



**AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN, CST-HFSS-
MATLAB YAZILIMLARI KARŞILAŞTIRMALI
ANTEN TASARIMI**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Mehmet İzzeddin GÜLER

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Muhammet Tahir GÜNEŞER**

**AKILLI ULAŖIM SİSTEMLERİ İÇİN, CST-HFSS-MATLAB
YAZILIMLARI KARŞILAŞTIRMALI ANTEN TASARIMI**

Mehmet İzzeddin GÜLER

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Muhammet Tahir GÜNEŞER**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıőtır**

**KARABÜK
Mayıs 2024**

Mehmet İzzeddin GÜLER tarafından hazırlanan “AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN, CST-HFSS-MATLAB YAZILIMLARI KARŞILAŞTIRMALI ANTEN TASARIMI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Muhammet Tahir GÜNEŞER
Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 03/05/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Hüseyin Şerif SAVCI (İMÜ)
Üye : Doç. Dr. Muhammet Tahir GÜNEŞER (KBÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Cihat ŞEKER (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mehmet İzzeddin GÜLER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN, CST-HFSS-MATLAB YAZILIMLARI KARŞILAŞTIRMALI ANTEN TASARIMI

Mehmet İzzeddin GÜLER

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Muhammet Tahir GÜNEŞER

Mayıs 2024, 100 sayfa

Bu çalışmada, akıllı ulaşım sistemlerinde kullanılmak üzere 5.74 GHz merkez frekansında E-şekilli yüksek performanslı, üretimi kolay ve kompakt bir mikroşerit anten tasarlanmıştır. Anten tasarımı sürecinde, CST Studio Suite, Ansys HFSS ve MATLAB PCB Antenna Designer gibi çeşitli benzetim ortamları kullanılarak farklı geometrik yapılar simüle edilmiş ve performansları değerlendirilmiştir. Her yazılımın farklı analiz yöntemleriyle analizleri yapılmış ve prototip üretimi yapılmış mikroşerit antene yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Örneğin prototip antenin S_{11} değeri CST Studio Suite ve Ansys HFSS yazılımlarıyla yakın sonuçlara sahiptir. Kazanç değerinde ise MATLAB PCB Antenna Designer yazılımı prototipe yakın sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Önerilen anten tasarımı, tüm bu benzetim ortamlarında aynı fiziksel parametreler kullanılarak geliştirilmiş, analiz edilmiş ve ardından LPKF ProtoMat S64 cihazıyla prototip olarak üretilmiştir. Anten prototipi için 1,6 mm kalınlığındaki FR-4 alüminyum kullanılmış ve besleme tekniği olarak 50 Ω 'luk mikroşerit

hat tercih edilmiştir. Önerilen anten geometrisi, literatürdeki benzer tasarımlara kıyasla daha küçük bir boyuta sahiptir ($35 \times 50 \times 1,6 \text{ mm}^3$). 5.74 GHz merkez frekansında elde edilen geri dönüş kaybı değeri -27,02 dB, Gerilim Duran Dalga Oranı (Voltage Standing Wave Ratio-VSWR) 1.14 ve kazanç değeri yaklaşık olarak 1.98 dBi olarak ölçülmektedir. Bu mikroşerit anten, arzu edilen frekans bandında kararlı ve tatmin edici bir performans sergilemektedir, bu nedenle taşıttan nesneye kablosuz haberleşme bandında kullanımı önerilmektedir. Bu bulgular, önerilen antenin akıllı ulaşım sistemleri uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılabilceğini desteklemektedir.

Anahtar Sözcükler : E-şekilli anten, Mikroşerit anten, Akıllı ulaşım sistemleri, 5.8 GHz bandı, CST Studio Suite, Ansys HFSS, Matlab PCB Antenna Designer, Anten tasarım optimizasyonu, Performans analizi

Bilim Kodu : 90521

ABSTRACT

Master Thesis

COMPARATIVE ANTENNA DESIGN FOR INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS IN CST-HFSS-MATLAB SOFTWARE

Mehmet İzzeddin GÜLER

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Electrical and Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Muhammet Tahir GUNESER

May 2024, 100 pages

In this study, an E-shaped high performance, easy to fabricate and compact microstrip antenna with a center frequency of 5.74 GHz is designed for use in intelligent transportation systems. During the antenna design process, different geometric structures were simulated and their performances were evaluated using various simulation environments such as CST Studio Suite, Ansys HFSS and MATLAB PCB Antenna Designer. Each software was analyzed with different analysis methods and it was observed that the results were close to the prototyped microstrip antenna. For example, the value of the prototype antenna has close results with CST Studio Suite and Ansys HFSS software. In the gain value, MATLAB PCB Antenna Designer software is observed to give results close to the prototype. The proposed antenna design was developed and analyzed using the same physical parameters in all these simulation environments and then fabricated as a prototype using the LPKF ProtoMat S64. For the antenna prototype, a 1.6 mm thick FR-4

substrate is used and a 50Ω microstrip line is chosen as the feeding technique. The proposed antenna geometry has a smaller size ($35 \times 50 \times 1.6 \text{ mm}^3$) compared to similar designs in the literature. At 5.74 GHz center frequency, the return loss is -27.02 dB, the Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) is 1.14 and the gain is approximately 1.98 dBi. This microstrip antenna exhibits stable and satisfactory performance in the desired frequency band, and is therefore recommended for use in the vehicle-to-object wireless communication band. These findings support that the proposed antenna can be successfully used in intelligent transportation systems applications.

Key Word : E-shaped antenna, Microstrip antenna, Intelligent transportation systems, 5.8 GHz band, CST Studio Suite, Ansys HFSS, Matlab PCB Antenna Designer, Antenna design optimization, Performance analysis

Science Code : 90521

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının tasarlanması, araştırılması, gerekleőtirilmesi ve hazırlanması surecinde desteklerini esirgemeyen, derin bilgi ve tecrubelerinden faydalandığım, rehberlik ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temellere dayandıran kıymetli danıőmanım Doç. Dr. Muhammet Tahir GÜNEŞER'e iten teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili anne ve babama manevi destekleri için, değerli eőime hiçbir fedakarlığı esirgemedен yoğun çalışma surecimde yanımda olduğu için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması kapsamında, KB BAP Koordinatrlėnden KBÜBAP-23-YL-093 kodlu projeyle destek alınmıştır.

Ayrıca tez çalıőmamda her türlü desteği sunan TAMARA Elektronik Limited Őirketine ve TRANTEN Elektronik Anonim Őirketine teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	Hata! Yer işareti tanımlanmamış. i
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	10
GENEL BİLGİLER	10
2.1. AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ	10
2.1.1. AUS'a Genel Bakış.....	10
2.1.2. AUS'un Tarihsel Gelişimi	11
2.1.3. AUS'a Duyulan İhtiyaç ve AUS'un Faydaları	13
2.1.4. AUS Uygulamalarında Kullanılan Teknolojiler ve Haberleşme Çeşitleri	13
2.1.4.1. Tahsis Edilmiş Kısa Mesafeli İletişim Teknolojisi (Dedicated-Short Range Communications-DSRC).....	14
2.1.4.2. Küresel Navigasyonlu Uydu Sisteminin Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması (Global Navigation Satellite System-GNSS).....	15
2.1.4.3. Taşıt Üstü Birimlerin (On-Boards Unit-OBU) Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması.....	16
2.1.4.4. Kablosuz Ağların Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması.....	16

2.1.4.5. Radyo Dalgası ve Kızılötesi İşaretlerin Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması	17
2.1.4.6. Yol Kenarı Kamera Tanıma Sisteminin Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması	17
2.2. ANTENLER	18
2.2.1. Antenlerin Çalışma Prensipleri	20
2.2.2. Anten Çeşitleri	20
2.2.2.1. Tel Antenler	20
2.2.2.2. Boynuz (Horn) Antenler	21
2.2.2.3. Dizi Antenler	21
2.2.2.4. Yansıtıcı Antenler	22
2.2.2.5. Lens Antenler	22
BÖLÜM 3	24
MİKROŞERİT ANTENLER	24
3.1. MİKROŞERİT ANTENLERİN GENEL YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ	25
3.2. MİKROŞERİT ANTENLERİN ÖNEMLİ PARAMETRELERİ	27
3.2.1. Geri Dönüş Kaybı (S₁₁ parametresi)	27
3.2.2. Gerilim Duran Dalga Oranı (Voltage Standing Wave Ratio-VSWR)	27
3.2.3. Yönlülük ve Kazanç	28
3.2.4. Verim ve Kalite Faktörü	28
3.2.5. Bant Genişliği	29
3.3. MİKROŞERİT ANTEN ÇEŞİTLERİ	29
3.3.1. Mikroşerit Yama Antenler	30
3.3.2. Mikroşerit Yarık Antenler	31
3.3.3. Mikroşerit Dipol Antenler	32
3.3.4. Mikroşerit Yürüyen Dalga Antenler	33
3.4. MİKROŞERİT ANTENLERDE KULLANILAN BESLEME TEKNİKLERİ	34
3.4.1. Mikroşerit İletim Hatlı Besleme	36
3.4.2. Koaksiyel Besleme	38

	<u>Sayfa</u>
3.4.3. Açıklık Kuplajlı Besleme	39
3.4.4. Yakınlık Kuplajlı Besleme	40
3.4.5. Mikroşerit Antenlerde Kullanılan Alternatif Besleme Teknikleri.....	41
3.5. MİKROŞERİT ANTENLERDE KULLANILAN ANALİZ YÖNTEMLERİ	42
3.5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method-FEM)	42
3.5.2. Moment Yöntemi (Method of Moment-MoM)	45
3.5.3. Sonlu İterasyon Yöntemi (Finite Integration Technique -FIT)	47
3.5.4. Zaman Domainde Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain-FDTD)	50
3.5.5. İletim Hattı Matrisi Yöntemi (Transmission Line Matrix Method-TLM)	52
BÖLÜM 4	55
MATERYAL VE YÖNTEMLER	55
4.1. DİELEKTRİK MALZEME SEÇİMİ.....	55
4.1.1. Rogers RT/Duroid 5880	55
4.1.2. Rogers 4003C	55
4.1.3. FR4	56
4.2. MİKROŞERİT ANTEN TASARIMINDA KULLANILAN ÖNE ÇIKAN YAZILIMLAR	57
4.2.1. CST Studio Suite	57
4.2.2. Ansys HFSS.....	58
4.2.3. MATLAB PCB Antenna Designer.....	59
4.3. MİKROŞERİT ANTEN ÜRETİM TEKNİKLERİ VE ÖLÇME YÖNTEMLERİ	60
4.3.1. Baskı Devre Üretimi	60
4.3.2. Vektör Ağ Analizörü	61
4.3.3. Konnektör	62
BÖLÜM 5	64
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	64

Sayfa

5.2. CST STUDIO SUITE YAZILIMIYLA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ	69
5.3. MATLAB PCB ANTENNA DESIGNER YAZILIMIYLA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ.....	72
5.4. ANSYS HFSS YAZILIMIYLA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ.....	75
5.5. FR4 MALZEMEYLE ÜRETİMİ YAPILAN ANTENİN ANALİZİ	78
5.6. YAZILIMLARIN VE ÜRETİMİ YAPILAN ANTENİN ANALİZLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	82
5.7. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALARLA KARŞILAŞTIRMA	85
BÖLÜM 6	87
SONUÇLAR	87
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Akıllı ulaşım sistemleri uygulamaları[52]	11
Şekil 2. 2. IoV teknolojileri [63]	14
Şekil 2. 3. Kaynaktan elektromanyetik dalgalarla iletim yapan sistem	18
Şekil 2. 4. Antenin iletim hattının Thevenin Eşdeğer Devresi.....	19
Şekil 2. 5. Tel Antenler; (a) Dipol Anten, (b) Monopol Anten (c) Dairesel Halka Anten, (d) Heliksel Anten [71]	21
Şekil 2. 6. Boynuz (Horn) Antenler; (a) Dikdörtgen Açıklı Piramit Boynuz, (b) Dairesel Açıklı Konik Boynuz, (c) Dikdörtgen Dalga Kılavuzu [71]	21
Şekil 2. 7. Dizi anten çeşitleri; (a) Yagi-Uda Dizi Anteni, (b) Dikdörtgen Dalga Kılavuzu Dizi Anteni, (c) Mikroşerit Yamalı Dizi Anteni ve (d) Slotlu Dalga Kılavuzu Dizi Antenleri [71].....	22
Şekil 2. 8. $n < 1$ olan Lens Antenler; (a) iç bükey- düz, (b) iç bükey- iç bükey (c) iç bükey dış bükey [71].....	23
Şekil 2. 9. $n > 1$ olan Lens Antenler; (a) dış bükey-düz, (b) dış bükey-dış bükey (c) dış bükey-iç bükey [71]	23
Şekil 3. 1. Mikroşerit Anten Geometrileri	24
Şekil 3. 2. Dikdörtgen Mikroşerit antenlerin genel yapısı	26
Şekil 3. 3. Mikroşerit Yama (Patch) anten geometrileri	30
Şekil 3. 4. Dikdörtgen şekilli mikroşerit antenin ışınma örneği	31
Şekil 3. 5. Mikroşerit yarık anten geometrisine örnek	32
Şekil 3. 6. Mikroşerit dipol anten örneği	33
Şekil 3. 7. Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme teknikleri.....	35
Şekil 3. 8. İletim hatlı mikroşerit anten.....	37
Şekil 3. 9. (a) içe girintili, (b) çeyrek dalga dönüşümlü, (c) kenar bağlantılı	38
Şekil 3. 10. Koaksiyel hatlı mikroşerit anten	39
Şekil 3. 11. Açıklık kuplajlı mikroşerit anten	40
Şekil 3. 12. Yakınlık kuplajlı mikroşerit anten	41
Şekil 4. 1. (a) bakır kaplanmamış FR4 (b) bakır kaplanmış FR4	57
Şekil 4. 2. CST kullanıcı ara yüzü.....	58
Şekil 4. 3. HFSS kullanıcı ara yüzü	59
Şekil 4. 4. MATLAB PCB Antenna Designer kullanıcı ara yüzü	60

Sayfa

Şekil 4. 5. LPKF ProtoMat S64 freze makinesi	61
Şekil 4. 6. Rohde & Schwarz ZNH26 vektör ağ analizörü	62
Şekil 4. 7. SMA 180C dışı konnektör	63
Şekil 4. 8. SMA 180C dışı konnektörle lehimlenmiş mikroşerit anten	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 5. 1. Anten modelleme ve tasarım aşamalarında izlenen akış diyagramı.....	64
Şekil 5. 2. Birinci prototip.....	65
Şekil 5. 3. Birinci prototipin S11 değeri	66
Şekil 5. 4. İkinci prototip	67
Şekil 5. 5. İkinci prototipin S11 değeri.....	68
Şekil 5. 6. Üçüncü prototip	68
Şekil 5. 7. Üçüncü prototipin S11 değeri.....	69
Şekil 5. 8. CST Studio Suite yazılımıyla elde edilmiş S11.....	70
Şekil 5. 9. CST Studio Suite yazılımıyla elde edilmiş VSWR.....	71
Şekil 5. 10. CST Studio Suite yazılımıyla elde edilmiş ışıma örüntüsü	71
Şekil 5. 11.CST Studio Suite yazılımıyla elde edilmiş kazanç	72
Şekil 5. 12.MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla elde edilmiş S11 grafiği	73
Şekil 5. 13. MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla elde edilmiş kazanç.....	74
Şekil 5. 14. MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla elde edilmiş ışıma örüntüsü.....	74
Şekil 5. 15.MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla elde edilmiş VSWR grafiği.....	75
Şekil 5. 16. ANSYS HFSS yazılımıyla elde edilmiş S11 grafiği	76
Şekil 5. 17. ANSYS HFSS yazılımıyla elde edilmiş VSWR grafiği	77
Şekil 5. 18. Ansys HFSS yazılımıyla elde edilmiş ışıma örüntüsü.....	77
Şekil 5. 19. ANSYS HFSS yazılımıyla elde edilmiş kazanç	78
Şekil 5. 20. Rohde & Schwarz ZNH26 cihazında S11 grafiği	79
Şekil 5. 21. FR4 malzemeyle üretimi yapılmış antenin S11 grafiği.....	80
Şekil 5. 22.FR4 malzemeyle üretimi yapılmış antenin VSWR grafiği.....	80
Şekil 5. 23. FR4 malzemeyle üretimi yapılmış antenin kazancı	81
Şekil 5. 24. Mikroşerit antenin kazanç ölçme düzeneği.....	82
Şekil 5. 25. S11 grafiklerinin karşılaştırılması	83
Şekil 5. 26. VSWR grafiklerinin karşılaştırılması	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. Tahsis Edilmiş Kısa Mesafeli İletişim Teknolojisinin (DSRC) Özellikleri	15
Çizelge 3. 1. Mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları.....	25
Çizelge 3. 2. Mikroşerit antenlerin karşılaştırılması	34
Çizelge 3. 3. Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme tekniklerinin karşılaştırılması	36
Çizelge 5. 1. Birinci prototipin boyutları	65
Çizelge 5. 2. İkinci prototipin boyutları	67
Çizelge 5. 3. Üçüncü prototipin boyutları.....	69
Çizelge 5. 4. Karşılaştırmalı kazanç değeri.....	84
Çizelge 5. 5. Literatürdeki antenlerde karşılaştırma	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- Z_g : İletim hattı empedansı
 X_A : Işıma reaktansı
 R_r : Işıma direnci
 R_L : Dielektrik ve iletim kayıpları
 Z_L : Yük empedansı
 λ_0 : Serbest uzay dalga boyu
 Γ : Yansıma katsayısı
 G : Kazanç
 e : Verimlilik
 D : Yönlülük
 F : Frekans
 ΔL : Elektriksel genişleme
 ϵ_r : Dielektrik sabiti
 t : Yama yüksekliği
 h : Dielektrik malzemenin kalınlığı
dB: : Desibel
dBi : Desibel izotropik

KISALTMALAR

AUS	: Akıllı Ulaşım Sistemleri
KHz	: Kilohertz
GHz	: Gigahertz
MHz	: Megahertz
WAVE	: Wireless Access in Vehicular Environments (Taşıt Ortamlarında Kablosuz Erişim)
Wi-Fi	: Wireless Fidelity (Kablosuz Ağ Protokolü)
FR4	: Flame Retardant Type-4 (Alev Geciktirici Tip-4)
CST Studio Suite	: Computer Simulation Technologies Microwave Studio (Bilgisayar Simülasyon Teknolojileri Mikrodalga Modülü)
Ansys HFSS	: High Frequency Structural Simulator (Yüksek Frekans Yapı Simülatörü)
RFID	: Radio-Frequency Identification (Radyo Frekanslı Tanımlama)
IoT	: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
MATLAB	: Matrix Laboratory (Matris Laboratuvarı)
WiMAX	: Worldwide Interoperability for Microwave Access (Dünya Çapında Birlikte İşleyen Mikrodalga Erişimi)
WLAN	: Wireless Local Area Network (Kablosuz Yerel Alan Ağı)
DSRC	: Dedicated Short-Range Communications (Tahsis Edilmiş Kısa Mesafeli İletişim Teknolojisi)
HGS	: Hızlı Geçiş Sistemi
PTFE	: Poli Tetra Flor Etilen
5G	: Beşinci nesil mobil haberleşme
UWB	: Ultra-Wideband (Çok Geniş bantlı)
OBU	: On-Boards Unit (Taşıt Üstü Birimler)
RSU	: Road Side Unit (Yol Kenarı Birimleri)
V2X	: Taşıttan Her Şeye

V2V	: Taşıttan Taşıta
V2I	: Taşıttan Altyapıya
V2H	: Taşıttan İnsana
GSM	: Global System for Mobile Communications (Mobil İletişim için Küresel System)
S_{11}	: Geri Dönüş Kaybı
ISM	: Industrial, Scientific and Medical (Bilimsel, Endüstriyel ve Tıbbi)
WiMAX	: Worldwide Interoperability for Microwave Access (Kablosuz Geniş Bant Haberleşme Standartı)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IoV	: Taşıtların İnterneti
VSWR	: Gerilim Duran Dalga Oranı (Voltage Standing Wave Ratio)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
VANET	: Vehicular Ad Hoc Networks (Taşıtsal Ağlar)
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems (Küresel Uydu Konum Belirleme Sistemleri)
WiBro	: Wireless Broadband (Geniş bant kablosuz internet teknolojisi)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
MoM	: Method of Moment (Moment Yöntemi)
FIT	: Finite Integration Technique (Sonlu İterasyon Yöntemi)
FDTD	: Finite Difference Time Domain (Zaman Domainde Sonlu Farklar Yöntemi)
TLM	: Transmission Line Matrix Method (İletim Hattı Matrisi Yöntemi)
VNA	: Vector Network Analyzer; Vektör Ağ Çözümleyicisi
PCB	: Baskılı Devre Kartı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Akıllı Ulaşım Sistemleri, günümüzde trafik yönetimi, taşıt iletişimi ve sürücü destek sistemleri gibi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için güvenilir ve yüksek performanslı iletişim cihazları gerekmektedir. Bu bağlamda, antenlerin tasarımı ve optimizasyonu, haberleşmeyi etkileyen bir faktördür. Bu tez çalışmasında, antenin kazancı, bant genişliği ve VSWR üzerinde yapılan analizler, üretimi yapılmış mikroşerit antenle karşılaştırılmış ve üretimi yapılan antene en yakın sonucu veren yazılım belirlenecektir. Bu çalışma, Akıllı Ulaşım Sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirilen antenlerin tasarımı ve analizi konusunda literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Anten tasarımı alanında, CST, HFSS ve MATLAB gibi simülasyon yazılımlarının karşılaştırmalı analizi oldukça değerlidir çünkü her bir yazılımın avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışma, farklı yazılımların kullanımının anten tasarımı sürecine nasıl etki ettiğini ve hangi durumlarda hangi yazılımın daha uygun olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, tezde sunulan karşılaştırmalı anten tasarımı, Akıllı Ulaşım Sistemlerinin iletişim ihtiyaçlarını karşılamak için optimize edilmiş bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma, akademik ve endüstriyel alanda anten tasarımı üzerine çalışan araştırmacılar için değerli bir referans kaynağı olacağı düşünülmektedir. Son olarak, mikroşerit antenlerin analizinde yaygın olarak kullanılan Ansys HFSS ve CST Studio Suite yazılımlarına ek olarak Matlab PCB Antenna Designer yazılımıyla da mikroşerit antenin analiz edilmesi, literatürde MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla yapılmış çalışmanın az olması sebebiyle bu tez çalışmasının özgünlüğünü artırmaktadır. Bu amaç doğrultusunda tezin bölümleri aşağıdaki gibi organize edilmiştir.

Girişi takip eden ikinci bölümde akıllı ulaşım sistemlerinde hakkında bilgiler verilmektedir. Bu kapsamda akıllı ulaşım sistemlerine genel bilgilendirme yapılmaktadır. Ardından, akıllı ulaşım sistemlerinin tarihsel gelişimi göz önüne

alınarak, geçmişten günümüze ulaşımın nasıl dönüştüğü ve bu dönüşümde akıllı sistemlerin rolü ele alınmaktadır. Ayrıca akıllı ulaşım sistemlerine duyulan ihtiyaç ve faydaları incelenmektedir, bu da günümüzdeki trafik sorunları, çevresel etkiler ve ekonomik faydalar gibi konuları içermektedir. Son olarak, akıllı ulaşım sistemlerinde kullanılan teknolojiler üzerinde durulmaktadır; bu kapsamda, tahsis edilmiş kısa mesafeli iletişim teknolojisi, küresel navigasyonlu uydu sistemi, taşıt üstü birimler, kablosuz ağlar, radyo dalgası ve kızılötesi işaretler, yol kenarı kamera tanıma sistemlerinin akıllı ulaşım sistemlerindeki rolü ve bu teknolojilerin ulaşım sistemlerini nasıl daha etkin ve verimli hale getirdiği detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Bu kısımda son olarak antenlerin çalışma prensibinden, anten çeşitlerinden (tel antenler, boynuz antenler, dizi antenler, yansıtıcı antenler, lens antenler) bahsedilmektedir.

Üçüncü bölümde ise mikroşerit antenlerin genel yapısı hakkında bilgiler verilmektedir. Ardından mikroşerit antenlerin önemli parametreleri (geri dönüş kaybı, gerilim duran dalga oranı, yönlülük ve kazanç, verim ve kalite faktörü, bant genişliği), mikroşerit anten çeşitleri (yama, yarık, dipol, yürüyen dalga), mikroşerit antenlerde kullanılan besleme teknikleri (iletim hatlı besleme, koaksiyel besleme, açıklık kuplajlı besleme, yakınlık kuplajlı besleme ve alternatif besleme yöntemleri), ve mikroşerit antenlerde kullanılan analiz yöntemlerinden (sonlu elemanlar yöntemi, moment yöntemi, sonlu iterasyon yöntemi, zaman domainde sonlu farklar yöntemi, iletim hattı matrisi yöntemi) bahsedilmektedir.

Dördüncü bölümde ise mikroşerit antenin alttaşındaki kullanılacak dielektrik malzeme ve mikroşerit anten tasarımı ve analizinde kullanılacak yazılımlar hakkında bilgiler verilmektedir. Ardından tasarımı yapılan mikroşerit antenin prototipinin üretilmesinde kullanılacak cihaz ve malzemelerden bahsedilmektedir.

Beşinci bölümde ilk olarak tasarımı ve üretimi yapılmış mikroşerit antenin iyileştirme adımlarından bahsedilmektedir. Ardından CST Studio Suite, Ansys HFSS, Matlab PCB Antenna Designer yazılımıyla mikroşerit antenin analiz sonuçlarından ve FR4 malzemeyle prototip üretimi yapılmış mikroşerit antenin çıktılarından bahsedilmektedir. Yazılımlardan ve prototipten elde edilmiş S_{11} , gerilim duran dalga oranı ve kazanç değerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Son olarak literatürdeki mikroşerit antenlerle tezde önerilen mikroşerit antenin boyut, frekans bandı, bant genişliği, kazancı, alttaşı ve prototip üretiminin yapılıp yapılmaması parametreleri baz alınarak karşılaştırılması yapılmıştır.

Altıncı ve son bölümde önerilen antenin 5.8 GHz merkez frekansında çalışan Akıllı Ulaşım Sistemlerinde V2V ve V2I iletişimde, otomatik ücret toplama ve otomatik geçiş kontrolü uygulamalarında kullanılabileceği belirlenmiş ve FR4 malzeme ile üretimi yapılmış mikroşerit antene en yakın sonucu veren yazılım belirlenmiştir.

Bu tez kapsamında mevcut çalışmaya yakın çalışmalar incelendiğinde elde edilen literatür özeti aşağıda sunulmuştur.

B. R. Franciscatto ve arkadaşları 2012 yılında DSRC için 5.8 GHz merkez frekanslı mikroşerit anten önermiştir. Önerilen anten 5.8 GHz'de 230 MHz bant genişliğine ve -23 dB'lik geri dönüş kaybına sahiptir [1].

Jaswinder Kaur ve arkadaşları 2014 yılındaki çalışmada WLAN/ Bluetooth/ ISM/ WiMAX/ IMT/ AUS uygulamalarını kapsayacak şekilde, 35x30 mm² boyutlarında mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır [2].

Tomoya Ijiguchi ve arkadaşları 2014 yılında DSRC uygulamaları için önerdikleri anten, 22.6 mm x 22.6 mm x 6.93 mm boyutlarında olup 5.82-6.58 GHz frekans aralığında maksimum 12 dB geri dönüş kaybına sahiptir [3].

2015 yılında Bathula Lakshmi Narayana ve arkadaşı Rogers/RT Duroid 5870 alttaşında, çoklu bant uygulamaları için tasarladıkları anten 5.8 GHz merkez frekansında yaklaşık 10MHz bant genişliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir [4].

Hang Wong ve arkadaşları 2016 yılında V2V ve WLAN iletişimi için V şeklinde bir yamaya sahip tek kutuplu bir mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır. Simülasyonunu ve üretimini yaptıkları anten, 4.82- 6.67 GHz aralığında çalışmaktadır [5].

Tiago Varum ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada merkez frekansı olan 5.8 GHz'de yaklaşık -30 dB'lik geri dönüş kaybına sahip mikroşerit antenin simülasyon sonuçlarını elde etmişler ve antenin tasarımı yapmışlardır. Prototipi üretilen antenin S_{11} ölçümleri yapıldığında ise merkez frekansı 5.9 GHz olarak ölçülmüş ve 358 MHz bant genişliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Simülasyonunu ve ölçümlerini yaptıkları antenin DSRC frekanslarını kapsayan bant genişliğine sahip olduğunu ifade etmişlerdir [6].

Tiago Varum ve arkadaşları yine aynı yıl yaptıkları çalışmada ise 1 GHz bant genişliğine sahip DSRC uygulamaları için dizi anten tasarımı ve simülasyonu yapmışlardır [7].

Nipont Tangthong ve arkadaşları 2016 yılındaki çalışmalarında WLAN/WiMAX uygulamaları için üç bantlı slot anten tasarımı sunmuşlardır. Ölçüm sonuçları, 2.5, 3.5 ve 5.5 GHz bandında IEEE 802.11b/g/a ve IEEE 802.16e standartlarını desteklediğini kanıtlamaktadır [8].

Ayyappan M ve arkadaşları 2016 yılındaki çalışmalarında RT/Duroid 5880 cam mikro elyafla güçlendirilmiş PTFE kompozit alt tabaka malzemesi üzerine tasarımı yapılmış 5.8 GHz merkez frekansına sahip anten yüksek veri hızına sahip gömülü uygulamalar için uygun olduğu belirtilmiştir. Antenin üretimi yapılmamıştır [9].

Ankang Liu ve arkadaşlarının 2017 yılındaki çalışmalarında 5.9 GHz merkez frekansında 1.7 dBi kazançta sahip mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır. DSRC uygulamalarında kullanılacağını ifade etmişlerdir [10].

Tapas Mondal ve arkadaşlarının 2017 yılındaki çalışmasındaki mikroşerit antenin boyutları 47.7 x 58.2 mm²'dir. Merkez frekansı 5.3 GHz olan anteni HFSS yazılımında simüle ettikleri ve WLAN IEEE 802.11a frekans bandında, V2V uygulamalarında, WiMAX IEEE 802.16 frekans bandında ve DSRC uygulamalarını kapsamakta ve bu uygulamalar için kullanılabileceği ifade edilmiştir [11].

2017 yılında Sayed Amirul Hassan ve arkadaşlarının IoT uygulamalarında kullanmak üzere 3.5/5.8 GHz merkez frekansında tasarladıkları anteni CST ve HFSS yazılımlarında karşılaştırmışlardır [12].

2018 yılında Younes El Hachimi ve arkadaşlarının RFID okuyucu uygulamalarında kullanmak üzere tasarladıkları anten çalışmasını CST ve HFSS yazılımlarını kullanarak analiz etmişler ve 2.45 GHz- 5.8 GHz merkez frekanslarına sahip mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır. Aynı şekilde tasarımı yapılmış antenin üretimini yapmamışlardır [13].

Haixiong Li ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptığı çalışma incelendiğinde 70x44 mm boyutlarındaki 2.50 ve 5.80 GHz merkez frekansında çift banta sahip antenin simülasyonunu HFSS yazılımında yapmışlar ve üretimini yaptıkları anten ile karşılaştırmışlardır [14].

2019 yılında C. Divya ve arkadaşları FR4 alttaşına sahip, CST Studio Suite benzetim ortamında tasarımı yaptıkları anten endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamalarda

kullanılmak üzere yaklaşık 100 MHz bant genişliği elde etmişlerdir. Tasarımı yapılmış anteni üretmemişlerdir [15].

2019 yılında Stefano Maddio ve arkadaşları DSRC protokolüne göre HGS'yi mümkün hale getirecek hem de IEEE 802.11p standardına göre taşıt iletişimleri için düşük gecikmeli Wi-Fi haberleşmesini mümkün kılacak bir mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır [16].

Manoj Kumar ve arkadaşları da 2019 yılında IoT, 5G, AUS, WLAN ve RFID uygulamalarında kullanılmak üzere merkez frekansı 5.8 GHz olan mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonunu yaptıkları mikroşerit antenin 2.67 GHz bant genişliğine ve 3dBi kazanç değerine sahip olduğunu raporlamışlardır [17].

Pradeep Singh ve arkadaşlarının 2019 yılındaki çalışmalarında AUS uygulamaları için 5.83 GHz merkez frekansında ve yaklaşık -35 dB'lik geri dönüş kaybı ile 5.71 GHz'den 5.94 GHz'e kadar bir bant genişliğine sahip mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır. Antenin prototip baskısı bulunmamaktadır [18].

Adnan Basir Patwary ve arkadaşları 2019 yılında yalnızca simülasyonunu gerçekleştirdikleri çift beslemeli mikroşerit anten 5.8 GHz merkez frekansında kazancı 6.88 dBi, geri dönüş kaybı ise -25dB'dir [19].

V. Renuga Kanni ve arkadaşları 2019 yılında önerdikleri anteni Ansys HFSS yazılımında simüle etmişler ve prototipini yaptıkları antenle karşılaştırmışlardır. Önerdikleri antenin V2V bandında (5.85 GHz - 5.925 GHz) çalıştığını DSRC uygulamaları için uygun olduğunu belirtmişlerdir [20].

Nur A. A. Rahman ve arkadaşları 2019 yılında V2X uygulamaları için iki çift tamamlayıcı dipole dayalı kompakt bir DSRC mikroşerit anten önermişlerdir. Merkez frekansı 5.9 GHz olan 5.850 ile 5.925 GHz arasındaki frekans bandında çalışan anten, AUS/ 5G/ OBU/ V2X uygulamalarına uygundur [21].

Keerthana Sathiamoorthy ve arkadaşları 2019 yılında tasarımını yaptıkları altıgen yama anteni Ansys HFSS yazılımında simüle etmişler ve DSRC uygulamaları için kullanılan 5.85 GHz-5.925 GHz bandını kapsayacak şekilde merkez frekansı 5.9 GHz'de bant genişliği 343 MHz mikroşerit anteni önermişlerdir [22].

2020 yılında Dhirgham Kamal Najinin yaptığı çalışmada WiMAX ve WLAN uygulamaları için çift bantlı anten tasarımı gerçekleştirmiştir. Önerilen anteni CST HFSS yazılımlarında analiz etmiş ve üretimini yaptığı prototip antenle karşılaştırmıştır [23].

2020 yılında Lukman Medriavin Silalahi ve arkadaşlarının Wi-Fi uygulamalarında kullanmak için FR4 plaka üzerine, CST Studio Suite benzetim ortamında, 5.8 GHz merkez frekansında 1.02 GHz bant genişliğine sahip mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır [24].

Susamay Samanta ve arkadaşları 2020 yılında yayınladıkları çalışmalarında tasarımını ve simülasyonunu yaptıkları OBU mikroşerit anteni 5.8 GHz merkez frekansında DSRC uygulaması için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Önerilen OBU anteni simülasyon ortamında araba modelinin çatısına entegre etmişlerdir. Bu sayede araba gibi büyük bir elektromanyetik nesnenin antenin performansı üzerindeki etkisini incelemişler ve AUS uygulamasındaki performansını analiz etmişlerdir [25].

Jimi Prasojo ve arkadaşları 2020 yılında V2X iletişim uygulamaları için 50 mm x 50 mm x 1.6 mm boyutlarında altıgen şekilde mikroşerit anten önermişlerdir. HFSS yazılımında simülasyonu yapılan anten 5.9 GHz merkez frekansında 400 MHz bant genişliğine sahiptir [26].

2020 yılında Hritik Singhal ve arkadaşları IEEE 802.11p standardında V2V uygulamaları için tasarımını gerçekleştirdikleri mikroşerit anten 5.9 GHz merkez frekansında 200 MHz bant genişliğine sahiptir [27].

Ashwani Sharma ve arkadaşları 2021 yılında AUS uygulaması için önerdikleri antenle RSU ve OBU arasındaki kablosuz iletişimi sağlamayı amaçlamışlardır [28].

2021 yılında Akash Modi ve arkadaşları Rogers RT/Duroid5880 alttaşıda tasarladıkları multiband anteni Ansys HFSS benzetim ortamında analiz etmişler ve 5.8 GHz bandında 2.17 GHz bant genişliğine sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Ancak tasarımı yapılmış antenin üretimini gerçekleştirmemişlerdir [29].

2021 yılının ikinci yarısında çıkan MATLAB'ın Toolboxu olan PCB Antenna Designer Toolbox'ı sayesinde MATLAB benzetim ortamında mikroşerit anten tasarımı yapmak ve sonuçlarını gözlemlemek mümkün olmuştur. 2022 yılında Khatri

Kumar ve arkadaşları Matlab PCB Antenna Designer Toolbox'ında yapılan çalışmalara bir örnek olarak gösterilebilmektedir [30].

Sabari Prasad M ve arkadaşları 2021 yılında V2I haberleşmeyi mümkün hale getirecek 5.8 GHz merkez frekansına ve 5.6 mm kalınlığa sahip mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır. İlgili tasarımın sonuçlarını Ansys HFSS yazılımında simüle etmişlerdir [31].

2022 yılında Jogesh Chandra Dash Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) uygulamalarında kullanılmak üzere 5.9 GHz (5.855 5.925 Hz), IEEE 802.11p / WAVE teknolojisi bandında bir mikroşerit yama tasarımı yapmıştır. Anten 93 MHz (5.850 5.944 Hz) bant genişliğine sahip olup 5.9 GHz çalışma frekansında 5.63 dBi kazanç değerine sahiptir [32].

Gurney Nga ve arkadaşları 2022 yılındaki çalışmalarında IoT, 5G ve RFID uygulamaları için 36mm × 32mm × 1.6mm'lik kompakt UWB mikroşerit yama anten önerilmişler, simüle etmişler fakat prototip karşılaştırması yapmamışlardır. Önerilen anten, 5.12 GHz ile 6.44 GHz frekans aralığını kapsamaktadır. Önerilen anten, 5G uygulamaları için uygun maliyetli bir aday haline getiren FR4 alt tabakasına sahiptir. Simülasyon sonuçlarından 3.51 dBi kazanç ile 5.3 dBi yönlülük elde edilmiştir [33].

Allam M. Ameen ve arkadaşları 2022 yılında 5G uygulamaları için 2.86 GHz–7.68 GHz frekans bandında çalışan geniş bantlı kompakt köpekbalığı yüzgeci anteni tasarımı yapmışlardır. Antenin üretimini de gerçekleştirip S_{11} ve kazanç değerlerini de ölçmeleri gelecek çalışmalara ışık tutmaktadır [34].

Daasari Surender ve arkadaşlarının 2022 yılında önerdikleri antenin bant genişliği (3.32–3.59 GHz) ve (5.58–5.99 GHz) aralığındadır. Anten, düşük ve yüksek çalışma frekanslarında sırasıyla 6.41 dBi ve 5.01 dBi kazançta sahip olduğu simülasyon ortamında elde edilmiş ve prototip ölçümleri sonucunda 6.2 dBi ve 5.04 dBi kazanç değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir [35].

Yuqiang Zhang ve arkadaşlarının 2022 yılında önerdikleri anten, 5.08 GHz ile 6.25 GHz arasında 12.34 dBi tepe kazancına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu da önerilen antenin WLAN ve V2V iletişimlerinde uygulanabileceği anlamına gelmektedir [36].

Liton Chandra Paul ve arkadaşlarının 2022 yılındaki çalışmalarında 6 GHz altı bant uygulaması için çok yönlü, geniş bantlı bir yama anteni önerilmiştir. Antenin performansı geniş frekans aralığına (3.6959- 6.8939 GHz) sahiptir ve -33.235 dB'lik geri dönüş kaybına sahiptir. Ayrıca simülasyon sonuçları CST yazılımında yapılan mikroşerit anten 5.11 GHz merkez frekansında 3.342 dBi kazanç değerine sahiptir [37].

Husnu Yalduz ve arkadaşları 2023 yılında yayınladıkları çalışmada, GSM/ WLAN/ WiMAX/ DSRC/ X-band uygulamalarında kullanılmak üzere mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır. Simülasyonunu CST Studio Suite yazılımında yaptıkları antenin 5.8 GHz'de 2.50 dBi kazanç değerine sahiptir [38].

Waqas Ali ve arkadaşları 2024 yılındaki çalışmalarında çeşitli kablosuz uygulamalar için tasarlanmış $25 \times 40 \times 1,5$ mm³ boyutlarında dört bantlı mikroşerit anten sunmuşlardır. Bu anten, S-bandında (2.2 GHz), kablosuz yerel alan ağında (WLAN) (5.7 GHz), mikrodalga RFID frekans bandında (5.8 GHz) ve X-bandında (7.7 GHz ve 8.3 GHz) çalışabilmektedir [39].

Sagiru Gaya ve arkadaşlarının 2024 yılındaki Taşıtların İnterneti (IoV) uygulamaları için önerdikleri çalışmada 4.1, 4.7, 5.0 ve 5.7 GHz frekanslarında rezonansa giren ve tepe kazancı 4.2 dBi olan bölümlü yama anteni tasarımı yapmışlardır [40].

Bahsedilen çalışmalara ek olarak 5.8 GHz merkez frekansına sahip mikroşerit anten çalışmaları bulunmaktadır [41–48]. Mikroşerit antenlerle ilgili yapılmış çalışmalar incelendiğinde akıllı ulaşım sistemlerinde veya farklı uygulamalarda kullanılmak üzere birçok 5.8 GHz merkez frekansa sahip mikroşerit anten tasarımı yapıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca CST-HFSS yazılım karşılaştırılması yapıldığı çalışmalarda mevcuttur [49–51]. Fakat CST, HFSS ve MATLAB PCB Antenna Designer yazılımlarının karşılaştırıldığı çalışmalara rastlanmamıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasında akıllı ulaşım sistemleri için önerilen anten, üç yazılımda analizleri yapılmış ve anten prototipinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, KBÜ BAP Koordinatörlüğünden KBÜBAP-23-YL-093 kodlu projeye destek alınmıştır. Aşağıda bilgileri bulunan bilimsel makale WoS

indeksinde Q1 düzeyinde taranan Mathematics isimli dergide 2024 tarihli 12(8) sayı'da 16 sayfa olarak yayınlanmıştır

“Efficient 5.8 GHz Microstrip Antennas for Intelligent Transportation Systems: Design, Fabrication, and Performance Analysis”
<https://doi.org/10.3390/math12081202>

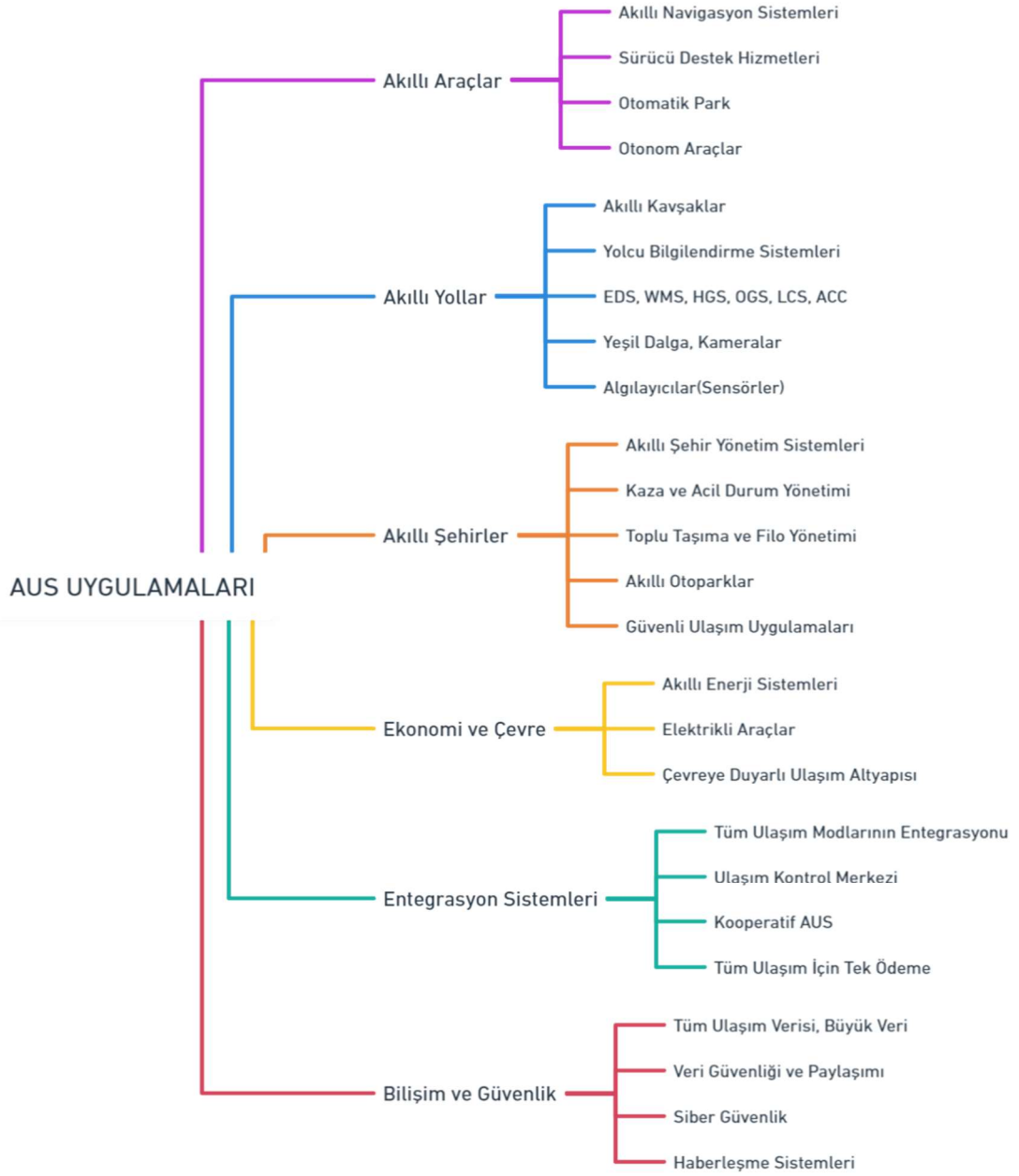
BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1. AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ

2.1.1. AUS'a Genel Bakış

AUS; seyahat süresinin ve çevreye verilen olumsuz etkinin azaltılması, trafik güvenliğinin artırılması, mevcut yolların ve enerjinin verimli kullanılması gibi amaçlar doğrultusunda geliştirilen sürücü, taşıt, altyapı arasında veri alışverişiyle izleme, ölçme, analiz ve kontrol mekanizmalarını içeren sistemler olarak özetlenebilmektedir. Ek olarak araçlarda elektronik ödeme yöntemlerinin hayata geçirilmesinde, toplu taşıma, nakliye ve diğer filo uygulamalarının kontrol süreçlerinde ve politika oluşturma süreçlerinde de AUS'a ihtiyaç duyulmaktadır. AUS, haberleşme ve bilgi teknolojilerini entegre bir şekilde kullanarak ulaşımda yaşanan sorunları en aza indirmeyi hedeflemektedir. Şekil 2.1'de gösterilen T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığının "Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi" ve 2020-2023 Eylem Planında da belirtildiği gibi Akıllı Ulaşım Sistemleri Uygulamaları ulaşımın her alanında trafiğin optimize edilmesine, kazaların ve trafik sıkışıklığının giderilmesine olanak sağlamaktadır [52]. Bu sayede enerji tasarrufu sağlanması ve ulaşımda verimliliğin artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca sosyal ve ekonomik yapıları geliştirebilmesi nedeniyle AUS, yeni endüstriler ve pazarlar oluşturma potansiyeline de sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 1. Akıllı ulaşım sistemleri uygulamaları[52]

2.1.2. AUS'un Tarihsel Gelişimi

Gelişmiş ülkeler, 20. yüzyılın sonlarından itibaren, AUS'u benimseyerek kazaları azaltmayı, trafik sıkışıklığını önlemeyi ve ulaşım maliyetlerini düşürmeyi hedeflemişlerdir. Bu sistemler, mevcut altyapının verimliliğini artırmak ve modern toplumun gereksinimlerine uygun bir çözüm sunmak amacıyla geliştirilmiştir.

Örneğin, ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC), 1999 yılında DSRC tabanlı otonom taşıma uygulamaları için 5,9 GHz bandında 75 MHz'lik bir spektrum tahsis etmiştir. Bu tahsisten sonra ASTM, E2213-03 standardını 2003 yılında tamamlamıştır. ASTM E2213-03'ün paydaşları, 2010 yılında yüksek hızda hareket eden taşıtlarla çevre arasındaki iletişimi (V2I) içeren IEEE 802.11p standartında kablosuz erişim WAVE değişikliğini yayınlamışlardır [53]. Bu yaklaşıma taşıttan her şeye (V2X) iletişimi denilmektedir [54]. IEEE 802.11p, kablosuz iletişim alanında bir standart olarak kabul edilen bir protokoldür. Bu standart, özellikle akıllı ulaşım sistemleri ve taşıt-taşıtlar arasındaki iletişimini desteklemek üzere tasarlanmıştır. 802.11p, genellikle WAVE adını taşıyan bir kablosuz erişim ortamını tanımlar. Bu standart, taşıtlar arasında ve taşıtlar ile yol altyapısı arasında güvenli ve etkileşimli iletişimi mümkün kılmak amacıyla geliştirilmiştir. Temel olarak, trafik güvenliği, trafik yönetimi ve acil durum müdahaleleri gibi alanlarda bilgi paylaşımını kolaylaştırarak, karayolu güvenliğini artırmayı hedefler. IEEE 802.11p, 5.9 GHz frekans bandında faaliyet gösteren ve özel bir kısa menzilli iletişim teknolojisi olan DSRC'yi temel alır. DSRC, taşıtlar arasında kısa mesafeli kablosuz iletişimi destekleyen bir teknoloji olup, kaza uyarıları, trafik durumu bilgileri ve acil durum uyarıları gibi önemli bilgilerin hızlı ve güvenilir bir şekilde paylaşılmasına olanak tanır. Bu standart, akıllı ulaşım sistemlerinin ve otonom taşıtların etkili bir şekilde çalışabilmesi için gerekli olan iletişim altyapısını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. 802.11p, karayolu güvenliği ve trafik yönetimi konularında önemli katkılarda bulunabilecek bir kablosuz iletişim çözümü olarak kabul edilmektedir. Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) tarafından standardize edilen ETSI ITS-G5 standardı, IEEE 802.11p'nin Avrupa profili olarak bilinmektedir. Bu standart, araçtan araca (V2V) ve araçtan altyapıya (V2I) iletişimini mümkün kılmaktadır. Avrupa'da DSRC terimi, Avrupa Standartlar Komitesi (CEN) tarafından belirlenen iletişim teknolojisini ifade etmektedir. DSRC, elektronik ücret tahsili ve otomatik yol fiyatlandırması gibi uygulamalar için kullanılmaktadır [55]. Japonya'da, 1996 yılında dünyanın ilk taşıt bilgi iletişim sistemi (VICS) kurulmuştur. Bu sistem, gerçek zamanlı bilgi toplama ve iletimini sağlamaktadır. 2011 yılında, VICS ve elektrikli geçiş ücreti düzeltmesi (ETC) tek bir taşıta monte edilen bir ünite olan ETC 2.0 adlı yeni bir proje başlatılmıştır. ETC 2.0, 5.8 GHz frekansında DSRC özelliklerini kullanarak yüksek hızlı ve yüksek kapasiteli iletişim sağlayarak kentteki trafik sorunlarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır. [56].

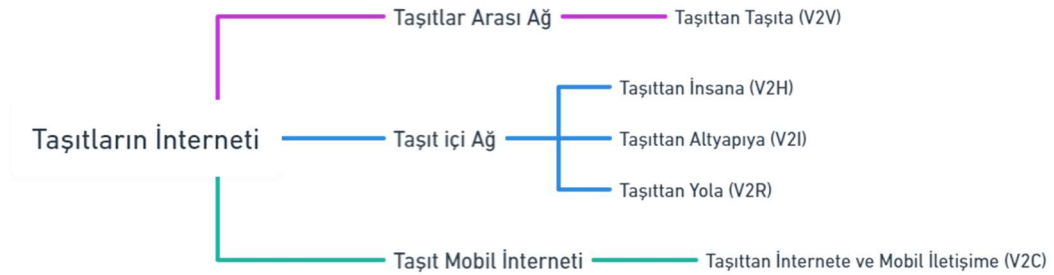
2.1.3. AUS'a Duyulan İhtiyaç ve AUS'un Faydaları

Akıllı ulaşım sistemleri, günümüz şehirlerindeki artan nüfus, trafik yoğunluğu ve çevresel zorluklar gibi ulaşım sorunlarıyla başa çıkabilmek, verimliliği artırmak, sürdürülebilir bir ulaşım altyapısı oluşturabilmek ve doğaya verilen zararın azaltılması için önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Kentlerdeki yaşam alanlarıyla iş yerleri arasındaki mesafelerin uzun olması, özel taşıt kullanma tercihinin toplu taşımaya göre fazla olması gibi nedenlerden dolayı oluşan trafik yoğunluğu ulaşımında geçen zamanı, yakıt tüketimini ve karbondioksit salım miktarını artırmaktadır. Bu sebeple ulaşım alanında bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Kameralar, algılayıcılar ve benzer sensörler yardımıyla taşıt, çevre ve altyapıdan elde edilen büyük verinin analizi sayesinde, anlık trafik durumu takip edilerek alternatif rotalar önerilir ve trafik sıkışıklığı en aza indirilerek zaman kaybı azaltılabilmektedir. Bu sayede taşıtlar daha az yıpranacak ve bakım maliyetlerinde tasarruf edilebilmektedir. Ayrıca, benzer sensörler kullanılarak anlık trafik durumu izlenebilir ve bu verilerle trafik ışıkları gibi trafik düzenleme taşıtları otomatik olarak ayarlanabilir. Bu sayede ölüm, yaralanma veya maddi kayıpla sonuçlanan trafik kazalarının sayısı azalacaktır. Buna örnek olarak 2017 yılında Japonya'da AUS sayesinde yıllık 60.850 kaza azalmış ve buna karşılık 157.928 bin JPY (Japon Yeni) tasarruf edilmiştir [57]. Son olarak, AUS şehir planlamasında ve kentsel gelişimde de önemli bir rol oynamaktadır. Toplu taşıma, bisiklet ve yaya yolları gibi ulaşım altyapısıyla entegre edilerek şehirlerin sürdürülebilirliğini artırabilir ve yaşanabilir bir kentsel çevre oluşturabilmektedir.

2.1.4. AUS Uygulamalarında Kullanılan Teknolojiler ve Haberleşme Çeşitleri

Günümüzde 5G teknolojileri akıllı şehirlerin gelişimine ve trafik sıkışıklığı, kirliliği ve çarpışmalar dahil olmak üzere şehirlerdeki ulaşım sorunlarıyla başa çıkmaktadır. Bu sayede akıllı ulaşım sistemlerinin daha güvenli ve verimli olmasına yardımcı olmaktadır [58]. Günümüzde birçok cihazın birbirine bağlandığı ve Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramının hayatımızda yer etmeye başladığı gözlemlenmektedir. AUS, IoT sayesinde verimli ve sürdürülebilir ulaşım sistemleri sağlamaktadır [59].

IoT sayesinde veriler insan etkisine ihtiyaç duymadan ağ üzerinden iletilebilmektedir [60]. IoT, Taşıtların İnterneti (IoV) kavramı oluşturmuştur. Bu kavram, taşıtların internet sayesinde bilgi paylaşımı yapabilmesi anlamına gelir. IoV'nin gelişimi, VANET teknolojilerinden türetilmektedir. VANET, taşıtların kablosuz iletişim teknolojileri sayesinde birbirleriyle ve yol kenarındaki altyapıyla etkileşimde bulunduğu bir tür ağ sistemi olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojiye, DSRC, OBU, GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi), EDR (Olay Yeri Kaydedici) ve sensörler (radar ve lidar) kullanılmaktadır [61]. IoV kapsamında sınıflandırılan teknolojiler Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Taşıtların her şeyle iletişim kurması olarak da bilinen IoV, başta kazaları ve trafik sıkışıklığını azaltmak ve diğer bilgi hizmetlerini sağlamak amacıyla taşıtla taşıtı etkileyebilecek her şey arasında bilgi aktarımı gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Bu teknolojik gelişmeler, taşıttan taşıta haberleşmeyi, taşıtların altyapıyla (yol kenarındaki cihazlar, trafik ışıkları, yol işaretleri, vb.) haberleşmesini, taşıtların yayalarla haberleşmesini sağlamıştır [62].



Şekil 2. 2. IoV teknolojileri [63]

2.1.4.1. Tahsis Edilmiş Kısa Mesafeli İletişim Teknolojisi (Dedicated-Short Range Communications-DSRC)

DSRC, kısa mesafe kablosuz iletişim için özel olarak tasarlanmış bir iletişim standardı olarak International Telecommunication Union (ITU) tarafından belirlenmiştir [64]. Genellikle 5.9 GHz frekans bandında, 75 MHz bant genişliğinde çalışan DSRC, özellikle otomotiv endüstrisinde trafik güvenliği, trafik yönetimi ve akıllı ulaşım sistemleri uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu teknolojinin temel amacı, taşıtlar arası ve taşıt-altyapı iletişimi sayesinde acil durum uyarıları, trafik sıkışıklığı bilgileri,

elektronik ücret tahsili, taşıtlar arası haberleşme, otomatik yol ücretlendirme gibi pek çok akıllı ulaşım sistemleri kullanılarak sürücülere hizmetler sunmaktır. Bu teknoloji RFID teknolojisinin alt dalıdır [65]. DSRC ile ilgili detaylı bilgiler Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 1. Tahsis Edilmiş Kısa Mesafeli İletişim Teknolojisinin (DSRC) Özellikleri[66]

Özellik	Değer
Frekans	5.9 GHz
Bant Genişliği	75 MHz (5850 - 5.925 Hz)
Kanal Sayısı	10 MHz’lik 7 adet
Veri İletim Hızı	6-27 Mbps
Başarılı Veri İletim Oranı	%50-60
İletim Yöntemi/Menzili	Yarı çift yönlü/1000m

2.1.4.2. Küresel Navigasyonlu Uydu Sisteminin Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması (Global Navigation Satellite System-GNSS)

Küresel Navigasyonlu Uydu Sistemleri (GNSS), birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Özellikle akıllı ulaşım sistemlerinde önemli bir rol oynayan bu sistemler, taşıma sektöründe (karayolu, demiryolu, denizyolu ve havayolu gibi), harita ve coğrafi bilgi sistemleri, askeri uygulamalar, acil durum yönetimi ve diğer birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. GNSS, özellikle araç takip ve konum belirleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Araçların anlık konumlarını belirlemek ve navigasyon hizmetleri sunmak için GNSS sinyallerini kullanılmaktadır. Böylece, filo yönetimi, lojistik planlama, trafik yönetimi ve benzeri uygulamaların etkin bir şekilde yönetilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, GNSS, havacılık sektöründe de önemli bir rol oynamaktadır. Uçakların konumunu belirlemek ve navigasyonunu sağlamak için GNSS sinyalleri kullanılmaktadır. Bu sayede, uçuş güvenliği artırılmakta ve hava trafiği yönetimi iyileştirilmektedir. Harita ve coğrafi bilgi sistemleri alanında da GNSS, konum tabanlı hizmetlerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Konum tabanlı uygulamalar, kullanıcılara çevrelerindeki noktaları bulma, yol tarifi alma, konum

tabanlı hizmetlere erişim gibi imkanlar sunmaktadır. Özetle, GNSS teknolojisi, akıllı ulaşım sistemlerinde kullanımı, konum belirleme, navigasyon, filo yönetimi, trafik yönetimi gibi birçok alanda önemli faydalar sağlamaktadır. [65].

2.1.4.3. Taşıt Üstü Birimlerin (On-Boards Unit-OBU) Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması

Taşıt Üstü Birim (OBU), taşıtlara entegre edilen bir elektronik cihazdır ve akıllı ulaşım sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. OBU'lar, taşıt üzerinde bulunan sensörler ve iletişim modülleri aracılığıyla çeşitli verileri toplar, işler ve haberleşmeyi sağlamaktadır. Yaygın olarak GPS, hız ölçer ve benzeri sensörlerle donatılmış olan OBU'lar, taşıtın konumunu, hızını ve diğer çevresel koşulları izleyebilmektedir. OBU'lar yaygın olarak Araçtan Araca (V2V) ve Araçtan Altyapıya (V2I) iletişimi için kullanılmaktadır. Bu iletişim protokolleri, çevredeki diğer araçlarla ve altyapıyla etkileşime geçerek trafik akışını yönetmeyi, kazaları önlemeyi ve otonom sürüş gibi ileri düzey uygulamaları desteklemeyi sağlamaktadır. Örneğin, bir aracın ani bir durumda diğer araçlara uyarı göndermesi veya trafik ışıklarının durumunu alarak sürücülere en uygun hızı önermesi gibi durumlar, OBU'ların sağladığı iletişim imkanlarıyla gerçekleştirilebilmektedir. Sonuç olarak, OBU'lar akıllı ulaşım sistemlerinin temel bileşenlerinden biridir ve çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Bu sistemler, trafik yönetimi, güvenlik ve sürücü yardımı gibi alanlarda önemli avantajlar sağlayarak, modern taşımacılıkta önemli bir rol oynamaktadırlar.

2.1.4.4. Kablosuz Ağların Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması

Kablosuz ağlar, akıllı ulaşım sistemlerinde çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, genellikle internete kablosuz erişim sağlamak amacıyla kullanılır ve taşıtlar ile yol kenarındaki cihazlar arasında iletişimi kolaylaştırmaktadır. Ancak kapsama alanlarının dar olması nedeniyle, bağlantı genellikle diğer sıralı taşıtlardan veya sıralı yol kenarı cihazlarından atlamalı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Örneğin, Güney Kore'de [67], WiMAX [68] teknolojilerine dayalı olarak yaygın bir şekilde kullanılan kablosuz ağlar, ulaşım ağı boyunca trafik ve toplu taşıma bilgilerini

iletmek için kablosuz iletişim altyapısı olarak kullanılmaktadır. Bu sayede, taşıt operatörleri ve yolcular, anlık trafik durumu, toplu taşıma seferleri ve diğer önemli bilgilere kablosuz ağlar aracılığıyla erişebilmektedir. Kablosuz ağlar, akıllı ulaşım sistemlerinde veri iletimi ve iletişimde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak kapsama alanlarının dar olması ve bağlantının atlamalı olarak gerçekleşmesi gibi bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu nedenle, kablosuz ağların verimli bir şekilde kullanılabilmesi için uygun altyapı ve teknolojik çözümler gerekmektedir.

2.1.4.5. Radyo Dalgası ve Kızılötesi İşaretlerin Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması

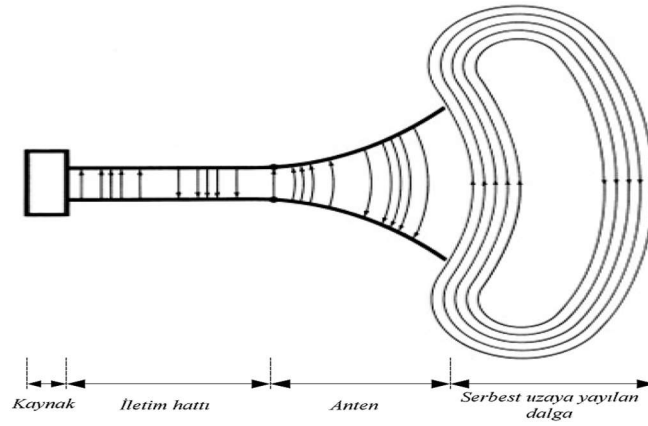
Radyo dalgaları, taşıtların birbirleriyle haberleşmelerini sağlamaktadırlar. Taşıtların konum, hız, yol güzergahı ve diğer önemli bilgileri diğer taşıtlarla paylaşmasına olanak tanımaktadırlar. Bu sayede kazaların önlenmesi, trafik akışının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca radyo dalgaları ve kızılötesi işaretler, taşıtların trafik ışıkları, yol işaretleri ve otoyol şeritleri gibi elemanlarla iletişim kurmasını sağlamaktadırlar. Bu iletişim, trafik sinyallerinin optimize edilmesi, trafik yönetiminin geliştirilmesi ve sürücülere bilgi sağlanması gibi konularda yardımcı olmaktadır. Bunlara ek olarak radyo dalgaları ve kızılötesi işaretler, otopark alanlarında boş yerlerin tespit edilmesi ve sürücülerin yönlendirilmesi için kullanılabilirler. Bu sistemler kablosuz 5.8 GHz DSRC teknolojisi ile işlem yapmaktadırlar [65].

2.1.4.6. Yol Kenarı Kamera Tanıma Sisteminin Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Kullanılması

Bu sistemler kavşaklar gibi önemli noktalara konumlandırılmaktadır. Bu kameralar, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sayesinde özel algoritmalar kullanarak trafik işaretlerini tanıma, taşıt plakalarını tespit etme ve hız kontrolü sağlama yeteneklerine sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen veriler, trafik kontrol merkezleri ile güvenlik birimleri tarafından kullanılır. Yol kenarı kamera tanıma, trafik yönetimi ve güvenlik uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılarak trafik akışını düzenlemekte ve güvenliği artırmaktadır.

2.2. ANTENLER

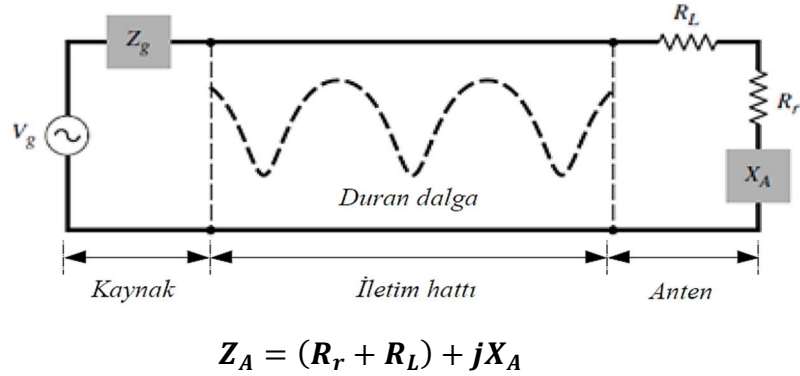
Antenler, bütün kablosuz iletişim sistemlerinin kilit bileşenleri olarak öne çıkmaktadır. Anten, elektromanyetik dalgaları alabilen ve yayabilen bir dönüştürücü olarak tanımlanmaktadır. Anten teriminin oluşması 19. yy.'ın sonlarında Maxwell'in yaptığı çalışmaya dayanmaktadır. Maxwell Denklemleri elektromanyetik dalgaların hesaplanmasında temel taşları oluşturmuştur. Ardından 1886 yılında Heinrich Rudolph Hertz, kablosuz elektromanyetik sistemini bulmuştur. Anten çalışmaları, İkinci Dünya Savaşı zamanında Marconinin etkisiyle büyük bir gelişme yaşamıştır. Metalik bir yapı olan antenlerin elektrik alan dalgalarıyla atmosferde ışıma yapmasıyla günümüzdeki antenlerin temeli atılmıştır. Antenlerin çalışma prensibi özetlenecek olursa; verici antenle alıcı antenin aynı frekans bandında çalışmasıyla antenin hedeflenen elektromanyetik dalgayı alması sağlanmış olur. Kaynaktan, iletim hattından, antenden ve serbest uzaya yayılan dalgalardan oluşan sistem Şekil 2.3'te verilmiştir. Kaynaktan iletim hattıyla taşınan sinyal, anten kullanılarak elektromanyetik dalgaya dönüştürülüp uzaya gönderilmektedir[69].



Şekil 2. 3. Kaynaktan elektromanyetik dalgalarla iletim yapan sistem

Şekil 2.3'teki gösterimin Thevenin eşdeğer devresi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Kaynak, üreteçle; iletim hattı, empedansı Z_g olan hatla; antense iletim hattına bağlı ve empedansı Z_A olan bir yük ile temsil edilmiştir. Anten empedans gösteriminde yük direnci olarak harflendirilen R_L antenle ilgili dielektrik ve iletim kayıplarını; R_r , ışıma

direncini ve X_A ışıma reaktansını ifade göstermektedir. İdeal durumlarda kaynaktan oluşan enerjinin tamamı ışıma direncine (R_r) aktarılması gerekmektedir. Fakat kullanılan sistemlerde, antenin yapısından dolayı iletim hattında dielektrik kayıpları oluşmaktadır. Empedans uyumu yakalandığında, yansıma ve iletim hattındaki kayıplar görmezden gelinir ve antene doğru maksimum güç iletilir.



Şekil 2. 4. Antenin iletim hattının Thevenin Eşdeğer Devresi

Thevenin devresinde gösterildiği üzere yansıyan dalgalar, kaynaktan çıkan dalgalarla iletim hattı üzerinde olumlu veya olumsuz girişim oluşturmaktadır. Bu sebepten, duran dalgalar oluşmaktadır. Anten sistemi optimize bir şekilde kurgulanmazsa, iletim hattında dalga yönlendirilmenin aksine enerji deposu olarak görev yapar. Ayrıca, duran dalgaların maksimum alan yoğunluğu iletim hattının taşıyabileceğinden büyükse iletim hattında elektrik patlaması olarak da ifade edilen arklar oluşabilmektedir. İletim hattında duran dalgalar ve anten kayıpları istenmez. İletim hattı kayıplarını düşürmek için düşük kayıplı iletim hatları kullanılabilirken anten kayıpları ise antenin kayıp direnci olarak da ifade edilen R_L direncinin azaltılmasıyla düşürülebilmektedir. İletim hattında oluşan duran dalgalarla iletim hattı empedansı anten empedansı arasındaki uyumun artırılmasıyla azaltılabilmektedir. Enerjinin transfer edilebilmesine veya alınabilmesine ek olarak, gelişmiş teknolojik cihazlarda kullanılan antenler, genel olarak enerjinin bir yönde ışıma yapmasını ve diğer yönlerde ışıma yapmamasını sağlamak amacıyla optimize edilirler. Bu sebepten ötürü anten yönlü bir cihaz olarak çalışmaktadır. Antenler, kullanılacakları yerlere ve şekillerine göre, yama, boynuz, tel antenler olarak adlandırılmaktadırlar.

2.2.1. Antenlerin Çalışma Prensibi

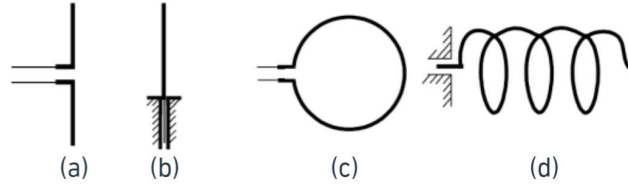
Çevreye elektromanyetik dalga gönderen cihazlara verici anten denir. Tam tersi görev yapan antenlereyse alıcı anten denir. Antenleri sınıflandırırken; yapısal özelliklerine, genel karakteristik özelliklerine, ışınım özelliklerine, uygulama alanlarına ve frekans bantlarına göre sınıflandırma yapmak mümkündür. Yapısal antenlere; monopol ve dipol antenler, mikroşerit yama antenler, tel antenler, boynuz (horn) antenler, doğrusal ve düzlemsel anten dizisi gibi örnekler verilebilmektedir. Antenleri özelliklerine göre; yansıtıcı, boynuz (horn), geniş bant, adaptif antenler başlıklarında inceleyebiliriz. Işınım özelliğine göre noktasal kaynaklı antenler, çubuk şekilli ışınım diyagramlı, dairesel, doğrusal ve elips yapılı antenler ve yelpaze şekilli antenler söylenebilmektedir. Antenler, radar, TV yayınları, haberleşme, radyo ve yön tahmini gibi çeşitli uygulama alanları için kullanılabilir. Antenler, çok alçak frekanslı (3-30 KHz), alçak frekanslı (30-300 KHz), orta frekanslı (0,3-3 MHz), yüksek frekanslı (3-30 MHz), çok yüksek frekanslı (30-300 MHz), ekstra çok yüksek frekanslı (0,3-3 GHz), süper yüksek frekanslı (3-30 GHz) ve milimetrik (30-300 GHz) olmak üzere farklı frekans bantlarında sınıflandırılabilir [70].

2.2.2. Anten Çeşitleri

Antenler birçok uygulama alanlarına göre farklı tasarımlara sahiptir. Bu kısımda çok kullanılan anten çeşitlerine yer verilmiştir ve antenlerle ilgili genel bilgilerden bahsedilmektedir. Mikroşerit antenlerle ilgili bilgiler diğer bölümlerde bahsedilecektir.

2.2.2.1. Tel Antenler

Bu tür antenler genellikle otomobillerin radyolarında, binaların çatılarında kullanılmaktadır. Tip olarak en yaygın kullanılanları Şekil 2.5'te gösterildiği gibi; monopol ve dipol antenler, dikdörtgen, kare, elips, daire şekillerine sahip halkalı antenler ve spiral şekline sahip olan tel antenler adını almaktadır.



Şekil 2. 5. Tel Antenler; (a) Dipol Anten, (b) Monopol Anten (c) Dairesel Halka Anten, (d) Heliksel Anten [71]

2.2.2.2. Boynuz (Horn) Antenler

Bu anten tiplerinin çok kullanılmasının sebebi yüksek frekansta başarılı sonuçlar vermesi olarak açıklanabilmektedir. Açıklık antenlerin çeşitleri Şekil 2.6'da dikdörtgen açıklık piramit, dairesel açıklık konik ve dalga kılavuzlu boynuz antenler gösterilmektedir. Bu antenlerin olumsuz çevre koşullarında etkili performans verebilmeleri için dışları dielektrik malzemelerle kaplanarak üretimleri gerçekleştirilmektedir [72].

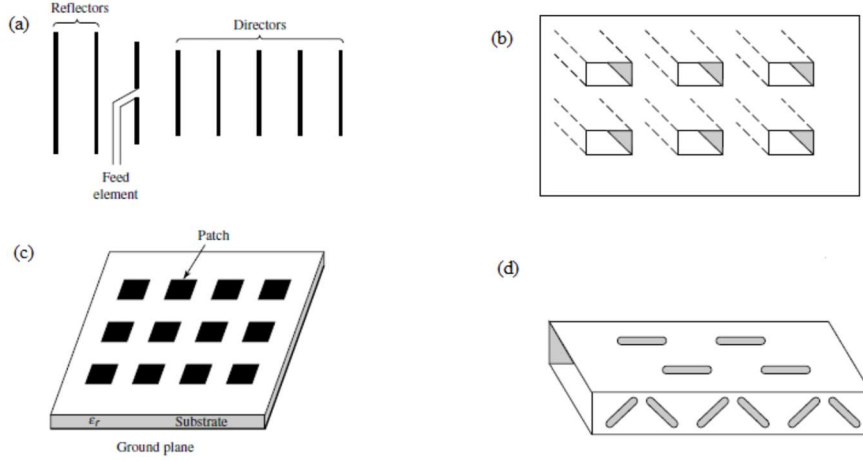


Şekil 2. 6. Boynuz (Horn) Antenler; (a) Dikdörtgen Açıklık Piramit Boynuz, (b) Dairesel Açıklık Konik Boynuz, (c) Dikdörtgen Dalga Kılavuzu [71]

2.2.2.3. Dizi Antenler

Birçok antenin birleştirilmesiyle tasarlanan anten çeşitlerine dizi antenler adı verilmektedir. Antenlerin diziye benzer şekilde tasarlanmasının sebebiyse, tek antenin gerçekleştiremediği ışınımı birçok antenin bir araya getirilmesiyle gerçekleştirilmesine denir. Bu şekilde üretilen antenlere dizi antenler adı verilir. Dizi antenlerin tasarımı yapılırken ihtiyaç olan yönlerde ışınımın maksimum olması

istenirken, bazı yönlerdeyse ışımının minimum olması istenir ve tasarım anında bu özelliklere göre tasarım gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.7’de dizi antenlere örnekler verilmektedir.



Şekil 2. 7. Dizi anten çeşitleri; (a) Yagi-Uda Dizi Anteni, (b) Dikdörtgen Dalga Kılavuzu Dizi Anteni, (c) Mikroşerit Yamalı Dizi Anteni ve (d) Slotlu Dalga Kılavuzu Dizi Antenleri [71]

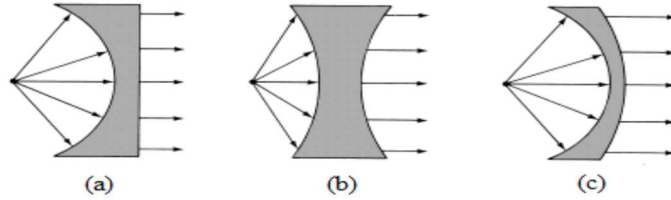
2.2.2.4. Yansıtıcı Antenler

Yansıtıcı antenlerin çaplarının büyük tasarlanmasının sebebi kullanım alanlarından kaynaklanır. Yansıtıcı antenler gök cisimlerinin yerinin tespiti için kullanılır. Gök cisimlerinin kilometreler uzaklıkta olması sebebiyle sinyallerin alınımı veya gönderimi için yüksek kazanç değerine sahip antenlerin olması gerekmektedir. Bundan dolayı yansıtıcı antenler, çapları çok fazla büyük olacak şekilde tasarımları yapılır (350 m gibi).

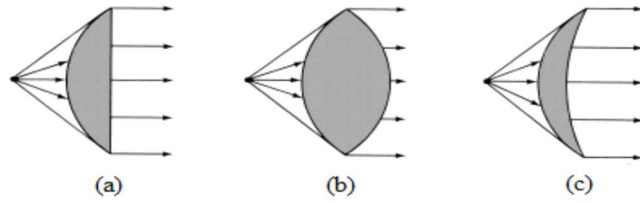
2.2.2.5. Lens Antenler

Lens antenler, içerisinde kullanılan filtreleyici lensler sayesinde istenmeyen enerjilerin yayılmasını engeller. Uygun malzeme ve şekillere sahip lensler, enerjiyi geri kazanabilir ve onu düzlemsel bir dalga biçimine dönüştürebilmektedirler. Lens

antenlerin geometrileri Şekil 2.8'deki gibi 1'den küçük ya da Şekil 2.9'da kırılma indislerinin (n) 1'den büyük olmasına göre kalın veya ince mercekli olarak isimlendirilmektedirler. Ayrıca kalın merceklere iç bükey mercekler, ince merceklere de dış bükey mercekler de denir.



Şekil 2. 8. $n < 1$ olan Lens Antenler; (a) iç bükey- düz, (b) iç bükey- iç bükey (c) iç bükey dış bükey [71]



Şekil 2. 9. $n > 1$ olan Lens Antenler; (a) dış bükey- düz, (b) dış bükey- dış bükey (c) dış bükey- iç bükey [71]

BÖLÜM 3

MİKROŞERİT ANTENLER

Mikroşerit antenler, metalik yamadan, toprak düzleminde, alttaşın ve beslemeden oluşan tek katmanlı antenler olarak ifade edilmektedir. Belirli frekansta ışınım diyagramı ve giriş empedansı gibi karakteristik değerler sabit olarak verilmektedir. Mikroşerit anten, yalıtkan alttaşın yüksekliği (t), serbest uzay dalga boyundan (λ_0) oldukça küçük olan ($t \ll \lambda_0$) ışınım yapan yama düzleminde ve alttaşın arka tarafında yer alan ve aynı metalden oluşan toprak düzleminde oluşmaktadır. Metalik yama korozyona karşı dirençli malzemelerden olan altın, kalay, nikel, bakır ince folyodan oluşmaktadır. Alttaşın kalınlığı, genellikle, serbest uzay dalga boyunun %1 ile %5'i arasında olacak şekilde hesaplanmaktadır. Mikroşerit antenlerin alttaşlarında yüksek dielektrik sabitinde (ϵ_r) malzemeler ve loss tanjantı 0.005'ten küçük malzemeler tercih edilmektedir. Mikroşerit antenler hakkında yapılan çalışmaların çoğunluğu, üçgen, daire, dikdörtgen geometrilerinden oluşmaktadır. Bu geometriler Şekil 3.1'de verilmiştir [73].



Şekil 3. 1. Mikroşerit Anten Geometrileri

Mikroşerit antenlerde alttaş oldukça önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Alttaş kalınlığı antenin verimini etkilemektedir ayrıca bant genişliği ve rezonans frekansını önemli ölçüde etkileyen parametreye dielektrik sabiti adı verilmektedir.

Kalınlığın artması, istenmeyen yüzey dalgalarının oluşmasına sebep olmaktadır. Mikroşerit antenler, yama düzlemiyle toprak düzlemi arasında oluşan dalgalar sayesinde ışına yapmaktadır. Anten performansının maksimum olması, düşük dielektrik sabitine sahip kalın bir alttaş ile mümkün olmaktadır. Bu şekilde tercih edilen alttaş sayesinde yüksek kazanç elde edilmektedir. Ayrıca daha geniş bant aralığı ve daha iyi ışına yapmasına olanak sağlanacaktır. Fakat bu adımlar uygulandığında mikroşerit antenlerin boyutları istenenden daha büyük olacağı bilinmektedir. Kompakt mikroşerit antenlerde yüksek dielektrik sabitine sahip alttaş tercih edildiğinde bant genişliğinin daralmasına ve daha düşük kazanç sebep olsa da boyutlarının küçülmesine olanak sağlamaktadır. Çizelge 3.1’de mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir. Mikroşerit antenlerin kullanım alanına göre dezavantajları avantaja döndürülebilmektedir [74,75].

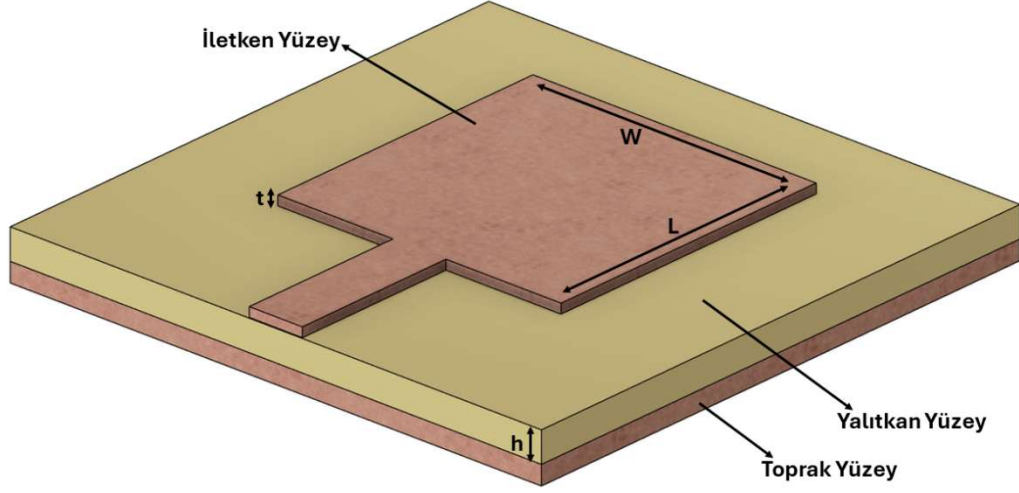
Çizelge 3. 1. Mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları[75]

Avantajları	Dezavantajları
- Küçük hacimli ve hafiftir.	- Dar bant genişliğine (BW) sahiptir.
- Yerleştirilecekleri alana göre üretilebilmektedir.	- Düşük kazanç değerlerine sahiptirler. Kazançları maksimum 5-6 dB seviyesindedir.
- Baskı devre teknolojisiyle düşük maliyetlerle ve kolay bir şekilde üretilebilmektedir.	- Düşük güç kapasitelerine sahiptir.
- Aynı alttaş üzerinde diğer mikrodalga devrelerle beraber üretilebilmektedir.	- Düşük verimliliğe sahiptir.
- Doğrusal (lineer) veya dairesel ışına yapmaya uygun yapıya sahiptir.	- Yüzey dalgaları uyarımı olabilmektedir.
- İki veya üç frekanslı mikroşerit antenler tasarlanabilmektedir.	- Besleme ve bağlantı noktalarında istenmeyen ışımalara sahiptir.
- Radar kesit alanı (RKA) düşüktür.	- Mikroşerit antenlerin birçoğu yarım uzaya ışına yapmaktadır.

3.1. MİKROŞERİT ANTENLERİN GENEL YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Mikroşerit antenler, elektriksel iletim hatları olarak tanımlanabilmektedir ve mikrodalga frekanslarda sinyallerin iletimini sağlamak için baskı devre kartlarında

üretilmektedirler. Bu antenlerin yapısı, dielektrik malzeme üzerine yerleştirilmiş iletken bir yamadan oluşur ve toprak yüzeyinden ayrılmış bir konfigürasyona sahiptir. Şekil 3.2'de, standart bir mikroşerit antenin tipik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. 2. Dikdörtgen Mikroşerit antenlerin genel yapısı

Işımayı gerçekleştiren iletken yamanın genişliği (W), uzunluğu (L), dielektrik malzemesinin kalınlığı (h) ve bu malzemenin dielektrik geçirgenliği (ϵ_r) mikroşerit antenin elektriksel performansını etkileyen temel parametreler olarak kabul edilmektedir. MA'larda iletken malzemeye sahip yama, ışımının gerçekleşebilmesi için düşük kayıplı dielektrik malzemeyle birleştirilmektedir. Yaygın olarak yama ve toprak yüzeyi bakırdan oluşmaktadır. Dielektrik malzemeyle dielektrik geçirgenliği genellikle $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığında olan yalıtkan malzemeden oluşmaktadır. Dielektrik malzemenin kalınlığı genellikle $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ arasında değişir. İletken yamanın kalınlığı (t) ise genellikle 0.018 mm ile 0.070 mm arasında seçilmektedir [71]. MA performansını artırmak için, genellikle düşük dielektrik geçirgenliğine sahip kalın yalıtkan malzemeler tercih edilir. Bu malzemeler, büyük yama boyutlarına rağmen yüksek bant genişliği, yüksek verimlilik ve istenilen ışımaya sahip olmanın yanı sıra ışılan alanları daha az sınırlar. Fakat dielektrik sabiti arttıkça antenin ışımaya örüntüsü ve verimliliği azalmaktadır. Bundan dolayı anten boyutlarıyla performansı arasında dengeyi gözetmek gerekmektedir [76].

3.2. MİKROŞERİT ANTENLERİN ÖNEMLİ PARAMETRELERİ

3.2.1. Geri Dönüş Kaybı (S_{11} parametresi)

S_{11} olarak bilinen geri dönüş kayıpları mikroşerit antenlerin önemli parametrelerinin başında gelmektedir. Geri dönüş kaybı, empedans uyumuyla ve gücün maksimum aktarımıyla ifade edilir. Antene gelen gücün ($P_{giriş}$) yansıyan güce oranını ($P_{yansıyan}$) ifade etmektedir. Bu ifade, aşağıda verilmiştir.

$$RL = 10 \log_{10} \frac{P_{yansıyan}}{P_{giriş}} \quad (3.1)$$

Yüksek güç transferi için $\frac{P_{yansıyan}}{P_{giriş}}$ oranının küçük olması gerekmektedir. Geri dönüş kayıplarında kullanılan farklı formüller aşağıda verilmiştir.

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (3.2)$$

$$RL = -20 \log_{10} \left| \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right| \quad (3.3)$$

$$RL = -20 \log_{10} \left| \frac{Z_L - Z_g}{Z_L + Z_g} \right| \quad (3.4)$$

Burada Γ , yansıma katsayısını; VSWR, gerilim duran dalga oranını, Z_g , iletim hattının empedansını, Z_L yük empedansını ifade etmektedir [77].

3.2.2. Gerilim Duran Dalga Oranı (Voltage Standing Wave Ratio-VSWR)

Antenin yüksek verimde çalışması için vericiden antene doğru transfer edilen gücün maksimum düzeyde olması gerekmektedir. Bu durum yalnızca giriş empedansıyla

vericinin empedansı eşit olduğu zaman mümkün olmaktadır. Antenin yüksek verimle çalışabilmesi için çeşitli uygulamalar olsa bile, gücün belli oranda antende duran dalga olarak kalmasına Gerilim Duran Dalga Oranı olarak ifade edilir.

VSWR:

$$VSWR = \frac{V_{maksimum}}{V_{minimum}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.5)$$

Matematiksel olarak ifade edilmektedir. Antenden yansıyan katsayı 0 ile 1 arasında olduğundan dolayı VSWR değeri 1'den başlayıp ∞ 'a kadar hesaplanabilmektedir. Antenin giriş empedansı ile iletim hattı empedansının ne kadar uyumlu olduğunu ifade etmektedir. Yapılan çalışmalarda VSWR'ın 2'den küçük bir değere sahip olması yeterli olarak kabul edilmiştir.

3.2.3. Yönlülük ve Kazanç

Antenin istenen yöne doğru yaptığı ışımının güç yoğunluğunun, antenin bütün yönlerde yaptığı ışımaya yoğunluğunun oranına yönlülük denir. Yönlülük her zaman 1'den büyük değere sahip olmaktadır. Bir antenin verimliliği ile yönlülüğünün çarpımı kazancını ifade etmektedir.

Antenin kazancı:

$$G = eD \quad (3.6)$$

(3.1)

olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki formülde e, antenin verimini ifade ederken D, antenin yönlülüğünü ifade etmektedir. Verim, 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu sebeple kazanç ifadesi maksimum yönlülüğe eşit olabilmektedir.

3.2.4. Verim ve Kalite Faktörü

Mikroşerit anten için verim, elektromanyetik dalgaya dönüştürülen enerjinin, mikroşerit antene aktarılan enerjiye oranı olarak ifade edilmektedir. Yansıma,

polarizasyon, iletim ve dielektrik kayıpları ve farklı bir yükte yoğunlaşan güç antenin verimliliğini olumsuz etkileyen faktörlerdir.

Işıma verimi:

$$e = \frac{P_{ışıma}}{P_{giriş}} \quad (3.7)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada $P_{ışıma}$, antenden etrafa doğru oluşan gücü ve $P_{giriş}$, antene verilen gücü ifade etmektedir.

3.2.5. Bant Genişliği

Antenin yüksek performans gösterdiği alt frekanslarla üst frekansların arasında kalan alan olarak ifade edilmektedir. Geniş bant aralığına sahip mikroşerit antenlerde üst frekansın alt frekansa oranı bant genişliğini verirken dar bantlı mikroşerit antenlerde üst frekansın alt frekans arasındaki farkın merkez frekansa oranının yüzde olarak ifade edilmesine denir [78].

$$BW_{geniş\ bant} = \frac{f_{üst}}{f_{alt}} \quad (3.8)$$

$$BW_{dar\ bant}(\%) = 100 \times \left[\frac{f_{üst} - f_{alt}}{f_{merkez}} \right] \quad (3.9)$$

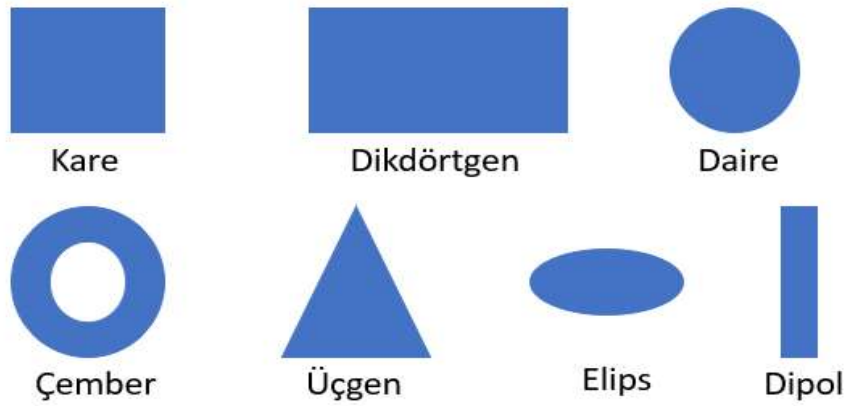
3.3. MİKROŞERİT ANTEN ÇEŞİTLERİ

Mikroşerit antenlerin üretimlerindeki kolaylık, çeşitli şekillere sahip tasarımların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, antenlerin çeşitlilik göstermesi, belirli ortak özelliklere göre kategorize edilmelerini gerektirmektedir. Mikroşerit antenler hem geometrilerine göre hem de besleme çeşitlerine göre sınıflandırılabilir. Bu

çeşitlilik, anten teknolojisinin gelişimine ve uygulama alanlarının genişlemesine katkı sağlar.

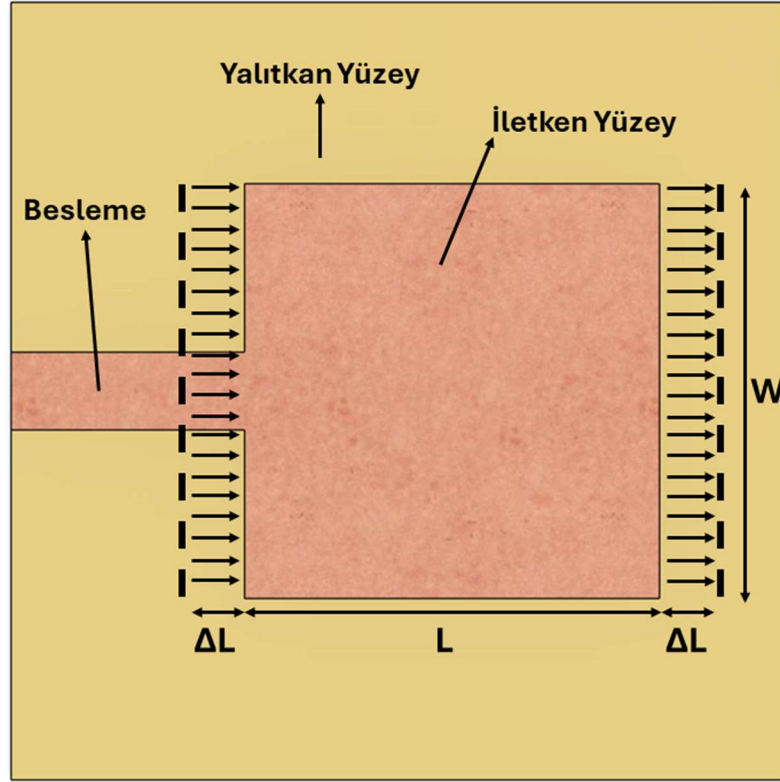
3.3.1. Mikroşerit Yama Antenler

Mikroşerit yama antenler, istenilen geometrilerin alttaş üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu antenlerde yama ve toprak düzlemi genellikle düzgün geometrilerden oluşmaktadır. Birçok yama anteni için önceden hesaplanmış ışıma karakteristikleri mevcuttur. Bu antenlerin boyutları, frekanslarıyla ters orantılıdır. Genellikle büyük boyutlara sahiptirler. Analiz ve performans hesabının kolaylıkla yapılabilmesi için genellikle; kare, dikdörtgen, daire, çember, üçgen, elips, dipol şekillerinde yamalar tasarlanır. Şekil 3.3'te Mikroşerit Yama anten geometrileri gösterilmiştir.



Şekil 3. 3.Mikroşerit Yama anten geometrileri

Bu antenlerin kazançları 5-6 dB civarında olup, hüzme genişlikleri genellikle 70° - 90° arasında 3 dB'dir. Şekil 3.4'te, bir mikroşerit yama antenin ışıma örneği bulunmaktadır.

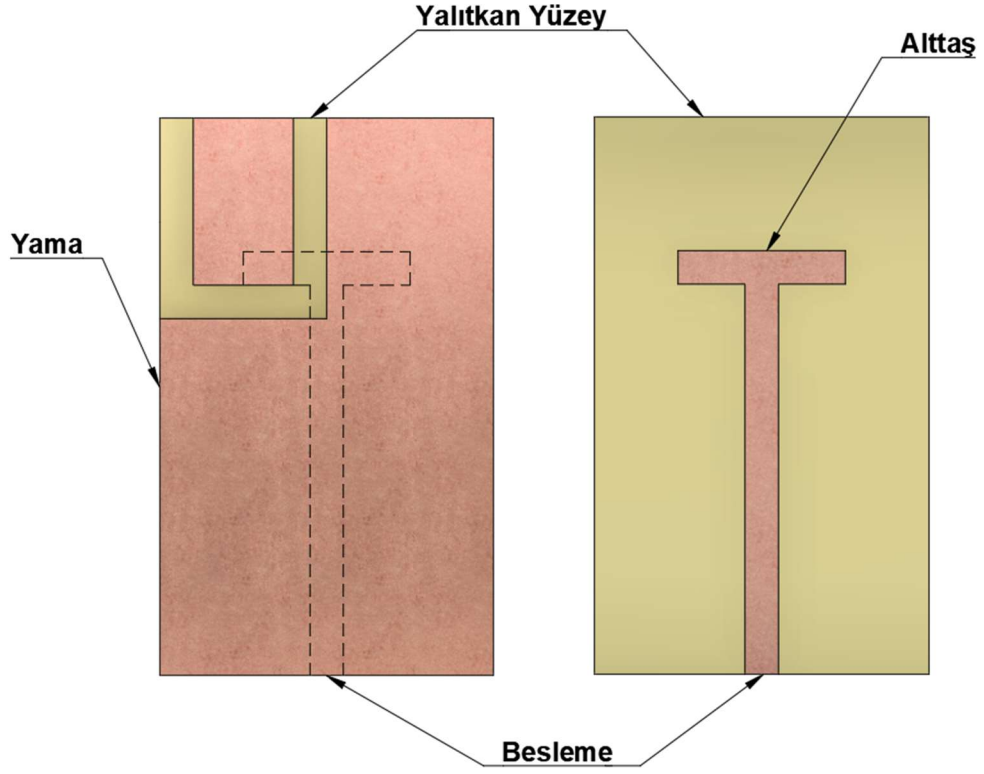


Şekil 3. 4. Dikdörtgen şekilli mikroşerit antenin ışıma örneği

Mikroşerit anten, W genişliğindeki kenardan ışıma gerçekleştirmektedir. Antenin ışıma sürecine etki eden kenar kaçak alanları, yamanın boyutlarında elektriksel bir genişlemeye yol açmaktadır. Bu elektriksel genişleme, ΔL olarak adlandırılmaktadır.

3.3.2. Mikroşerit Yarık Antenler

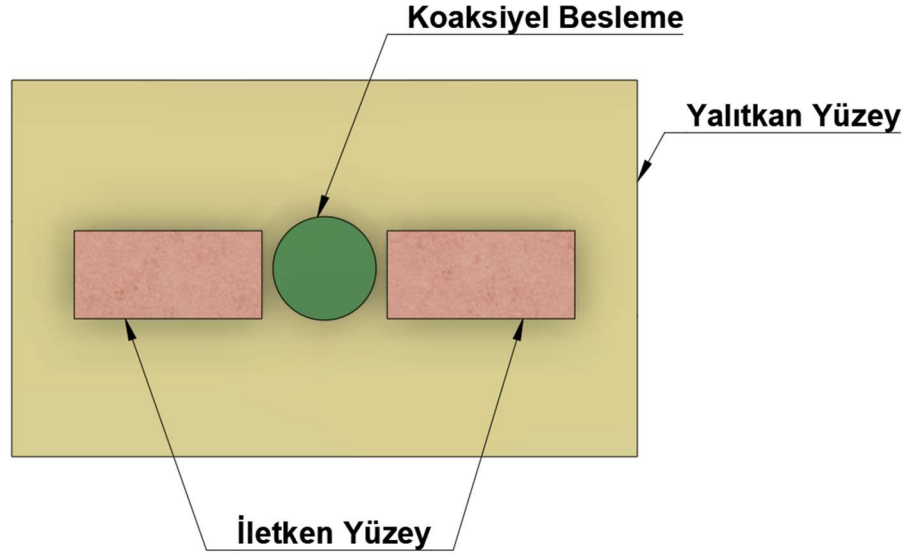
İşıma yapan yamada delikler oluşturulmasıyla elde edilen anten çeşitlerine mikroşerit yarık anten denir. Genellikle toprak ve yama düzlemi düzgün geometrilerden oluşmaktadır. Literatürdeki mikroşerit yarık anten geometrilerine örnekler Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Yarık antenler çoğunlukla mikroşerit hat ile beslenmektedirler [79].



Şekil 3. 5. Mikroşerit yarık anten geometrisine örnek

3.3.3. Mikroşerit Dipol Antenler

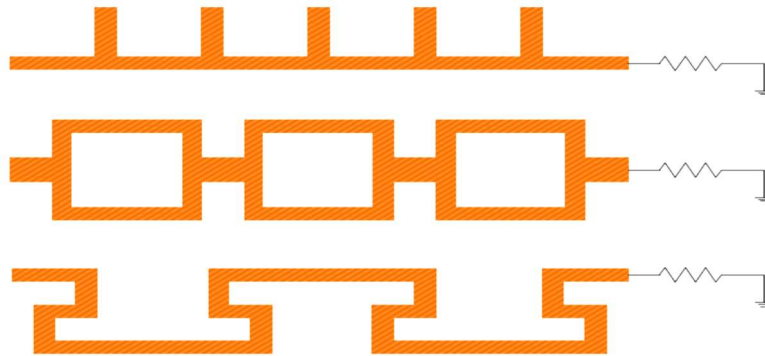
Mikroşerit dipol antenlerin genişliği, çoğunlukla uzay dalga boyunun 0.05 katından daha küçük olacak şekilde hesaplanmaktadır. Mikroşerit dipol antenlerle yama antenlerin ışıma yoğunluğu, akımların dağılımları sebebiyle benzemektedirler. Fakat ısınmaya karşı dirençleri farklılık göstermektedir. Dipol antenler, boyutlarındaki küçüklük ve lineer polarizasyona sahip olduklarından dolayı tercih edilmektedirler. Bir mikroşerit dipol antenin örneği Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 6. Mikroşerit dipol anten örneği

3.3.4. Mikroşerit Yürüyen Dalga Antenler

Mikroşerit yürüyen dalga antenler, yeterli genişlikteki mikroşerit hatların sıralanmasıyla oluşturulan antenler olarak adlandırılmaktadır. Antenin bir yüzü, duran dalga oluşumunu önlemek amacıyla rezistif bir yüke bağlanmalıdır. Mikroşerit yürüyen dalga antenler, dairesel polarizasyon elde etmek için özellikle zincir anten ve kare döngü anten gibi yapılarla kullanılmaktadır. Örnek mikroşerit yürüyen dalga anten yapıları Şekil 3.7'de sunulmuştur [79].



Şekil 3. 7.Yürüyen Dalga Antenlere Bazı Örnek Şekiller

Şimdiye kadar özetlenmiş mikroşerit antenlerin çeşitli özelliklerinin birbirleriyle karşılaştırması Çizelge 3. 2’de verilmektedir.

Çizelge 3. 2. Mikroşerit antenlerin karşılaştırılması[75]

Karakteristik Özellikleri	Mikroşerit Yama Antenler	Mikroşerit Slot Antenler	Mikroşerit Dipol Antenler
Üretim	Çok Kolay	Kolay	Kolay
Polarizasyon	Lineer ve Dairesel	Lineer ve Dairesel	Lineer
Yama Şekli	Herhangi bir şekil	Çoğunlukla dikdörtgen ve dairesele	Dikdörtgen ve üçgen
Bant Genişliği	2-50%	5-30%	≈30%

3.4. MİKROŞERİT ANTENLERDE KULLANILAN BESLEME TEKNİKLERİ

Mikroşerit antenler şekillerine göre sınıflandırıldıkları gibi, besleme tekniklerine göre de sınıflandırılabilirler. Kullanılan besleme teknikleri temelde, temaslı ve temassız besleme olmak üzere ikiye ayrılır. Temaslı besleme yöntemleri; kaynaktan gelen gücü, yamaya temas eden iletkenle direkt aktarlar. Temassız besleme yöntemleri ise; kaynaktan gelen gücü, yamaya elektromanyetik kuplaj sayesinde aktarırlar. Temaslı besleme yöntemleri, kolay üretilebilmelerinden dolayı temassız besleme yöntemlerine göre daha çok tercih edilmektedir. Mikroşerit antenleri beslemek için birçok farklı yapı kullanılmaktadır. Bunların içinde literatürde en yaygın kullanılanlar;

- Mikroşerit hatla besleme
- İç girintili
- Çeyrek dalga Dönüşümlü
- Kenar bağlantılı

- Koaksiyel hatla besleme
- Yakınlık kuplajlı
- Açıklık kuplajlı beslemedir.

Besleme tekniklerindeki asıl amaç; empedans uyumunu sağlayarak, aktarılan gücün büyük bir kısmının metalik yamaya geçirmektir. Besleme yöntemleri Şekil 3.8’de özetlenmektedir.



Şekil 3. 8. Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme teknikleri

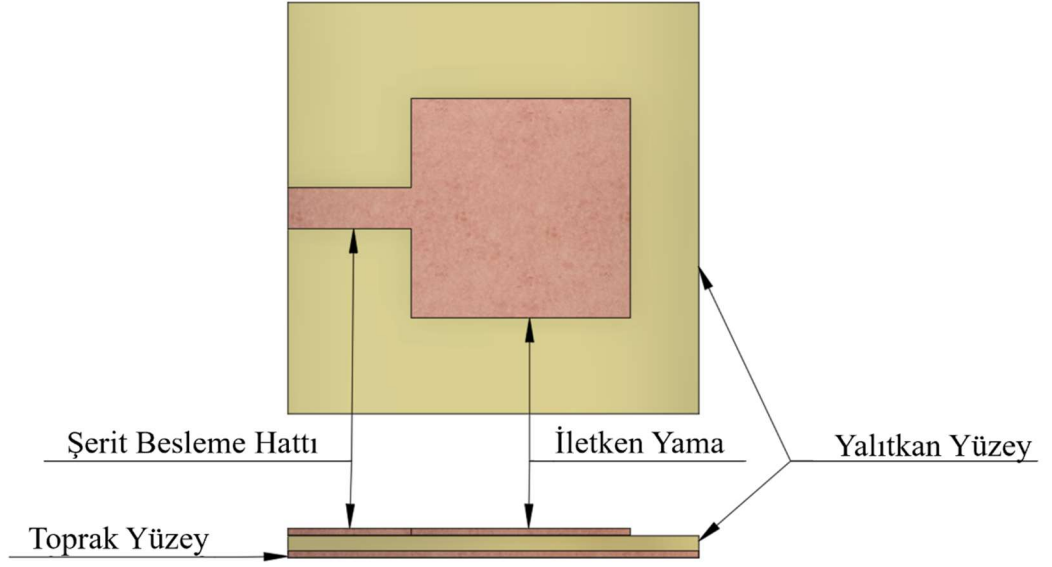
Besleme yönteminin seçimi, birçok faktöre göre değişiklik göstermektedir. Bu faktörlerden biri, beslemeyle ışıma yapacak olan yamanın empedans uyumudur, ki bu önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır. Gücün yüksek verimle iletilmesi ve yansımanın düşük seviyede tutulması için, bu iki tabaka arasında empedans uyumunun sağlanması gereklidir. Aksi takdirde, istenmeyen ışımlar meydana gelebilmektedir. Besleme yönteminin dizi anten uygulamalarına uygunluğu da dikkate alınması gereken diğer bir faktördür. Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme tekniklerinin karşılaştırılması Çizelge 3.3 verilmektedir.

Çizelge 3. 3. Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme tekniklerinin karşılaştırılması[75]

Karakteristik Özellikleri	Mikroşerit Hat Besleme	Koaksiyel Hat Besleme	Yakınlık Kuplajlı Besleme	Açıklık Kuplajlı Besleme
Yapı	Eş düzlemlili	Farklı düzlemlili	Paralel düzlemlili	Paralel düzlemlili
Yanlış Besleme Radyasyonu	Çok	Az	Az	Yok
Polarizasyon Uyumluluğu	İyi	Kötü	Kötü	Daha iyi
Üretim Kolaylığı	Kolay	Delme ve lehimleme gerekli	Paralel hizalama gerekli	Paralel hizalama gerekli
Güvenilirlik	Daha iyi	Lehimleme nedeniyle kötü	İyi	İyi
Empedans Uyumu	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Bant Genişliği (Empedans uyumu yakalandığında)	%2-%5	%2-%5	%13	%21

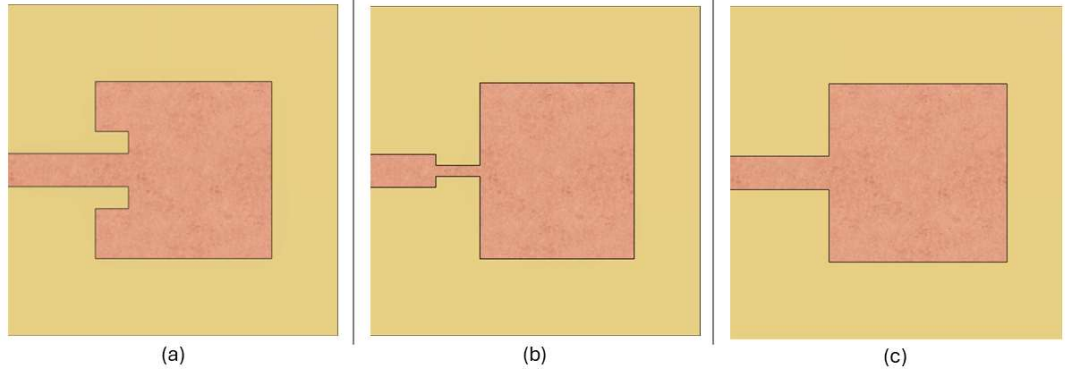
3.4.1. Mikroşerit İletim Hatlı Besleme

Şekil 3. 9’da mikroşerit iletim hatlı dikdörtgen MA gösterilmektedir. Bu beslemede giriş besleme iletim hattı, ışımayı gerçekleştirecek olan yamanın kenarına doğrudan bağlanmaktadır. İletim hattının genişliği yamaya göre daha ince tasarlanmaktadır.



Şekil 3. 9. İletim hatlı mikroşerit anten

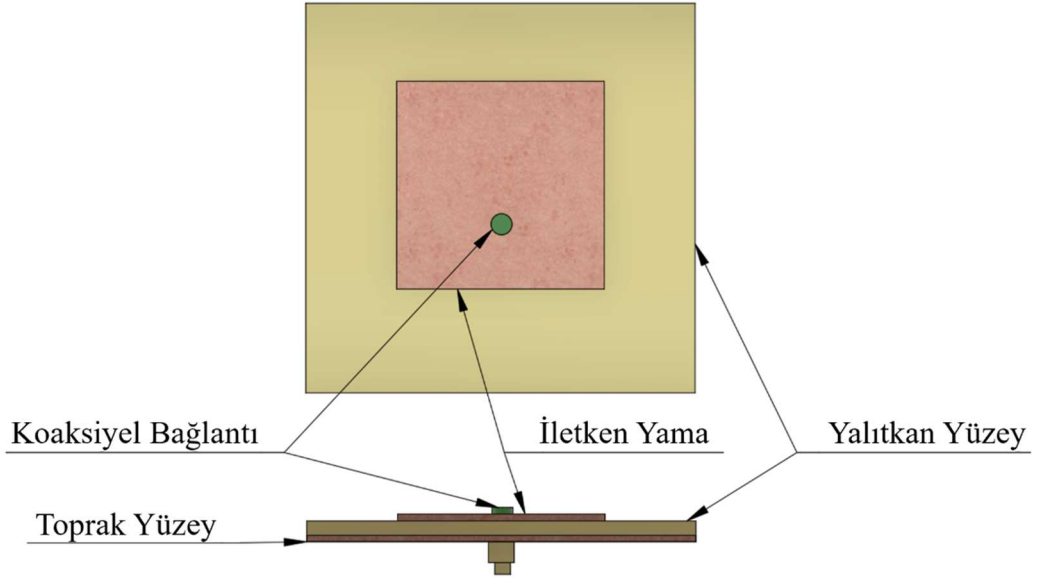
Aynı yalıtkan alttaş üzerinde mikroşerit besleme ile iletken yamanın kullanılması, iletken yamanın mikroşerit beslemenin bir parçası gibi görünmesini sağlar. Bundan dolayı mikroşerit antenin tasarımı ve üretimi kolaydır. Fakat bu tekniğin bazı dezavantajları mevcuttur. İlk olarak, besleme hattından kaynaklanan yayılım, yüzey akım yoğunluğunu artırabilmektedir. Ek olarak, milimetre-dalga seviyesinde besleme mikroşerit hattının ölçüleri, iletken yamaya göre istenmeyen yayılmaya sebep olabilmektedir. Bir diğer olumsuzluk ise kenar bağlantılı beslemelerde empedans uyumsuzluğudur. İletken yamanın ışımaya yapan kenarının giriş empedansı, besleme hattının 50Ω 'luk empedansına kıyasla oldukça yüksek olmasından dolayı yama kenarı ile 50Ω 'luk mikroşerit hat arasında harici empedans uyumlandırma devresi kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak alttaş kalınlığı arttırıldığında istenmeyen ışımalar artabilir, bu da bant genişliğini yaklaşık olarak %5 oranında düşürebilmektedir. İletim hatlı beslemedeki dezavantajların giderilebilmesi için kullanılan içe girintili (a), çeyrek dalga dönüşümlü (b) ve kenar bağlantılı (c) besleme yöntemlerinin geometrik yapıları Şekil 3. 10'da gösterilmektedir. Bunlardan çeyrek dalga dönüşümlü ve içe girintili besleme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır [80].



Şekil 3. 10. (a) içe girintili, (b) çeyrek dalga dönüşümlü, (c) kenar bağlantılı

3.4.2. Koaksiyel Besleme

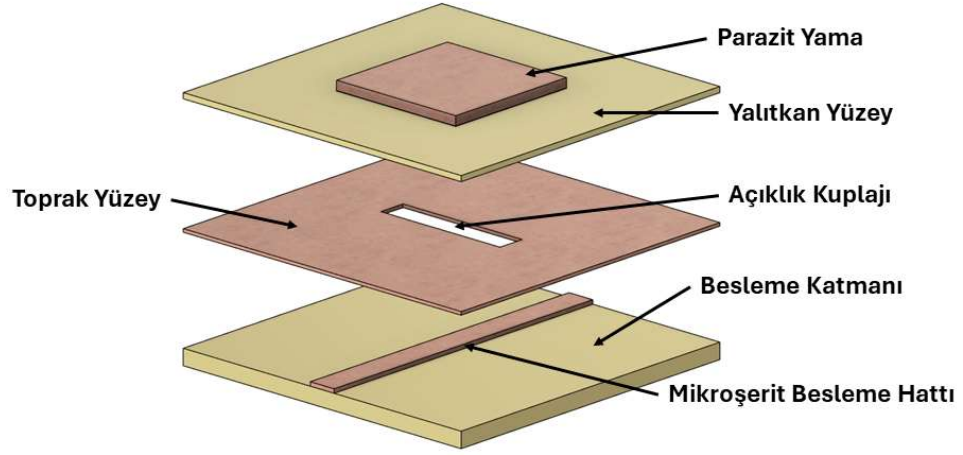
Koaksiyel beslemede mikroşerit iletim hatlı beslemeden farklı bir koaksiyel hat kullanılmaktadır. Bu hat iç ve dış iletken oluşmaktadır. İç iletken alttaşa açılan delikle ışına yapan yamaya bağlanırken dış iletken anten toprağına bağlanmaktadır. Koaksiyel bağlantı noktası ışına düzlemine istenilen bir noktadan bağlanabilmektedir. Bu nokta, tasarım aşamasında yapılacak olan simülasyonlarla en optimum empedans uyumunu gerçekleştirecek şekilde tespit edilebilmektedir. Kullanım kolaylığı ve yüksek veriminden dolayı sıkça kullanılmaktadır. En önemli dezavantajlarından birisi bant genişliğinin dar (%2-%5) olmasıdır. Alttaş kalınlığı arttığında iç hat uzunluğu artacağı için bant genişliği azalabilmektedir ve koaksiyel beslemede olumsuzluklar oluşabilmektedir. Bunun yanı sıra, koaksiyel hattın iletkenin yüzeyini delip geçmesi ve lehim kullanımı, yüzey akımlarında kaçığa neden olarak ışına verimini azaltabilmektedir. Şekil 3. 11’de koaksiyel bağlantılı mikroşerit anten yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. 11. Koaksiyel hatlı mikroşerit anten

3.4.3. Açıklık Kuplajlı Besleme

Bu yöntemin en belirgin özelliği; daha büyük bant genişliği sağlaması ve yamadaki ışımının besleme sisteminden sızan ışımadan korunmasıdır. Bu yöntemde temel toprak tabakayla birbirinden ayrılmış iki alt tabaka kullanılır. Mikroşerit hat beslemesi en alttaki tabakanın alt tarafında bulunur. Bu hat, iki tabakayı ayıran toprak tabaka içindeki bir yarık aracılığıyla, yamaya enerjisini verir. Bu yarık, herhangi bir boyut ve şekilde olabilmektedir. Yarık parametreleri bant genişliğini artırmak için kullanılabilir. Alt tabaka parametreleri, beslemenin en verimli olacağı şekilde ve ışım tabakasından etkilenmeyecek şekilde seçilir. Örneğin; yama yüzeyi kalın ve düşük dielektrik sabitine sahipken, besleme hattı ince ve kalın dielektrik sabitine sahip olmalıdır. Ayrıca besleme hattının açık ucundaki ışım, toprak plakanın koruyucu etkisinden dolayı, yamanın ışım diyagramıyla karışmaz. Açıklık kuplajlı besleme ile beslenen bir mikroşerit anten Şekil 3. 12’de gösterilmiştir.

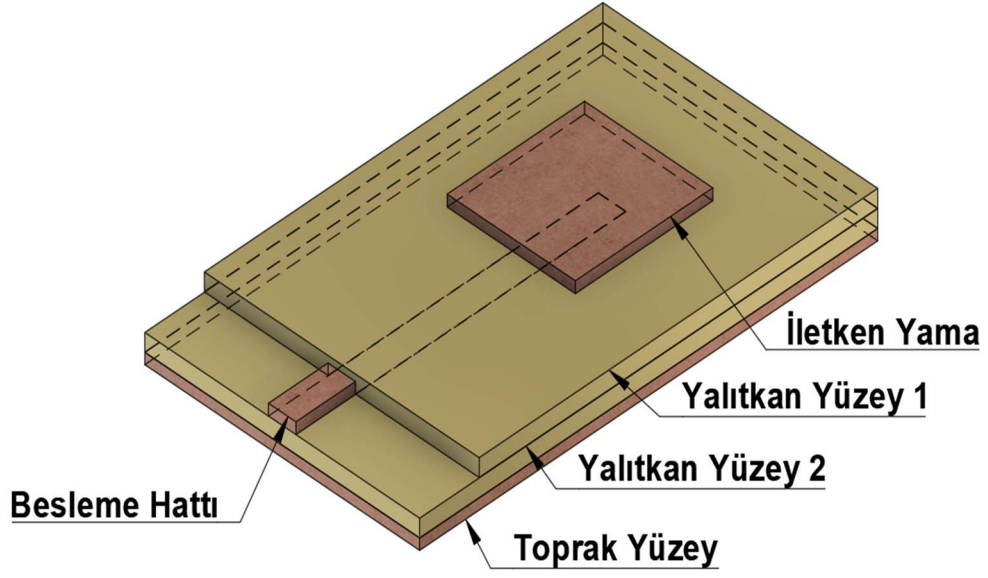


Şekil 3. 12. Açıklık kuplajlı mikroşerit anten

Bu yöntemde genellikle alt tabaka için dielektrik katsayısı yüksek malzeme, üst tabaka için ise dielektrik katsayısı düşük malzeme kullanılır. Bu yöntemin modellenmesi kolaydır ve parazit ışıması düşüktür. Fakat dört besleme yöntemi içinde üretimi en zor olan yöntem, açıklık kuplajlı beslemedir.

3.4.4. Yakınlık Kuplajlı Besleme

Elektromanyetik kuplaj olarak da adlandırılan bu yöntemde iki dielektrik tabaka kullanılır ve besleme hattı iki dielektrik tabaka arasına, yama ise üstteki dielektrik malzemenin üstüne yerleştirilir. Bu yöntemde yama ve besleme hattı ayrı düzlemlerde olduklarından dolayı birbirlerine temas etmezler. Işıyan yamanın iki dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmesi daha büyük bant genişliği sağlar. En yüksek bant genişliğine sahip besleme yöntemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem kullanılarak %13 bant genişliği elde edilebilmektedir. Yakınlık Kuplajlı Besleme ile beslenen bir mikroşerit anten Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



Şekil 3. 13. Yakınlık kuplajlı mikroşerit anten

Bu yöntemin modellenmesi kolay olmakla beraber düşük parazit ışıması yapmaktadır. Fakat yapısından dolayı üretimi zordur. Çünkü yama ile besleme hattının aynı hizada olması gerekmektedir. Bu problem lehimleme ile giderilebilmektedir.

3.4.5. Mikroşerit Antenlerde Kullanılan Alternatif Besleme Teknikleri

Mikroşerit besleme ağı (Microstrip Network Feed), mikroşerit antenlerin beslenmesinde kullanılan alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu teknikte, antene birden fazla besleme noktasıyla veya mikroşerit hatlar aracılığıyla sinyal iletilir. Mikroşerit besleme ağı, antenin çalışma frekanslarını çeşitlendirebilmekte, çok bantlı çalışmayı destekleyebilmekte veya karmaşık radyasyon desenleri elde etmek için kullanılabilir. Bu yöntem, antenin performansını artırmak ve çeşitli uygulama gereksinimlerini karşılamak için yaygın olarak tercih edilmektedir[81].

3.5. MİKROŞERİT ANTENLERDE KULLANILAN ANALİZ YÖNTEMLERİ

Bu bölümde, mikroşerit antenlerin analizinde kullanılan popüler yöntemler incelenmektedir. Bu yöntemler arasında Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method-FEM), Moment Yöntemi (Method of Moment-MoM), Sonlu İterasyon Yöntemi (Finite Integration Method-FIT), Zaman Domainde Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain-FDTD) ve İletim Hattı Matrisi Yöntemi (Transmission Line Matrix Method-TLM) bulunmaktadır. Her bir yöntem, mikroşerit antenlerin elektromanyetik özelliklerini analiz etmek ve optimize etmek için farklı yaklaşımlar sunmaktadır.

3.5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method-FEM)

Sonlu Elemanlar Yöntemi, karmaşık yapıların analizinde kullanılan sayısal yöntem olarak görülmektedir. Bu yöntem, çözülmesi zor olan problemleri küçük alt problemlere ayırarak ve bunları kendi içerisinde çözerek çözüme ulaştırması büyük bir avantajdır. Bu yöntemi baz alan birçok akademik çalışma mevcuttur[82–85]. FEM'in üç temel özelliği bulunmaktadır. İlk olarak, geometrik şekli daha kolay ve hassas bir şekilde çözümlenmek amacıyla çözüm bölgesi, sonlu elemanlar olarak adlandırılan yöntemle daha kolay alt segmentlere ayrılır. Bu ayrıklaştırma işlemine 'meshing' adı verilmektedir. İkinci olarak, tüm fonksiyonlar, matematiksel polinomların doğrusal olarak ifade edilebileceği varsayımıyla kabul edilir. Üçüncü olarak, aranan değerlerin her elemanın içerisinde tanımlanmış denklemlerin belirlenen noktalarda problemin çözümü için yeterli olduğu varsayılır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları, interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi, çözülmesi istenen problem denkleminin derecesine ve çözümü yapılacak denklemde belirlenmiş olan elemanlarındaki düğüm sayılarına bağlıdır. FEM, malzeme özelliklerinin ve geometrinin doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanır ve genellikle üçgen veya dörtgen gibi küçük elemanlara bölünmüş yapıları kullanarak her elemanın davranışını modeller ve sonuçları bir araya getirir[86].

Bu yöntemde, alan, iki boyutlu problemleri çözmek için üçgen veya dörtgen şeklinde alt alanlara (mesh) bölünerek ayrıklaştırılmaktadır. Ayrıca, üç boyutlu problemleri

çözmek için geometrik şekiller prizma, altı yüzlü veya dört yüzlü mesh olarak ele alınabilmektedir. Her bir alt alan, elektromanyetik özelliklere sahiptir. Bir nesnenin sağladığı akım kaynağı \mathbf{J}^{int} . Hem manyetik hem de elektrik akım yoğunluklarının varlığı göz önüne alındığında, Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\nabla \times \mathbf{E}(r) = -\mathbf{M}^{int}(r) - j\omega\mu_0\mu_r\mathbf{H}(r)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(r) = \mathbf{J}^{int}(r) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E}(r)$$

Eşitlik 3.10 ve 3.11’de, \mathbf{J}^{int} ve \mathbf{M}^{int} sırasıyla iç elektrik ve manyetik kaynakları temsil eder. Yukarıdaki denklemlere uygulanan curl operatörü, FEM yönteminin başlangıç noktası olarak adlandırılan eşitlikler, Eşitlik 3.12 ve Eşitlik 3.13’tür.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{j\omega\mu_0\mu_r} \nabla \times \mathbf{E}(r) \right) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E}(r) = -\mathbf{J}^{int}(r) - \frac{1}{j\omega\mu_0\mu_r} \nabla \times -\mathbf{M}^{int}(r) \quad (3.12)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(r)} \nabla \times \mathbf{H}(r) \right) + j\omega\mu_0\mu_r\mathbf{H}(r) = -\mathbf{M}^{int}(r) - \frac{1}{j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(r)} \nabla \times \mathbf{J}^{int}(r) \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.12 ve Eşitlik 3.13 çarpılması ve ağırlık fonksiyonu $w(r)$ ile çarpılması, ardından bunların entegrasyonu alındığında, sırasıyla Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.15 elde edilir:

$$\begin{aligned} & \iiint_V^1 \left[\nabla \times \left(\frac{1}{j\omega\mu_0\mu_r} \nabla \times \mathbf{E}(r) \right) (w(r)) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E}(r) \times w(r) \right] dV \\ & = \iiint_V^1 \left[-\mathbf{J}^{int}(r) \times w(r) - \frac{1}{j\omega\mu_0\mu_r} \nabla \times \mathbf{M}^{int}(r) \times w(r) \right] dV \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} & \iiint_V^1 \left[\nabla \times \left(\frac{1}{j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(r)} \nabla \times \mathbf{H}(r) \right) (w(r)) + j\omega\mu_0\mu_r\mathbf{H}(r) \times w(r) \right] dV \\ & = \iiint_V^1 \left[-\mathbf{M}^{int}(r) \times w(r) - \frac{1}{j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(r)} \nabla \times \mathbf{J}^{int}(r) \times w(r) \right] dV \end{aligned} \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.15’e Stratton'un ilk teoremi uygulandığında, Eşitlik 3.16 elde edilir:

$$\begin{aligned}
& \iiint_V \left[\left(\frac{1}{j\omega\mu_0\mu_r} \nabla \times \mathbf{E}(r) \right) (\nabla \times w(r)) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(r)\mathbf{E}(r) \times w(r) \right] dV \\
& = \int_S \hat{n} \times \mathbf{H}(r) \times w(r) ds - \iiint_V \left[\mathbf{J}^{int}(r) \frac{1}{j\omega\mu_0\mu_r} \nabla \times \mathbf{M}^{int}(r) \times w(r) \right] dV \quad (3.16)
\end{aligned}$$

Böylece, elektrik alan bileşenleri Eşitlik 3.17 ve Eşitlik 3.18'deki gibi oluşturulabilmektedir:

$$\vec{\mathbf{E}}(r) = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n \vec{w}_n(r) \quad (3.17)$$

$$\hat{n} \times \vec{\mathbf{H}}(r) = \sum_{n=1}^N (J_s)_n \vec{f}_n(r) \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.18'deki J_s , olarak ifade edilen bilinmeyen parametreler kümesine eşdeğer bir yüzey üzerindeki elektrik akımını Eşitlik 3.19'da gösterilmektedir.

$$[A_{mn}][\mathbf{E}] = [B_{mn}][\mathbf{J}] + [G_m^{int}] \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.19'da $[A_{mn}]$ ve $[B_{mn}]$ seyrek ve aynı zamanda simetrik $N \times N$ matrisleridir, G_m^{int} ve $[\mathbf{E}]$ ise $N \times 1$ sütun vektörleridir ve matematiksel olarak Eşitlik 3.20, Eşitlik 3.21 ve Eşitlik 3.22'deki eşitliklerle verilmektedir.

$$A_{mn} = \iiint_V \left(\frac{1}{j\omega\mu_0\mu_r} \nabla \times \mathbf{E}(r) \right) \times (\nabla \times w(r)) \times j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(r)\mathbf{E}(r) \times w \, dV \quad (3.20)$$

$$B_{mn} = \int_S \vec{f}_n(r) \vec{w}_n(r) ds \quad (3.21)$$

$$[G_m^{int}] = - \iiint_V \left[\mathbf{J}^{int}(r) \frac{1}{j\omega\mu_0\mu_r} \nabla \times \mathbf{M}^{int}(r) \times w(r) \right] dV \quad (3.22)$$

Önceki tüm matrislerin hacim ağırlıklandırma fonksiyonu $w(r)$ 'ye kaynağı vardır. Bu, bir elektrik alanının, örneğin üçgen, dikdörtgen ve dört yüzlü gibi seçilen ayrıklaştırma geometrisi ile ilişkili olduğu anlamına gelir[87].

3.5.2. Moment Yöntemi (Method of Moment-MoM)

1968 yılında Harrington tarafından türetilen Moment Metodu, elektromanyetik problemlerin etkili bir şekilde çözümünde kullanılmıştır. MoM, frekans uzayında nümerik hesaplamalara dayanan elektromanyetik problemlerin analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olarak görülmektedir. MoM, elektromanyetik problemlerin analizinde yaygın olarak kullanılan bir sayısal yöntem olarak görülmektedir[85,88,89]. Bu metod, genellikle sağ tarafta dürtü fonksiyonu şeklinde bir terim bulunan Green fonksiyonu problemlerini ele alır. Sağ tarafta dürtü fonksiyonu, dış etkenlerin varlığını ve etkisini ifade eder. Bu tür problemler, elektromanyetik alanın birçok uygulama alanında karşımıza çıkar. Moment Metodu, bu karmaşık problemlerin çözümünde etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Moment Metodunun genel özellikleri şu şekildedir:

- Başlangıçta, incelenen yapıya ait Green fonksiyonu analitik olarak tespit edilmelidir.
- Ardından, yapı üzerinde meydana gelen yüzey akımları sayısal olarak hesaplanır.
- İncelenen yapının parçalara ayrılması ve yüzey akımlarının matris sistemine dönüştürülerek çözülmesi temeline dayanır.
- Matris sisteminin boyutu, parçaların sayısına bağlıdır. Parça sayısı arttıkça, matrisin tersini alma işlemi sırasındaki sayısal zorluklar nedeniyle hesaplama süresi ve karmaşıklığı artmaktadır[86].

Ele alınan integral denklemlere dayanan Moment Metodu tekniği; sadece iletken yapılar, homojen kayıpsız dielektrikler ve belirli iletken-kayıpsız yapılar için uygulanabilir. Özellikle, iletken tellerden oluşan üç boyutlu yapıların anten tasarımı veya bu yapıların yaydığı alanların modellenmesi gibi alanlarda Moment Metodu tekniği oldukça başarılıdır. Moment Metodu (MoM) tabanlı simülasyonlar, giriş empedansı, yakın ve uzak alan hesaplamaları, S parametreleri, metal yüzeylerdeki akım dağılımı ve metal yüzeylerin etkileşimi ve verimliliği gibi çeşitli çözümleri gerçekleştirebilir. Ayrıca, mikroşerit iletim hattı ve kenar portu, yakınlık ve açıklık bağdaştırma, dalga kılavuzu ve prop besleme gibi farklı besleme yöntemleri

tanımlanabilir. Bu tür simülasyonlar geniş bir dielektrik ve iletken malzeme kütüphanesine sahiptir ve kullanıcılar kendi malzeme modellerini tanımlayabilirler.

MoM yöntemini açıklamak için Eşitlik 3.22'de verilen denklemi temel alabiliriz;

$$L\varphi = u \quad (3.22)$$

L bilinen doğrusal operatörü, u ise bilinen kaynak fonksiyonu ifade etmektedir. φ 'yi bulmak için Eşitlik 3.23'de verilen ifadede, $K(x,x')$ ve $u(x)$ bilinmektedir.

$$\int_a^b K(x, x')\varphi(x') dx' = u(x) \quad (3.23)$$

MoM yönteminin ilk aşamasında, Eşitlik 3.24'teki gibi φ seçilen f_n temel fonksiyonlarıyla gösterilmektedir.

$$\varphi = \sum_{n=1}^N a_n f_n \quad (3.24)$$

Eşitlik 3.24'te verilen a_n genişletme katsayıları olup ilerleyen eşitliklerde belirlenecektir. Eşitlik 3.24'teki denklemi kullanarak Eşitlik 3.25 elde edilmektedir.

$$\sum_{n=1}^N a_n \int_a^b K(x, x')f_n(x') dx' = u(x) \quad (3.25)$$

Eşitlik 3.25'te verilen denklemdeki integrasyon analitik ve sayısal olarak uygulanabilmektedir. Tanım olarak ise Eşitlik 3.26'da verilen eşitlik seçildiğinde Eşitlik 3.27'deki eşitlik elde edilmektedir.

$$k_n(x) @ \int_a^b K(x, x')f_n(x') dx' @ \langle k(x, x'), F_n(x') \rangle \quad (3.26)$$

$$\sum_{n=1}^N a_n k_n(x) \cong u(x) \quad (3.27)$$

Bu sayede N üst limiti tanımlanmış olur. Eşitliğin iki tarafı da seçilmiş uygun ağırlaştırma veya test ($w_m(x)$) fonksiyonlarıyla çarpıldığında ve (a,b) aralığında integral hesaplandığında Eşitlik 3.28 elde edilmektedir.

$$(3.28)$$

$$\sum_{n=1}^N a_n \int_{\alpha}^b k_n(x) w_m(x) dx = \int_{\alpha}^b u(x) w_m(x) dx$$

Tanım olarak; Eşitlik 3.29 ve Eşitlik 3.30 seçildiğinde Eşitlik 3.31 elde edilmektedir.

$$[A]_{m,n} \triangleq \langle k_n, w_m \rangle \quad (3.29)$$

$$[u]_m \triangleq \langle u, w_m \rangle \quad (3.30)$$

$$\sum_{n=1}^N [A]_{m,n} a_n = [u]_m \quad (3.31)$$

(m=1,2,...N) olmak üzere işlem bütün w_m serisine uygulandığında Eşitlik 3.32 elde edilmektedir.

$$[A][a] = [u] \Rightarrow [a] = [A^{-1}][u] \quad (3.32)$$

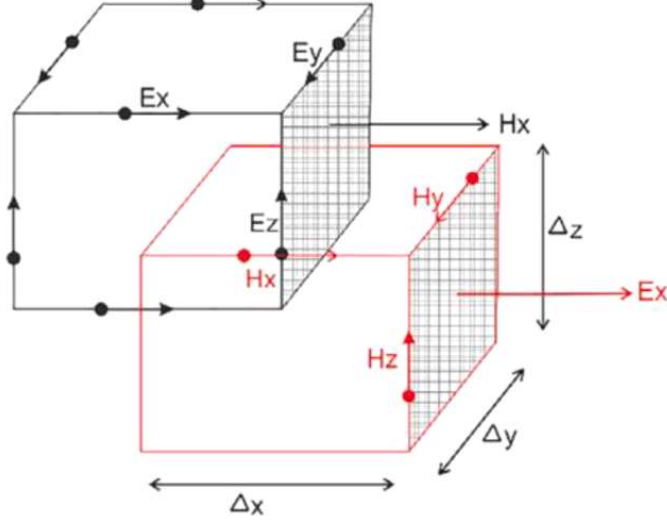
$$\varphi = [a][f]^t = [A]^{-1}[u][f]^t \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.25 ve Eşitlik 3.32 eşitliklerinden ise Eşitlik 3.33'e ulaşılmaktadır. Bu yöntemde f ve w fonksiyonlarını kolaylaştıracak ve $\sum a_n f_n$ serisine yakınsayacak bir şekilde seçilmesi gerekmektedir[86,90].

3.5.3. Sonlu İterasyon Yöntemi (Finite Integration Technique -FIT)

1977 yılında Weiland tarafından geliştirilen bir iterasyon tekniğidir ve Maxwell'in integral denklemleri gibi karmaşık işlemleri doğrusal bir forma dönüştürerek analizlerin daha kolay ve hassas hale gelmesini sağlaması avantajıdır. Bu formülasyon süreci, bilgisayar ortamında gerçekleştirilerek karmaşık yapıdaki geometrik yapıların elektromanyetik alanlarının daha kolay çözülmesine ve simüle edilmesine olanak tanımaktadır. FIT yöntemi esnek bir yapıya sahip olmasından dolayı karmaşık denklemleri doğrusal bir forma dönüştürerek daha hassas sonuçlar elde etme yeteneğine sahiptir. Özellikle geometrik yapıların oluşturulması kolay ve basittir. Eğer geometrik modellerin sınırları kavisli yapılar ise, FIT yöntemi çok daha doğru

sonuçlara ulaşma imkânı sunar[70]. Sonlu İterasyon ile ayrıştırma yöntemi Şekil 3.14'te gösterilmektedir. FIT, Maxwell Denklemlerini integral formunda çözmek için popüler olarak kullanılan sayısal tekniklerden biridir. Bu sayede mikroşerit antenlerin analizinde kullanılmaktadır[91–93]. FIT, Maxwell denklemlerinin integral formunu ayrıklaştırır ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi verilen hem zaman hem de frekans alanlarında sonuçlar elde etmektedir [87]:



Şekil 3. 14. Sonlu İterasyon ile ayrıştırma yöntemi [87]

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{A_p} \varepsilon_r(r) \mathbf{E}(r, t) dA = \oint_{\partial A_p} \mathbf{H}(r, t) dR - \iint_{A_p} \sigma(r) \mathbf{E}(r, t) dA \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{A_{p^*}} \mu_r(r) \mathbf{H}(r, t) dA^* = \oint_{\partial A_{p^*}} \mathbf{E}(r, t) dR - \iint_{A_{p^*}} \sigma^*(r) \mathbf{H}(r, t) dA^* \quad (3.35)$$

Eşitlik 3.34 ve Eşitlik 3.35'te $\mathbf{E}(r, t)$ ve $\mathbf{H}(r, t)$ sırasıyla kompleks elektrik ve manyetik alan genliklerini temsil etmektedir. $\varepsilon_r(r)$ ve $\mu_r(r)$ sırasıyla elektrik geçirgenliğini ve manyetik geçirgenliği göstermektedir. Bu türetimde bağıl geçirgenlik $\mu_r = 1$ olarak kabul edilmiştir. $\sigma(r)$ ve $\sigma^*(r)$ sırasıyla elektrik ve manyetik iletkenlikleri, A_p ve A_{p^*} sırasıyla elektrik alan ve manyetik alan yüzeyini ifade etmektedir. Eşitlik 3.34 ve Eşitlik 3.35, Şekil 3.14'te gösterildiği gibi belirli bir ağ boyutuna sahip üç boyutlu

kademeli bir ızgara üzerinde ayrıklaştırılırsa, Eşitlik 3.36 ve Eşitlik 3.37 elde edilecektir.

$$\frac{\mathbf{E}_h^{n+1} - \mathbf{E}_h^n}{\tau} \iint_{A_p} \epsilon r(r) dA = \oint_{\partial A_p} \mathbf{H}_h^{-n+1/2}(r) dR - \mathbf{E}_h^{-n+1} \iint_{A_p} \sigma(r) dA \quad (3.36)$$

$$\frac{\mathbf{H}_h^{n+1} - \mathbf{H}_h^{n-1/2}}{\tau} \iint_{A_p^*} \mu_r(r) dA^* = \oint_{\partial A_p} \mathbf{E}_h^n(r) dR - \mathbf{H}_h^{-n+1} \iint_{A_p} \sigma^*(r) dA^* \quad (3.37)$$

Burada, (τ) ayrık zaman adımlarını temsil etmektedir. Yukarıdaki denklemlerde, elektrik ve manyetik vektör alanları $n = 0, 1, 2$ için ($n\tau$)'ya karşılık gelen zamana bölünür. Bileşenlerinin son hali Eşitlik 3.38'de elde edilmektedir.

$$\mathbf{E}_x|_n^{n+1} = \frac{1}{1 + \tau \frac{\widetilde{\sigma}_p}{\epsilon_p}} \mathbf{E}_x|_M^n + \frac{1}{1 + \tau \frac{\widetilde{\sigma}_p}{\epsilon_p}} \left[\frac{\mathbf{H}_z|_N^{n+1/2} - \mathbf{H}_z|_S^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{\mathbf{H}_z|_T^{n+1/2} - \mathbf{H}_y|_D^{n+1/2}}{\Delta z} \right] \quad (3.38)$$

Elektrik alan türetimine benzer şekilde, manyetik alan bileşenleri x,y,z cinsinden yazılabilmektedir. Eşitlik 3.39'da gösterildiği gibi manyetik alan bileşenleri, elektrik alan bileşeninin integrali alınarak hesaplanır ve manyetik vektör bileşeni Şekil 3.14'te gösterildiği gibi elektrik alan vektörlerinin yüzeyine dik olarak yerleştirilir

Eşitlik 3.40'ta gösterildiği gibi manyetik alanın y ve z bileşenleri \mathbf{H}_x olarak yazılabilmektedir. Bu sayısal yöntemlerle ilgili bu bilgiler ışığında, farklı mikroşerit anten tipleri için hangi yöntemin çözümünün daha fazla doğruluk sağladığı belirlenebilmektedir.

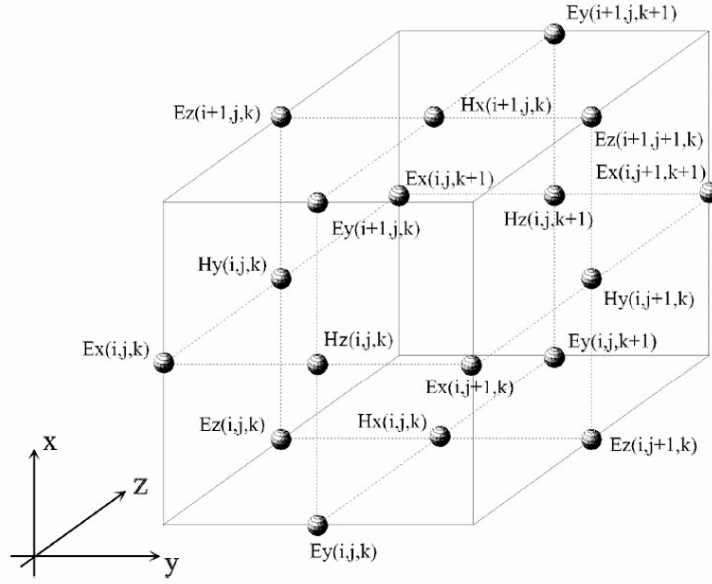
$$\iint_{A_p^*} \mu_r(r) dA^* = \mu_0 \Delta y \Delta z \quad (3.39)$$

$$\mathbf{H}_x|_M^{n+1/2} = \frac{1}{1 + \tau \frac{\widetilde{\sigma}_p^*}{\mu_0}} \mathbf{H}_x|_M^{n+1/2} + \frac{1}{1 + \tau \frac{\widetilde{\sigma}_p^*}{\mu_0}} \left[\frac{\mathbf{E}_y|_T^n - \mathbf{E}_0|_D^n}{\Delta y} - \frac{\mathbf{E}_z|_N^n - \mathbf{E}_z|_S^n}{\Delta z} \right] \quad (3.40)$$

3.5.4. Zaman Domainde Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain-FDTD)

FDTD yöntemi, Maxwell denklemlerinin sayısal çözümü için kısmi türev operatörlerinin merkezi farklara dayalı sonlu farklar eşleniğiyle zaman ve konum alanında sayısallaştırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntem, Maxwell denklemlerindeki diferansiyel operatörleri sayısal olarak ifade ederek sonlu farklar eşdeğerleriyle değiştirmektedir. Ardından, elde edilen ayrık denklemler, iteratif olarak çözülürken ele alınan yapının sınır koşullarını da dikkate almaktadır. Bu yöntem, ilk olarak 1966'da Yee tarafından önerilmiştir. Bu yöntem, sürekli elektromanyetik dalgaların bilgisayar ortamında belirli bir uzayda nasıl yayıldığını simüle etmek için örneklenmiş verileri kullanmaktadır. Her zaman adımında gerçek elektromanyetik dalga davranışının tahmin edilmesi, incelenen yapının içinde ve çevresindeki bilinmeyen alanların bir zaman periyodu boyunca hacimsel olarak örneklenmesine dayanmaktadır. [86]. Bu sayede mikroşerit antenlerin analizinin ve tasarımında kullanılmaktadır[94–96].

Zaman Domainde Sonlu Farklar Yöntemi denklemlerinde, herhangi bir ortam, ϵ dielektrik sabiti, μ manyetik geçirgenlik ve σ ısı kayıplarını ifade eden üç ortam parametresiyle tanımlanmaktadır. Bu parametreler, elektrik alan bileşenlerinin hesaplandığı denklemlerde ϵ ve σ içerirken, manyetik alan bileşenlerinin hesaplandığı denklemlerde μ kullanılır. Zaman Domainde Sonlu Farklar Yöntemi benzetimi süresince, elektrik ve manyetik alanlar sürekli olarak güncellenir, fakat herhangi bir noktada gerilim veya akımın hesaplanması oldukça basittir. Herhangi bir (i, j, k) hücresindeki gerilim ve akım, Gauss ve Amper yasaları temel alınarak elde edilir. FDTD benzetimi, sinüzoidal ve darbesel kaynakların modellenmesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3.15'te Birim Yee hücresi gösterilmektedir.



Şekil 3. 15.Birim Yee hücresi [97]

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) = u_{i,j,k}^n \quad (3.41)$$

Eşitlik 3.41'de sunulan fonksiyon ifadesi, uzay ve zaman türevlerini içeren FDTD yöntemleriyle ilgilenmektedir. Bu yöntemler, ileri, geri ve merkezi farklar gibi farklı yaklaşımları içermektedir. Merkezi farklar yöntemi kullanıldığında, zaman ve konum bağımlılıklarını içeren kısmi diferansiyel denklemler seti elde edilmektedir. Eşitlik 3.42-3.47 arasında, zaman ve konum değişkenlerine göre ayrılmış altı denklem olarak ifade edilebilmektedir.

$$H_x^{n+1/2}(i, j, k) = H_x^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu_x(i, j, k)} \left[\frac{E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta z(k)} - \frac{E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta y(j)} \right] \quad (3.42)$$

$$H_y^{n+1/2}(i, j, k) = H_y^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu_y(i, j, k)} \left[\frac{E_z^n(i+1, j, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta x(i)} - \frac{E_x^n(i, j, k+1) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta z(k)} \right] \quad (3.43)$$

$$(3.44)$$

$$H_z^{n+1/2}(i, j, k) = H_z^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu_z(i, j, k)} \left[\frac{E_x^n(i, j+1, k) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta y(j)} - \frac{E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta x(i)} \right]$$

$$E_x^{n+1/2}(i, j, k) = \frac{\varepsilon_x(i, j, k) - 0.5\Delta t\sigma_x(i, j, k)}{\varepsilon_x(i, j, k) + 0.5\Delta t\sigma_x(i, j, k)} E_x^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_x(i, j, k) + 0.5\Delta t\sigma_x(i, j, k)} \times \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i, j+1, k) - H_y^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta t(j)} - \frac{H_y^{n+1/2}(i, j, k+1) - H_x^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta z(k)} \right] \quad (3.45)$$

$$E_y^{n+1/2}(i, j, k) = \frac{\varepsilon_y(i, j, k) - 0.5\Delta t\sigma_y(i, j, k)}{\varepsilon_y(i, j, k) + 0.5\Delta t\sigma_y(i, j, k)} E_y^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_y(i, j, k) + 0.5\Delta t\sigma_y(i, j, k)} \times \left[\frac{H_x^{n+1/2}(i, j, k+1) - H_z^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta z(k)} - \frac{H_z^{n+1/2}(i+1, j, k) - H_x^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta x(i)} \right] \quad (3.46)$$

$$E_z^{n+1/2}(i, j, k) = \frac{\varepsilon_z(i, j, k) - 0.5\Delta t\sigma_z(i, j, k)}{\varepsilon_z(i, j, k) + 0.5\Delta t\sigma_z(i, j, k)} E_z^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_z(i, j, k) + 0.5\Delta t\sigma_z(i, j, k)} \times \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i+1, j, k) - H_x^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta x(i)} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1, k) - H_z^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta y(j)} \right] \quad (3.47)$$

FDTD tekniğinde zaman aralığı (Δt), konum adımlarına ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) bağlı olarak seçilmektedir. Courant Kriteri adı verilen bağıntı Eşitlik 3.48'de ifade edilmiştir.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (3.48)$$

Zaman Domainde Sonlu Farklar Yönteminde dalga hareketinin zaman aralığı hücre içerisinde kalabilmesi ve denklemlerinin kararlı olabilmesi için zaman aralığı yeterince küçük seçilmelidir [97,98].

3.5.5. İletim Hattı Matrisi Yöntemi (Transmission Line Matrix Method-TLM)

TLM yöntemi, iletim hattı modellemesi için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, alan teorisi ile devre teorisi arasında bir eşdeğerlik kurar. Benzer şekilde FDTD yöntemi gibi, TLM yöntemi de üç boyutlu fiziksel problemleri bir dizi küçük hücrenin toplamı olarak ele alır. Ancak, FDTD'deki gibi, TLM'deki küçük hücreler de birim hücre olarak

adlandırılır ve yapısal olarak özdeşirler. Zaman alanında dalga olaylarını simüle etme yaklaşımları benzer olsa da FDTD ve TLM yöntemlerinin birim hücre yapıları tamamen farklıdır. FDTD'deki birim hücre mantığı, Maxwell denklemlerinin zaman alanında iteratif olarak çözülmesinden kaynaklanır ve altı alan bileşeni içerir. Diğer yandan, TLM yöntemi birim hücre mantığı iletim hattı modellemesine dayanır ve bağımsız değişkenler olarak gerilim ve akımla ilgilenir[86]. Mikroşerit anten tasarımında ilk adım genellikle anten boyutlarının belirlenmesidir ve bu amaçla mikroşerit anten denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemler, anten boyutlarıyla ilgili temel bilgileri sağlar ve istenen performans özelliklerine ulaşmak için boyutların ayarlanmasına olanak tanımaktadır. Anten tasarımında yaygın olarak kullanılan formüller literatürde mevcuttur ve bu formüller, anten boyutları hakkında genel bir anlayış sağlar. Bu bilgiye dayanarak, anten boyutları üzerinde yapılan küçük değişikliklerle istenilen sonuçlara ulaşılabilmektedir.

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.49)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (W/h > 1 \text{ için}) \quad (3.50)$$

$$\Delta L = 0.412 h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.51)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}} \mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.52)$$

Burada W= İletken yüzeyin genişliği,

L= İletken yüzeyin uzunluğu,

f_r = Merkez frekansı,

ϵ_r = Dielektrik malzemenin dielektrik sabiti,

ϵ_{reff} = Dielektrik malzemenin etkin dielektrik sabiti,

h= Dielektrik malzemenin kalınlığı,

ΔL = İletken yüzeyin her iki tarafa genişleme mesafesi,

c = Işık hızı= 3×10^8 m/s

μ_0 = 1.2566×10^{-6} Weber

ϵ_0 = 8.8542×10^{-12} Farad/m², dir.

Yukarıda belirtilen formüller sayesinde bir mikroşerit antenin ham tasarımı yapılabilmektedir. Tasarımı gerçekleştirebilmek için dielektrik malzemenin sabiti (ϵ_r), dielektrik malzemenin yüksekliği (h) ve merkez frekansı (f_r) bilinmelidir. Bu parametrelerle iletken yüzeyin genişliği (W) ve uzunluğu (L) bulunabilmektedir. Yamanın genişliği ve uzunluğunu bulabilmek için sırasıyla aşağıdaki adımlar gerçekleştirilmelidir.

- Etkin bir ışınım için iletken yüzey genişliği (W) eşitlik (3.49) kullanılarak hesaplanmaktadır.
- Eşitlik (3.50) kullanılarak mikroşerit antenin etkin dielektrik sabiti bulunmaktadır.
- İletken yüzeyin her iki tarafında meydana gelen genişleme uzunluğu (ΔL), eşitlik (3.51) kullanılarak belirlenmektedir.
- Eşitlik (3.52) kullanılarak yamanın gerçek uzunluğu (L) hesaplanmaktadır [99].

İletim hattı modeli, diğer yöntemlere nazaran basittir. İletim hattı modelinin dezavantajı ise doğruluğunun diğer yöntemlere göre az olmasıdır. Ancak diğer yöntemlere göre daha az karmaşık olmasından dolayı mikroşerit anten çalışmalarında en çok tercih edilen yöntemlerden biridir[100–102]. Bu tez çalışmasında mikroşerit antenin tasarımı İletim Hattı Matrisi Yöntemi esas alınarak yapılmıştır.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEMLER

4.1. DİELEKTRİK MALZEME SEÇİMİ

4.1.1. Rogers RT/Duroid 5880

Rogers RT/Duroid 5880, düşük dielektrik sabiti ve düşük dielektrik kaybına sahiptir. Bu sayede yüksek frekans/geniş bant uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır[103–106]. Rogers RT/Duroid'in en büyük avantajı milimetre dalga bantlarında 2.2 gibi düşük dielektrik katsayısına sahip olmasından dolayı yüksek rezonans bant frekansları elde edebilmektir. Gelişen 5G teknolojisi, ihtiyaç duyulan yüksek frekans bantları bu gibi düşük dielektrik katsayılı malzemelere olan ihtiyacı gün geçtikçe zorunlu hale getirmektedir. 0,0009 gibi düşük tanjant kaybına sahip olması da yüksek frekansta düşük geri dönüş kayıpları elde edebilmede en önemli avantajından biri olarak öne çıkmaktadır. En önemli dezavantajları ise yüksek maliyeti ve tedarik sorunudur. Ayrıca başka bir dezavantajı da çok ince olmasından dolayı üretim zorlukları olarak öne çıkmaktadır. Prototip üretimi yüksek hassasiyetli PCB işleme cihazlarında mümkün olmaktadır. Bu sebeple prototip üretiminde zaman ve tedarik sorunu ortaya çıkmaktadır [107].

4.1.2. Rogers 4003C

Rogers 4003C, mikroşerit antenler için özel olarak geliştirilmiş bir alttaş malzemesidir. Bu malzeme, RF ve mikrodalga uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [108–110]. Düşük dielektrik sabitine ($\epsilon_r = 3.38$) sahip olması önemli özelliklerinin başında gelmektedir.

Bu özellik, yüksek frekanslı sinyallerin iletilmesinde oldukça önemlidir çünkü düşük dielektrik sabiti, dalga boyunu kısaltmakta ve buna bağlı olarak daha yüksek bant genişliği ve daha düşük dielektrik kaybına sahiptir ($\tan\delta = 0.0027$). Ayrıca, düşük kayıplı bir malzeme olması, iletim hatları boyunca daha tutarlı sinyal iletimi sağlamaktadır. Son olarak, işlenebilir bir malzeme olduğundan çeşitli üretim yöntemleriyle şekillendirilebilir ve monte edilebilmektedir. Rogers 4003C, yüksek frekanslı uygulamalarda güvenilir ve etkili bir seçenek olarak bilinmektedir. Fakat Rogers 4003C dezavantajları arasında yüksek maliyet, tedarik zorlukları ve işleme zorlukları malzemenin seçiminde dikkate alınması gereken faktörlerin başında gelmektedir [111].

4.1.3. FR4

FR4 alttaş malzemesi, dokuma camla takviye edilmiş bir epoksi matrisinden oluşur. Epoksi reçine ve fiber camın bileşimi, kalınlığa göre değişkenlik gösterir. Polimer reçine kompozitlerin bir özelliği, malzeme özelliklerini kaybetmeden yeniden şekillendirilebilmesidir. Malzemenin bileşim oranı, %40 epoksi reçine ve %60 fiber camdır. Şekil 4. 1 (a)'da bakır kaplanmamış FR4 bulunmaktadır. Genellikle basılan antenlerin maliyeti, alttaş malzemesine bağlıdır. FR4, 1 GHz'in üzerindeki mikroşerit anten üretimi için maliyetinin düşük olması, üretim kolaylığı açısından yaygın olarak tercih edilmektedir. FR4 alttaşın iki yüzüne bakır kaplaması yapılarak mikroşerit antenin toprak ve yama yüzeyleri oluşturulmaktadır. Şekil 4.1 (b)'de bakır kaplanmış FR4 bulunmaktadır. FR4 alttaşının dielektrik sabiti 4.6'dır. Kayıp tanjantı 0.015 ila 0.035 arasındadır. FR4'ün kayıp tanjantı, birçok elektronik uygulamada olduğu gibi radyo frekansı uygulamaları için de genellikle kabul edilebilir seviyede görülmektedir. Yalıtkan yüzeyinin kalınlığı 1,6 mm ve bakır kalınlığı 35 μm 'dir. FR4 alttaşının maliyet, yalıtım gibi avantajları olmasına rağmen diğer alttaşlara göre kayıplarının, boyutu ve kalınlığının fazla olması gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında yüksek frekans bandı kullanılmamasından dolayı ve yüksek maliyet ve tedarik zorlukları gibi dezavantajlardan dolayı FR4 malzemeyle tasarımı ve prototip üretimi yapılmıştır.

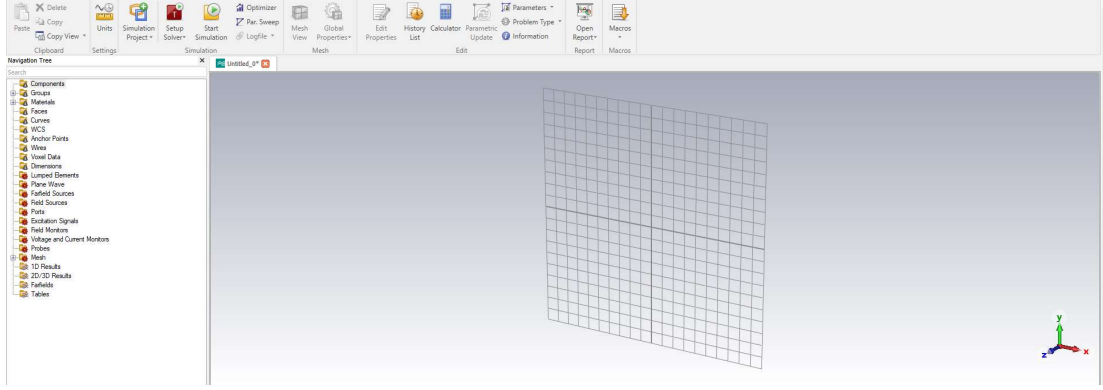


Şekil 4. 1. (a) bakır kaplanmamış FR4 (b) bakır kaplanmış FR4

4.2. MİKROŞERİT ANTEN TASARIMINDA KULLANILAN ÖNE ÇIKAN YAZILIMLAR

4.2.1. CST Studio Suite

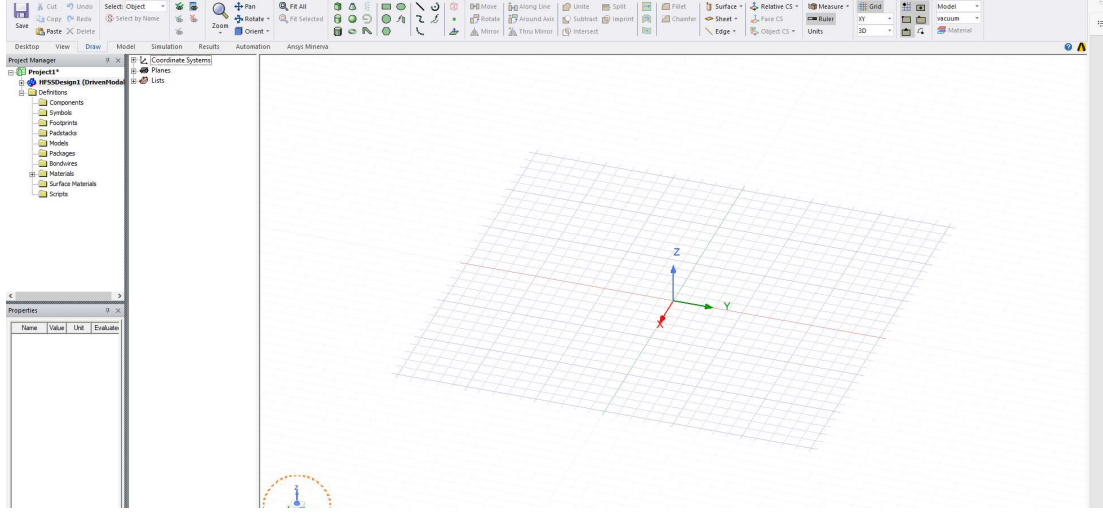
CST Studio Suite, elektromanyetik alan simülasyon yazılımlarından biridir ve özellikle anten tasarımında çokça tercih edilen yazılımın başında gelmektedir. Bu yazılım sayesinde antenlerin elektromanyetik hareketleri modellenilebilmekte, simüle edilebilmekte ve analiz edilebilmektedir. CST Studio Suite, mühendislere geniş bir anten tasarım imkânı sunmakta ve bu tasarımların performansını değerlendirmek için çeşitli analiz araçları sağlamaktadır. Mühendisler, CST Studio Suite'i kullanarak antenlerin geometrik yapısını oluşturabilmekte, malzeme özelliklerini tanımlayabilmekte ve tasarımını yaptıkları antenlerini simülasyon sonuçlarıyla elektromanyetik özelliklerini inceleyebilmektedir. CST Studio Suite yazılımı sayesinde S_{11} , VSWR, ışınma örüntüsü, yüzey akımları, anten kazancı, yönlülük ve verimlilik gibi performans parametreleri elde edilebilmektedir. Simülasyon sonuçları sayesinde, kullanıcılar antenlerin performansını optimize edebilmekte ve istenilen düzeye getirebilmektedir. Bu tez çalışmasında, anten simülasyonları ve sayısal sonuçlar için CST Studio Suite 2022 Learning Edition kullanılmıştır. Şekil 4.2'de CST kullanıcı ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 4. 2. CST kullanıcı ara yüzü

4.2.2. Ansys HFSS

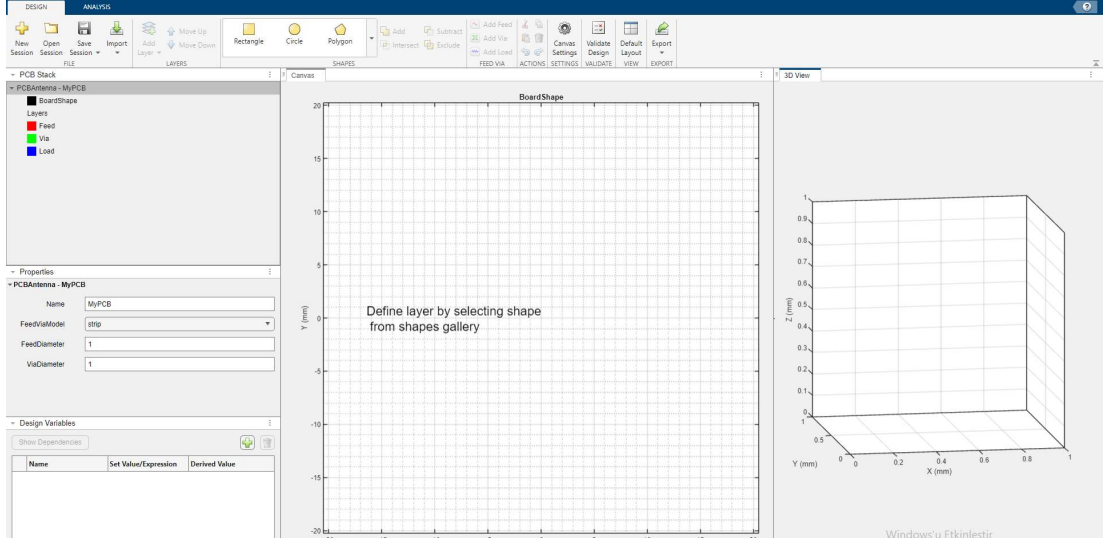
HFSS, yüksek frekanslı elektromanyetik alan simülasyonu için kullanılan bir yazılım programıdır. HFSS, karmaşık elektromanyetik yapıların analizini gerçekleştirmek için kullanılır. Genellikle mikrodalga, radyo frekansı ve optik frekanslarda çalışan elektronik cihazların tasarımında yaygın olarak kullanılır. HFSS'in temel amacı, bir elektromanyetik yapıya sahip olan antenler, devreler veya mikrodalga bileşenlerin elektromanyetik davranışını sentezlemek ve optimize etmektir. Bu yazılım, Maxwell denklemlerine dayalı sayısal çözümler üreterek elektromanyetik alanların simülasyonunu gerçekleştirir. HFSS, kullanıcılara elektromanyetik yapıların performansını inceleme, tasarlama ve analiz etme imkânı sağlar. HFSS kullanılarak antenlerin 3D modellenmesi, S-parametreleri, VSWR, Smith abağı gösterimleri, dâhili alanları ve daha fazlasını içeren elektriksel performansların analizi yapılır ve grafikler ile görselleştirilir. Bu sayede anteni üretmeden simülasyon sonuçlarına ulaşabilmek maliyet açısından çok büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, kullanıcıların çeşitli geometrik yapılar ve malzemeler üzerinde çalışmasına olanak tanıyan kullanıcı dostu arayüzü sayesinde anten tasarımlarında en iyi sonuçlara ulaşılabilmesi için en verimli malzemenin seçimini kolaylaştırmaktadır. Bu tez çalışmasında, anten simülasyonları ve sayısal sonuçlar için Ansys HFSS 2022 R1 kullanılmıştır. Şekil 4. 3'te HFSS kullanıcı ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 4. 3. HFSS kullanıcı ara yüzü

4.2.3. MATLAB PCB Antenna Designer

MATLAB PCB Antenna Designer, MATLAB yazılımının bir toolboxı olarak 2021 yılının ikinci yarısında MATLAB R2021b versiyonuyla hayatımıza girmiştir. Baskı devre kartları (PCB) için anten tasarımı üzerine odaklanmış olan toolbox, anten tasarımıyla ilgili MATLAB'ın hesaplama ve analiz altyapısını kullanarak kullanıcılara geniş bir anten tasarımı yelpazesi sunmaktadır. PCB Antenna Designer, kullanıcıların baskı devre kartları üzerinde entegre edilebilecek antenlerin geometrik yapısını oluşturmalarını sağlamakla beraber mikroşerit anten tasarımlarına da olanak sağlamaktadır. MATLAB PCB Antenna Designer, MATLAB'ın diğer toolboxlarıyla eş zamanlı çalışabilmesinden dolayı antenlerin tasarımı ve analizi için kullanıcılara yeni bir soluk getirmektedir. Bu toolbox'ta kullanıcılar, istedikleri anten geometrisini tanımlayabilmekte, malzeme özelliklerini belirleyebilmekte ve ardından MATLAB'ın hesaplama yeteneklerini kullanarak antenin elektromanyetik davranışını analiz edebilmektedir. Bu sebeple MATLAB PCB Antenna Designer, çeşitli analiz ve optimizasyon araçlarıyla antenin performansını iyileştirebilmesine olanak sağlamakta ve istenen sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, anten simülasyonları ve sayısal sonuçlar için MATLAB R2023b kullanılmıştır. Şekil 4. 4'te MATLAB PCB Antenna Designer kullanıcı ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 4. 4. MATLAB PCB Antenna Designer kullanıcı ara yüzü

4.3. MİKROŞERİT ANTEN ÜRETİM TEKNİKLERİ VE ÖLÇME YÖNTEMLERİ

4.3.1. Baskı Devre Üretimi

LPKF ProtoMat S64, PCB materyalini keserek, yüksek hassasiyetle kazıma, delme ve diğer yapısal özellikleri oluşturmaktadır. Bu sayede, tasarlanan devrelerin hızlı bir şekilde prototipleşme imkânı bulunmaktadır. Şekil 4.5'te gösterilen bu cihaz, altına yüksek hassasiyetle izler oluşturabilmektedir. Bu sayede yazılımlarda tasarlanan mikroşerit antenlerin üretimi kusursuz şekilde yapılmakta ve mikroşerit anten performansları test edebilmektedir. Bu tez çalışmasında LPKF ProtoMat S64 cihazı sayesinde mikroşerit antenin prototip üretimi yapılmıştır.



Şekil 4. 5. LPKF ProtoMat S64 freze makinesi

4.3.2. Vektör Ağ Analizörü

Rohde & Schwarz ZNH26, yüksek frekanslı elektromanyetik sistemlerin testi için kullanılan vektör ağ analizörüdür. Bu cihaz, elektromanyetik sinyallerin parametrelerini ölçmek ve analiz etmek için kullanılmaktadır. Genellikle mikrodalga, radyo frekansı ve iletişim sistemleri alanlarında tercih edilmektedir. ZNH26, elektromanyetik sinyallerin frekans, güç, faz, bant genişliği ve sinyal kaybı gibi birçok önemli parametreleri ölçebilmektedir. Ayrıca, cihaz genellikle S-parametreleri olarak bilinen parametrelerin ölçümü için kullanılmaktadır. Bu parametreler, devrenin giriş ve çıkış portları arasındaki elektriksel ilişkileri tanımlamakta ve bu portlardan geçen sinyallerin yansıma ve iletim özelliklerini göstermektedir. Şekil 4. 6'da gösterilen ZNH26, geniş bir frekans aralığında çalışabilir ve yüksek hassasiyetle ölçüm yapabilir. Bu, çeşitli elektromanyetik sistemlerin karakterizasyonu ve performans analizi için geniş bir uygulama yelpazesine olanak tanır. Ayrıca, cihaz genellikle kullanıcı dostu

bir arayüz ve veri analizi araçları ile donatılmıştır, bu da ölçülen verilerin etkili bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Genel olarak, Rohde & Schwarz ZNH26 vektör ağ analizörü, elektromanyetik sistemlerin karakterizasyonu ve testi için gelişmiş ölçüm yetenekleri sunan bir cihazdır. Yüksek frekanslı elektronik cihazların tasarımı, üretimi ve bakımı gibi birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4. 6. Rohde & Schwarz ZNH26 vektör ağ analizörü

4.3.3. Konnektör

SMA 180C dişi konnektör, radyo frekansı uygulamalarında kullanılan bir tür koaksiyel konnektördür. SMA (SubMiniature Version A) tipi bir konnektördür ve genellikle 50 ohm karakteristik empedans ile kullanılır. Şekil 4.7’de gösterilen SMA 180C dişi konnektör, genellikle yaygın olarak bulunan SMA dişi konnektörlerin tersine monte edilir ve bir cihazın dış anten bağlantısını sağlar. Bu konnektör tipi, radyo frekansı sinyallerinin iletimini sağlamak ve antenlerin cihazlara bağlanmasını mümkün kılmak için kullanılır. Genellikle, kablosal veya anten bağlantılarında kullanılır ve sinyal iletiminde ve alımında kullanılan elektronik cihazlarla entegre edilir. SMA 180C dişi

konnektörün işlevi, RF sinyallerinin güvenilir ve düşük kayıplı iletimini sağlamaktır. Bu, özellikle yüksek frekanslarda ve hassas radyo frekansı uygulamalarında önemlidir. Bu konnektör tipi, sağlam bir bağlantı sağlar ve genellikle radyo frekansı test ekipmanları, WiFi antenleri, kablosal iletişim cihazları gibi çeşitli elektronik cihazlarda kullanılır. Sonuç olarak, SMA 180C dişi konnektör, radyo frekansı sinyallerinin iletiminde ve alımında kullanılan elektronik cihazlarda anten bağlantısını sağlayan bir koaksiyel konnektördür. Yüksek frekanslı iletimde güvenilirlik ve düşük sinyal kaybı sağlamak için tasarlanmıştır.

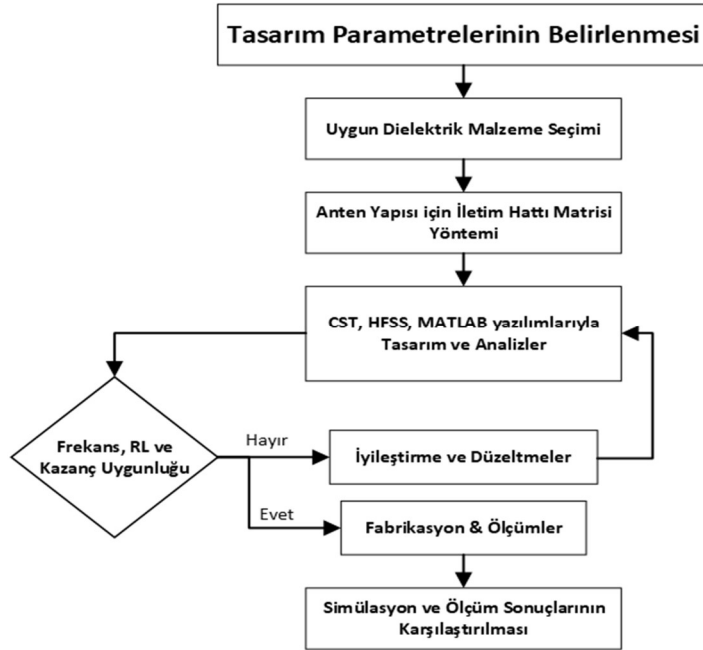


Şekil 4. 7. SMA 180C dişi konnektör

BÖLÜM 5

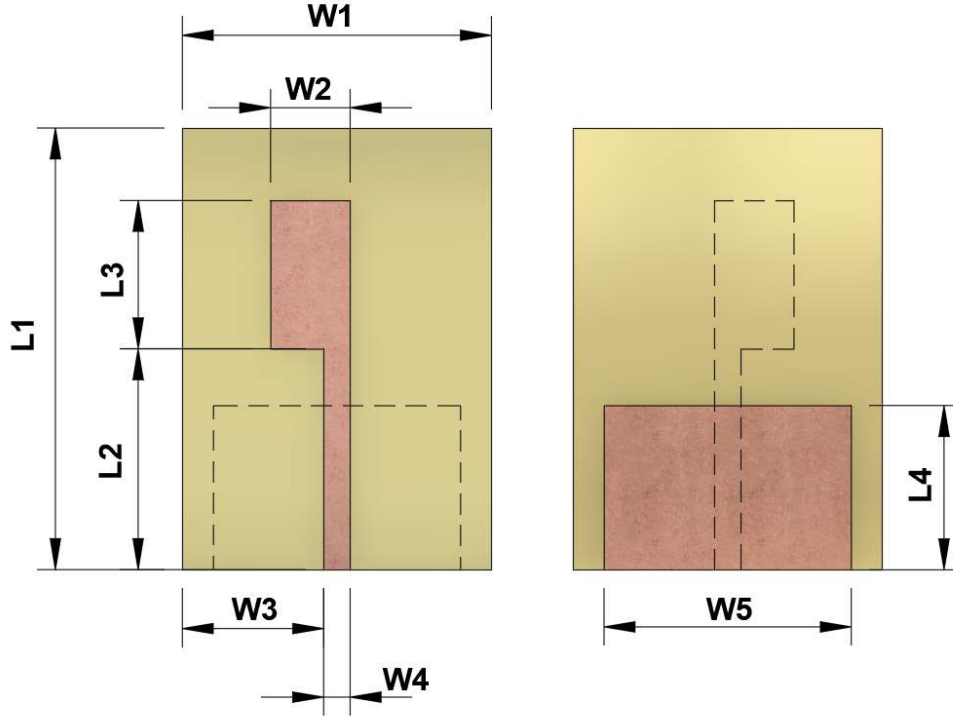
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, 5.8 GHz merkez frekansında çalışan Akıllı Ulaşım Sistemlerinde, V2V ve V2I iletişimde, otomatik ücret toplama ve otomatik geçiş kontrolü uygulamalarında kullanılmak üzere 5.8 GHz merkez frekansına sahip mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan anten $h=1.6$ mm kalınlığında $\epsilon_r = 4.3$ dielektrik katsayısına sahip FR4 malzemeyle empedansı 50Ω olan mikroşerit hat ile beslenmiştir. Anten $W=35$ mm ve $L=50$ mm boyutlarındadır. Bu bölümde mikroşerit antenlerin tasarımları modellenirken anten parametrelerinin uygun şekilde belirlenebilmesi için Şekil 5.1’de verilen akış diyagramı baz alınmıştır. Ayrıca anten verimliliğini ve iletim performansını belirleyen ve antenler için önemli parametrelerden olan S_{11} iyileştirme aşamaları adım adım gösterilmektedir.



Şekil 5. 1. Anten modelleme ve tasarım aşamalarında izlenen akış diyagramı

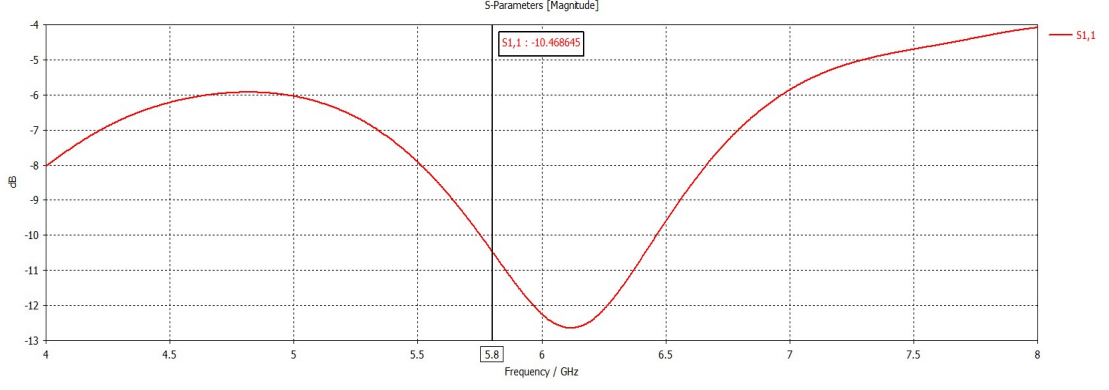
Birinci prototipte 9x17 mm yama yüzeye sahip 35x50 mm boyutunda dikdörtgen bir mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır (Şekil 5.2). Önerilen antenin boyutları Çizelge 5.1’de, S_{11} sonuçları Şekil 5.3’de gösterilmektedir.



Şekil 5. 2. Birinci prototip

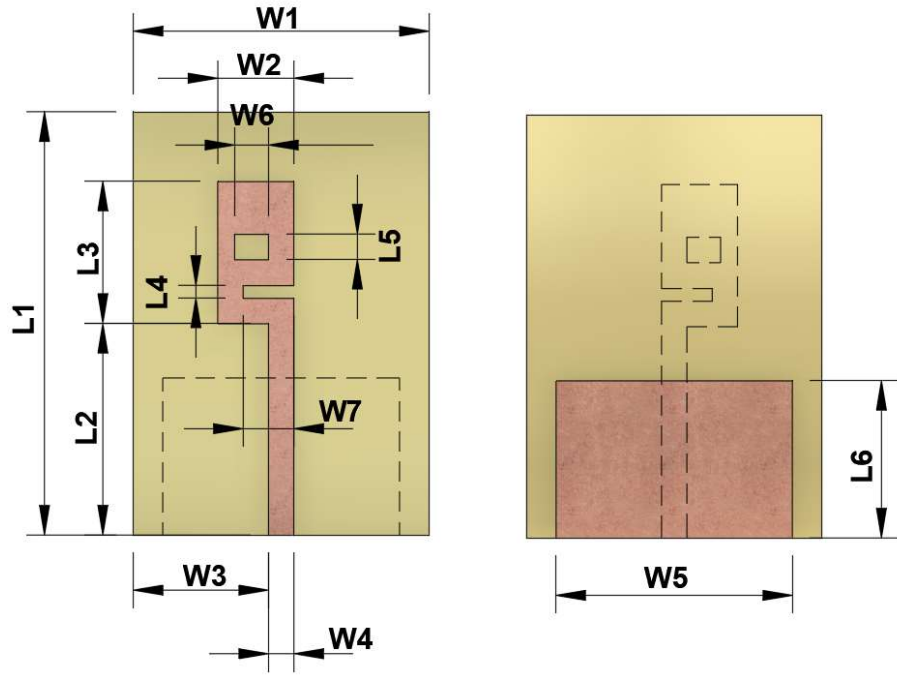
Çizelge 5. 1. Birinci prototipin boyutları

W1= 35 mm	W2= 9 mm	W3= 16 mm	W4= 3 mm
W5= 28 mm	L1= 50 mm	L2= 25 mm	L3= 17 mm
L4= 18.6 mm			



Şekil 5. 3. Birinci prototipin S_{11} değeri

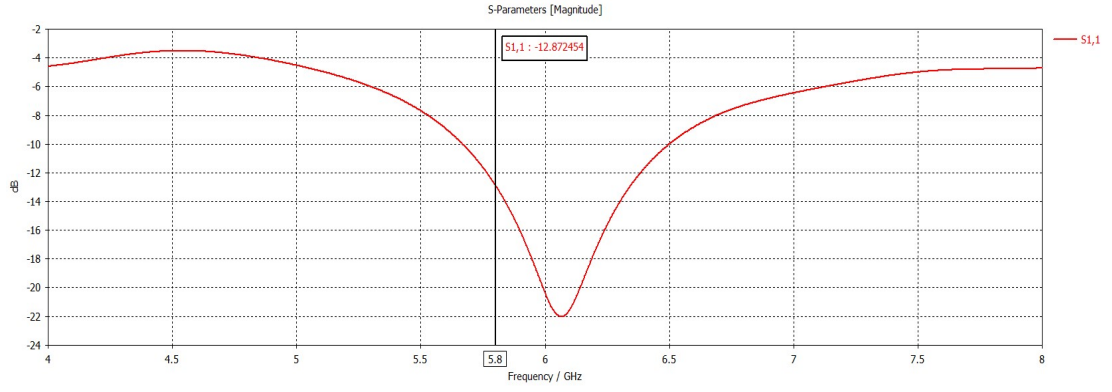
İkinci prototipte yama yüzeyinde 4x3 mm ve 6x1.5 mm boyutlarında delikler açılmış, yama yüzey 3 mm sola kaydırılmış ve yama 0.2 mm kısaltılmıştır (Şekil 5.4). İkinci prototipin boyutları Çizelge 5.2’de gösterilmektedir. Yapılan değişiklikler sayesinde S_{11} parametresi daha kararlı hale gelmiş ve merkez frekansı 6.05 GHz olarak gözlemlenmiştir. Gözlemlenen S_{11} parametresi Şekil 5.5’te gösterilmektedir. Bu iyi bir geliştirme olarak değerlendirilebilmektedir. Fakat antenin hedeflenen merkez frekansı 5.8 GHz olmasından dolayı anten prototipinde optimizasyon çalışmaları devam etmiştir.



Şekil 5. 4. İkinci prototip

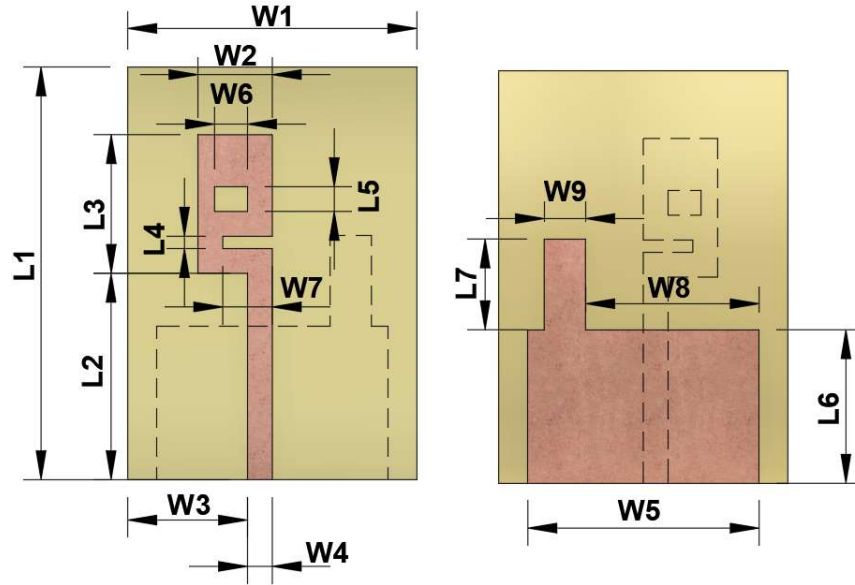
Çizelge 5. 2. İkinci prototipin boyutları

W1= 35 mm	W2= 9 mm	W3= 14.5 mm	W4= 3 mm
W5= 28 mm	W6= 4 mm	W7= 6 mm	L1= 50 mm
L2= 25 mm	L3= 16.8 mm	L4= 1.5 mm	L5= 3 mm
L6= 18.6 mm			



Şekil 5. 5. İkinci prototipin S_{11} değeri

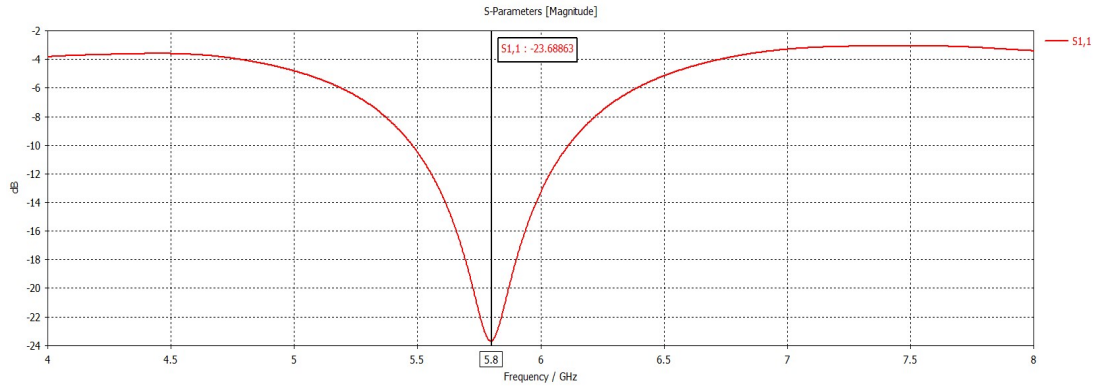
Üçüncü prototipte ise toprak yüzeyine 5x8 boyutlarında iletken eklemesi yapılmış ve mikroşerit anten 1.5 mm sola kaydırılmıştır (Şekil 5.6). Yapılan değişiklikler Çizelge 5.3'te gösterilmektedir. Bu değişiklikler sayesinde elde edilen S_{11} sonuçları Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Yapılan bütün iyileştirmeler sayesinde merkez frekansı 5.8 GHz olarak ayarlanmıştır. Bant genişliği 630 MHz olarak ölçülmektedir. VSWR 2.18'den 1.14'e düştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 5. 6. Üçüncü prototip

Çizelge 5. 3. Üçüncü prototipin boyutları

W1= 35 mm	W2= 9 mm	W3= 14.5 mm	W4= 3 mm
W5= 28 mm	W6= 4 mm	W7= 6 mm	W8= 21 mm
W9= 5 mm	L1= 50 mm	L2= 25 mm	L3= 16.8 mm
L4= 1.5 mm	L5= 3 mm	L6= 18.6 mm	L7=8 mm



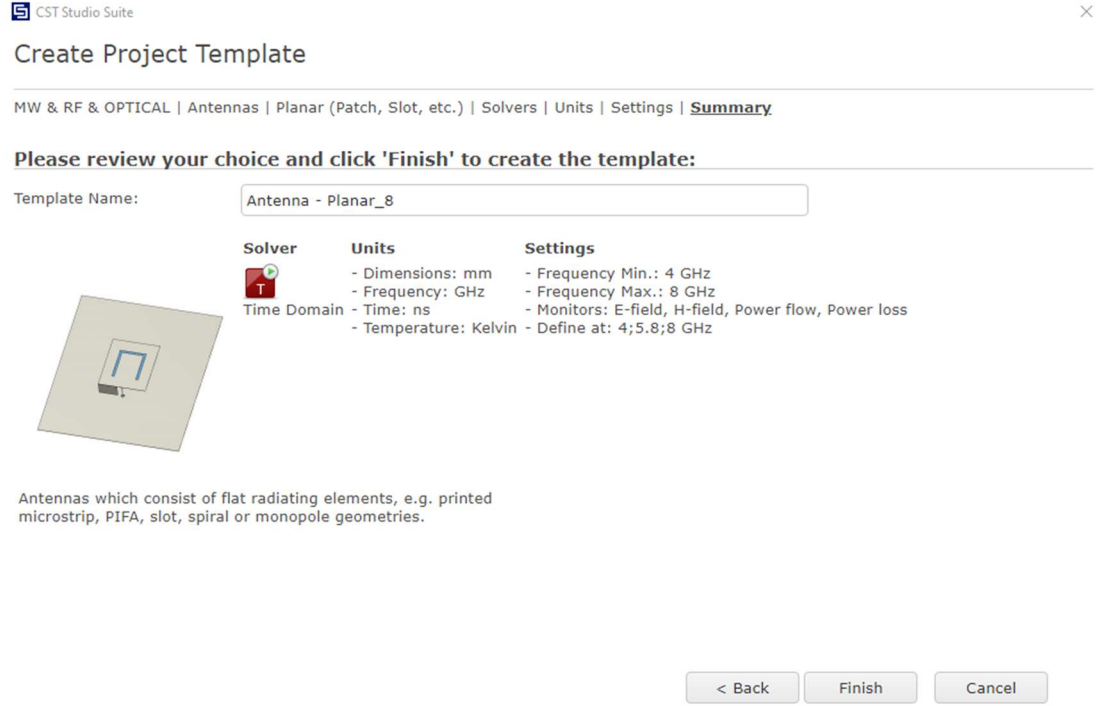
Şekil 5. 7. Üçüncü prototipin S_{11} değeri

Optimize edilmiş mikroşerit anten CST, HFSS ve MATLAB yazılımlarında tasarlanmış ve antenin prototipi LPKF ProtoMat S64 cihazla elde edilmiştir. Elde edilen analizler karşılaştırılmış ve prototipi üretilen antenin analiz sonuçlarına en yakın sonucu veren yazılım belirlenmiştir.

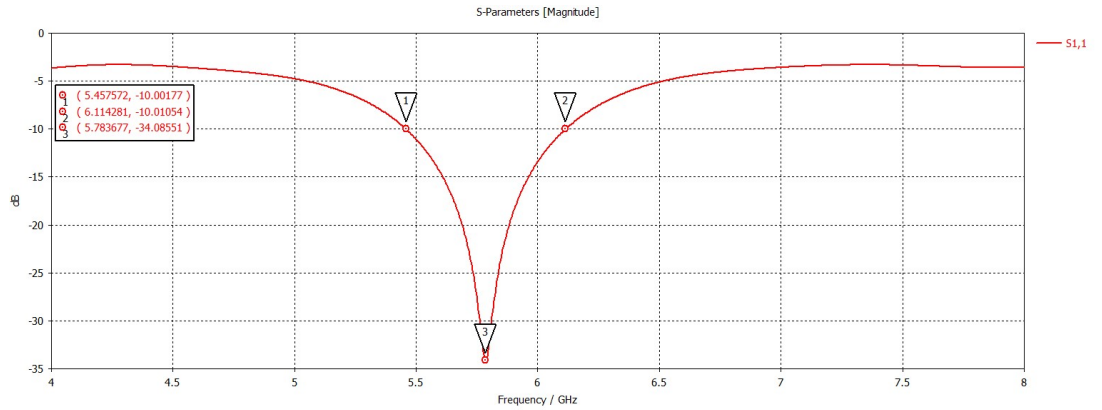
5.2. CST STUDIO SUITE YAZILIMIYLA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

Tasarımı yapılan mikroşerit antenin CST Studio Suite yazılımının ara yüzündeki tasarımın başında seçilen parametreler Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Zaman Domainde Sonlu Farklar (FDTD) yöntemiyle çözdürülen mikroşerit antende bağlantı noktasında Waveguide Port kullanılmıştır. Mikroşerit antenin analizinde frekans aralığı 4 GHz’den 8 GHz’e kadar ayarlanmıştır. CST Studio Suite yazılımı 98.406 adet

örgü (mesh) kullanmış ve 20 saniyede analiz sonuçlarına ulaşılmıştır. Tasarımı yapılan mikroşerit antenin analizinde CST Studio Suite 2022 Student Edition versiyonu kullanılmıştır ve elde edilen S_{11} , VSWR, ışına örüntüsü ve kazanç sonuçları incelenmiştir. Şekil 5.9'daki S_{11} parametresinde de görüldüğü gibi mikroşerit antenin merkez frekansı olan 5.78 GHz'de bant genişliği 656 MHz olarak gözlemlenmiştir.

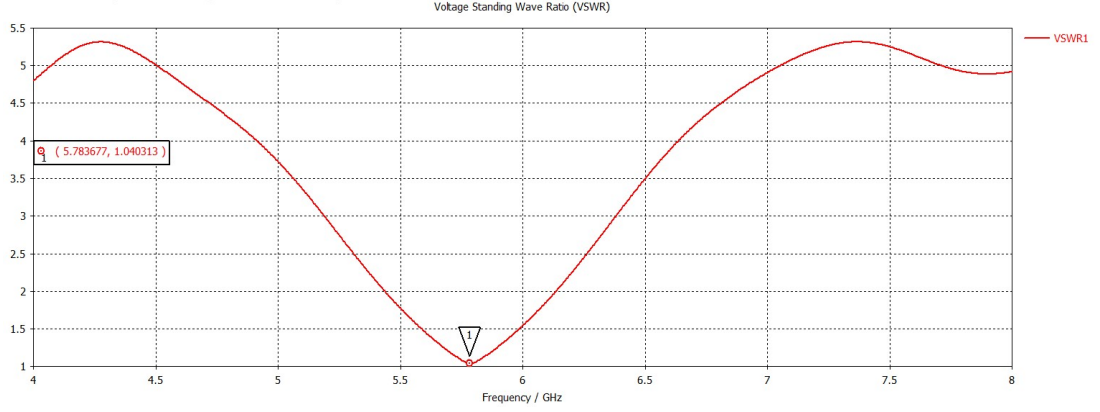


Şekil 5. 8. Tasarım parametreleri

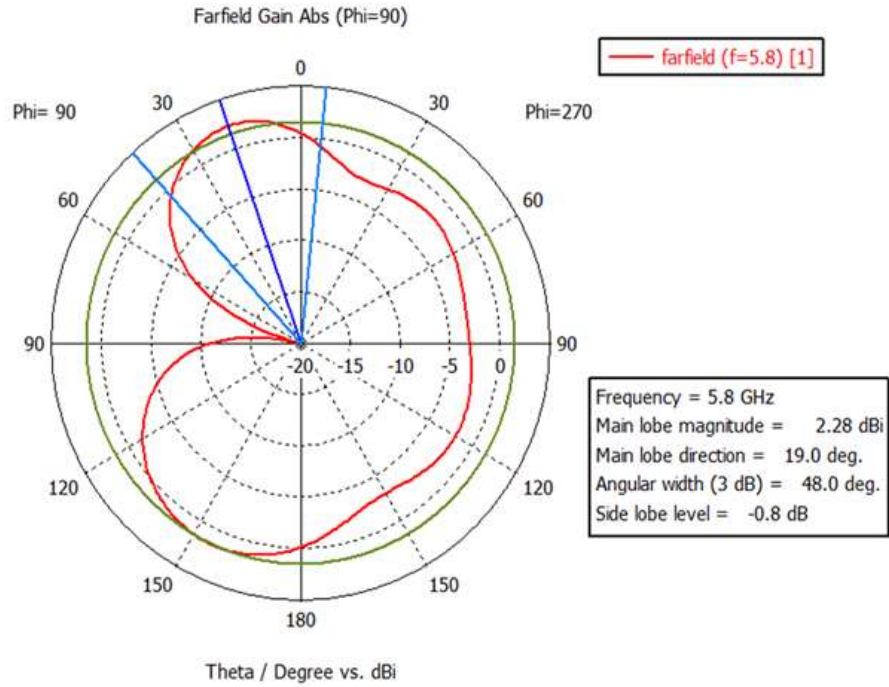


Şekil 5. 9. CST Studio Suite yazılımıyla elde edilmiş S_{11}

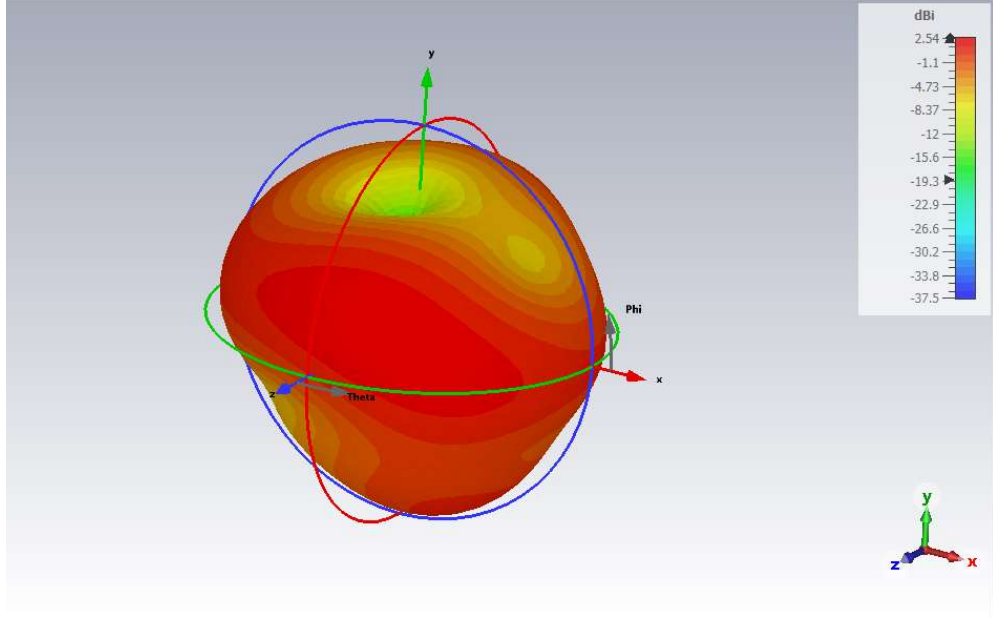
Mikroşerit antenin VSWR'ı 1.04 olarak gözlenmiş ve Şekil 5.10'da belirtilmiştir. Işıma örüntüsü Şekil 5.11'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.12'de belirtildiği gibi 5.78 GHz frekansında mikroşerit anten kazancı 2.54 dBi olarak gözlenmiştir.



Şekil 5. 10. CST Studio Suite yazılımıyla elde edilmiş VSWR grafiği



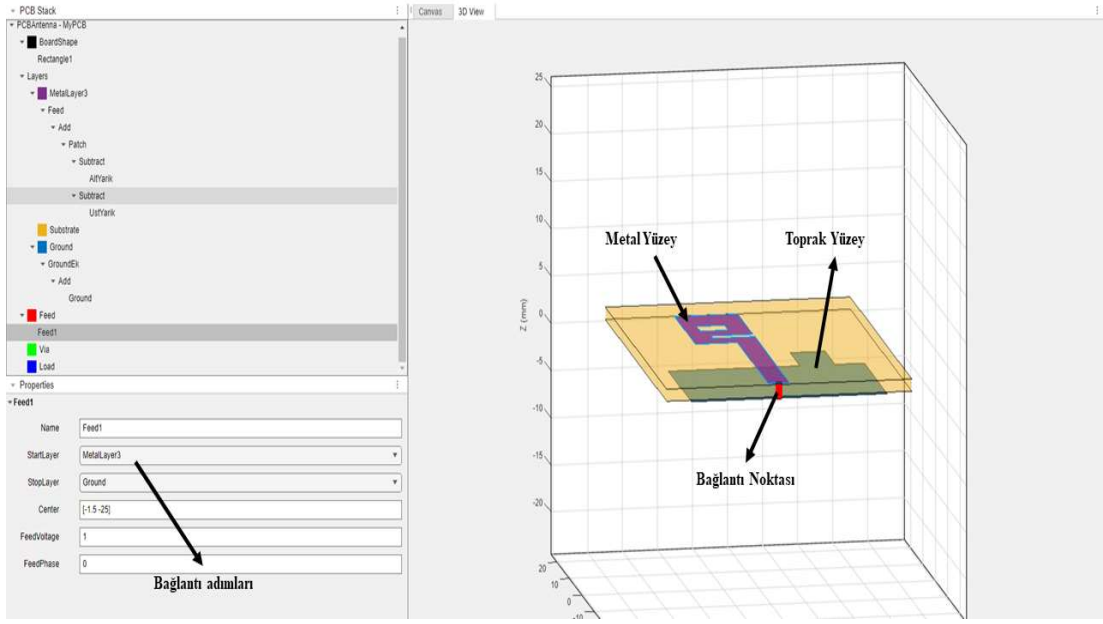
Şekil 5. 11. CST Studio Suite yazılımıyla elde edilmiş ışıma örüntüsü



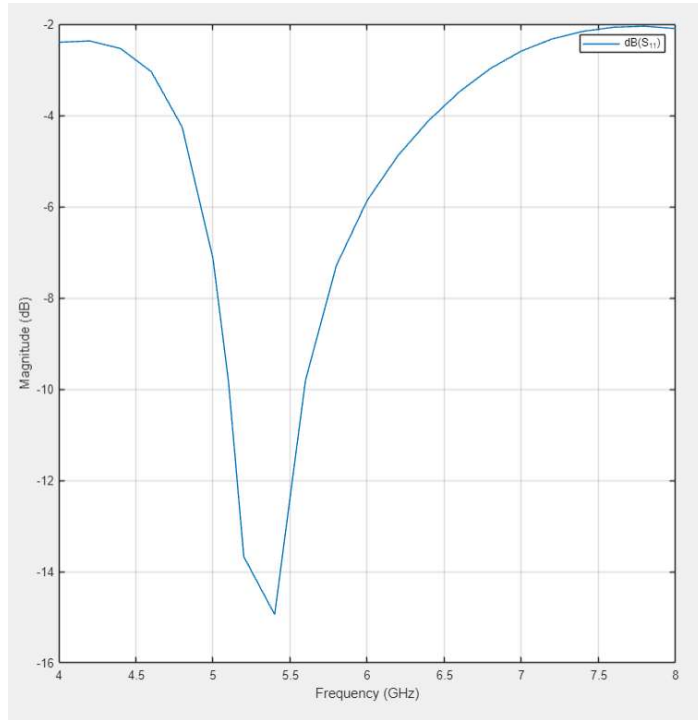
Şekil 5. 12.CST Studio Suite yazılımıyla elde edilmiş kazanç

5.3. MATLAB PCB ANTENNA DESIGNER YAZILIMIYLA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

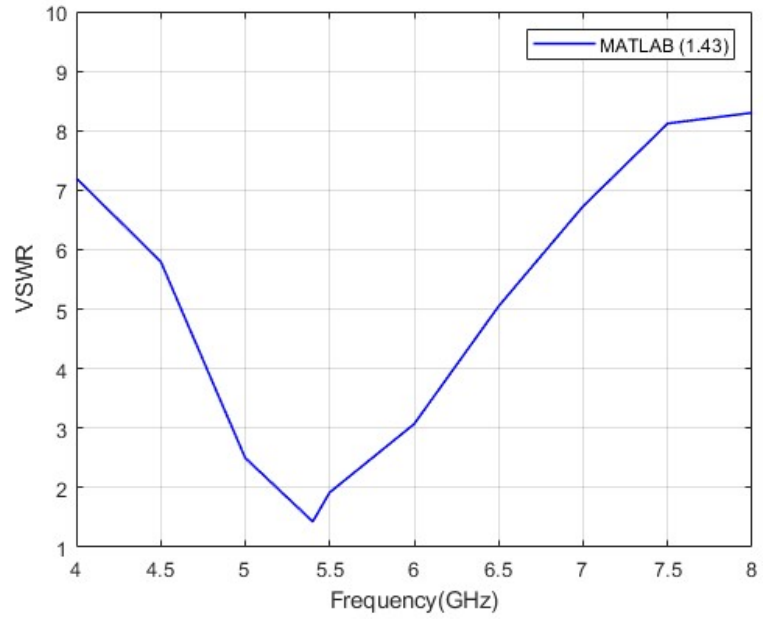
MATLAB yazılımını analiz yöntemi olarak Moment Yöntemi (MoM) kullanmaktadır. Şekil 5.13'te belirtildiği gibi Mükemmel Elektrik İletkeni (Perfect Electric Conductor-PEC) olarak hem toprak yüzeyi hem de ışıma yapan yüzey seçilmiştir, bağlantı adımları gösterilmiştir ve çözdürülen mikroşerit antenin bağlantı noktasında Lumped Port kullanılmıştır. Mikroşerit antenin analizinde frekans aralığı 4 GHz'den 8 GHz'e kadar ayarlanmıştır. MATLAB PCB Antenna Designer'da ise 87.732 adet örgü (mesh) kullanılmış ve analiz sonuçlarına 8 saniyede ulaşılmıştır. Bu çalışmada MATLAB R2023b yazılımının PCB Antenna Designer Toolbox'ı kullanılmış ve elde edilen S_{11} , VSWR ışıma örüntüsü ve kazanç incelenmiştir. Şekil 5.14'teki S_{11} grafiğinde de görüldüğü gibi mikroşerit antenin merkez frekansı olan 5.4 GHz'de bant genişliği 500 MHz olarak gözlemlenmiştir. 5.4 GHz'de elde edilmiş VSWR 1.43 olarak gözlemlenmiş ve grafiği Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Işıma örüntüsü Şekil 5.16'da antenin merkez frekansı olan 5.8 GHz frekansında anten kazancı 2.14 dBi olarak gözlemlenmiş ve Şekil 5.17'de gösterilmektedir.



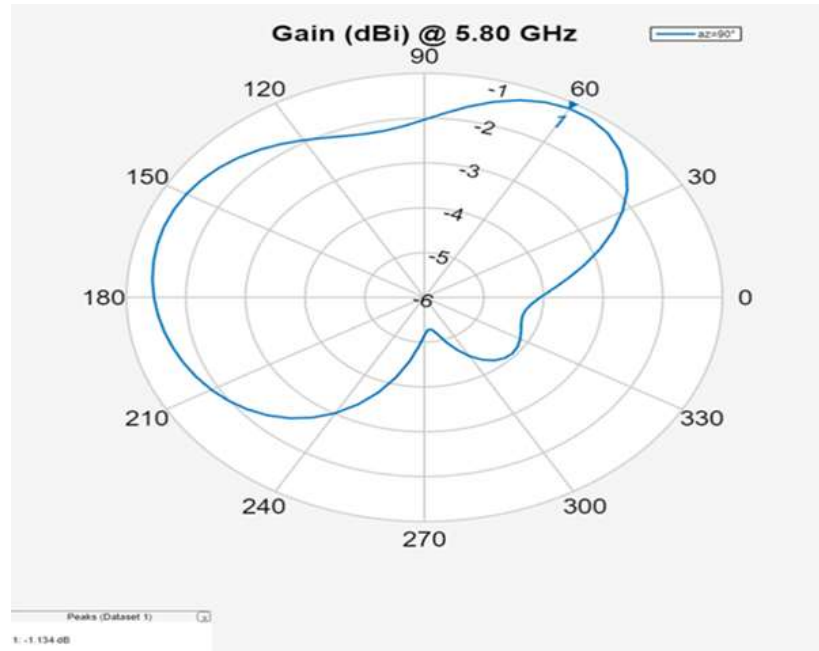
Şekil 5. 13. Bağlantı adımları ve bağlantı noktası



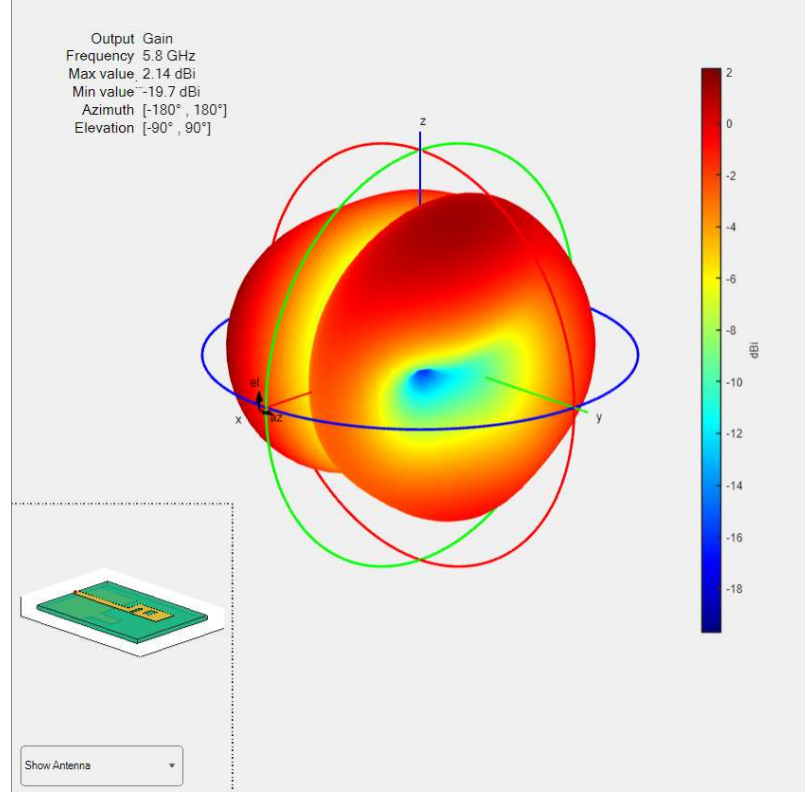
Şekil 5. 14. MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla elde edilmiş S_{11} grafiği



Şekil 5. 15. MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla elde edilmiş VSWR grafiği



Şekil 5. 16. MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla elde edilmiş ışınma örüntüsü

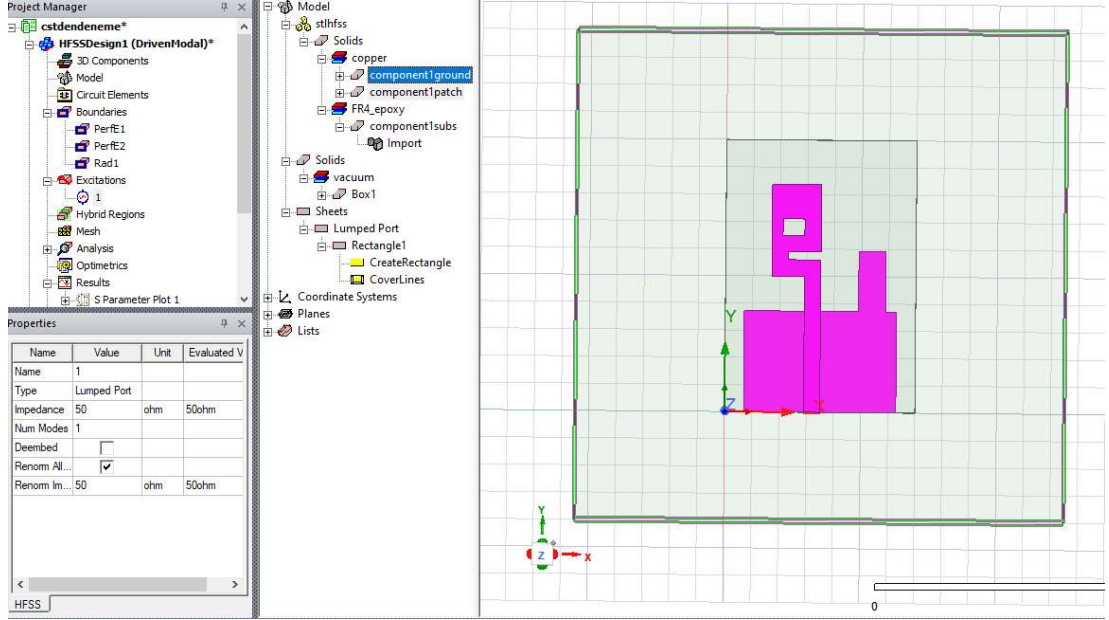


Şekil 5. 17. MATLAB PCB Antenna Designer yazılımıyla elde edilmiş kazanç

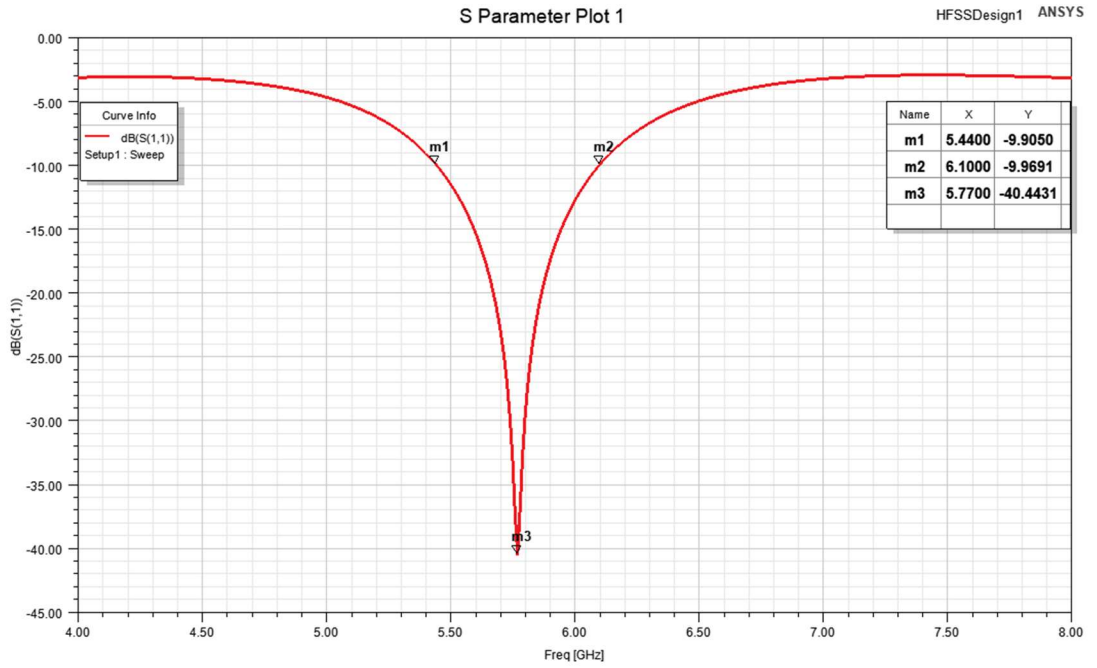
5.4. ANSYS HFSS YAZILIMIYLA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

Tasarımı yapılan mikroşerit antenin Ansys HFSS yazılımında analizi yapılacak olan mikroşerit anten Ansys HFSS yazılımının kullandığı Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile analiz edilmiştir. Şekil 5.18’de belirtildiği gibi mikroşerit antenin bağlantı noktasında Lumped Port kullanılmıştır ve mükemmel elektrik iletkeni (Perfect Electric Conductor-PEC) olarak hem toprak yüzeyi hem de ışımaya yapan yüzey seçilmiştir. Mikroşerit antenin analizinde frekans aralığı 4 GHz’den 8 GHz’e kadar ayarlanmıştır. Ansys HFSS yazılımı analiz sonuçlarını 46 saniyede vermiş ve 174.993 adet örgü (mesh) kullanmıştır. Tasarımı yapılan mikroşerit antenin analizinde Ansys HFSS 2022 R1 versiyonu kullanılmıştır Ansys HFSS 2022 R1 programıyla analizi gerçekleştirilen mikroşerit antenden elde edilen S_{11} , VSWR, kazancı incelenmiştir. Şekil 5.19’daki S_{11}

grafiginde de görüldüğü gibi mikroşerit antenin merkez frekansı olan 5.77 GHz’de bant genişliği 650 MHz olarak gözlemlenmiştir.

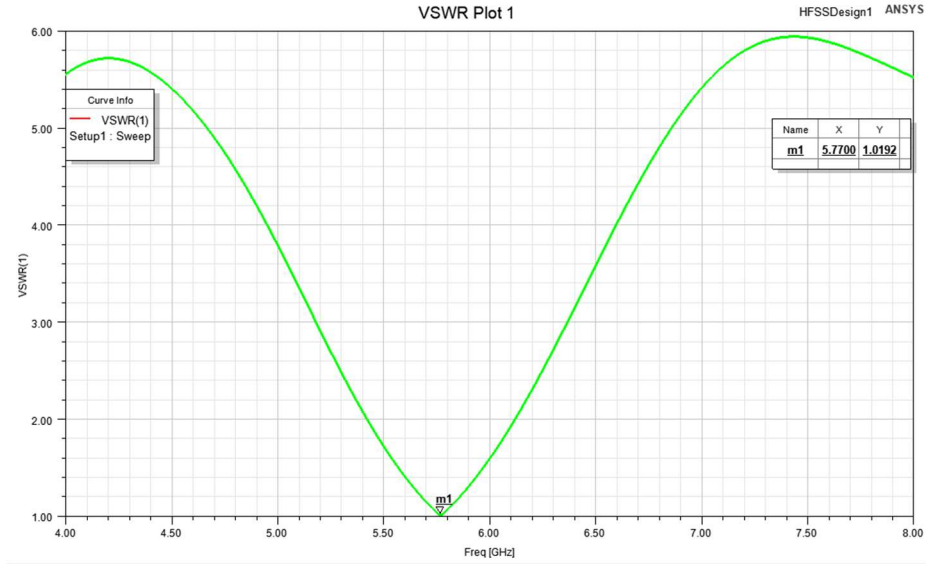


Şekil 5. 18. Port seçimi ve PEC yüzeyleri

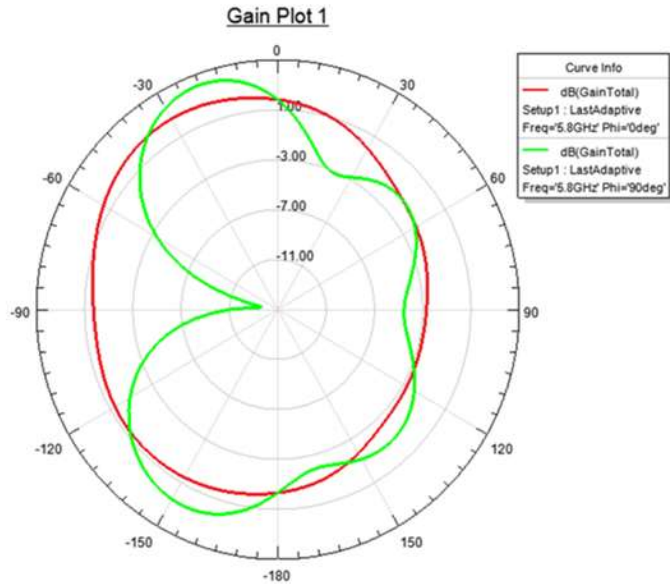


Şekil 5. 19. ANSYS HFSS yazılımıyla elde edilmiş S_{11} grafiği

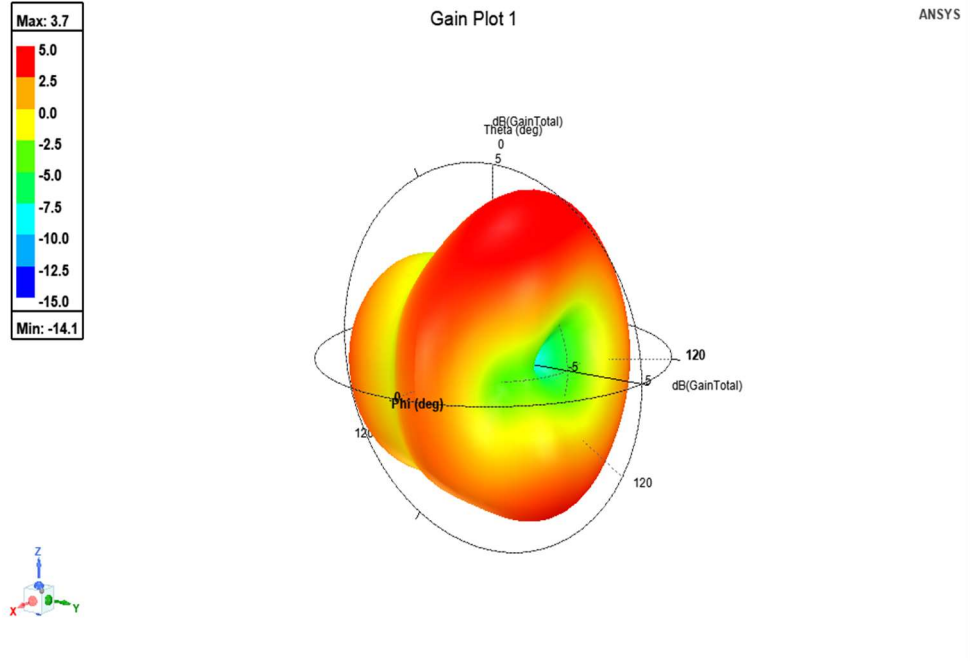
Mikroşerit antenin VSWR'ı 1.04 olarak gözlenmiş ve Şekil 5.20'de belirtilmiştir. Şekil 5.21'de ANSYS HFSS yazılımıyla elde edilmiş ışıma örüntüsü gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 5.22'de de belirtildiği gibi 5.77 GHz frekansında mikroşerit anten kazancı 3,7 dB olarak gözlenmiştir.



Şekil 5. 20. ANSYS HFSS yazılımıyla elde edilmiş VSWR grafiği



Şekil 5. 21. Ansys HFSS yazılımıyla elde edilmiş ışıma örüntüsü



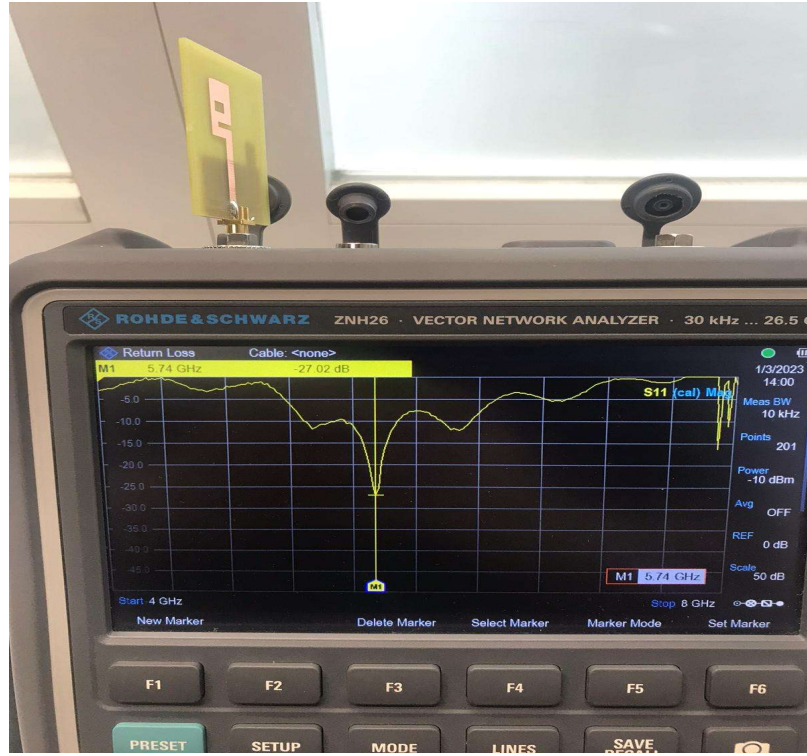
Şekil 5. 22. ANSYS HFSS yazılımıyla elde edilmiş kazanç

5.5. FR4 MALZEMEYLE ÜRETİMİ YAPILAN ANTENİN ANALİZİ

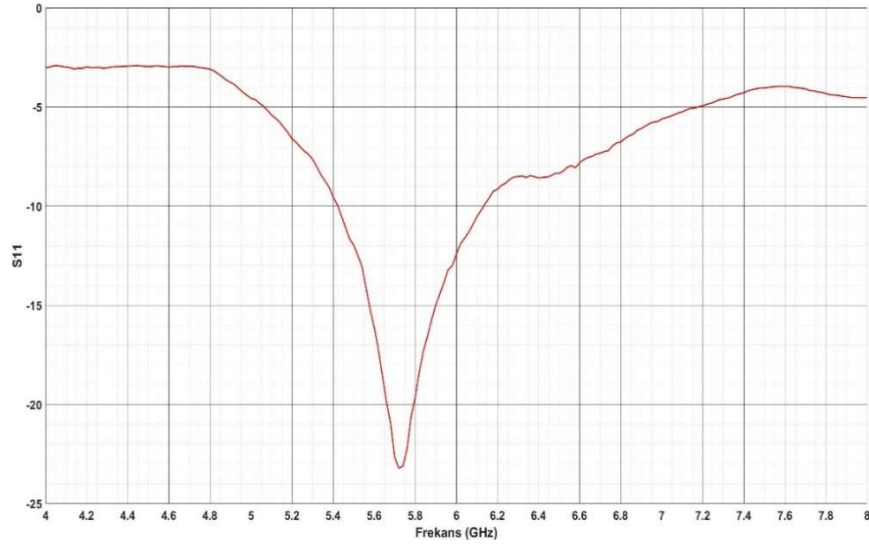
FR4 malzeme kullanılarak LPKF ProtoMat S64 cihaz yardımıyla prototip baskısı yapılan mikroşerit antenin SMA 180C dişi konnektörle lehimlenmiş hali Şekil 5.23'te gösterilmiştir. Şekil 5.24'te Rohde & Schwarz ZNH26 vektör ağ analizörü yardımıyla ölçümü gerçekleştirilen S_{11} değeri gösterilmektedir. Şekil 5.25'te S_{11} parametre değeri görülmektedir. 5.74 GHz merkez frekansında yaklaşık 700 MHz bant genişliğine sahip olduğu ölçülmektedir.



Şekil 5. 23. SMA 180C dişi konnektörle lehimlenmiş mikroşerit anten

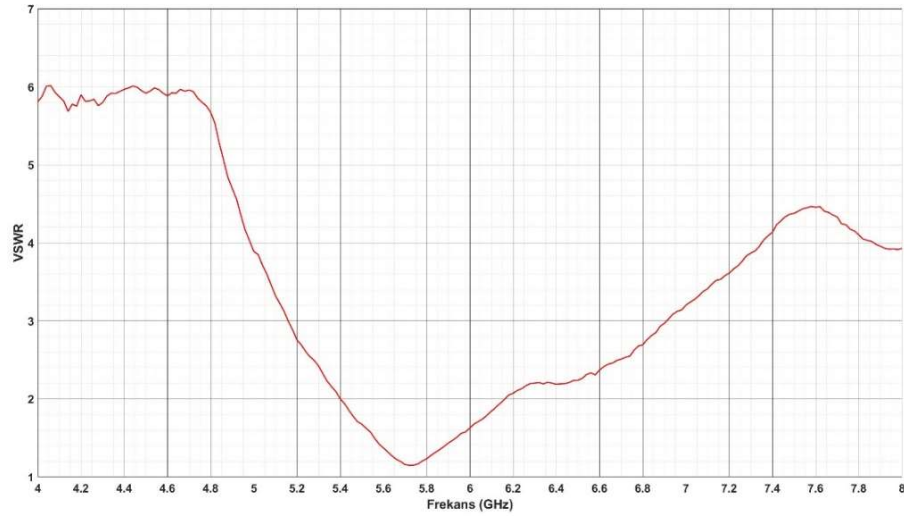


Şekil 5. 24. Rohde & Schwarz ZNH26 cihazında S_{11} grafiği

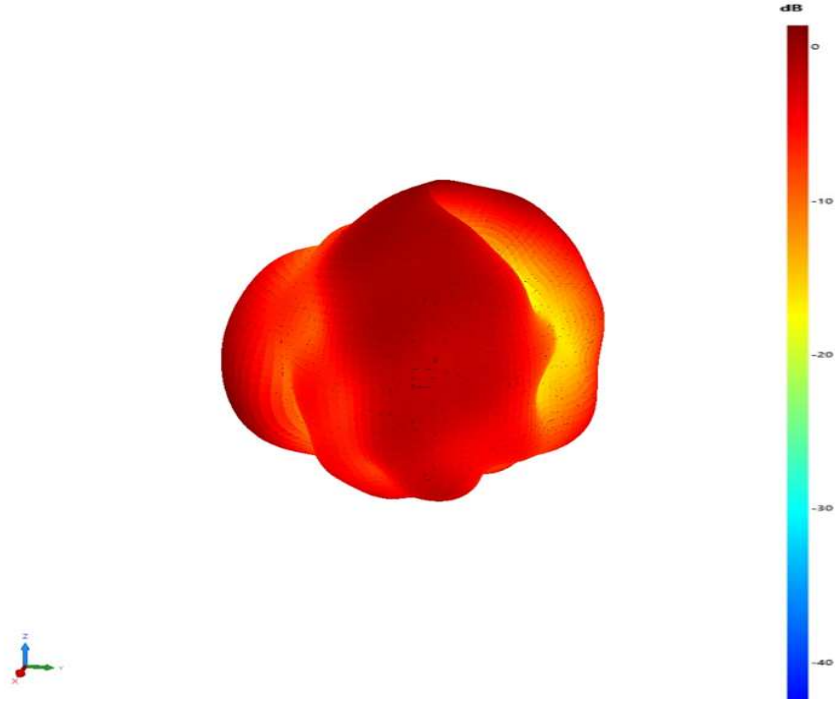


Şekil 5. 25. FR4 malzemeyle üretimi yapılmış antenin S_{11} grafiği

Mikroşerit antenin VSWR'ı yaklaşık olarak 1.14 olarak gözlenmiş ve Şekil 5.26'da belirtilmiştir. Ayrıca Şekil 5.27'de de belirtildiği gibi 5.74 GHz frekansında mikroşerit anten kazancı yaklaşık olarak 1.98 dBi olarak gözlenmiştir.

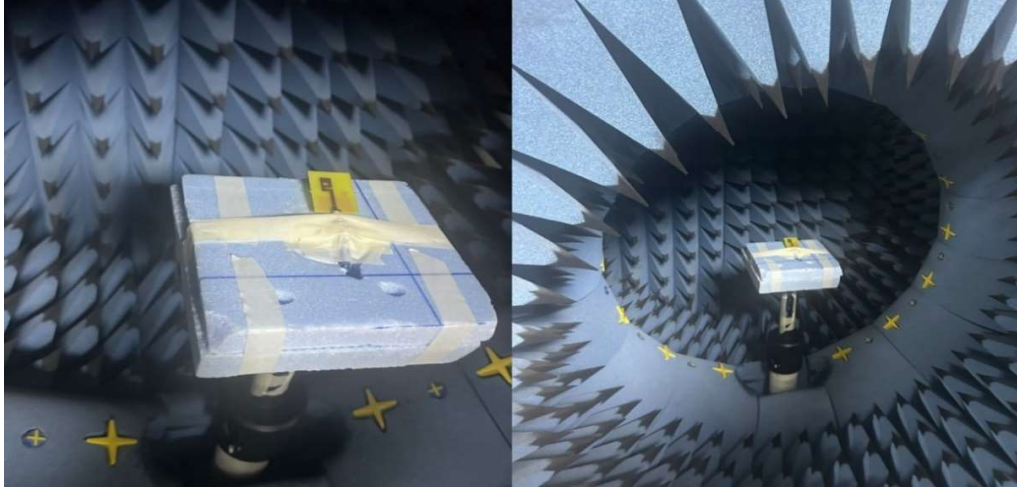


Şekil 5. 26.FR4 malzemeyle üretimi yapılmış antenin VSWR grafiği



Şekil 5. 27. FR4 malzemeyle üretimi yapılmış antenin kazancı

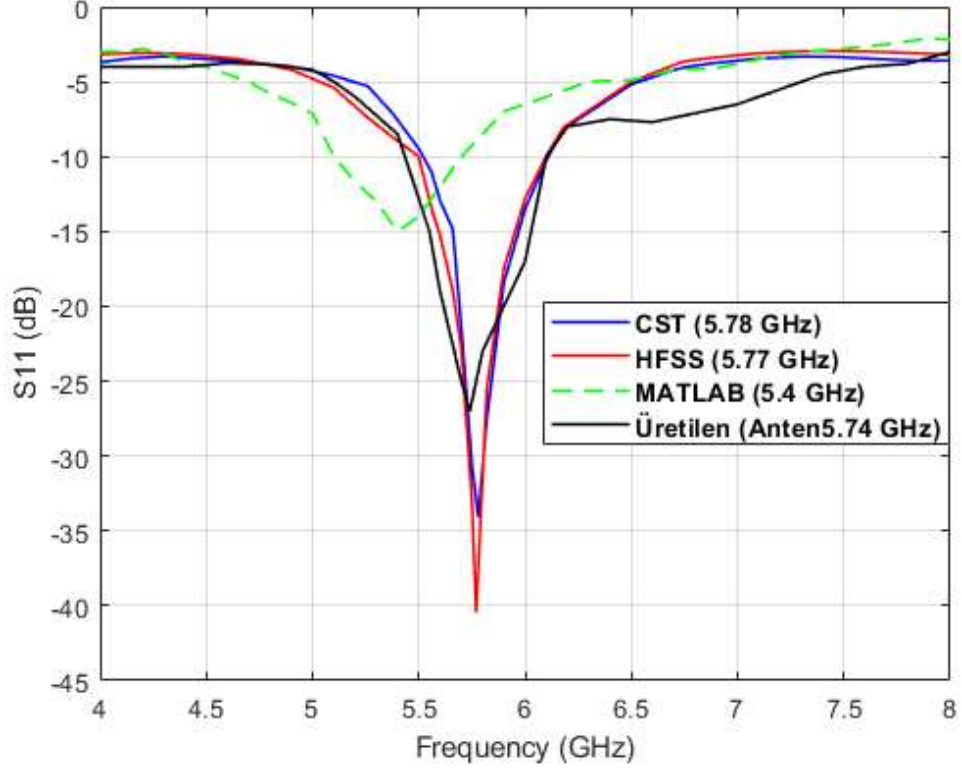
Yansımaz ortamlar, elektromanyetik dalgaların dış ortama yansımalarını en aza indirerek, anten testlerinin doğruluğunu arttırmak için tasarlanmıştır. Yansımaz ortamlar genellikle yüksek performanslı emici malzemelerle kaplanmıştır. Bu sayede elektromanyetik dalgaların kontrollü bir şekilde yayılmasını sağlayarak anten performansının doğru bir şekilde ölçülmesine olanak tanımaktadır. Antenin radyasyon desenlerini belirlemek için yapılan ölçümler azimut (yatay) ve elevasyon (dikey) düzlemlerde gerçekleştirilmektedir. Tez çalışmasında yansımaz bir ortamda gerçekleştirilen ölçümler, StarLab cihazı kullanılarak 24 derecelik açılarla azimut ve elevasyon düzlemlerinde 180 derecede ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümler, antenin kazanç özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır. Kazanç ölçümü, antenin belirli bir yönde ne kadar etkili olduğunu göstermek ve antenin performansını değerlendirmek için önemlidir. Yapılan ölçümler, antenin yönlendirme yetenekleri, verimliliği ve sinyal dağılımı gibi önemli özellikler hakkında bilgi sağlamaktadır. Şekil 5.28’te mikroşerit antenin yansımaz ortamda mikroşerit antenin kazanç ölçme düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 5. 28. Mikroşerit antenin kazanç ölçme düzeneği

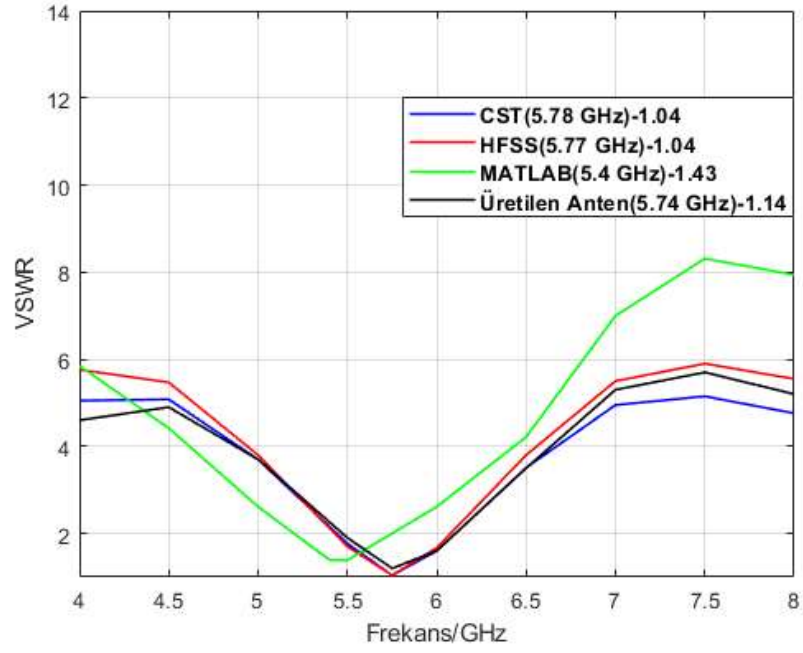
5.6. YAZILIMLARIN VE ÜRETİMİ YAPILAN ANTENİN ANALİZLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Mikroşerit antenin CST Studio Suite yazılımında yapılan analizlerde 656 MHz bant genişliğine ve 5.78 GHz merkez frekansına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ansys HFSS yazılımında yapılan analiz sonucunda mikroşerit antenin 650 MHz bant genişliğine ve 5.77 GHz merkez frekansına sahip olduğu gözlemlenmiştir. MATLAB PCB Antenna Designer’da tasarlanan anten 500 MHz bant genişliğine ve 5.4 GHz merkez frekansına sahiptir. Üretilen anten ise 700 MHz bant genişliğine ve 5.74 GHz merkez frekansına sahiptir. S_{11} değerinin üç benzetim ortamında tasarlanan antenin üretilen antenle karşılaştırılması Şekil 5.29’da gösterilmektedir.



Şekil 5. 29. S_{11} grafiklerinin karşılaştırılması

Üretilen antenin VSWR'ı Rohde & Schwarz Znh26 markalı Vektör Ağ Analizörüyle yapılan ölçümler sonucunda 1.140 çıkmıştır. CST Studio Suite yazılımında VSWR'ı 1.04'tür. Ansys HFSS yazılımında VSWR sonucu 1.04, MATLAB PCB Antenna Designer'da 1.43'tür. Şekil 5. 30'da VSWR'ın karşılaştırmalı grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5. 30. VSWR'ın karşılaştırılması

Çizelge 5.4'te önerilen mikroşerit antenin merkez frekansında kazanç değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapılan karşılaştırma sonucunda üretilen antene en yakın kazanç değerini MATLAB yazılımının verdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 5. 4. Karşılaştırmalı kazanç değeri

	Merkez Frekansı	Kazanç Değeri
CST Studio Suite	5.78 GHz	2.54
Ansyz HFSS	5.77 GHz	3.7
MATLAB PCB Antenna Designer	5.8 GHz	2.14
Üretilen Anten	5.74 GHz	1.98

5.7. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALARLA KARŞILAŞTIRMA

Çizelge 5.5'te üretimi yapılmış önerilen antenin boyutları, bant genişliği ve kazanç değerleri 5.8 GHz bandında çalışmak için tasarlanan literatürdeki antenlerle kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu bulgular, önerilen antenin performansını ve üstün özelliklerini vurgulamakta ve onu 5.8 GHz frekans bandında çalışmayı gerektiren uygulamalar için cazip bir seçenek haline getirmektedir.

Çizelge 5. 5. Literatürdeki antenlerde karşılaştırma

Anten	Boyut (mm)	Frekans Bandı (GHz) & Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dB)	Alttaş	Prototip Üretimi
[9]	30x30	5.8 & 270	7.48	RT-Duroid 5880	Hayır
[18]	80x105	5.8 & 230	6.6	FR4	Hayır
[25]	35x35	5.8 & 497	7	RT-Duroid 5870	Hayır
[26]	50x50	5.9 & 400	7.65	FR4	Hayır
[112]	40x40	5.9 & 200	5.9	FR4	Evet
[113]	22x15	2.4 - 5.71 & 110-570	0.42-2.45	FR4	Evet
[114]	60x50	5.81 & 196	3	FR4	Evet
[115]	54x71	2.45-5.8 & 210 - 410	2.18-2.21	FR4	Hayır
[116]	32x29	5.8 & 400	5.17	RT-Duroid	Hayır
[117]	19x19	5.5 & 702	3.23	FR4	Hayır
[118]	25.5x22.5	5.8 & 100	1.49	FR4	Hayır

[119]	15x10.6	5.8 & 580	4.4	FR4	Evet
[120]	76.5x40	5.73 & 640	9.1	Rogers RT5880	Hayır
[121]	20x18	5.8 & 200	2.47	FR4	Hayır
[122]	24.7x20.8	5.75 & 167	2.54	FR4	Hayır
Önerilen Anten	35x50	5.74 & 700	1.98	FR4	Evet

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada, 5.8 GHz merkez frekansında çalışan Akıllı Ulaşım Sistemlerinde V2V ve V2I iletişiminde, otomatik ücret toplama ve otomatik geçiş kontrolü uygulamalarında kullanılabilecek kompakt ve düşük maliyetli mikroşerit anten tasarlanmıştır [64]. Önerilen anten modeli CST Studio Suite, Ansys HFSS ve Matlab PCB Antenna Designer benzetim ortamlarında analiz edilmiştir. Geri Dönüş Kaybı (S_{11}), Kazancı, VSWR'ı üç programda analiz edilmiştir. Prototipi üretilen mikroşerit anten ilgili laboratuvarlarda test edilmiştir. CST Studio Suite ve Ansys HFSS yazılımının S_{11} ve VSWR sonuçlarının protipi yapılmış antene benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kazanç değerinde ise MATLAB PCB Antenna Designer yazılımının prototipe yakın sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Üç yazılımda farklı analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Üretimi yapılan antenle her yazılımın performans ilişkisinin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. MATLAB PCB Antenna Designer yazılımının yeni olmasına rağmen MATLAB yazılımının diğer Toolbox'larıyla entegre edilebilmesi büyük bir avantajdır. Ayrıca benzetim ortamlarında yapılan analizler sonucunda toprak düzleminde yüzey akımlarının olmadığı yerlerde kazıma işlemi yapılmıştır. Bu sayede önerilen anten istenilen merkez frekansına ulaşmış ve bant genişliği artmıştır [123]. Önerilen antende, 1.6 mm kalınlığına sahip FR-4 alttaşı kullanılmıştır. Önerilen anten, 5.74 GHz merkez frekansında -27,02 dB'de 700 MHz bant genişliğini sahiptir. VSWR'ın 1.14 olarak ölçülmesi avantajdır, kazanç değeri ise yaklaşık olarak 1.98 dBi olarak ölçülmektedir. Ayrıca tez çalışmasındaki mikroşerit anten şekilleri Autodesk Fusion 360 yazılımında yapılmıştır.

KAYNAKLAR

1. B. R. Franciscatto, A.C. Souza, T. T. Trang, and T. P. Vuong, "High Gain Microstrip Patch Antenna Array Using Multiple Superstrate Layers for DSRC Applications", *IEEE-APS Conference On Antennas And Propagation For Wireless Communications*, 736–739 (2012).
2. Kaur, J., Khanna, R., and Kartikeyan, M. V., "Optimization and development of O-shaped triple-band microstrip patch antenna for wireless communication applications", *IETE Journal Of Research*, 60 (2): 95–105 (2014).
3. Ijiguchi, T., Kanemoto, D., Yoshitomi, K., Yoshida, K., Ishikawa, A., Fukagawa, S., Kodama, N., Tahira, A., and Kanaya, H., "Circularly polarized one-sided directional slot antenna with reflector metal for 5.8-GHz DSRC operations", *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 13: 778–781 (2014).
4. Bathula Lakshmi Narayana and S Nagakishore Bhavanam, "Design & Simulation of Triple Frequency Triangular Patch Antenna by Using HFSS 14.0", *IEEE Sponsored 2nd International Conference On Innovations In Information, Embedded And Communication Systems (ICIIECS)*, 18585–18589 (2015).
5. Wong, H., So, K. K., and Gao, X., "Bandwidth Enhancement of a Monopolar Patch Antenna with V-Shaped Slot for Car-to-Car and WLAN Communications", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 65 (3): 1130–1136 (2016).
6. Varum, T., Matos, J. N., and Pinho, P., "Non-uniform microstrip antenna array for dsrc in single-lane structures", *Sensors*, 16 (12): (2016).
7. Varum, T., Matos, J. N., Pinho, P., and Abreu, R., "Nonuniform broadband circularly polarized antenna array for vehicular communications", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 65 (9): 7219–7227 (2016).

8. Nipont Tangthong, Pichet Moeikham, and Somsak Akatimagool, "A Compact Multi Band CPW-fed Monopole Antenna using L-shaped and Straight Slots", *International Conference On Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications And Information Technology, ECTI-CON*, (2016).
9. Ayyappan M, Manoj B, and Dr.Stephen Rodrigues, "Low Return Loss Circular Microstrip Patch Antenna at 5.8GHz for Wide-band Applications", *International Conference On Electrical, Electronics, And Optimization Techniques (ICEEOT)*, 3023–3026 (2016).
10. Liu, A., Lu, Y., and Huang, L., "Low-profile patch antennas with enhanced horizontal omnidirectional gain for DSRC applications", *IET Microwaves, Antennas And Propagation*, 12 (2): 246–253 (2018).
11. Mondal, T., Maity, S., Ghatak, R., and Chaudhuri, S. R. B., "Design and analysis of a wideband circularly polarised perturbed psi-shaped antenna", *IET Microwaves, Antennas And Propagation*, 12 (9): 1582–1586 (2018).
12. Sayed Amirul Hassan, Md. Samsuzzaman, Mohammad Jamal Hossain, Md. Akhtaruzzaman, and Tariqul Islam, "Compact Planar UWB Antenna with 3.5/5.8 GHz Dual Band-Notched Characteristics for IoT Application", *IEEE International Conference On Telecommunications And Photonics (ICTP)*, 195–199 (2017).
13. Younes El Hachimi, Yassine Gmih, El mostafa Makroum, and Abdelmajid Farchi, "A Compact Dual-band Antenna including Symmetrical Slots for 2.45/5.8 GHz Handheld RFID Reader Applications", *4th International Conference On Optimization And Applications (ICOA)*, (2018).
14. Li, H., Zheng, Q., Ding, J., and Guo, C., "Dual-band planar antenna loaded with CRLH unit cell for WLAN/WiMAX application", *IET Microwaves, Antennas And Propagation*, 12 (1): 132–136 (2018).
15. Venkat, K., Divya, C., Koushick, V., Lakshmi, G., Dinesh, S., Scholar, R., and Associate, R., "DESIGN OF PATCH ANTENNA FOR ISM BAND APPLICATIONS USING CST MICROWAVE STUDIO DESIGN AND SIMULATION OF COMMON FEED WITH DOUBLE MICROSTRIP PATCH ANTENNA FOR DUAL BAND SATELLITE APPLICATIONS View project DESIGN OF PATCH ANTENNA FOR ISM BAND APPLICATIONS

- USING CST MICROWAVE STUDIO", *International Journal Of Management, Technology And Engineerin*, 2846–2853 (2019).
16. Stefano Maddio, Giuseppe Pelosi, Monica Righini, and Monica Righini, "A Compact Series Array for Vehicular Communication in the C-Band", *IEEE International Symposium On Antennas And Propagation And USNC-URSI Radio Science Meeting*, 1337–1338 (2019).
 17. Kumar, M., Agarwal, S., and Sharma, A., "A Multi-application Compact Ultra Wideband Vivaldi Antenna for IoT, 5G, ITS, and RFID", *IEEE Indian Conference On Antennas And Propagation (InCAP)*, (2019).
 18. Pradeep Singh, Kota SivaRamaKrishna Chaitanya, and Runa Kumari, "Microstrip Patch Antenna for application in Intelligent Transport Systems", *TEQIP III Sponsored International Conference On Microwave Integrated Circuits, Photonics And Wireless Networks (IMICPW)*, 324–327 (2019).
 19. Adnan Basir Patwary, Sabrina Abedin, and Md. Azad Hossain, "Design of a Ladybug Shaped Circular Polarized Microstrip Antenna at 5.8 GHz as Microwave Power Transmitter to a MAV", *2019 International Conference On Electrical, Computer And Communication Engineering (ECCE)*, (2019).
 20. Kanni, V. R. and Brinda, R., "Design of High Gain Microstrip Antenna for Vehicle to Vehicle Communication Using Genetic Algorithm", *Progress In Electromagnetics Research M*, 81: 167–179 (2019).
 21. Rahman, N. A. A., Jamlos, M. A., Jamlos, M. F., Soh, P. J., Bahari, N., and Hossain, T. M., "Compact bidirectional circularly polarized dedicated short range communication antenna for on-board unit vehicle-to-everything applications", *International Journal Of RF And Microwave Computer-Aided Engineering*, 30 (5): (2020).
 22. Sathiamoorthy, K., Muthaiah, S., and Vignesh Subramanian, K., "Compact Antenna For Future Short Range Communication Among Automobiles Article in", *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 8: 8 (2019).
 23. Naji, D. K., "Miniature slotted semi-circular dual-band antenna for WiMAX and WLAN applications", *Journal Of Electromagnetic Engineering And Science*, 20 (2): 115–124 (2020).
 24. Lukman Medriavin Silalahi, Setiyo Budiyanto, Freddy Artadima Silaban, Imelda Uli Vistalina Simanjuntak, Putri Syahkina Hendriasari, and Heryanto,

- "Design of 2.4 GHz and 5.8 GHz Microstrip Antenna on Wi-Fi Network", *2nd International Conference On Broadband Communications, Wireless Sensors And Powering (BCWSP)*, 6–11 (2020).
25. Samanta, S., Mandal, K., Reddy, S., and Nasimuddin, N., "Circularly Polarized Metallic Post Integrated Patch Antenna for Road Transport and Traffic Telematics Application at 5.8 GHz DSRC Band", *URSI Regional Conference On Radio Science (URSI-RCRS)*, 12–14 (2020).
 26. Jimi Prasajo and Riyanarto Sarno, "Hexagonal Patch Microstrip Antenna with Parasitic Element for Vehicle Communication", *International Seminar On Application For Technology Of Information And Communication (ISemantic)*, 340–345 (2020).
 27. Hritik Singhal, Ashwin S, Vinay Sharma, Jitendra Prajapati, and Madhur Deo Upadhayay, "High Gain Hexagonal Patch Antenna for V2V Communication", *7th International Conference On Signal Processing And Integrated Networks (SPIN)*, 687–691 (2020).
 28. Sharma, A., Prajapati, A., and Pinho, P., "Interference-Aware Antenna Synthesis for Enhanced Coverage in Intelligent Transportation System", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 70 (8): 7803–7811 (2021).
 29. Modi, A., Sharma, V., and Rawat, A., "Compact Design of Multiband Antenna for IRNSS, Satellite, 4G and 5G Applications", (2021).
 30. Kumar, K. S., Naik, B. M., Vahini, S., Kunooru, B., and Ramakrishna, D., "Design of Miniaturized Planar Inverted F Antenna", (2022).
 31. Sabari Prasad, M. and Jayakumar, M., "Design and Performance Evaluation of Superstrate Microstrip Array Antenna for V2I-DSRC Applications", (2021).
 32. Dash, J. C. and Sarkar, D., "Multi-Antenna Configuration with Reduced Passive Self-Interference for Full-Duplex Intelligent Transportation System", (2022).
 33. Nga, G., Moakyef, M., Manzoor, S., and Ramasamy, M., "Compact Ultra-Wideband Slotted Microstrip Patch Antenna for 5G, IoT and RFID Applications", *International Conference On Artificial Life And Robotics (ICAROB2022)*, 1012–1016 (2022).
 34. Ameen, A. M., Ahmed, M. I., Elsadek, H., and Anis, W. R., "A Wideband Compact Antenna for Vehicles Communication in ITS Applications", (2022).

35. Surender, D., Halimi, M. A., Khan, T., Talukdar, F. A., and Antar, Y. M. M., "Circularly Polarized DR-Rectenna for 5G and Wi-Fi Bands RF Energy Harvesting in Smart City Applications", *IETE Technical Review (Institution Of Electronics And Telecommunication Engineers, India)*, 39 (4): 880–893 (2022).
36. Zheng, Y., Gao, M., and Zhao, X., "A Broadband Multimode Antenna With Enhanced Gain and High Efficiency By Employing Single-Layer Metasurface for WLAN and Car-to-Car Application", *IEEE Access*, (2022).
37. Paul, L. C., Saha, H. K., Roy, T. K., Azim, R., and Islam, M. T., "A Wideband Inset-fed Simple Patch Antenna for Sub-6 GHz Band Applications", (2022).
38. Yalduz, H. and Çizmeçi, H., "DESIGN AND ANALYSIS OF MULTI-BAND COMPACT MICROSTRIP ANTENNA IN GSM1900/WLAN/WiMAX/DSRC/X-BAND FREQUENCY BANDS FOR VEHICLE APPLICATIONS", *Journal Of Scientific Reports*, 407–418 (2023).
39. Ali, W., Nizam-Uddin, N., Abdulkawi, W. M., Masood, A., Hassan, A., Abdul Nasir, J., and Khan, M. A., "Design and Analysis of a Quad-Band Antenna for IoT and Wearable RFID Applications", *Electronics (Switzerland)*, 13 (4): (2024).
40. Gaya, S., Hamza, A., Sokunbi, O., Sheikh, S. I. M., and Attia, H., "Electronically Switchable Frequency and Pattern Reconfigurable Segmented Patch Antenna for Internet of Vehicles", *IEEE Internet Of Things Journal*, (2024).
41. Xia, Z. X., Leung, K. W., Yang, N., and Lu, K., "Compact Dual-Frequency Antenna Array with Large Frequency Ratio", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 69 (4): 2031–2040 (2021).
42. Boukarkar, A., Lin, X. Q., Jiang, Y., and Yu, Y. Q., "Miniaturized Single-Feed Multiband Patch Antennas", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 65 (2): 850–854 (2017).
43. Xiang, B. J., Zheng, S. Y., Wong, H., Pan, Y. M., Wang, K. X., and Xia, M. H., "A Flexible Dual-Band Antenna with Large Frequency Ratio and Different Radiation Properties over the Two Bands", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 66 (2): 657–667 (2018).

44. Li, Y., Sim, C. Y. D., Luo, Y., and Yang, G., "Multiband 10-Antenna Array for Sub-6 GHz MIMO Applications in 5-G Smartphones", *IEEE Access*, 6: 28041–28053 (2018).
45. Elmobarak, H. A., Himdi, M., Castel, X., Rahim, S. K. A., and Geok, T. K., "Flexible Patch Antenna Array Operating at Microwaves Based on Thin Composite Material", *IEEE Access*, 10: 115663–115672 (2022).
46. Sun, Y. X., Leung, K. W., and Lu, K., "Compact Dual Microwave/Millimeter-Wave Planar Shared-Aperture Antenna for Vehicle-to-Vehicle/5G Communications", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 70 (5): 5071–5076 (2021).
47. Lee, K. F., Yang, S. L. S., and Kishk, A. A., "Dual- and multiband U-slot patch antennas", *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 7: 645–647 (2008).
48. Govindarajulu, S. R., Hokayem, R., Tarek, M. N. A., Guerra, M. R., and Alwan, E. A., "Low profile dual-band shared aperture array for vehicle-to-vehicle communication", *IEEE Access*, 9: 147082–147090 (2021).
49. Lakrit, S., Ammor, H., Terhzaz, J., and Tribak, A., "Realization and Measurements of a Miniature Square Patch Antenna for Ultra Wideband Applications", (2015).
50. Slimani, A., Bennani, S. D., El Alami, A., and Terhzaz, J., "Ultra Wideband Planar Microstrip Array Antennas for C-Band Aircraft Weather Radar Applications", *International Journal Of Antennas And Propagation*, 2017: (2017).
51. Bemani, M. and Nikmehr, S., "A NOVEL WIDE-BAND MICROSTRIP YAGI-UDA ARRAY ANTENNA FOR WLAN APPLICATIONS", (2009).
52. "Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi ve 2020-2023 Eylem Planı", .
53. Kuor-Hsin Chang and Chang Consulting, "Wireless Communications For Vehicular Safety", *IEEE Wireless Communications*, 22 (1): 6–7 (2015).
54. Festag, A., "Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G", *Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 132 (7): 409–416 (2015).
55. Ström, E. G., "On medium access and physical layer standards for cooperative intelligent transport systems in Europe", *Proceedings Of The IEEE*, 99 (7): 1183–1188 (2011).

56. Makino, H., Tamada, K., Sakai, K., and Kamijo, S., "Solutions for urban traffic issues by ITS technologies", *IATSS Research*, 42 (2): 49–60 (2018).
57. Japan Traffic Management Technology Association Institute of Urban Traffic Research, "ITS Developed by Japanese Police", .
58. Gohar, A. and Nencioni, G., "The role of 5g technologies in a smart city: The case for intelligent transportation system", *Sustainability (Switzerland)*, 13 (9): (2021).
59. Abbas, K., Tawalbeh, L. A., Rafiq, A., Muthanna, A., Elgendy, I. A., and Abd El-Latif, A. A., "Convergence of Blockchain and IoT for Secure Transportation Systems in Smart Cities", *Security And Communication Networks*, 2021: (2021).
60. Yeong, D. J., Velasco-hernandez, G., Barry, J., and Walsh, J., "Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review", *Sensors*, 21 (6): 1–37 (2021).
61. Hasrouny, H., Samhat, A. E., Bassil, C., and Laouiti, A., "VANET Security Challenges and Solutions: A survey", *Vehicular Communications*, 7: 7–20 (2017).
62. Ji, B., Zhang, X., Mumtaz, S., Han, C., Li, C., Wen, H., and Wang, D., "Survey on the Internet of Vehicles: Network Architectures and Applications", *IEEE Communications Standards Magazine*, 4 (1): 34–41 (2020).
63. Garg, S., Mehrotra, D., Pandey, H. M., and Pandey, S., "Accessible review of internet of vehicle models for intelligent transportation and research gaps for potential future directions", (2083).
64. "Intelligent Transport Systems - Handbook on Land Mobile (Including Wireless Access)", (2021).
65. Açıkgöz, T., "Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Analizi Ve Uygulamaları", (2020).
66. Turan, M. C., "AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ VE ARAÇSAL AĞLARIN KULLANILDIĞI ADAPTİF SEYİR KONTROL SİSTEMİ BENZETİMİ", .
67. Cheng, Y.-M., Lee, I.-K., Cha, J.-S., and Kwak, K.-S., "Analysis on the Interference of UWB Sensor into WiBro in Korea", *9th International Symposium On Communications And Information Technology*, 1421–1425 (2009).

68. An, S. H., Lee, B. H., and Shin, D. R., "A survey of intelligent transportation systems", (2011).
69. Biçer, M. B., "Wlan/Wimax Uygulamaları İçin Kompakt Mikroşerit Anten Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi", (2011).
70. Sağık, M., "Mikroşerit Antenin Parametrelerini MTM Yapılar İle İyileştirme Ve Parametre Değerlerinin Yapay Sinir Ağı İle Tahmin Edilmesi", (2019).
71. Balanis, C. A., "ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN THIRD EDITION", .
72. Uysal, "BİR DAİRESEL POLARİZASYONLU MİKROŞERİT ANTENDE EKSENEL ORAN FREKANS BANT GENİŞLİĞİNİN MANTAR BİÇİMLİ BİR ELEKTROMANYETİK BANT ARALIĞI YAPISI İLE ARTIRILMASI", (2015).
73. Çekingen, M., "YAPAY MANYETİK İLETKEN TOPRAK YÜZEYLİ GENİŞBANT MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI", (2011).
74. Uyanık, "KALP DAMAR TIKANIKLIĞININ TESPİTİ İÇİN GİYİLEBİLİR MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI", (2021).
75. Şen, C., "GPS L1, L2 VE L5 BANTLARINDA ÇALIŞAN YIĞIN YAPILI MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ TEZİ", .
76. Pozar, D. M., "Microstrip Antennas Invited Paper", (1992).
77. Kayabaşı, "KOMPAKT MİKROŞERİT ANTENLERİN REZONANS FREKANSININ YAPAY SİNİR AĞLARI ve BULANIK MANTIK SİSTEMİNE DAYALI UYARLANIR AĞ KULLANARAK HESAPLANMASI MERSİN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI DOKTORA TEZİ MERSİN HAZİRAN-2015", (2015).
78. Ataş, İ., "YÜKSEK KAZANÇLI MİKROŞERİT ANTENLERİN HFSS İLE MODELLENMESİ VE TASARIMI", (2019).
79. Kuş, A., "DİKDÖRTGEN MİKROSERİT ANTENLERİN BİLGİ – TABANLI DESTEK VEKTÖR ANALİZİ", (2010).
80. Huang, Y. and Boyle, K., "Antennas : From Theory to Practice", .
81. Li Chao, Wang Yonghua, and Zhang Zhimin, "A Feed Network of Microstrip Array Antenna", *IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic And Automation Control Conference (ITNEC)*, 1764–1767 (2017).

82. Stupfel, B., Andrieu, P., Lecouvez, M., and Pujols, A., "Efficient Feed Port Modeling of Patch or Microstrip Antennas in a Finite-Element Method", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 71 (12): 9386–9393 (2023).
83. El Jaafari, B., Gonzalez De Aza, M. A., and Zapata, J., "An approach based on finite element method for CAD of printed antennas", *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 11: 1238–1241 (2012).
84. Zhang, H.-X., Huang, L., Zhou, L., Zhao, Z. G., Zheng, Y.-T., Zhu, G. D., and Yin, W.-Y., "Electromagnetic-Thermal Co-simulation of Large Antenna Array on Platform Using Enhanced Finite Element Solver with Massively Parallel Computing Capability", .
85. Ramadan, A., Al, M., Karim, -Husseini, Kabalan, Y., and Ei-Hajj, A., "Design Using FEM and MoM of an Ultra-wideband Microstrip Antenna Based on a Modified Sierpinski Carpet", (2009).
86. Atar, H., "Farklı Frekansta Yayın Yapan Mikroşerit Antenin İnsan Kafatasına Olan Etkisinin İncelenmesi", (2019).
87. Ezzulddin, S. K., Hasan, S. O., and Ameen, M. M., "Microstrip patch antenna design, simulation and fabrication for 5G applications", *Simulation Modelling Practice And Theory*, 116: (2022).
88. F.M. Abdussalam, Linda Djouablia, I.T.E. Elfergani, A.S. Hussaini, J. Rodriguez, R.A. Abd-Alhameed, and S.M.R. Jones, "The Computation of Complex Resonance of Microstrip Antenna Using Method of Moment and Firefly Algorithms", (2016).
89. Puranik, A., Nayak, S., Agnihotri, A., Visoriya, A., Chouhan, S., Jain, S. K., and Dhote, C., "Design of Microstrip Patch Antennas Using Method of Moment Based MATLAB Codes", (2017).
90. Batur, M. N., "MOM ANALYSIS OF LOADED PRINTED DIPOLES WITH APPLICATIONS IN THE DESIGN OF ELECTRICALLY SMALL ANTENNAS A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY", (2015).
91. Zhou, H., Sutton, N. A., and Filipovic, D. S., "Wideband W-band Patch Antenna", .

92. Bilgin, G., Yilmaz, V. S., Kara, A., and Aydin, E., "Comparative assessment of electromagnetic simulation tools for use in microstrip antenna design: Experimental demonstrations", *Microwave And Optical Technology Letters*, 61 (2): 349–356 (2019).
93. Kaburcuk, F., Kalinay, G., Chen, Y., Elsherbeni, A. Z., and Demir, V., "A dual-band and low-cost microstrip patch antenna for 5g mobile communications", *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 36 (7): 824–829 (2021).
94. Balti, E. and Johnson, B. K., "Sub-6 GHz Microstrip Antenna: Design and Radiation Modeling", (2019).
95. Asif, R. M., Aziz, A., Amjad, M., Akhtar, M. N., Baqir, A., and Nawaz Abbasi, N., "Analysis and design of an efficient and novel MIMO antenna for 5G smart phones using FDTD and FEM", *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 36 (3): 266–272 (2021).
96. Sharma, S. K., Mulchandani, J. D., Gupta, D., and Chaudhary, R. K., "Triple-band metamaterial-inspired antenna using FDTD technique for WLAN/WiMAX applications", *International Journal Of RF And Microwave Computer-Aided Engineering*, 25 (8): 688–695 (2015).
97. Toktaş, A., "Farksal Gelişim Algoritması Kullanarak H Şekli Mikroişerit Antenlerin Rezonans Frekansının Hesaplanması", .
98. Yu, W. and Mittra, R., "A Conformal FDTD Software Package Modeling Antennas and Microstrip Circuit Components", (2000).
99. Şen, C., "GPS L1, L2 VE L5 BANTLARINDA ÇALIŞAN YIĞIN YAPILI MİKROİŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ TEZİ", .
100. Alibakhshikenari, M., Virdee, B. S., Azpilicueta, L., Naser-Moghadasi, M., Akinsolu, M. O., See, C. H., Liu, B., Abd-Alhameed, R. A., Falcone, F., Huynen, I., Denidni, T. A., and Limiti, E., "A Comprehensive Survey of “Metamaterial Transmission-Line Based Antennas: Design, Challenges, and Applications”", *IEEE Access*, 8: 144778–144808 (2020).
101. Errifi, H., Baghdad, A., Badri, A., and Sahel, A., "Design and Analysis of Directive Microstrip Patch Array Antennas with Series, Corporate and Series-Corporate Feed Network", *International Journal Of Electronics And Electrical Engineering*, 3 (6): (2015).

102. Nyitamén, D. S., Agbendeh, and Simon T, "MODIFIED TRANSMISSION LINE MODEL EQUATIONS FOR MICROSTRIP ANTENNA DESIGN", (2018).
103. Liton Chandra, P., Md., I. H., Rezaul, A., Md. Rashedul, I., and Mohammad Tariqul, I., "Design of High Gain Microstrip Array Antenna and Beam Steering for X and RADAR Application", .
104. Modi, A., Sharma, V., and Rawat, A., "Compact Design of Multiband Antenna for IRNSS, Satellite, 4G and 5G Applications", (2021).
105. Modi, A., Sharma, V., and Rawat, A., "Compact design of ka-band antenna for 5G applications", (2021).
106. Brij Bhushan, C., Ratul, D., and Manik, B., "A Novel Design for Circular Patch Fractal Antenna for Multiband Applications", *3rd International Conference On Signal Processing And Integrated Networks*, (2016).
107. Türkmen, H. A., "5G HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN GENİŞ BANT MİLİMETRE DALGA MİKROŞERİT ANTENİN TASARLANMASI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ", (2021).
108. Sabek, A. R., Ibrahim, A. A., and Ali, W. A., "Dual-Band Millimeter Wave Microstrip Patch Antenna with StubResonators for 28/38 GHz Applications", (2021).
109. Christian, R., Christian, K., Stefan, B., and Thomas Zwick, "Planar Beam Switched Antenna with Butler Matrix for 60GHz WPAN", (2012).
110. Vilenskiy, A. and Kletsov, A., "Ultra-Wideband Signals Radiation by Linear Arrays of Aperture Stacked Patch Antennas", (2013).
111. ISAYEV, M., "FARKLI YAPILARDAKİ SERAMİK MALZEMELERİN MİKROŞERİT ANTEN OLARAK TASARIMLARI VE ELEKTRİKSEL PERFORMANSLARININ ANALİZİ", .
112. "High Gain Hexagonal Patch Antenna for V2V Communication", .
113. Shafqat, A. and Tahir, F. A., "Miniaturized Tapered Meandered Dual Band Dipole Antenna for WiFi 2.4/5.8 GHz Application", (2017).
114. Selvam, Y. P., Elumalai, L., Alsath, M. G. N., Kanagasabai, M., Subbaraj, S., and Kingsly, S., "Novel Frequency- And Pattern-Reconfigurable Rhombic Patch Antenna with Switchable Polarization", *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 16: 1639–1642 (2017).

115. Al Ka'Bi, A., "Design of a Microstrip Dual Band Fractal Antenna for Mobile Communications", (2022).
116. Merbin, J., Ayyappan, M., Manoj, B., and Stephen, R., "Bandwidth Enhancement of Microstrip Patch Antenna for 5.8GHz by Optimized Feed Offset", *2016 International Conference On Communication And Signal Processing (ICCSP)*, 2186–2189 (2016).
117. Mukta, C., Rahman, M., and Islam, A. Z. Md. T., "Design of a Compact Circular Microstrip Patch Antenna for WLAN Applications", *International Journal On AdHoc Networking Systems*, 11 (03): 01–11 (2021).
118. Atif, A., Majid, A., Zahid, M., and Amin, Y., "Circular Slotted Triangular Patch Antenna for 5.8 GHz ISM Band Applications †", *Engineering Proceedings*, 46 (1): (2023).
119. Jung, J. I. and Yang, J. R., "5.8-GHz Patch Antenna with an Enhanced Defected Ground Structure for Size Reduction and Increased Bandwidth", *Journal Of Electromagnetic Engineering And Science*, 22 (3): 245–251 (2022).
120. Debabrata K., K., Khaled M., M., Selim, H., and Nurunnabi, M., "A High-Gain Slot-Loaded Microstrip Patch Antenna Fed by a Half-Width Microstrip Line for 5.5 and 5.8 GHz Wi-Fi/WiMAX Applications", *Proceedings Of International Conference On Electrical Information And Communication Technology* , (2015).
121. Mangal, J., "RFID reader with miniaturized horn patch for microwave frequency applications at 5.8 GHz", (2020).
122. Elijah, A. A. and Mokayef, M., "Miniature microstrip antenna for IoT application", (2019).
123. Durgun, A. C., Balanis, C. A., Birtcher, C. R., and Allee, D. R., "Design, simulation, fabrication and testing of flexible bow-tie antennas", *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 59 (12): 4425–4435 (2011).

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet İzzeddin GÜLER ilk, orta öğrenimini Karaman'da, lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2022 yılında mezun oldu. Ayrıca 2017 yılında öğrenime başladığı Anadolu Üniversitesi, Açıköğretim Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümünden de 2023 yılında mezun oldu. 2022 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2023 yılında Karabük Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı kurumda çalışmaya devam etmektedir.