

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

**Mikrodalga Bölgesinde Süper-Formül Yaklaşımıyla Mikroşerit Anten
Tasarımları**

Eda ULU

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Cemile BARDAK**



MANİSA-2020

Eda ULU

**MİKRODALGA BÖLGESİNDE SÜPER-FORMÜL YAKLAŞIMIYLA MİKROŞERİT
ANTEN TASARIMLARI**

2020

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Eda ULU



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VI
TEŞEKKÜR.....	VIVII
ÖZET.....	VIIVIII
ABSTRACT	IXX
1. GİRİŞ	1
2.GENEL BİLGİLER	7
2.1 Antenler	7
2.2 Anten Parametreleri.....	8
2.2.1 Işıma Deseni	9
2.2.2 Hüzme Genişliği	10
2.2.3 Yönlülük	11
2.2.4 Giriş Empedansı.....	12
2.2.5 Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)	13
2.2.6. Geri Dönüş Kaybı	14
2.2.7 Anten Verimi	14
2.2.8 Bant Genişliği	15
2.2.9 Polarizasyon (Kutuplanma)	16
2.3. Anten Çeşitleri.....	17
2.3.1. Tel Antenler	17
2.3.2. Açıklık Antenler	17
2.3.3. Dizi Antenler.....	18
2.3.4. Mikroşerit antenler.....	19
3. MİKROŞERİT ANTENLER	20
3.1. Mikroşerit Anten Çeşitleri.....	20
3.1.1. Mikroşerit Yama Antenler	20
3.1.2. Mikroşerit Yarık Antenler	22
3.1.3. Mikroşerit Dipol Antenler	22
3.1.4. Mikroşerit Yürüyen Dalga Antenler	23
3.2 Mikroşerit Antenlerin Avantaj ve Dezavantajları	24

3.3. Mikroşerit Antenlerin Çalışma Prensibi	24
3.4. Mikroşerit Antenlerde Kullanılan Besleme Teknikleri	25
3.4.1. Mikroşerit Hatlı Besleme	25
3.4.2. Koaksiyel Besleme	27
3.4.3. Açıklık Kuplajlı Besleme	27
3.4.4. Yakınlık Kuplajlı Besleme	28
4. MATERYAL VE YÖNTEMLER	29
4.1. Mikroşerit Anten Tasarımı	29
4.2. Dielektrik Malzeme Seçimi	30
4.3. Mikroşerit Antenlerde Yama Boyutlarının Hesaplanması	30
4.3.1. Dikdörtgensel Yamalı Mikroşerit Antenlerde Yama Boyutlarının Hesaplanması	31
4.3.2. Dairesel Yamalı Mikroşerit Antenlerde Yama Boyutlarının Hesaplanması	32
4.4. Mikroşerit Antenlerde Giriş Empedansının Hesaplanması	33
4.5. Süper- Formül	33
4.6. Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (HFSS)	36
4.7. Mikroşerit Anten Üretimi ve Ölçümler	38
4.7.1. Baskı Devre Üretimi	38
4.7.2. Spektrum Ağ Analizörü	39
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	41
5.1. HFSS Programıyla Süper Şekli Mikroşerit Anten Tasarımı ve Analizi	41
5.1.1. Palmiye Yaprağı Şeklinde Yama Kullanan Mikroşerit Anten Tasarımları	42
5.1.2. Çınar Yaprağı Şeklinde Yama Kullanan Mikroşerit Anten Tasarımı	50
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1G	First Generation (Birinci Nesil)
2G	Second Generation (İkinci Nesil)
3G	Third Generation (Üçüncü Nesil)
4G	Fourth Generation (Dördüncü Nesil)
CSMA	Carrier Sense Multiple Access (Çoklu Erişimde Hat Kontrolü)
dB	Desibel
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution (GSM Evrimi İçin Geliştirilmiş Veri Hızları)
FEM	Finite Elements Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FNBW	First Null Bandwidth (İlk Sıfır Hüzme Genişliği)
FR-4	Frame Resistant – 4 (Isıya Dayanıklı-4)
GHz	Gigahertz
GPRS	General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Servisi)
GPS	Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
HFSS	High Frequency Structure Simulator (Yüksek Frekans Yapı Simülatörü)
HPBW	Half Power Bandwidth (Yarım Güç Hüzme Genişliği)
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
M.Ö.	Milattan Önce
Mbps	Megabits per second (Saniyede Megabit)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Çok Giriş Çok Çıkış)
MMS	Multimedia Messaging Service (Multimedya Mesajlaşma Servisi)
MOM	Method of Moments (Moment Metodu)
PCB	Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
RF	Radyo Frekansı
TEM	Transverse Electro Magnetic (Enine Elektromanyetik)
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio (Gerilim Duran Dalga Oranı)
Wi – Fi	Wireless Fidelity (Kablosuz Bağlantı)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access (Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik)
WLAN	Wireless Local Area Network (Kablosuz Yerel Alan Ağı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Alıcı ve verici antenlerin temel çalışması.....	7
Şekil 2.2. İletim modundaki bir antenin Thevenin eşdeğer devresi.....	7
Şekil 2.3. Anten Işıma Örüntüsü ve Lobların Gösterimi	9
Şekil 2.4. Yön bağımsız antene ait ışıma deseni.....	10
Şekil 2.5. Yönlü antene ait ışıma deseni.....	10
Şekil 2.6. İlk Sıfır Hüzme Genişliği ve Yarım Güç Hüzme Genişliğinin Işıma Deseni Üzerinde Gösterilmesi.....	11
Şekil 2.7. Genel anten modeli	13
Şekil 2.8. Verici anten eşdeğer devresi.....	13
Şekil 2.9. Bir antenin bant genişliği [28]	16
Şekil 2.10. Polarizasyon çeşitleri (a) doğrusal, (b) dairesel, (c) eliptik.....	16
Şekil 2.11. Tel anten örnekleri (a) Monopol anten, (b) Halka anten, (c) Sarmal anten (d) Yagi-Uda anten.....	17
Şekil 2.12. Açıklık anten örnekleri (a) Horn anten, (b) Yansıtıcı anten	18
Şekil 2.13. Dizi anten örnekleri (a) Yagi-Uda dizi, (b) Açıklık dizi, (c) Mikroşerit yama dizi, (d) Yarık dalga kılavuzu tipli dizi	18
Şekil 2.14. Mikroşerit anten örnekleri	19
Şekil 3.1. Mikroşerit Yama Anten Yapısı.....	21
Şekil 3.2. Geleneksel yama şekilleri	21
Şekil 3.3. Mikroşerit yarık anten örnekleri	22
Şekil 3.4. Mikroşerit dipol anten örneği	23
Şekil 3.5. Mikroşerit yürüyen dalga anten örnekleri.....	23
Şekil 3.6. Saçaklanma etkisi	25
Şekil 3.7. Doğrudan temaslı mikroşerit besleme ve eşdeğer devresi.....	26
Şekil 3.8. Boşluklu mikroşerit besleme ve eşdeğer devresi.....	26
Şekil 3.9. Mikroşerit hat besleme teknikleri (a) Çeyrek dalga dönüştürücülü, (b) Kenar bağlantılı, (c) İç girintili.....	26
Şekil 3.10. Koaksiyel beslemeli mikroşerit anten geometrisi.....	27
Şekil 3.11. Açıklık kuplajlı besleme yapısı	27
Şekil 3.12. Yakınlık kuplajlı besleme	28
Şekil 4.1. Mikroşerit anten tasarımında uygulanacak adımlar.....	29
Şekil 4.2. Dikdörtgen şekilli mikroşerit yama	32
Şekil 4.3. Süper-Formül parametrelerinin belirlenmesi	34
Şekil 4.4. Süper-Formül ile elde edilen şekiller.....	36
Şekil 4.5. HFSS kullanıcı ara yüzü	37
Şekil 4.6. Malzeme seçim penceresi	38
Şekil 4.7. Eleven Lab baskı devre üretim cihazı.....	39
Şekil 4.9. Signal Hound USB-SA124B spektrum analizörü	39
Şekil 4.10. Ölçüm düzeneği	40
Şekil 5.1. Palmiye ağacı yaprağı.....	42
Şekil 5.2. Tasarım-A'da kullanılan palmiye yaprağı şeklinde yama geometrisi	43

Şekil 5. 3. Palmiye Yaprığı Tasarım-A ön yüz ve arka yüz görünümü	43
Şekil 5.4. Palmiye yaprağı şeklinde yama kullanarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım-A)	44
Şekil 5.5. Palmiye Yaprığı Tasarım-A'ya ait S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	44
Şekil 5. 6. Palmiye Yaprığı Tasarım-A'ya ait ışıma deseni a) 2 Boyutta b) 3 Boyutta	45
Şekil 5.7. Palmiye Yaprığı Tasarım-A'ya ait VSWR grafiğı.....	46
Şekil 5.8. Palmiye Yaprığı Tasarım-B'de kullanılan yama geometrisi.....	47
Şekil 5.9. Palmiye Yaprığı Tasarım-B ön yüz ve arka yüz görünümü.....	47
Şekil 5.10. Palmiye yaprağı şeklinde yama kullanılarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım-B).....	48
Şekil 5.11. Palmiye Yaprığı Tasarım-B'ye ait S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	48
Şekil 5. 12. Palmiye Yaprığı Tasarım-B'ye ait kazanç grafiğı a) 2 Boyutta b) 3 Boyutta	49
Şekil 5.13. Palmiye Yaprığı Tasarım-B'ye ait VSWR grafiğı	50
Şekil 5.14. Palmiye Yaprığı Tasarım-B'ye ait yüzey akım dağılımı	50
Şekil 5.15. Çınar ağacı yaprağı	51
Şekil 5.16. Süper-Formül ile elde edilen çınar yaprağı biçimli yama geometrisi.....	51
Şekil 5.17. Çınar Yaprığı Tasarım-A ön yüz ve arka yüz görünümü.....	52
Şekil 5.18. Çınar Yaprığı Tasarım-A'ya ait geri dönüş kaybı (S11) grafiğı.....	52
Şekil 5.19. Çınar Yaprığı Tasarım-A'ya ait kazanç grafiğı a) 2 Boyutta b) 3 Boyutta	53
Şekil 5.20. Çınar Yaprığı Tasarım-A'ya ait VSWR grafiğı.....	53
Şekil 5.21. Çınar Yaprığı Tasarım-B'de kullanılan yama geometrisi.....	54
Şekil 5.22. Çınar Yaprığı Tasarım-B ön yüz ve arka yüz görünümü.....	54
Şekil 5.23. Çınar yaprağı şeklinde yama kullanılarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım-B).....	55
Şekil 5.24. Çınar Yaprığı Tasarım-B'ye ait S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	55
Şekil 5.25. Çınar Yaprığı Tasarım-B'ye ait kazanç grafiğı a) 2 Boyutta b) 3 Boyutta	56
Şekil 5.26. Çınar Yaprığı Tasarım-B'ye ait VSWR grafiğı	57
Şekil 5.27. Çınar Yaprığı Tasarım-A ve Çınar Yaprığı Tasarım-B'ye ait S11 değerlerinin karşılaştırılması.....	57

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Çeşitli dielektrik malzemelere ait elektriksel özellikler.....	30
Tablo 5. 1. Hesaplanan yama boyutları	41
Tablo 5.2. Tasarım–A’da kullanılan Süper–Formül Parametreleri.....	42
Tablo 5.3. Palmiye Yaprağı Tasarım–B’de kullanılan Süper–Formül Parametreleri	46
Tablo 5.4. Çınar yaprağı Tasarım-A’da kullanılan Süper-Formül Parametreleri	51
Tablo 5.5. 5.2 GHz merkez frekansına göre tasarlanmış geleneksel dikdörtgenel yamalı anten ile tasarlanan Süperşekilli antenlerin karşılaştırılması	58
Tablo 5.6. Literatürde mevcut olan Süperşekilli anten tasarımları ile tez kapsamında tasarlanan Süperşekilli mikroşerit antenlerin karşılaştırılması	59



TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cemile BARDAK'a, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen annem ve babama, hayatımın her alanında bana yol gösteren ablam Seda ULU'ya teşekkür ederim.

Ayrıca deneysel üretim ve ölçüm desteği sağlayan, Kâtip Çelebi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Merih PALANDÖKEN'e, Arş. Gör. Cem GÖÇEN'e ve Hacer Danacı'ya teşekkür ederim.

Eda ULU
Manisa, 2020



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİKRODALGA BÖLGESİNDE SÜPER-FORMÜL YAKLAŞIMIYLA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMLARI

Eda ULU

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cemile BARDAK

Günümüz teknolojilerinde üretilen elektronik cihazların büyük bir çoğunluğunun kablosuz ağ teknolojileri ile ve uzaktan erişime uygun yapıda olması beklenmektedir. Bu talepler doğrultusunda üretilen sistemlerde Wi-Fi ve WLAN yapıları önemli bir yer tutmaktadır. Bu yapıların en önemli parçasını anten tasarımları oluşturmaktadır. Özellikle iletişim teknolojisinde kullanılan cihazların boyutlarında meydana gelen küçülmeye birlikte cihaz yapısında kullanılan anten sistemlerinin de küçülmesine ihtiyaç duyulmuştur. Mikroşerit anten yapıları, bu gereksinimleri karşılamada önemli bir yer tutmaktadır. Mikroşerit antenlerin düşük kazanç ve dar bant genişliği gibi dezavantajları olmasına rağmen antenlerde kullanılan yama şeklinin, taban malzemesinin ve besleme yönteminin seçimi bu problemleri çözmede etkili olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, geleneksel yama geometrileri (kare, dikdörtgen, daire, elips vb.) yerine doğada mevcut olan yapılardan ilham alınarak tasarlanan geometriler mikroşerit anten yapısında yama şekli olarak kullanılmıştır. Yama geometrilerinin oluşturulmasında Süper-Formül yaklaşımından faydalanılmıştır. Tasarlanan antenlerin WLAN (Wireless Local Area Network) teknolojisinde çalışması istenmiş ve merkez frekansı 5.2 GHz olarak seçilmiştir. Kullanılan materyalin dielektrik sabiti, yüksekliği ve antenin merkez frekansı göz önünde bulundurularak yama boyutları hesaplanmıştır. Tasarlanan antenler, elektromanyetik alanları sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çözümleyen HFSS (High Frequency Structure Simulator-Yüksek Frekans Yapı Simülatörü) programıyla analiz edilmiş ve daha iyi bir geri dönüş kaybı için gerekli boyutsal optimizasyonlar sağlanmıştır. Ayrıca antenler PCB baskı yöntemi ile üretilmiş ve Skaler Network Analizörü kullanılarak gerekli ölçümler yapılmıştır. Elde edilen deneysel ölçüm ve benzetim sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Süperşekilli mikroşerit antenlerin, geleneksel yama şekli kullanan mikroşerit antenlere kıyasla daha küçük boyutlarda ve daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikroşerit anten, Süper-Formül, biyo-ilhamlı antenler, antenlerin minyatürleştirilmesi
2020, 65 Sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

MICROSTRIP ANTENNA DESIGNS VIA SUPER - FORMULA APPROACH ON MICROWAVE REGION

Eda ULU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Asts. Prof. Cemile BARDAK

The majority of electronic devices manufactured in today's technologies are supposed to get connected with wireless network systems and to have a structure suitable for remote access. Wi-Fi and WLAN structures have an exceptional place in these systems to meet the demands. Antenna designs are the most significant part of these structures. To have a reduction in the dimensions of the devices used in communication technology, the size of the antenna systems also needs to reduce. Microstrip antenna structures are of an essential role in miniaturization of the antenna systems. Although microstrip antennas have disadvantages such as low gain and narrow bandwidth, the determinations of the shape of the patch, the base material, and the feeding method used in antennas are of great importance in solving these problems.

In this thesis, geometries designed with inspiration from structures existing in nature are used as a patch shape in the microstrip antenna structure instead of traditional patch geometries such as square, rectangle, circle, ellipse. The Super-Formula approach is used to create patch geometries. The designed antennas are desired to work in WLAN (Wireless Local Area Network) technology, and the center frequency is selected as 5.2 GHz. The patch dimensions are calculated by considering the dielectric constant, the height of the substrate, and the center frequency of the antenna. The designed antennas are analyzed with the HFSS (High-Frequency Structure Simulator) program, which resolves electromagnetic fields using the finite element method. The necessary dimensional optimizations are provided for a better return loss. Also, antennas are produced with the PCB printing method, and necessary measurements are made using Scalar Network Analyzer. When the obtained experimental measurement and simulation results are compared, it is seen that the results are compatible. It is concluded that super-shaped microstrip antennas are smaller and more efficient than microstrip antennas that use traditional patch shape.

Keywords: Microstrip antenna, Super – Formula, bio-inspired antenna, the miniaturization of antennas

2020, 65 Pages

1. GİRİŞ

Haberleşme veya iletişim, genel olarak bir noktadan(verici) başka bir noktaya (alıcı) bilgi aktarımı olarak tanımlanabilmektedir. Uzak bölgeler arası iletişim, tarih öncesi çağlardan bu yana insanoğlunun en temel ihtiyaçlarından biri olmuştur. M.Ö 200.000’li yıllarda insanlar tamtam adı verilen müzik aleti yardımıyla haberleşirken; duvarlara çizilen resimler taş devrinde iletişim sağlama görevini üzerine almışlardır. Yıllar içerisinde duman, güvercin ve ulak ile haberleşme gibi ilkel yöntemler haberleşme amacıyla kullanılsa da teknolojinin ilerlemesi kablosuz iletişim cihazlarına duyulan ihtiyacın artmasına neden olmuştur.

Antenler ve haberleşme tarihindeki önemli gelişmeler aşağıdaki gibi listelenebilir [1]:

- 1844 – Telgraf ile elektronik haberleşmenin başlangıcı (Samuel Morse)
- 1864 – Elektromanyetik spektrum ve radyo dalgalarının temelini açıklayan Maxwell denklemleri (James Clerk Maxwell)
- 1876 – Uzak mesafeler arası iletişimin kablolu analog telefon ile sağlanması (Alexander Bell)
- 1887 – İlk anten (Heinrich Hertz)
- 1897 – İlk kablosuz iletişim sistemi uygulaması (Guglielmo Marconi)
- 1901 – İlk transatlantik radyo (Guglielmo Marconi)
- 1920 – İlk radyo istasyon yayını
- II. Dünya Savaşı yılları – Radar, açıklık anten, yansıtıcı anten ve dizi antenlerin gelişimi
- 1950’ler - Geniş kullanımlı televizyon yayıncılığı
- 1960’lar – Uydu haberleşmesi ve fiber optik
- 1980’ler – 1. nesil (1G) kablosuz iletişim sistemleri
- 1990’lar – 2. nesil (2G) kablosuz iletişim sistemleri
- 2004 – 3. nesil (3G) kablosuz iletişim sistemleri
- 2012 – 4. nesil (4G) kablosuz iletişim sistemleri

1980 yılı itibariyle hayatımıza giren kablosuz iletişim cihazları 1G (1. nesil) haberleşme protokolünün örneklerindedir. Bu protokol sadece ses verilerinin taşınmasına olanak sağlamaktaydı. 1990’lı yıllara kadar 1G protokolü kullanılmaya

devam etmiş olup sonrasında yerini 2G haberleşme protokolüne bırakmıştır. Bu sistemle birlikte sesli konuşmanın yanı sıra SMS ile haberleşme dönemi de başlamıştır. Zamanla GPRS, EDGE ve MMS teknolojilerinin de bu protokolün kapsamına girmesiyle 2.5G, 2.75G gibi farklı isimler almıştır. 2000 yılı itibariyle akıllı telefonların hayatımıza girmesiyle birlikte kullanıcılara görüntülü arama hizmeti sunan 3G protokolü sunulmuştur. Kullanıcıların daha yüksek hız beklentisi 2012 yılı itibari ile 4G protokolünün ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Kablosuz iletişim sistemleri; WLAN Wi-Fi, WiMAX, cep telefonu, mikrodalga, trafik radarı, kızıl ötesi, GPS gibi pek çok uygulamaya sahiptir ve anten yapısı bu sistemlerin hayati bir parçasıdır.

WLAN teknolojisi, IEEE 802.11 standardıyla belirlenmiş bir kablosuz yerel ağ teknolojisidir. 30 – 300 m uzaklığındaki mesafelerde iki yönlü kablosuz haberleşmeye olanak sağlar. Bu teknoloji, yüksek hızlarda veri aktarımını sağlar ve ağ yapılarına kolayca uygulanabilir. Kablosuz iletişim kurma avantajı sayesinde günlük hayatta kullanılan cep telefonları, taşınabilir bilgisayarlar, fotoğraf makineleri ve yazıcılar gibi elektronik cihazlarda kullanımı tercih edilmiştir. WLAN teknolojisi, üçüncü nesil (3G) iletişim sistemlerine göre hem daha hızlı hem de daha kaliteli bir servis sağlamaktadır. WLAN teknolojisinde daha güvenilir veri aktarımının sağlanabilmesi için çoklu erişimde hat kontrolü (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) teknolojisi kullanılmaktadır.

IEEE 802.11 standardı, WLAN teknolojisinin standartlarını belirlemiştir. 1990 yılında, Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) tarafından çalışmalar başlatılmış olup ilk sürümü ise 1997 yılında sunulmuştur. Bu sürüm, 2.4 GHz frekans bandını kullanmaktadır ve 75 m mesafede maksimum 2 Mbps hızında haberleşmeyi desteklemektedir. 2.4 GHz frekansı aynı zamanda bluetooth ve mikrodalga fırınlar gibi cihazlar tarafından da kullanıldığı için bazı sorunların ortaya çıkmasına neden olmuştur. 1999 yılında, 3.7 GHz ve 5 GHz frekans bantlarında, daha uzak mesafelerle iletişimi sağlayan IEEE 802.11a standardının geliştirilmesinin yanı sıra 2.4 GHz frekans bandında çalışan ve IEEE 802.11 standardına göre daha geniş mesafelerde daha hızlı haberleşmeye olanak sunan IEEE 802.11b sürümü yayınlanmıştır. 2003 yılında, IEEE 802.11b sürümü geliştirilerek standardın 54 Mbps'e kadar olan hızları desteklemesi sağlanmıştır. Bu

yeni sürüm IEEE 802.11g olarak adlandırılmıştır. 2009 yılında, son güncelleme yapılarak IEEE 802.11n sürümü geliştirilmiştir. Bu standartla, çok daha geniş mesafelerde, 150 Mbps'e kadar olan hızlarda kablosuz haberleşme sağlanmıştır.

Yüksek bant genişliği gerektiren yerel ağlarda, geniş kapsama alanı ve güvenlik gerektiren uygulamalarda IEEE 802.11b standardının kullanımı daha uygundur. Bu standarda uygun WLAN teknolojisinin kullanımıyla binaların içerisindeki kablolu yerel alan ağı, kablosuz olarak yenilenirse hem kabloların oluşturduğu karışıklık giderilmektedir hem de kablolar için kullanılan maliyet ortadan kaldırılmaktadır [2].

Yıllar geçtikçe haberleşme sistemleri gelişmekte ve buna bağlı olarak kullanılan antenlerin sağlaması gereken nitelikler değişmektedir. Günümüzde kullanılan cihazların iletişim ihtiyacımızı karşılama yanısıra küçük boyutlu ve düşük ağırlıklı olması beklenmektedir. Cihazların boyutlarında gerçekleşen küçülme yapısında bulunan antenlerin de minyatürleşmesini gerektirir. Bu durum, mikroşerit antenlerin kullanımının yaygınlaşmasına neden olmuştur.

Mikroşerit yama anten kavramından ilk kez 1953 yılında Deschamps bahsetmiş daha sonra ise Gutton ve Baissinot tarafından ilk patent alınmıştır[3,4]. Howel, pratikteki ilk mikroşerit yama anteni 1970'li yılların başında tasarlamış ve baskı devre yöntemleri kullanarak gerçekleştirmiştir. Bu çalışma sonunda üretilen antenin düşük profil gerektiren uygulamalar için uygun olduğu gözlemlenmiştir [5].

1981 yılında Carver ve Mink, Moment Metodu (MoM) ve Sonlu Elemanlar Yöntemini (Finite Element Method, FEM) dikdörtgensel yamalı mikroşerit antene uygulamıştır. Bu çalışmada hem farklı yama şekillerinin anten karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiş hem de taban olarak kullanılan dielektrik malzemenin kalınlığındaki değişimin antenin merkez frekansında meydana getirdiği değişim araştırılmıştır [6].

1985 yılında Kumar ve Gupta, dikdörtgensel yamalı mikroşerit antenin bant genişliğini arttırabilmek için üç yeni konfigürasyon tasarlamıştır. Bu tasarımlarda, aynı dielektrik taban malzemenin üzerine asıl yamanın yanısıra parazitik yamalar yerleştirmiş ve bant genişliğinin arttığını gözlemlemiştir [7]. 1986 yılında Sullivan ve

Schaubert antenin toprak tabakasında küçük bir dikdörtgenel açıklık oluşturarak bir mikroşerit anten tasarımı yapmıştır. Açıklık kuplajlı besleme yöntemini kullanarak elde edilen anten MoM ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada hem açıklık yüksekliğinin etkisi incelenmiş hem de taban malzemenin dielektrik sabitinin ve kalınlığının giriş empedansı ve merkez frekansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Analiz sonuçları antenin % 65 daha yüksek bant genişliği sağladığını göstermektedir [8].

1991 yılında Bhattacharya ve ark. tarafından dikdörtgenel, eliptik ve dairesel yamalı mikroşerit antenlerde iletim hattı modelini uygulanmıştır ve iletim hattı modelinin anten karakteristiğini etkileyen pek çok parametre üzerinde etkili olduğu görülmüştür [9]. 1998 yılında Yau ve Shuley moment metodunu (MOM) açıklık kuplajlı besleme tekniği kullanılan mikroşerit yama antenlerde uygulamış, ayrıca Green fonksiyonunu da kullanarak yüzey akım ve elektrik alan denklemlerini elde etmişlerdir [10]. 2001 yılında Rahmat-Samii ve ark. tarafından E – şekilli yama kullanılmıştır. Tasarlanan E – şekilli antenin iki farklı frekansta, daha küçük boyutta ve daha geniş bir bant aralığında çalıştığı görülmüştür [11].

Tüm bu çalışmalar incelendiğinde mikroşerit anten tasarımlarında genel olarak dikdörtgen, kare, daire, elips, üçgen vb. geleneksel yamaların kullanıldığı gözlemlenmiştir. Farklı şekillerde ve boyutlarda yamalar kullanılarak ve değişik özelliklere sahip taban malzeme kullanılarak elde edilen sonuçların iyileştirilmesi istenmiştir. Son zamanlarda, Süper-Formül yaklaşımı ile elde edilen şekillerin anten tasarımlarında kullanılmasıyla daha küçük boyutlarda, daha yüksek kazançlı ve daha büyük bant genişliğine sahip anten tasarımları elde edilmiştir.

Süper-Formül, 2003 yılında Johan Gielis tarafından sunulan geometrik bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım altı farklı parametreden oluşan bir formül ile ifade edilebilir. Süper-Formüldeki parametrelerin değişimiyle çok farklı şekiller elde edilmiştir [12]. Süper-Formül ile elde edilen bu şekillerden bazıları mikroşerit antenlerde yama olarak kullanılabilir.

İlk olarak 2010 yılında Siemoni ve ark. tasarladıkları ultra geniş bantlı anten yapısında Süper-Formül yaklaşımını kullanmıştır. Tasarlanan antenin ışınım desenleri incelendiğinde yüksek kazançlı ve frekans değişimlerine karşı kararlı olduğu görülmüştür. Bu özellikleri antenin, geniş bantlı iç haberleşme sistemleri için uygun

bir erişim noktası olarak işlev görebileceğini göstermektedir [13]. 2013 yılında Süper-Formülle tasarlanan bir antenin elektromanyetik özellikleri Bia ve ark. tarafından incelenmiştir. İnceleme sonucunda Süper-Formül yaklaşımı kullanılarak tasarlanan lens antenin yüksek frekanslarda kablosuz iletişim uygulamalarında kullanımının avantaj sağlayacağı gözlemlenmiştir [14].

2016 yılında Shaima Naser ve Nihad Dib tarafından yapılan çalışmada bir tek kutuplu ultra geniş bantlı anten Süper-Formül kullanılarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan yama 4.4 dielektrik sabitine ve 1.6 mm kalınlığa sahip kompakt boyutlu FR4 taban üzerine monte edilmiştir. Tasarlanan antenin kompakt olma ve yüksek sabit kazanç gibi birçok avantajı olduğu görülmüştür [15]. 2017 yılında araştırmacıların yaptığı bir başka çalışmada ise aynı Süper-Formül ile elde edilmiş ultra geniş bantlı iki antenin, aynı taban üzerine birbirine 180° yerleştirilmesiyle oluşan MIMO yapısı elde edilerek analizleri yapılmıştır. Her iki anten de 3.1 – 12 GHz bandında çalışmaktadır. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarında grup gecikmesinin neredeyse sabit kaldığı görülmüştür [16].

Yine 2017 yılında Amjad Omar ve ark. tarafından yapılan çalışmada 3.1-10.6 GHz bant aralığında çalışan bir ultra geniş bantlı yama anten önerilmiştir. Tasarımda Süper-Formül parametrelerinin seçilmesiyle elde edilen testere dişi benzeri bir çevreye sahip dairesel bir yama kullanılmıştır. Tasarlanan anten analiz edilip sonuçları dairesel yamalı mikroşerit anten ile kıyaslanmıştır. Önerilen antenin, dairesel yamanın çapında yaklaşık % 30 boyut küçültme, gelişmiş grup gecikme performansı, benzer kazanç performansı ve bant üzerinde yüksek radyasyon verimliliği sağladığı bulunmuştur [17]. Alexandre Jean René Serres ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada ise biyo-ilhamlı yani doğadan ilham alan mikroşerit antenler incelenmiştir. Süper -Formül kullanımıyla yapraklar, çiçekler veya hayvan uzuvları gibi doğadaki şekillerin üretilmesi kolaylaşmıştır. Üretilen bu şekillerin anten tasarımlarında yama olarak kullanılmıştır. Yapılan analizler sonrası yaprakların fraktal özelliği göstermesi sayesinde yaprak biçimli antenlerde iyi sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir [18].

2018 yılında Seyfollah ve ark. frekans seçici yüzey tasarımında Süper-Formülden faydalanmıştır. Tasarlanan frekans seçici yüzey minyatürleştirme yönünden başarılı olmuştur [19]. 2019 yılında Samaras ve ark. tarafından Süper-Formül kullanımıyla damla benzeri bir şekil elde edilmiştir. Elde edilen bu şekil

mikroşerit anten yapısında kullanılmıştır. Karakteristik mod analizi kullanılarak, tasarlanan antenin elektrik akımı ve manyetik akım değerleri analiz edilmiştir [20].

Literatürde yer alan araştırmalar incelendiğinde, Süper-Formül yaklaşımının mikroşerit antenlerde uygulanmasıyla geleneksel yama şekillerinin kullanımına kıyasla yüksek kazançlı, çok daha küçük yapılar elde edildiği gözlemlenmiştir.

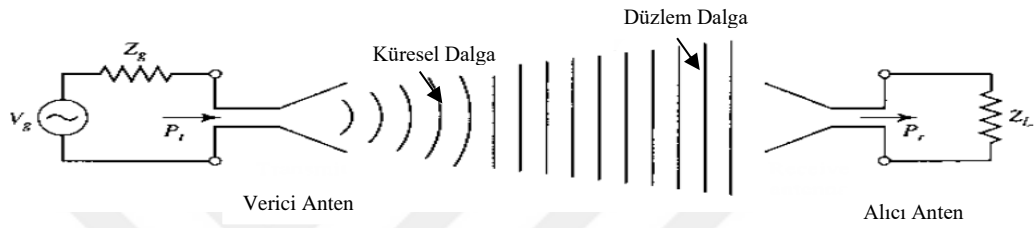
Kablosuz iletişim cihazlarının kullanımının ve işlevlerinin artmasıyla internet erişimi, elektronik posta, video izleme ve aktarma gibi uygulamalarda yüksek hızlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için, kesilme, gecikme ve parazit oluşumu olmadan çalışan güvenli sistemler tasarlanmıştır. Çok giriş ve çok çıkışa sahip olan Multi Input Multi Output (MIMO) sistemler bu uygulamaların örneklerindedir. MIMO sistemler sayesinde bir anten birden fazla noktadan beslenir. Bu sayede çoklu anten performansı tek bir anten üzerinden sağlanabilmektedir. MIMO anten sistemleri, kablosuz iletişim cihazlarının performansını arttıran yöntemlerin başında gelmektedir. Küçük bir alan üzerine iki veya daha fazla anten yerleştirilmesiyle MIMO antenler elde edilmektedir [21].

Bu çalışmada, Süper-Formül kullanımıyla elde edilen yamaların mikroşerit anten tasarımında kullanımı amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle Süper-Formül parametreleri seçilerek yama geometrileri elde edilmiştir. Süper-Formül parametreleri seçilirken yaprak şekillerinden ilham alınmıştır. Elde edilen şekiller ANSYS HFSS programında FR4 malzemesi üzerine yerleştirilerek anten yapıları elde edilmiştir. Daha iyi sonuçlar elde edebilmek için çeşitli boyutsal optimizasyonlar yapılmıştır. Analiz edilen mikroşerit anten yapılarına ait sonuçlar tezin beşinci bölümünde yer almaktadır. Ayrıca, tasarlanan antenler baskı devre yöntemleri kullanılarak üretilmiş ve Skaler Network Analizör cihazıyla gerekli ölçümler yapılmıştır. Tezin son bölümünde hem literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırma yapılmış hem de üretim sonuçları ile simülasyon sonuçlarının birbiriyle ne derecede örtüştüğü sunulmuştur.

2.GENEL BİLGİLER

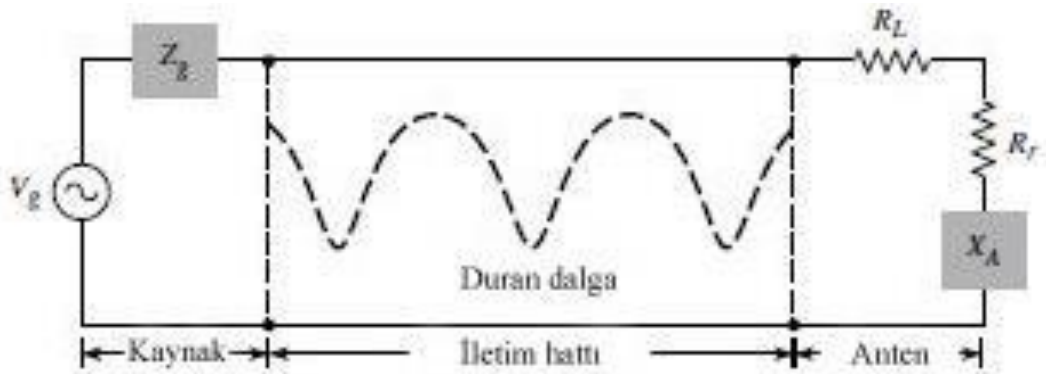
2.1 Antenler

Elektrik sinyalleri bir noktadan diğer noktaya iletim hattı kullanımıyla veya uç noktalarda anten kullanımıyla uzayda taşınabilir. Antenlerin amacı elektrik sinyallerini antenden uzak mesafelere ulaşmasını sağlamak yani ışıma yapmaktır. IEEE' ye göre anten "Elektromanyetik dalgalar almak veya yaymak için tasarlanan sistemin alıcı veya yayıcı kısmı" olarak tanımlanmaktadır [1]. Anten yapısı alıcı ve verici olmak üzere iki yönlü olarak çalışır [22]. Bu durum Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Alıcı ve verici antenlerin temel çalışması

Verici, temel olarak gerilim kaynağına seri bağlı bir dirençle ifade edilebilir ve verici antene P_t gücünü aktaran Thevenin kaynağı olarak modellenebilir. Verici anten, mesafe ilerledikçe düzlem dalgaya benzeyen bir küresel dalga yayılımı yapar. Alıcı anten verici antenden gelen dalganın bir bölümünü keser ve yük empedansına P_r gücünü iletir [22]. İki anten arası elektromanyetik dalga alışverişinin olabilmesi için alıcı ve verici antenin çalışma frekansı aynı olmalıdır [23].



Şekil 2.2. İletim modundaki bir antenin Thevenin eşdeğer devresi

İletim modundaki bir antene ait Thevenin eşdeğer devresi Şekil 2.2'de verilmiştir. Anten, empedans değeri Z_A [$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$] olan bir yük ile temsil edilir ve iletim hattına bağlanır. Burada R_L antenin yük direncidir, iletkenlik ve

dielektrik kayıplarını temsil eder. R_r ise ışına direnci olarak adlandırılır ve antenin ışına özelliğini temsil eder. X_A reaktansı, antenin ışına özelliğinin sanal kısmını temsil etmektedir. İdealde, kaynak tarafından üretilen enerjinin tamamı ışına direnci, R_r ' ye transfer edilmektedir. Ancak, pratikte böyle bir sistem mevcut değildir [23]. Kaynakta üretilen enerjinin ışına direncine aktarılması sırasında dielektrik kayıplarının yanı sıra anten ve iletim hattı arasında ara yüz uyumsuzluğu olabilir. Bu uyumsuzluk nedeniyle, kaynakta üretilen enerjinin tamamı antene aktarılamaz ve yansımalar meydana gelir. Uyumsuzluğun neden olduğu yansımalar anten ışınmasında önemli bir problem oluşturur.

Verici olarak çalışan bir antene gelen elektrik sinyali boşluğa elektromanyetik dalga halinde yayılır. Dalga alıcı bir antene ulaştığında anten üzerinde elektrik akımı indükler ve böylece elektromanyetik dalganın taşıdığı bilgi alıcı sisteme iletilmiş olur. Antenin çalışma prensibi, maksimum güç aktarımı ilkesine dayanır [24]. Maksimum güç, eşlenik eşleştirme koşulu altında aktarılır. Eşlenik eşleştirme koşulu, yük ve iletim hattı empedansının eşit olması durumudur. Bu eşitlik durumu sağlanmazsa enerjinin bir kısmı geri yansır. İletilen sinyalle yansıyan sinyal karşılaştığında bir duran dalga oluşur. Anten tasarımı düzgün yapılmazsa iletim hattı enerji depolama cihazı gibi davranır, anten verimli ışına yapamaz. Yukarıda bahsedilen tüm kayıplar anten tasarımında istenmeyen durumlardır. Bu kayıpların minimize edilebilmesi için bazı değişiklikler yapılmaktadır. Örneğin, iletim hattı kayıplarının azaltılabilmesi için daha küçük bir kayıp direnci (R_L) seçilebilir. Anten yük empedansı ile iletim hattının empedansı eşitlenerek duran dalga oluşumu engellenebilir. Böylece iletim hattının depolama etkisi azaltılmış olur [25].

2.2 Anten Parametreleri

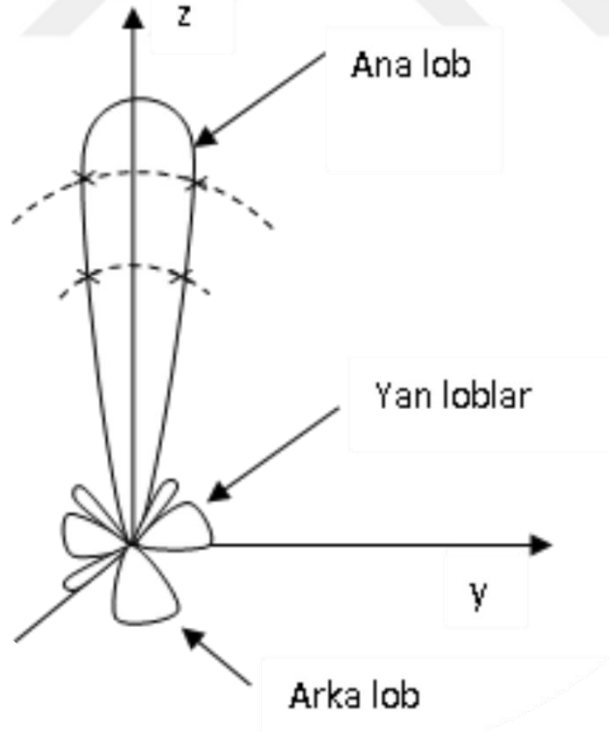
Anten parametreleri, antenlerin belirli koşullar altında optimum olarak çalışıp çalışmadığını göstermektedir. Işıma deseni, hüzme genişliği, yönlülük, giriş empedansı, gerilim duran dalga oranı (VSWR), geri dönüş kaybı, anten verimi, bant genişliği ve polarizasyon gibi parametreler en önemli anten parametreleridir. Bu parametreler hem birbiriyle ilişkilendirilebilir hem de anten karakteristikleri hakkında bilgi vermektedir.

2.2.1 Işıma Deseni

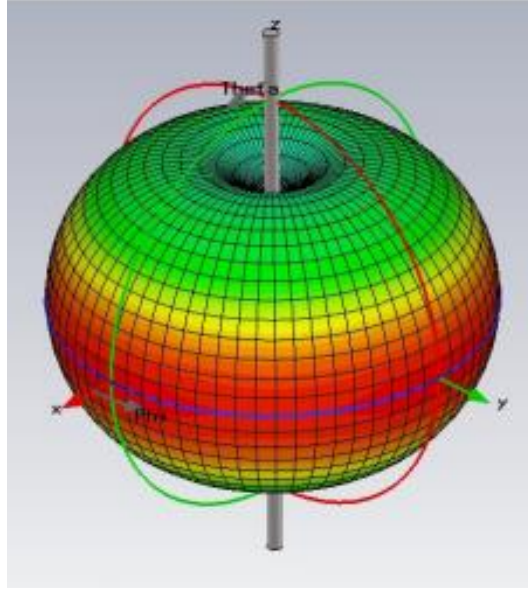
Bir antenin ışıma deseni, anten ışıma özelliklerinin uzay koordinatlarının bir fonksiyonu olarak matematiksel ya da grafik olarak gösterimidir [23]. Işıma deseninin çeşitli kısımlarında lob adı verilen çıkıntılar mevcuttur. Bu çıkıntılar Şekil 2.2’ de gösterildiği gibi “ana lob, yan lob ve arka lob” olmak üzere üç çeşittir.

Ana lob; maksimum ışıma şiddeti yönünü temsil etmektedir. Yan loblar ana lobun dışında kalan bütün loblardır ve istenmeyen yönlereki ışımayı temsil eder ve minimize edilmesi istenir. Arka lob ise ana loba tam zıt yönde oluşan ışımadır.

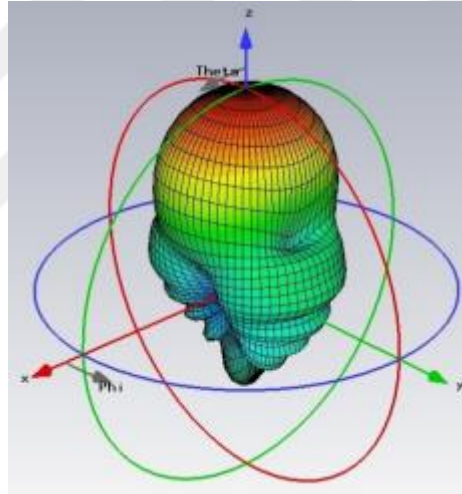
Antenler ışıma desenlerine göre yönlü, yönsüz ve yön bağımsız olarak üç grupta incelenebilir. Yönlü antenler; belirli bir yönde diğer yönlere göre daha etkin elektromanyetik dalga yayan veya toplayan antenlerdir. Yönsüz antenler; belirli bir düzlemde yönlü olmayan ama bu düzleme dik olan bir düzlemde yönlü olan antenlerdir ve yönlü antenlerin özel bir biçimidir. Yön bağımsız antenler; her yöne eşit seviyede elektromanyetik dalga yayan kayıpsız antenlerdir[26].



Şekil 2.3. Anten Işıma Örüntüsü ve Lobların Gösterimi



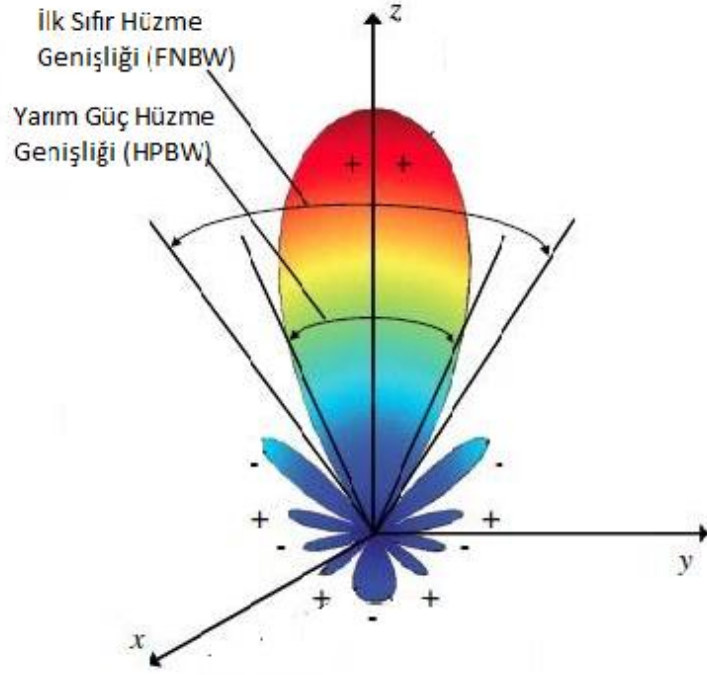
Şekil 2.4. Yön bağımsız antene ait ışıma deseni



Şekil 2.5. Yönlü antene ait ışıma deseni

2.2.2 Hüzme Genişliği

Hüzme Genişliği; ana lobun zıt taraflarındaki iki eş nokta arasındaki açısal aralıktır. Bir antenin ışıma örüntüsünde birden fazla hüzme genişliği mevcuttur. Bunlardan en bilinenleri yarım güç hüzme genişliği (HPBW) ve ilk sıfır hüzme genişliği (FNBW) dir. Yarım güç hüzme genişliği (HPBW); ana lob üzerinde ışıma şiddetinin yarı değerde olduğu iki yön arasındaki açıdır [27]. İlk sıfır hüzme genişliği (FNBW) ise ilk sıfır noktalarının arasındaki açısal açıklık olarak tanımlanır ve antenin ışıma yapmadığı bölümü temsil eder.



Şekil 2.6. İlk Sıfır Hüzme Genişliği ve Yarım Güç Hüzme Genişliğinin Işıma Deseni Üzerinde Gösterilmesi

Hüzme genişliği anten kalitesini belirleyen önemli parametrelerden biridir ve yan lob seviyesiyle ilişkilendirilebilir. Hüzme genişliği arttıkça yan lob seviyesi düşer ya da bunun tersini söylemek mümkündür.

2.2.3 Yönlülük

Yönlülük, antenin verilen bir yöndeki ışıma şiddetinin tüm yönler üzerindeki ortalama ışıma şiddetine oranı olarak tanımlanır. Eğer anten %100 verimlilikte çalışıyorsa antenin yönlülüğü kazanca eşit olacaktır. Yönlülüğün belirlenebilmesi için öncelikle yön bağımsız kaynağın ortalama ışıma şiddetinin hesaplanması gerekir. Yön bağımsız kaynağın ortalama ışıma şiddeti (2.1) numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U_0 d\Omega = U_0 \iint_{\Omega} d\Omega = 4\pi U_0 \quad (2.1)$$

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.2)$$

Bu durumda yönlülük;

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.3)$$

olarak bulunur. Burada; D yönlülüğü, P_{rad} toplam ışıyan gücü, U ışımaya şiddetini, U_0 yön bağımsız kaynağın ışımaya şiddetini ve $d\Omega$ katı açığı ifade eder.

İşımaya şiddeti her yönde aynı olan bir yön bağımsız kaynak için yönlülük 1'e eşit olur. Belirli bir yönde diğer yönlere göre daha fazla ışımaya yapan antenlerde ise yönlülük, 1'den daha büyük bir değer olacaktır. Yönlülüğün artması antenin belirtilen yönde daha fazla enerji taşıdığını göstermektedir.

2.2.4 Giriş Empedansı

Antenin giriş empedansı, antenin giriş terminalindeki gerilim akım oranı olarak tanımlanabilir. Bu empedans, reel ve sanal kısımlardan meydana gelmektedir ve Eşitlik (2.4) ile ifade edilebilir.

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.4)$$

Burada,

Z_A : a -b terminalleri arasındaki anten empedansı (Ω),

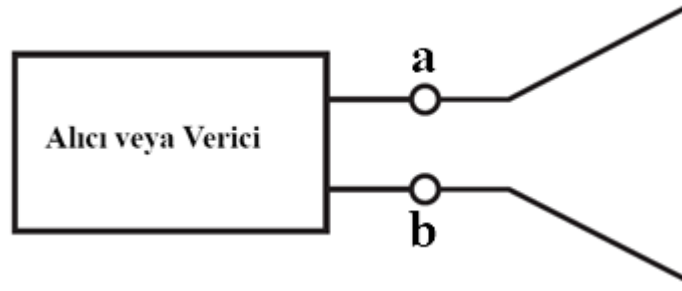
R_A : a -b terminalleri arasındaki anten direnci (Ω),

X_A : a -b terminalleri arasındaki anten reaktansı (Ω)

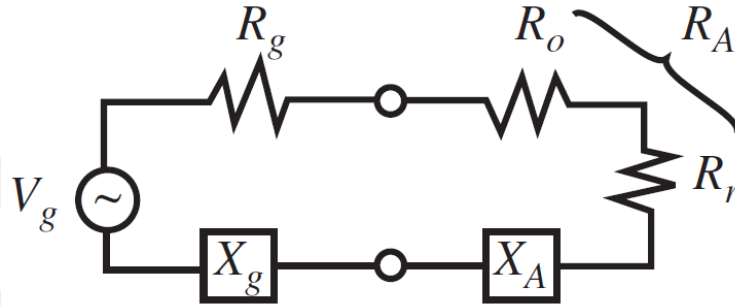
Şeklinde ifade edilir. Ayrıca anten direnci R_A iki bileşenden oluşmaktadır.

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.5)$$

R_r , antenin ışımaya direncini ifade ederken R_L ise antenin kayıp direncini ifade etmektedir. Şekil 2.7. ve Şekil 2.8. sırasıyla genel anten modelini ve verici antenin eşdeğer devresini göstermektedir.



Şekil 2.7. Genel anten modeli



Şekil 2.8. Verici anten eşdeğer devresi

Şekil 2.8.'de verilen verici anten eşdeğer devresinde görülen R_g değeri üreteç empedansının direncini ifade ederken X_g ise üreteç empedansının reaktansını göstermektedir.

Anten empedansı, bir vericiden antene veya antenden alıcıya güç aktarımı konusunda önemli bir parametredir. Alıcı bir antene aktarılan gücün en yüksek seviyeye çıkarılabilmesi, antenin düşük kayıpla ve maksimum verimlilikte çalışabilmesi için, alıcı empedansı ile anten empedansı uyumlu olmalıdır. Bu uyumluluk anten empedansı ile alıcı empedansının birbirinin eşleniği olması ile sağlanabilmektedir. Günümüzde pek çok RF sistemi 50Ω empedans değerini kullanmaktadır. Bu nedenle anten sistemlerinin 50Ω giriş empedansına göre tasarlanması istenmektedir.

2.2.5 Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)

Gerilim duran dalga oranı iletim hattının karakteristik empedansı ile anten giriş empedansının uyumunun bir göstergesidir. VSWR değeri Eşitlik (2.6) yardımıyla hesaplanabilir [22].

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.6)$$

Burada Γ , yansımaya katsayısıdır. Yansımaya katsayısının 1 veya -1 olduğu durumlarda VSWR sonsuza gider bu en istenmeyen durumdur ve hat ile anten arası empedans uyumunun sağlanmadığını gösterir. VSWR 1 değerini aldığı anda ise iletim hattının karakteristik empedansı ile anten giriş empedansı uyumlu hale gelmiş olur.

2.2.6. Geri Dönüş Kaybı

Geri dönüş kaybı (S11), yükte kaybolup yansımaya olarak gelmeyen güç miktarının bir parametresidir. Verici ile anten arası empedans uyumunun ne kadar başarılı olduğunu gösteren bir değerdir ve dB cinsinden Eşitlik (2.6)'daki gibi ifade edilebilir [23].

$$RL = -20 \log|\Gamma| \quad (2.6)$$

Anten ve verici arasındaki empedans uyumunun mükemmel olabilmesi için $\Gamma = 0$ ve $RL = \infty$ olmalıdır. Bu durumlarda yansıtılan gücün geri yansımaya yapmadığı sonucuna varılabilir. Pratikte ise bu sonuçlara asla ulaşılammamaktadır.

2.2.7 Anten Verimi

Anten verimi, değişik verimlilik etkenlerinin birleşimi olarak tanımlanabilir. Toplam anten verimi e_0 , antenin yapısından kaynaklanan kayıpları ve giriş terminalindeki kayıpları kullanır. Bu kayıplar, iletim hattı ile anten arasındaki empedans uyumsuzluğu ve dielektrik kayıplardan kaynaklı olarak meydana gelmektedir. Anten veriminin hesaplanmasında genel olarak Eşitlik (2.7) geçerlidir.

$$e_0 = e_r \cdot e_c \cdot e_d \quad (2.7)$$

Burada;

- e_0 : Anten Verimi
- e_r : Yansımaya Verimi ($1 - |\Gamma|^2$)
- e_c : İletim Verimi
- e_d : Dielektrik Verimi

İfade etmektedir. İletim verimi ve dielektrik veriminin hesaplanması zordur. Bu nedenle e_c ve e_d ' nin ayrı ayrı hesaplanması yerine ışıma verimi e_{cd} deneysel olarak ölçülerek hesaplamalar yapılır. e_{cd} Eşitlik (2.8) ile ifade edilmektedir.

$$e_{cd} = e_c \cdot e_d \quad (2.8)$$

Bu durumda toplam verim e_0 Eşitlik (2.9)' daki haliyle kolaylıkla hesaplanabilir.

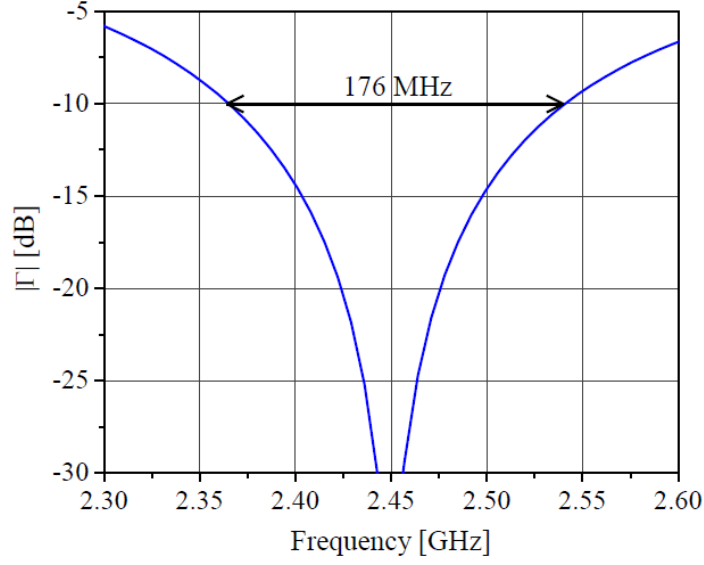
$$e_0 = e_{cd} \cdot e_r = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (2.9)$$

2.2.8 Bant Genişliği

Bir anten belirli bir merkez frekansına göre tasarlanır. Bu merkez frekansını içerisine alan bir frekans aralığında düzgün bir şekilde elektromanyetik dalga yayar veya toplar. Bu frekans aralığına bant genişliği denir. Antenin giriş empedansı, hüzmeye genişliği, kutuplanması, yan lob seviyesi, kazancı ve yönlülüğü gibi parametreleri bant genişliği içinde kalan frekanslarda kabul edilebilir seviyelerde olur. Bant genişliği eşitlik (2-7) ile hesaplanabilir.

$$BG = f_{max} - f_{min} \quad (2.10)$$

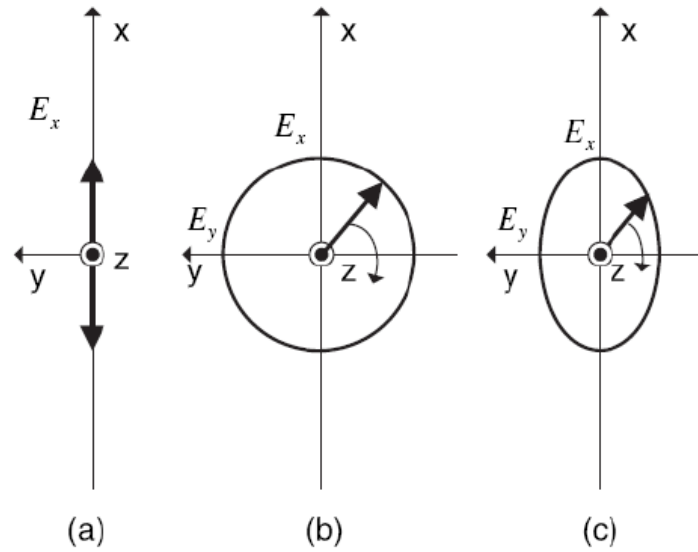
Burada f_{max} ; antenin istenilen özellikte çalıştığı maksimum frekansı; f_{min} ise antenin istenilen özellikte çalıştığı minimum frekansı ifade etmektedir. Yansıma katsayısı değerinin -10 dB'den küçük olduğu frekans aralığının antenin ışıma yaptığı frekansları gösterdiği kabul edilmektedir. Şekil 2.9. merkez frekansı 2.45 GHz olan bir antenin bant genişliğini göstermektedir.



Şekil 2.9. Bir antenin bant genişliği [28]

2.2.9 Polarizasyon (Kutuplanma)

Polarizasyon, elektrik alan vektörünün zamana göre değişimidir. Antenin yaydığı dalganın polarizasyonu anten polarizasyonu olarak tanımlanır. Polarizasyon yönü belli değilse maximum kazancın olduğu yönde bir polarizasyon mevcuttur. Işıyan enerjinin kutuplanması, anten merkezinin yönüne göre farklılık gösterdiğinden ışınma deseninin farklı kısımları farklı kutuplanmaya sahip olabilmektedir. Doğrusal, eliptik ve dairesel olmak üzere üç çeşit polarizasyon vardır. Polarizasyon çeşitleri Şekil 2.10. ile verilmiştir [29].



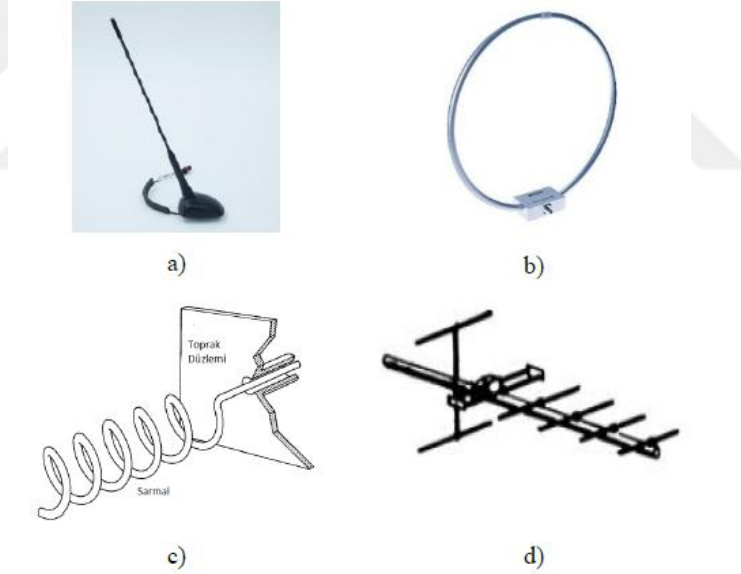
Şekil 2.10. Polarizasyon çeşitleri (a) doğrusal, (b) dairesel, (c) eliptik

2.3. Anten Çeşitleri

Fiziksel yapılarına ve kullanım yerlerine göre pek çok çeşit anten bulunmaktadır. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan anten çeşitlerinden kısaca bahsedilmiştir.

2.3.1. Tel Antenler

Tel antenler; otomobillerde, binalarda, gemilerde, hava ve uzay araçları gibi pekçok yerde kullanılmasıyla bilinir. Yagi-Uda antenleri, logaritmik periyotlu antenler, dipol antenler, monopol antenler ve halka antenler tel antenlerin örneklerindedir. Genellikle düşük frekanslarda çalışmasıyla bilinseler de zamanla yüksek frekanslarda çalışan tasarımları da bulunmaktadır. Tasarımları kolaydır , kolay üretim ve montaj avantajına sahiplerdir. Şekil 2.11. tel anten örneklerini göstermektedir [30].

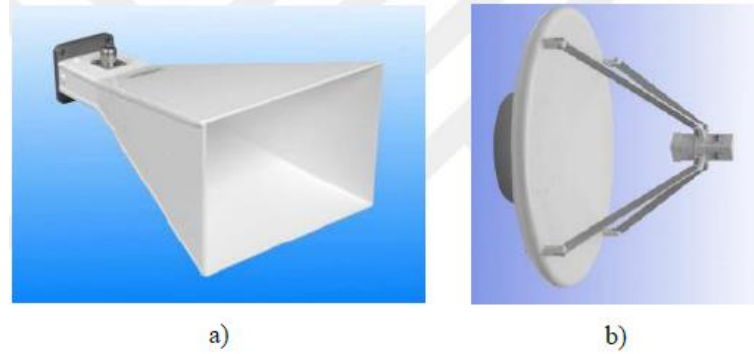


Şekil 2.11. Tel anten örnekleri (a) Monopol anten, (b) Halka anten, (c) Sarmal anten (d) Yagi-Uda anten

2.3.2. Açıklık Antenler

Açıklık antenler, elektromanyetik dalgaların yayılabildiği bir açıklığa sahip olan antenlerdir. Günümüzde yüksek frekansların kullanımı ve daha karmaşık yapılarda anten sistemlerine talebin artması nedeniyle kullanımı artmıştır. Piramit horn, konik horn, parabolik yansıtıcı antenler, lens antenler, dikdörtgen dalga kılavuzu

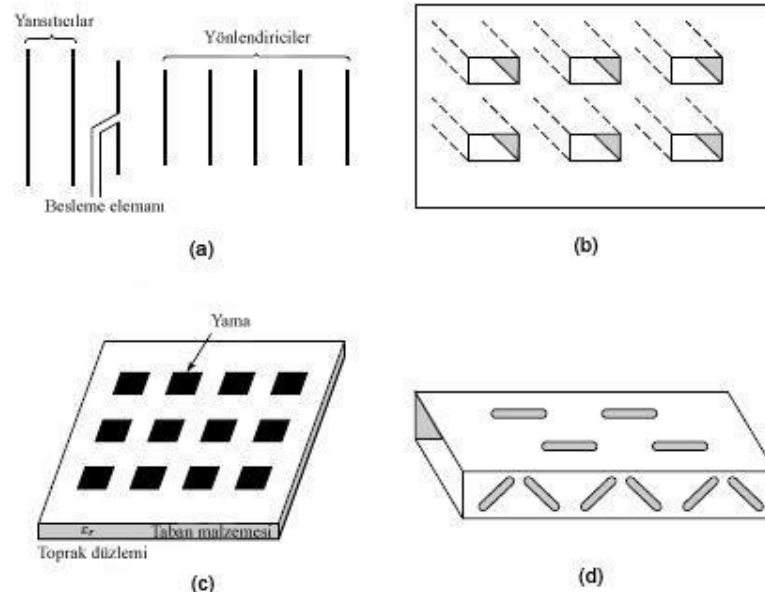
gibi antenler açıklık antenlere örnek olarak verilebilmektedir. Uzay araçlarının ve hava araçlarının gövdelerine kolayca monte edilebilmeleri nedeniyle uygulanması çok kullanışlı olmaktadır. Şekil 2.12. açıklık anten örneklerini göstermektedir [30].



Şekil 2.12. Açıklık anten örnekleri (a) Horn anten, (b) Yansıtıcı anten

2.3.3. Dizi Antenler

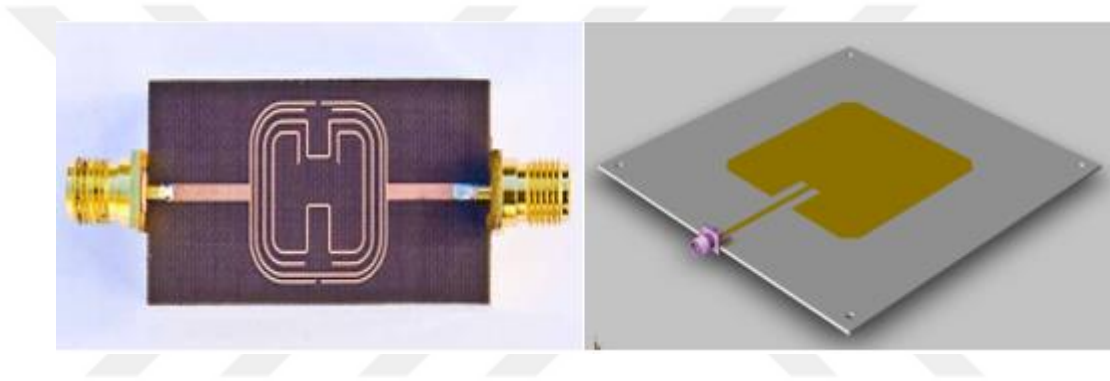
Tek elemanlı antenler geniş bir ışınma örüntüsüne ve düşük kazançla sahiptir. Tek elemanın yeterli olmadığı durumlarda ışınma özelliklerinin artırılması amacıyla dizi antenlere ihtiyaç duyulmuştur. Dizi antenlerin oluşturulmasıyla, maksimum ışınmanın istenen yönde veya yönlerde olması ve diğer yönlerde ise minimum olması sağlanabilir [23]. Dizi anten örnekleri Şekil 2.13. ile sunulmuşmuştur.



Şekil 2.13. Dizi anten örnekleri (a) Yağı-Uda dizi, (b) Açıklık dizi, (c) Mikroşerit yama dizi, (d) Yarık dalga kılavuzu tipli dizi

2.3.4. Mikroşerit antenler

Mikroşerit antenler 1970'li yılların başında kullanımının artmasıyla dikkat çeken anten çeşididir. Temel olarak dielektrik taban malzemesinin üzerine ışına yapan bir katmanın yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Yama anten adıyla da bilinmektedir. Üretiminin kolay olması, düşük maliyetli olması, küçük hacim kaplaması ve sert yüzeylere entegre edilmesinin kolay olması gibi sebeplerle kullanımı tercih edilmektedir. Günlük hayatımızda kullandığımız cep telefonu, bilgisayar gibi cihazların ve haberleşme uydularının yapısında mikroşerit antenler kullanılmaktadır. Şekil 2.14. mikroşerit antenlerin örnekleri göstermektedir. Bu anten türü tezin üçüncü bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 2.14. Mikroşerit anten örnekleri

3. MİKROŞERİT ANTENLER

Yüksek performanslı hava araçları, uzay araçları, uydu ve füze gibi uygulamalarda küçük boyutlu, üretimi kolay, maliyeti düşük ve sert yüzeylere kolayca monte edilebilen antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca günümüzde kullandığımız mobil radyo uygulamaları ve haberleşme cihazları da benzer özelliklere ihtiyaç duymaktadır. Bu gibi ihtiyaçların karşılanması için mikroşerit antenler kullanılabilir. Bu bölümde, mikroşerit antenlerin çeşitleri, avantaj ve dezavantajları, uygulama alanları ve besleme yöntemleri yer almaktadır.

3.1. Mikroşerit Anten Çeşitleri

Mikroşerit antenlerin üretimlerinin kolay olması çeşitli tasarımların yapılmasına da olanak sağlamaktadır. Geometrilerine göre dört tip mikroşerit anten vardır. Bunlar;

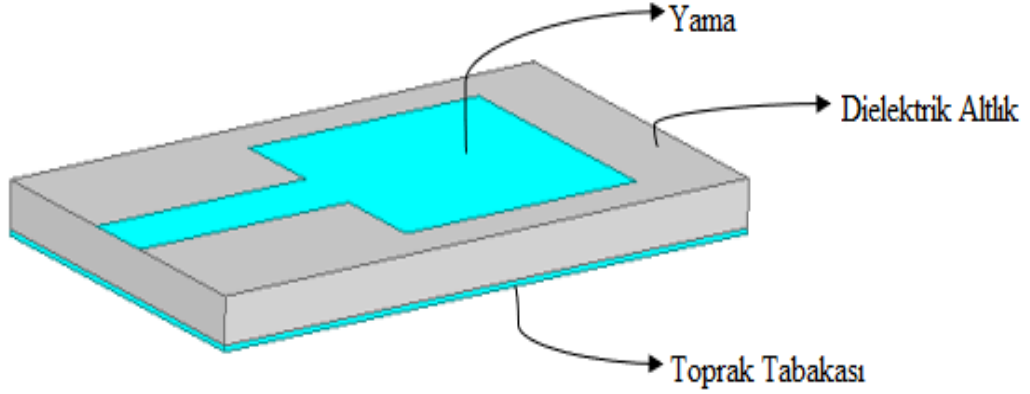
- Mikroşerit yama antenler,
- Mikroşerit yarık antenler,
- Mikroşerit dipol antenler,
- Mikroşerit yürüyen dalga antenler

şeklinde isimlendirilebilir [2], [31].

3.1.1. Mikroşerit Yama Antenler

Mikroşerit yama antenler genel olarak bir taban malzeme, yama ve toprak tabakasından oluşmaktadır. Taban, dielektrik bir malzemedir ve yama ile toprak tabakasının arasında yer alır. Yama ve toprak tabakası ise yüksekliği dalga boyuna oranla çok küçük olan, ışımaya yapan bir iletken olarak seçilir. Tipik bir dikdörtgenel mikroşerit yama anten yapısı Şekil 3.1.'de verilmiştir. Yama şekli, taban malzeme özellikleri ve besleme türü istenilen anten özelliklerine göre belirlenir. Yama malzemesi olarak bakır gibi düşük omik kayıp ve yüksek iletkenliğe sahip olan ve dielektrik taban üzerine yerleştirilebilecek bir malzeme kullanılır. Yama şekli kare, dikdörtgen, daire, elips, üçgen veya çok daha farklı biçimlerde olabilir. Yama şeklinin seçimi kazanç, polarizasyon, bant genişliği gibi özel gerekliliklere bağlı olarak yapılır. Analiz ve üretim aşamaları diğer şekillere göre daha kolay olduğu için kare, dikdörtgen

ve daire şekilli yamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikroşerit antenlerde sıklıkla kullanılan geleneksel yama çeşitleri Şekil 3.2.' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Mikroşerit Yama Anten Yapısı

Mikroşerit antenlerin ışınım yapabilmesi için yama düşük kayıplı dielektrik taban üzerine entegre edilir. Kullanılan dielektrik taban seçilirken her türlü yüzeye uyum sağlayabilen esnek malzemeler tercih edilmektedir. Mikroşerit antenlerde en sık kullanılan taban malzemelere FR4, duroid ve tacatonic örnek gösterilebilir. Bu tabanların dielektrik sabitleri 2.2 ile 12 arasında değişmektedir [32].

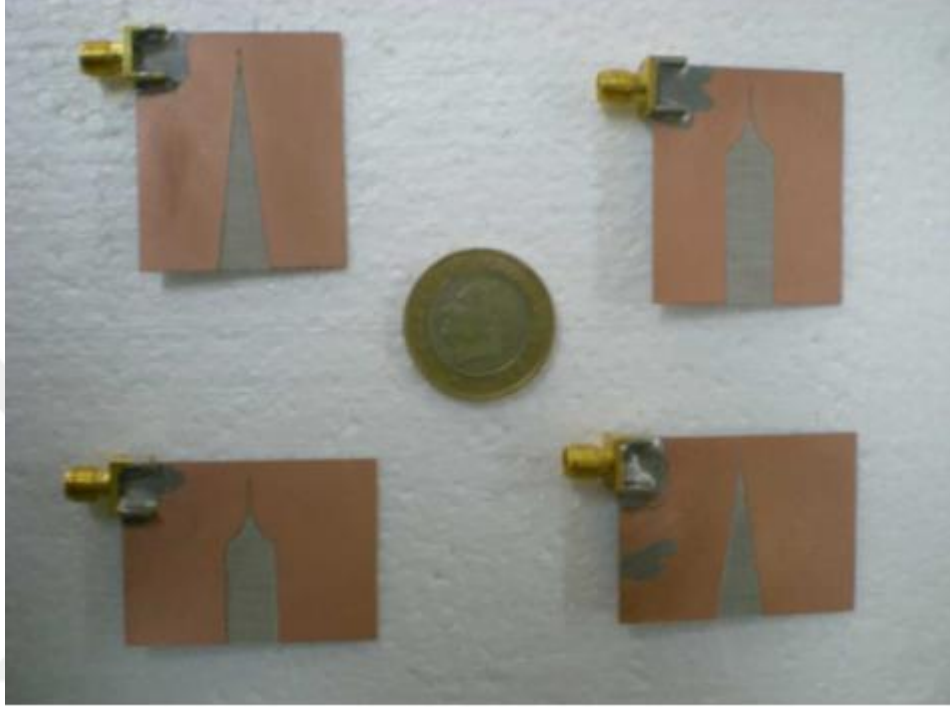
Mikroşerit antenlerde yama ve toprak düzlemi olarak genellikle bakır seçilir. İletken özellikte olan yama ve toprak düzlemi iletim hattı gibi davranarak bir Transverse Electro Magnetic (TEM) dalgalar kılavuz görevini alırlar. Dielektrik altlığın yüksekliği $0.03 \lambda_0 \leq h \leq 0.05 \lambda_0$ aralığında değişmektedir. Yama kalınlığı ise $18 \mu_m \leq t \leq 70 \mu_m$ aralığında değişmektedir [23].



Şekil 3.2. Geleneksel yama şekilleri

3.1.2. Mikroşerit Yarık Antenler

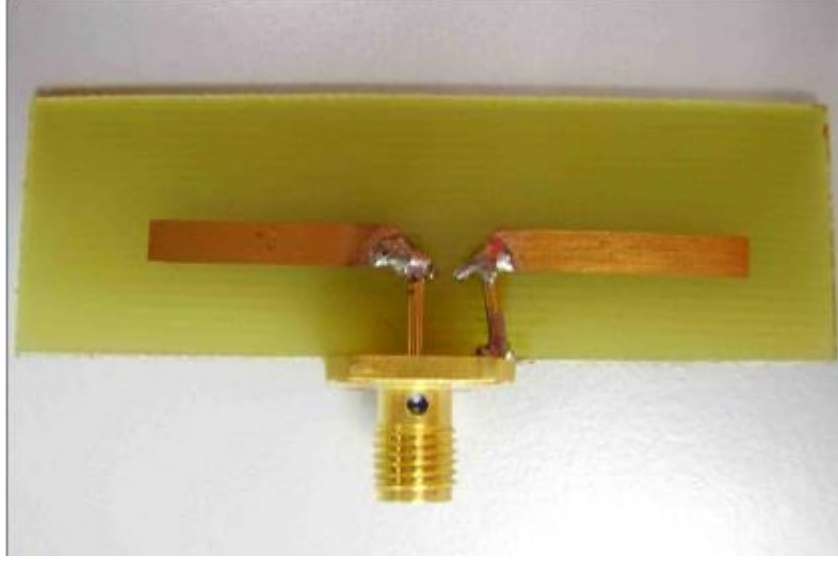
Mikroşerit yarık antenler, dielektrik taban üzerine yerleştirilen ve ışığa görevi gören yamanın üzerine boşluklar açılmasıyla elde edilir. Mikroşerit yarık anten örnekleri Şekil 3.3 ile verilmiştir [33].



Şekil 3.3. Mikroşerit yarık anten örnekleri

3.1.3. Mikroşerit Dipol Antenler

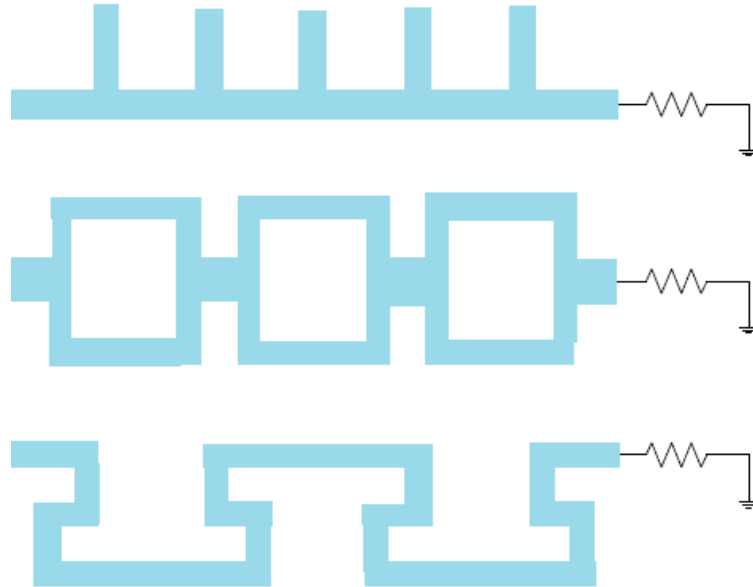
Mikroşerit dipol antenler, dikdörtgenel yamalı mikroşerit antenlere benzer olsa da kenarlarının oranları nedeniyle farklı karakteristiklere sahiptir. Mikroşerit dipol antenin genişliği serbest uzay dalga boyunun 0.05 katından daha küçük olarak seçilmektedir. Mikroşerit dipol antenler ile mikroşerit yama antenler benzer akım dağılımlarına sahiptirler. Bu nedenle ışığa desenleri benzerlik göstermektedir. Mikroşerit dipol anten örneği Şekil 3.4. ile verilmiştir [34].



Şekil 3.4. Mikroşerit dipol anten örneği

3.1.4. Mikroşerit Yürüyen Dalga Antenler

Mikroşerit yürüyen dalga antenler, zincir şeklinde sıralanmış bir mikroşerit hattın oluştuğu antenlerdir. Duran dalga oluşumunun engellenmesi amacıyla antenin bir ucu rezistif yük ile sonlandırılır. Bu anten çeşidi dairesel kutuplanma uygulamaları için kullanılmaktadır. Mikroşerit yürüyen dalga anten örnekleri Şekil 3.5.'te verilmiştir [2].



Şekil 3.5. Mikroşerit yürüyen dalga anten örnekleri

3.2 Mikroşerit Antenlerin Avantaj ve Dezavantajları

Mikroşerit antenlerin diğer mikrodalga antenlerine kıyasla hafiflik, küçük hacimli olma, düşük üretim maliyeti, kolay seri üretim, uydu ve roket gibi cihazlarda montaj kolaylığı, modüler tasarıma uygunluk gibi bazı üstünlükleri bulunmaktadır.

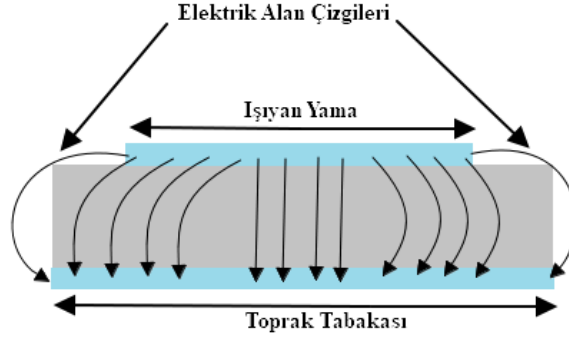
Mikroşerit yama antenler, bu üstünlüklerin yanı sıra dar bant genişliği, düşük kazanç (maksimum 20 dBi) gibi çok önemli dezavantajlara da sahiptir. Bu gibi eksikliklere rağmen mikroşerit antenlerin avantajları dezavantajlarından üstün gelmektedir ve pek çok uygulama alanına sahiptir.

- Uzay endüstrisi (uydu haberleşme sistemleri)
- Kablosuz haberleşme alanı (Bluetooth, WLAN, Wi-Fi)
- Askeri telsiz ve ekipman sistemleri (Füze sistemleri, akıllı silah uygulamaları)
- GPS ve GSM uygulamaları
- Doppler ve diğer radarlar
- Biyomedikal ölçümler

gibi uygulamalar mikroşerit yama antenlerin kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir [35].

3.3. Mikroşerit Antenlerin Çalışma Prensibi

Mikroşerit antenlerde ışıma olayı üst tarafta bulunan yama ile alt tarafta bulunan toprak tabakası arasında meydana gelir. İletken tabakanın uyarılmasıyla yamanın altında güçlü bir elektrik akımı oluşur. Oluşan bu akım, yamanın kenarlarından toprak düzlemine doğru elektromanyetik dalga hareketi gerçekleşir. Toprak düzleminden geri yansıyan elektromanyetik dalgalar boşluğa yayılır. İletken yamanın kenarlarında gerçekleşen bu olaya “saçaklanma etkisi” denir ve antenler bu etki sayesinde ışıma yapar [36]. Saçaklanma etkisi, yamanın ve dielektrik taban malzemesinin fiziksel özelliklerine göre değişmektedir. Yamanın uzunluğunun dielektrik taban malzemenin kalınlığına oranı ($\frac{L}{h} \gg 1$) olduğunda saçaklanmalarda azalma meydana gelmektedir. Bu nedenle anten tasarımları yapılırken saçaklanmaların merkez frekansı üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Saçaklanma etkisi Şekil 3.6. ile gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Saçaklanma etkisi

3.4. Mikroşerit Antenlerde Kullanılan Besleme Teknikleri

Mikroşerit antenleri beslemede ilk başlarda sadece mikroşerit hat ile besleme ve koaksiyel besleme yöntemleri kullanılsa da zamanla uygulama alanlarının artmasıyla birlikte yeni besleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu besleme yöntemleri beş başlıkla ifade edilebilir:

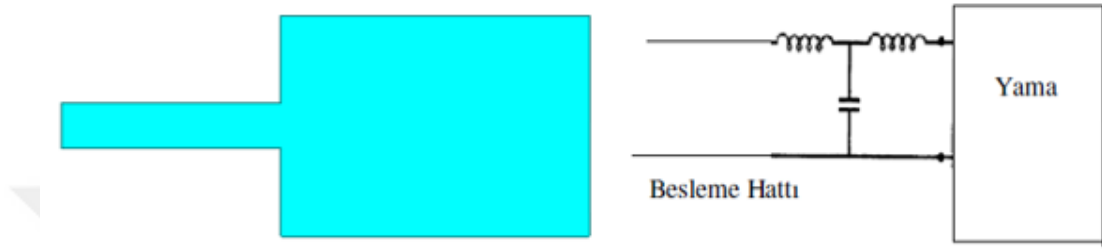
- Mikroşerit hatlı besleme,
- Koaksiyel besleme,
- Açıklık kuplajlı besleme,
- Yakınlık kuplajlı besleme,
- Eş düzlemsel dalga kılavuzlu besleme.

Besleme tekniği seçimi toplam gücün ışıma alanına verimli olarak iletilmesi açısından çok önemlidir. Besleme ile mikroşerit anten arasında empedans uyumu sağlandığında güç iletimindeki kayıplar minimum seviyede gerçekleşir. Ayrıca besleme yönteminin, uygulamaya yatkınlığı da önemlidir. Bazı besleme teknikleri birçok parametreye bağlıdır ve bu parametrelerin doğru seçilmesi yöntemin performansını artırır. Besleme yöntemi, giriş empedansını etkilediğinden anten karakteristiği üzerinde doğrudan etkilidir. Bu tez çalışmasında tasarlanan mikroşerit anten yapılarında mikroşerit hatlı besleme yöntemi kullanılmıştır.

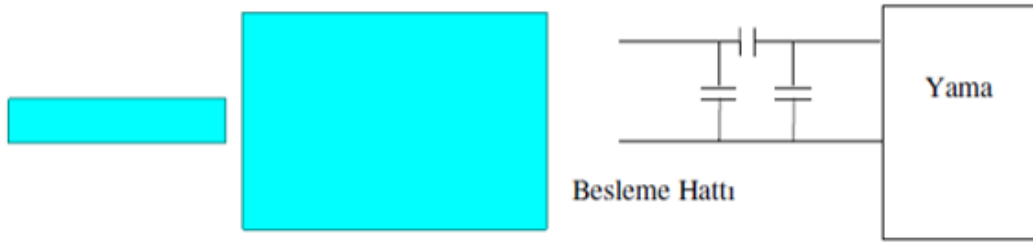
3.4.1. Mikroşerit Hatlı Besleme

Mikroşerit hatlı besleme iki farklı şekilde yapılabilir. Bunlardan birincisi iletim hattının doğrudan yama ile birleştirilmesiyle, ikincisi ise yama ile iletim hattı arasında

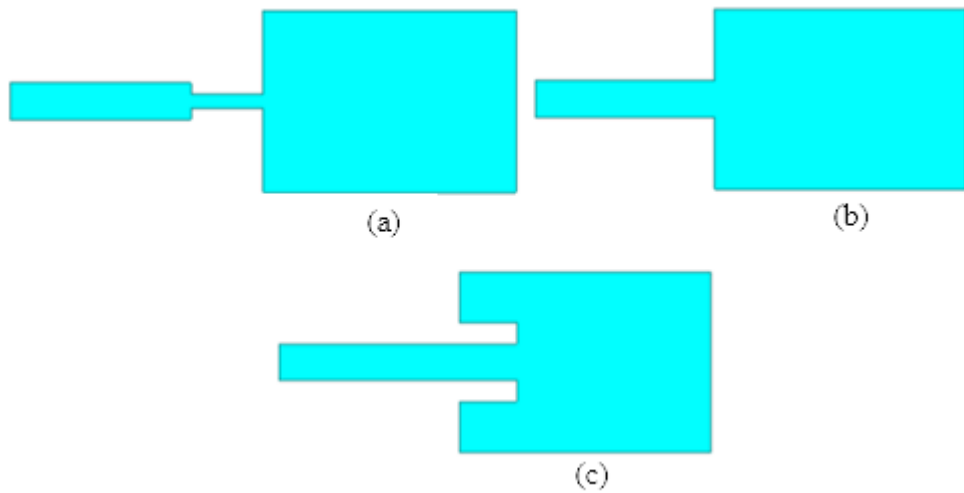
boşluk bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Bu iki uygulama yöntemi sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 ile verilmiştir. Mikroşerit hatla beslemenin en önemli avantajı üretim kolaylığıdır. Ancak bu yöntem; istenmeyen ışımların oluşması ve empedans uyumsuzluğu gibi dezavantajlara da sahiptir. Bu dezavantajların ortadan kaldırılabilmesi için mikroşerit iletim hatlı besleme; çeyrek dalga dönüştümlü, içeri girintili ve kenar bağlantılı mikroşerit hatlı besleme şeklinde uygulanmaktadır. Şekil 3.6. mikroşerit hat besleme tekniklerini göstermektedir.



Şekil 3.7. Doğrudan temaslı mikroşerit besleme ve eşdeğer devresi

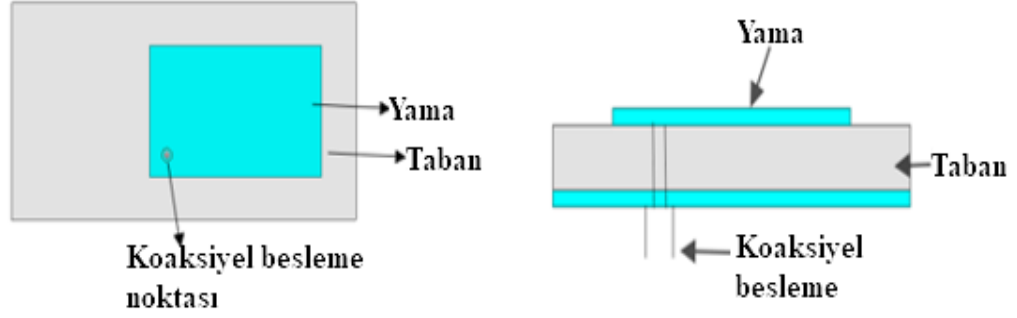


Şekil 3.8. Boşluklu mikroşerit besleme ve eşdeğer devresi



Şekil 3.9. Mikroşerit hat besleme teknikleri (a) Çeyrek dalga dönüştürücülü, (b) Kenar bağlantılı, (c) İç girintili

3.4.2 Koaksiyel Besleme



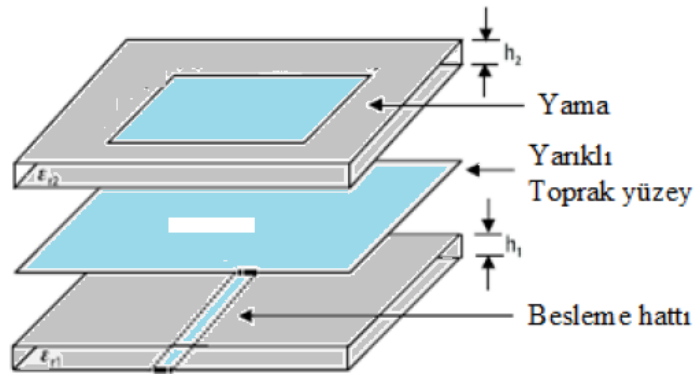
Şekil 3.10. Koaksiyel beslemeli mikroşerit anten geometrisi

Gücün, bir prob aracılığıyla yamaya ulaştırıldığı besleme yöntemidir. Prob, koaksiyel kablo vasıtasıyla doğrudan yamaya bağlanabilir veya toprak tabakası üzerinden boşluk boyunca yamaya güç iletimi sağlanabilir. Koaksiyel beslemeli mikroşerit anten geometrisi Şekil 3.7. ile gösterilmiştir.

Koaksiyel besleme noktasının konumundaki değişim ile giriş empedansının doğrudan ayarlanması bu yöntemin en önemli avantajıdır. Ancak bu besleme tekniğini kullanan antenlerde çok sayıda lehim noktasına ihtiyaç duyulması antenin üretimini zorlaştırmaktadır.

3.4.3. Açıklık Kuplajlı Besleme

Açıklık kuplajlı besleme yöntemi kullanılan antenlerde bant genişliği daha düşüktür ayrıca yamada meydana gelen ışımaya besleme sisteminden sızan ışımadan korunmaktadır. Açıklık kuplajlı beslemenin temel yapısı Şekil 3.11. ile gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Açıklık kuplajlı besleme yapısı

3.4.4. Yakınlık Kuplajlı Besleme

Yakınlık bağlantılı mikroşerit beslemede, besleme hattının alt katmanda yamanın ise üst katmanda olduğu iki katmanlı bir taban kullanılır. Yakınlık kuplajlı besleme aynı zamanda elektromanyetik kuplaj olarak da bilinir. Katmanların yüzey parametreleri seçilirken bant genişliğinin artırılması, mikroşerit hattın açık ucundan gelecek sahte ışımaların ise azaltılması sağlanmalıdır. Yamanın iki tabaka üzerine yerleştirilmesi bant genişliğinin artmasını sağlamaktadır. Yama ile besleme hattının hizalarının aynı olması yakınlık kuplajlı beslemenin üretimini zorlaştırmaktadır [37].

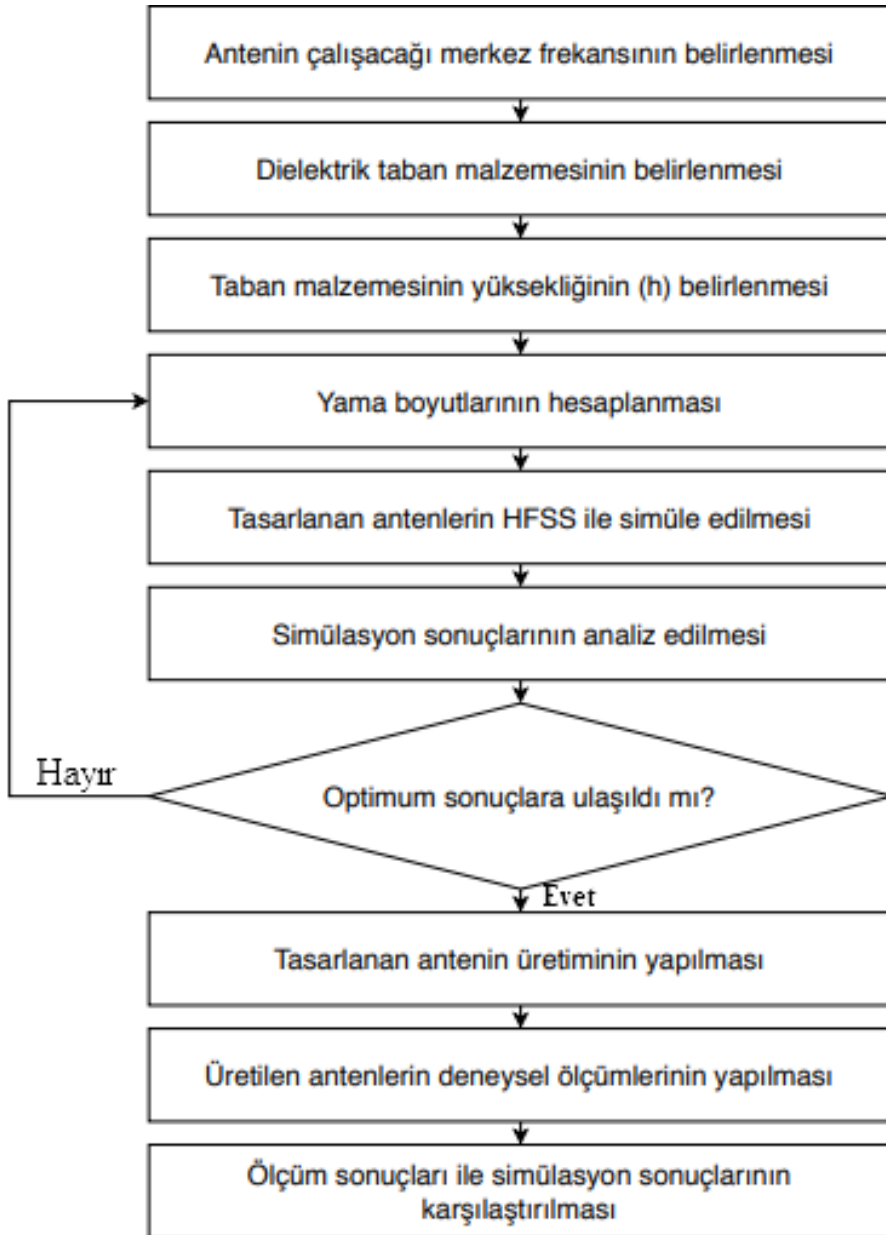


Şekil 3.12. Yakınlık kuplajlı besleme

4. MATERYAL VE YÖNTEMLER

4.1. Mikroşerit Anten Tasarımı

Mikroşerit anten tasarımı yapılırken ilk önce antenin çalışması istenen merkez frekansı ve bant aralığı belirlenir. Daha sonra kullanılacak olan taban malzeme seçimi yapılır. Bu bölümde mikroşerit anten tasarımında kullanılan malzeme seçimi, yama boyutlarının hesaplanması ve tasarımda kullanılan yöntem yer verilmiştir. Mikroşerit anten tasarımı yapılırken izlenecek yol haritası Şekil 4.1.'de verilmiştir



Şekil 4.1. Mikroşerit anten tasarımında uygulanacak adımlar

4.2 Dielektrik Malzeme Seçimi

Anten tasarımında kullanılan dielektrik malzemenin özellikleri, antenin çalışma frekansını etkilemektedir. Bu nedenle kullanılan taban malzeme seçilirken aşağıdaki parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekir [38]:

- Malzemenin dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerleri,
- Sıcaklık, nem ve yıpranma durumlarının malzeme üzerindeki etkileri,
- Malzemenin işlenebilirlik, esneklik, lehimlenebilme gibi mekanik gereksinimleri karşılayabilmesi,
- Maliyet.

Tablo 4.1. anten tasarımlarında kullanılan çeşitli dielektrik malzemelere ait elektriksel özellikleri göstermektedir [38].

Tablo 4.1. Çeşitli dielektrik malzemelere ait elektriksel özellikler

Malzeme Parametre	Rogers Ultralam 1217	Rogers Kappa 438	RT Duroid 5870	RT Duroid 5880	FR4
Dielektrik Sabiti, ϵ_r	2.17 ± 0.02	4.38	2.33 ± 0.02	2.20 ± 0.02	4.25 – 4.55
Kayıp Tanjantı, $\tan\delta$	0.0009	0.0050	0.0012	0.0009	0.0160
Kalınlık, h (mm)	1.575	2.4	1.575	3.175	1.6 / 3.2

Bu tez çalışmasında yapılan tüm malzemeler FR4 malzemesi kullanılarak analiz edilmiş ve üretilmiştir.

FR4, %40 oranında epoksi reçine ve %60 oranında fiber camın birleştirilmesiyle oluşan yalıtkan bir malzemedir. Uygun fiyatlı olması ve malzeme özelliklerini yitirmeksizin şekillendirilmesi anten tasarımlarında sıklıkla kullanılmasının sebeplerindedir.

4.3. Mikroşerit Antenlerde Yama Boyutlarının Hesaplanması

Mikroşerit antenlerde kullanılan yama boyutlarının hesaplanmasında yama geometrisinin seçimi önemlidir. Bu başlık altında dikdörtgensel ve dairesel yamalı

mikroşerit antenler için yama boyutlarının hesaplanmasında kullanılan yöntemler verilmiştir.

4.3.1. Dikdörtgenel Yamalı Mikroşerit Antenlerde Yama Boyutlarının Hesaplanması

Dikdörtgen şekilli mikroşerit yama antenlerde yama boyutları hesaplanırken öncelikle tasarımda kullanılan taban malzemenin dielektrik sabiti (ϵ_r), yüksekliği (h) ve merkez frekansı (f_c) değerlerinin bilinmesi gerekir. Bilinen bu değerler kullanılarak yama genişliği W ve yama uzunluğu L , (4-1), (4-2), (4-3), (4-4) ve (4-5) numaralı denklemler kullanılarak bulunabilir [39].

$$W = \frac{1}{2f_c\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right) \quad (4.2)$$

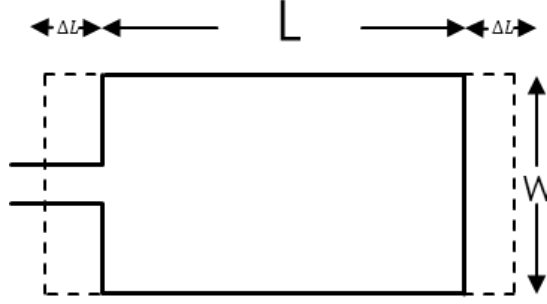
Yama uzunluğu L (4.3) numaralı formül ile hesaplanır. Burada ΔL saçaklanma uzunluğudur.

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4.3)$$

L_{eff} efektif (etkin) yama uzunluğunu ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_c\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (4.4)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (4.5)$$



Şekil 4.2. Dikdörtgen şekilli mikroşerit yama

4.3.2 Dairesel Yamalı Mikroşerit Antenlerde Yama Boyutlarının Hesaplanması

Dairesel yamalı mikroşerit antenlerde yama boyutları hesaplanırken izlenecek yol, dikdörtgenel yamalı mikroşerit antenlerdekiyle hemen hemen aynıdır. Öncelikle antenin çalışması istenen merkez frekansı (f_c) ve kullanılan taban malzemenin dielektrik sabiti (ϵ_r) ile yüksekliği (h) belirlenmelidir. Kullanılacak yamanın belirlenebilmesi için öncelikle etkin yama yarıçapı (a_e) hesaplanır.

$$f_c = \frac{1.8412 \cdot c}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.6)$$

Formül (4.6) kullanılarak belirlenen merkez frekansı değeri (f_c) ve ışık hızı (c) değerleri yerine yazılır ve etkin yama yarıçapı bulunur. Bulunan bu değer;

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{2h} \right) + 1772 \right] \right\}^{1/2} \quad (4.7)$$

Formül (4.7)'de yerine konularak yama yarıçapı hesaplanır. Başka bir yaklaşımla yama yarıçapı (a);

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (4.8)$$

ile hesaplanabilir. Burada F ;

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.9)$$

ile hesaplanır [40].

4.4. Mikroşerit Antenlerde Giriş Empedansının Hesaplanması

Mikroşerit antenlerde giriş empedansı (z_0) iletim hattının genişliği (w) yamanın kalınlığı (t) ve taban malzemenin yüksekliği (h) kullanılarak hesaplanır [41].

$$z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98xh}{0.8xw + t} \right) \quad (4.10)$$

4.5. Süper- Formül

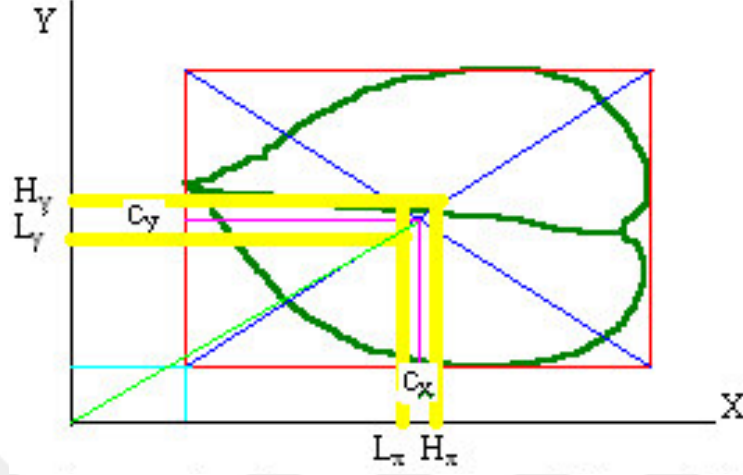
Doğadaki pek çok şekil bozulmuş bir elips formunda kapalı eğriler şeklinde ifade edilebilir. Örneğin doğada pek çok farklı geometride yaprak şekilleri mevcuttur. Fakat bunları matematiksel olarak ifade etmek zor ve karmaşıktır. Johan Gielis 2003 yılında geliştirdiği Süper-Formül yardımıyla bu şekilleri geometrik olarak ifade etmiştir.

Gielis, neredeyse tüm kapalı eğrilerin $f(\theta)$ cinsinden tanımlanabileceğini bulmuştur. Burada $f(\theta)$; a, b, m, n_1, n_2 ve n_3 parametrelerinden oluşan bir fonksiyondur ve Süper-Formül olarak adlandırılır [42].

$$f(\theta) = \left(\left| \frac{\cos\left(\frac{m}{4}\theta\right)}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin\left(\frac{m}{4}\theta\right)}{b} \right|^{n_3} \right)^{-1/n_1} \quad (4.11)$$

Süper-Formül eşitlik (4-11)'da verilmiştir. Burada r ve θ kutupsal koordinatları ifade ederken a, b, m, n_1, n_2 ve n_3 parametreleri gerçek sayılardır. m parametresi, şekil üzerine sabitlenmiş nokta, köşeler, sektörler veya oyukların sayısını ve bunların aralıklarını, n_2 ve n_3 ise şeklin birim daireye girip girmeyeceğini belirlemektedir [43]. a ve b parametreleri sırasıyla şeklin x-eksenindeki maksimum uzunluğu ve y-eksenindeki maksimum genişliği ile ilgilidir. x ve y değerlerinin a ve

b parametrelerine bölünmesiyle uzunluk ve genişlik birimleştirilir. Böylece tüm noktalar birim çemberin üzerinde veya içerisinde yer alır.



Şekil 4.3. Süper-Formül parametrelerinin belirlenmesi

Süper-Formül parametreleri elde edilirken öncelikle şeklin merkezinin XY düzleminde (c_x, c_y) gibi bir noktada olduğu kabul edilir. Böylelikle,

$$(x, y) = (x - c_x, y - c_y) \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Daha sonra şeklin içerisine tam olarak sığabileceği en küçük dikdörtgen belirlenir. Bu dikdörtgenin kenar uzunluğu bulunarak $a = \text{uzunluğun yarıısı}$ ve $b = \text{genişliğin yarıısı}$ şeklinde elde edilebilir. Geri kalan dört parametrenin (m, n_1, n_2, n_3) belirlenmesinde tahmin yürütme ve doğrusal arama algoritmaları kullanılabilir.

$Z_i = (x_i, y_i); i = 1, 2, 3, \dots, n$, n tane doğru nokta olsun. Bu noktalara karşılık gözlemlenen noktalar $Z' = (x'_i, y'_i)$ olarak yazılabilir. Bu noktalarda bizim bilmediğimiz hatalar mevcuttur. $(\tilde{c}_x, \tilde{c}_y)$, (c_x, c_y) noktasının yaklaşık olarak tahmin edilen değerleri olsun. Öyleyse;

$$\tilde{Z}_i = (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i) = (x'_i - \tilde{c}_x, y'_i - \tilde{c}_y) \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradan;

$$\tilde{r}_i = \sqrt{\tilde{x}_i^2 + \tilde{y}_i^2} \quad (4.14)$$

$$\tilde{\theta}_i = \tan^{-1}(\tilde{y}_i/\tilde{x}_i) \quad (4.15)$$

hesaplamaları yapılabilir. Ayrıca;

$$\hat{r}_i = f(\tilde{\theta}_i, \tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{m}, \tilde{n}_1, \tilde{n}_2, \tilde{n}_3) \quad (4.16)$$

şeklinde yazılabilir. Burada f fonksiyonu Eşitlik (4.11) ile verilen Süper-Formül yaklaşımıdır. f fonksiyonundaki parametrelerin üzerindeki ~ sembolü tüm değerlerin tahmin edilen değerler olduğunu göstermektedir.

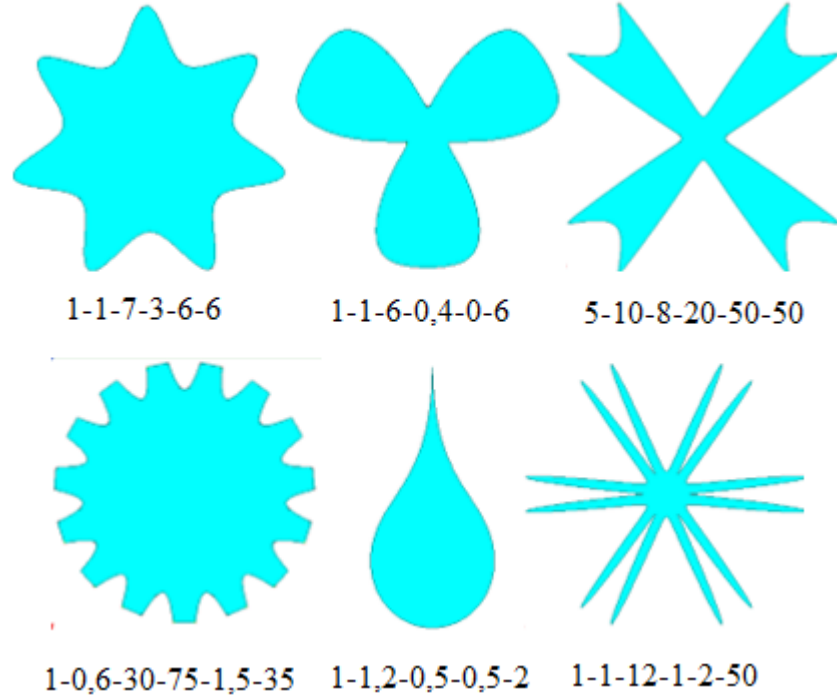
Tahmin edilen değerlerin doğruluğundan emin olabilmek için sapmanın hesaplanması gerekmektedir. Sapma Eşitlik (4.17) ile hesaplanır.

$$d_i = |\tilde{r}_i - \hat{r}_i| \quad (4.17)$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (4.18)$$

Eğer tahmin edilen değerler doğruysa 4.18 numaralı eşitlik sonucunda S^2 değeri 0 olarak bulunur. Yani f fonksiyonundaki parametreler seçilirken S^2 'nin minimum olması hedeflenir. Bu minimizasyon işleminde genetik algoritma yöntemlerinden faydalanılabilir [42].

Formüldeki 6 parametrenin değişimiyle çok farklı şekiller elde edilebilmektedir. Şekil 4. 2' de Süper-Formüldeki 6 parametrenin değişimiyle elde edilen şekillere örnekler sunulmuştur.

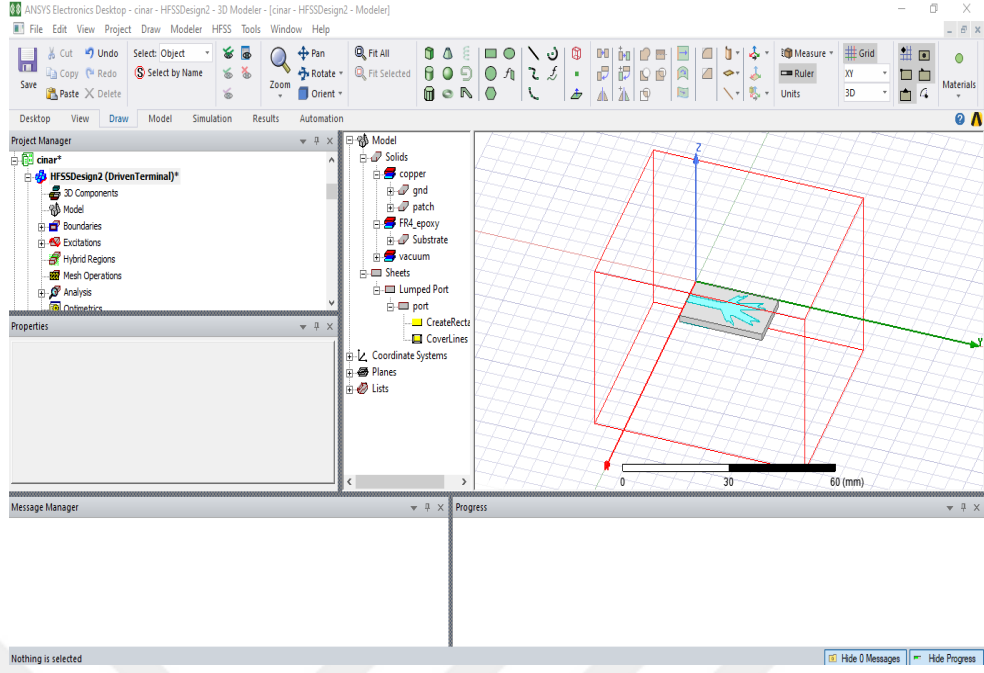


Şekil 4.4. Süper-Formül ile elde edilen şekiller

Süper-Formül ile elde edilen bu şekillerden bazıları simetri gereksinimini sağlamaktadır ve bu sayede anten tasarımına uygun olmaktadır.

4.6. Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (HFSS)

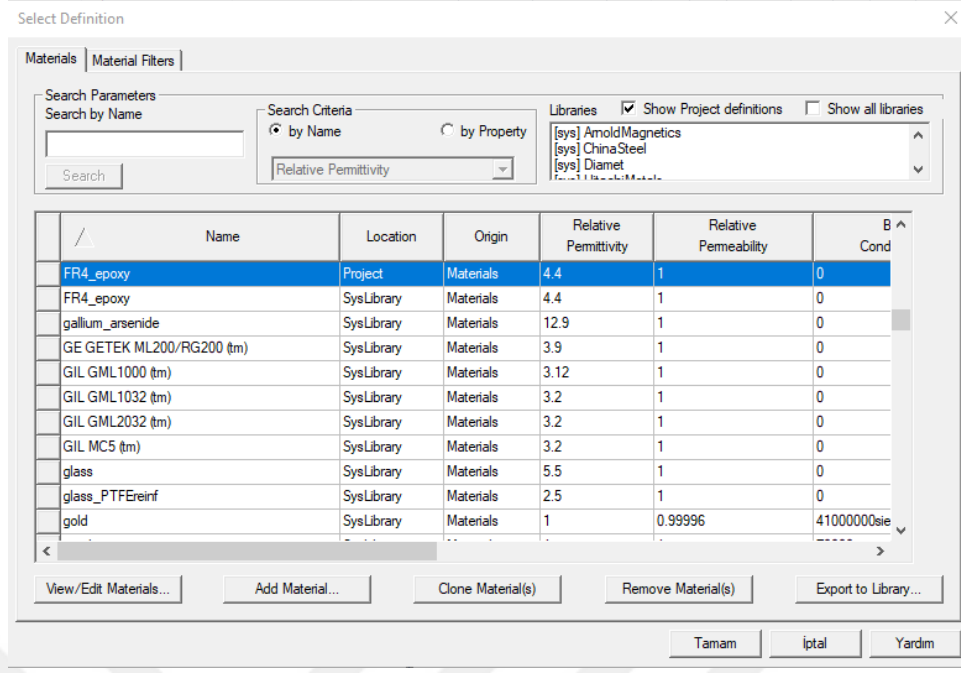
HFSS (Yüksek Frekans Yapı Simülatörü); ANSYS Electronics firmasına ait, 3 boyutlu tam dalga elektromanyetik alan simülasyonu yapmaya olanak sağlayan bir yazılımdır. Program, tasarlanan yapının elektromanyetik davranışını hesaplayabilmek için sonlu elemanlar metodunu (FEM) kullanır. Bu program yardımıyla ışınma deseni, hüzme genişliği, S parametreleri, VSWR gösterimleri gibi pek çok anten parametresi görüntülenebilir ve optimize edilebilir. Şekil 4.5. HFSS programının kullanıcı ara yüzünü göstermektedir.



Şekil 4.5. HFSS kullanıcı ara yüzü

Ara yüzün üst bölümünde bulunan çizim araçları paneli ile iki veya üç boyutlu çizimler yapılarak anten tasarımları gerçekleştirilebilir. Ayrıca Autocad gibi çizim programlarında elde edilen çizimler de HFSS programına aktarılabilir.

İstenilen boyut ve şekilde çizilen antenin analizinin yapılması için öncelikle malzeme tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. Şekil 4.7. ile verilen pencere yardımıyla anten tasarımında kullanılacak yama, toprak tabakası ve dielektrik taban için malzeme seçimleri yapılır. Bu pencereden malzemelerin bağlı geçirgenlik ve kayıp tanjantı gibi karakteristik özellikleri de görüntülenebilmektedir.



Şekil 4.6. Malzeme seçim penceresi

Anten analiz edilmeden önce, kullanılacak sınır koşulları ve uyarımlar belirtilmelidir. Ayrıca antenin çözüm parametreleri ayarlanarak analiz işlemi başlatılır. Kullanıcı ara yüzünde analiz işleminin süreci ve bu süreçte meydana gelen hatalar takip edilebilmektedir. Analizin tamamlanmasının ardından sonuçlar elde edilir. Bütün bu işlemler proje yöneticisi penceresi kullanılarak kontrol edilebilir.

4.7. Mikroşerit Anten Üretimi ve Ölçümler

Bu bölümde mikroşerit antenlerin üretim ve ölçüm cihazları hakkında bilgi verilmiştir.

4.7.1. Baskı Devre Üretimi

Bu tez çalışması kapsamında HFSS programı ile tasarlanan antenlerin üretilmesi için öncelikle 3-Boyutlu olarak modellenen yapı Gerber dosyası formatına dönüştürülmüştür. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi bünyesinde bulunan RF Elektronik ve Haberleşme Laboratuvarında mevcut olan Eleven Lab firmasına ait baskı devre üretim cihazı kullanılarak PCB üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9. kullanılan baskı devre üretim cihazını göstermektedir [44].



Şekil 4.7. Eleven Lab baskı devre üretim cihazı

4.7.2. Spektrum Ağ Analizörü

Üretimleri tamamlanan antenlere ait karakteristik özelliklerin (S parametreleri, giriş empedansı, VSWR) ölçülebilmesi için spektrum ağ analizörü kullanılmaktadır. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi bünyesinde bulunan RF Elektronik ve Haberleşme Laboratuvarında üretilen antenler Signal Hound USB-SA124B spektrum analizörü kullanılarak S11 (Geri dönüş kaybı) değerleri ölçülmüştür. Signal Hound USB-SA124B spektrum analizörü 100 kHz ile 12.4 GHz arasında ölçüm yapmaktadır. Şekil 4.9. ve Şekil 4.10. sırasıyla spektrum ağ analizörü cihazını ve ölçüm düzeneğini göstermektedir [45].



Şekil 4.8. Signal Hound USB-SA124B spektrum analizörü



Şekil 4.9. Ölçüm düzeneği

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde yaprak şekilli yamaya sahip olan mikroşerit anten tasarımlarına ait simülasyon ve ölçüm sonuçlarına yer verilmiştir. Yaprakların fraktal özelliği göstermesi anten tasarımlarında iyi sonuçlar alınmasını sağlamıştır [18]. Tasarlanan tüm antenler için taban malzeme olarak FR-4 malzemesi seçilmiştir. FR-4 oldukça dayanıklı olan bir malzemedir. Nemli ortamlarda da özelliğini kaybetmemesi, mekanik sarsıntılara dayanıklı olması, temin edilmesi kolay ve uygun fiyatlı olması gibi avantajları FR-4 malzemesinin seçilmesinde etkili olmuştur. Kullanılan FR-4 malzemesi 1.6 mm kalınlığa sahiptir ve dielektrik sabiti (ϵ_r) değeri 4.4'tür.

Simülasyon sonuçları elde edilirken HFSS yazılımı kullanılmıştır. Program, tasarlanan yapının elektromanyetik davranışını hesaplayabilmek için sonlu elemanlar metodunu (FEM) kullanır. Bu program yardımıyla ışın deseni, hüzmeye genişliği, S parametreleri, VSWR gösterimleri gibi pek çok anten parametresi görüntülenebilir ve optimize edilebilir.

Tasarımı yapılan antenin WLAN teknolojisinin standartlarına uygun çalışması istenmektedir. Bu nedenle antenin merkez frekansı 5.2 GHz olarak seçilmiştir. Buna göre yama boyutları Bölüm 4.3.1.'de verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 5.1. ile verilmiştir.

Tablo 5. 1. Hesaplanan yama boyutları

W	L
17.55 mm	13.2 mm

5.1. HFSS Programıyla Süper Şekli Mikroişerit Anten Tasarımı ve Analizi

Bu tez çalışmasında anten tasarımları yapılırken ilk önce Süper-Formül kullanımıyla yama şekilleri oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan yama boyutları genişliği 17.55 mm ve yüksekliği 13.20 mm olan bir dikdörtgenin içine sığacak şekilde ölçeklenerek FR-4 taban üzerine yerleştirilmiştir. Tüm tasarımlarda kullanılan altlığın boyutları 15 mm x 25 mm x 1.6 mm olarak seçilmiştir. Tasarlanan antenlerde mikroişerit besleme yöntemi kullanılmıştır. Günümüzde kullanılan cihazlar, kablolar

50 Ω empedansa sahiptir. Anten ile cihaz arasında bağlantı sağlanırken empedans uyumsuzluklarından kaynaklanan kayıpların oluşmaması için mikroşerit iletim hattının genişliği (w), Eşitlik 4.10. kullanılarak anten giriş empedansı 50 Ω olacak şekilde hesaplanmıştır. Palmiye yaprağı şeklinde yamaya sahip olan mikroşerit anten tasarlanırken iletim hattı genişliği $w=2.8$ mm olarak seçilirken çınar yaprağı şeklinde yamaya sahip olan mikroşerit anten tasarımında iletim hattı genişliği $w=2.9$ mm seçilmiştir. Yapılan denemelerde toprak düzlemi yapısının geri dönüş kaybında etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Toprak düzlemi tasarlanırken DGS yapısı kullanıldığında daha iyi geri dönüş kaybı elde edilmiştir.

5.1.1. Palmiye Yaprığı Şeklinde Yama Kullanan Mikroşerit Anten

Tasarımları

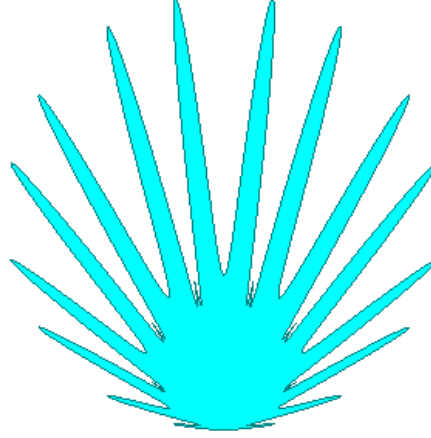
Tasarlanan ilk antenin yama şekli seçilirken Şekil 5.1.'de verilen palmiye ağacı yaprağından esinlenilmiştir. Antenlerin üretimleri sırasında oluşabilecek zorlukların engellenebilmesi amacıyla iki farklı palmiye yaprağı geometrisi elde edilmiştir. Bu geometriler tezde Palmiye Yaprığı Tasarım–A ve Palmiye Yaprığı Tasarım–B olarak adlandırılmıştır. Palmiye Yaprığı Tasarım–A'da kullanılan yama şeklini elde etmek için kullanılan Süper–Formül parametreleri Tablo 5.2.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Palmiye ağacı yaprağı

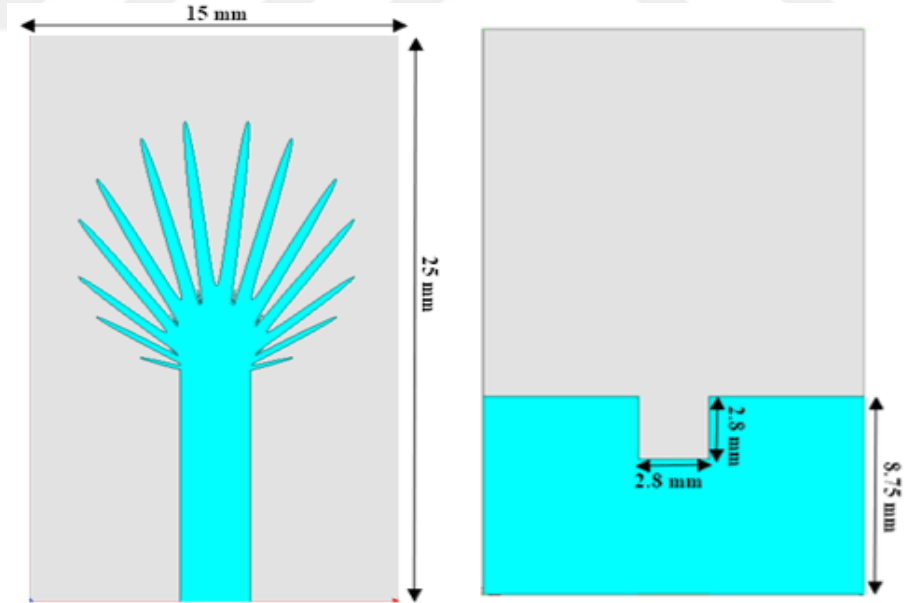
Tablo 5.2. Tasarım–A'da kullanılan Süper–Formül Parametreleri

a	b	m	n_1	n_2	n_3
1	1	32	0.3	1	9

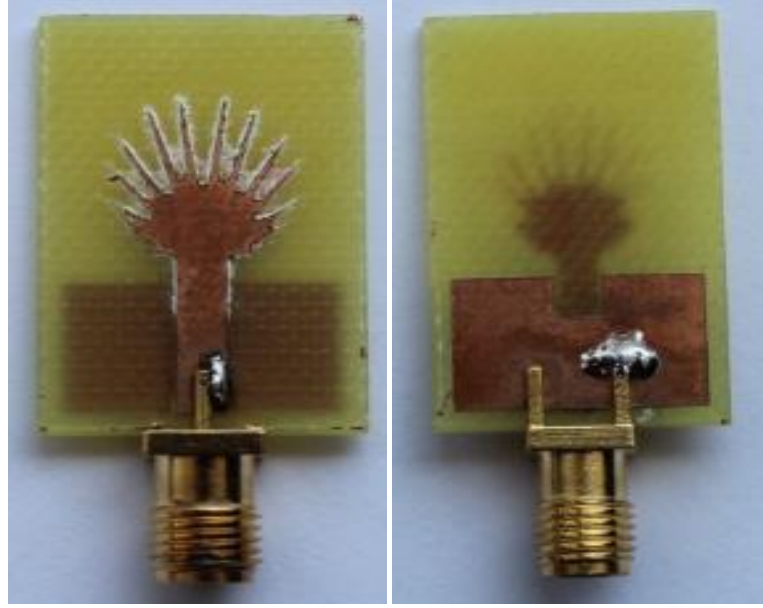


Şekil 5.2. Tasarım-A'da kullanılan palmiye yaprağı şeklinde yama geometrisi

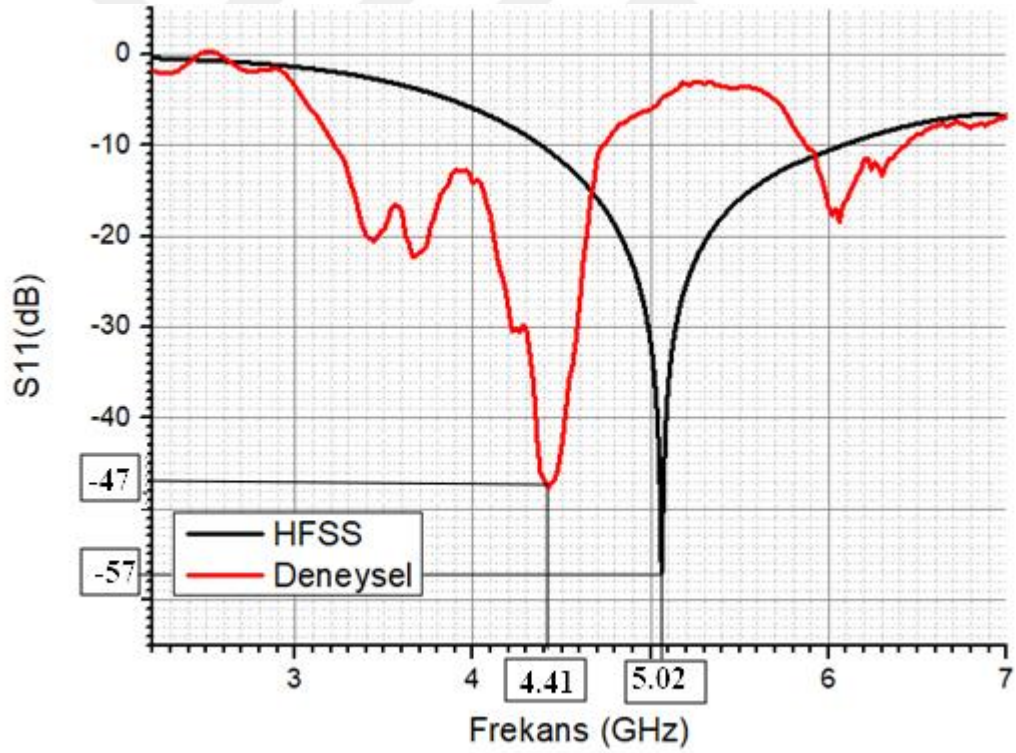
Tablo 5.2 ile verilen parametrelerin seçilmesi sonucu elde edilen yama geometrisi Şekil 5.2. ile verilmiştir. Yama boyutları 11 mm x 11 mm olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Elde edilen yama şekli FR4 taban üzerine yerleştirilerek anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenin ön yüz ve arka yüz görünümü Şekil 5.3. ile gösterilmiştir.



Şekil 5. 3. Palmiye Yaprığı Tasarım-A ön yüz ve arka yüz görünümü



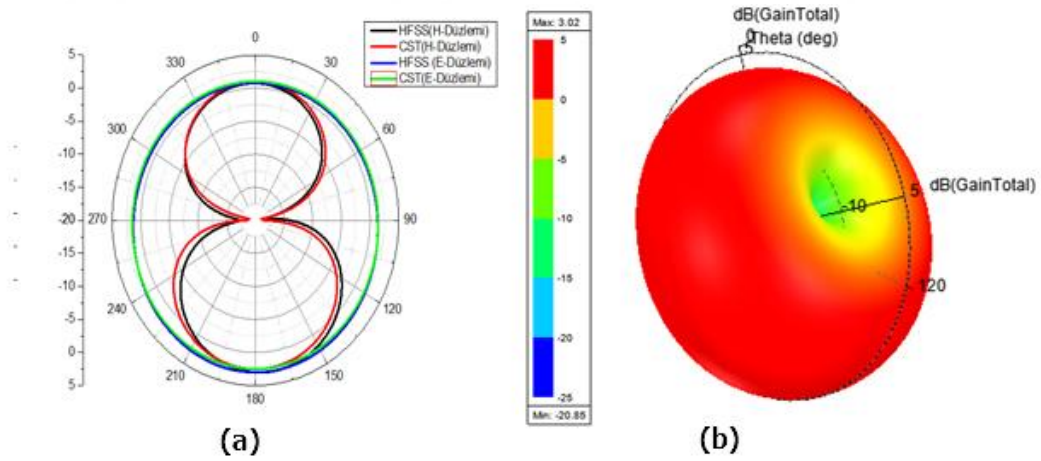
Şekil 5.4. Palmiye yaprağı şeklinde yama kullanarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım–A)



Şekil 5.5. Palmiye Yapağı Tasarım–A’ya ait S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

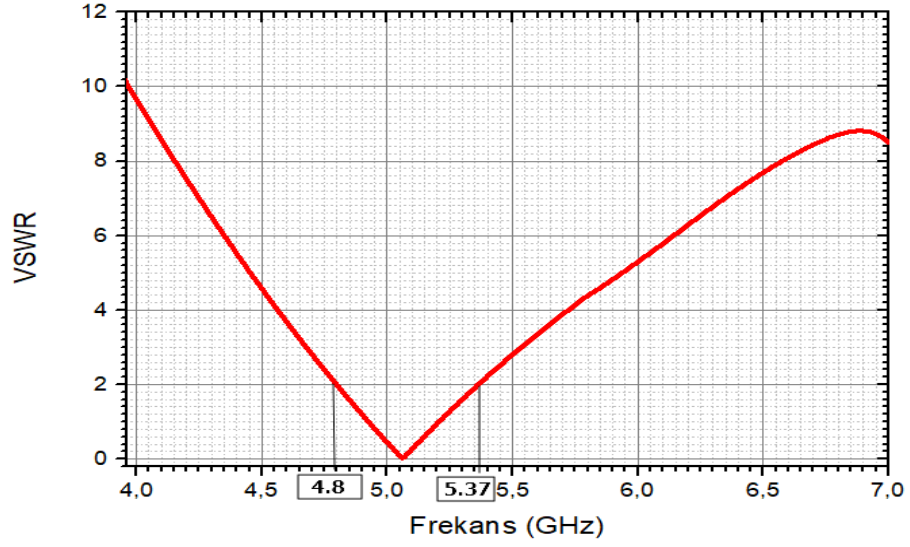
Palmiye yaprağı şeklinde yama kullanarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım–A) Şekil 5.4. ile verilmiştir. Şekil 5.5., Palmiye Yapağı Tasarım–A’ya ait S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir.

Şekil 5.5. incelendiğinde simülasyon sonucuna göre tasarlanan antenin en yüksek ışıma yaptığı frekansın 5.02 GHz olduğu görülmektedir. Anten bu frekansta yaklaşık -57 dB geri dönüş kaybına sahiptir. Anten 4.37 GHz ve 6.11 GHz frekans aralığında ışıma yapmaktadır. Bunun yanısıra üretilen antenin merkez frekansının simülasyon sonucuna göre daha düşük bir frekans olduğu görülmektedir. Şekil 5.2. ile verilen yama geometrisi incelendiğinde elde edilen yaprak şeklinin uzantıları arasında küçük yapılar farkedilmektedir. Bu küçük yapıların hem anten karakteristiklerini etkilediği hem de antenin üretimini zorlaştırdığı görülmüştür. Palmiye Yaprağı Tasarım-A’da kullanılan yama geometrisinde bulunan küçük yapıların üretim sırasında elde edilememesi antenin istenen frekanstan daha küçük bir değerde çalışmasına neden olmuştur.



Şekil 5. 6. Palmiye Yaprağı Tasarım-A’ya ait ışıma deseni a) 2 Boyutta b) 3 Boyutta

Şekil 5.6. tasarlanan antenin ışıma desenini sırasıyla 2 boyutta ve 3 boyutta göstermektedir. Palmiye Yaprağı Tasarım-A’ya ait ışıma deseni hem CST programı hem de HFSS programı kullanılarak çizdirilmiş ve karşılaştırılmıştır. CST de HFSS gibi anten tasarımlarında ve analizlerinde kullanılan bir programdır. Bu karşılaştırmaya ait grafit Şekil 5.6.a’da gösterilmektedir. Bu grafikte görülen kırmızı ve siyah eğriler ışıma desenini H-düzleminde, mavi ve yeşil eğriler ise E-düzleminde göstermektedir. E-düzlemi ışıma deseninin yön bağımsız antenin ışıma desenine benzediği görülmektedir. H-düzlemi ışıma deseninde ön ve arka lobların kazançları neredeyse eşittir. Tasarlanan antenin maksimum kazancının yaklaşık 3.02 dBi olduğu görülmektedir.



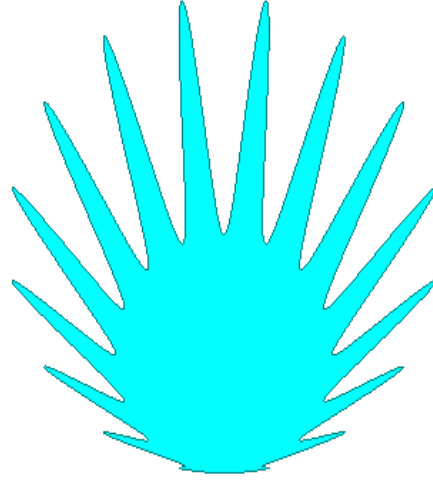
Şekil 5.7. Palmiye Yaprığı Tasarım-A'ya ait VSWR grafiği

Şekil 5.7. tasarlanan antenin VSWR grafiğinin göstermektedir. 4.8 GHz – 5.37 GHz frekans aralığında VSWR değerinin 2'den küçük olması antenin istenen frekansta düzgün çalıştığını göstermektedir.

Palmiye Yaprığı Tasarım-A'nın üretimi sırasında meydana gelen zorluklar ve üretimin istenilen hassasiyette yapılamamasının neden olduğu problemlerin giderilmesi amacıyla parametreler değiştirilerek yeni bir palmiye yaprağı şekli elde edilmiştir. Bu şekli yama olarak kullanan anten tasarımı (Tasarım-B), analiz edilmiş ve üretimi sağlanmıştır.

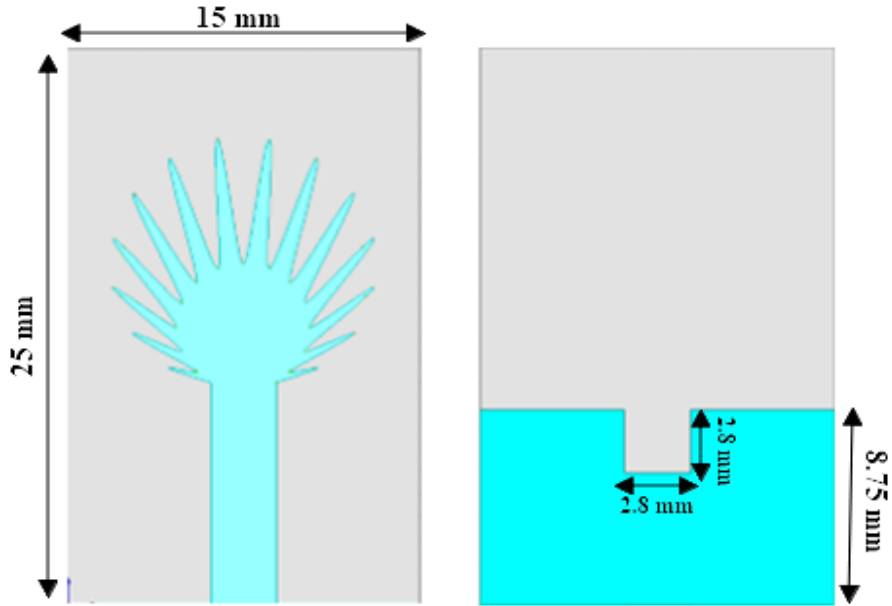
Tablo 5.3. Palmiye Yaprığı Tasarım-B'de kullanılan Süper-Formül Parametreleri

a	b	m	n_1	n_2	n_3
1	1	32	2	6	6

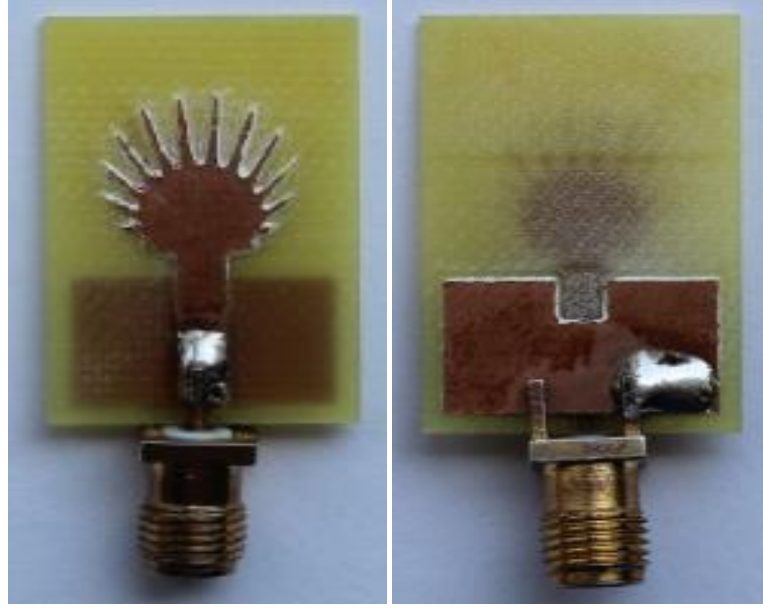


Şekil 5.8. Palmiye Yapağı Tasarım–B’de kullanılan yama geometrisi

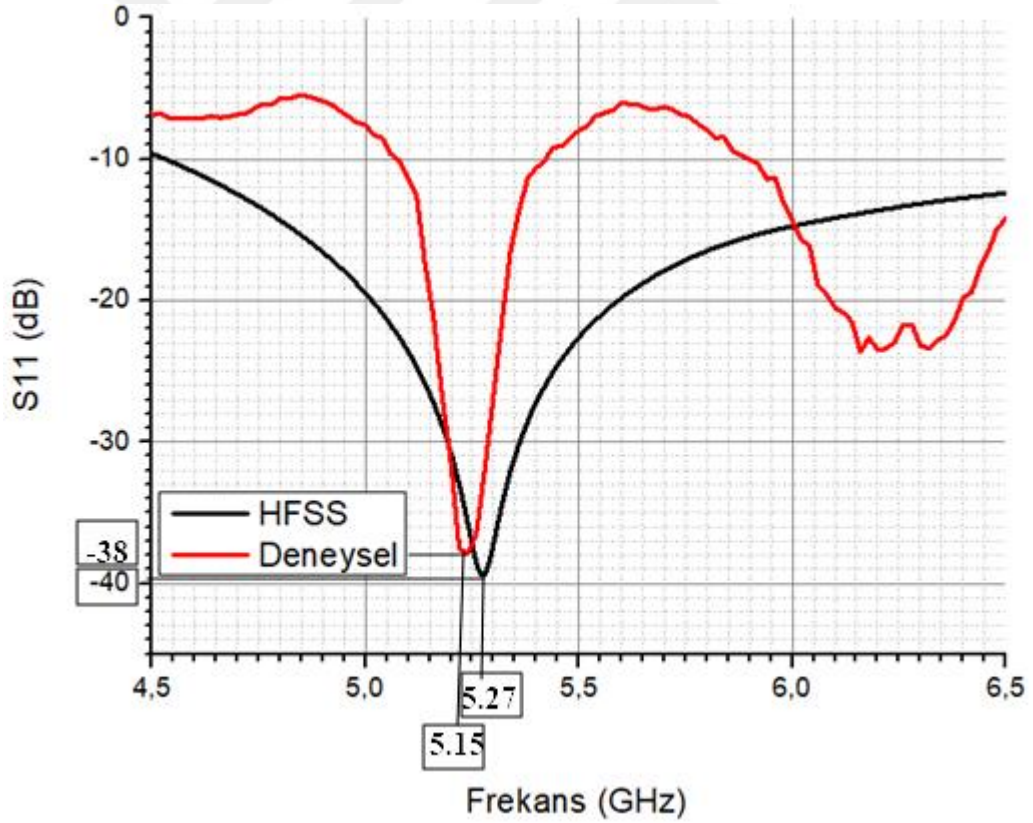
Tablo 5.3. ile verilen parametrelerin seçilmesi sonucu elde edilen yama geometrisi Şekil 5.8. ile verilmiştir. Şekil 5.8. Tasarım–B’de kullanılan palmiye yapağı şeklini göstermektedir. Yama boyutları 11 mm x 11 mm olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Elde edilen yama şekli FR4 taban üzerine yerleştirilerek anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenin ön yüz ve arka yüz görünümü Şekil 5.9. ile gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Palmiye Yapağı Tasarım–B ön yüz ve arka yüz görünümü



Şekil 5.10. Palmiye yaprağı şeklinde yama kullanılarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım-B)

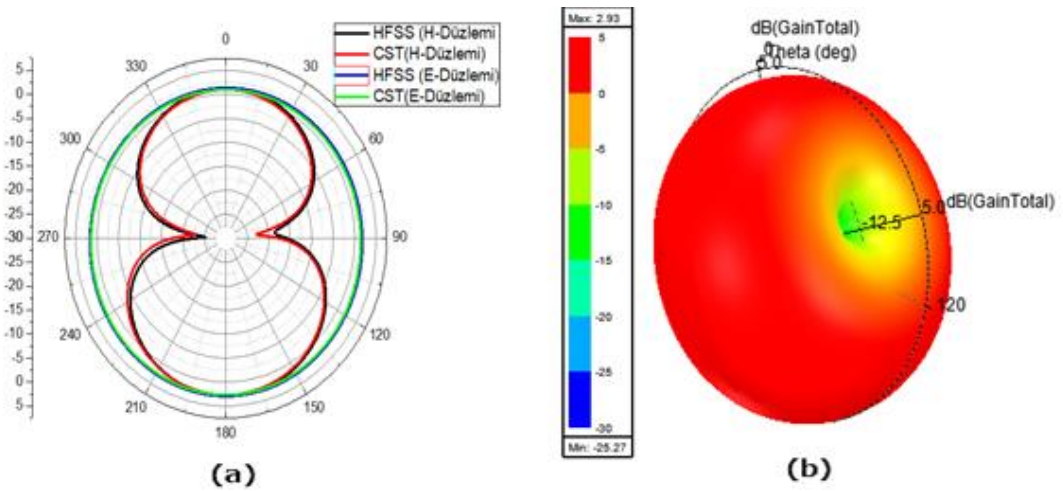


Şekil 5.11. Palmiye Yaprığı Tasarım-B'ye ait S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Palmiye yaprağı şeklinde yama kullanılarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım-B), Şekil 5.10. ile verilmiştir. Şekil 5.11. Palmiye Yaprığı Tasarım-B'ye ait

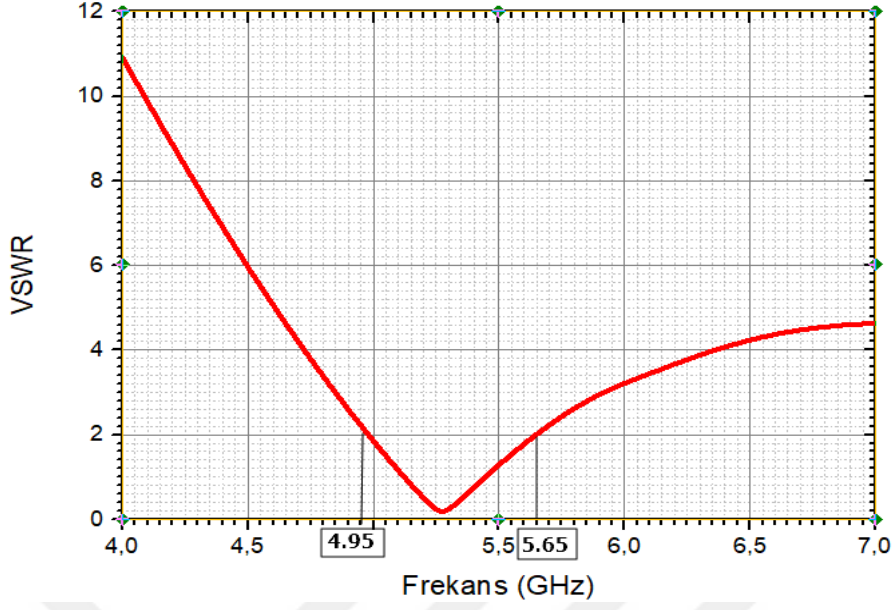
S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekil 5.11. incelendiğinde simülasyon sonucuna göre tasarlanan antenin en yüksek ışıma yaptığı frekansın 5.27 GHz olduğu görülmektedir. Anten bu frekansta yaklaşık -40 dB geri dönüş kaybına sahiptir ve 4.5 GHz ile 8.2 GHz frekans aralığında ışıma yapmaktadır. Üretimi yapılan antenin ölçüm sonuçlarına bakıldığında ise merkez frekansının 5.15 GHz olduğu görülmektedir. Anten bu frekansta -38 dB geri dönüş kaybı değerine sahiptir. Bu grafiğe bakılarak simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının büyük oranda tutarlı olduğu görülmektedir.

Şekil 5.12. tasarlanan antenin ışıma desenini sırasıyla 2 boyutta ve 3 boyutta göstermektedir. Palmiye Yaprağı Tasarım-B'ye ait ışıma deseni hem CST programı hem de HFSS programı kullanılarak çizdirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya ait grafit Şekil 5.12.a'da gösterilmektedir. Bu grafikte görülen kırmızı ve siyah eğriler ışıma desenini H-düzleminde, mavi ve yeşil eğriler ise E-düzleminde göstermektedir. E-düzlemi ışıma deseninin yön bağımsız antenin ışıma desenine benzediği görülmektedir. H-düzlemi ışıma deseninde ön ve arka lobların kazançları neredeyse eşittir. Tasarlanan antenin maksimum kazancının yaklaşık 2.93 dBi olduğu görülmektedir.

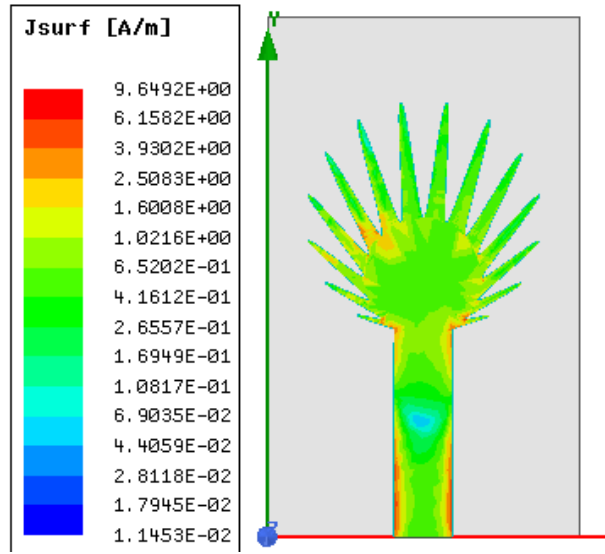


Şekil 5. 12. Palmiye Yaprağı Tasarım-B'ye ait kazanç grafiği a) 2 Boyutta b) 3 Boyutta

Şekil 5.13. ile verilen grafik incelendiğinde 4.95 GHz- 5.65 GHz frekans bandında antenin VSWR değerinin 2'nin altında olduğu görülmüştür. Hem geri dönüş kaybı değerinin (S11) -10 dB'den düşük olması hem de VSWR değerinin 2'den daha küçük olması tasarlanan antenin istenen aralıkta verimli çalıştığını göstermektedir.



Şekil 5.13. Palmiye Yaprağı Tasarım-B'ye ait VSWR grafiği



Şekil 5.14. Palmiye Yaprağı Tasarım-B'ye ait yüzey akım dağılımı

Şekil 5.14. Palmiye Yaprağı Tasarım-B'ye ait yüzey akım dağılımını göstermektedir. Akımın yama yüzeyinde homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir.

5.1.2. Çınar Yaprağı Şeklinde Yama Kullanan Mikroşerit Anten Tasarımı

Tasarlanan diğer bir antenin yama şekli seçilirken Şekil 5.15.'de verilen çınar ağacı yaprağından esinlenilmiştir. İlk başta Şekil 5.15'deki gibi beş damardan oluşan bir çınar yaprağı geometrisi elde edilmiştir. Oluşturulan bu yama şekli kullanılarak

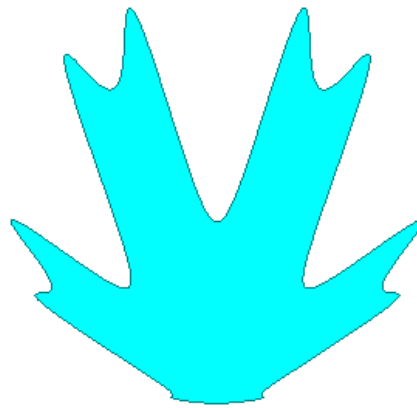
yapılan tasarımlar sonucunda antenin verimli çalışmadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra Tablo 5.4’de verilen Süper -Formül parametreleri kullanılarak dört damarlı bir Çınar yaprağı şekli elde edilip tasarım adımları tekrarlanmıştır. Süper -Formül parametreleri kullanılarak elde edilen Çınar yaprağı şeklinde yama kullanan iki farklı anten tasarımı yapılmıştır. Tezde bu tasarımlardan Çınar Yaprığı Tasarım-A ve Çınar Yaprığı Tasarım-B şeklinde bahsedilecektir.



Şekil 5.15. Çınar ağacı yaprağı

Tablo 5.4. Çınar yaprağı Tasarım-A’da kullanılan Süper-Formül Parametreleri

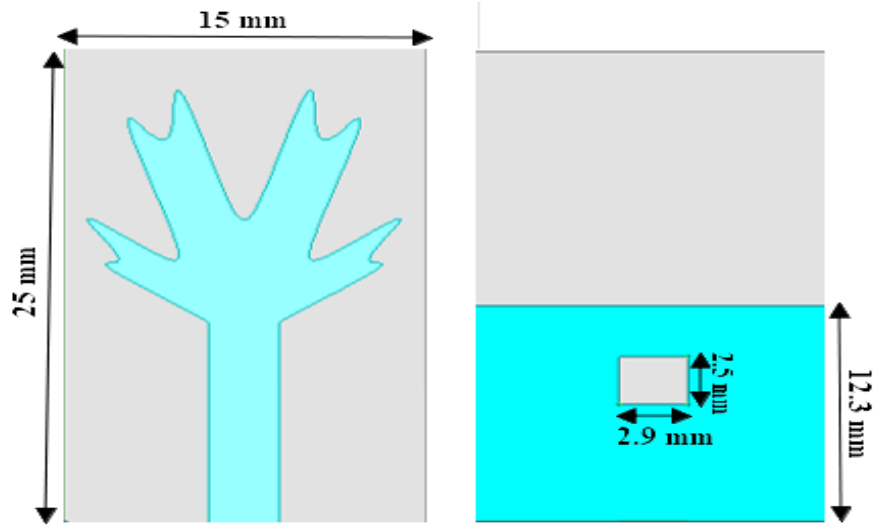
a	b	m	n_1	n_2	n_3
7.865	5.87	20	5	7	10



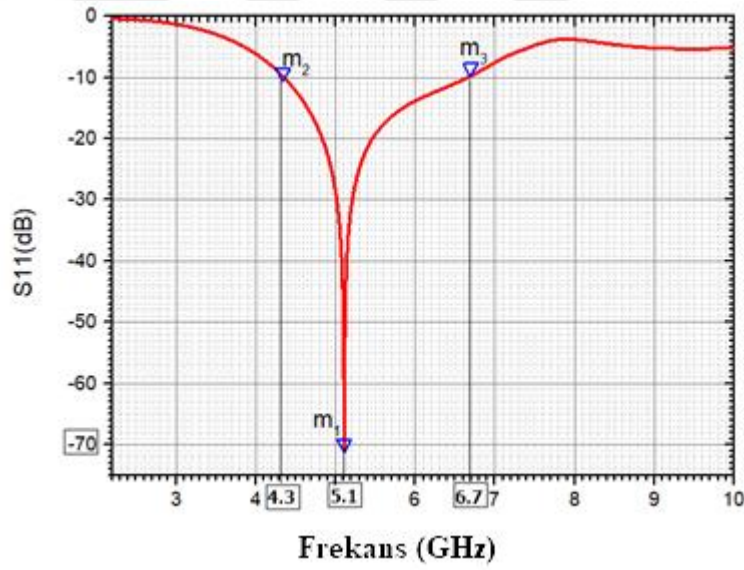
Şekil 5.16. Süper-Formül ile elde edilen çınar yaprağı biçimli yama geometrisi

Süper-Formül ile elde edilen çınar yaprağı şekilli yama şekil 5.16.’da verilmiştir. Yama boyutları 11 mm x 11 mm olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Elde edilen yamanın FR-4 taban üzerine basılmasıyla mikroşerit anten yapısı elde

edilmiştir. Elde edilen mikroserit antenin ön yüz ve arka yüz görüntüleri Şekil 5.17. ile sunulmuştur.

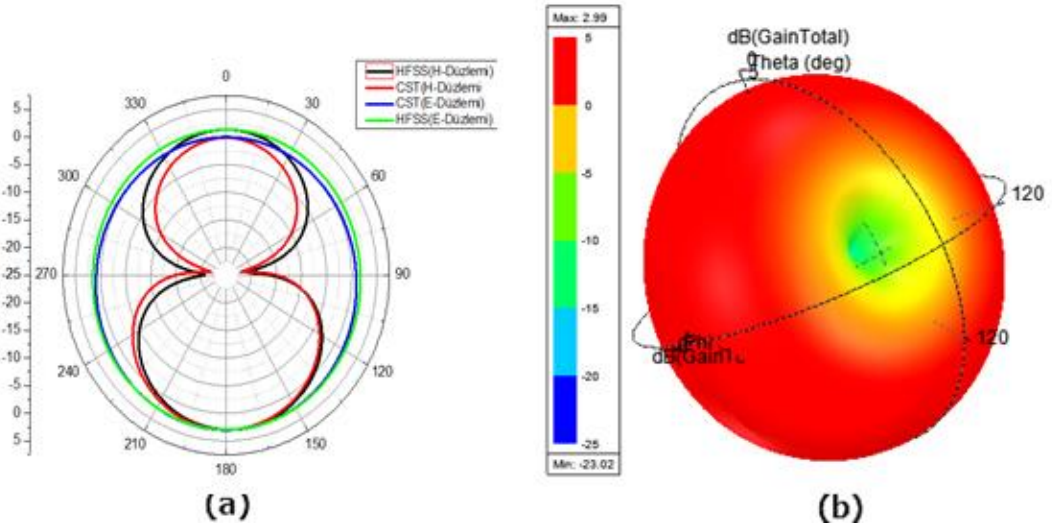


Şekil 5.17. Çınar Yaprığı Tasarım-A ön yüz ve arka yüz görünümü



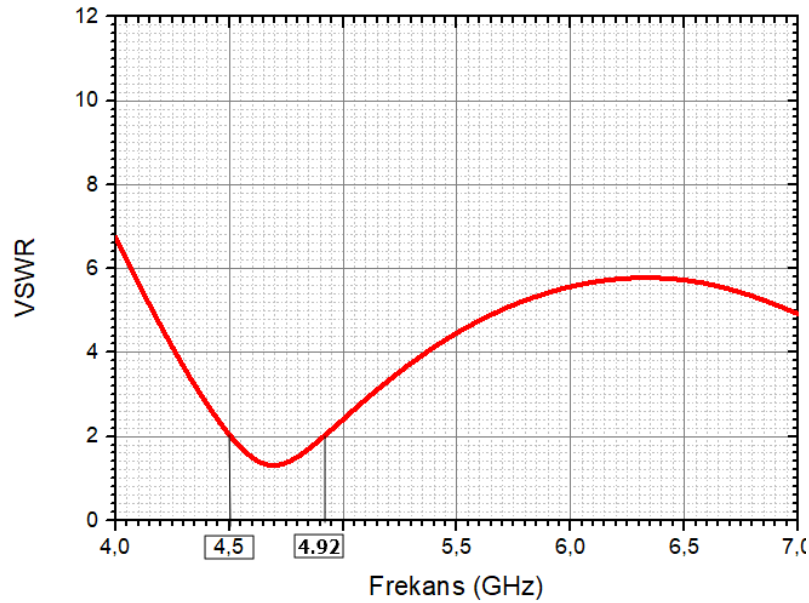
Şekil 5.18. Çınar Yaprığı Tasarım-A'ya ait geri dönüş kaybı (S11) grafiği

Tasarlanan antene ait geri dönüş kaybı (S11) grafiği Şekil 5.18.'de verilmiştir. Simülasyon sonucu incelendiğinde tasarlanan antenin en yüksek ışıma yaptığı frekansın 5.1 GHz olduğu görülmektedir. Anten bu frekansta yaklaşık -70 dB geri dönüş kaybına sahiptir. Anten 4.3 GHz ve 6.7 GHz frekans aralığında ışıma yapmaktadır. Şekil 5.19 tasarlanan antenin ışıma desenini sırasıyla 2 boyutta ve 3 boyutta göstermektedir.



Şekil 5.19. Çınar Yaprığı Tasarım-A'ya ait kazanç grafiği a) 2 Boyutta b) 3 Boyutta

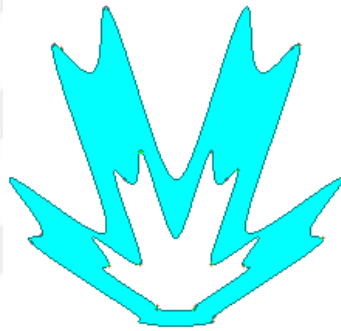
Şekil 5.19. tasarlanan antenin ışınma desenini sırasıyla 2 boyutta ve 3 boyutta göstermektedir. Çınar Yaprığı Tasarım-A'ya ait ışınma deseni hem CST programı hem de HFSS programı kullanılarak çizdirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya ait grafit Şekil 5.19.a'da gösterilmektedir. Bu grafikte görülen kırmızı ve siyah eğriler ışınma desenini H-düzleminde, mavi ve yeşil eğriler ise E-düzleminde göstermektedir. E-düzlemi ışınma deseninin yön bağımsız antenin ışınma desenine benzediği görülmektedir. H-düzlemi ışınma deseninde ön ve arka lobların kazançları neredeyse eşittir. Tasarlanan antenin maksimum kazancının yaklaşık 2.99 dBi olduğu görülmektedir.



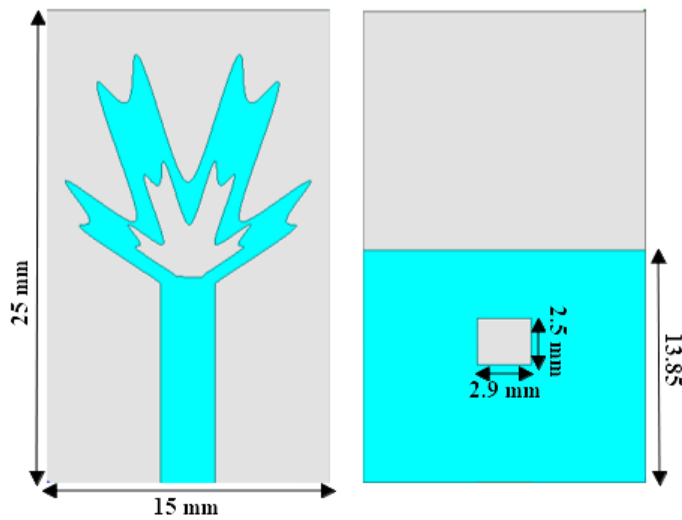
Şekil 5.20. Çınar Yaprığı Tasarım-A'ya ait VSWR grafiği

Şekil 5.20 ile verilen grafik incelendiğinde 4.5 GHz- 4.92 GHz frekans bandında antenin VSWR değerinin 2'nin altında olduğu görülmüştür. Antenin merkez frekansındaki VSWR değerinin 2'den büyük olsa da bu değer kabul edilebilir aralıktadır. Bu nedenle tasarlanan antenin istenen aralıkta çalıştığı söylenebilir.

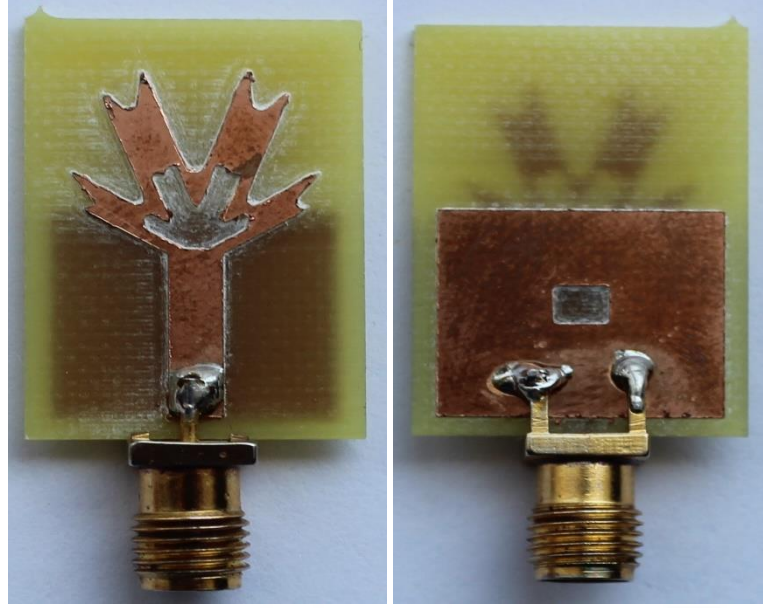
Çınar Yapağı Tasarım-B'nin tasarımında Tablo 5.4. ile verilen Süper-Formül parametreleri kullanılarak elde edilen çınar yapağı şekli %50 oranında küçültülerek büyük yamanın içinden çıkartılmış ve bir boşluk oluşturulması sağlanmıştır. Elde edilen yama geometrisi Şekil 5.21. ile verilmiştir. Yama boyutları 11 mm x 11 mm olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Tasarlanan yeni yama geometrisi FR-4 taban malzeme üzerine yerleştirilerek mikroşerit anten yapısı elde edilmiştir. Elde edilen antenin ön yüz ve arka yüz görünümü Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



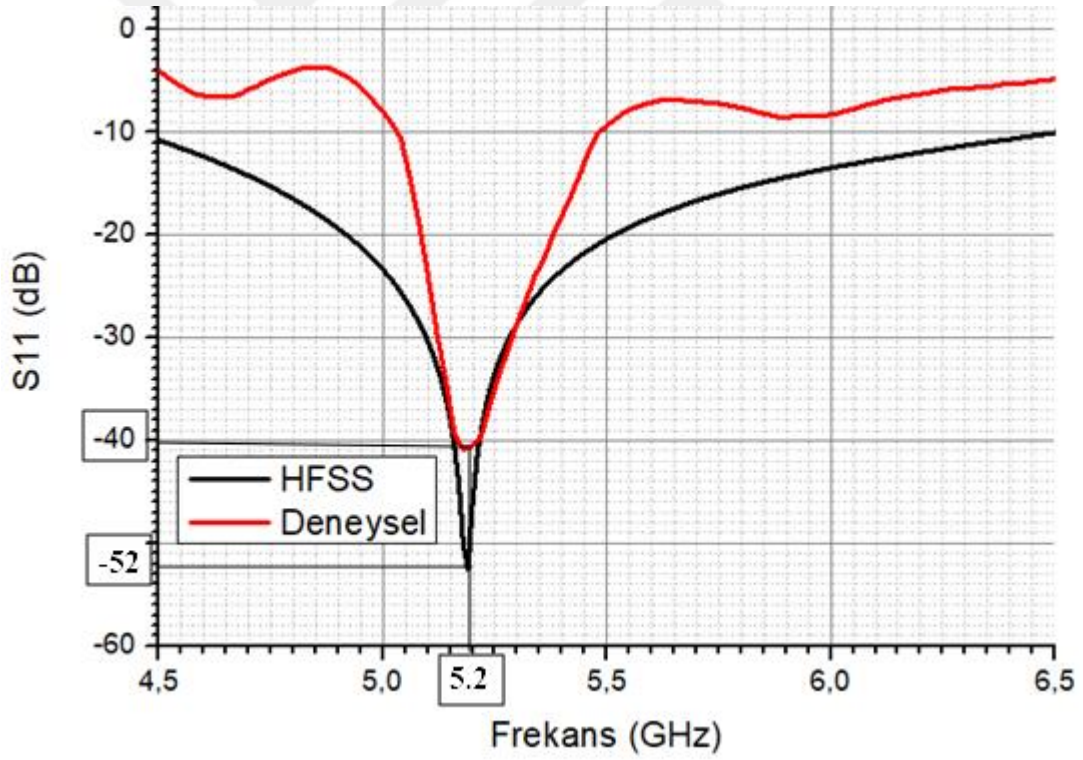
Şekil 5.21. Çınar Yapağı Tasarım-B'de kullanılan yama geometrisi



Şekil 5.22. Çınar Yapağı Tasarım-B ön yüz ve arka yüz görünümü



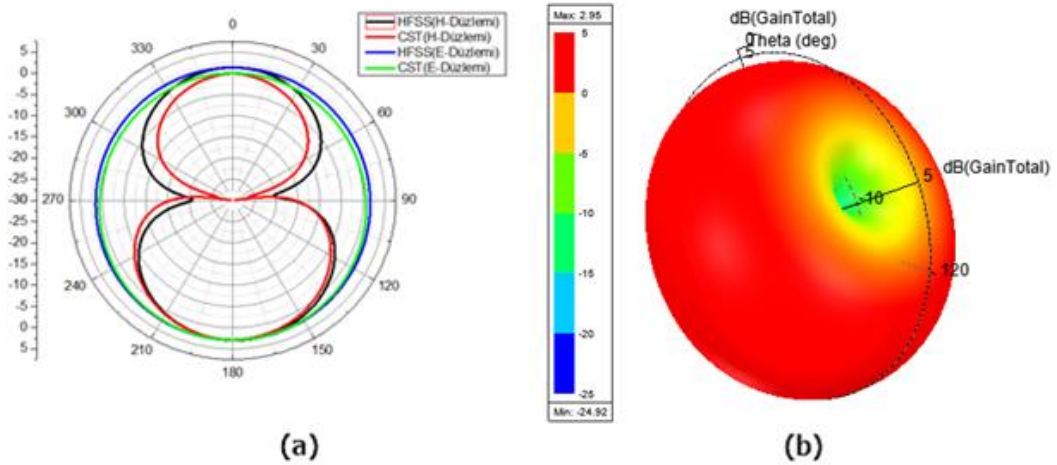
Şekil 5.23. Çınar yaprağı şeklinde yama kullanılarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım-B)



Şekil 5.24. Çınar Yaprağı Tasarım-B'ye ait S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

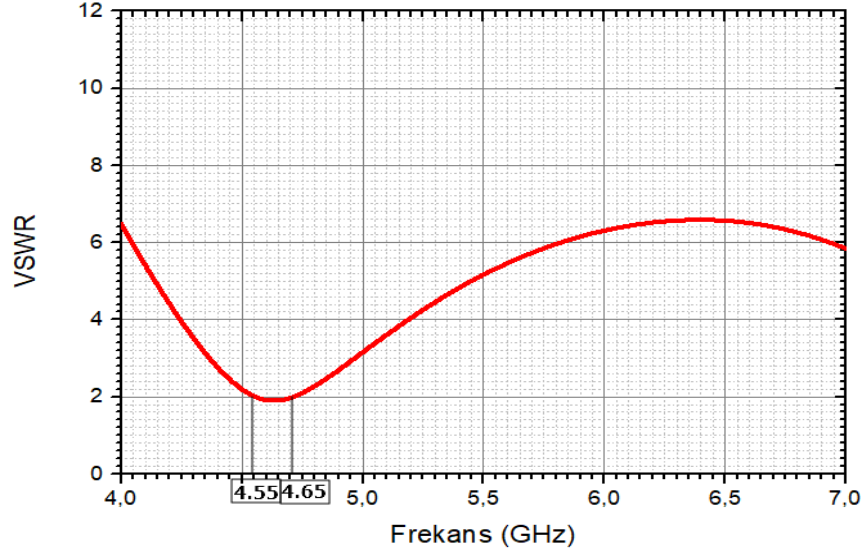
Çınar Yaprağı şeklinde yama kullanılarak üretilen mikroşerit anten (Tasarım-B) Şekil 5.23. ile verilmiştir. Şekil 5.24. Çınar Yaprağı Tasarım-B'ye ait S11 değerlerinin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir.

Şekil 5.24. incelendiğinde simülasyon sonucuna göre tasarlanan antenin en yüksek ışıma yaptığı frekansın 5.2 GHz olduğu görülmektedir. Anten bu frekansta yaklaşık -52 dB geri dönüş kaybına sahiptir. Anten 4.45 GHz ve 6.5 GHz frekans aralığında ışıma yapmaktadır.

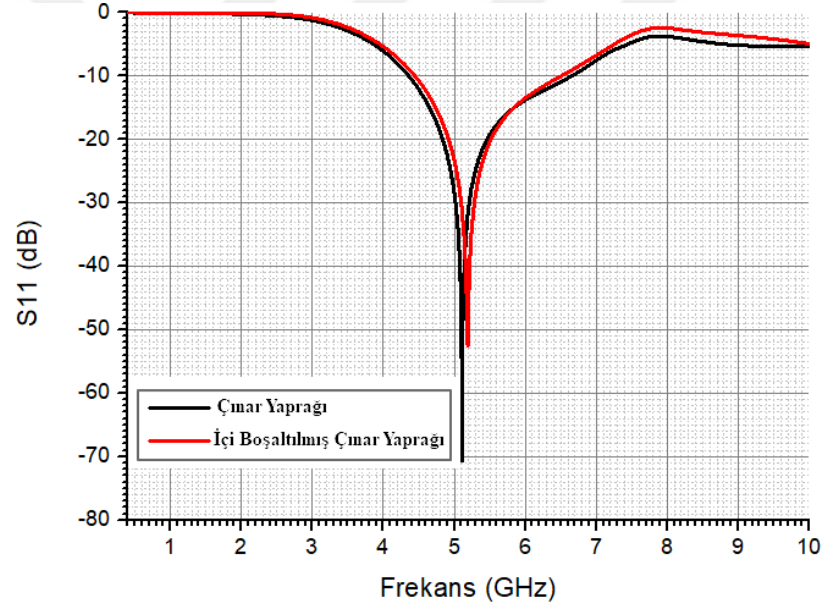


Şekil 5.25. Çınar Yaprığı Tasarım-B'ye ait kazanç grafiği a) 2 Boyutta b) 3 Boyutta

Şekil 5.19. tasarlanan antenin ışıma desnini sırasıyla 2 boyutta ve 3 boyutta göstermektedir. Çınar Yaprığı Tasarım-B'ye ait ışıma deseni hem CST programı hem de HFSS programı kullanılarak çizdirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya ait grafit Şekil 5.19.a'da gösterilmektedir. Bu grafikte görülen kırmızı ve siyah eğriler ışıma deseni H-düzleminde, mavi ve yeşil eğriler ise E-düzleminde göstermektedir. E-düzlemi ışıma deseninin yön bağımsız antenin ışıma desenine benzediği görülmektedir. H-düzlemi ışıma deseninde ön ve arka lobların kazançları neredeyse eşittir. Tasarlanan antenin maksimum kazancının yaklaşık 2.95 dBi olduğu görülmektedir.Şekil 5.26. ile verilen grafik incelendiğinde 4.55 GHz – 4.65 GHz frekans aralığında Çınar Yaprığı Tasarım-B'nin VSWR değerinin 2'nin altında olduğu görülmektedir. Bu aralık antenin merkez frekansını kapsamamaktadır. Antenin merkez frekansı olan 5.2 GHz'de ise VSWR değeri 2'den büyük olsa da kabul edilebilir bir değerde olması antenin bu frekansta düzgün bir ışıma yaptığını göstermektedir.



Şekil 5.26. Çınar Yapraklı Tasarım-B'ye ait VSWR grafiği



Şekil 5.27. Çınar Yapraklı Tasarım-A ve Çınar Yapraklı Tasarım-B'ye ait S11 değerlerinin karşılaştırılması

Aynı boyutlarda tasarlanan Çınar Yapraklı Tasarım-A ile Çınar Yapraklı Tasarım-B'ye ait S11 değerleri Şekil 5.27. ile karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslamaya göre Çınar Yapraklı Tasarım-B'nin merkez frekansının WLAN teknolojisi standartlarına uygun olduğu görülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde Süper-Formül yardımıyla üretilen antenlerin hem boyutsal olarak hem de geri dönüş kaybı açısından daha üstün özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin 5.2 GHz merkez frekansında çalışan dikdörtgenel yamalı

mikroşerit antene ait boyut, geri dönüş kaybı ve kazanç değerlerinin tasarlanan Süperşekilli mikroşerit antenlere ait değerlerle karşılaştırılması Tablo 5.5. ile sunulmuştur.

Tablo 5.5. 5.2 GHz merkez frekansına göre tasarlanmış geleneksel dikdörtgenel yamalı anten ile tasarlanan Süperşekilli antenlerin karşılaştırılması

	Boyutlar	S11	Toplam Kazanç
Dikdörtgenel Yamalı Anten [46]	27mm x 31 mm	-23.9 dB	5.39 dBi
Palmiye Yaprağı Tasarım-A	15mm x 25mm	-57 dB	3.02 dBi
Palmiye Yaprağı Tasarım-B	15mm x 25mm	-40 dB	2.93 dBi
Çınar Yaprağı Tasarım-A	15mm x 25mm	-70 dB	2.99 dBi
Çınar Yaprağı Tasarım-B	15mm x 25mm	-52.5 dB	2.95 dBi

Tablo 5.5. incelendiğinde tasarlanan antenlerin mevcut dikdörtgenel antene göre %55 daha küçük boyutlara sahip olduğu söylenebilir. Palmiye Yaprağı Tasarım-A' ya ait geri dönüş kaybı %58, Palmiye Yaprağı Tasarım-B'ye ait geri dönüş kaybı % 40.25, Çınar Yaprağı Tasarım-A'ya ait geri dönüş kaybı % 65.85 ve Çınar Yaprağı Tasarım-B'ye ait geri dönüş kaybı % 54.47 daha iyidir.

5.2 GHz merkez frekansında çalışan dikdörtgenel yamalı mikroşerit antenin yaması 16.11 mm x 21 mm boyutlarındadır. Tez çalışmasında tasarlanan dört antende kullanılan Süperşekilli yamalar ise 11 mm x 11 mm boyutlarındadır. Mikroşerit anten tasarımında Süperşekilli yama kullanımı, yama boyutlarında %64 oranında küçülme olmasını sağlamıştır. Literatürde mevcut olan Süperşekilli anten tasarımlarına ait taban boyutları ve S11 değerleri Tablo 5.6. ile verilmiştir. Tablo 5.6. incelendiğinde tez kapsamında yapılan anten tasarımlarının hem daha küçük boyutlarda olduğu hem de daha iyi geri dönüş kaybına sahip olduğu söylenebilir.

Tablo 5.6. Literatürde mevcut olan Süperşekilli anten tasarımları ile tez kapsamında tasarlanan Süperşekilli mikroserit antenlerin karşılaştırılması

Çalışma Adı	Boyut (mm x mm)	Yama Boyutları (mm x mm)	S11 (dB)	Kazanç (dBi)	Yama Boyutlarında Yapılan Küçültme
Compact Design of UWB CPW-Fed-Patch Antenna Using the Superformula [43]	32.4x40	18.2x18.2	-50	9	%30
Bio-Inspired Microstrip Antenna (Lale şekilli yama) [18]	35.7x52.65	25.7x26.45	-35	5.18	Küçültme Yok
Bio-Inspired Microstrip Antenna (Papatya şekilli yama) [18]	36.5x40	19x19	-35	5.95	%11.3
Bio-Inspired Microstrip Antenna (Mabet ağacı yaprağı şekilli yama) [18]	39x60.5	39x24.5	-38	3.12	%67.64
Palmiye Yapağı Tasarım-A	15x25	11x11	-57	3.02	%64
Palmiye Yapağı Tasarım-B	15x25	11x11	-40	2.93	%64
Çınar Yapağı Tasarım-A	15x25	11x11	-70	2.99	%64
Çınar Yapağı Tasarım-B	15x25	11x11	-52	2.95	%64

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması ile geleneksel yama şekilleri yerine doğadan ilham alan yama şekilleri kullanan mikroşerit anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda kullanılan palmiye yaprağı şekilleri ve çınar yaprağı şekilleri Süper-Formül kullanımıyla elde edilmiştir. Bu şekillerin kullanıldığı toplam dört adet mikroşerit anten tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Bu tasarımların her biri FR4 taban malzemesi kullanılarak analiz edilmiş ve gerekli ölçümler yapılmıştır.

HFSS programı ile yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda tasarlanan antenlerin mevcut dikdörtgenel antene göre %55 daha küçük boyutlara sahip olduğu görülmüştür. Dikdörtgenel antene kıyasla, Palmiye Yaprağı Tasarım-A' ya ait geri dönüş kaybı %58, Palmiye Yaprağı Tasarım-B'ye ait geri dönüş kaybı %40.25, Çınar Yaprağı Tasarım-A'ya ait geri dönüş kaybı %65.85 ve Çınar Yaprağı Tasarım-B'ye ait geri dönüş kaybı %54.47 daha iyidir.

Süper şekilli yama geometrisinin anten tasarımlarında tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden biri aynı frekansta çalışan geleneksel yamalı mikroşerit antenlere kıyasla daha küçük yama kullanımıyla daha iyi geri dönüş kaybının elde edilmesidir. Literatürde mevcut olan süper şekilli anten tasarımları incelendiğinde Compact Design of UWB CPW-Fed-Patch Antenna Using the Superformula adlı çalışmada tasarlanan antenin, aynı frekansta çalışan geleneksel yamalı mikroşerit antene kıyasla %30 daha küçük bir yama kullandığı görülmektedir. Bio Inspired Microstrip antenna adlı çalışmada birden fazla süperşekilli anten tasarımına yer verilmiştir. Bunlardan Lale şekline yama kullanan antenin yama boyutlarında herhangi bir küçültme sağladığı görülmezken, Papatya şekilli yamanın %11.3 oranında ve Balina kuyruğu şeklindeki yamanın %67.64 oranında küçültme sağladığı gözlemlenmiştir. Tez kapsamında yapılan anten tasarımlarında kullanılan süper şekilli yamaların boyutları ise aynı frekansta çalışan dikdörtgenel yamalı mikroşerit antene göre %64 daha küçüktür.

Üretim sonuçları ile simülasyon sonuçları büyük oranda tutarlı bulunsa da daha sonra yapılacak olan çalışmalarda taban malzemesi olarak FR4 yerine ROGERS 4350B gibi kayıp tanjantı daha küçük dielektrik malzemelerle tasarımlar ve üretimler tekrarlanarak uyumsuzluk minimum seviye indirilebilecektir.

Sonuç olarak WLAN uygulamalarında kullanılması hedeflenen 4 adet mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan Süperşekilli antenlerin üretim sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırdığında değerlerin büyük ölçüde tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Süper- Formül ile elde edilen yama geometrilerinin mikroşerit anten tasarımlarında kullanılmasının geleneksel yama kullanan mikroşerit antenlere kıyasla, daha küçük boyutlarda ve daha iyi geri dönüş kaybı elde etme konusunda etkili olduğu gösterilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). Antenna theory and design. John Wiley & Sons, 857
- [2] Biçer, Mustafa Berkan. WLAN/WiMAX Uygulamaları İçin Kompakt Mikroşerit Anten Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin, 2011,111 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [3] Deschamps, Georges A. Microstrip microwave antennas. Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program, Ekim, 1953
- [4] Gutton, H., & Baissinot, G. (1955). Flat aerial for ultra high frequencies. French patent, 703113.
- [5] Howell, J. Q. A least square distance curve fitting technique, Mayıs, 1971
- [6] Carver, K., Mink, J. Microstrip antenna technology. IEEE transactions on antennas and propagation, 1981, 29(1) 2-24.
- [7] Kumar, G., Gupta, K. Directly coupled multiple resonator wide-band microstrip antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, 33(6), 588-593.
- [8] Sullivan, P., Schaubert, D. Analysis of an aperture coupled microstrip antenna. IEEE transactions on antennas and propagation, 1986, 34(8), 977-984.
- [9] Bhattacharyya, A. K., Shafai, L., Gary, R. Microstrip Antenna–A Generalized Transmission Line. Progress In Electromagnetics Research, 1991, 4, 45-84.
- [10] Yau, D., Shuley, N. V. Numerical analysis of an aperture coupled microstrip patch antenna using mixed potential integral equations and complex images. Progress In Electromagnetics Research, 1998, 18, 229-244.
- [11] Yang, F., Zhang, X. X., Ye, X., Rahmat-Samii, Y. Wide-band E-shaped patch antennas for wireless communications. IEEE transactions on antennas and propagation, 2001, 49(7), 1094-1100.
- [12] Gielis, J. A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes. American journal of botany, 2003, 90(3), 333-338.
- [13] Simeoni, M., Cicchetti, R., Yarovoy, A., Caratelli, D. Circularly polarized supershaped dielectric resonator antennas for indoor ultra wide band applications. In 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Temmuz 2010 (s. 1-4)
- [14] Bia, P., Caratelli, D., Mescia, L.,Gielis, J. Electromagnetic characterization of supershaped lens antennas for high-frequency applications. 2013 European Radar Conference, Ekim 2013 (s. 367-370)
- [15] Naser, S., & Dib, N. Design and analysis of super-formula-based UWB monopole antenna.2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Haziran, 2016, (pp. 1785-1786)
- [16] Naser, S., & Dib, N. Design and analysis of super-formula-based UWB monopole antenna and its MIMO configuration. Wireless Personal Communications, 2017, 94(4)
- [17] Omar, A., Rashad, M., Al-Mulla, M., Attia, H., Naser, S., Dib, N., Shubair, R. M. Compact design of UWB CPW-fed-patch antenna using the superformula. 2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), Aralık, 2016, (pp. 1-4)
- [18] Serres, A. J. R., de Freitas Serres, G. K., da Silva Júnior, P. F., Freire, R. C. S., do Nascimento Cruz, J., de Albuquerque, T. C,Fonseca Silva, P. H. Bio-inspired

- microstrip antenna. Trends in Research on Microstrip Antennas, 2017
- [19] Khajevandi, S., Oraizi, H., & Poordaraee, M. Design of planar dual-bandstop FSS using square-loop-enclosing superformula curves. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(5), 731-734.
- [20] Samaras, K. A., Maximidis, R. T., Koutinos, A., Ioannopoulos, G. A., Caratelli, D., Sahalos, J. N., Kyriacou, G. A. Characteristic mode analysis of drop-like supershaped patch antenna. 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Mayıs, 2018 (pp. 1-4)
- [21] Eskiçirak, Mustafa Celal. Çok Demetli Anten Sistemleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 83 s., Yüksek Lisans Tezi
- [22] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 756
- [23] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, 1104
- [24] Kiriş, Serap. Mikroşerit Anten ve Filtresinin Tasarımı, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Kayseri, 2018, 87 s., Yüksek Lisans Tezi
- [25] Aydın, Erkan. Microstrip patch antenna design for ultra-wideband communications, Adana Alparslan Türkeş Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 2019, 111 s., Yüksek Lisans Tezi
- [26] Akkaya, Eren. Oldukça Geniş Bantlı Yönsüz Mikroşerit Dipol Anten Tasarım Analiz ve Gerçekleşmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2013, 89 s. Yüksek Lisans Tezi
- [27] URL: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/major-lobe-first-null-beamwidth-fnbw-normalized-field-pattern-linear-scale-half-power-beam-q43207145>. [Erişim Tarihi: 06-Mayıs-2020].
- [28] Koutinos, A. G., Ioannopoulos, G. A., Chryssomallis, M. T., Kyriacou, G. A., Caratelli, D. Bandwidth enhancement of a supershape patch antenna using multiple feeding technique. In 2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT), Mart, 2017, (pp. 211-214).
- [29] Blaunstein, N., & Christodoulou, C. G.. Radio propagation and adaptive antennas for wireless communication links: terrestrial, atmospheric and ionospheric (Vol. 193). John Wiley & Sons.
- [30] Zengin, Fatma. Ultra Geniş Bantlı Balun Beslemeli Düzlemsel Log Periyodik Anten Tasarımı, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü / Fizik Anabilim Dalı, Kocaeli, 2018, 113 s., Doktora Tezi
- [31] İbrahimli, İlkin. Mobil Haberleşmedeki Mikroşerit Anten Tasarımı, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2017, 97 s., Yüksek Lisans Tezi
- [32] Pozar, D. M. Microstrip antennas. *Proceedings of the IEEE*, 1992, 80(1), 79-91.
- [33] Cihangir, Aykut. Radiation characteristic analysis of tapered slot antennas, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, 2010, 101 s., Yüksek Lisans Tezi
- [34] Jamaluddin, M. H., Rahim, M. K. A., Aziz, M. A., Asrokin, A. Microstrip dipole antenna for WLAN application. In 2005 1st International Conference on Computers, Communications, & Signal Processing with Special Track on Biomedical Engineering, Kasım, 2005, (pp. 30-33)
- [35] Karaca, Erol. Dairesel Polarizasyonda Çalışan L Şeklinde Çevrilmiş Şeritlere Sahip Eş Düzlemsel Dalga Kılavuzu Beslemeli Kare Slot Anten Tasarımı,

- İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2013, 97 s., Yüksek Lisans Tezi
- [36] URL: <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/mikroserit-yama-anten-ve-uygulama-alanlari/21949#ad-image-0>. [Erişim Tarihi 06-Mayıs-2020].
- [37] Kütük, Haydar. 3.3 GHz Mikroşerit Anten Tasarımı ve Farklı Besleme Yöntemleri İçin Analizi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 2012, 83 s., Yüksek Lisans Tezi
- [38] Ataş, İsa. Yüksek Kazançlı Mikroşerit Antenlerin HFSS ile Modellenmesi ve Tasarımı, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, 2019, 95s., Doktora Tezi
- [39] P. Ranjan, Dual-Band Square Patch Antenna for Bluetooth and WiMAX Applications, Intelligent Communication, Control and Devices, 2018, pp. 73–81.
- [40] Amin, Sunbel S. Çeşitli frekanslarda geniş band dairesel mikroşerit yama anten analizi ve tasarımı, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2011, 76 s., Yüksek Lisans Tezi
- [41] URL: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/microstrip-impedance-calculator>. [Erişim Tarihi: 06-Mayıs-2020].
- [42] Mishra, S. K., On estimation of the parameters of gielis superformula from empirical data, 2006.
- [43] Omar, A., Rashad, M., Al-Mulla, M., Attia, H., Naser, S., Dib, N., Shubair, R. M. Compact design of UWB CPW-fed-patch antenna using the superformula. In 2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), Aralık, 2016, (pp. 1-4)
- [44] URL: <https://pcbprototyping.com/product/the-eleven-lab-2/>. [Erişim Tarihi 02-Temmuz-2020].
- [45] URL: <https://signalhound.com/products/usb-sa124b/>. [Erişim Tarihi 02-Temmuz-2020].
- [46] Kaur, J., & Khanna, R., Co-axial fed rectangular microstrip patch antenna for 5.2 GHz WLAN application, Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2013, 1(3), 94-98.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Eda ULU

Doğum Yeri ve Yılı : İstanbul, 1995

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : eda.ul@cbu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : E.C.A Elginkan Anadolu Lisesi, 2013

Lisans :Sakarya Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2017

Yüksek Lisans :Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Devam Ediyor

Mesleki Deneyim

M.C.B.Ü. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Arş. Gör. 24.04.2018-(halen)

Yayınlar

Ulu, Eda, Bardak, Cemile. "Microstrip Patch Antenna Design Using The Super-Formula". 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, 12-13 Haziran, 2020, İstanbul