TÜRKİYE CUMHURİYETİ
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KONFORMAL YÜZEYLERE UYGUN MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIM VE ANALİZİ

Ayşe ÇODUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Danışman
Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

Temmuz, 2019

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KONFORMAL YÜZEYLERE UYGUN MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIM VE ANALİZİ

Ayşe ÇODUR tarafından hazırlanan tez çalışması 16.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Hamid TORPİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Peyman MAHOUTI, Üye
İstanbul Arel Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet KIZILAY sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Konformal Yüzeylere Uygun Mikroşerit Yama Anten Tasarım ve Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ayşe ÇODUR

İmza

Hep yanımda olan sevgili aileme...

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgilerini paylaşan, kendisine danışan her öğrencisini sabırla ve ilgiyle dinleyen, güler yüzünü, samimiyetini ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet KIZILAY'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez konusunun belirlenmesinden tezin son aşamasına gelene kadar yol gösteren, yoğun iş temposu arasında değerli zamanını ayırarak her fırsatta yardımcı olan, bilgisini, tecrübesini anlayışını ve sabrını esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Peyman MAHOUTI'ye teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında özellikle üretim, analiz ve ölçüm aşamalarında, faydalı olabilmek adına elinden gelenden fazlasını sunan, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren hocam Sayın Dr. Mehmet Ali BELEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana en büyük desteği ve morali veren, sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirip bugünlere getiren ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen bu hayattaki en büyük şansım olan aileme tamamlamış olduğum bu çalışmayı minnet duygularımla ithaf ediyorum.

Antenin üretim, analiz ve ölçümlendirme aşamalarında sunduğu olanaklar için Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Bölümü'ne teşekkür ederim.

Ayşe ÇODUR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ xi

ŞEKİL LİSTESİ xiii

TABLO LİSTESİ xv

ÖZET xvi

ABSTRACT xvii

1 Giriş 1

1.1 Literatür Özeti . . . 2
1.2 Tezin Amacı . . . 2
1.3 Hipotez . . . 2

2 Mikroşerit Antenlere Genel Bakış, Besleme Teknikleri ve Analiz Yöntemleri 4

2.1 Temel Anten Parametreleri . . . 5
2.1.1 Işıma Örüntüsü . . . 5
2.1.2 Anten Polarizasyonu . . . 6
2.1.3 Hüzme Genişliği . . . 7
2.1.4 Işıma Güç Yoğunluğu . . . 7
2.1.5 Işıma Şiddeti . . . 8
2.1.6 Yönlendiricilik . . . 8
2.1.7 Işıma Verimliliği . . . 8
2.1.8 Anten Yansıma Katsayısı . . . 9
2.1.9 Anten Kazancı . . . 9
2.1.10 Duran Dalga Gerilim Oranı (VSWR) . . . 9
2.1.11 Anten Etkin Alanı . . . 10
2.1.12 Giriş Empedansı . . . 10
2.1.13 Bant Genişliği . . . 11
2.2 Mikroşerit Antenlere Genel Bakış ve Tarihçesi . . . 12

2.3 Mikroşerit Antenlerin Üstünlükleri, Sınırlılıkları ve Kullanım Alanları . 13
2.4 Temel Bir Mikroşerit Dikdörtgen Yama Anten 15
2.5 Mikroşerit Antenlerde Besleme Teknikleri 16
2.5.1 Doğrudan (Temaslı) Besleme Teknikleri 16
2.5.2 Temassız Besleme Teknikleri 19
2.6 Mikroşerit Antenlerin Analiz Yöntemleri 21
2.6.1 İletim Hattı Modeli 21
2.6.2 Kavite Modeli 24

3 3B Baskı Teknolojisi ve 3B Yazıcılar 27
3.1 3B Baskı Teknolojisinin Kısıtları, Üstünlükleri ve Hammadde Seçimi . . 28
3.2 3B Baskı Teknikleri 28
3.2.1 Erimiş Birikim Modelleme (FDM) 30
3.2.2 PolyJet Modeli (MultiJet) 30
3.2.3 Seçici Lazer Sinterleme ve Eritme (SLS & SLM) 31
3.2.4 Tarayarak Işıkla Kürleme Tekniği (SLA) 32
3.2.5 Katı Zemin Kürleme (SGC) 32
3.2.6 Lamine Nesne Üretimi (LOM) 33
3.2.7 Elektron Işın Eritme (EBM) 34
3.2.8 Binder Jet – Renkli 3B Yazıcı (3D Printer) 34
3.3 3B Baskı Teknolojisinin Kullanım Alanları 35

4 3B Baskılı Düzlemsel Olmayan Mikroşerit Antenin Tasarım ve Üretim Aşamaları ile Uygulama Sonuçları 38
4.1 Tasarım ve Üretim 38
4.2 Uygulama Sonuçları 41

5 Sonuç ve Öneriler 44

Kaynakça 45

Tezden Üretilmiş Yayınlar 47

SİMGE LİSTESİ

σ	İletkenlik [S/m]
ϵ	Permitivite [F/m]
ϵ_0	Boşluğun Dielektrik Sabiti [F/m] ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$)
ϵ_r	Bağıl Dielektrik Sabiti [F/m]
ϵ_{reff}	Etkin Bağıl Dielektrik Sabiti [F/m]
ϵ_{r_1}	Birinci Dielektrik Tabakanın Bağıl Dielektrik Sabiti [F/m]
ϵ_{r_2}	İkinci Dielektrik Tabakanın Bağıl Dielektrik Sabiti [F/m]
μ_0	Boşluğun Manyetik Permeabilitesi [H/m] ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$)
μ_r	Dielektrik Tabakanın Manyetik Permeabilitesi [H/m]
λ	Dalga Boyu [m]
λ_0	Boşluğun Dalga Boyu [m]
λ_{eff}	Etkin Dalga Boyu [m]
Γ	Antenin Yansıma Katsayısı
θ	Yükseklik Açısı
ϕ	Azimut Açısı
ω	Açısal Frekans [rad/s] ($2\pi f$)
A_e	Anten Etkin Alanı [m^2]
BW	Bant Genişliği [Hz]
D	Anten Yönlendiriciliği
D_0 (D_{max})	Maksimum Anten Yönlendiriciliği [dB] ($10 \log D_0$)
e_0	Toplam Işıma Verimliliği ($e_{ref} e_c e_d$)
e_c	İletim Verimliliği
e_d	Dielektrik Verimliliği

e_r	Işıma Verimliliği ($e_c e_d$)
e_{ref}	Yansıma (Uyumsuzluk) Verimliliği ($1-\|\Gamma\|^2$)
$\vec{\mathbf{E}}$	Elektrik Alan Vektörü [V/m]
E_z	Elektrik Alan Bileşeni (z yönündeki)
f_0	Anten Çalışma Frekansı [Hz]
f_1 (f_2)	Antenin Alt (Üst) Çalışma Frekansı [Hz]
FNBW	İlk Sıfır Hüzme Genişliği
G	Anten Kazancı
G_0 (G_{max})	Maksimum Anten Kazancı [dB] ($10\log G_0$)
h	Dielektrik Tabaka Kalınlığı [m]
$\vec{\mathbf{H}}$	Manyetik Alan Vektörü [A/m]
E_x	Manyetik Alan Bileşeni (x yönündeki)
E_y	Manyetik Alan Bileşeni (y yönündeki)
E_z	Manyetik Alan Bileşeni (z yönündeki)
HPBW	Yarı (Yarım) Güç Hüzme Genişliği
$\vec{\mathbf{J}}$	Akım Yoğunluğu [A/m]
$\vec{\mathbf{J}}_b$	Yamanın Alt Kısmındaki Dielektrik Tabaka İçindeki Akım Yoğunluğu [A/m]
$\vec{\mathbf{J}}_t$	Yamanın Üstündeki Akım Yoğunluğu [A/m]
k	Dalga Sayısı [rad/m]
k_0	Boşluğun Dalga Sayısı [rad/m]
L	Yama Uzunluğu [m]
ΔL	Saçaklanma Uzunluğu [m]
L	Yamanın Etkin Uzunluğu [m]
$\hat{\mathbf{n}}$	Birim Normal Vektör
P_{rad}	Işıma Güç Yoğunluğu [W/m^2]
Q	Anten Kalite Faktörü
r	Uzaysal Noktalar Arası Mesafe [m]
R	Toplam Direnç [Ω]

R_a	Anten Direnci [Ω]
R_g	Kaynak Direnci [Ω]
R_L	Kayıp Direnci [Ω]
R_r	Işıma Direnci [Ω]
s	Yarık Genişliği [m]
S	Kapalı Yüzey Alanı [m^2]
t	Yama Kalınlığı [m]
U	Işıma Şiddeti (Yoğunluğu) [W/sr]
V_g	Kaynak Gerilimi [V]
v_0	Boşlukta Elektromanyetik Dalganın Hızı [m/s] ($v_0 = 3 \times 10^8$)
VSWR	Duran Dalga Gerilim Oranı (VSWR$\geq$ 1)
W	Yama Genişliği [m]
w_0	Besleme Hattının Genişliği [m]
ΔW	Saçaklanma Genişliği [m]
W	Yamanın Etkin Genişliği [m]
X_a	Anten Reaktansı [Ω]
X_g	Kaynak Reaktansı [Ω]
y_0	Besleme Hattının Uzunluğu [m]
Z_0 (Z_c)	İletim Hattının Karakteristik Empedansı [Ω]
Z_a (Z_{in})	Anten Giriş Empedansı [Ω]
Z_g	Kaynak Empedansı [Ω]

KISALTMA LİSTESİ

2B	2 Boyutlu
2D	2 Dimensional
3B	3 Boyutlu
3D	3 Dimensional
A	Amper
BW	Bant Genişliği
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
cm	santimetre
CPW	Coplanar Waveguide (Koplanar Dalga Kılavuzu)
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Avustralya Devlet Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Örgütü)
dB	Desibel
EBM	Electronic Beam Melting (Elektron Işın Eritme)
FDM	Fused Deposition Method (Erimiş Birikim Modelleme)
FNBW	First Null Beam Width (İlk Sıfır Hüzme Genişliği)
G-Kod	G-Code, Preparatory Codes (Geometrik Kod)
GHz	Giga Hertz
HPBW	Half-Power Beam Width (Yarı (Yarım) Güç Hüzme Genişliği)
Hz	Hertz
ISM Band	Industrial Scientific Medical Band (Sınai, Bilimsel ve Tıbbi Cihaz Bandı)
kg	kilogram
LOM	Laminated Object Manufacturing - Lamine Nesne Üretimi
m	metre

m^2	metrekare
MIC	Microwave Integrated Circuits (Mikrodalga Entegre Devreler)
mm	milimetre
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
PLA	Polar White (Poliaktik Asit)
PVA	Polivinil Alkol
rad	radyan
RepRap	Replicating Rapid Prototyper (Kendin Yap, Kendin Geliştir Projesi)
RF	Radyo Frekansı
S	Siemens
SGC	Solid Ground Curing (Katı Zemin Kürleme)
SLA	Stereo Lithography Apparatus (Tarayarak Işıkla Kürleme Tekniği)
SLM	Selective Laser Melting (Seçici Lazer Eritme)
SLS	Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
sr	steradyan
STL	STereoLithography (3B Nesnelerin Dosya Formatı)
V	Volt
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio (Duran Dalga Gerilim Oranı)
W	Watt

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Işıma örüntüsü 5
Şekil 2.2 Işıma örüntüsü çeşitleri 6
Şekil 2.3 Polarizasyon çeşitleri 6
Şekil 2.4 Yarı güç hüzme genişliği (HPBW) 7
Şekil 2.5 Antenin eşdeğer devresi 10
Şekil 2.6 Geri dönüş kaybı grafiğinde bant genişliğinin gösterimi 11
Şekil 2.7 Mikroşerit antenlerde kullanılan yama konfigürasyonları 13
Şekil 2.8 Temel bir mikroşerit dikdörtgen yama antenin yapısı 15
Şekil 2.9 Mikroşerit hat besleme yapısının şematik diyagramı 17
Şekil 2.10 Mikroşerit hat besleme türleri 17
Şekil 2.11 Anten konumuna göre mikroşerit hat besleme türleri 18
Şekil 2.12 Koaksiyel besleme yapısının şematik diyagramı 18
Şekil 2.13 Eş düzlemsel dalga kılavuzu besleme yapısının şematik diyagramı . 19
Şekil 2.14 Açıklık kuplajlı besleme yapısının şematik diyagramı 20
Şekil 2.15 Yakınlık kuplajlı besleme yapısının şematik diyagramı 21
Şekil 2.16 Mikroşerit hat yapısının şematik diyagramı 22
Şekil 2.17 Dielektrik tabaka içerisine gömülü mikroşerit hat şematik diyagramı 23
Şekil 2.18 Mikroşerit antenin fiziksel, etkin boyutları ve elektrik alan çizgileri . 23
Şekil 2.19 Kavite modeli şematik diyagramı 24
Şekil 2.20 Mikroşerit anten üzerindeki yük dağılımı ve akım yoğunluğu 25
Şekil 3.1 FDM çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar 30
Şekil 3.2 PolyJet çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar 31
Şekil 3.3 SLS & SLM çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar 31
Şekil 3.4 SLA çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar 32
Şekil 3.5 SGC çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar 33
Şekil 3.6 LOM çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar 33
Şekil 3.7 EBM çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar 34
Şekil 3.8 Binder Jet çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar 34
Şekil 3.9 2019'da Eindhoven kentinde 3B yazıcı ile üretilecek evlerin tanıtım görseli 35
Şekil 3.10 Airbus firması tarafından üretilen model uçak THOR 36

Şekil 3.11 Monash Üniversitesi tarafından 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş jet motoru 37
Şekil 4.1 Simülasyon programında tasarlanan anten modelinin üstten görünümü 39
Şekil 4.2 Simülasyon programında tasarlanan anten modelinin yandan görünümü 39
Şekil 4.3 Simüle edilen antenin 2.4 GHz'deki geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği . . 39
Şekil 4.4 Simüle edilen antenin 2.4 GHz'deki uzak alan kazanç grafiği 40
Şekil 4.5 CEL Robox® masaüstü 3B yazıcı ve mikro üretim platformu 41
Şekil 4.6 Yansımasız ortamda 3B baskılı anten prototipinin ölçümlerinin yapılması 41
Şekil 4.7 3B anten prototipinin yandan ve üstten görünümü 42
Şekil 4.8 3B baskılı antenin 2.4 GHz'deki geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiğinin ölçüm ve benzetim sonuçları 42
Şekil 4.9 3B baskılı antenin 2.4 GHz'deki uzak alan kazanç grafiği ölçüm ve benzetim sonuçları 43

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 3B Yazıcılarda Sıklıkla Kullanılan Hammaddeler ve Özellikleri . . . 29
Tablo 4.1 Antenin benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması . 43

ÖZET

Konformal Yüzeylere Uygun Mikroşerit Yama Anten Tasarım ve Analizi

Ayşe ÇODUR

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

Bu çalışmada, 3B baskı teknolojisi kullanılarak düşük maliyetli, yüksek kazançlı, düzlemsel olmayan mikroşerit yama anten tasarımı amaçlanmıştır. Bunun için, ilk olarak düzlemsel olmayan mikroşerit yama antenin 3B elektromanyetik tabanlı bir taslak modeli CST Microwave Studio® ortamında modellenmiştir.

Modelin simülasyon sonuçlarına göre, S_{11} geri dönüş kaybının -10 dB'den daha düşük olduğu 2.4 GHz frekans değerinde 7 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir. Bunun üzerine, simülasyon modelinin doğrulanması amacıyla anten tasarımı 3B baskı teknolojisi kullanılarak prototiplenmiştir. Uygulama sonuçlarına göre, ölçüm değerlerinin simülasyon sonuçlarıyla aynı doğrultuda olduğu görülmüştür.

Böylelikle, 3B baskı teknolojisindeki son gelişmelerle birlikte, ISM bandı gibi yaygın olarak kullanılan çalışma frekanslarında çalışabilecek, yüksek performans özelliklerine ve hızlı prototipleme süreçlerine sahip, düşük maliyetli düzlemsel olmayan mikroşerit antenlerin tasarım ve gerçekleştiriminin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 3B baskı, 3B yazıcı, mikroşerit anten, yama anten, düzlemsel olmayan anten

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABSTRACT

Microstrip Patch Antenna Design and Analysis for Conformal Surfaces

Ayşe ÇODUR

Department of Electronics Communication Engineering
Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

In this work, it is aimed to design a low cost, high gain non-planar microstrip patch antenna by using 3D printing technology has been studied. For this mean, firstly a 3D electromagnetic based model of the proposed non-planar microstrip antenna has been modelled in CST Microwave Studio® environment.

The simulation results of the model achieves a gain level of 7 dB with a S_{11} retun loss level of less than −10 dB at 2.4 GHz. Then for justification of the simulation model, the antenna design was prototyped using 3D printing technology. From the experimental results it can be said that the measured characteristics are in line with the simulated results.

Thus, with the recent development in the 3D printing technology, it is possible to design and realize non-planar microstrip antennas with very low cost and fast prototyping processes with high performance characteristics to operate at commonly used operation frequencies such as ISM band.

Keywords: 3D printing, 3D printer, microstrip antenna, patch antenna, non-planar antenna

1
Giriş

Mikroşerit, diğer ismiyle yama antenler[1][2] günümüzde yaygın olarak kullanılan antenler arasındadır. Düşük profilli olmaları, uygulandıkları yüzeye kolayca uyum sağlamaları, üretimlerinin kolaylığı, düşük üretim maliyetine sahip olmaları gibi üstünlükleri sayesinde son yıllarda uydu teknolojileri, uzaktan algılama sistemleri ve kablosuz haberleşme gibi pek çok uygulama alanında popüler hale gelmiştir. Ancak, dar bant genişliği, düşük kazanç, düşük güç kapasitesi gibi kısıtlar anten performansını düşürerek kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Günümüzde bu kısıtların etkisini azaltmaya ve anten performansını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Mikroşerit antenlerin tasarım ve analizlerindeki teknolojik gelişmelerle birlikte birçok araştırmacı çeşitli nümerik analiz yöntemleri geliştirerek mikroşerit antenlerin tasarım ve analizini farklı şekillerde gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, çeşitli alanlardaki türlü ihtiyaçlar için farklı geometrilere sahip birçok mikroşerit anten geliştirilmiştir.

Mikrodalga antenleri çeşitli yöntemlerle üretilebilir. Bu yöntemlerden biri, üç boyutlu (3B) yazıcılardır[3–7]. Son zamanlarda, homojen olmayan yansımalı dizi antenler[3], çok katmanlı silindirik dielektrik lens anten[4], iç mekan uygulamaları için quasi-Yagi[5], küresel dipol anten[6] ve X-band uygulamaları için horn anten[7] gibi tasarımların prototiplenmesi ve imal edilmesi için 3B baskı teknolojileri kullanılmıştır.

3B yazıcılar, günümüzde yoğun olarak kullanılan 2B yazıcılara alternatif olarak 3B baskıya izin veren cihazlardır. Çalışma mantığı olarak lazer veya mürekkep püskürtmeli (inkjet) 2B yazıcılara benzemelerine rağmen 3B yazıcılarda üretim eklemeli bir süreçtir ve bu süreç 'katmanlı üretim' olarak isimlendirilir[8][9].

Tasarım ve prototipleme süreçlerinde hızlı ve pratik olması, üretim maliyetlerinin geleneksel yöntemlere göre daha düşük olması gibi üstünlükleri, 3B baskı teknolojilerinin yaygınlaşmasını ve geliştirilmesini sağlamaktadır.

1.1 Literatür Özeti

3B baskı teknolojisi sağladığı kolaylıklar nedeniyle günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Tezin hazırlık aşamasında bu teknoloji kullanılarak üretilmiş antenlerin analizlerini barındıran çalışmalar incelenerek literatür taraması yapılmıştır. 3B teknolojisinin son kullanıcılara kadar ulaşması, akademik çalışmalarda da kullanılmasının yolunu açmıştır. Yapılan inceleme sonucunda 3B baskı teknolojisinin kullanıldığı çalışmaların diğer geleneksel üretim yöntemlerine göre daha pratik ve hızlı olduğu, üretim maliyetlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, 3B baskı teknolojisi kullanılarak düşük maliyetli, yüksek kazançlı, düzlemsel olmayan mikroşerit yama anten tasarımı amaçlanmaktadır. Düzlemsel olmayan mikroşerit antenin 3B elektromanyetik tabanlı bir taslak modelinin CST Microwave Studio® ortamında modellenecektir. Daha sonra, simülasyon modelinin doğrulanması ve sonuçların karşılaştırılması için Yıldız Teknik Üniversitesi RF ve Mikrodalga ArGe Laboratuvarı'nda anten tasarımı 3B yazıcı kullanılarak prototiplenecek ve ölçümleri yapılacaktır. Sonuç olarak simülasyon sonuçları ile prototipin uygulama sonuçları karşılaştırılacaktır.

1.3 Hipotez

Bu tez beş bölümden oluşmakta olup bölümler hakkında genel bilgiler aşağıda bulunmaktadır:

Bölüm 1: Bu bölümde, tez bölümlerinde detaylıca incelenen mikroşerit antenler, 3B baskı teknolojisi ve bu teknoloji ile üretilen anten çeşitleri hakkında kısa açıklamalar yapılmıştır.

Bölüm 2: Bu bölümde, temel anten parametreleri açıklanmış, mikroşerit yama antenlerin genel tanımı, tarihçesi, üstünlükleri, sınırlılıkları ve kullanım alanları anlatılmış, mikroşerit antenlerde besleme teknikleri ve mikroşerit yama antenlerin analiz yöntemleri incelenmiştir.

Bölüm 3: Bu bölümde, 3B baskı teknolojilerinin kullanım alanları, kısıtları, üstünlükleri ve kullanılacak materyal (hammadde) seçiminin önemi açıklanmış olup en yaygın 3B yazdırma teknikleri incelenmiştir.

Bölüm 4: Bu bölümde, tez konusu olan 3B baskılı düzlemsel olmayan mikroşerit antenin tasarım ve üretim aşamaları açıklanarak elde edilen analiz sonuçları

incelenmiştir. Üretimi ve ölçümleri Yıldız Teknik Üniversitesi RF ve Mikrodalga ArGe Laboratuvarı'nda yapılan antenin ölçülen değerleri simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 5: Bu bölümde, tezde elde edilen sonuçlara dayanarak varılan sonuçlar özetlenmiş ve planlanan çalışmalardan bahsedilmiştir.

2
Mikroşerit Antenlere Genel Bakış, Besleme Teknikleri ve Analiz Yöntemleri

Bu bölümde, temel anten parametreleri açıklanmış, mikroşerit yama antenlerin genel tanımı, tarihçesi, üstünlükleri, sınırlılıkları ve kullanım alanları anlatılmış, mikroşerit antenlerde besleme teknikleri ve mikroşerit yama antenlerin analiz yöntemleri incelenmiştir.

Anten, boşlukta yayılan elektromanyetik dalgaları toplayarak bir iletim hattı içerisinde elektriksel işaretlere çeviren veya bir iletim hattı içerisinden gelen elektriksel işaretleri boşluğa elektromanyetik dalga olarak yayan çift yönlü (resiprok) bir dönüştürücüdür. Antenler belirli bir alana odaklanabilen pasif cihazlardır[10].

Alıcı antenler boşlukta yayılan elektromanyetik dalgaları yakalayarak elektriksel işaretlere dönüştürürken verici antenler ise iletim hattından gelen elektriksel işaretleri elektromanyetik dalgalara çevirerek boşluğa yayar.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde önemli bir yere sahip olan antenler türlerine farklı kategoriler altında incelenebilir[11].

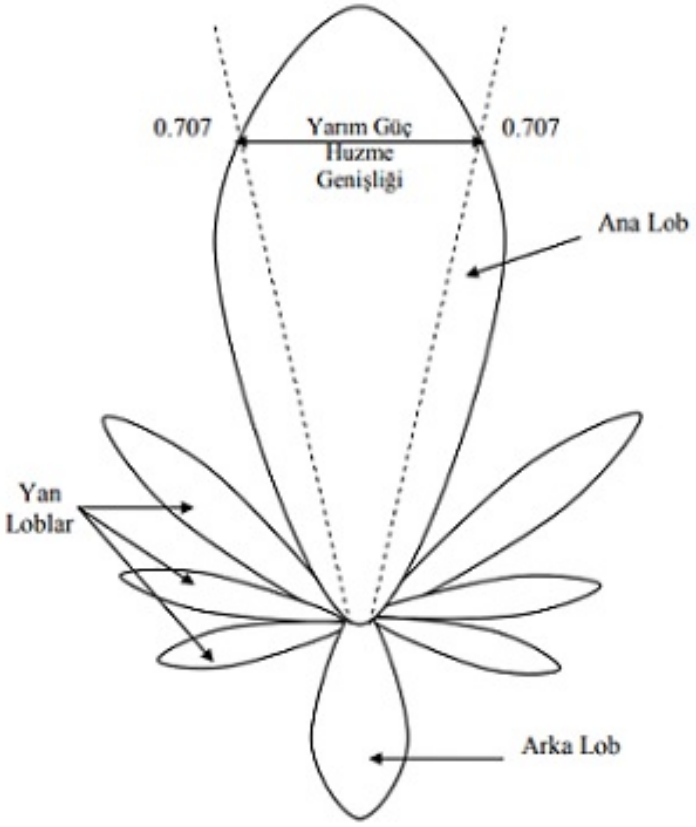
- Aktif entegre antenler
- Dizi antenler
- Dielektrik antenler (dielektrik rezonans antenler, vb.)
- Mikroşerit antenler (yama antenler, vb.)
- Tel antenler (dipol, halka antenler, vb.)
- Açıklık antenler (piramidal horn antenler, vb.)
- Reflektör antenler (parabolik çanak antenler, vb.)

2.1 Temel Anten Parametreleri

Bu bölümde anten performansını etkileyen temel parametreler açıklanmıştır.

2.1.1 Işıma Örüntüsü

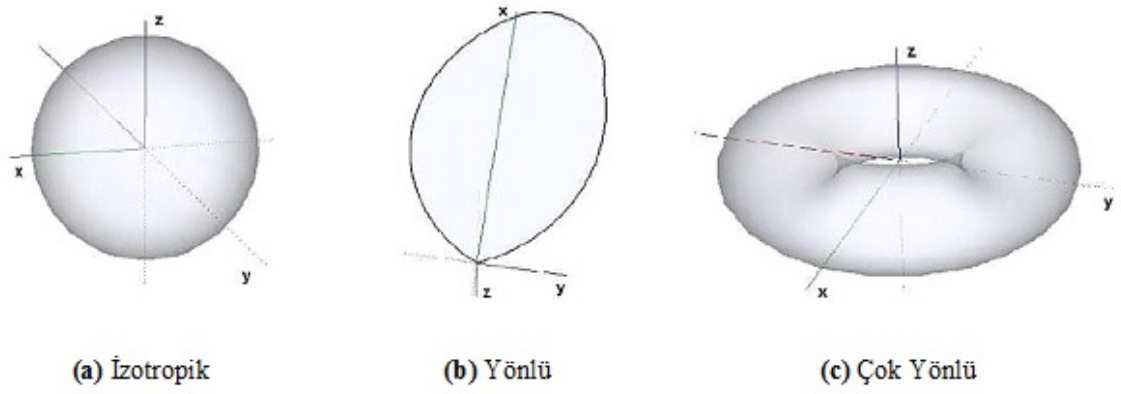
Işıma örüntüsü veya anten örüntüsü bir antenin yaydığı gücün (elektromanyetik alan şiddetinin) uzak alan bölgesinde oluşturmuş olduğu ve sabit bir uzaklıktaki açısal değişimini gösteren grafik ya da matematiksel ifadelerdir. Genellikle ışıma örüntüsü uzak alan bölgesinde belirlenir ve yön koordinatlarının bir fonksiyonu olarak ifade edilir[1]. Şekil 2.1'de bir antenin ana lob, yan loblar ve arka lobdan oluşan ışıma örüntüsü bulunmaktadır. Ana lob antenin ışıma yaptığı yönü gösterirken, arka lob ışıma yaptığı yönün ters yönünde oluşan lobdur. Yan loblar ise anten ışıma yaparken elektromanyetik dalgaların saçılımı ile oluşan istenmeyen yayılımlardır[12].



Şekil 2.1 Işıma örüntüsü

Işıma örüntülerini, şekillerine göre izotropik, yönlü ve çok yönü olmak üzere üç farklı gruba ayırmak mümkündür. İzotropik ışıma örüntüsü fiziksel olarak ulaşılamayan ideal bir kavram olup antenin kayıpsız olarak her yöne eşit yayılım yapan bir küre ile temsil edildiği bir kavramdır[1].

Yönlü (directional) ışıma örüntülerinde yayılım bir yöne odaklı olup bu durumda anten belirli yönde elektromanyetik dalgaları diğer yönlerden daha iyi alır ya da yayar. Çok yönlü (omni-directional) ışıma örüntülerinde anten, eksene açılı olarak değişen, eksende sıfıra düşen ve bir eksene dik olan her yöne eşit yayılım yapmaktadır. Şekil 2.2'de İzotropik, Yönlü ve Çok Yönlü ışıma örüntüleri gösterilmektedir[1].

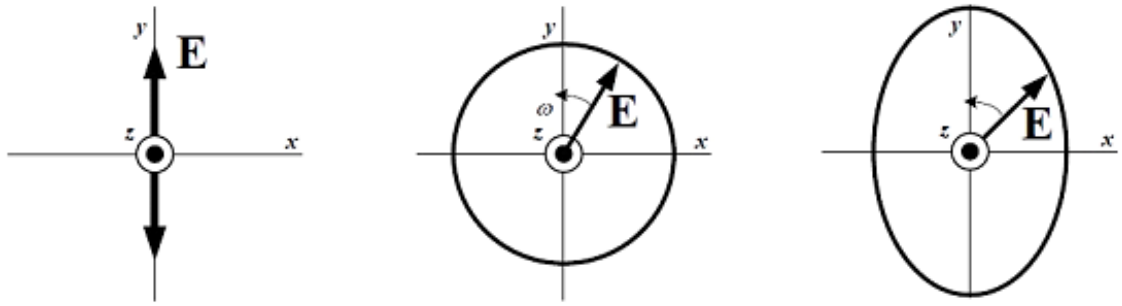


(a) İzotropik (b) Yönlü (c) Çok Yönlü

Şekil 2.2 Işıma örüntüsü çeşitleri

2.1.2 Anten Polarizasyonu

Anten polarizasyonu veya anten kutuplanması antenden yayılan elektrik alan vektörünün yönüne göre belirlenmektedir. Doğrusal (linear), dairesel (circular) ve eliptik (elliptic) olmak üzere üç tip polarizasyon bulunmaktadır.



(a) Doğrusal (b) Dairesel (c) Eliptik

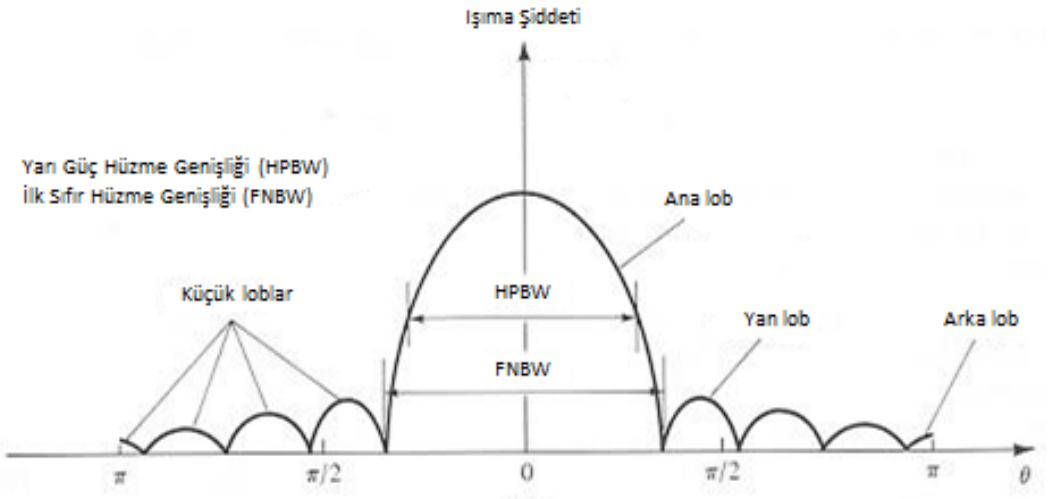
Şekil 2.3 Polarizasyon çeşitleri

Polarizasyon denkleminde yalnızca bir bileşen varsa doğrusal polarizasyon, bileşenler arasındaki faz farkı 90° olup katsayıları birbirine eşit iki bileşene sahip ise dairesel polarizasyon, bileşenleri arasındaki faz farkı 90° olup katsayıları farklı iki bileşene sahip ise eliptik polarizasyon olarak isimlendirilir. Doğrusal polarizasyonda elektrik alan bileşeni yeryüzüne paralel ise yatay polarizasyon, yeryüzüne dik ise

dikey polarizasyon olarak adlandırılır. Anten polarizasyon çeşitleri Şekil 2.3'te gösterilmektedir[1][12].

2.1.3 Hüzme Genişliği

Bir antenin hüzme genişliği, ışıma örüntüsünün maksimumunun her iki yanında bulunan özdeş noktalar arasındaki açısal genişliktir. Yarı güç hüzme genişliği (HPBW), Şekil 2.4'te gösterildiği üzere ışıma şiddetinin yarıya düştüğü ana lobun iki yanındaki noktalarından geçen vektörler arasındaki açıdır. İlk sıfır hüzme genişliği (FNBW) ise, ışıma örüntüsünün ilk sıfırları arasındaki açısal genişliktir[1]. İlk sıfır hüzme genişliği ile yarı güç hüzme genişliği arasında (FNBW/2 ≈HPBW) bağıntısı bulunur.



Şekil 2.4 Yarı güç hüzme genişliği (HPBW)

2.1.4 Işıma Güç Yoğunluğu

Bir anten tarafından yayılan elektromanyetik dalgaların oluşturduğu elektromanyetik alana eşlik eden güç ve enerjinin bulunduğu varsayılmaktadır. Poynting vektörü, elektromanyetik alana eşlik eden güç yoğunluğunun vektörüdür. Elektrik alan vektörü ile manyetik alan vektörünün vektörel çarpımı ile elde edilen Poynting vektörünün tüm yüzey üzerinden integralinin alınması ile yüzeyden geçen toplam anlık güç hesaplanır. Ortalama güç yoğunluğu Denklem 2.1'de matematiksel olarak ifade edilmiştir[1][12].

$$P_{rad} = \frac{1}{2} \oint_S Re(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*).ds \tag{2.1}$$

2.1.5 Işıma Şiddeti

Uzak alan parametrelerinden olan ışıma şiddeti, ışıma güç yoğunluğunun ölçümün yapıldığı nokta ile anten arasındaki uzaklığın karesi ile çarpılmasıyla elde edilir. Işıma şiddeti Denklem 2.2'de matematiksel olarak ifade edilmiştir[1].

$$U = \frac{r^2}{2} \oint_S Re(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*).ds \tag{2.2}$$

2.1.6 Yönlendiricilik

Bir antenin yönlendiriciliği, antenin maksimum ışıma yaptığı yöndeki ışıma şiddetinin aynı güçteki izotropik bir antenin aynı uzaklıkta oluşturduğu ortalama güç yoğunluğuna oranıdır. Kayıpsız antenlerde yönlendiricilik anten kazancına eşittir. Maksimum anten yönlendiriciliği gözlem noktasından bağımsız olup Denklem 2.3'te matematiksel olarak ifade edilmiştir[1][12].

$$D_{max} = D_0 = \frac{4\pi \times U}{P_{rad}} \tag{2.3}$$

2.1.7 Işıma Verimliliği

Bir antenle ilişkili olan birkaç verimlilik bulunmaktadır. Antenin toplam verimliliği hesaplanırken ilişkili olan tüm verimliliklerin de hesaplanması gerekmektedir. Kaynaktan çekilen gücün bir kısmı ısıl kayıp olarak harcanmaktadır. Işıma gücü ile kayıpların toplamı antenin kaynaktan çektiği güce eşittir. Bu kayıplar, iletim ve dielektrik kayıpları ve iletim hattı ile anten arasındaki uyumsuzluktan dolayı yansımalar nedeniyle oluşan kayıplardır. Kayıpların az olması anten verimliliğini arttırmaktadır. Antenin toplam ışıma verimliliği Denklem 2.4'te ifade edilmiştir[1].

$$e_0 = e_{ref} e_c e_d \tag{2.4}$$

Denklemde e_c iletim verimliliği, e_d dielektrik verimliliğidir. e_{ref} ise yansıma (uyumsuzluk) verimliliğidir ve $(1-|\Gamma|^2)$ ifadesi ile hesaplanır. e_c ve e_d değerlerinin hesaplama zorluğu nedeniyle antenin toplam verimliliği Denklem 2.5'teki şekilde hesaplanır[1].

$$e_0 = (1-|\Gamma|^2)e_{cd} = (1-|\Gamma|^2)e_r \tag{2.5}$$

2.1.8 Anten Yansıma Katsayısı

Anten yansıma katsayısı Γ, antenden geri dönen gerilimin antenin girişine gelen gerilimine oranıdır. Z_a veya Z_{in} antenin giriş empedansı olup Z_c veya Z_0 iletim hattının karakteristik empedansıdır. Antenin yansıma katsayısı Denklem 2.6'da ifade edilmiştir[1].

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_c}{Z_a + Z_c} \tag{2.6}$$

2.1.9 Anten Kazancı

Antenin performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri olan anten kazancı, antenin yönlendiriciliğinin ışıma verimliliği ile çarpımına eşittir. Antenin kazancının artması elektromanyetik dalganın yayılma mesafesini arttırmaktadır. Kayıpsız bir antende kazanç, yönlendiriliğe eşit olmaktadır. Anten kazancı Denklem 2.7'de ifade edilmiştir[1].

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \tag{2.7}$$

Desibel cinsinden ifade edilen anten kazancının dönüşüm formülü Denklem 2.8'de verilmiştir[1].

$$G_0(dB) = 10 \log_{10}[e_{cd} D_0] \tag{2.8}$$

2.1.10 Duran Dalga Gerilim Oranı (VSWR)

Anten besleme hattındaki maksimum gerilimin minimum gerilime oranıdır. İletim hattı ile anten arasında empedans uyumsuzluğunun olduğu durumlarda kaynaktan çekilen gücün tamamı anten tarafından yansıtılamadığı için bir kısmı iletim hattı üzerinden kaynağa geri dönmektedir. Geri dönen dalgalar ile iletim hattından gelen iletim dalgaları karşılaşarak duran dalga oluşmaktadır. Mükemmel empedans uyumu için duran dalga gerilim oranı 1:1 olmalıdır. Duran dalga gerilim oranı Denklem 2.9'daki eşitlik ile hesaplanır[1].

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{2.9}$$

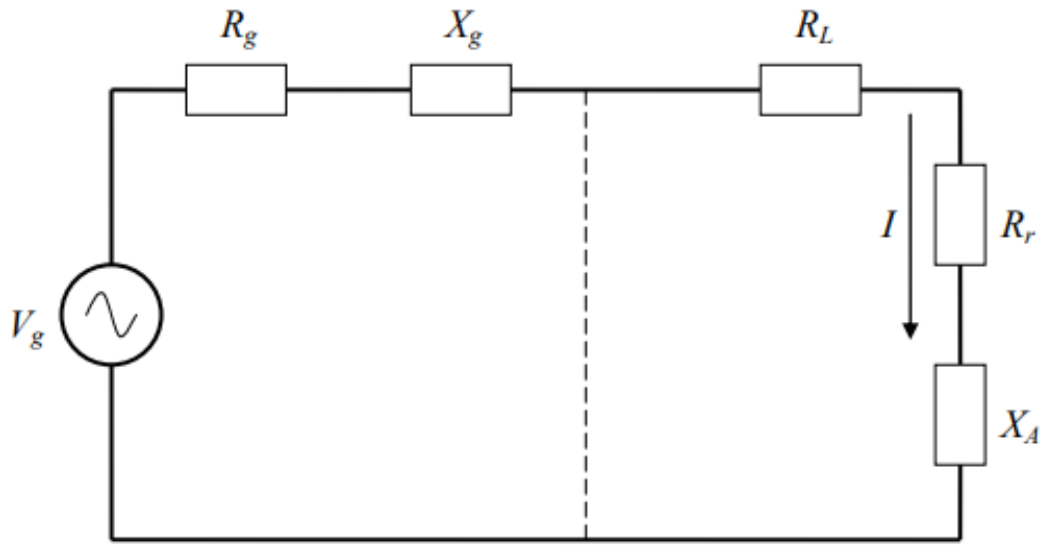
2.1.11 Anten Etkin Alanı

Bir kaynaktan yayılan elektromanyetik dalgalar uzaklık arttıkça bozularak güç kaybetmektedir. Uzak mesafelerden gelen elektromanyetik dalgaları yakalayabilmek için dalganın çarptığı yüzey genişletilmektedir. Alıcı durumdaki bir antene gelen gücün, gelen elektromanyetik dalganın ışıma güç yoğunluğuna oranı anten etkin alanını vermektedir. Bu parametre, antenin fiziksel boyutları ve şekli ile ilgilidir ve Denklem 2.10'daki eşitlik ile hesaplanır[1][12].

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \tag{2.10}$$

2.1.12 Giriş Empedansı

En temel ifade ile antenin giriş empedansı, besleme uçlarındaki gerilimin akıma oranıdır. Elektrik alan bileşenlerinin manyetik alan bileşenlerine oranı olarak da ifade edilebilir[1]. Anten direnci üzerindeki kayıpları mümkün olan ölçüde azaltarak verimliliği arttırabilmek için iletim hattının karakteristik empedansının anten empedansının karşılığı olarak seçilmesi diğer bir deyişle empedans eşleştirmenin yapılması gerekmektedir. Şekil 2.5'te antenin eşdeğer devresi gösterilmektedir[12].



Şekil 2.5 Antenin eşdeğer devresi

Yukarıdaki görselde R_L kayıp direnci (ohm), R_r ışıma direncini (ohm), X_a anten reaktansını (ohm), V_g kaynak çıkış gerilimini (volt), R_g kaynak direncini (ohm), X_g kaynak reaktansını (ohm) ifade etmektedir. Antenin kaynak empedansı (ohm) $Z_g = R_g + jX_g$, anten direnci ise $R_a = R_L + R_r$ ifadeleri ile elde edilir. Anten giriş empedansı ise Denklem 2.11 ile hesaplanır[1].

$$Z_a = R_a + jX_a \tag{2.11}$$

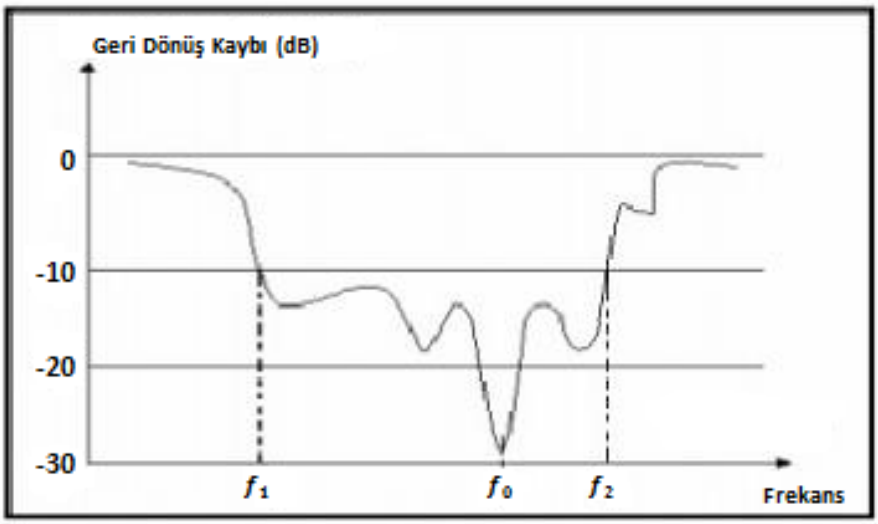
Antenin güç kaybı olmaksızın ışıma yapması için reel ve imajiner bileşenlerden oluşan anten giriş empedansı ile kaynak empedansın karmaşık kısımlarının birbirlerinin kompleks eşleniği olarak seçilmesi gerekmektedir. Maksimum güç iletiminin sağlanması için kaynak direncinin anten direncine eşit olması ($R_g = R_L + R_r$) ve kaynak reaktansı ile anten reaktansının kompleks eşlenik olması gerekmektedir ($jX_g = -jX_a$).

İletim hattında maksimum güç kapasitesi için ideal empedans değerinin 30 Ω, minimum kayıp için ise ideal empedans değerinin 77 Ω olduğu göz önünde bulundurulduğunda anten tasarımında giriş empedans değerinin iki değerin de ortalaması sayılan 50 Ω seçilmesi uygun bulunmaktadır[12].

2.1.13 Bant Genişliği

Belirli bir merkez çalışma frekansına sahip antenin bant genişliği, antenin çalışabileceği frekans aralığı anlamına gelmektedir. Antenin karakteristik özelliklerinin değişken olması nedeniyle ve uygulamaya bağlı olarak bant genişliği değişiklik göstermektedir[1].

Genel olarak antenin bant genişliği, Şekil 2.6'daki geri dönüş kaybı grafiğinde görüleceği üzere -10 dB'deki alt ve üst çalışma frekans değerleri arasındaki frekans aralığı olarak ifade edilir.



Şekil 2.6 Geri dönüş kaybı grafiğinde bant genişliğinin gösterimi

Antenden yansıma ölçüsü olan geri dönüş kaybının grafiğinde 0 dB değeri, tüm gücün yansıdığını ifade etmesi nedeniyle bant genişliğinin belirlenmesinde uygun

olmamaktadır. $-10\ dB$ değerinde ise, gücün %10'unun yansıdığı böylelikle %90'ının anten tarafından kabul edildiği anlamına gelmesi nedeniyle bant genişliğinin saptanmasında kullanılır. Antenin bant genişliği, Denklem 2.12 ile elde edilir[1].

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{f_2 + f_1}} \times 100\% \tag{2.12}$$

2.2 Mikroşerit Antenlere Genel Bakış ve Tarihçesi

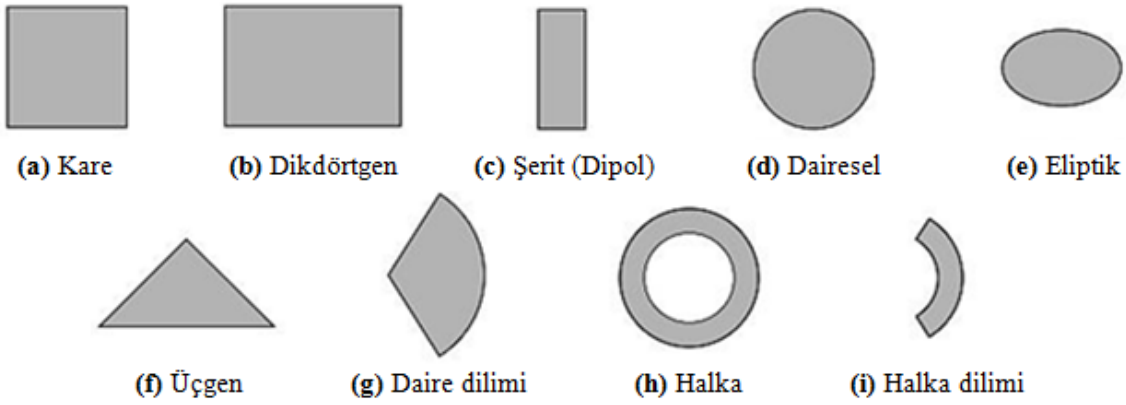
Mikroşerit, antenler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikroşerit antenler, hafifliği, uygulandığı yüzeye kolayca uyum sağlamaları, üretim kolaylığı ve maliyetinin düşük olması gibi özellikleri sayesinde son yıllarda mobil radyo ve kablosuz iletişim gibi pek çok uygulama alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanında dar bant genişliği, düşük kazanç, düşük güç kapasitesi gibi dezavantajları anten performansını düşürmekte ve kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Düşük profile sahip bu antenler, uçak ve roket şekillerinden insan vücuduna kadar düzlemsel ve düzlemsel olmayan yüzeylerde uygulanmaktadır.

Bir mikroşerit anten, uzunluğu , genişliği, giriş empedansı, kazancı ve ışıma örüntüsü ile karakterize edilmektedir. Mikroşerit anten parametreleri, besleme teknikleri ve analiz yöntemleri bu bölümde ele alınmıştır.

Genel yapı olarak bir mikroşerit anten, yamanın bulunduğu ışıma yapan iletken tabaka, orta kısımda bulunan dielektrik tabaka ve altta bulunan toprak tabaka olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır.

Mikroşerit antenlerin analiz edilmesi için çeşitli matematiksel modeller geliştirilerek uygulama alanları genişletilmiştir. Son yıllarda anten tasarımcıları tarafından birçok uygulamada tercih edilen mikroşerit antenlerde maksimum ışıma elde etmek amacıyla düşük dielektrik sabitine sahip dielektrik tabakalar kullanılmaktadır. Mikroşerit antenin uzunluğunun yarım dalga boyu olarak belirlenmesi ($L \approx \lambda/2$) durumunda antenin uzunluğu, antenin çalışma frekansıdır[1].

Işıma yapan iletken yama; kare, dikdörtgen, ince şerit (dipol), dairesel, eliptik, üçgen, daire dilimi, halka, halka dilimi veya başka herhangi bir şekilde olabilir. Mikroşerit antenlerde kullanılan yama konfigürasyonları Şekil 2.7'de gösterilmiştir[1]. Kare, dikdörtgen, dipol (şerit) ve dairesel yama konfigürasyonları; analiz ve üretim kolaylıkları, en önemlisi cazip ışıma ve düşük çapraz polarizasyon karakteristikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır.



Şekil 2.7 Mikroşerit antenlerde kullanılan yama konfigürasyonları

Işıma yapan mikroşerit eleman fikri ilk kez 1953 yılında Deschamps tarafından, daha sonra 1955 yılında da Gutton ve Baissinot tarafından patentlendirilmiştir. Howell ve Munson, bir mikroşerit yama anten üreten belgelenmiş ilk araştırmacılardır. Mikroşerit antenler, üretildikleri ilk zamanlar oldukça dar bant genişliğine sahip antenler oldukları için (%1 − 2) kablosuz haberleşme sistemleri için uygun görülmemekteydi. Sınırlılıklarına yönelik çalışmalar devam ederken mikroşerit antenlerin analiz ve modellenmesi için, iletim hattı modeli ve kavite (rezonatör) modeli isimli iki yöntem geliştirilmiştir. Bu analiz yöntemleri devrim niteliğinde olmasına rağmen her iki yöntem de mikroşerit anten performansını kesin olarak hesaplama bakımından yeterli değildi[13]. 1980'lerde mikroşerit antenler için tasarım ve analiz yöntemleri geliştirilmeye devam etmiş ve 1980'lerin sonunda sınırlılıkların büyük çoğunluğu ortadan kaldırılmıştır. Mikroşerit antenler için başta dairesel polarizasyon olmak üzere çeşitli polarizasyon yöntemleri de bu yıllarda incelenmiştir. 1990'lı yılların başından itibaren kablosuz haberleşme teknolojisi gibi ticari uygulamalarda mikroşerit antenler kullanılmaya başlanmıştır[14].

2.3 Mikroşerit Antenlerin Üstünlükleri, Sınırlılıkları ve Kullanım Alanları

Mikroşerit antenler, küçük boyutlara indirilebilen yapıları, uygulandığı yüzeylere kolayca uyum sağlamaları, entegre sistemlere uyumlu olmaları gibi özellikleri sayesinde pek çok uygulama alanında tercih edilmektedir. Mikroşerit antenlerin üstünlükleri aşağıda listelenmiştir[15]:

- Hafif ve düşük hacimli yapıları
- Düşük üretim maliyetleri
- Çoklu bantlarda ışıma yapabilmeleri

- Düzlemsel yapıları nedeniyle uygulandıkları yüzeylere ve entegre edildikleri sistemlere uyumlu olmaları
- Hem doğrusal hem de dairesel polarizasyonlu dalgalar yayınlayabilecek şekilde tasarlanabilmeleri
- Mikrodalga entegre devrelerle (MIC) verimli çalışabilmeleri
- Sağlamlıkları sayesinde sert yüzeylere bile entegre edilebilmeleri

Üstünlüklerine rağmen mikroşerit antenler, geleneksel antenlere kıyasla daha fazla sınırlılıklara sahiptir. Dar bant genişliği, düşük kazanç, düşük güç kapasitesi gibi kısıtlar anten performansını düşürmekte ve kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Mikroşerit antenlerin sınırlılıkları aşağıda listelenmiştir[15]:

- Dar bant genişliği
- Düşük verimlilik
- Düşük kazanç
- Düşük güç kapasitesi
- Yüzey dalgaları kaynaklı besleme hattı ve birleşim noktalarında istenmeyen sahte ışımalar

Mikroşerit antenler, diğer anten türlerine göre yüksek bir anten kalite faktörüne (Q) sahiptir. Antenin birleşim noktalarındaki kayıpları temsil eden (Q), dar bant genişliği ve düşük verimlilik gibi anten performansında istenmeyen sonuçlara neden olmaktadır. (Q) değerinin azaltılması için dielektrik tabakanın kalınlığının (h) arttırılması çözüm olarak önerilse de bu çözümü uygulamak her zaman olumlu sonuçlar vermemektedir. Tabaka kalınlığının arttırılması, kaynaktan iletilen toplam gücük yüzey dalgalarına dönüşmesine neden olmaktadır. Yüzey dalgalarının artması, yüksek miktarda saçılmalara, anten karakteristiklerinde bozulmalara, istenmeyen güç kayıplarına ve bant aralığının daralmasına neden olmaktadır. Düşük dieletrik sabitine (ϵ_r) sahip, optimum kalınlıktaki bir dielektrik tabakanın belirlenmesi verimliliği %90 oranında arttırabilmektedir[15].

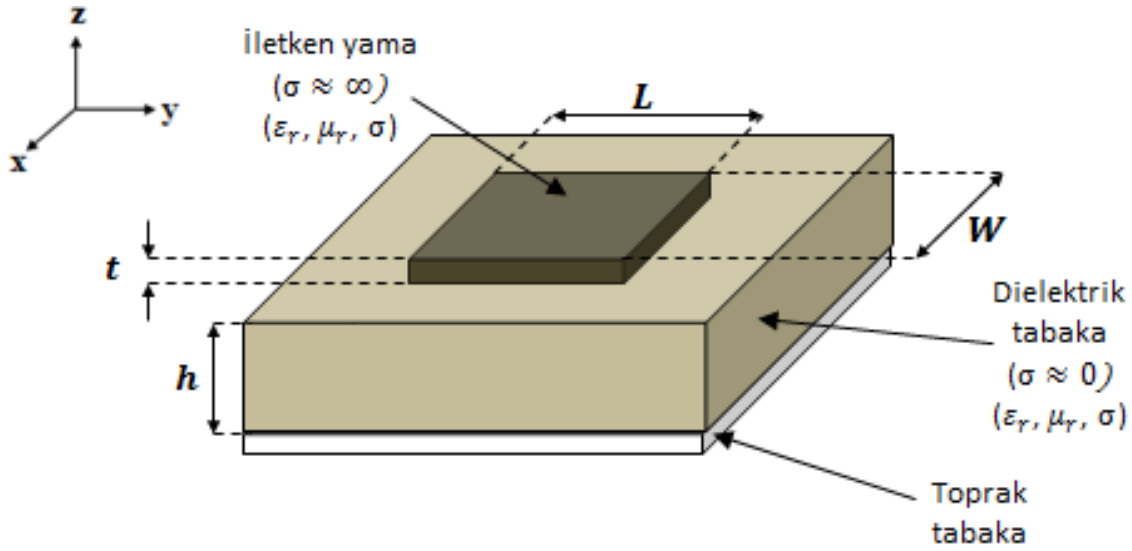
Uygulama alanları çok geniş olan mikroşerit antenlerin başlıca kullanım alanları aşağıda listelenmiştir[15]:

- Haberleşme ve televizyon uyduları

- Doppler ve diğer radarlar
- Radyo altimetreleri
- Komuta ve kontrol sistemleri
- Füze ve telemetri
- Uzaktan algılama
- Uydu navigasyon alıcıları
- Mobil radyo
- Entegre antenler
- Biyomedikal cihazlar ve hırsız alarmları

2.4 Temel Bir Mikroşerit Dikdörtgen Yama Anten

Temel bir mikroşerit dikdörtgen yama anten, yamanın bulunduğu ışıma yapan iletken tabaka, orta kısımda bulunan dielektrik tabaka ve en altta bulunan toprak tabaka olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır. Standart bir mikroşerit dikdörtgen yama antenin yapısı Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Temel bir mikroşerit dikdörtgen yama antenin yapısı

Mikroşerit dikdörtgen yama anten, uzunluk (L), genişlik (W) ve dielektrik tabaka kalınlığı (h) ile karakterize edilir. Altta bulunan toprak tabaka iletken olup mikroşerit antenin tek yönlü ışıma yapmasını sağlar.

Orta tabaka genellikle manyetik olmayan ($\mu_r = 1$), dielektrik malzeme olup bağıl dielektrik sabiti 2.5'den küçük seçilmelidir ($\epsilon_r < 2.5$)[1]. Bağıl dielektrik sabiti değerinin yüksek seçilmesi, saçak alanlarını (ΔL ve ΔW) çoğaltmaktadır[15]. Dielektrik tabakanın kalınlığı h, genellikle 0.05 mm ile 6.35 mm arasında bir değere sahip olup (0.05 $mm < h <$ 6.35 mm) bu tabakanın kalınlığı ve bağıl dielektrik sabiti, ışınım değerleri ve bant genişliği gibi anten parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Anten performansını artırmak için düşük bağıl dielektrik sabitine sahip, kalın dielektrik tabaka seçilmelidir[1].

Yamanın bulunduğu tabaka ise genelde altın, gümüş ya da bakır gibi metalden yapılmış, antenin ışıma yaptığı iletken tabakadır. Yamanın kalınlığı t, genellikle 0.035 mm ile 0.070 mm arasında bir değere sahiptir (0.035 $mm < t <$ 0.07 mm)[1].

2.5 Mikroşerit Antenlerde Besleme Teknikleri

Mikroşerit yama antenler farklı besleme tekniklerine sahiptir. Besleme tekniği, antnin giriş empedans eşleştirmesinin iyileştirmesinde önemli bir role sahiptir. Besleme teknikleri, doğrudan (temaslı) besleme ve temassız besleme olarak iki ana başlık altında incelenebilir[1].

2.5.1 Doğrudan (Temaslı) Besleme Teknikleri

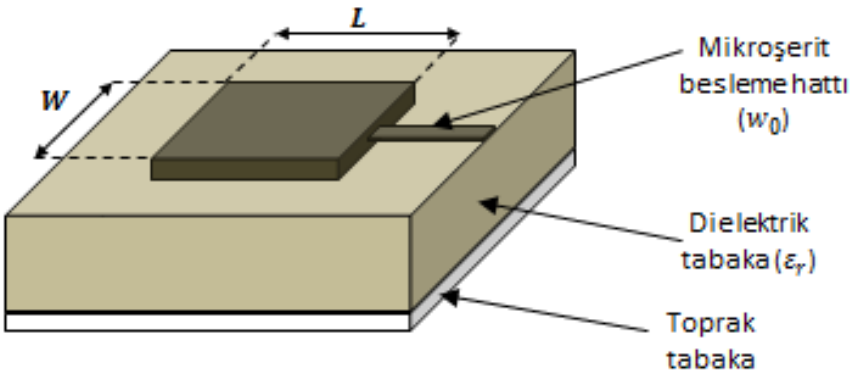
Doğrudan besleme tekniklerinde, elektriksel enerjinin taşındığı iletim hattı doğrudan anten yamasına bağlıdır. Mikroşerit hat besleme, koaksiyel besleme ve eş düzlemsel dalga kılavuzu besleme sıklıkla kullanılan doğrudan besleme teknikleridir.

2.5.1.1 Mikroşerit Hat Besleme

Antenin yaması ile aynı yüzey üzerinde bulunan besleme hattı yamanın bir kenarına doğrudan bağlıdır.

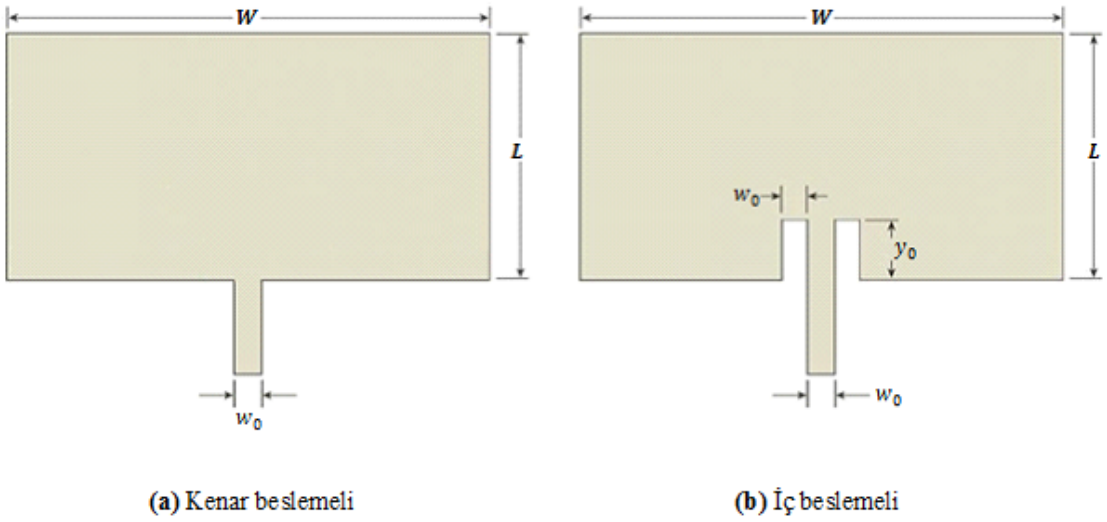
Şekil 2.9'da mikroşerit hat besleme yapısı gösterilmektedir. Genişliği w_0 olan mikroşerit besleme hattı, L uzunluğuna ve W genişliğine sahip dikdörtgen yama ile doğrudan temas halindedir. Bu konfigürasyona sahip antenlerde dielektrik tabakanın kalınlığının artması, yüzey dalgalarından kaynaklanan sahte ışımaları arttırdığı için bant genişliğini sınırlamaktadır[1][12].

Mikroşerit hat besleme tekniğinde, besleme hattı, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi kenar beslemeli, iç beslemeli gibi farklı şekillerde olabilir. Kenar besleme tekniğinde besleme hattı yamanın kenarına doğrudan bağlıyken iç besleme tekniğinde besleme hattı



Şekil 2.9 Mikroşerit hat besleme yapısının şematik diyagramı

besleme hattı y_0 değeri kadar yamanın içerisine yerleştirilmiştir.



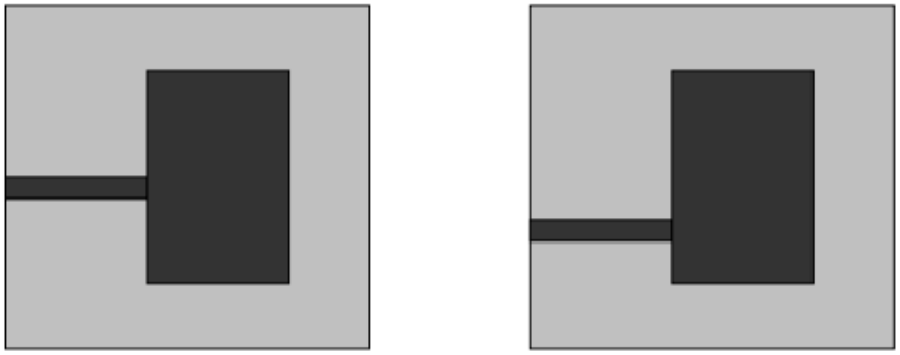
Şekil 2.10 Mikroşerit hat besleme türleri

Besleme hattının yama ile temas ettiği konuma göre merkezi ve merkez dışı besleme olarak ikiye ayrılır. Besleme hattı yamanın ortasından bağlanır ise merkezi besleme olarak adlandırılır. Besleme hattının konumunun değişmesi antenin çalışma frekansını etkilemektedir. Şekil 2.11'de anten konumuna göre mikroşerit hat besleme şekilleri gösterilmektedir[12].

Kenar beslemeli yamaların diğer besleme tekniklerine göre avantajları bulunmaktadır. Besleme hattı ve yama tek bir yüzeye kazınabildiği için üretim kolaylığı sağlamaktadır. Kenar beslemeli yama antenler giriş empedansına kolay uyumlanabilir[16].

2.5.1.2 Koaksiyel Besleme

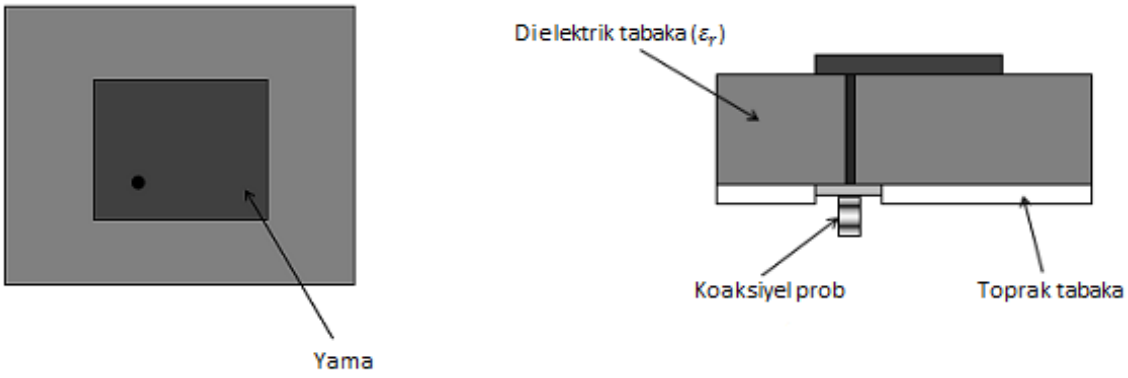
Koaksiyel besleme, koaksiyel kablonun içindeki iletken ucunun antenin ışıma yaptığı yamaya, diğer ucunun ise topraklama için kullanılan toprak tabakaya bağlanması



(a) Merkezi **(b)** Merkez dışı

Şekil 2.11 Anten konumuna göre mikroşerit hat besleme türleri

ile gerçekleştirilir. Şekil 2.12'de bu konfigürasyonu temsil eden şematik diyagram gösterilmektedir.



(a) Üstten Görünüm **(b)** Yandan Görünüm

Şekil 2.12 Koaksiyel besleme yapısının şematik diyagramı

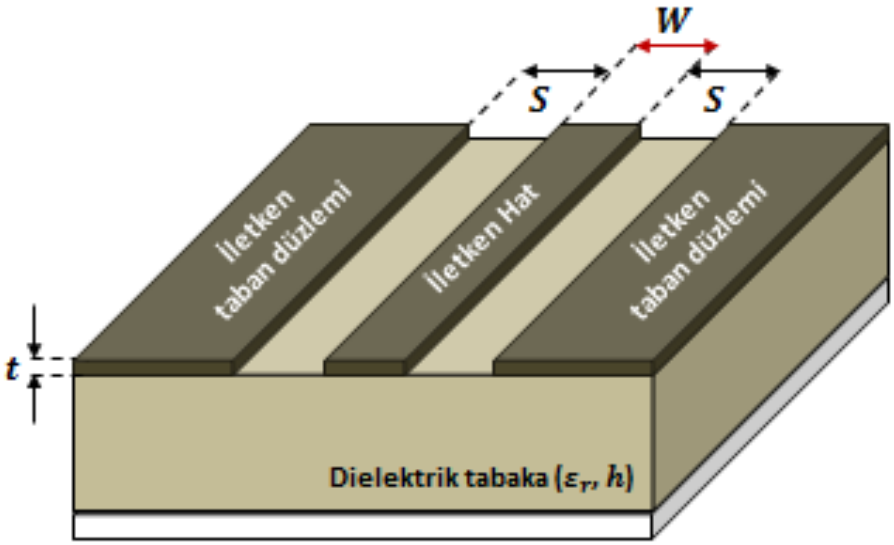
Koaksiyel besleme, üretim ve empedans eşleştirmede kolaylık sağladığı gibi yüzey dalgalarından kaynaklanan istenmeyen sahte ışımaların da az olması gibi avantajlara sahiptir. Koaksiyel besleme tekniğinin kullanıldığı antenler dar bantlıdır ve dielektrik tabakanın kalınlığı arttıkça modelleme zorlukları ve istenmeyen ışımaların artması gibi dezavantajlara da sahiptir.

2.5.1.3 Eş Düzlemsel Dalga Kılavuzu Besleme

Eş düzlemsel dalga kılavuzu besleme (CPW), baskı devre teknolojisi ile üretilebilen, mikrodalga sinyalleri iletmek için düzlemsel iletim yapısını kullanan bir iletim hattıdır.

Bir dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş iki adet iletken taban düzlemi ile ortalarına yerleştirilmiş iletken bir hattan oluşmaktadır. Bu konfigürasyon düzlemsel bir yapı

sağlamaktadır. Bu besleme tekniğinde, merkezde W genişliğinde iletken bir hat ve bu hattın iki yanında S genişliklerinde yarıklar bulunmaktadır[1]. Şekil 2.13'te eş düzlemsel dalga kılavuzu besleme yapısının şematik diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 2.13 Eş düzlemsel dalga kılavuzu besleme yapısının şematik diyagramı

Eş düzlemsel dalga kılavuzu besleme tekniği geniş bantta çalışmayı desteklemesi ve iki hat arasında kuplaj etkisi oluşturması nedeniyle tercih edilmektedir.

2.5.2 Temassız Besleme Teknikleri

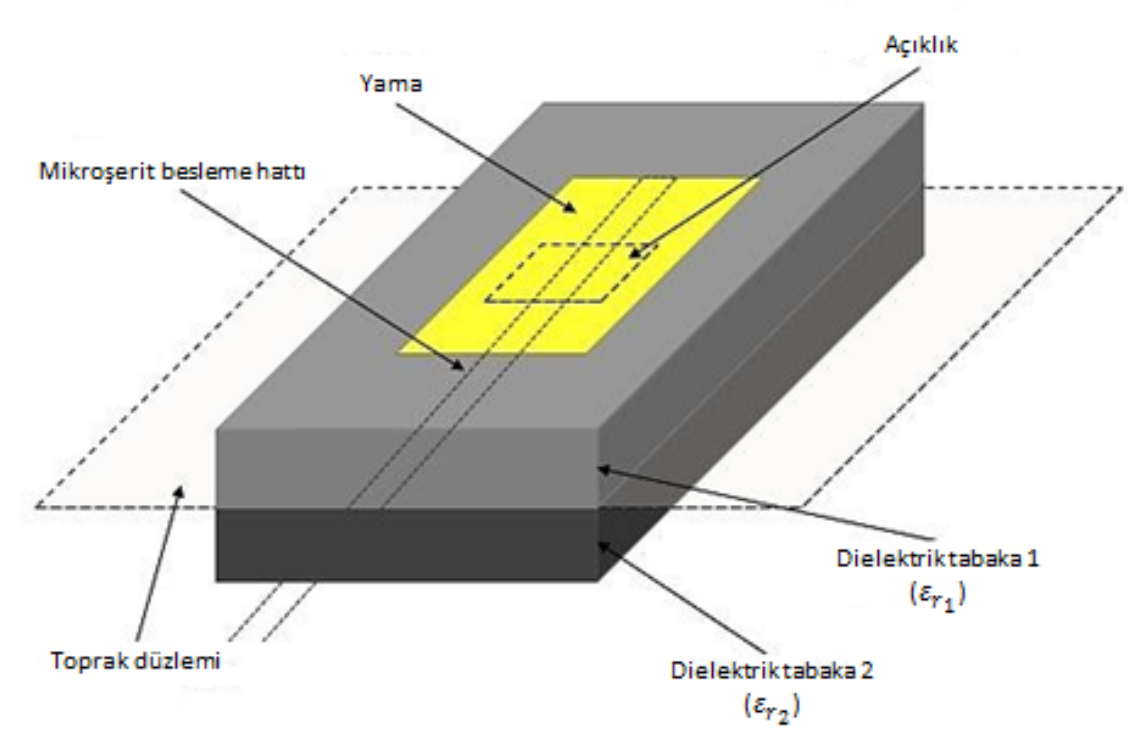
Temassız besleme tekniklerinde, elektrik enerjisinin taşındığı iletim hattı ile ışıma yapan yama arasında enerji iletimi elektromanyetik alan kuplajı ile sağlanır. Açıklık kuplajlı besleme ve yakınlık kuplajlı besleme sık kullanılan temassız besleme teknikleridir.

2.5.2.1 Açıklık Kuplajlı Besleme

Açıklık kuplajlı besleme yapısı, bir toprak düzlemi tarafından ayrılan iki farklı dielektrik tabakadan oluşmaktadır. Toprak düzlemi mikroşerit besleme hattı ile ışıma yapan iletken yama arasına yerleştirilmiştir. Besleme hattı alttaki dielektrik tabaka üstüne yerleştirilmiştir ve enerji, toprak düzlem üzerindeki açıklık aracılığıyla yamaya iletilir[12].

Genellikle üstteki dielektrik tabaka düşük, alttaki dielektrik tabaka ise yüksek bağıl dielektrik sabitine sahip malzemelerden seçilir[1]. Açıklık kuplajlı besleme tekniğinin şematik diyagramı Şekil 2.14'te gösterilmektedir.

Bu besleme tekniğinde toprak düzlemi, besleme hattını ışıma yapan yamadan



Şekil 2.14 Açıklık kuplajlı besleme yapısının şematik diyagramı

izole ederek polarizasyonun saflığını arttırır ve yüzey dalgalarından kaynaklanan istenmeyen sahte ışımaların etkisini azaltır[15].

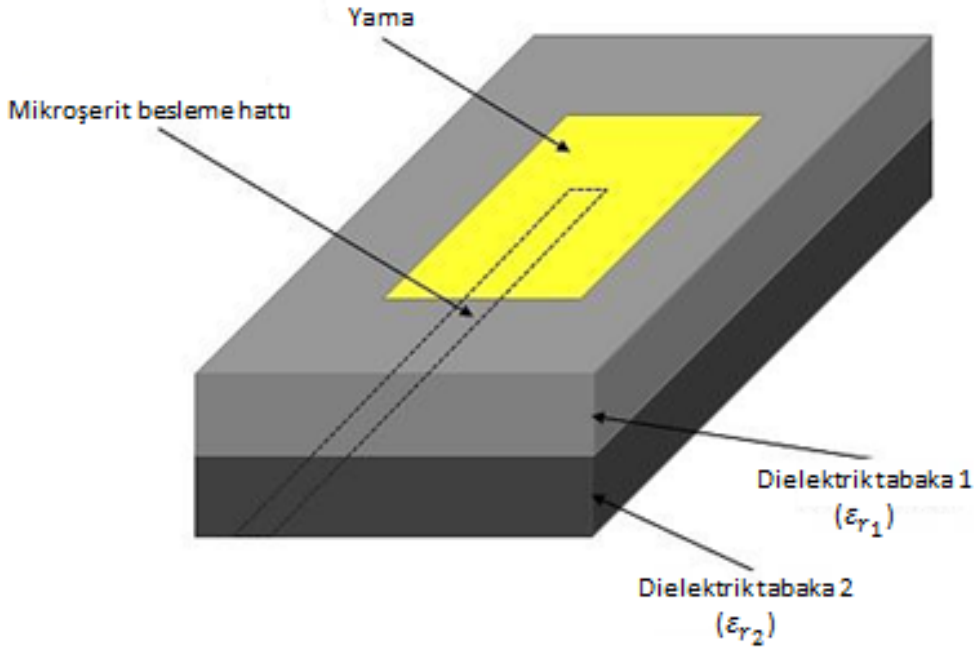
Tasarım parametrelerinin fazlalığı, anten tasarımcısı için esneklik ve serbestlik sağlarken üretimin zor olmasına neden olmaktadır. Doğrudan besleme tekniklerinde olduğu gibi bu besleme tekniğinde de bant aralığı dardır[1].

2.5.2.2 Yakınlık Kuplajlı Besleme

Yakınlık kuplajlı besleme tekniğinde mikroşerit besleme hattı, iki dielektrik tabakanın arasına yerleştirilmiş olup yama, üstteki dielektrik tabakanın üzerinde yer alır.

Toprak tabaka ise açıklık kuplajlı besleme tekniğinin aksine alttaki dielektrik tabakasının altında bulunmaktadır. Işıma yapan yama, besleme hattı ile temas etmemektedir[12]. Şekil 2.15'te yakınlık kuplajlı besleme tekniğinin şematik diyagramı gösterilmektedir.

Yakınlık kuplajlı besleme tekniği, yüzey dalgalarından kaynaklanan sahte ışımaları en aza indirmesi ve çok yüksek bant genişliği sunması gibi avantajlara sahip olmasına rağmen bu besleme tekniğine sahip mikroşerit antenlerin tasarım ve üretim aşamalarındaki güçlükler anten tasarımcılarını zorlamaktadır[15].



Şekil 2.15 Yakınlık kuplajlı besleme yapısının şematik diyagramı

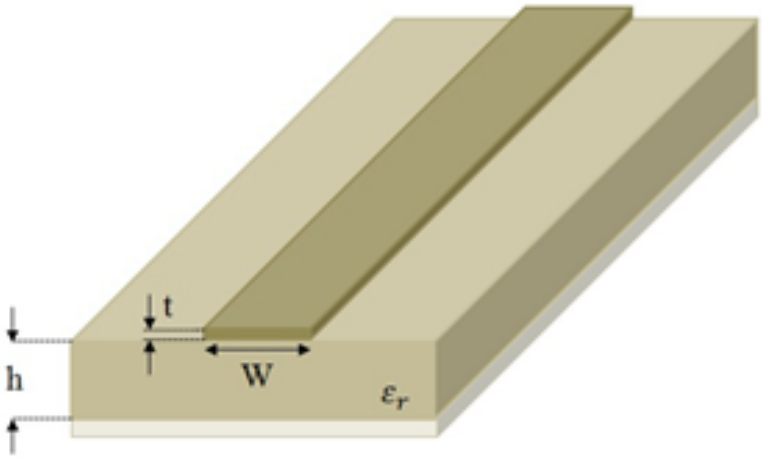
2.6 Mikroşerit Antenlerin Analiz Yöntemleri

Mikroşerit yama antenlerin analizi farklı analiz yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. İletim hattı modeli, kavite modeli ve tam dalga modeli en çok kullanılan analiz yöntemlerindendir. Kare ve dikdörtgen yapıların analizinde kullanılan iletim hattı modeli en basit analiz yöntemidir. Anten parametrelerinin deneye dayalı formüller ile elde edilmesi nedeniyle doğruluk payı düşüktür. Kavite modeli, daha hassastır ve daha güvenilir sonuçlar elde etmeyi sağlar. Ancak iletim hattı modeline göre daha karmaşıktır. Tam dalga modeli son derece hassastır, kesin sonuç verir ve uygulama alanları oldukça geniştir. Ancak iletim hattı ve kavite modellerine kıyasla karmaşık modellerdir[17]. Bu çalışmada kullanılmaması nedeniyle tam dalga modeli ayrı bir başlık altında incelenmemiştir.

2.6.1 İletim Hattı Modeli

İletim hattı modelinde, W genişliğine, L uzunluğuna ve h yüksekliğine sahip dikdörtgen mikroşerit yama anten, iki ucunda ışıma yarıkları bulunan, düşük empedanslı (Z_c), L uzunluğundaki bir iletim hattı ile temsil edilir[1]. İletim hattı modeli genellikle mikroşerit antenin fiziksel parametrelerinin hesaplamasında kullanılır. Şekil 2.16'da iletim hattı modelini temsil eden mikroşerit hat yapısına ait şematik diyagram bulunmaktadır.

İletim hattı modelinde mikroşerit anten eşdeğer bir devre yardımı ile analiz



Şekil 2.16 Mikroşerit hat yapısının şematik diyagramı

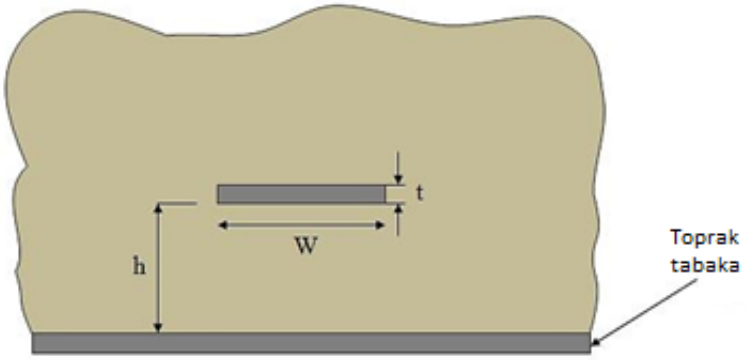
edilmektedir. Bu modelde,

- Çalışma frekansı, f_0
- Yama genişliği, W
- Yama uzunluğu, L
- Boşlukta elektromanyetik dalganın hızı, $v_0 = 3 \times 10^8 m/s$
- Dielektrik tabakanın kalınlığı, h
- Boşluğun dielektrik permitivitesi, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$
- Boşluğun manyetik permeabilitesi, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$
- Dielektrik tabakanın bağıl dielektrik sabiti, ϵ_r

olmak üzere yama genişliği Denklem 2.13 aracılığı ile elde edilir[1].

$$W = \frac{v_0}{2f_0}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \tag{2.13}$$

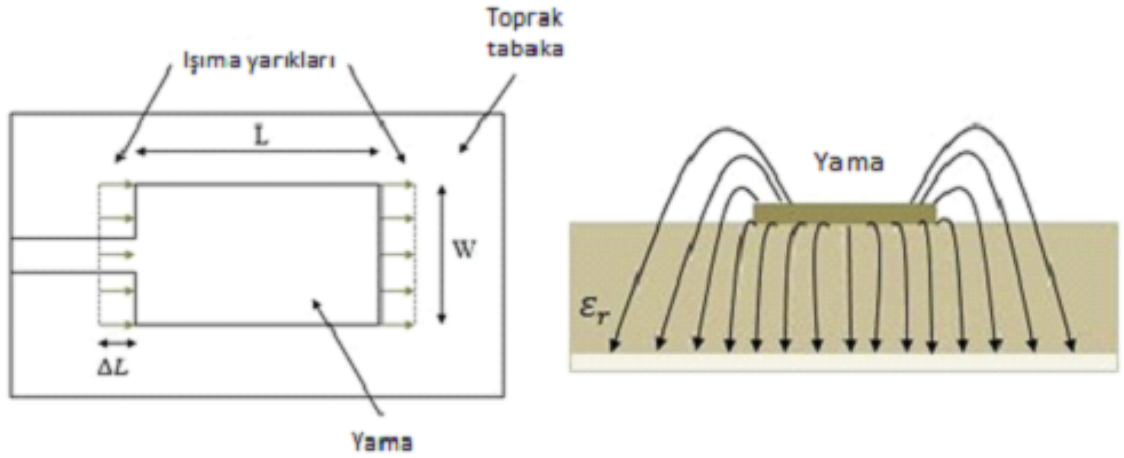
Mikroşerit antenlerde ışıma yapan yama, alt yüzeyde dielektrik tabaka ve üst yüzeyde hava bulunması nedeniyle homojen olmayan bir yapıdadır. Bu durum, elektriksel geçirgenlik değerinin farklı olmasına neden olur. Dielektrik tabakanın etkin bağıl dielektrik sabitini elde etmek için yamanın dielektrik içerisine Şekil 2.17'deki gibi gömülü olduğu varsayılır. Denklem 2.14 ile dielektrik tabakanın etkin bağıl dielektrik sabiti hesaplanır[1].



Şekil 2.17 Dielektrik tabaka içerisine gömülü mikroşerit hat şematik diyagramı

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} [1 + 12\frac{h}{W}]^{-1/2} \tag{2.14}$$

Saçaklanma etkisi nedeniyle mikroşerit yama antenin fiziksel boyutları olduğundan daha uzun (L_{eff}) ve daha geniş (W_{eff}) görünür[1]. Şekil 2.18'de mikroşerit yama antenin fiziksel ve etkin boyutları ile oluşan elektrik alan çizgileri gösterilmektedir.



(a) Üstten görünüm **(b)** Yandan görünüm

Şekil 2.18 Mikroşerit antenin fiziksel, etkin boyutları ve elektrik alan çizgileri

Dielektrik tabakanın bağıl dielektrik sabiti saçaklanma alanlarını ΔL ve ΔW çoğaltır ve bu durum ışımayı etkileyen faktörlerden biridir[18]. Saçaklanma alanlarından dolayı yamanın etkin boyutları fiziksel boyutlarından farklıdır. Fark uzunluk değeri ΔL, Denklem 2.15 ile, fark genişlik değeri ΔW ise, Denklem 2.16 ile elde edilir. Genellikle ΔW değeri hesaplamalarda ihmal edilir.

$$\Delta L = 0.412 \times h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3)(\frac{W}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{reff} - 0.258)(\frac{W}{h} + 0.8)} \tag{2.15}$$

$$\Delta W = 0.44 \times h \tag{2.16}$$

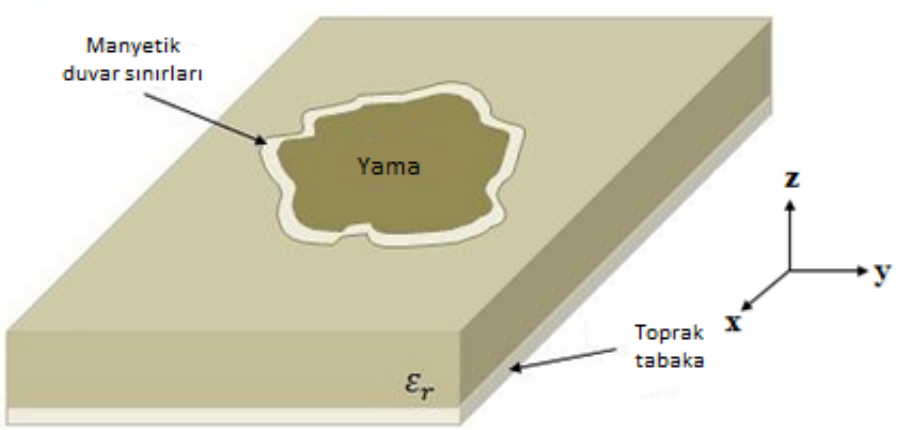
Yamanın etkin uzunluğu L_{eff} ve etkin genişliği W_{eff} sırasıyla Denklem 2.17 ve Denklem 2.18 ile elde edilir.

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \tag{2.17}$$

$$W_{eff} = W + 2\Delta W \tag{2.18}$$

2.6.2 Kavite Modeli

Kavite modeli aynı zamanda rezonatör modeli olarak da bilinmektedir. Mikroşerit yama antenler, kayıplı rezonatör olarak da adlandırılabilinen dar bantlı antenlerdir[19]. Kavite modeli, iletken yama ile toprak tabaka arasındaki bölgenin iletken kenarları boyunca Şekil 2.19'daki gibi manyetik bir duvar tarafından sınırlandırılan rezonans boşluğu olduğu varsayımına dayanmaktadır[18].



Şekil 2.19 Kavite modeli şematik diyagramı

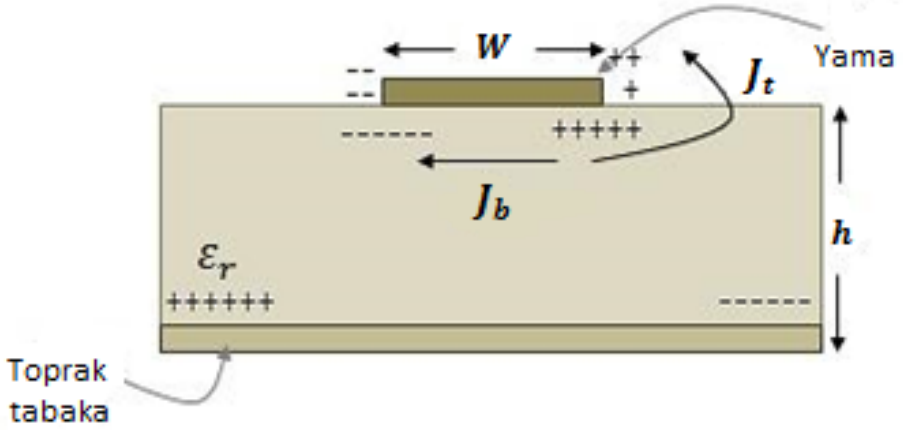
Manyetik duvar tarafından sınırlandırıldığı varsayımı ince dielektrik tabaka için aşağıdaki gözlemlere dayanmaktadır[18]:

- Dielektrik tabaka çok ince ($h \ll \lambda_0$) olduğu için iç bölgedeki alanlar z ile değişmez ($\partial/\partial z = 0$)
- Elektrik alan z yönündedir (E_z) ve manyetik alan, ışıma yapan yama ile toprak tabaka arasında sınırlandırılan bölgede yalnızca enine bileşenlere sahiptir. (H_x, H_y)

- Mikroşerit yama antendeki elektrik akımı, herhangi bir noktada ışıma yapan yamanın kenarına normal olacak şekilde bir bileşen içermez. ($\partial E_z / \partial \hat{n} = 0$)

Kavite modeli, ışıma yapan yamanın kenarlarında oluşan saçak alanlarını hesaba katacak şekilde mikroşerit anten analizi yapma konusunda oldukça başarılıdır[18]. Kavite alanının hesaplanmasından önce kavite mekanizması incelenmiştir.

Çekim kuvveti, ışıyan yama ile toprak tabaka üzerindeki zıt yükler arasında olup yamanın altında bulunan dielektrik tabaka içerisinde $\vec{J}_b$ akım yoğunluğu yaratır. İtme kuvveti ise, benzer yükler arasındadır. Işıyan yamanın alt kısmındaki yükleri yamanın kenarlarından üst kısmına doğru itme eğilimindedir. Bu kuvvet, Şekil 2.20'de gösterildiği gibi $\vec{J}_t$ akım yoğunluğunu oluşturur[1].



Şekil 2.20 Mikroşerit anten üzerindeki yük dağılımı ve akım yoğunluğu

Boşluk içerisinde bulunan alan E_z, H_x ve H_y olmak üzere üç alan bileşenine sahiptir. Buna göre,

- Dalga sayısının karesi, $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r$,
- Besleme hattı ile ışıma yapan yamayı besleyen elektrik akım yoğunluğu $\vec{\mathbf{J}}$,
- Işıyan yama düzlemine normal birim vektörü $\hat{\mathbf{z}}$,

olarak kabul edildiğinde mikroşerit antenin elektromanyetik dalga denklemi Denklem 2.19 ve Denklem 2.20'de gösterildiği şekilde yazılabilir[18].

$$\nabla \times \nabla \times \vec{\mathbf{E}} - k^2 \vec{\mathbf{E}} = -j\omega\mu_0 \vec{\mathbf{J}} \tag{2.19}$$

$$\nabla^2 E_z \times k^2 E_z = -j\omega\mu_0 \hat{\mathbf{z}} \cdot \vec{\mathbf{J}} \tag{2.20}$$

Dalga denklemi ile birlikte elektrik ve manyetik alanlar Denklem 2.21 ve 2.22'de bulunan sınır koşullarını da sağlamalıdır. Üstte ve altta bulunan iletken tabakaların elektrik alanı Denklem 2.21'deki gibi, manyetik duvarlardaki manyetik alan ise Denklem 2.22'deki gibi olmalıdır[18].

$$\hat{\mathbf{n}} \times \vec{\mathbf{E}} = 0 \tag{2.21}$$

$$\hat{\mathbf{n}} \times \vec{\mathbf{H}} = 0 \tag{2.22}$$

Tek kutuplu (monopol) bir anten için toprak tabakanın sonsuz boyutta olması gerekir ancak küçük boyutlu toprak tabaka istenmesi nedeniyle bunun uygulanması mümkün değildir. Toprak tabakanın uzunluğunun en az bir dalga boyu uzunluğunda olması, yamanın uzunluğunun yarım dalga boyuna eşit veya daha az olması anlamına gelmektedir ($L \leq \lambda_0$). Bu nedenle toprak tabaka ışıyan yamanın kenarından $\lambda/4$ kadar uzatılır[18]. Boşlukta elektromanyetik dalganın hızı $v_0 = 3 \times 10^8 m/s$, mikroşerit antenin çalışma frekansı f_0 iken boşluktaki dalga boyu λ_0 Denklem 2.23 ile ifade edilir.

$$\lambda_0 = \frac{v_0}{f_0} \tag{2.23}$$

Dielektrik tabakanın etkin bağıl dielektrik sabiti ϵ_{reff} olduğuna göre, etkin dalga boyu λ_{eff} Denklem 2.24 ile elde edilir.

$$\lambda_{eff} = \frac{v_0}{f_0} \sqrt{\epsilon_{reff}} \tag{2.24}$$

Kavite modeli, çok sayıda yama şekline uygulanmaktadır. Bu yöntem, birden çok açıklığa sahip mikroşerit antenlerdeki açıklık alanlarının oranını doğrulamamaktadır, bu nedenle dizi anten uygulamalarına uygun değildir. Bu analiz yöntemi, dikdörtgen yamalar arasındaki ortak kuplajın belirlenmesini sağlayarak açıklık kuplajlı besleme tekniğine sahip mikroşerit antenlerin analizinde kullanılmaktadır[19].

3
3B Baskı Teknolojisi ve 3B Yazıcılar

Son yıllarda bilimsel ve teknolojik gelişmeler insanların ihtiyaçlarına paralel olarak hız kazanmıştır. Teknolojik çalışmalar insanların ihtiyaçları doğrultusunda şekillenmekte ve birçok teknolojik yenilik insanların yaşamlarındaki yerini almaktadır. 3 boyutlu (3B) modelleme ve 3 boyutlu (3B) baskı teknolojisi de insanların hayatında yerini alan yenilikler arasında bulunmaktadır. 3B modelleme ve 3B baskı teknolojisine yönelik gelişmelerin yeni olduğu düşünülse de tarihsel gelişimi incelendiğinde bu kapsamdaki çalışmaların 1980'li yılların başına kadar dayandığı görünmektedir. İlk 3B yazıcının üretimi 1984 yılında Chuck Hull of 3D Systems firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Teknolojinin gelişimi ile birlikte günümüzde birçok firma 3B baskı teknolojili yazıcı üretmekte ve satışını yapmaktadır[8].

Piyasaya ilk çıktığı zamanlarda pahalı olan 3B baskı teknolojisi, kullanımının yaygınlaşması ile beraber son kullanıcılara kadar ulaşmaya başlamış ve günlük kullanımda yerini almıştır. Özellikle, 2010 yılından itibaren giyim sektöründen yemek sektörüne kadar birçok sektördeki ihtiyaçları karşılaması, üretim maliyetlerini düşürmesi ve sağladığı kolaylıklar 3B baskı teknolojisinin adının duyulmasını ve yaygınlaşmasını sağlamıştır.

3B yazıcılar, yoğunlukla kullanılan 2B yazıcılara bir alternatif olarak sunulan 3 boyutlu çıktı almaya imkan tanıyan cihazlardır. Çalışma mantığı olarak 2B yazdırma yapan lazer veya mürekkep püskürtmeli yazıcılar gibi çalışsalar da 3B yazıcılarda üretim, eklemeli (additive) bir süreçtir. Bilgisayar ortamında modellenen üç boyutlu nesnelerin üst üste yığınlar halinde ve katmanlı bir yapıda somut çıktılarının alındığı bu sürece "katmanlı üretim" ismi de verilmektedir[8][9].

3.1 3B Baskı Teknolojisinin Kısıtları, Üstünlükleri ve Hammadde Seçimi

3B yazıcıların girişimci ve meraklı bireylerin kontrolünde gelişme göstermesi farklı amaçlar için farklı çözümler üretilmesine olanak sağlamış böylece çözüme yönelik farklı üretim biçimleri ve kullanım amacına yönelik malzeme (hammadde) türlerini ortaya çıkarmıştır. Prototip ve kalıp oluşturma, topografik katı modelleme, ürünlerin kişiselleştirilmesi, medikal ve dental uygulamalar, yedek parça üretimi 3B yazıcıların başlıca kullanım alanlarındandır.

Kullanım amacı 3B baskı teknolojisinde önemlidir. Kullanım amacının belirlenmesinden sonra istenen sonuca göre üretim modeli ve kullanılacak hammaddelerin tespiti yapılır. Bu aşamada 3B baskı teknolojisinin kısıtları da göz önünde bulundurulmalıdır. Hammadde, renk ve yüzey özellikleri açısından çeşitliliğin az olması, üretilen objelerin sıcaklık, nem ve kırılganlık açısından dayanıklılığının az olması, ürün boyutu büyüdükçe maliyetin artması, diğer üretim tekniklerine göre daha düşük hassasiyet göstermesi 3B baskı teknolojisinin kısıtlarındandır. Mevcut sınırlılıkların giderilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bununla birlikte 3B baskı teknolojisinin sahip olduğu avantajlar bu teknolojinin tercih edilmesini sağlamaktadır. Yatırım ve üretim açısından verimli olması, dijital veriden oluşan tasarımın aktarılabilir ve paylaşılabilir olması, değişiklik ve düzeltmelerin hızlı ve kolaylıkla yapılabilmesi, kişiselleştirilmiş üretime olanak sağlaması, ürün fiyatının üretimden önce hesaplanabilmesi, dönüştürülebilir, çevre dostu hammadde kullanılması bu teknolojinin sahip olduğu avantajlardır[9].

Üretimde kullanılan malzeme (hammadde), bu teknolojide büyük öneme sahiptir. Filamentler şeklinde yazıcılara yüklenen hammadde kullanım amacına ve elde edilmesi istenen ürüne göre değişiklik göstermektedir. Bununla birlikte, hammaddeye uygun 3B yazıcı seçimi ve yazdırma tekniği de aynı şekilde önemlidir. 3B yazıcılarda sıklıkla kullanılan hammaddeler (filament) ve özellikleri Tablo 3.1'de özetlenmiştir[8].

3.2 3B Baskı Teknikleri

Elektronik parçalar ve motorlar dışında neredeyse tüm mekanik parçalar 3B yazıcı tarafından basılabilir. Basılacak üç boyutlu tasarımlar, AutoCAD®, SolidWorks®, Google Sketchup®, Rhino3D® gibi CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) programlar tarafından tasarlanır. Bu programlar ile tasarlanan üç boyutlu modeller STL dosyası formatında export edilerek 3B yazıcı aracılığıyla basılır. STL dosyası, tasarım dışında 3B yazıcının baskı sırasında yapacağı tüm hareketler ve hammadde kullanım zamanı gibi bilgileri de içerir. Herhangi bir nesne üç boyutlu tarayıcılar kullanılarak dijital

Tablo 3.1 3B Yazıcılarda Sıklıkla Kullanılan Hammaddeler ve Özellikleri

Filament Türü	**Özellikleri**
PLA (Poliaktik Asit)	Bir çeşit bioplastiktir. 180-220 $^{\circ}C$ arasında verimli işlem görür. Renk çeşitliliği fazladır. Geri dönüşüme uygun malzemelerden üretilebilirler.
ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren)	Petrol bazlı bir plastik türüdür. 250-260 $^{\circ}C$ arasında verimli işlem görür. Isıtmalı platforma ihtiyaç duyar.
PVA (Polivinil Alkol)	Sıcak ve soğuk sıvıda çözünme özelliği olduğundan en iyi destek materyallerindendir. ABS ve PLA'ya göre daha pahalıdır.
Ahşap	ABS ve PLA'ya benzer baskı süreçleri vardır. 175-250 $^{\circ}C$ arasında verimli işlem görür. Nesnelere ahşap görünümü ve kokusu vermede tercih edilir.
Bakır – Bronz ve Bambu	Nispeten daha pahalı olan bir teknolojidir. % 30'luk karışımlar şeklinde elde edilir.
Naylon	Medikal alanda daha sık kullanılan dayanıklı materyaldir. Isıtmalı platforma ihtiyaç duyar.
Pet – Petg	Kristalimsi ve renksiz bir malzemedir. 160-210 $^{\circ}C$ arasında verimli işlem görür.
Sıvı Reçine	Kuyumculuk, mimarlık ve dişçilik alanlarında sıklıkla tercih edilir. Ayrıntılı işlemlerde etkili olmasına rağmen diğerlerine göre pahalıdır.
Seramik	Seramikle üretilen malzemelerin imalatında kullanılır ve seramik tozundan oluşur.
Gümüş	Gümüş ile üretilen malzemelerin imalatında kullanılan malzemedir. İki aşamalı üretime sahip olan gümüş materyalde ilk olarak ürünün 3 boyutlu modeli çıkarılır sonra gümüş kalıba dökülür.

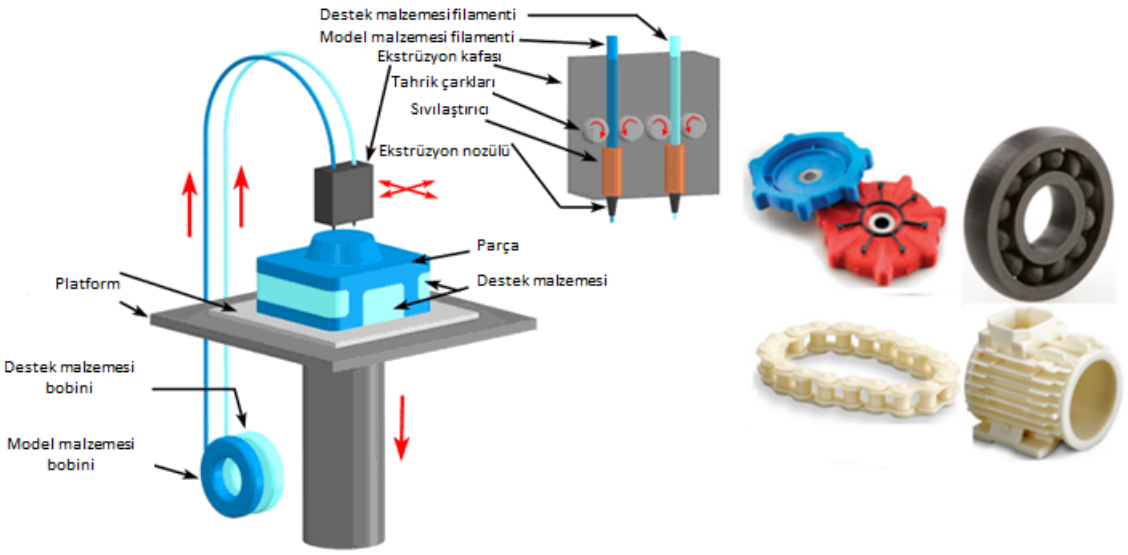
ortama aktarılabilir ve aktarılan verilerin analiz edilmesi sonucunda 3B yazıcılar tarafından basılabilir[20].

3B baskı teknolojisi, geleneksel imalat yöntemleri ile elde edilemeyen geometrilere sahip nesneleri üretebilmesi, hızlı ve pratik olması nedeniyle tercih edilmektedir. 2006 yılında başlayan RepRap (kendin yap, kendin geliştir) projesi sıradan kullanıcıların ilgisini çekmiş ve kullanımlarını yaygınlaştırmıştır. 3B yazıcılar, üretim sırasında farklı teknikler kullanabilir. Katmanlı üretim olarak da isimlendirilen 3B baskı teknolojisinin yazdırma teknikleri, katmanların oluşturulma aşamalarında farklılıklar göstermektedir. 3B yazıcılarda çeşitli yazdırma teknikleri kullanılmakta olup en çok kullanılan teknikler ve özelliklerinden sonraki kısımda bahsedilmektedir.

3.2.1 Erimiş Birikim Modelleme (FDM)

Dünyada ve ülkemizde en yaygın şekilde kullanılan katmanlı üretim tekniğidir. Bu yöntemde, lif (filament) halindeki termoplastik malzeme (hammadde) eritilerek oluşturulan tabakanın üstünde yeni bir katman oluşturur[21]. Bazen filament yerine plastik granül de kullanılmaktadır[22].

Bir baş bölümün üç eksen üzerinde yaptığı harekete göre geliştirilen bu yöntemde yatay ekseni temel alan baş bölüm üçüncü eksende yığma yaparak modeli oluşturur[9]. Baş bölüm her seferde bir katmanın kontürünü çizip içini dolduracak şekilde x ve y eksenlerinde hareket ederken üretimin yapıldığı üretim tablası da z yönünde hareket eder. Üretim sırasında üst üste yığılan katmanların bozulmaması için apartman iskeletine benzer bir destek malzemesine ihtiyaç duyulmaktadır. Baş bölüm model ve destek malzemesini yönlendirerek üretim tablasına ince katmanlar halinde serer. Katman katman serilen malzemenin soğuyarak katılaşması ile model oluşturulur. Gerekli yerlere örülen destek malzemesi sökülerek üretim süreci tamamlanır[21]. Şekil 3.1'de erimiş birikim modelinin çalışma diyagramı ve bu teknikle elde edilmiş ürünler bulunmaktadır.



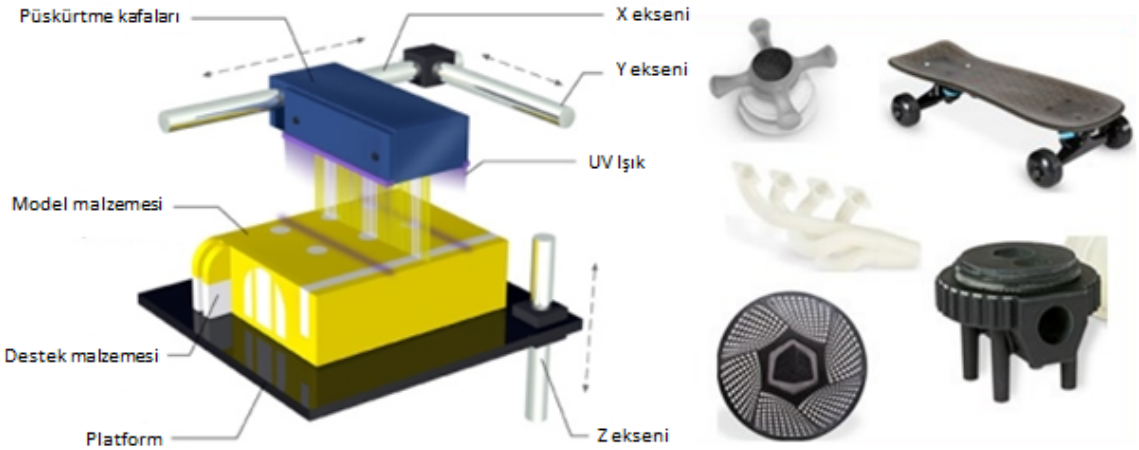
Şekil 3.1 FDM çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar

En yüksek malzeme mukavemetine bu teknoloji ile ulaşılmaktadır. Poliaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril Butadin Stiren (ABS) en çok tercih edilen malzemelerdendir[9].

3.2.2 PolyJet Modeli (MultiJet)

Ployjet tekniğinin çalışma prensibi, mürekkep püskürtmeli (inkjet) yazıcılara benzemektedir. Eritilmiş hammadde, yazıcıda bulunan enjeksiyon bloğundaki nozullardan püskürtülerek model oluşturulur. Püskürtülen hammadde tahliye

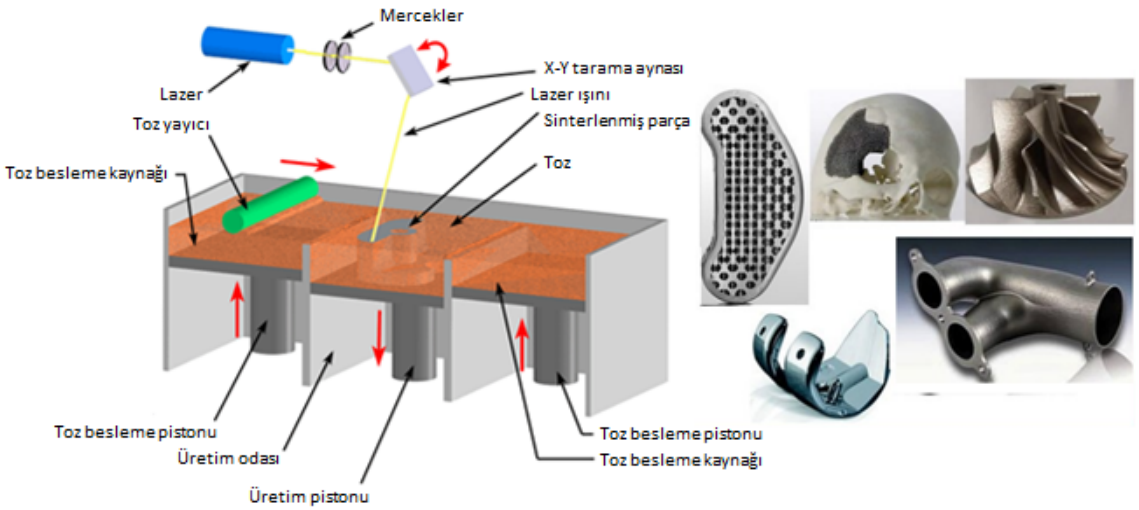
edildiği anda morötesi (ultraviyole) lambalar vasıtasıyla soğutularak katılaştırılır. Her katmanda üretim tablası bir adım aşağıya iner ve katmanlar halinde tasarım modellenir. Bu teknikte, destek malzemesine ihtiyaç duyulmaktadır. Soğuma işleminden sonra destek malzemesi modelden sökülür[23]. Şekil 3.2'de PolyJet modelinin görseli ve bu teknikle elde edilmiş ürünler bulunmaktadır.



Şekil 3.2 PolyJet çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar

3.2.3 Seçici Lazer Sinterleme ve Eritme (SLS & SLM)

SLS ve SLM tekniğinde model, toz metallerin ısı ve basınç altında katı cisimlere dönüştürülmesi ile elde edilmektedir[9]. Isı ve basınç altında kaynaşabilen toz halindeki hammadde ince ve düzgün bir tabaka halinde yayılır. Yüzeyde seçilen bölgeler lazer ışını ile taranır. Işının yüzeye çarptığı noktalarda toz malzeme eriyerek veya sinterlenerek (katılaştırılarak) temas halinde olduğu diğer toz taneleri ile kaynaşır.



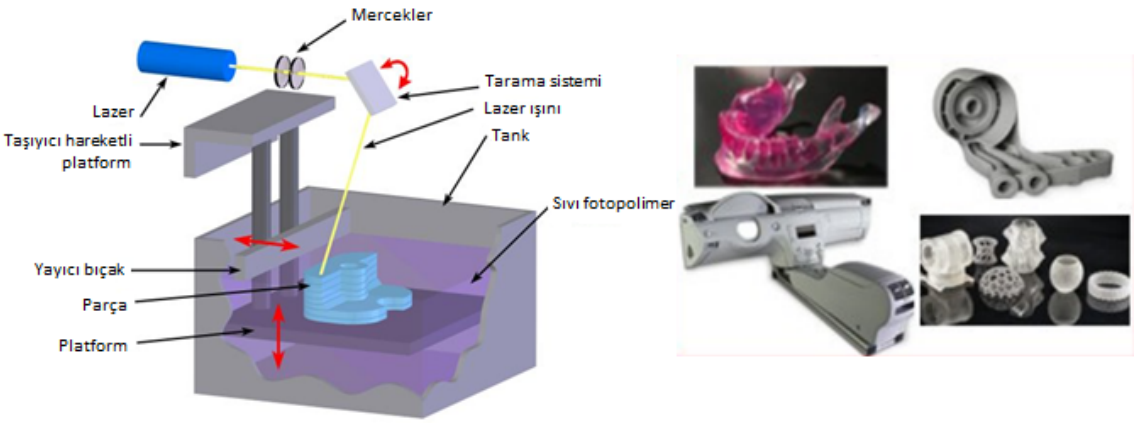
Şekil 3.3 SLS & SLM çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar

Her katmanın inşası tamamlandığında üretim tablası bir katman daha aşağı çekilerek işlem tekrarlanır. Üretim sırasında doğal bir destek görevi üstlenmiş serbest tozlar fırça veya vakum ile temizlenir[23].

FDM'den farklı olarak üretim toz formdaki hammadde içerisinde gömülü yapılmaktadır. Her katman için düzgün bir toz yüzeyi serilmesi gerekliliği süreci yavaşlatmaktadır[9]. Seçici lazer sinterleme tekniğinde hammadde olarak sıvı reçine içerisinde toz malzeme kullanılırken seçici lazer eritme tekniğinde toz haldeki metaller kullanır. Naylon, alüminyum, çelik, gümüş, metaller, cam ve seramik seçici lazer sinterleme tekniğinin, paslanmaz çelik, titanyum, kobalt krom ve alüminyum ise seçici lazer eritme tekniğinin başlıca hammaddelerindendir. Şekil 3.3'te seçici lazer sinterleme ve eritme tekniklerinin çalışma prensibine ait görsel ve bu teknikle imal edilmiş ürünler bulunmaktadır.

3.2.4 Tarayarak Işıkla Kürleme Tekniği (SLA)

SLA tekniği, yüksek doğrulukta ve detayda üretim olanağı sağlamaktadır. Hammadde olarak kullanılan oda sıcaklığında sıvı haldeki fotopolimer reçine tabakasının noktasal bir morötesi (ultraviyole) lazer ışını ile belirli bölgelerinin kürleştirilmesi (katılaştırılması) ile çıktı elde edilir[23]. Üretim sırasında destek materyaline ihtiyaç duyulmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu tekniğin en büyük avantajı çok farklı türlerde malzemelerden üretim seçenekleri sunmasıdır[9]. Şekil 3.4'te SLA çalışma prensibinin görseli ve bu teknikle elde edilmiş örnek ürünler bulunmaktadır.

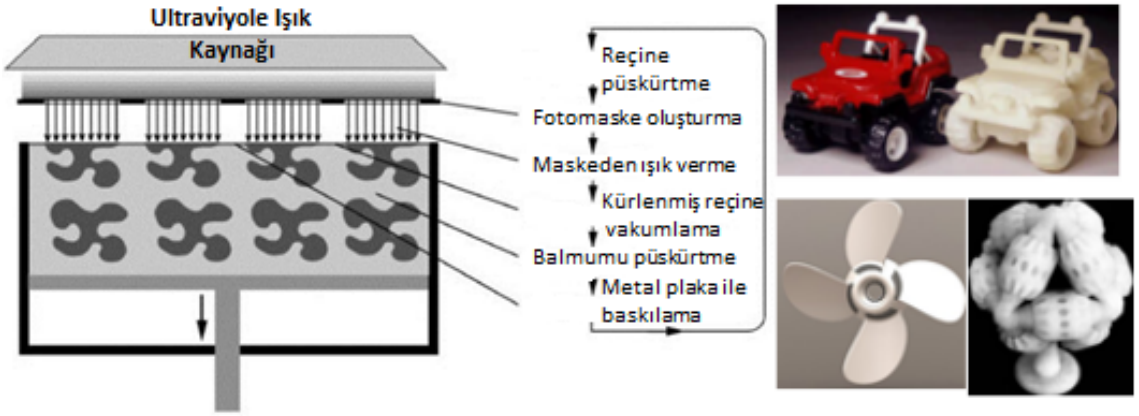


Şekil 3.4 SLA çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar

3.2.5 Katı Zemin Kürleme (SGC)

SGC tekniğinde yüzeye ince bir tabaka fotopolimer püskürtülürken cihazın başka bir kısmında cam bir plaka üzerine maske oluşturulur. Her katman için ayrı bir maske hazırlanılır. Maske, fotopolimer tabakası üzerine getirilerek üstten morötesi

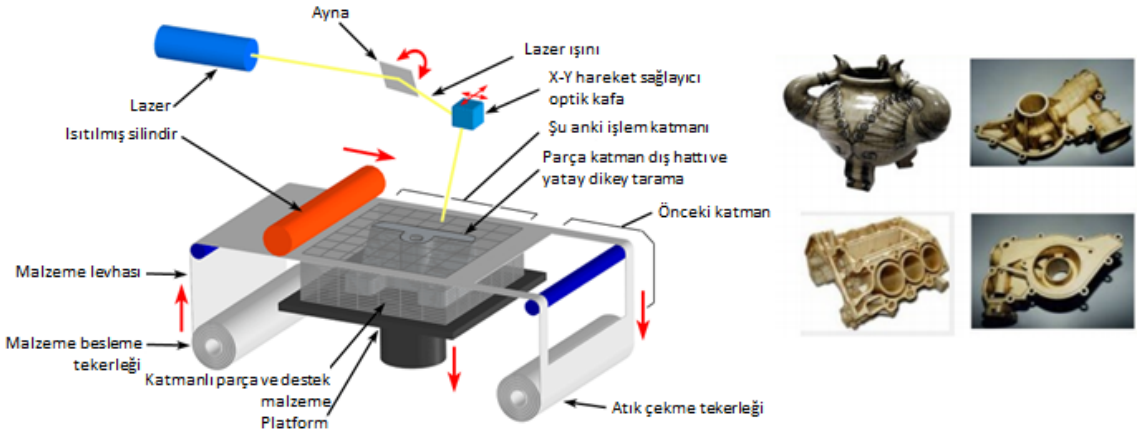
(ultraviyole) ışığa maruz bırakılır. Bu aşamada maskelenmemiş bütün alanlar kür olur. Sıvı halde kalan fotopolimer vakum ile temizlenir ve oluşan boşluklara erimiş mum püskürtülür. Püskürtülen mumun sertleşmesi için su ile soğutulan metal bir plaka yüzeye bastırılır. Bu işlem her katmanda tekrarlanır[23]. Şekil 3.5'te bu tekniğin çalışma prensibine ait görsel ve bu teknikle üretilmiş örnekler bulunmaktadır.



Şekil 3.5 SGC çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar

3.2.6 Lamine Nesne Üretimi (LOM)

LOM tekniğinde, ısı ve basınç yardımıyla üst üste birleştirilen hammaddeler bilgisayar ile kontrol edilen lazer veya bıçakla kesilerek şekillendirilir. Yüksek hızda büyük hacimli parçalar üretilebilmektedir[23].

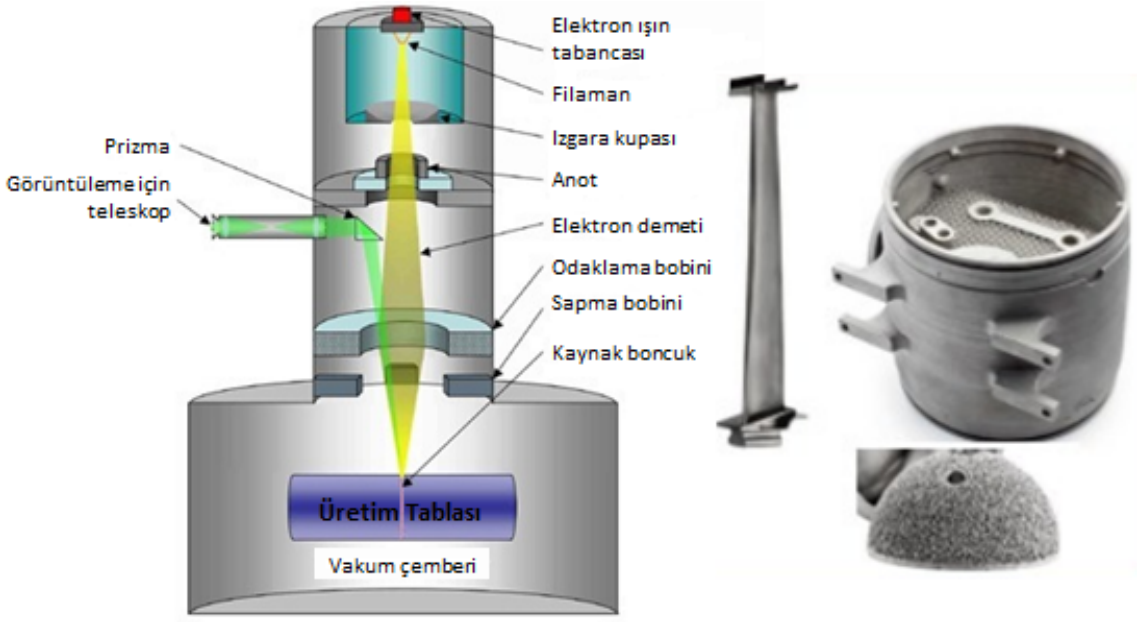


Şekil 3.6 LOM çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar

Hammadde olarak yapışkan kaplı kağıt, plastik köpük, seramik veya metal tozu emdirilmiş malzemelerin kullanılabildiği çevre dostu bir tekniktir. Geri dönüşüme olanak sağlamaktadır[9]. Şekil 3.6'da LOM çalışma prensibi ve bu teknik ile elde edilmiş ürünlere ait görseller bulunmaktadır.

3.2.7 Elektron Işın Eritme (EBM)

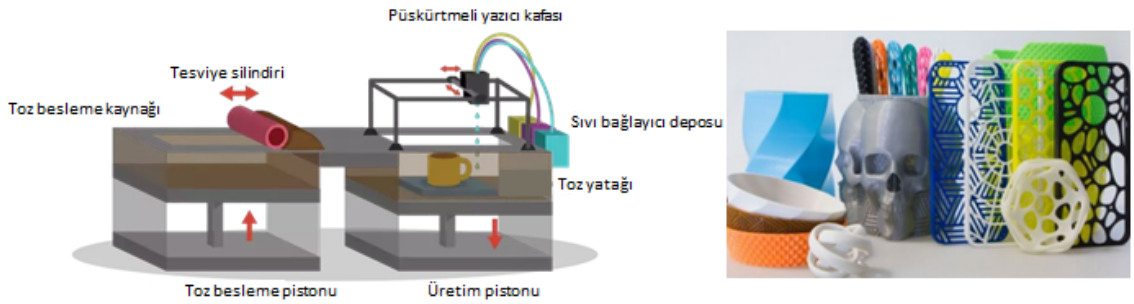
EBM tekniği, toz halinde bulunan metalleri ısıtarak eritme ve birleştirme prensibi ile çalışmaktadır. Toz tabanlı olması nedeniyle SLS tekniği ile benzerlik gösteren bu teknik güç kaynağı olarak vakum içerisindeki elektron demetini kullanır. Hammaddesi metal olan bu teknikte işlemler yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır, ayrıca baskının alınma süresi uzun ve maliyetlidir[23]. Şekil 3.7'de bu tekniğin çalışma prensibinin şematik görseli ve elde edilmiş ürünlerin örnekleri bulunmaktadır.



Şekil 3.7 EBM çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar

3.2.8 Binder Jet – Renkli 3B Yazıcı (3D Printer)

Bu teknikte bir nesneyi oluşturabilmek için üç boyutlu modele ihtiyaç vardır. 3B nesnelerin yazdırma işlemi, mürekkep püskürtmeli yazıcılara (inkjet) benzemektedir.



Şekil 3.8 Binder Jet çalışma prensibi ve üretilmiş örnek parçalar

Plastik hammadde toz halindedir ve bağlayıcı olarak yapışkan, sıvı bir madde kullanılmaktadır. Üretim aşamasında enjeksiyon bloğundan püskürtülen yapışkan bağlayıcı sıvı ile tozlar birbirine bağlanır ve bir silindir yardımıyla yeni katman toz

yayılır. Bu işlem her katmanda tekrarlanır. Üretim sonucunda destek malzemesi olarak kullanılan tozlar vakum veya fırça ile temizlenir[9][23].

Bu teknik, renkli 3B baskı elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Şekil 3.8'de Binder Jet teknolojisinin çalışma prensibi ve bu tip yazıcılar ile imal edilmiş örnek ürünler bulunmaktadır.

3.3 3B Baskı Teknolojisinin Kullanım Alanları

Teknolojik gelişmeler ile birlikte 3B yazıcıların kullanım alanları da oldukça genişlemiştir. Sağlık sektörü, uzay ve havacılık sanayii, otomotiv endüstrisi, savunma sanayii, mimarlık gibi alanlarda 3B baskı teknolojisi ile üretilen ürünlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Akademik çevreler tarafından da benimsenen ve yaygın şekilde kullanılan 3B yazıcıların geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Son yıllarda medikal ve dental alanlarda 3B yazıcıların kullanımı büyük artış göstermiştir. Standart implantlar ile yapılan yeniden yapılandırma (reconstruction) operasyonlarının, 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilen kişiye özel implantlar ile çok daha kısa sürelerde gerçekleştirildiği bilinmektedir[23]. Chicago'daki Northwestern Üniversitesi Feinberg Tıp Fakültesi tarafından yapılan bir deney sonucunda, 3B baskı teknolojisi ile üretilmiş yumurtalıklara sahip bir farenin sağlıklı yavrular doğurması sağlanmıştır[24].



Şekil 3.9 2019'da Eindhoven kentinde 3B yazıcı ile üretilecek evlerin tanıtım görseli

3B baskı teknolojisi inşaat ve mimarlık sektörlerinde de kullanılmaktadır. 2018 yılında 24 saatten daha kısa bir sürede, Moskova'nın banliyösünde 3B baskı teknolojisiyle 400 m^2'lik bir ev inşa edilmiştir. Pekin'de iki katlı bir evin inşası 3B yazdırma teknolojisi kullanılarak 45 günde tamamlanmıştır[24]. Hollandalı inşaat firması Van Wijnen, Hollanda'nın Eindhoven kentinde 3B yazıcı teknolojisiyle yaşanabilir evlerin yapımı projesine başlamıştır. İlk aşamada beş adet ev üretimi ile başlanan projenin 2019 yılı içerisinde tamamlanarak satışa sunulması öngörülmektedir. Şekil 3.9'da 3B baskı teknolojisi ile inşa edilecek evlere ait projenin tanıtım görseli bulunmaktadır.

3B baskı teknolojisi havacılık, uzay ve savunma sanayilerinde de kullanılmaktadır. Hava taşıt araçları üreten Airbus firması 3B baskı teknolojisi kullanarak 20 kg ağırlığında ve 4 m uzunluğunda THOR ismini verdikleri bir model uçak üretmiştir. Şekil 3.10'da Airbus firması tarafından geliştirilen THOR isimli model uçağa ait görsel bulunmaktadır. NASA 2013 yılında 3B baskı teknolojisi kullanarak roket motoru parçaları imal edip testlerini yapmıştır[23].



Şekil 3.10 Airbus firması tarafından üretilen model uçak THOR

2015 yılında Avustralya Melbourne şehrinde Monash Üniversitesi araştırmacıları, Deakin Üniversitesi ve CSIRO (Avustralya Devlet Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Örgütü) işbirliğiyle 3B yazıcı kullanarak bir jet motoru üretmiştir. Şekil 3.11'de 3B yazıcı ile üretilen ve aynı yıl Avustralya Uluslararası Havacılık Fuarı'nda sergilenen jet motorunun görseli bulunmaktadır.

Gıda sektöründe pasta süslemesi, çikolata gibi çeşitli yiyecekleri basabilen 3B yazıcılar kullanılmaktadır. Özellikle, çikolata gibi oda sıcaklığında hızlı katılaşabilen gıdalar 3B baskı teknolojisi kullanımına uygundur. Günümüzde dondurma, kurabiye hamuru, badem ezmesi, hamburger köftesi gibi yenilebilir malzemelerin de üretimi yapılmaktadır[24].



Şekil 3.11 Monash Üniversitesi tarafından 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş jet motoru

Otomotiv sanayinde ise 3B baskı teknolojisi ile yedek parça üretimi gerçekleştirilmektedir. 3B baskı teknolojisinin ve 3B yazıcıların gelecekte çok daha fazla sektörde aktif olarak kullanılacağı öngörülmektedir.

4
3B Baskılı Düzlemsel Olmayan Mikroşerit Antenin Tasarım ve Üretim Aşamaları ile Uygulama Sonuçları

Bu bölümde, 3B baskı teknolojisi kullanılarak prototiplenmiş düzlemsel olmayan mikroşerit yama antenin uygulama sonuçları ile CST Microwave Studio® ortamında modellenen düzlemsel olmayan mikroşerit yama antenin 3B elektromanyetik tabanlı bir taslak modelinin simülasyon sonuçları incelenmiştir. Tasarlanan bu antenin üretim ve ölçüm aşamaları Yıldız Teknik Üniversitesi RF ve Mikrodalga ArGe Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Simülasyondaki anten modelinin ve 3B baskı teknolojisi ile üretilmiş anten tasarımının görselleri ve analiz sonuçları sonraki başlıklarda sunulmuş simülasyon ve uygulama sonuçları bölüm sonunda açıklanmıştır.

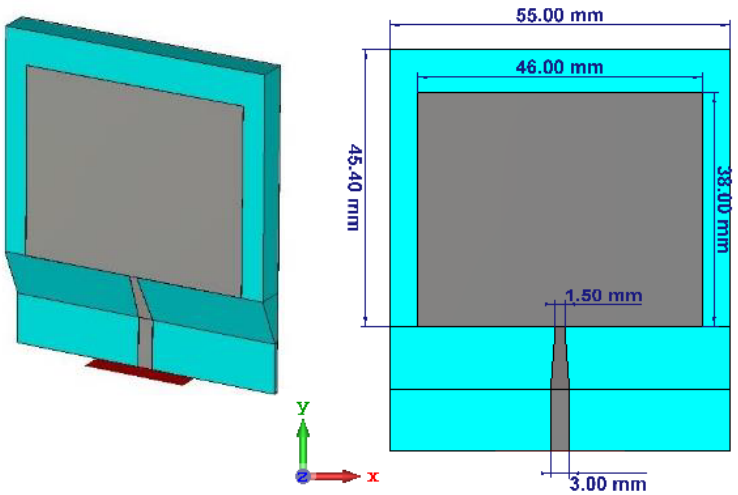
4.1 Tasarım ve Üretim

CST Microwave Studio® ortamında modellenen düzlemsel olmayan mikroşerit yama antenin 3B elektromanyetik tabanlı bir taslak modelinin görünümü Şekil 4.1'de tasarım parametreleri ile birlikte verilmiştir.

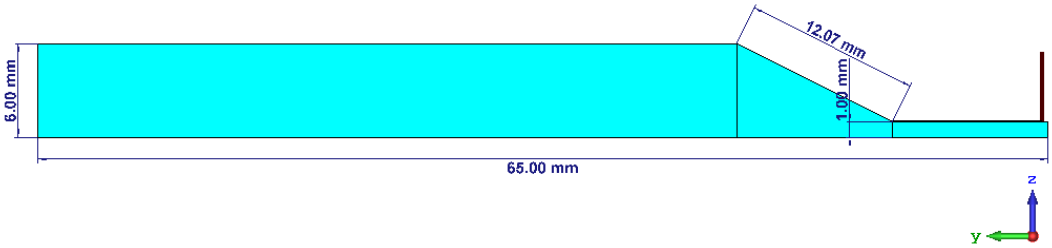
Simülasyon programında modellenen mikroşerit anten modelinin yan görünümü Şekil 4.2'de tasarım parametreleri ile birlikte verilmiştir.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilen tasarım parametrelerinin değerleri, CST Microwave Studio®'da bulunan lokal optimizasyon algoritmaları ile birlikte tezin ikinci bölümünde bulunan teorik denklemler ile elde edilmiştir.

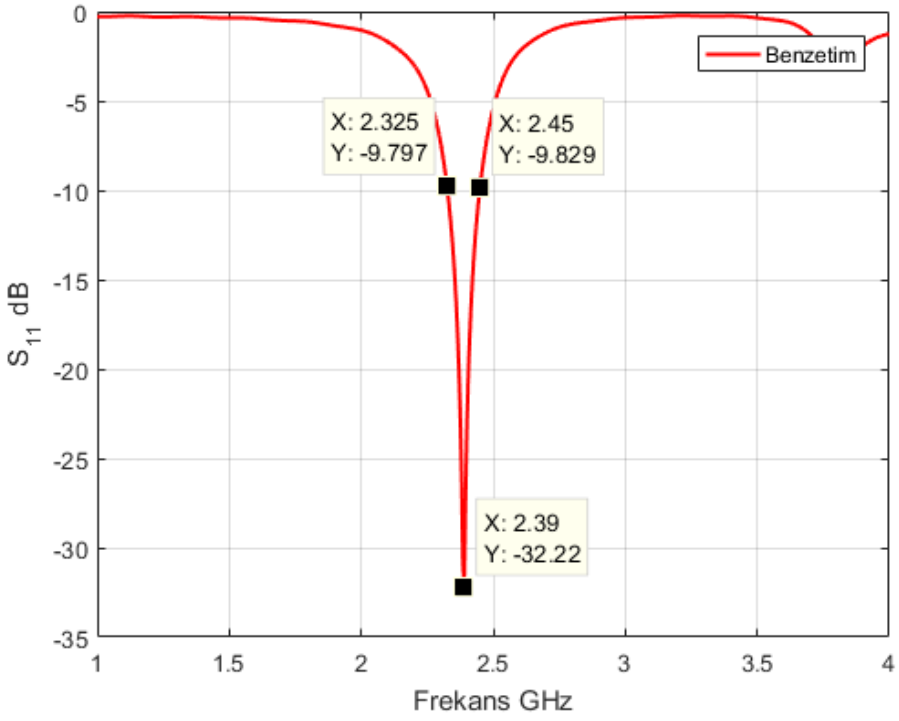
Simüle edilen antenin taslak modelinin geri dönüş kaybı (S_{11}) ve uzak alan kazanç karakteristik grafikleri sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.1 Simülasyon programında tasarlanan anten modelinin üstten görünümü

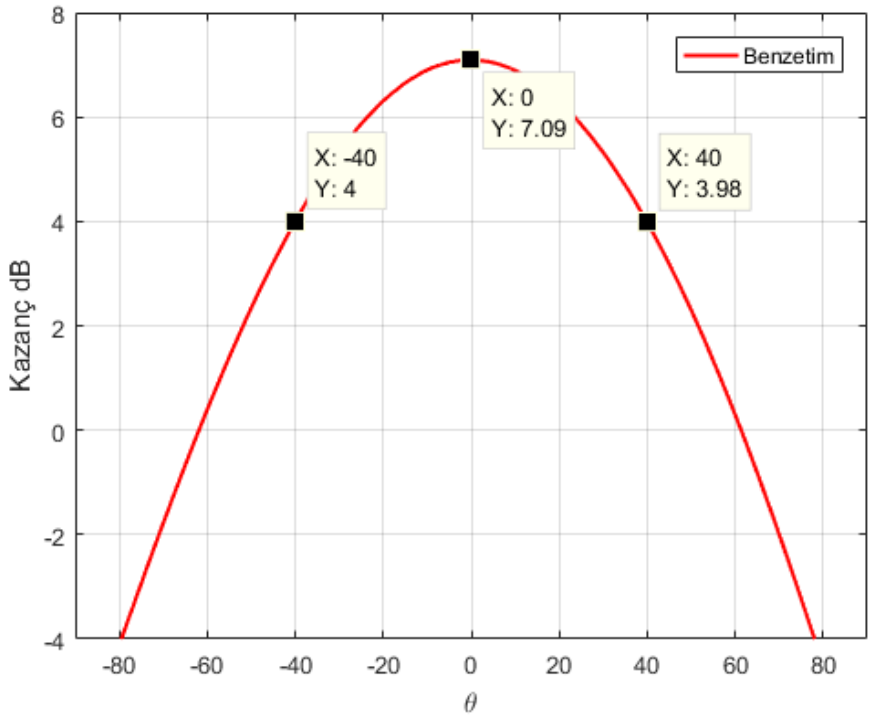


Şekil 4.2 Simülasyon programında tasarlanan anten modelinin yandan görünümü



Şekil 4.3 Simüle edilen antenin 2.4 GHz'deki geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği

Modelin simülasyon (benzetim) sonuçlarına göre, S_{11} geri dönüş kaybının $-10\ dB$'den daha düşük olduğu 2.4 GHz frekans değerinde yaklaşık 7 dB'lik yüksek bir kazanç elde edilmiştir.

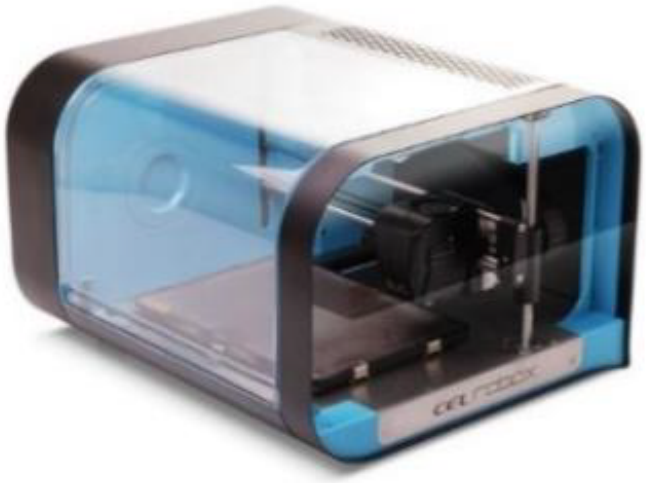


Şekil 4.4 Simüle edilen antenin 2.4 GHz'deki uzak alan kazanç grafiği

Simüle edilen antenin benzetim sonuçlarından görüldüğü üzere anten, iyi geri dönüş kaybı özelliği yanında yüksek kazanç da sağlamaktadır.

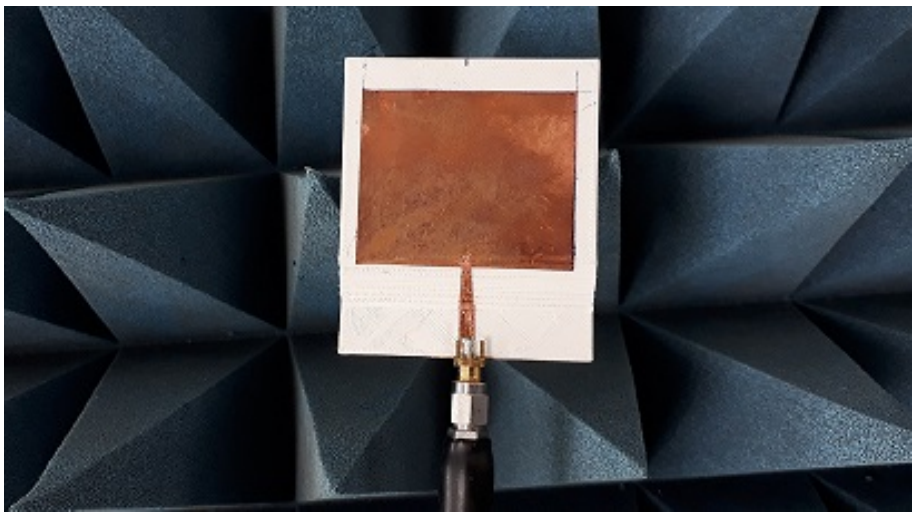
4.2 Uygulama Sonuçları

3B baskı teknolojisi ile düzlemsel olmayan mikroşerit yama anten prototipinin üretilebilmesi için; 3B yazıcı tarafından kullanılacak bir G-kodu oluşturmak amacıyla modelin '.STL' dosya biçiminde dışa aktarılması gerekmektedir. Anten prototipinin imalatında CEL Robox® Masaüstü 3B Yazıcı ve Mikro Üretim Platformu kullanılmıştır (Şekil 4.5)[25].



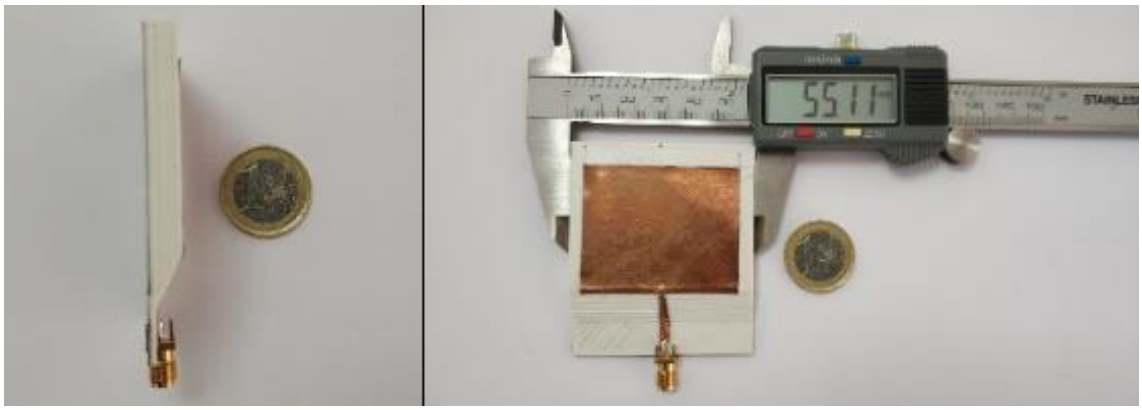
Şekil 4.5 CEL Robox® masaüstü 3B yazıcı ve mikro üretim platformu

3B yazıcı ile anten prototipinin imalatında 2.4 dielektrik sabitine sahip ($\epsilon_r = 2.4$) PLA 'Polar White'[26] materyali kullanılmıştır ve dielektrik tabaka kalınlığı 0.1 mm olarak belirlenmiştir. 3B yazıcı ile üretilen anten prototipinin ölçümlerinin yansımasız ortamda (anechoic chamber) yapıldığı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



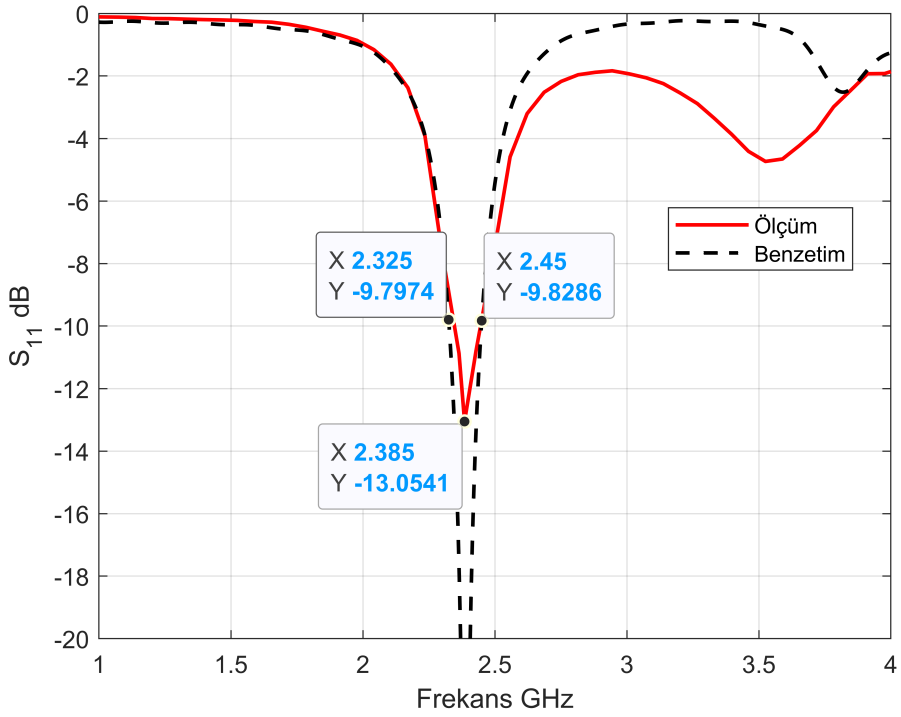
Şekil 4.6 Yansımasız ortamda 3B baskılı anten prototipinin ölçümlerinin yapılması

3B yazıcı ile üretilen anten prototipinin yandan ve üstten görünümüne ait görseller Şekil 4.7'de bulunmaktadır.



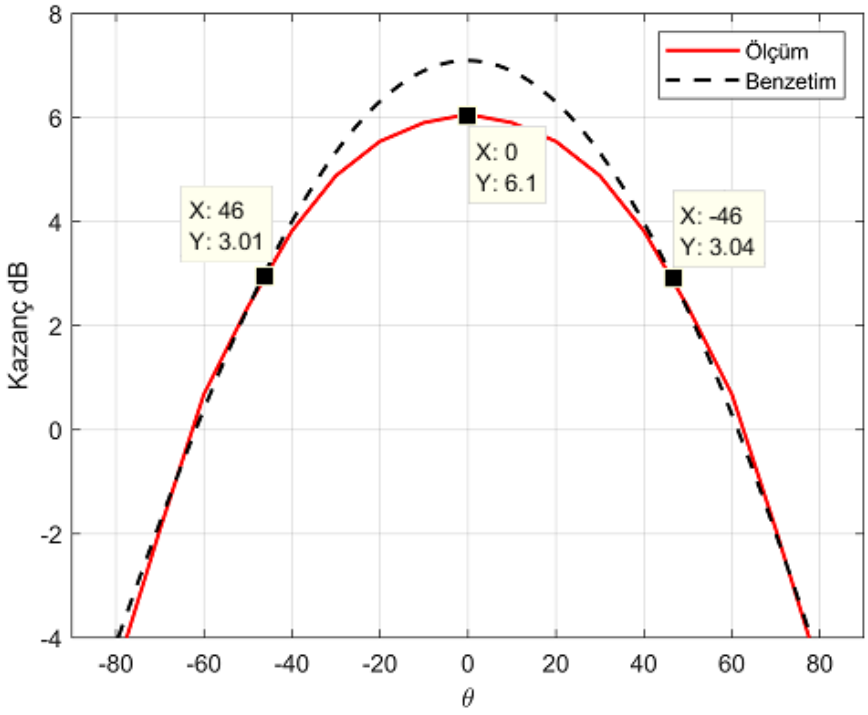
Şekil 4.7 3B anten prototipinin yandan ve üstten görünümü

3B yazıcı ile üretilen anten prototipinin geri dönüş kaybı (S_{11}) ve uzak alan kazanç karakteristik grafikleri ölçüm ve simülasyon (benzetim) sonuçları ile birlikte sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8 3B baskılı antenin 2.4 GHz'deki geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiğinin ölçüm ve benzetim sonuçları

3B baskılı anten prototipinin ölçüm sonuçlarına göre, S_{11} geri dönüş kaybının -10 dB'den daha düşük olduğu 2.4 GHz frekans değerinde yaklaşık 6 dB'lik yüksek bir kazanç elde edilmiştir.



Şekil 4.9 3B baskılı antenin 2.4 GHz'deki uzak alan kazanç grafiği ölçüm ve benzetim sonuçları

CST Microwave Studio® ortamında modellenen düzlemsel olmayan mikroşerit yama antenin simülasyon (benzetim) sonuçları ile 3B baskılı mikroşerit yama anten prototipinin ölçüm sonuçları Tablo 4.1'de gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Antenin benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

Parametre	**Benzetim Sonuçları**	**Ölçüm Sonuçları**
Frekans	2.39 GHz	2.385 GHz
Maksimum Kazanç	7.09 dB	6.1 dB
Bant Genişliği	125 MHz	125 MHz
Yarı Güç Hüzme Genişliği	80°	92°

Ölçülen antenin sonuçlarından görüldüğü üzere anten, iyi geri dönüş kaybı özelliği yanında yüksek kazanç da sağlamaktadır. Uygulama sonuçlarında, 3B baskılı anten prototipinin ölçüm sonuçları ile model antenin simülasyon sonuçlarının tutarlı ve uyumlu olduğu görülmüştür.

5
Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, 3B baskı teknolojisi kullanılarak düşük maliyetli, yüksek kazançlı, düzlemsel olmayan mikroşerit yama anten tasarımı amaçlanmıştır. Bunun için, ilk olarak düzlemsel olmayan mikroşerit yama antenin 3B elektromanyetik tabanlı bir taslak modeli CST Microwave Studio® ortamında modellenmiştir.

Modelin benzetim (simülasyon) sonuçlarına göre, S_{11} geri dönüş kaybının $-10\ dB$'den daha düşük olduğu 2.4 GHz frekans değerinde 7 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir. Bunun üzerine, simülasyon modelinin doğrulanması amacıyla anten tasarımı 3B baskı teknolojisi kullanılarak prototiplenmiştir. Antenin uygulama sonuçlarına göre, S_{11} geri dönüş kaybının $-10\ dB$'den daha düşük olduğu 2.4 GHz frekans değerinde 6 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir. Uygulama sonuçlarında, ölçüm değerleri ile benzetim sonuçlarının tutarlı ve uyumlu olduğu görülmüştür.

Böylelikle, 3B baskı teknolojisindeki son gelişmelerle birlikte, ISM bandı gibi yaygın olarak kullanılan çalışma frekanslarında çalışabilecek, yüksek performans özelliklerine ve hızlı prototipleme süreçlerine sahip, düşük maliyetli düzlemsel olmayan mikroşerit antenlerin tasarım ve gerçekleştiriminin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonraki çalışmalarda, 3B baskı teknolojisindeki gelişmelerin takip edilerek farklı konfigürasyonlara ve karakteristiklere sahip mikroşerit antenlerin 3B modellerinin tasarlanıp gerçekleştirilerek benzetim (simülasyon) sonuçları ile uygulama sonuçlarının karşılaştırılması düşünülmektedir.

Kaynakça

[1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 1997.

[2] J. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*. McGraw Hill, 2007.

[3] P. Mahouti, F. Güneş, M. A. Belen, and A. Çalışkan, "A novel design of non-uniform reflectarrays with symbolic regression and its realization using 3-d printer," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 34*, no. 2, 2019.

[4] P. Mahouti, M. A. Belen, F. Güneş, and R.Yurt, "Design and realization of multilayered cylindrical dielectric lens antenna using 3d printing technology," *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019.

[5] P. Mahouti and M. A. Belen, "Design and realization of quasi yagi antenna for indoor application with 3d printing technology," *Microwave and Optical Technology Letters, 60*, pp. 2177–2181, 2018.

[6] P. Mahouti, "3 boyutlu yazıcı teknolojisi ile bir mikroşerit yama antenin maliyet etkin üretimi," *Journal of Engineering Sciences and Design*, 2019.

[7] Y. C. Toy, P. Mahouti, F. Güneş, and M. A. Belen, "Design and manufacturing of an x-band horn antenna using 3-d printing technology," *8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 2017.

[8] G. Yıldırım, S. Yıldırım, and E. Çelik, "Yeni bir bakış – 3 boyutlu yazıcılar ve öğretimsel kullanımı: Bir içerik analizi," *Bayburt Eğitim Fakültesi Dergisi, 13*, no. 25, pp. 163–184, 2018.

[9] K. Şahin and B. O. Turan, "Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin karşılaştırmalı analizi," *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2*, no. 2, pp. 97–116, 2018.

[10] P. Project, *Antennas and transmission lines*, 2012.

[11] S. Alam, "Miniaturization of rectangular patch antennas using defected ground structures (dgss)," Master's thesis, Universiti Teknologi MARA (UiTM), 2012.

[12] M. Çekingen, "Yapay manyetik iletken toprak yüzeyli genişbant mikroşerit anten tasarımı," Master's thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2011.

[13] H. Kütük, A. Y. Teşneli, and N. B. Teşneli, "3.3 ghz microstrip antenna design and analysis for different feeding methods," *Sakarya University Journal of Science, 17*, no. 1, pp. 119–124, 2013.

[14] C. K. Clayton, "Aperture coupled microstrip patch antenna for wıfı, wimax, and radar applications," Master's thesis, Auburn University, 2014.

[15] S. Singh, N. Agarwai, N. Nitin, and A. K. Jaiswal, "Design consideration of microstrip patch antenna," *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, 2*, no. 1, pp. 306–316, 2013.

[16] R. Waterhouse, *Microstrip Patch Antennas*. CRC Press LLC, 2002.

[17] V. Bernard and J. P. I. Iloh, "Microstrip antenna design using transmission line model," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3*, no. 11, 2013.

[18] A. F. Alsager, "Design and analysis of microstrip patch antenna arrays," Master's thesis, University College of Boras, 2011.

[19] D. Koçer, "Daire ve dikdörtgen geometrik yapılı mikroşerit antenlerin simülasyonu ve rezonans frekanslarının yapay sinir ağları ile belirlenmesi," Master's thesis, Selçuk Üniversitesi, 2009.

[20] R. C. İlgül and B. Akgünoğlu, "3 boyutlu yazıcı," Master's thesis, Karabük Üniversitesi, 2016.

[21] İ. Durgun and D. Başaran, "Fdm katmanlı üretim teknolojisinin araç geliştirme sürecindeki uygulamaları," OTEKON 2010 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 2010.

[22] H. Maden and Ö. Ş. Kamber, "Fdm teknoloji ile üretilen prototip parçalarının hataları ve hataların önlenmesi," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 2*, no. 1, pp. 40–51, 2018.

[23] K. Özsoy and B. Duman, "Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 1*, no. 1, pp. 36–48, 2017.

[24] B. Marr, *7 amazing real-world examples of 3d printing in 2018*, 2018.

[25] https://www.cel-uk.com/shop/robox-by-cel-a-micro-manufacturing-platform-with-dual-nozzle-fff-head-rbx01/, *Robox by cel – a micro manufacturing platform*, 2019.

[26] https://www.cel-uk.com/shop/pla/, *Pla 3d printing filament, polar white filament*, 2019.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgileri: aysecodur@gmail.com

Makale

1. A. Çodur, A. Kızılay, M. A. Belen, "Design and Realization of 3D Printed Non-Planar Microstrip Patch Antenna", *International Journal of Engineering and Science Invention, 8*, no. 5, pp. 34–38, 2019.