

**T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK KAZANÇLI VE KÜÇÜK EBATLI U-YUVALI  
YAMA ANTEN TASARIMI**

**Tezi Hazırlayan  
Asena Melike ÇAYAN**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Suad BAŞBUĞ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2022  
NEVŞEHİR**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü sorunda bana yol gösteren ve hiçbir yardımı esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübeleriyle bana her konuda ışık tutan, aynı zamanda kişilik olarak da bana çok şey katan Sayın Danışman Hocam Doç. Dr. Suad BAŞBUĞ'a,

Her zaman olduğu gibi yüksek lisans eğitimim boyunca da maddi manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli AİLEME sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin gerçekleşmesinde 120E396 numaralı proje ile maddi destek veren TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Ayrıca, ABAP21F8 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve deneysel çalışmalar için laboratuvar imkanlarını kullanmama olanak tanıyan Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'ne teşekkür ederim.

**YÜKSEK KAZANÇLI VE KÜÇÜK EBATLI U-YUVALI YAMA ANTEN  
TASARIMI  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Asena Melike ÇAYAN**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Temmuz 2022**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında yüksek kazanç, geniş bant ve küçük ebat özelliklerine sahip u-yuvalı mikroşerit anten tasarımları sunulmaktadır. Tasarlanan antenlerin 2.4-2.5 GHz bant aralığını kapsaması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, simülasyonlar yardımı ile tasarlanan antenlerin iki farklı sistem uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki, haberleşme erişim mesafelerini artırmak amacıyla geliştirilmiş bir tekrarlayıcı modül için tasarlanan u-yuvalı antendir. Söz konusu tekrarlayıcı modül dört farklı yöne anahtarlama yapabilen bir yapıya sahiptir ve her bir yön için özdeş antenler kullanılmaktadır. İkinci olarak, silindirik yapıda u-yuvalı mikroşerit bir anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Silindirik anten imalatında üç boyutlu yazıcı teknolojisi ve esnek taban malzemesi kullanılmıştır. İmalatı yapılan antenlerin ışınma diyagramlarının ölçülebilmesi için öncelikle üç boyutlu bir ışınma diyagramı ölçüm sistemi geliştirilmiş ve prototipi gerçekleştirilmiştir. Bu ışınma ölçüm diyagramı sistemi ile 1-3 GHz frekans aralığında çalışan antenlerin üç boyutlu olarak ışınma diyagramı ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Tez kapsamında imalatı gerçekleştirilen antenlerin geliştirilen ölçüm sistemi yardımıyla iki boyutlu ışınma diyagramları elde edilmiştir. Ayrıca, söz konusu antenlerin yansıma katsayısı parametreleri vektör ağ analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçların kazanç ve bant genişliği açısından oldukça başarılı olduğu gözlenmiştir. Her iki temel anten parametresi ölçüm sonucu simülasyonlar ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

***Anahtar kelimeler: U-yuvalı mikroşerit anten, Işınma diyagramı ölçüm sistemi, Tekrarlayıcı modül, Silindirik anten.***

**Tez Danışman: Doç. Dr. Suad BAŞBUĞ**

**Sayfa Adeti: 88**

# HIGH GAIN AND SMALL SIZE U-SLOT PATCH ANTENNA DESIGN

(M. Sc. Thesis)

**Asena Melike CAYAN**

**NEVSEHIR HACI BEKTAS VELI UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**July 2022**

## **ABSTRACT**

In this thesis, u-slot microstrip antenna designs with high gain, broadband and small size are presented. The designed antennas are aimed to cover 2.4-2.5 GHz band range. In this purpose, two different system applications of the antennas designed with the help of simulations were carried out. Firstly, a u-slot antenna is designed for a repeater module developed to increase communication ranges. The repeater module has a structure that can switch to four different directions separately and identical antennas are used for each direction. Secondly, a cylindrical u-slot microstrip antenna was designed. Three-dimensional printer technology and flexible base material were used for the manufacture of the cylindrical antenna. In order to measure the radiation patterns of the manufactured antennas, a three-dimensional radiation pattern measurement system was developed and its prototype was realized. Three-dimensional radiation pattern measurement system proposed in this work can be operated in the range of 1-3 GHz frequency. Two-dimensional radiation pattern was obtained with the help of the developed measurement system of the antennas manufactured within the scope of the thesis. In addition, the reflection coefficient parameters of the designed antennas were measured using a vector network analyzer. It has been observed that the obtained results are very successful in terms of gain and bandwidth. The measurement results of both basic antenna parameters were compared with the results obtained by simulations. It was concluded that the simulation and measurement results were in harmony.

***Keywords: U-slot microstrip antenna, Radiation pattern measurement system, Repeater module, Cylindrical antenna.***

**Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Doç. Dr. Suad BAŞBUĞ**

**Page Number: 88**

## İÇİNDEKİLER

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| KABUL VE ONAY SAYFASI .....           | i   |
| TEZ BİLDİRİM SAYFASI .....            | ii  |
| TEŞEKKÜR.....                         | iii |
| ÖZET.....                             | iv  |
| ABSTRACT.....                         | v   |
| İÇİNDEKİLER .....                     | vi  |
| TABLO LİSTESİ.....                    | ix  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                | x   |
| RESİMLER LİSTESİ .....                | xiv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ ..... | xv  |
| BÖLÜM 1                               |     |
| GİRİŞ .....                           | 1   |
| 1.1. Amaç ve Kapsam .....             | 2   |
| 1.2. Literatür Özeti .....            | 3   |
| BÖLÜM 2                               |     |
| ANTENLER VE ÖZELLİKLERİ.....          | 8   |
| 2.1. Antenler.....                    | 8   |
| 2.2. Anten Özellikleri.....           | 9   |
| 2.3. Temel Anten Parametreleri .....  | 10  |
| 2.3.1. Işıma örüntüsü.....            | 11  |
| 2.3.1.1. Anten alan bölgeleri.....    | 12  |
| 2.3.2. Işıma güç yoğunluğu.....       | 13  |
| 2.3.3. Işıma şiddeti .....            | 13  |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3.4. Yönlülük.....  | 14        |
| 2.3.5. Anten verimi.....  | 14        |
| 2.3.6. Kazanç.....  | 15        |
| 2.3.7. Duran dalga oranı (VSWR).....                              | 15        |
| 2.3.8. Geri dönüş kaybı .....                                     | 15        |
| 2.3.9. Bant genişliği .....                                       | 16        |
| 2.3.10. Kutuplanma.....   | 16        |
| 2.3.10.1. Doğrusal, dairesel, eliptik kutuplanmalar .....         | 17        |
| 2.3.11. Giriş empedansı.....                                      | 17        |
| 2.3.12. Anten ışınım verimi.....                                  | 18        |
| 2.4. Anten Tipleri .....  | 18        |
| 2.4.1. Tel antenler.....  | 19        |
| 2.4.2. Açıklık antenleri.....                                     | 19        |
| 2.4.3. Mikroşerit antenler .....                                  | 19        |
| 2.4.4. Dizi antenler .....  | 19        |
| 2.4.5. Yansıtıcı antenler .....                                   | 20        |
| 2.4.6. Lens antenler .....  | 20        |
| <b>BÖLÜM 3</b>  |           |
| <b>KABLOSUZ VE ÜÇ BOYUTLU ANTEN DİYAGRAMI ÖLÇÜM SİSTEMİ .....</b> | <b>21</b> |
| 3.1. Alıcı Modül .....  | 24        |
| 3.2. Verici Modül .....   | 26        |
| 3.3. Hareketli Aksam.....   | 27        |
| 3.4. Merkez Bilgisayar .....                                      | 28        |
| 3.5. Ölçüm Sisteminin Genel Yapısı.....                           | 29        |

|  |    |
|--|----|
| BÖLÜM 4  |    |
| YÜKSEK KAZANÇLI, KÜÇÜK EBATLI U-YUVALI ANTEN TASARIMI .....        | 32 |
| 4.1. Mikroşerit Antenler .....                                     | 32 |
| 4.2. U-yuvalı Mikroşerit Antenler .....                            | 34 |
| 4.3. Anten Tasarımları ve Analizleri .....                         | 37 |
| BÖLÜM 5  |    |
| TEKRARLAYICI ANTEN SİSTEMİ .....                                   | 56 |
| BÖLÜM 6  |    |
| U-YUVALI SİLİNDİRİK ANTEN TASARIMI .....                           | 64 |
| BÖLÜM 7  |    |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....  | 70 |
| 7.1. Üç Boyutlu Anten Işıma Diyagramı Test Sonuçları .....         | 70 |
| 7.2. Tekrarlayıcı Anten Sisteminin İmalat ve Ölçüm Sonuçları ..... | 72 |
| 7.3. U-yuvalı Silindirik Anten İmalatı ve Ölçüm Sonuçları .....    | 76 |
| BÖLÜM 8  |    |
| SONUÇ VE ÖNERİLER .....  | 79 |
| KAYNAKÇA .....   | 81 |
| ÖZGEÇMİŞ .....   | 88 |

## TABLO LİSTESİ

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tablo 4.1. | 1 mm yarıçapa sahip yönlendirici eklenen u-yuvalı yama antene ait kazanç ve bant genişliği değerleri .....                              | 54 |
| Tablo 4.2. | U-yuvalı yama antene eklenen iki adet yönlendiricinin yarıçapları değiştirildiğinde elde edilen kazanç ve bant genişliği değerleri..... | 54 |
| Tablo 4.3. | U-yuvalı yama antene eklenen üç adet yönlendiricinin yarıçapları değiştirildiğinde elde edilen kazanç ve bant genişliği değerleri.....  | 54 |
| Tablo 5.1. | SP4T sinyal yolu kontrol tablosu.....   | 60 |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Şekil 2.1. | Tipik alıcı verici anten sistemi .....  | 8  |
| Şekil 2.2. | Verici antenin eşdeğer devresi.....   | 9  |
| Şekil 2.3. | Alıcı antenin eşdeğer devresi.....  | 10 |
| Şekil 2.4. | Bir anten örüntüsünün ışınma kulakları .....  | 11 |
| Şekil 2.5. | Anten alan bölgeleri .....  | 12 |
| Şekil 2.6. | Bant genişliği ayrımı .....   | 16 |
| Şekil 2.7. | Dalga Kutuplanmaları .....  | 17 |
| Şekil 2.8. | Antenlerin Sınıflandırılması .....  | 18 |
| Şekil 3.1. | Alıcı modül blok şeması.....  | 24 |
| Şekil 3.2. | Verici modül blok şeması.....   | 26 |
| Şekil 3.3. | Hareketli aksama ait blok şeması .....  | 28 |
| Şekil 3.4. | Ölçüm sisteminin üç boyutlu bilgisayar ortamındaki modeli.....  | 30 |
| Şekil 4.1. | Mikroşerit anten.....   | 33 |
| Şekil 4.2. | U-yuvalı mikroşerit yama anteni .....   | 35 |
| Şekil 4.3. | COMSOL Multiphysics ana ekran ara yüzü .....  | 38 |
| Şekil 4.4. | (a) Geleneksel mikroşerit antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği..... | 39 |
| Şekil 4.5. | (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği... 40        |    |
| Şekil 4.6. | (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler[17], (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği.....     | 41 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 4.7.  | (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler [69], (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği.....   | 42 |
| Şekil 4.8.  | (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği...  | 43 |
| Şekil 4.9.  | (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği...  | 44 |
| Şekil 4.10. | PLA malzemesinin bağlı $\epsilon_r$ değerinin hesaplanması için T-rezonatör modeli [70] .....  | 45 |
| Şekil 4.11. | (a) PLA malzemesinin $\epsilon_r$ değerinin hesaplanması için çizilen T-rezonatör modeli, (b) Bakır iletken ve PLA ile gerçekleştirilmiş T-rezonatör, (c) COMSOL'da çizimi yapılan T-rezonatörün $S_{21}$ simülasyon sonucu..... | 47 |
| Şekil 4.12. | (a) Tasarlanan u-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği.....   | 48 |
| Şekil 4.13. | Tasarlanan antenin ışınma diyagramı.....   | 49 |
| Şekil 4.14. | (a) Tasarlanan u-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği.....   | 50 |
| Şekil 4.15. | Tasarımı yapılan antene ait ışınma diyagramı.....  | 51 |
| Şekil 4.16. | PLA kalınlığı 5 mm olan u-yuvalı antene ait $S_{11}$ grafiği.....  | 52 |
| Şekil 4.17. | PLA kalınlığı 5 mm olan u-yuvalı antene ait ışınma diyagramı .....   | 52 |
| Şekil 4.18. | Yagi-Uda anten modeli.....   | 53 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 4.19. | Üç adet yönlendirici elemanı bulunan u-yuvalı yama antenin tasarım görüntüsü.....   | 55 |
| Şekil 4.20. | Tasarlanan antene ait $S_{11}$ grafiği.....   | 55 |
| Şekil 5.1.  | IoT uygulamalarının temel yapısı.....   | 56 |
| Şekil 5.2.  | Klasik çift RF katlı tekrarlayıcı modüle ait çalışma prensibi.....  | 57 |
| Şekil 5.3.  | Tekrarlayıcı anten sistemi için gerçekleştirilen anten ve kutu tasarımının COMSOL programında görüntüsü.....  | 59 |
| Şekil 5.4.  | Tekrarlayıcı anten sistemindeki bir antenin simüle edilmesi ile elde edilen $S_{11}$ grafiği.....   | 59 |
| Şekil 5.5.  | Tekrarlayıcı anten sistemindeki antenlerden birinin simüle edilmesi ile elde edilen üç boyutlu ışın diyagramı.....  | 60 |
| Şekil 5.6.  | SP4T devre kartına ait tasarım.....   | 61 |
| Şekil 5.7.  | SP4T devre kartının (a) RF1 yoluna ait $S_{11}$ ve $S_{21}$ grafiği, (b) RF2 yoluna ait $S_{11}$ ve $S_{21}$ grafiği, (c) RF3 yoluna ait $S_{11}$ ve $S_{21}$ grafiği, (d) RF4 yoluna ait $S_{11}$ ve $S_{21}$ grafiği..... | 62 |
| Şekil 5.8.  | Tekrarlayıcı anten sistemi blok şeması.....   | 63 |
| Şekil 6.1.  | (a) Tasarlanan u-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği.....  | 65 |
| Şekil 6.2.  | Tasarlanan USMA'nın COMSOL programında görüntüsü.....   | 66 |
| Şekil 6.3.  | Tasarlanan USMA'ya ait $S_{11}$ grafiği.....  | 67 |
| Şekil 6.4.  | Tasarlanan USMA'nın üç boyutlu ışın diyagramı.....  | 67 |
| Şekil 6.5.  | Yönlendirici eklenmiş USMA'nın COMSOL görüntüsü.....  | 68 |
| Şekil 6.6.  | Yönlendirici eklenmiş USMA'ya ait $S_{11}$ grafiği.....   | 68 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Şekil 6.7. | Yönlendirici eklenmiş USMA'ya ait üç boyutlu ışıma diyagramı.....   | 69 |
| Şekil 7.1. | (a) Tasarlanan u-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Ölçüm ve simülasyon sonuçları değerlendirilen u-yuvalı mikroşerit anten, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen $S_{11}$ grafiği.....  | 71 |
| Şekil 7.2. | (a) U-yuvalı mikroşerit antenin $x-z$ düzlemindeki Comsol simülasyonu, (b) kablosuz üç boyutlu anten diyagramı sisteminin $x-z$ düzlemindeki ölçüm sonuçları, (c) U-yuvalı mikroşerit antenin $x-z$ düzlemindeki Comsol simülasyonu, (d) kablosuz üç boyutlu anten diyagramı sisteminin $x-z$ düzlemindeki ölçüm sonuçları..... | 72 |
| Şekil 7.3. | Yarım kutu tekrarlayıcı anteni tasarımının $S_{11}$ parametresi simülasyon ve ölçüm sonuçları .....   | 74 |
| Şekil 7.4. | Yarım kutu tekrarlayıcı anten tasarımına ait ışıma diyagramının ölçüm ve simülasyon sonuçları .....   | 74 |
| Şekil 7.5. | Tekrarlayıcıya monte edilmiş SP4T üzerindeki RF4 yoluna bağlı U-yuvalı antenin örnek $S_{11}$ ölçüm grafiği.....  | 76 |
| Şekil 7.6. | U-yuvalı silindirik antene ait $S_{11}$ parametresinin simülasyon ve ölçüm sonuçları .....  | 78 |
| Şekil 7.7. | U-yuvalı silindirik antene ait ışıma diyagramının ölçüm ve simülasyon sonuçları .....   | 78 |

## RESİMLER LİSTESİ

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Resim 3.1. | Alıcı modülün imal edilmiş prototipinin ön (a) ve arka (b) yüzey fotoğrafları.....         | 26 |
| Resim 3.2. | Verici modülde kullanılan Vivaldi anten ve verici elektroniği .....                        | 27 |
| Resim 3.3. | Hareketli aksamın fotoğrafı.....   | 28 |
| Resim 3.4. | Ölçüm sistemi prototipinin dikey pozisyonundaki fotoğrafı.....                             | 31 |
| Resim 7.1. | Tekrarlayıcı için tasarlanan antenin yüzey üzerindeki konumu ve port bağlantı noktası..... | 73 |
| Resim 7.2. | İmal edilen tekrarlayıcı anten modülü.....   | 75 |
| Resim 7.3. | SP4T tasarım çıktısı.....  | 75 |
| Resim 7.4. | İmal edilen silindirik u-yuvalı anten.....   | 77 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                 |                                       |
|-----------------|---------------------------------------|
| SI              | Uluslararası birimler sistemi         |
| PLA             | Polilaktik asit                       |
| RF              | Radyo frekansı                        |
| $\epsilon_r$    | Dielektrik sabiti                     |
| PETG            | Polietilen tereftalat glikol          |
| VNA             | Vektör ağ analizörü                   |
| İHA             | İnsansız hava araçları                |
| ILS             | Aletli iniş sistemi                   |
| VOR             | Çok yüksek frekanslı çok yönlü menzil |
| HPBW            | Yarı güç hüzme genişliği              |
| FNBW            | İlk sıfır hüzme genişliği             |
| VSWR            | Duran dalga oranı                     |
| dB              | Desibel                               |
| S <sub>11</sub> | Yansıma Katsayısı                     |
| CW              | Saat yönü                             |
| CCW             | Saat yönünün tersine                  |
| AN              | Arduino nano                          |
| NRF             | NRF24L01+                             |
| AU              | Arduino uno                           |
| SPI             | Seri çevre birimi arayüzü             |
| PCS             | Kişisel iletişim sistemleri           |
| DBS             | Doğrudan yayın uydusu                 |
| WLAN            | Kablosuz yerel yayın ağları           |
| IVHS            | Akıllı araç otoyol sistemleri         |
| IoT             | Nesnelerin interneti                  |
| RFID            | Radyo frekansı tanımlama              |
| WNS             | Kablosuz sensör ağları                |
| LOS             | Görüş hattı                           |
| SA              | Silindirik anten                      |
| USMA            | U-yuvalı silindirik mikroşerit anten  |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması, teknolojinin gelişmesi ve değişen insan gereksinimleri, uzak mesafelerle haberleşmenin kolaylaştırılmasını zorunlu hale getirmiştir. Kablosuz haberleşmenin hayatın hemen her alanında kolaylık sağladığı ve kullanımının gün geçtikçe arttığı gözle görülür bir gerçektir. Tarihi süreçte telefon ve telgrafın icadı yeni bir devrin başlangıcı olsa da haberleşmenin kablolarla gerçekleştiriliyor olmasının zorluğu, zamanla insanlığı kablosuz haberleşmeye yöneltmiştir. Bu kapsamda kablosuz haberleşmeye dair ilk çalışmalar İskoç teorik fizikçi ve matematikçi James Clerk Maxwell'in elektrik ile manyetizmayı birleştirerek oluşturduğu dört denklem (Maxwell Denklemleri) ile başlamış olup, Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz'in 1888'de radyo dalgalarını deneysel olarak keşfetmesiyle devam etmiştir. Uluslararası Birimler Sistemi (SI) kapsamındaki frekans birimine ismi verilen Hertz aynı zamanda ilk antenleri de üreten kişidir.

1985 yılından itibaren İtalyan mucit ve elektrik mühendisi Guglielmo Marconi radyo dalgalarını uzak mesafelere taşıma amacıyla çalışmalara başlamıştır. Yaptığı çalışmalarla radyo dalgalarını önce 4 km, sonra 6 km ve son olarak yaklaşık 122 km öteye ulaştırmıştır. Daha sonra 150 m uzunluğunda bir alıcı anten kullanarak yaklaşık 3500 km uzaklıktaki bir konuma Mors alfabesindeki S harfini göndermiştir. Marconi'nin bu çalışmasıyla kablosuz haberleşme hem hız kazanmış hem de bu alanda yeni bir döneme başlanmıştır. Yine Marconi'nin bu çalışması ile birlikte kablosuz haberleşmenin en önemli bileşenlerinden biri olan antenler ile ilgili araştırmalara başlanmıştır. Anten, en basit tanımı ile iletim hatlarında bilgi taşıyan elektriksel sinyalleri elektromanyetik dalgalara çevirip boşluğa yayan cihazdır. Benzer şekilde, boşlukta ilerleyen elektromanyetik dalgaları elektriksel sinyallere dönüştürüp ilgili elektronik birimlere iletebilecek kabiliyete de sahiptir.

Bu tez kapsamında Bölüm 2'de temel anten bilgileri verilmiştir. Bölüm 3'te imal edilen antenlerin ışına diyagramlarını üç boyutlu olarak ölçebilmek amacıyla tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiş olan ışına diyagramı ölçüm sistemi anlatılmıştır. Sistem 1-3 GHz arasında çalışan antenler için ölçüm yapmaya olanak tanımaktadır. Ayrıca yatay ve dikey olarak ölçüm yapabilmesi sebebiyle hem kapalı alanlarda hem açık alanlarda

kullanıma uygundur. Bölüm 4'te yüksek kazançlı, geniş bant özelliğine sahip ve küçük boyutlarda u-yuvalı mikroşerit anten tasarımları sunulmuştur. Anten kazancını ve bant genişliğini artırmak amacıyla 3B yazıcı teknolojisinden faydalanılmıştır. 3B yazıcı ile üretilen tabaka FR4 malzemenin altına bir katman şeklinde yerleştirilmiştir. Katman üretimi için polilaktik asit (PLA) filament malzemesi kullanılmıştır. Ayrıca son aşamada kazancı daha fazla artırabilmek için yönlendirici elemanlar kullanılmıştır. Bölüm 5'te tekrarlayıcı anten sistemine yer verilmiştir. Bu sistemde dört adet u-yuvalı mikroşerit anten kullanılmıştır. Bu şekilde herhangi bir yönden alınan sinyal başka bir yöne iletebilmektedir. İletimin sağlanmasında anahtarlama elemanı olarak SP4T dijital radyo frekansı (RF) anahtarlama elemanı olan HMC241AQS16 entegresi kullanılmıştır. Bölüm 6'da ise u-yuvalı silindirik mikroşerit anten (USMA) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Özellikle düzlemsel olmayan yerlerde kullanıma elverişli olan silindirik antenin (SA) tasarımında esnek bir yapıya sahip olması sebebiyle dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) 10 olan Rogers AD1000 taban malzemesi kullanılmıştır. Söz konusu malzemenin kalınlığı 0.51 mm'dir. Yine kazancını ve bant genişliğini artırmak için AD1000 altında 3B yazıcı ile alınan polietilen tereftalat glikol (PETG) filamentini kullanılmıştır. Bölüm 7'de tez boyunca imal edilen sistemlerin test ve ölçüm sonuçları verilmiştir. Bölüm 8'de ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

### **1.1. Amaç ve Kapsam**

Günümüz dünyasında artan insan ihtiyaçları ve ilerleyen teknolojik gelişmeler ile insanlar her geçen gün daha iyiye ulaşma çabası içerisinde girmişlerdir. Elbette ki kablosuz teknoloji de bu gelişmelere ayak uydurarak her geçen gün gelişim göstermektedir. Anten tasarımları, üretimleri ve kullanım alanlarındaki ilerlemeler de bu gelişmeler arasında gösterilebilir.

Bu doğrultuda bu tez çalışmasında antenlerin kablosuz bir şekilde üç boyutlu anten ışıma diyagramlarının elde edileceği bir ölçüm sistemi, geniş bir kapsama alanına ve verimli bir sinyal kalitesine sahip, küçük boyutlarda u-yuvalı mikroşerit anten tasarımı, bu anten tasarımı kullanılarak gerçekleştirilecek olan tekrarlayıcı anten modülü ve son olarak yine u-yuvasına sahip küçük yapıda silindirik mikroşerit anten tasarımları yapılması hedeflenmiştir. U-yuvalı mikroşerit anten tasarımları yapılırken bant genişliğini ve kazancı artırmak için 3B yazıcısıyla PLA veya PETG filamentini kullanılarak yama ve



toprak yüzey arasındaki mesafe belirli bir miktarda artırılabacaktır. Gerekli duyulduğu takdirde kazanç artırma işlemi olarak yönlendiriciler kullanılacaktır. Literatüre bakıldığında tasarlanması hedeflenen düzlemsel ve silindirik u-yuvalı mikroşerit antenlerin özellikle geniş bant özellikleri sebebiyle özgün olması öngörülmektedir. Alıcı ve verici iki istasyon arasındaki mesafenin çok uzak olduğu veya bu hat üzerinde sinyalleri bozacak herhangi bir engelin bulunması durumlarında kullanılması için tekrarlayıcı anten modülünün imal edilmesi de oldukça önemlidir. Yine tekrarlayıcı modülde kullanılacak olan dört adet u-yuvalı antenin herhangi birinden alınan verinin bir başka yöne iletilmesi amacıyla dijital anahtarlama elemanı olan SP4T tasarımı ve üretimi yapılması hedeflenmektedir. Hedeflenen tasarımların gerçekleştirilmesi ve üretilmesi durumunda henüz literatürde yer almamış özgün tasarımların ortaya çıkması beklenmektedir.

## 1.2. Literatür Özeti

Brandissou ve arkadaşları 30 MHz ile 18 GHz aralığında ölçüm yapabilen tam otomatik bir sistem önermişlerdir. Bütün bir sistemin temel parametreleri bir klavye aracılığı ile girildikten sonra ölçüm otomatik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [1]. Taygur ve arkadaşları FPGA teknolojisi üzerine bina edilmiş eğitim amaçlı düşük güçlü bir ışıma diyagramı ölçüm sistemi sunmuştur. Sistem herhangi bir bilgisayara doğrudan ihtiyaç duymamaktadır ve tek başına çalışabilmektedir. RF güç ölçümü için Analog Devices firmasına ait AD8318 logaritmik dedektör devresi kullanılmıştır [2]. Anten sistemleri çoğunlukla uzak alan ölçümleri üzerinden gerçekleştirilir. Ancak kimi durumlarda yakın alan ölçümleri de gerçekleştirilebilir. Yakın alan ölçümleri gerçekten yakın alan ile ilgilendiği zaman yapılabilir. Bunun yanında uzak alan için yeterli alanın olmaması veya ölçüm alanının verimli kullanılması amacıyla da yakın alan ölçümleri gerçekleştirilebilir. Yakın alanda gerçekleştirilen ölçümler çeşitli analitik veya numerik tekniklerle uzak alan ölçeğine taşınabilir. Bu kapsamda, Kittiwittayapong ve arkadaşları uzak alan ölçümlerinin yanı sıra yakın alan ölçümleri de gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri sistemle özellikle küçük nesnelere üzerinden gerçekleşen yansımaları incelemişlerdir. Ayrıca yakın alan ve uzak alanda elde ettikleri değerleri karşılaştırmışlardır [3]. Vektör ağ analizörleri (VNA) saçılma parametrelerini ölçmek için sık başvurulan cihazlardır. Antenlerde ise empedans bant genişliği ölçümleri için çok kullanışlıdır. Patel ve arkadaşları, VNA cihazını bir anten diyagramı ölçüm sisteminin temel birimi olarak kullanmışlardır.

Önerdikleri sistem sayesinde 700 MHz ile 18 GHz frekans aralığında ölçüm gerçekleştirebilmişlerdir. Sistem bir bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Bilgisayar VNA'yı kontrol ettiği gibi, doğrusal harekete sahip gönderici anten ve dairesel harekete sahip alıcı anteni de kontrol ederek ölçümleri gerçekleştirmektedir [4]. Emin ve Basbug, ADF4351 ve AD8318 entegre devrelerini esas alarak iki boyutlu bir ölçüm sistemi sunmuşlardır. Bu sistemde ADF4351 ile istenilen frekansta sinyal üretilmekte ve AD8318 logaritmik RF sensör modülü ile bu RF sinyal ölçülmektedir. Sistemin en önemli özelliği kablosuz bir şekilde yönetilebilmesi ve verilerin toplanabilmesidir [5].

Anten sistemlerinin, yerinde ölçümlerinin gerçekleştirilmesi gerçekçi çözümler sunabilmektedir. Bu amaçla son zamanlarda farklı uygulamalar için sıklıkla kullanılan insansız hava araçları (İHA) kullanılabilir. Temel olarak sistem, bir RF güç algılayıcı veya spektrum analizörün İHA üzerine yerleştirilmesi ve elde edilen ölçümlerin İHA'nın konumu ile eşleştirilerek merkezi üniteye gönderilmesi üzerine kurulu bir mekanizmaya sahiptir [6]. Bazı uygulamalarda alıcı ve verici yer değiştirilerek, sürekli dalga verici sistem İHA'nın üzerinde, RF algılayıcı ise yerde sabit olan test altındaki antende bulunmaktadır [7]. İHA ile anten diyagramı ölçümü işlemi kilometre kare diziler gibi pratik çalışmalarda da kullanılmıştır [8]. Ayrıca literatürde aletli iniş sistemi (ILS) ve çok yüksek frekanslı çok yönlü menzil (VOR) ölçümlerini yerinde gerçekleştirmek üzere sekiz pervaneli bir sistemde sunulmuştur [9]. Bahsi geçen sistemlerde ölçümler uzak alan bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Böylece konum hatalarının etkisi azalmış ve yakın alanı uzak alana çevirmek için ayrıca bir prosedüre gerek kalmamıştır. Bu iki avantajın yanı sıra iki dezavantajdan bahsetmek de mümkündür. Birincisi ölçüm yapan İHA uzak alan bölgesinde daha uzun mesafelerde seyahat etmek zorunda kalır. İkinci olarak, antenin doğal ortamında bulunan fiziksel engeller operasyonu güçleştirebilir. Bu iki konuya çözüm getirmek amacıyla yakın alan çözümü önerilmiştir [10]. Bu çalışmada yakın alan algılayıcısına sahip olan bir İHA lazer destekli konum belirleyiciler ile desteklenmiştir. Bu tür çalışmalar için ayrıca tarama stratejileri de araştırılmıştır [11]. Anten arızalarını tespit etmek için İHA ölçüm yöntemi sözü geçen çalışmalarda yer bulmuştur [10, 11]. Özel olarak arızalı elemanın belirlenmesi için yapılan çalışmalar da vardır [12]. Bazı çalışmalarda maliyetleri azaltmak için faz ölçümlerinden kaçınılarak eş zamanlı ölçüm aparatları devreden çıkartılmıştır. Ancak yakın alan uzak alan dönüşümlerinin gerektiği durumlarda faz ölçümü kaçınılmaz olmaktadır [13].

Mikroşerit antenlerin kazancını ve bant genişliğini artırmak adına yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Yama üzerine u-yuvası eklemek bu çalışmalara örnek olarak verilebilir. Liu ve arkadaşları, 60 GHz'de kısa menzilli uygulamalar için kullanılmak üzere u-yuvalı bir anten tasarımı yapmışlardır. Tasarımlarında yüksek kazanç ve yüksek bant genişliği elde etmeyi amaçlamışlardır [14]. Verma ve Ansari bir çalışmada bant genişliğini artırmak amacıyla köşeleri kesilmiş bir u-yuvalı bir anten önermişlerdir. Fakat tasarımını yaptıkları antenin simülasyon sonuçlarına bakıldığında sadece bant genişliğinin değil kazanç değerinin de oldukça iyi olduğu görülmektedir [15]. Li ve Li bir çalışmada, yüksek kazançlı birden fazla u-yuvasına sahip bir anten sunmuşlardır. Bu çalışmada yeni bir yama şekli kullanmışlardır [16]. U-yuvalı antenler iki, üç ve dört bantlı antenler elde etmek amaçlandığında da tercih edilen bir yapı olmuştur. Mok ve arkadaşları, koaksiyel beslemeli olarak tasarladıkları antenlerine iki ve üç adet u-yuvası eklemişlerdir. Bu çalışma ile u-yuvası sayısının bant sayısını artırdığı gözlemlenmiştir [17]. Bant sayısını artırmak amacıyla yapılmış başka çalışmalar da mevcuttur [18-23]. U-yuvalı anten tasarımlarında görülen bir başka farklılık ise besleme şekilleridir. Dehbashi ve çalışma arkadaşları, iki farklı beslemeli u-yuvalı mikroşerit anten tasarımı yaparak bu antenlerin özelliklerini araştırmışlardır. Tasarlanan antenlerden biri dahili beslemeli biri koaksiyel beslemelidir [24]. Benzer şekilde L prob beslemeli [25, 26],  $\pi$  şekilli beslemeli [27, 28] çalışmalar da mevcuttur. U-yuvalı antenlerin literatüre sağladığı katkılar göz önüne alınarak bu türün tasarımında değişiklik yapma çalışmalarına da başvurulmuştur. Örneğin, Deshmukh ve Ray yaptıkları çalışmada geniş bantlı bir dikdörtgen mikroşerit anten tasarlamak amacıyla yarım u-yuvası ve dikdörtgen yuva kesilmesini önermişlerdir. Bu önerilen antenin sadece yarım u-yuvalı veya sadece dikdörtgen yuvalı mikroşerit antene kıyasla iki kat daha fazla bant genişliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca önerilen antenin kazancı 7 dBi'den daha fazladır [29]. U-yuvalı anten tasarımlarında bant genişliğini ekstra artırmak ve kazancı yükseltmek adına anten kalınlığını yükseltmek veya katman sayısını artırmak gibi çalışmalar da mevcuttur [30-32]. Kim ve arkadaşları, kıyafetler üzerinde kullanıma uygun bir anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Taban malzemesi olarak kumaş kullanmışlardır. Hedeflenen ışın yönlendirme özelliği için antende iki pin diyodu kullanmışlardır [33]. Mandala ve Sarkar yaptıkları bir çalışmada kompakt, yüksek kazançlı ve geniş bant genişliğine sahip bir anten tasarlamak amacıyla dairesel bir zemin düzlemine ters u-şekilli bir yuva eklemişlerdir. Taban malzemesi

olarak PTFE kullanmışlar ve anten kalınlığını 1.6 mm olarak ayarlamışlardır. Ölçüm sonuçlarında hedeflenen anten özelliklerine ulaşılmıştır [34]. Morshed ve çalışma arkadaşları bir çalışmalarında Rogers RT5870 taban malzemesi kullanarak 30x30 mm boyutlarında 1.6 mm kalınlığında u-yuvasına sahip yamanın iki kenarına via dizisi yerleştirilerek bir anten tasarımı yapmışlardır [35].

Uzak mesafeler arasındaki engeller sinyal kayıplarına sebep olur ve haberleşmeyi zorlaştırır. Bu kayıpların önüne geçebilmek veya kısmen azaltabilmek adına yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur. Adeunis şirketi bu konuyla alakalı olarak Sigfox Tekrarlayıcı olarak isimlendirdikleri cihazı kullanıma sunmuşlardır. Cihaz hem açık hem de kapalı alanlarda kullanıma uygun olarak tasarlanmış ve ağ menziline genişletme görevini üstlenmiştir [36]. CitySys şirketi de benzer bir ürün ortaya koymuşlardır. Dış mekan uygulamaları için kullanışlı olarak tasarlanan tekrarlayıcı uzaktan kontrole ve durum kontrolü için led göstergelere sahiptir [37]. Pantech Solutions ise bir NRF24L01+ ile iki adet wifi anten kullanarak bir wifi tekrarlayıcı tasarlamışlardır [38]. LoRaWAN ağ kapsamını genişletmek için Atim şirketi bir tekrarlayıcı ortaya çıkarmışlardır. Ürün birden fazla cihaz için çalışabilmektedir. Tek sınırlama cihazların bant genişliğinin aynı olmamasıdır [39]. Khomp şirketi ise kapalı ortamlarda kızılötesi ile çalışan cihazların otomasyonu için bir kızılötesi tekrarlayıcı geliştirmişlerdir [40]. Kim ve arkadaşları LPWAN sistemi için çift bantlı bir tekrarlayıcı sunmuşlardır. Sundukları sistem uç düğüm, RF geçidi ve tekrarlayıcıdan oluşmaktadır [41]. Sisinni ve arkadaşları LoRaWAN ağ kapsamını genişletecek bir tekrarlayıcı sunmuşlardır. Önerdikleri yaklaşımda, gelen mesajların kopyalarını iletmede ne kadarlık bir menzil genişletme yeteneğine sahip olduğu ve gecikmeleri incelenmiştir [42]. Emin ve Basbug, hem kapalı alanlarda hem de açık alanlarda kullanıma uygun olarak çift kanallı bir dijital tekrarlayıcı sunmuşlardır [43].

Düzlemsel olmayan yüzeylerde antenlere ihtiyaç duyulabilmesi veya antenin kullanılacağı alanda gizlenmek istenmesi gibi sebeplerden ötürü literatüre kazandırılmış çeşitli SA çalışmaları mevcuttur. Sahoo, literatürde SA çalışmaları arasında eksenel ve radyal SA tasarımlarının birlikte yapılmaması ve karşılaştırılmaması sebebiyle bir çalışmada batman şekilli radyal ve eksenel SA tasarımları yaparak bu iki tasarımın karşılaştırmasını yapmıştır. Radyal SA'daki bükülme nedeniyle rezonans frekansında daha aşağılara kayma görülmüştür [44]. Goff ve arkadaşları, düzlemsel ve SA çalışmaları

yapmışlardır. Çalışmalarında farklı taban malzemeleri kullanmışlardır. SA'ların yarıçaplarında değişiklikler yaparak sonuçları gözlemlemişlerdir [45]. Silindirik ve düzlemsel anten tasarımları yaparak ikisi arasında karşılaştırma yapılan bir başka çalışma ise Sachdeva ve arkadaşlarına aittir [46]. Liu ve arkadaşları, çalışmalarında iki adet E şekilli SA tasarımı yapmışlardır. Çalışmalarında geniş bant özelliğini elde edebilmek amacıyla eşit kalınlıkta olmayan taban malzemesi kullanmışlardır. Tasarlanan yamaların konumu değiştirilerek sonuçlar değerlendirilmiştir [47]. Chauhan ve Negi bir çalışmada düzlemsel bir anten ile SA karşılaştırması yapmak adına bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Tasarımlarını yama üzerinde sırt sırta verilmiş E ve U şeklinde yuva kullanarak yapmışlardır. Tasarlanan SA'nın diğer antene göre daha düşük bant genişliğine sahip olduğu belirtilmiştir [48]. Kashiwa ve arkadaşları, düzlemsel bir mikroşerit anten ile bir bölümüne kavis verilmiş bir mikroşerit anten tasarımı karşılaştırma çalışması yapmışlardır. Kavisli antenin tasarımını besleme bölümü düz ve yama kısmı eğimli olacak şekilde yapmışlardır [49]. Sahoo ve arkadaşları, iki u-yuvasına sahip mikroşerit hat beslemeli SA tasarımı çalışması yapmışlardır. Farklı yarıçaplara sahip olarak tasarlanan antenlerin karşılaştırması yapılmıştır [50]. Soily ve arkadaşları, üzerinde ikili ve dördü mikroşerit yamasının bulunduğu SA tasarımları sunmuşlardır. İki elemanlı SA'nın bant genişliği 94.07 GHz olurken dört elemanlı SA çift bantlı ve bant genişlikleri 63.3 MHz ve 22.2 MHz olarak elde edilmiştir [51]. Mitra ve arkadaşları, mikroşerit yamaya sahip bir SA tasarımı çalışması yapmışlardır. 3B yazıcı kullanarak esnek ve  $\epsilon_r$ 'si 2.6 olan NinjaFlex taban malzemesi üzerine tasarımlarını gerçekleştirmişlerdir. Antenin yamasında yine 3B yazıcı kullanılarak alınan Electrifi filamentini kullanmışlardır [52].

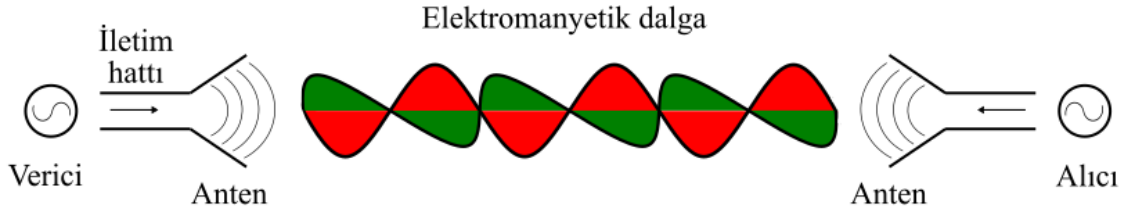
## BÖLÜM 2

### ANTENLER VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde bir anten tasarımı yapmak veya bir antene ait bilgileri okuyabilmek adına öncelikle temel anten bilgileri verilmiştir.

#### 2.1. Antenler

Anten, en genel tanımıyla bir veya bir dizi iletken metal kullanılarak elektromanyetik dalgaların iletim hattı içerisinde yayılmasını sağlayan veya iletim hatlarından gelen sinyallerin dalgalar halinde boşluğa yayılmasını sağlayan cihazlardır. Daha sade şekliyle anten, elektromanyetik enerjiyi alan ve yayan teknolojik cihazlardır [53].

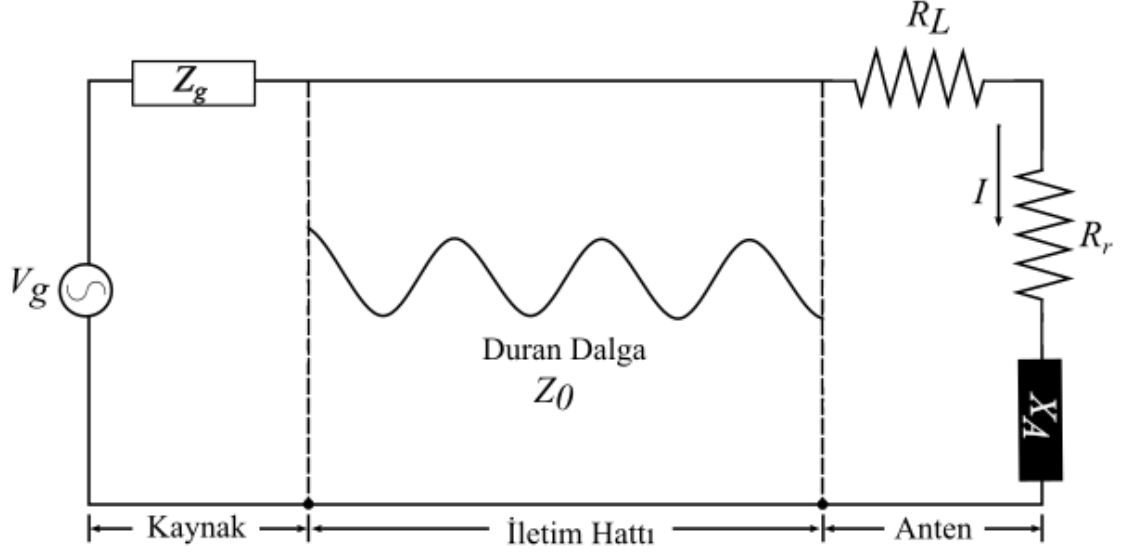


Şekil 2.1. Tipik alıcı verici anten sistemi

Şekil 2.1'de tipik bir alıcı verici anten sistemi gösterilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere bir antenin çalışma prensibi şu şekildedir: Vericide bulunan kaynak bilgisi modüle edilerek yükseltilir ve bir iletim hattı aracılığıyla verici antene iletilir. Verici anten bilgi taşıyan elektriksel sinyalleri elektromanyetik dalgalara çevirerek boşluğa gönderir. Daha sonra alıcı anten tarafından alınan dalgalar bir başka iletim hattı aracılığıyla alıcıya iletilir. Son olarak sinyal demodüle edilerek mesaj alınır. İletim hatları karakteristik empedanslarının uyumuna özen gösterilir [53].

## 2.2. Anten Özellikleri

Şekil 2.2’de bir iletim hattındaki verici antenin eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Verici antenin eşdeğer devresi

Aşağıda verici antenin eşdeğer devresine yönelik parametreleri ve formüsel gösterimleri verilmiştir.

$V_g$  : Verici devrenin çıkış gerilimi (V)

$Z_g$  : Verici devrenin empedansı ( $\Omega$ )

$Z_0$  : Antene giden hattın karakteristik empedansı ( $\Omega$ )

$R_L$  : Kayıp direnci ( $\Omega$ )

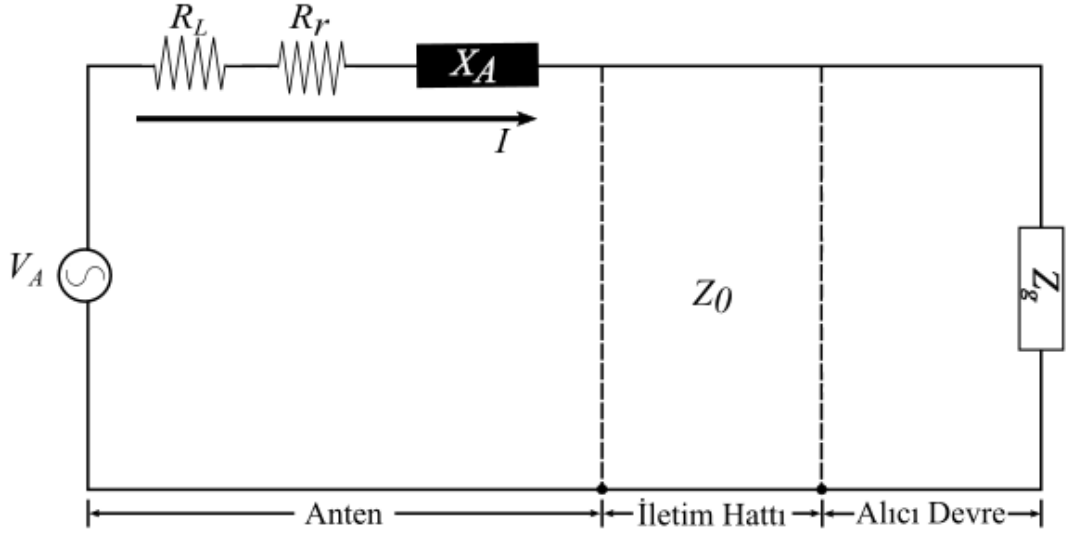
$R_r$  : Radyasyon direnci ( $\Omega$ )

$R_A = R_L + R_r$  : Anten direnci ( $\Omega$ )

$X_A$  : Anten reaktansı ( $\Omega$ )

$Z_A = R_A + jX_A$  : Anten empedansı ( $\Omega$ )

Şekil 2.3’de alıcı antenin eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Alıcı antenin eşdeğer devresi

Aşağıda alıcı antene yönelik eşdeğer devrenin parametreleri ve formüsel ifadeleri verilmiştir.

$h_e$  : Etkin anten uzunluğu (m)

$E$  : Gelen dalganın elektrik alan şiddeti (V/m)

$V_A$  :  $h_e.E$  : Gelen dalga ile indüklenen gerilim (V)

$V_R$  : Alıcı devreye aktarılan gerilim (V)

$R_R$  : Alıcı devre giriş direnci ( $\Omega$ )

$X_R$  : Alıcı devre giriş reaktansı ( $\Omega$ )

$Z_R$  :  $R_R + jX_R$  : Alıcı devre giriş empedansı ( $\Omega$ )

### 2.3. Temel Anten Parametreleri

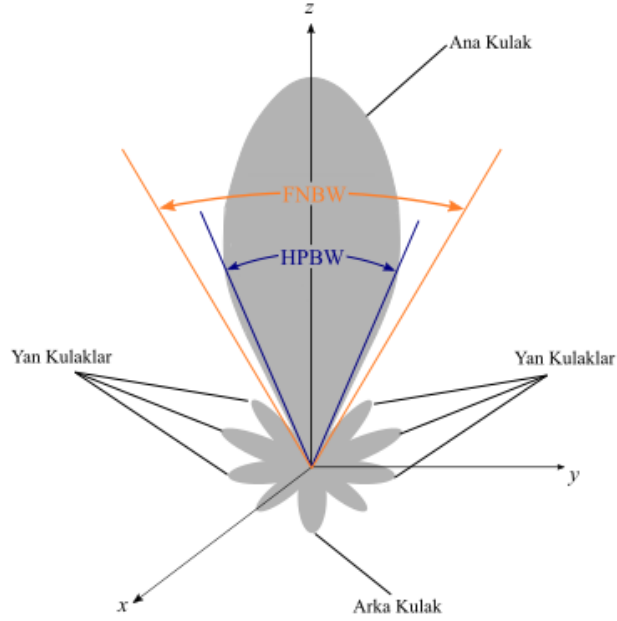
Hemen hemen hayatımızın her alanında yer alan antenlerin gerekli kriterlerde tasarlanabilmesi, doğru ve düzgün sonuçlar elde edilebilmesi için bazı parametrelere ihtiyaç duyulur. Bu parametreler göz önüne alınarak anten tasarımlarının yapılması antenlerin performansında daha belirgin sonuçların elde edilmesine yardımcı olur. Bu kapsamda bu başlık altında temel anten parametre tanımlamaları yapılacaktır.



### 2.3.1. Işıma örüntüsü

Işıma örüntüsü, matematiksel veya grafiksel olarak ifade edilebilen ve antenin ışımaya yaptığı yönün bilgisini veren gösterim olarak ifade edilebilir. Bir antenin ışımaya örüntüsüne bakılarak çeşitli ışımaya özelliği bilgilerine ulaşmak mümkündür. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Güç akı yoğunluğu
- Işıma şiddeti
- Alan genliği
- Yönlülük
- Faz
- Kutuplanma



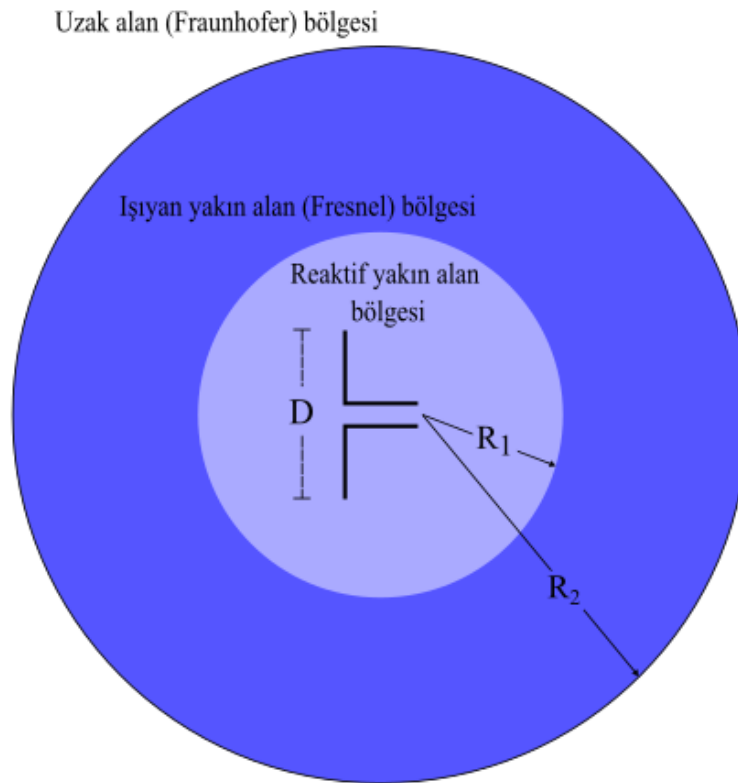
Şekil 2.4. Bir anten örüntüsünün ışımaya kulakları

Şekil 2.4'te bir anten örüntüsünün ışımaya kulakları verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere bir ışımaya örüntüsünün çeşitli kısımları vardır. Bunlardan ilki ana kulaktır. Bu kısım antenin ışımaya yaptığı yönü temsil eder. İkinci kısım olan arka kulak, ana kulağa göre yaklaşık 180° zıt yönde bulunan kulaktır. Üçüncü kısım yan kulaklar ise antenin ışımaya yaptığı yönün dışında yayılan elektromanyetik dalgaların oluşturduğu kulaklardır. Bir

diğer deyişle arzu edilen kulaktan (ana kulak) başka tüm kulaklardır şeklinde tanımlanabilir.

Bir antenin ışımaya örüntüsü ile alakalı olarak hüzme genişliğinden de bahsetmek gerekir. Hüzme genişliği başka bir deyişle demet genişliği, bir örüntünün maksimuma ulaştığı aynı seviyedeki noktalar arasındaki açısal uzaklıktır. Bu uzaklık antenin kalitesini belirler [54]. Hüzme genişliği daraldıkça yan kulak seviyeleri bir o kadar artar [53]. Yarı güç hüzme genişliği (HPBW) bir örüntüdeki ışımaya şiddetinin yarıya düştüğü iki aynı seviyede bulunan nokta arasındaki açıdır. Bir başka hüzme genişliği çeşidi ise ilk sıfır hüzme genişliği (FNBW)'dir.

### 2.3.1.1. Anten alan bölgeleri



Şekil 2.5. Anten alan bölgeleri

Anteni çevreleyen uzay, üç alt bölmeye ayrılmış olup en içten başlayarak sırayla “Reaktif Yakın Alan”, “Işıyan Yakın Alan (Fresnel)”, “Uzak Alan (Fraunhofer)” bölgeleri olarak isimlendirilmişlerdir. Anteni çevreleyen alan kuvveti hem uzaklığa hem de açısal koordinatlara göre değişiklik göstermektedir. Antene yakın olan bölgelerde reaktif güç fazladır ve antenden uzaklaştıkça bu güçte azalma olduğu görülür. Reaktif gücün yoğun

olarak görüldüğü bölge reaktif yakın alan bölgesidir. Reaktif yakın alan bölgesinin ilerisinde kalan bölümler sırasıyla ışıyan yakın alan ve uzak alan bölgeleridir. Işıyan yakın alan bölgesinde ışıyan alanlar baskın olarak görülür. Bu bölge reaktif alan ile uzak alan arasında yer alır. Bu bölgedeki açısal alan dağılımı mesafeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uzak alan bölgesi ise ışıyan yakın alanın tersine açısal alan dağılımının mesafeye bağlı olmadığı bölgedir [55]. Bu bölgeler Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Burada  $D$  anten boyunu,  $R_1$  reaktif yakın alan bölgesi yarıçapını,  $R_2$  ışıyan yakın alan bölgesi yarıçapını ifade eder ve bu ifadeler formüsel olarak:

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (2.1)$$

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilirler.

### 2.3.2. Işıma güç yoğunluğu

Gücün elektromanyetik dalgalarla anlatılması gerekirse anlık Poynting vektörü olarak tanımlanan,

$$W = \mathcal{E} \times \mathcal{H} \quad (2.3)$$

ifadesi kullanılır.

### 2.3.3. Işıma şiddeti

Belirli bir yöndeki ışıma şiddeti, birim katı başına bir antenden yansıyan güç demektir ve formüsel şekliyle ışıma güç yoğunluğu olan  $W_{rad}$ 'ın mesafenin ( $r$ ) karesi ile çarpımından elde edildiği söylenebilir. Matematiksel olarak,

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir.

Işıma şiddetinin bir uzak alan parametresi olması sebebiyle bir antenin yaydığı uzak alan elektrik alanı ile bağdaştırılabilir. Bu şekliyle ışıma şiddeti aynı zamanda,

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2 \quad (2.5)$$

olarak da ifade edilebilir. Burada  $|E(r, \theta, \phi)|$  antenin yaydığı uzak alan elektrik alan şiddeti,  $\eta$  ise ortamın öz empedansıdır.

Yönbağımsız bir kaynak için ışınım şiddeti hesaplanacak olursa elbette ki  $\theta$  ve  $\phi$ 'den bağımsız olarak toplam gücün  $4\pi$  ile bölümünden elde edilerek,

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.6)$$

şeklinde yazılır.

#### 2.3.4. Yönlülük

Yönlülük, enerjinin bir ışınım kaynağı tarafından belirli bir yönde ne derecede iyi yönlendirildiğinin bir göstergesidir. Bununla birlikte yönlülük anten ile ilgili önemli bir talimattır çünkü yönlülük antenin ışınım gücünün hangi yönde yoğunlaştığının bir ölçüsüdür [53]. Yönlülük antenin belirli bir yöndeki radyasyon yoğunluğunun tüm yönlerdeki radyasyon yoğunluğuna oranı olarak ifade edilebilir. Bununla birlikte yönlülük ışınım şiddetinin  $4\pi$  ile çarpımının toplam güce bölümü olarak da tanımlanabilir. Yani formüsel olarak yönlülük,

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır.

#### 2.3.5. Anten verimi

Antenin yapısından kaynaklı olarak antenin giriş uçları arasında bazı kayıplar ortaya çıkar. Bu kayıplar antenler konusunda verimlilik olarak isimlendirilirler ve birkaç tane çeşidi vardır. Bunlar,

- $e_0$  = toplam anten verimliliği
- $e_r$  = yansıma verimliliği
- $e_c$  = iletim verimliliği
- $e_d$  = dielektrik verimliliği

olarak sıralanabilir ve formüsel olarak toplam anten verimliliği,

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir.

### 2.3.6. Kazanç

Bir antenin ne kadar başarılı çalıştığıyla alakalı olarak bir diğer kriter de kazançtır. Matematiksel olarak kazanç ifadesi,

$$G = 4\pi \frac{\text{Işıma Şiddeti}}{\text{Toplam giriş (alınan) gücü}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.9)$$

şeklinindedir. Kayıpsız antenlerde kazanç yönlülüğe eşittir.

### 2.3.7. Duran dalga oranı (VSWR)

Antene verilen gücün bir kısmı yüke aktarılırken bir kısmı kayıplardan kaynaklı olarak yansıtılarak yitirilir. Alıcıdan gücün kayıpsız bir şekilde alınması istenir. Fakat gerçekte dalga kılavuzu ve besleme arasındaki empedans uyumsuzluğu sebebinden ötürü bir yansıma kaybı oluşur [56]. Bu yansıyan gücü tanımlayan kayba duran dalga oranı (VSWR) denir. VSWR,

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.10)$$

şeklinde formüle edilir ve burada yansıma katsayısı  $\Gamma$ ,

$$\Gamma = \frac{Z_{in} + Z_0}{Z_{in} - Z_0} \quad (2.11)$$

olarak yazılır. Burada  $Z_{in}$  giriş empedansını  $Z_0$  ise iletim hattının karakteristik empedansını temsil eder. Formülden de çıkarılabileceği gibi VSWR antenin giriş empedansı ile iletim hattının karakteristik empedansının ne kadar uyumlu olduğunun bir göstergesidir.

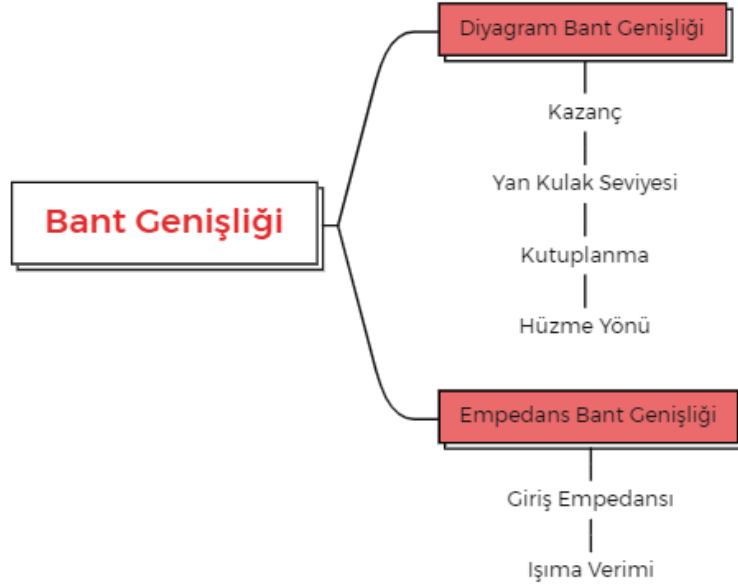
### 2.3.8. Geri dönüş kaybı

Bir antendeki uyumsuzluğu ifade etmenin bir yöntemi olarak geri dönüş kaybı ifadesi kullanılır. Başka bir deyişle, bir iletim hattı üzerinden bir sinyal iletildiğinde iletim hattındaki süreksizlikler nedeniyle sinyal gücünün bir kısmı yansıtılır. Yansıyan bu güce

geri dönüş kaybı denir. Formüsel ifadesi, yansıyan gücün gelen güce desibel (dB) cinsinden oranıdır.

### 2.3.9. Bant genişliği

Bant genişliği bir antenin doğru ve verimli bir şekilde çalışabildiği aralığı ifade eder. Bu aralık antenin kullanılacağı alan veya kullanacak kişi tarafından belirlenir. Fakat bir antenin sağlıklı çalışabilmesi için bir standarda uyması gerekir. Bu standart, antenin yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ) grafiğinde -10 dB'nin altında kalan bölgenin frekans aralığı olarak belirlenmiştir. Bu alan antenin elektromanyetik dalgaları düzgün bir şekilde yayabildiği ve alabildiği frekans aralığıdır. Bununla birlikte bir antende arzu edilen karakteristiğe göre bant genişliği, diyagram bant genişliği ve empedans bant genişliği olarak ikiye ayrılabilir. Bunların ilişkili oldukları konular Şekil 2.6.'da verilmiştir.

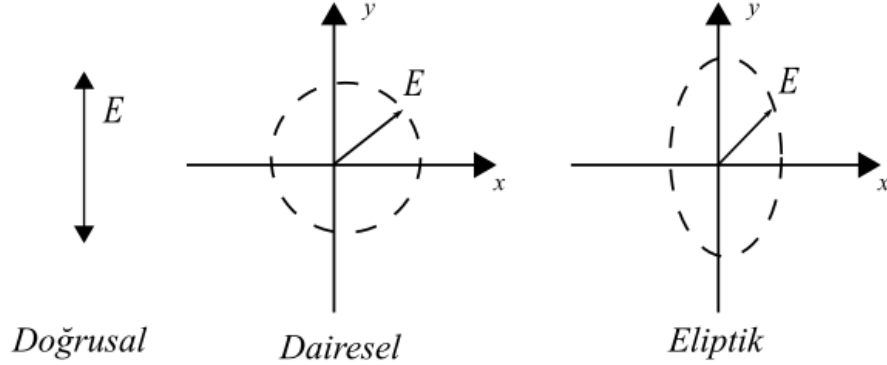


Şekil 2.6. Bant genişliği ayrımı

### 2.3.10. Kutuplanma

Kutuplanma, diğer bir deyişle polarizasyon bir antenden yayılan elektromanyetik dalganın elektrik alanının vektör cinsinden yönü olarak tanımlanabilir. Daha basit haliyle kutuplanma antene gelen veya antenden ışılan enerjinin yönsel bilgisini veren anten parametrelerinden birisidir. Bir alıcı anten ile verici anten arasındaki haberleşmenin iyi olabilmesi için kutuplanmalarının aynı olması gerekir. Aksi takdirde enerji kaybı fazla olacağı için antenlerden alınacak olan verim düşük olur.

### 2.3.10.1. Doğrusal, dairesel, eliptik kutuplanmalar



Şekil 2.7. Dalga Kutuplanmaları

Kutuplanma Şekil 2.7’de gösterildiği gibi doğrusal, dairesel ve eliptik kutuplanmalar olarak üçe ayrılır. Doğrusal kutuplanma, zaman ayırımı yapmaksızın elektrik alan vektörünün aynı yönde ilerlediği kutuplanma türüdür. Dairesel kutuplanmada elektrik alan vektörü zamanla doğru orantılı olarak bir daire çizer ve benzer şekilde eliptik kutuplanmada ise harmonik dalganın zamanla eliptik bir şekil çizdiği görülür. Dairesel ve eliptik kutuplanmaların elektrik alan vektörünün oluşturduğu şekil saat yönünde (CW) dönüyorsa sağ el kutuplanma, saat yönünün tersine (CCW) dönüyorsa sol el kutuplanma olarak adlandırılırlar.

### 2.3.11. Giriş empedansı

Giriş empedansı, bir antenin uçları arasındaki empedanstır. Başka bir açıklama olarak giriş empedansı (klasik empedans formülü düşünerek) antenin uçlarındaki gerilimin akıma oranıdır şeklinde de tarif edilebilir. Matematiksel olarak giriş empedansı,

$$Z_A = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_A + jX_A \quad (2.12)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $Z_A$  anten empedansı,  $V_{in}$  anten girişindeki gerilim,  $I_{in}$  anten girişindeki akım,  $R_A$  anten direnci ve  $X_A$  anten reaktansıdır. Verimli bir enerji iletimi için anten ile anteni birbirine bağlayan iletim kablosunun empedansının aynı olması gerekir. Alıcı-vericiler ve iletim hatları tipik olarak  $50\Omega$  empedansta çalışacak şekilde tasarlanmışlardır.

### 2.3.12. Anten ışıma verimi

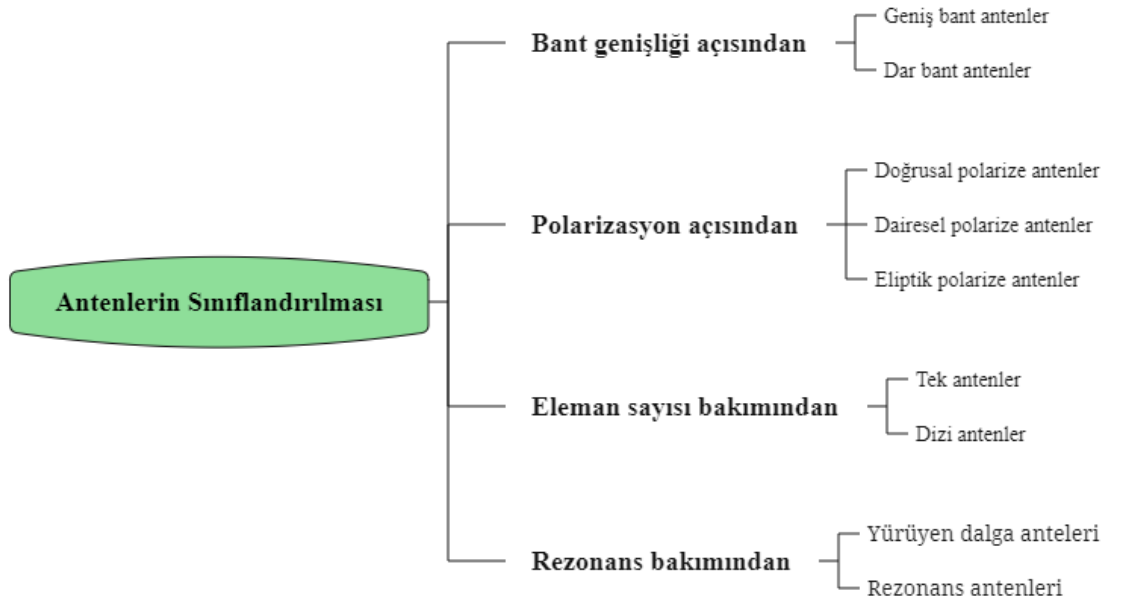
Antene gelen enerjinin bir kısmı bazı durumlardan ötürü kaybedilir. Bunlardan birincisi ısı kayıptan kaynaklanan durumdur. Yani anten gelen enerjinin bir kısmını ısıya çevirir ve kayıp olarak harcar. Diğer bir durum ise antende gerçekleşen empedans uyumsuzluğu sebebiyle oluşan kayıplardır. Bu durumda enerjinin bir kısmı ışıma gücüne katılmaz ve yansımaya sebep olur. Bahsedilen bu durumlardan sonra kalan enerji antenin ışıma gücünü oluşturur [57]. Işıma verimi  $e_{cd}$  ile tanımlanır ve formüsel gösterimi,

$$e_{cd} = \left[ \frac{R_r}{R_L + R_r} \right] \quad (2.13)$$

şeklindedir.

### 2.4. Anten Tipleri

Kablosuz iletimin başladığı günden itibaren günümüze kadar binlerde anten çeşidi tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu kapsamda antenlerin basit bir sınıflandırılması Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Antenlerin Sınıflandırılması



#### **2.4.1. Tel antenler**

Tel antenler, haberleşme dünyasında ve hatta günlük hayatta en sık kullanılan anten tipidir. Tel antenler, dipol, halka veya helezon gibi farklı şekillerde karşımıza çıkabilirler. Dipol tel antenler, basit bir yapıya sahip olmalarına rağmen en çok kullanılan anten türlerinden birisidir. İki iletken metal yapının aynı doğrultuda duracakları şekilde iletken olmayan bir yapının desteğiyle birbirine tutturulması ile dipol anten yapısı oluşur. Dipollerin en sık kullanılanı yarım dipol antenlerdir. Halka tel antenler, basit bir yapıdadırlar ve çok yönlü antenlerdir. Dipol antenler açık uçlu iletim hattından geliştirilmiş bir yapılandırma olmasına rağmen halka tel antenler, kısa uçlu iletim hattından geliştirilmiş bir anten yapılandırmasıdır. Dipol anten ile halka antenin bir türevi olarak helezon anten ortaya çıkmıştır. Helezon anten sarmal bir şekle sarılmış anten yapısına sahiptir. Dairesel/eliptik polarize bir antendir [53].

#### **2.4.2. Açıklık antenleri**

Son zamanlarda yaşanan teknolojik gelişmeler neticesinde yüksek frekanslarda çalışabilen antenlere ihtiyacın artmasıyla açıklık antenlerinin kullanımında geçmişe oranla artış görülmektedir. Montaj edilebilme yetenekleri sayesinde özellikle uzay ve havacılıkta uçak ve uzay araçlarına monte edilerek kullanılırlar. Piramit huni, konik huni ve dikdörtgen dalga kılavuzu açıklık antenlerin bazı türleridir.

#### **2.4.3. Mikroşerit antenler**

Mikroşerit antenin basit bir tanımı ile başlamak gerekirse iletken bir metal yama ile bir toprak düzleminden oluşan anten yapısına mikroşerit anten denir. Kullanılan yama şekilleri farklı formlarda olabilmektedir. Fakat tasarım, simülasyon ve imalat kolaylığı sebeplerinden ötürü daha çok dikdörtgen ve dairesel yamalar tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasının konusunun u-yuvalı mikroşerit yama antenler olması sebebiyle sonraki bölümde mikroşerit antenler daha ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

#### **2.4.4. Dizi antenler**

Bazı durumlarda bir anten için arzu edilen ışınma özelliklerinin karşılanması tek bir eleman ile sağlanamamaktadır. Bu sebeple istenen ışınma özelliklerini sağlamak amacıyla anten tasarımında bir dizi eleman kullanılabilir. Bu türe örnek olarak bir dizi yönlendirici

eleman kullanılarak oluşturulan Yagi-Uda anteni, birkaç yama bir araya getirilerek oluşturulan mikroşerit yama anten dizisi, açıklık dizileri ve yarıklı dalga kılavuzu dizileri verilebilir.

#### **2.4.5. Yansıtıcı antenler**

Yansıtıcı antenler diğer antenlere nazaran çok daha uzak mesafelerde iletişimin sağlanabilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Yansıtıcı antenler ile milyonlarca kilometre uzaklıklara bir sinyalin gönderilmesi ya da alınması mümkündür. Bu türde daha çok parabolik yansıtıcılar tercih edilse de köşe yansıtıcıların kullanıldığı yerler bulunmaktadır. Elbette ki bu kadar uzak mesafeler için çalışan bu anten türü boyutsal olarak diğer antenlere kıyasla çok daha büyüktür.

#### **2.4.6. Lens antenler**

Lens antenler, gelen enerjinin arzu edilen yönlerde yayılmasının istendiği durumlarda kullanılan bir anten türüdür. Lens antenler, parabolik yansıtıcıların kullanıldığı alanlarda da kullanılabilirler. Düşük frekanslarda tasarımı yapılan lens antenlerin boyutları ve ağırlıkları çok büyük olur.

## BÖLÜM 3

### KABLOSUZ VE ÜÇ BOYUTLU ANTEN DİYAGRAMI ÖLÇÜM SİSTEMİ

Kablosuz haberleşme teknolojisinin ana unsurlarından birisi antenlerdir. Antenler bilimsel çalışmalarda kullanılmasının yanı sıra günlük hayatta da pek çok yerde karşılaşılan ve kullanılan cihazlardır. Verici tarafında çalışan bir anten, iletim hattı üzerinden kendisine ulaşan sinyalleri elektromanyetik dalgalara dönüştürerek boşluğa gönderme vazifesine sahiptir. Bir alıcı antenin görevi ise boşluktan yayılarak gelen elektromanyetik dalgaları elektriksel sinyallere çevirerek alıcı devreye iletmektir. Karşılıklılık ilkesine bağlı olarak bir anten aktif eleman içermediği sürece hem alıcı hem verici olarak kullanılabilir. Bu özellik anten tasarımı ve imalatı için önemli bir avantajdır. Başarılı bir anten tasarımı ve üretimi gerçekleştirebilmek için temel anten tasarım parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi önemli bir kriterdir. Bu parametrelerden en önemlileri empedans bant genişliği ve ışınım diyagramıdır. Empedans bant genişliği VNA ile ölçülebilir. Cihazın gerekli kalibrasyonları yapıldıktan sonra belirli bir frekans aralığı için yansıma katsayısı ölçümü yapılarak empedans bant genişliği değeri elde edilir. Antenin ışınım diyagramının elde edilmesi nispeten daha karmaşık ve zahmetli bir süreçtir. Işınım diyagramı ölçümü için elde edilen verinin keyfiyeti açısından iki farklı uygulama yöntemi söz konusudur. Birinci uygulama yöntemi bir düzlem üzerinde gerçekleştirilen ölçümleri içerir. Bu ölçümler iki boyutlu RF güç değerlerinden ve açı bilgilerinden oluşur. İkinci uygulama yönteminde ise ölçüm hacimsel olarak planlanır ve sabit yarıçaplı bütün bir küre üzerinde gerçekleştirilir. Elde edilen sonuçlarda RF güç değerlerine karşılık gelen açısız bilgiler üç boyutlu bir sistemi kapsayacak şekilde iki farklı açıdan oluşur. Bu elde edilen sonuçlar ile antenin hangi yöne, ne kadarlık bir güçle ışınım yaptığı bilgisi elde edilir. Ölçümün yapıldığı mekan açısından da ölçüm sistemleri ikiye ayrılır. Bunlar, kapalı mekanlarda yapılan ölçümler ve dış (açık) mekanlarda yapılan ölçümlerdir. Kapalı mekanlarda yankısız bir odaya ihtiyaç duyulur. Çünkü ortamda bulunan nesnelere yansıyan elektromanyetik dalgaların olabilme ihtimali sağlıklı bir ölçüm yapabilmeyi engeller. Bu sebeple yankısız oda olarak isimlendirilen, duvarlarına soğurucu elemanlar monte edilmiş odaların kullanılması daha doğru sonuçların elde edilmesine yardımcı olur.

Anten doğası gereği üç boyutlu bir yapıya sahip olması sebebiyle bu yönleri tanımlayabilmek için irtifa ve istikamet açılarını kullanmak uygundur. Açılardan birini sabit tutarak diğerini bir düzlemde  $360^\circ$  tarayarak iki boyutlu ışın diyagramı grafiği elde edilir. Genelde iki boyutlu bir ışın diyagramı antenin ışın karakteristiği ile alakalı tatmin edici bir bilgi verir. Ancak bunun için ölçümü yapılan anten ile alakalı çeşitli ön bilgilere sahip olunması gerekir. Özellikle asıl antenin yönünün dışında kalan diğer yönlerdeki ışın karakteristikleri ile alakalı doğru kabullerin yapılması önemlidir. İki boyutlu diyagramlar, çoğunlukla görsellerin sayılarla daha iyi ifade edilmesine olanak sağlar. Ayrıca sayfa ve ekran gibi iki boyutlu gösterim alanlarıyla ifade edilmesi de daha uygundur. Bu sebeplerden ötürü tercih edilirler. Elbette ki anten ışın karakteristiğini en iyi yansıtan görsel kuşkusuz üç boyutlu anten diyagramlarıdır. Üç boyutlu anten diyagramı elde etmek simülasyon ortamlarında oldukça kolaydır. Fakat ölçüm sistemleri ile üç boyutlu diyagramlar elde etmenin oldukça güç olduğu aşikardır. Üç boyutlu anten sistemleri için aşılması gereken iki önemli husus vardır. Birincisi kapalı ortamlarda doğru ölçüm sonuçlarının elde edilebilmesi için yankısız ortam gerekliliğidir. Bu sorun ölçümün yankısız ortamlarda gerçekleştirilmesi ile çözülebilir. Fakat bu ihtiyacın oldukça maliyetli olması her çalışma ortamı için mümkün olmamaktadır. İkincisi ise uzaysal veri elde etmek için sahip olunması gereken elektro-mekanik sistemin yani diyagram ölçümünün her yönden yapılabilmesi için hem irtifa hem istikamet açılarında uyum içerisinde hareket edebilen bir mekanizmanın tasarım güçlüğüdür.

Bu bölümde, temel anten parametrelerinden biri olan ışın diyagramının ölçümünü yankısız bir ortama ihtiyaç duymadan ve kullandığı kablosuz kontrol yöntemi ile mekanik aksamın hareketini kolaylaştırarak üç boyutlu olarak yapabilen bir sistem tasarımı yapılmış ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu sistem ile hem mikroşerit antenlerin hem de uygun ebatlardaki tüm anten çeşitlerinin belirli bir frekans aralığında üç boyutlu ışın diyagramını ölçmek mümkündür. Ölçüm sistemi iki önemli özelliğe sahiptir. Bunlardan birincisi, ölçüm sırasında yankısız bir odaya ihtiyaç duyulmamasıdır. Ölçüm yapılan ortamdaki çevresel unsurlardan yansıyarak oluşan elektromanyetik dalgalar sonuçları olumsuz etkileyebilir. Bu sorunun önüne geçmek için genellikle duvarlarında elektromanyetik dalgaları soğuran özel piramit yapıların bulunduğu yankısız odalar kullanılır. Ancak yankısız odalar, imalat zahmeti ve maliyeti gibi sebeplerden ötürü her zaman kullanılabilir bir çözüm yöntemi değildir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen

sistem ile bu önemli sorunun önüne geçilmiştir. Bununla birlikte geliştirilen sistem ile bu ihtiyaca alternatif olarak dikeyde gerçekleştirilen bir ölçüm yöntemi de sunulmaktadır. Yani sistem hem uygun kapalı mekanlarda hem de açık alanlarda ölçüme uygun olarak tasarlanmıştır. Yankısız odalarda veya kapalı geniş mekanlarda yatay olarak kullanılabilen sistem, açık alanlarda gökyüzüne doğru çevrilerek dikey olarak kullanılabilir. Burada gökyüzü elektromanyetik soğurucu vazifesi görmektedir. Dikey olarak ölçüm yapılırken alıcı konumunda test altındaki anten gökyüzü istikametine yerleştirilerek ölçüm yapılır ve bu yöntem ile verici antenden alıcıya ulaşan elektromanyetik dalgaların çevresel etkenlerden kaynaklı olarak yansıyor tekrar vericiye ulaşma ihtimali minimum seviyeye indirilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen ölçüm sisteminin bir başka avantajı ise sistemi oluşturan bileşenlerin modülerliğidir. Bileşenler arasında kablo bağlantısı yoktur ve her bir bileşenin kendi güç kaynağı ve kablosuz haberleşme sistemi vardır. Güç kaynakları lipo pillerden ve bu pilleri kumanda eden devrelerden oluşmaktadır. Söz konusu devreler lipo pillerin tamamen bitip kullanılamaz hale gelmesini veya tehlikeli kimyasal tepkimelere yol açmasını önlemektedir. Sistemin temel bileşenleri merkez bilgisayar ile kablosuz modüller aracılığı ile haberleşmektedir. Bu da sistemi daha modüler hale getirmektedir. Modülerlik sistemin taşınabilirliğini artırdığı gibi bileşenlerin sahip olması gereken hareket kabiliyetinin de yükselmesine olanak sağlamaktadır. Üç boyutlu bir ölçüm sisteminin genel olarak iki farklı eksen ve en az birinin tam bir dönüş yapması beklenir. Geliştirilen sistemde hareketli aksam konum sensörleri ve adım motorları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Hareketi sağlayan adım motor sensörleri ise kontrol sinyallerini kablosuz olarak merkez bilgisayar ile haberleşme halindeki mikrodenetleyicilerden almaktadır. Elde edilen ölçüm değerleri yine kablosuz modüller aracılığı ile merkez bilgisayarda işlenmektedir. Veriler grafiksel olarak da sergilenebilmektedir.

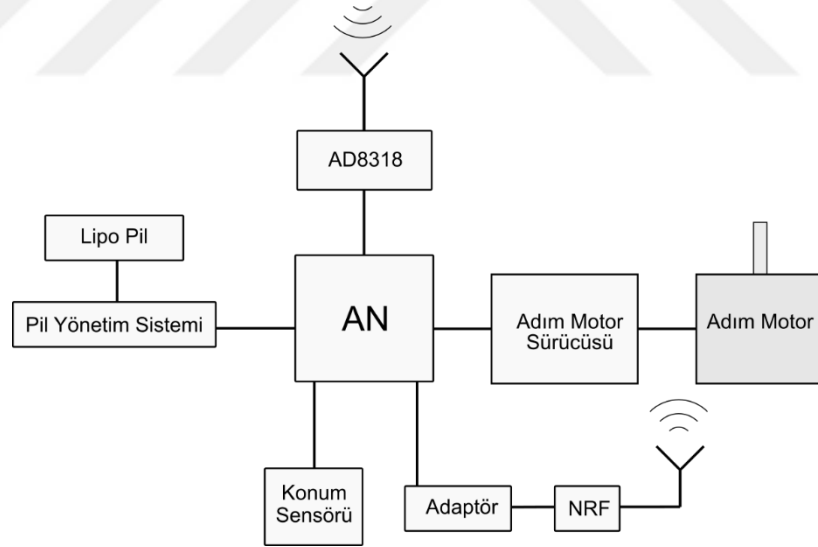
Bu tez kapsamında tasarımı ve imalatı yapılan kablosuz ve üç boyutlu diyagram ölçüm sistemini dört ana başlıkta incelemek mümkündür. Bunlar;

- Alıcı modül
- Verici modül
- Hareketli Aksam
- Merkezi bilgisayar

Alıcı modül, klasik kontrol elemanlarının yanı sıra logaritmik bir sensör içermektedir. Verici modül belirli bir frekans aralığında sinyal üreten bir entegre devre modülüne sahiptir. Aynı zamanda geniş bant özelliğine sahip bir Vivaldi anteni iletim için kullanılmıştır. Hareket modülleri de diğer modüller gibi bağımsız olarak çalışabilme özelliğine sahiptir. Birbirinden elektriksel ve mekanik olarak bağımsız olarak çalışan her bir modül bir merkez bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir.

### 3.1. Alıcı Modül

Alıcı modülün merkezinde bir Arduino Nano (AN) mikrokontrolcü bulunmaktadır. AN kullanımı kolay ve pratik bir elektronik karttır. Bununla birlikte üst seviye mikroişlemci bilgisi gerektirmez. Bir AN'nin kullanım kolaylığı, kolay ulaşılabilir olması gibi sebeplerden ötürü çok çeşitli alanlarda çalışmalar mevcuttur. Alıcı modül içerisinde AN kablosuz haberleşme, adım motorun hareketi, ölçümlerin alınması ve konum sensörünün takibi gibi bütün kontrol ve koordinasyon görevlerinden sorumlu olan cihaz olarak kullanılmıştır. Şekil 3.1'de alıcı modülün görev taksimi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Alıcı modül blok şeması

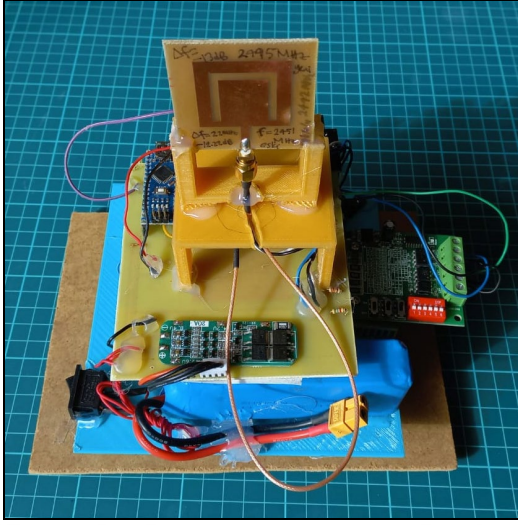
Her ne kadar AN kontrol açısından sistemin merkezinde olsa da, alıcı modülün en kritik görevi AD8318 entegre devresine sahip birime aittir. AD8318 entegre devresi, RF giriş sinyallerini bu sinyale karşılık gelen dB ölçekli çıkış voltajına dönüştüren bir logaritmik amplifikatördür [58]. Diyagram ölçüm sisteminde AD8318 entegre devresinin bulunduğu birim RF güç ölçümünü 1 MHz ile 8 GHz arasında logaritmik olarak gerçekleştirmektedir. AD8318'in gerçekleştirdiği ölçüm analog çıkış bacağı ile AN'nin

analog dijital dönüştürme özelliğine sahip bacağına ulaşır. AN içerisindeki yazılım sayesinde hesaplanan bu değer doğrusal bir tablo aracılığı ile dBm değerine çevrilir.

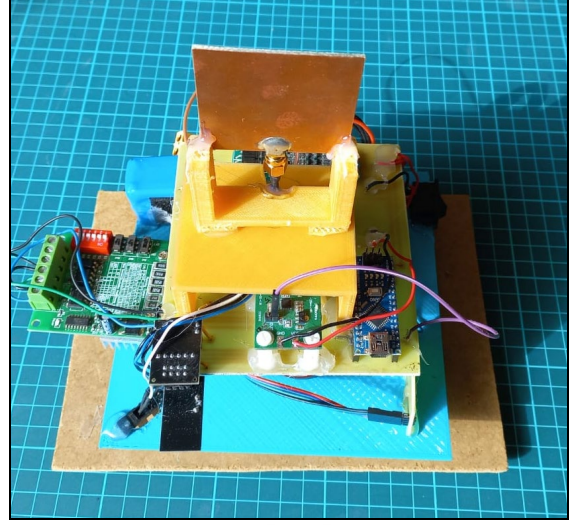
Ölçüm adım motorlar aracılığıyla hassas bir şekilde belirli yönlerin taranması esnasında kademe kademe sırası ile gerçekleştirilir. Adım motor sürücüsü (TB6560) yön ve sinyal darbesi bacakları ile kontrolü kolaylaştırdığı gibi gerekli gücü de adım motora sağlamaktadır. Adım motor sürücüsü üzerindeki donanımsal anahtar ayar sistemi, kullanılacak olan akımı, durdurma akımını ve adım sayısı ayarlarını yapmaya imkan tanımaktadır.

Her ne kadar Nema 17 adım motorunun adımları hesaplanarak dönüş konumunun nerede olduğu anlaşılabilse de, herhangi bir istenmeyen sapma veya gecikme olasılığına karşı optik bir sensör vasıtası ile hareket başlangıç konumuna kalibre edilmiştir. Lipo pil diğer modüllerde olduğu gibi alıcı modülde de güç kaynağı olarak kullanılmıştır. Alıcı modülde kullanılan pil 3S özelliğine sahiptir. Enerji kaynağının bağımsız bir şekilde kullanılması modülerliği ve hareket kabiliyetini arttırmaktadır. Lipo pilin kimyasal özelliğinden dolayı gücünü tamamen yitirmesi veya sahip olduğu üç hücrenin dengesiz kullanılması hem pilin kullanım ömrünü azaltmakta hem de güvenlik açısından çeşitli sakıncalar ortaya çıkarmaktadır. Bu tür olumsuzluklarla karşılaşmamak amacıyla ölçüm sistemi için tasarlanan alıcı modülde bir pil yönetim sistemi devresi kullanılmıştır. Bu devreye her bir hücreden ayrı ayrı ulaşan farklı seviyelerdeki gerilimler tek bir gerilim olarak güvenli bir şekilde sisteme iletilmektedir. Sistem üzerindeki AD8318, AN ve adım motor sürücüsü gücünü doğrudan pil yönetim sisteminden alırken, NRF24L01+ (NRF) adaptörü ve konum sensörü ihtiyaç duyduğu enerjiyi AN'nin bacaklarından almaktadır.

NRF modülü kablosuz olarak merkez bilgisayar ile haberleşmeyi sağlamaktadır. Bu haberleşme çift yönlüdür. Merkez bilgisayardan gelen komutlar NRF aracılığıyla AN'ye ulaştırıldığı gibi, ölçüm sonuçları da sistemden merkez bilgisayara aktarılmaktadır. Resim 3.1'de tasarlanıp imal edilen alıcı modülün fotoğrafları gösterilmektedir.



(a)

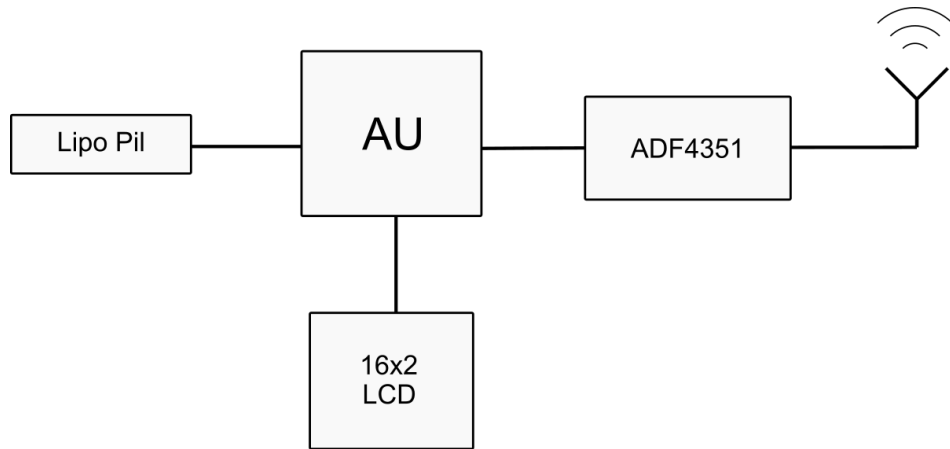


(b)

Resim 3.1. Alıcı modülün imal edilmiş prototipinin ön (a) ve arka (b) yüzey fotoğrafları

### 3.2. Verici Modül

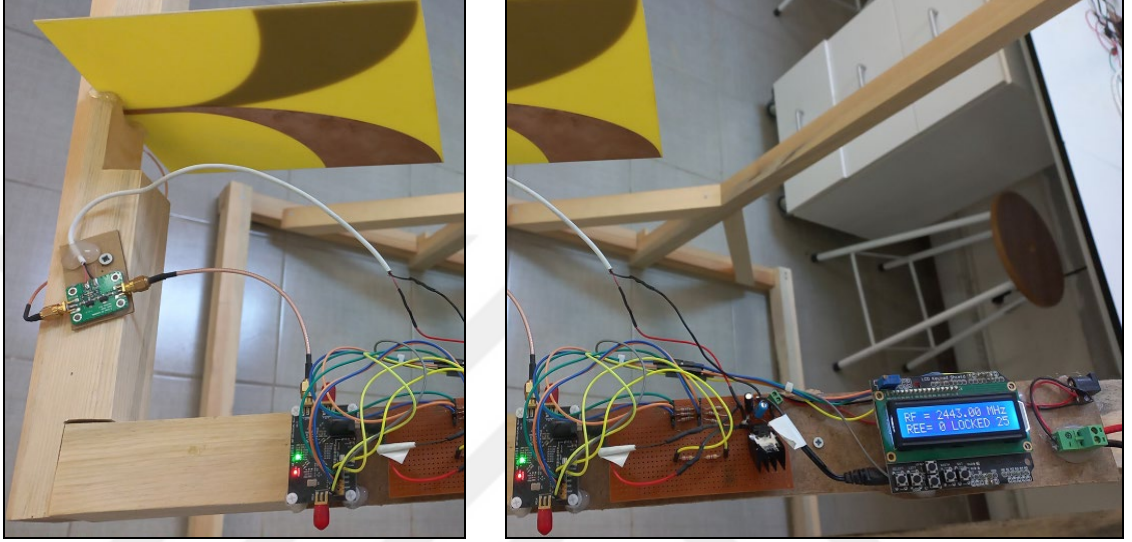
Verici modül ölçüm sisteminin alt kısmına sabit bir şekilde monte edilmiştir. Verici modülün temel bileşenleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Verici modül de yine bağımsız lipo pille beslenen bir Arduino Uno (AU) aracılığı ile kontrol edilmektedir. Bu birimin esas amacına yönelik en önemli parçası ADF4351 sinyal üretici entegre devre modülüdür. Bu modül 35 MHz ile 4400 MHz arasında sinyal üretebilme kabiliyetine sahiptir [59]. Bu modülden çıkan sinyaller başarıyı artırmak amacıyla ayrıca bir RF güç yükseltici ile yükseltilmektedir.



Şekil 3.2. Verici modül blok şeması



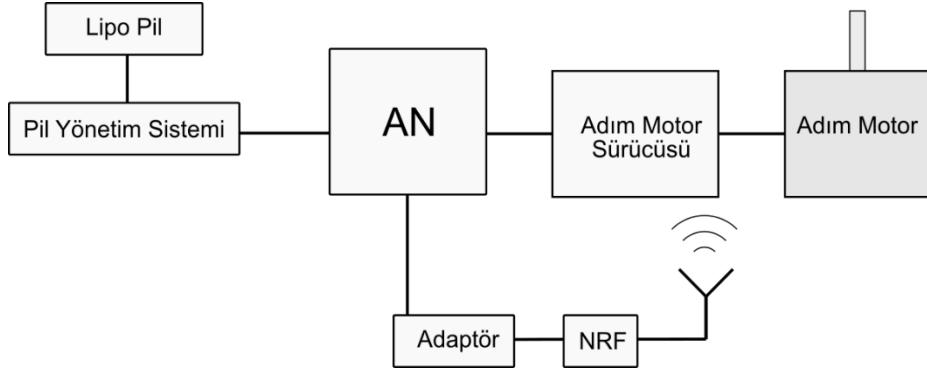
Verici modülün üreteceği ve göndereceği sinyale ait frekans değerlerinin izlenip manuel olarak kontrol edilebileceği bir LCD ekran bulunmaktadır. AU hem LCD hem de ADF4351'i yönetmektedir. ADF4351'de üretilen sinyalleri göndermek için kullanılan Vivaldi anten tez kapsamında üretilmiştir. Söz konusu antenin ve verici modülün fotoğrafı Resim 3.2'de gösterilmektedir.



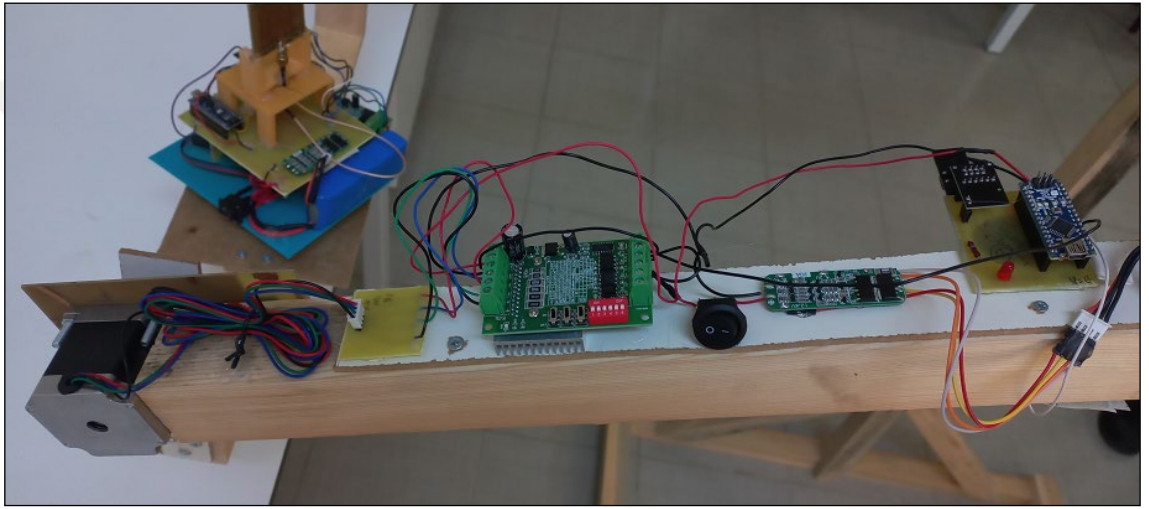
Resim 3.2. Verici modülde kullanılan Vivaldi anten ve verici elektronik devresi

### 3.3. Hareketli Aksam

Ölçüm için gerekli iki eksenli hareketi sağlayan ünitenin özet şeklinde blok şeması Şekil 3.3'te verilmiştir. Lipo pil yönetimi alıcı devrede olduğu gibidir. Doğası gereği bu modülde güç sarfiyatı çok fazladır çünkü alıcı üniteyi de hareket ettirmekle görevli birimdir. Daha fazla mekanik güce ihtiyaç olduğu için bu üniteye Nema 23 adım motoru tercih edilmiştir. Adım motor sürücüsü olarak yine TB6560 modülü kullanılmıştır. Alıcı antenin kendi ekseninde her bir tam tur dönüşünden sonra hareketli aksam diğer ekseninde bir kademe hareket eder. Hareket komutunu merkez bilgisayardan alır ve böylece koordinasyon sağlanır. Kablosuz olarak merkez bilgisayarla gerçekleştirilen bağlantı NRF modülü ile sağlanır. NRF modülünün stabil bir şekilde çalışabilmesi için bir adaptör kullanılmıştır. Ölçümü etkilememek için NRF modülü sadece ölçümün gerçekleşmediği zaman aralığında aktif bir şekilde haberleşme gerçekleştirilmektedir. NRF modülü AN birimine seri çevre birimi arayüzü (SPI) aracılığı ile bağlanmıştır. Resim 3.3'te imal edilip montajı yapılmış olan hareketli aksamın fotoğrafı sunulmuştur.



Şekil 3.3. Hareketli aksamın blok şeması



Resim 3.3. Hareketli aksamın fotoğrafı

### 3.4. Merkez Bilgisayar

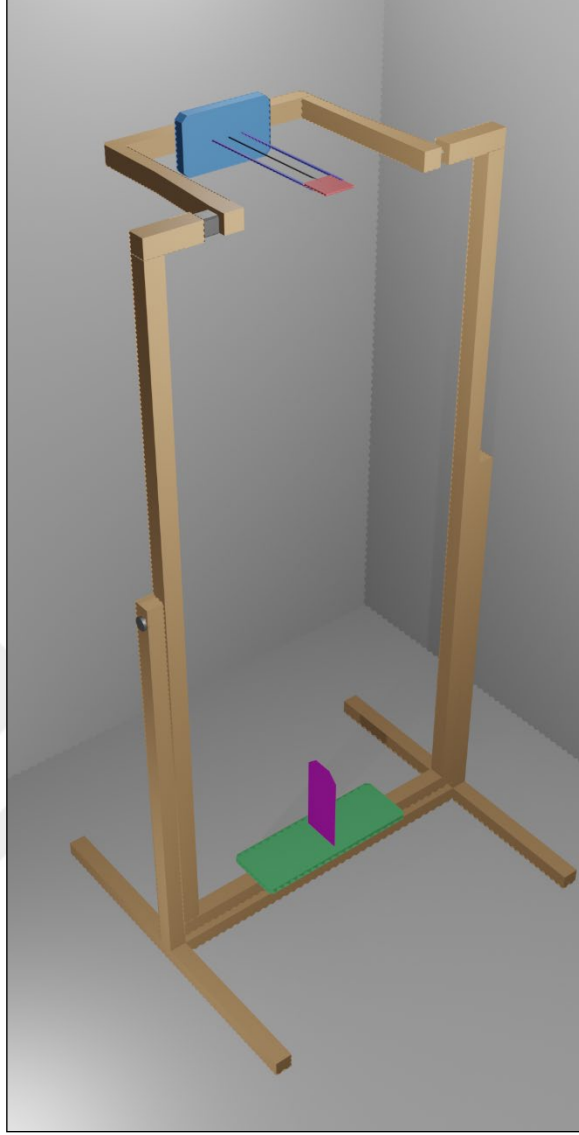
Üç boyutlu ölçüm sisteminin bütün kontrolü kablosuz olarak bir merkez bilgisayar tarafından gerçekleştirilmektedir. Kontrol bilgisayarın USB portuna bağlı bir NRF modül seti aracılığıyla kablosuz bir şekilde sağlanmaktadır. NRF modül seti sadece arabirim olarak kullanılmaktadır. NRF için gerekli olan gücü stabil bir şekilde sağlayabilmek amacıyla uygun bir NRF adaptörü kullanılmıştır. Merkez bilgisayar için tez kapsamında geliştirilen yazılımda Java programlama dili kullanılmıştır. Java programlama dilinde ihtiyaç duyulan seri haberleşme için jSerialComm kütüphanesinden faydalanılmıştır. Aktif haberleşme görevi için SwingWorker sınıfının bir nesnesi oluşturulmuştur. SwingWorker yardımı ile arabirimin pasif halde kalması engellenmiş ve kullanıcıya uygun bir çalışma ortamı sunulmuştur. Merkez bilgisayar temel olarak iki eksenli hareketin koordinasyonunu yaparken ölçümü gerçekleştirme görevini yerine getirir. Bunun için öncelikle alıcı sisteme bir tam tur dönme emrini kablosuz olarak gönderir.

Tam tur dönüş işlemi bittiğinde alıcı sistem sahip olduğu NRF aracılığı ile merkez bilgisayara elde ettiği sonuçları gönderir. Sonuçlar ve komut haberleşmesi sadece ölçümün yapılmadığı zamanlarda gerçekleştirilir. 200 adımda gerçekleşen tam bir dönüş doğal olarak  $1.8^\circ$ 'de bir ölçüm değeri geri döndürür. İlk turdan hemen sonra merkez bilgisayar diğer ekseni harekete geçirerek bir kademe ilerleme emri verir. İkinci tur ölçüm bu bir kademe hareketten sonra gerçekleştirilir. Bu görev süreci  $180^\circ$ 'lik bir yarım tur boyunca gerçekleşir ve tamamlandığında tam bir küre yüzeyi taranmış olur. Böylece üç boyutlu bir ölçüm gerçekleşmiş olur.

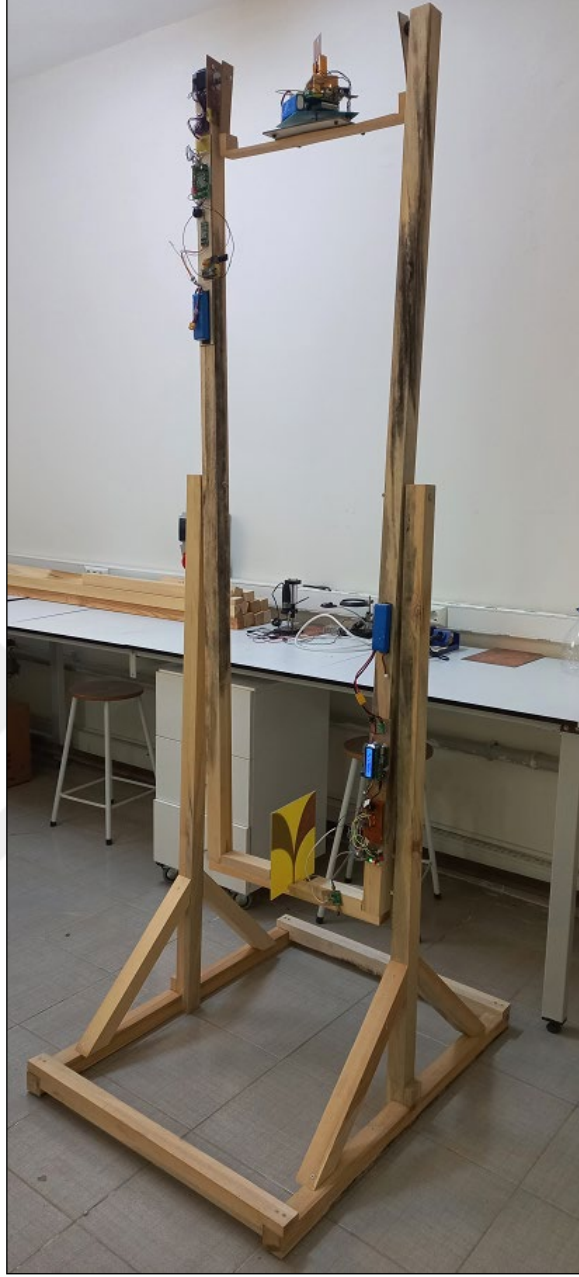
Verilerin tamamı merkez bilgisayara ulaştığında tez kapsamında geliştirilen yazılım sayesinde veriler tablolar halinde tasnif edilir. Elde edilen veriler üç boyutlu sanal bir uzay içerisinde noktalar halinde belirlenir. İlk ölçüm noktaları öncelikle  $x-y$  düzlemi üzerine yerleştirilir. Her bir kademede elde edilen diğer düzlem değerleri  $z$  ekseni de dikkate alınarak hesaplamalar neticesinde üç boyutlu uzaya dağıtılır. Noktaların yerleştirilmesi ile üç boyutlu görüntü elde edilmiş olur. Ancak bu görüntü katı bir üç boyutlu yapı oluşturmakta yetersiz kalır. Bu yüzden her bir nokta üzerinden uygun şekilde üçgen hücreler ile yüzey kaplaması yapılır. Her bir yüzey bağlı bulunduğu üç noktanın ortalama değerine göre kırmızıdan maviye kadar bir renk aralığına sahiptir. Kırmızı yüksek değerleri mavi ise düşük değerleri ifade etmektedir.

### **3.5. Ölçüm Sisteminin Genel Yapısı**

Tez kapsamında geliştirilen ölçüm sisteminin üç boyutlu bilgisayar modeli Şekil 3.4'te verilmiştir. Sistemin ahşap malzemeden üretilmesinin nedeni hem ahşabın kolay işlenebiliyor olması hem de elektromanyetik dalgalar ile iletken malzemelere nazaran çok daha az etkileşime giriyor olmasıdır. Resim 3.4'te sunulan kullanım biçimi açık alan dik kullanım tarzıdır. Sistemin ortasında bulunan menteşeler sayesinde sistem yatay konuma getirilebilmektedir. Yatay pozisyon geniş kapalı alanlar için uygun olacaktır. Resim 3.4 dikey pozisyonda ölçüme hazır hale getirilmiş sistemi göstermektedir.



Şekil 3.4. Ölçüm sisteminin üç boyutlu bilgisayar ortamındaki modeli



Resim 3.4. Ölçüm sistemi prototipinin dikey pozisyonundaki fotoğrafı

## BÖLÜM 4

### YÜKSEK KAZANÇLI, KÜÇÜK EBATLI U-YUVALI ANTEN TASARIMI

Bu bölümde mikroşerit yama antenler ile ilgili bilinmesi gereken temel bilgiler verildikten sonra bu tez çalışmasının asıl konusu olan u-yuvalı mikroşerit antenler ile ilgili gerekli tasarım ve parametre bilgileri verilmiştir. Daha sonra bu kapsamda gerçekleştirilen anten tasarımları ve simülasyon sonuçlarına yer verilmiştir.

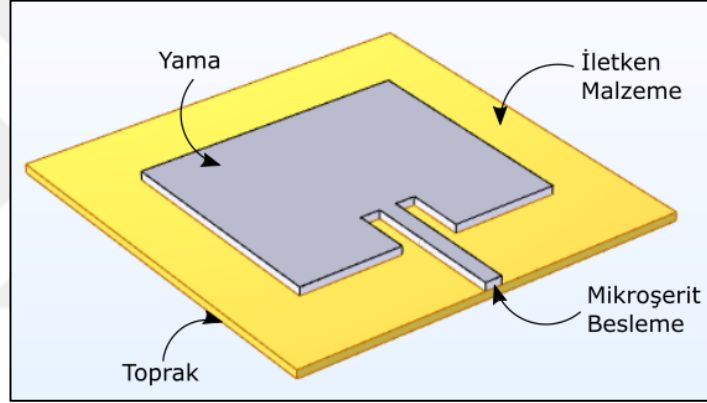
#### 4.1. Mikroşerit Antenler

Mikroşerit antenler ilk olarak 1953 yılında denemiş olmasına rağmen kullanılmaya ve geliştirilmeye başlaması 1970'leri bulmuştur. Bu süre zarfında bu türün ilerleme kaydedememesinin sebebi, o dönemlerde teknolojinin yetersizliğinden dolayı anten imalatında kullanılacak uygun taban malzemelerinin üretilmemesi olarak gösterilmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ve taban malzemesi üretimlerinin gelişmesiyle birlikte Munson ve Howell tarafından ilk mikroşerit anten basımı gerçekleştirilmiştir [57].

Mikroşerit antenler tek yönlü bir yayılma modeline sahiptir ve birçok kablosuz uygulama için uygun olması sebebiyle fazlaca çalışma mevcuttur. Bununla birlikte mikroşerit antenler kompakt, hafif ve düşük maliyetli olmaları sebepleriyle de tercih edilen bir yapıya sahiptirler. Mikroşerit antenler, hem düzlemsel yüzeylere hem de düzlemsel olmayan yüzeylere kolaylıkla monte edilebilirler. Mikroşerit antenlerin başlıca dezavantajları düşük verimlilik, düşük güç, zayıf tarama performansı, yüksek Q olarak sayılabilir. Bunların yanında önemli bir başka dezavantaj olarak da dar bant özelliğine sahip olmaları söylenebilir. Bu antenlerin bant genişliklerinin iyileştirilmesi veya birden fazla frekansta çalışmalarının sağlanabilmesi için çeşitli yamalar ve besleme modelleri üzerinde çalışılmıştır. Yine taban malzemesinin kalınlığının yükseltilmesi ile anten verimliliğinin ve bant genişliğinin artırılması mümkün olabilmektedir. Elbette ki bu, bazı istenmeyen durumlara sebep olabilmektedir. Örneğin, yüksekliğin artmasına bağlı olarak kullanılabilir toplam gücün düşmesi ve yüzey dalgalarının oluşması gibi [54]. Gerek teorideki ilerlemeler gerekse teknolojik alandaki gelişmeler sayesinde mikroşerit antenlerin dezavantajları bir nebze de olsa azaltılmış veya bu dezavantajlardan bir kısmının önüne geçilmiştir. Özellikle kişisel iletişim sistemleri (PCS), mobil uydu

iletişimi, doğrudan yayın uydusu (DBS), kablosuz yerel alan ağları (WLAN) ve akıllı araç otoyol sistemlerinde (IVHS) kaydedilen ilerlemeler ile mikroşerit antenlere olan talebin artacağı aşıkardır [60].

Yama antenler olarak da isimlendirilen mikroşerit antenler, taban malzemesi üzerine farklı şekillerde eklenen yamadan ve toprak alt düzleminden oluşurlar. Klasik bir mikroşerit anten yapısı Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bir mikroşerit antende farklı türlerde yamalar kullanılabilir. Bunlar genellikle, kare, dikdörtgen, dipol, daire, elips, üçgen, çember şeklinde olurlar. Bunlar dışında değişik yama şekillerini görmek de mümkündür. Fakat bahsi geçen yama türleri analizlerinin ve imalatlarının kolay olması sebebiyle en yaygın yapılardır.



Şekil 4.1. Mikroşerit anten

Mikroşerit antenlerin besleme yöntemleri ile alakalı kullanılan birçok yöntem vardır. Bunlardan en çok kullanılan dört tanesi,

- Mikroşerit hat
- Koaksiyel prob
- Açıklık bağlaşım
- Yakınlık bağlaşım

Bu tez çalışmasında besleme yöntemlerinden mikroşerit hat ve koaksiyel prob besleme yöntemleri kullanılmıştır. Mikroşerit hat, yama ile aynı yüzeyde olup alt taban malzemesinin  $\epsilon_r$ 'sine göre hat kalınlığı değişen bir besleme yöntemidir. Yamaya göre çok daha küçük bir genişliğe sahip olur. Bir diğer yaygın yöntem olan koaksiyel hat

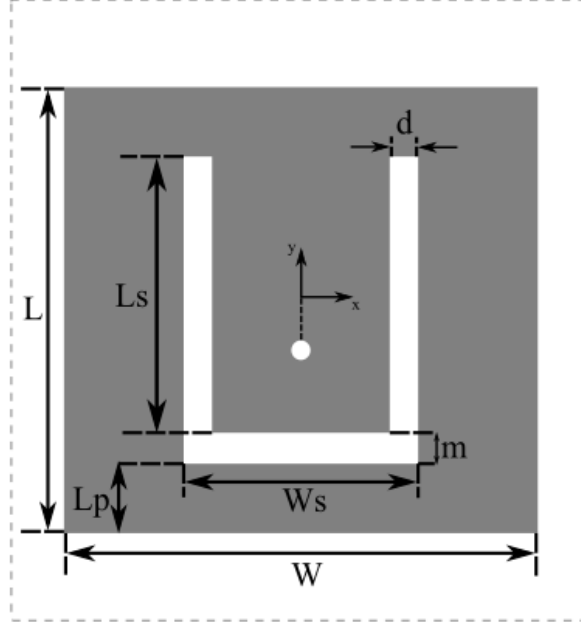
beslemesinde koaksiyel iç iletken kısmı yamaya, dış iletken kısmı toprağa bağlanır. Her iki yöntemde imalat kolaylığı açısından kullanıma oldukça uygundur.

#### **4.2. U-yuvalı Mikroşerit Antenler**

Kablosuz iletişimde mikroşerit antenler düşük profil, düşük ağırlık, düşük maliyet, kolay üretim gibi özelliklerinden dolayı önemli bir yere sahip olmasına rağmen bant genişliklerinin çok dar olması kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Empedans bant genişliği ile alakalı bu sorunun önüne geçebilmek adına birçok yöntem denenmiş ve geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri olarak yama üzerine eklenen yuvaları göstermek mümkündür. Yuvaya sahip bir antenin bant genişliği, antenin temel öğelerinden biri olan yuvanın şekli veya boyutları değiştirilerek arttırılabilir. Anten üzerinde daha büyük bir yuvanın kullanılması, daha geniş ışınım alanına ve daha düşük bir Q faktörüne olanak sağlar, bunun anlamı ise geniş bir bant genişliğidir. [61]. Doğru bir tasarımla, dairesel şekil [62], eliptik şekil [63], üçgenler [64] ve fraktal [65] gibi farklı yapılarda yuvalar kullanılarak geniş bir bant genişliği elde etme çalışmaları yapılabilir [66].

U-yuvalı antenlerin tarihine bakılacak olursa antenin temel geometrisi ve düzenlemesi ilk olarak 1995 yılında Huynh ve Lee tarafından yapılmıştır. Söz konusu anten bir katmanlı, bir yamalı, geniş bantlı doğrusal polarizasyona sahip mikroşerit yama anteni olarak sunulmuştur. Sonuçta geniş bantın elde edilmesiyle u-yuvalı antenlerin gelişim süreci başlamıştır. Mikroşerit antenlerde u-yuvaları esasen bant genişliğini ve kazancı arttırmak için kullanılmasının yanı sıra söz konusu model ile çift ve çok bant özelliğine sahip antenlerin tasarımı da mümkündür. [67]. Bunların yanında u-yuvalı anten tasarımları anten boyutlarının küçülmesine olanak tanır. Şekil 4.2'de gösterilmekte olan bir u-yuvalı koaksiyel beslemeli mikroşerit antendir. Antende u-yuvası yama üzerine yerleştirilmiştir.





Şekil 4.2. U-yuvalı mikroşerit yama anteni

Sağlıklı bir anten tasarımının elde edilebilmesi için her antende olduğu gibi u-yuvalı antenlerde de dikkat edilmesi gereken temel hususlar dışında tasarımı kolaylaştırmak adına takip edilebilecek matematiksel ifadeler vardır. Öncelikle bir u-yuvalı antenin tasarımında kullanılan parametre denklemleri şu şekildedir,

$$h \geq 0.06 \frac{\lambda_r}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.1)$$

Bununla birlikte bant genişliği hesabı için düşük kesim frekansı ve yüksek kesim frekansı belirlenir. Antenin yama genişliği  $W$ ,

$$W = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.2)$$

Burada  $c_0$  ışık hızı,  $f_r$  rezonans frekansı,  $\epsilon_r$  taban malzemesinin dielektrik sabitidir. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi  $L$  yamanın uzunluğunu,  $W$  yamanın genişliğini,  $m$  dikeydeki yuva genişliğini,  $d$  yataydaki yuva genişliğini ve  $L_p$  yuvanın alt kesimi ile yamanın alt kesimi arasındaki mesafeyi ifade eder.  $L_s$  dikeydeki yuva uzunluğu,  $W_s$  yataydaki yuva genişliğidir. Efektif dielektrik sabiti  $\epsilon_{eff}$  ‘nin formülü:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{\epsilon_r - 1} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

Efektif yama uzunluğu  $L_{eff}$  ve saçılma uzunluğu  $\Delta L$  şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (4.4)$$

$$L_{eff} = \frac{c_0}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (4.5)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4.6)$$

Böylece bu denklemlerle gerçek yama uzunluğu olan  $L$  elde edilmiş olur. Yatayda ve dikeyde u-yuvası kol genişlikleri  $d$  ve  $m$  birbirine eşit olup formülleri ise:

$$d = m = \frac{\lambda_r}{60} \quad (4.7)$$

Yataydaki kol genişliği olan  $W_s$ :

$$W_s = \frac{c_0}{f_{low} \sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 2(L + 2\Delta L - m) \quad (4.8)$$

U-yuvasının dikeydeki kol uzunluğu ise:

$$\frac{L_{S1}}{W} \geq 0.3 \text{ ve } \frac{L_{S2}}{W_s} \geq 0.75 \quad (4.9)$$

denklemleri kullanılarak ve  $L_{S1}$  ve  $L_{S2}$  değerleri belirlenerek yamadaki yuvanın yeri bulunur. Yuvanın alt kesimi ile yamanın alt kesimi arasındaki mesafesi  $L_p$ ,

$$\varepsilon_{eff(pp)} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_s - 2d}\right]^{1/2} \quad (4.10)$$

$$2\Delta_{L-m-L_p} = 0.4824h \frac{(\varepsilon_{eff(pp)} + 0.3)\left(\frac{W_s - 2d}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{eff(pp)} - 0.258)\left(\frac{W_s - 2d}{h} + 0.8\right)} \quad (4.11)$$

$$L_p \approx L - E + 2\Delta_{L-m-L_p} - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{eff(pp)}}} \left(\frac{c_0}{f_{high}} - (2L_s + W_s)\right) \quad (4.12)$$

formülleri kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanır. Sonuçta aşağıdaki denklem sağlanarak tasarımın geçerliliği belirlenir.

$$L_s + m + L_p < L \quad (4.13)$$

Bu denklem sağlanacak şekilde uygun bir  $L_s$  değerinin bulunması gerekir. Yoksa tasarım gerçekleştirilemez [68].

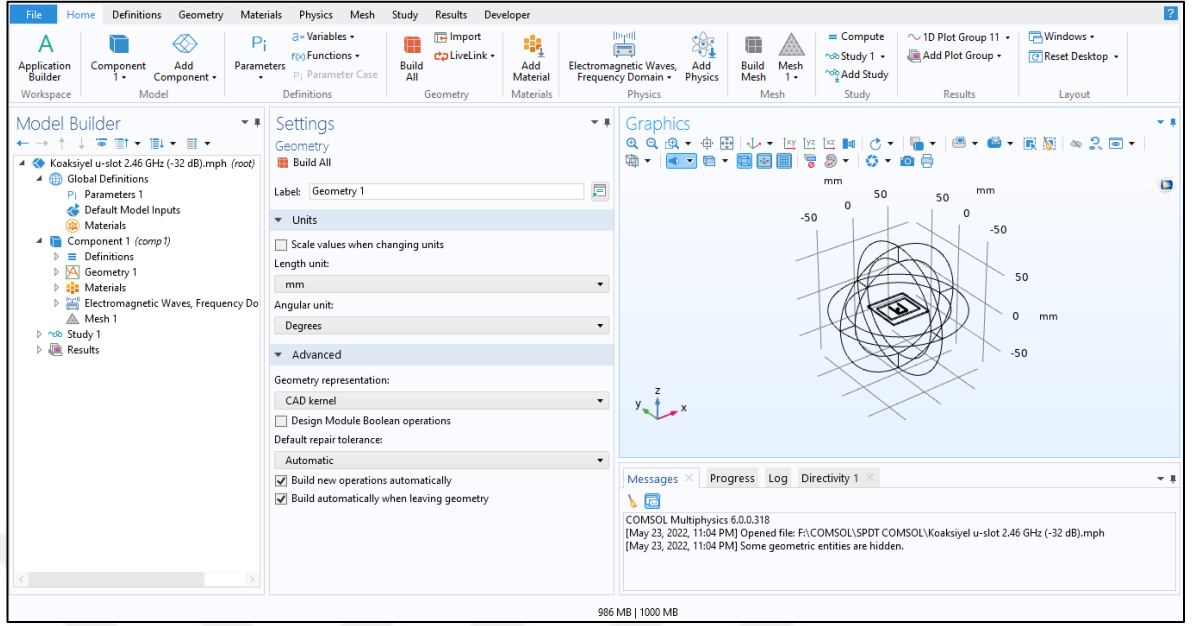
### 4.3. Anten Tasarımları ve Analizleri

COMSOL Multiphysics, modellenmesi veya çözülmesi gereken fizik ve mühendislik alanlarındaki her türlü sorun için kullanılan bir simülasyon programıdır. COMSOL ısı transferi, mikrodalga mühendisliği, elektrokimya, optik, kuantum mekaniği gibi daha birçok alanda kullanıma uygun bir programdır. Şekil 4.3'te COMSOL Multiphysics ana ekran ara yüzü gösterilmektedir. COMSOL programı en basit anten tasarımından en karmaşık dizi yapılarına kadar geniş bir alanda çalışabilmeye olanak tanır. Söz konusu program kullanılarak tasarlanan antene ait,

- S parametreleri
- 2D ışınma örüntüsü
- 3D kazanç ölçümü
- VSWR
- Demet genişliği
- Smith abağı grafiği

sonuçları elde edilebilir.

Bu çalışma boyunca gerçekleştirilen anten tasarımlarının tamamı COMSOL programı ile gerçekleştirilerek simüle edilmiştir.

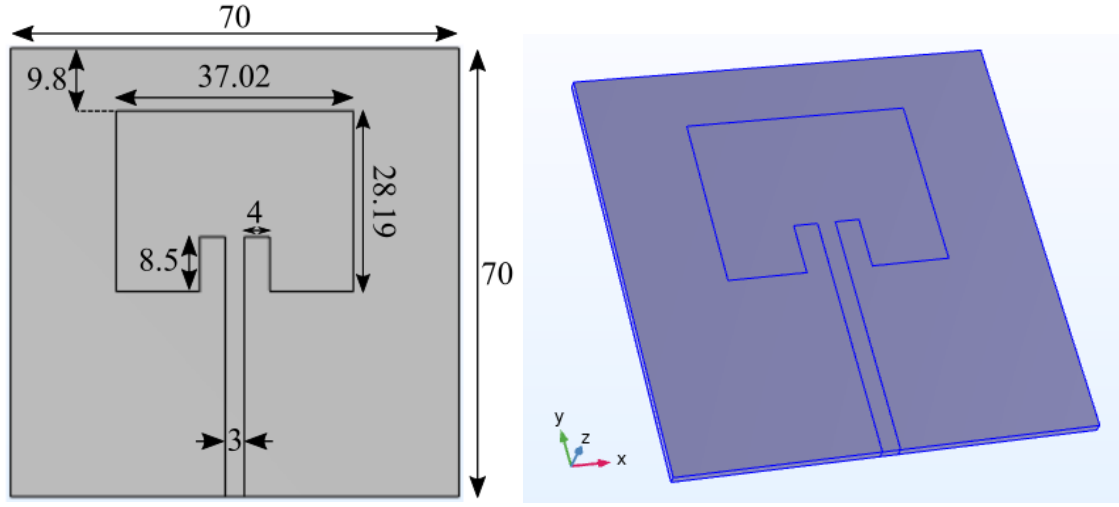


Şekil 4.3. COMSOL Multiphysics ana ekran ara yüzü

Bu tez çalışması ile tasarlanacak olan antenin öncelikle yüksek kazançlı ve küçük boyutlara sahip olması hedeflenmiştir. Amaçlardan bir diğeri ise 2.4-2.5 GHz bant aralığını kapsayacak bir antenin tasarlanmasıdır. Bu kapsamda anten tasarımlarının ilerleyişi şu şekilde gerçekleştirilmiştir,

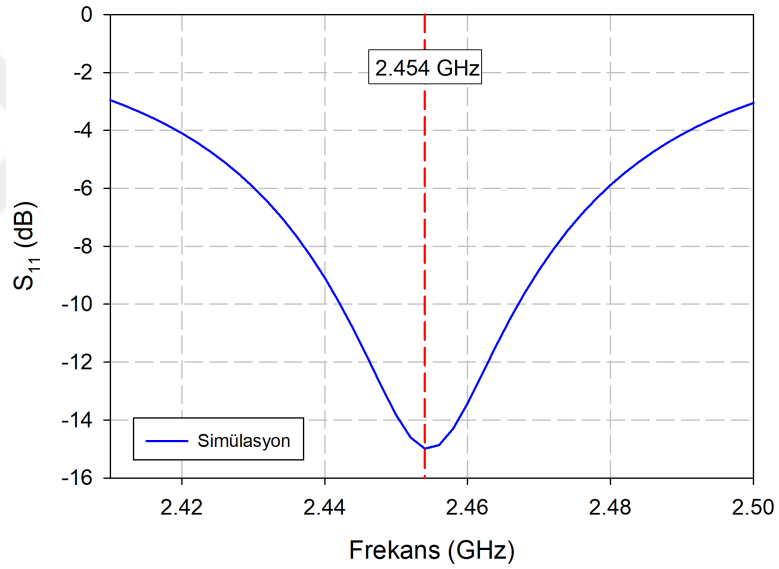
1. Klasik bir mikroşerit anten tasarımı ile mikroşerit beslemeli u-yuvalı bir mikroşerit anten tasarımının yapılması ve karşılaştırılması
2. U-yuvalı yama antenlerle alakalı ön bilgiye sahip olabilmek amacıyla literatürdeki bazı anten tasarımlarının COMSOL programı kullanılarak simüle edilmesi
3. Geniş bant özelliğine sahip u-yuvalı yama anten tasarımı
4. Bant genişliği artırılan antenin boyutlarının küçültülmesi
5. Kazanç yükseltme için gerekli çalışmaların yapılması.

İlk tasarım Şekil 4.4 (a)'da gösterilen parametre değerleri kullanılarak çizilmiş bir klasik mikroşerit antendir. Şekil 4.4 (b)'de tasarlanan antenin COMSOL ekran görüntüsü sunulmuştur. Bu tasarım simüle edilerek Şekil 4.4 (c)'de gösterilen simülasyon sonucu elde edilmiştir. Simülasyon sonucundan da anlaşılacağı gibi yapılan tasarım ile klasik bir mikroşerit hat beslemeli mikroşerit anten elde edilmiştir. 2.442-2.467 GHz arasında 25 MHz'lik bir bant genişliğine sahip olan antenin yansıma katsayısı değeri yaklaşık olarak -15 dB'dir.



(a)

(b)

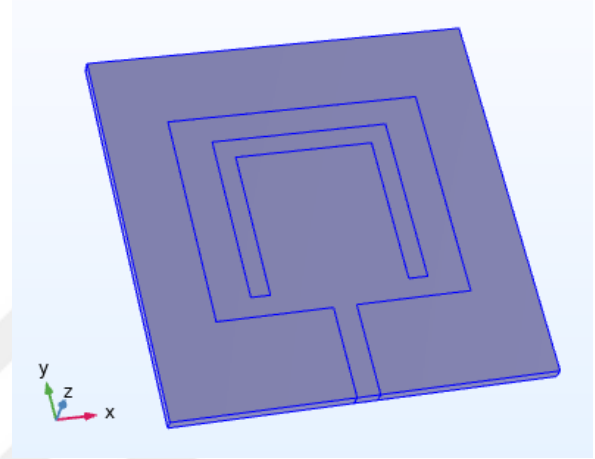
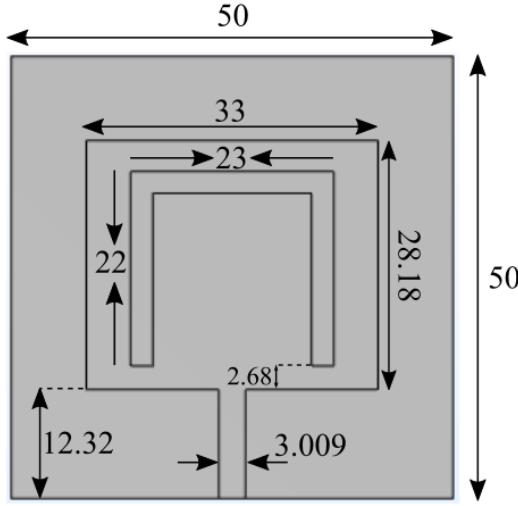


(c)

Şekil 4.4. (a) Geleneksel mikroşerit antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

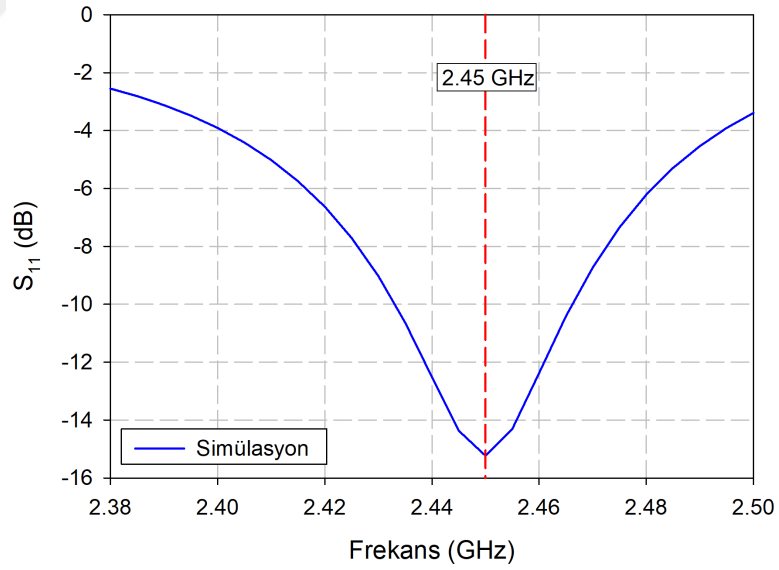
Bir sonraki çalışmada klasik bir mikroşerit yama anten üzerine u-yuvası ekleyerek gerçekleştirilen tasarımın parametre değerleri, COMSOL görüntüsü ve simülasyon sonucu Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Bu tasarım ile 2.433-2.466 GHz arasında 33 MHz'lik bant genişliğinde ve yansımaya katsayısı -15 dB olan bir anten elde edilmiştir. Bu anten tasarımı Şekil 4.4'teki tasarım ile karşılaştırılacak olursa her ne kadar rezonans frekansları ve yansımaya katsayısı değerleri yaklaşık olarak aynı olsa da u-yuvalı mikroşerit

antenin boyutlarının 50x50 mm, klasik mikroşerit antenin boyutlarının 70x70 mm olması küçük tasarımlar yapılabilmesi açısından u-yuvalı anten kullanmanın bir avantaj olacağını göstermektedir.



(a)

(b)

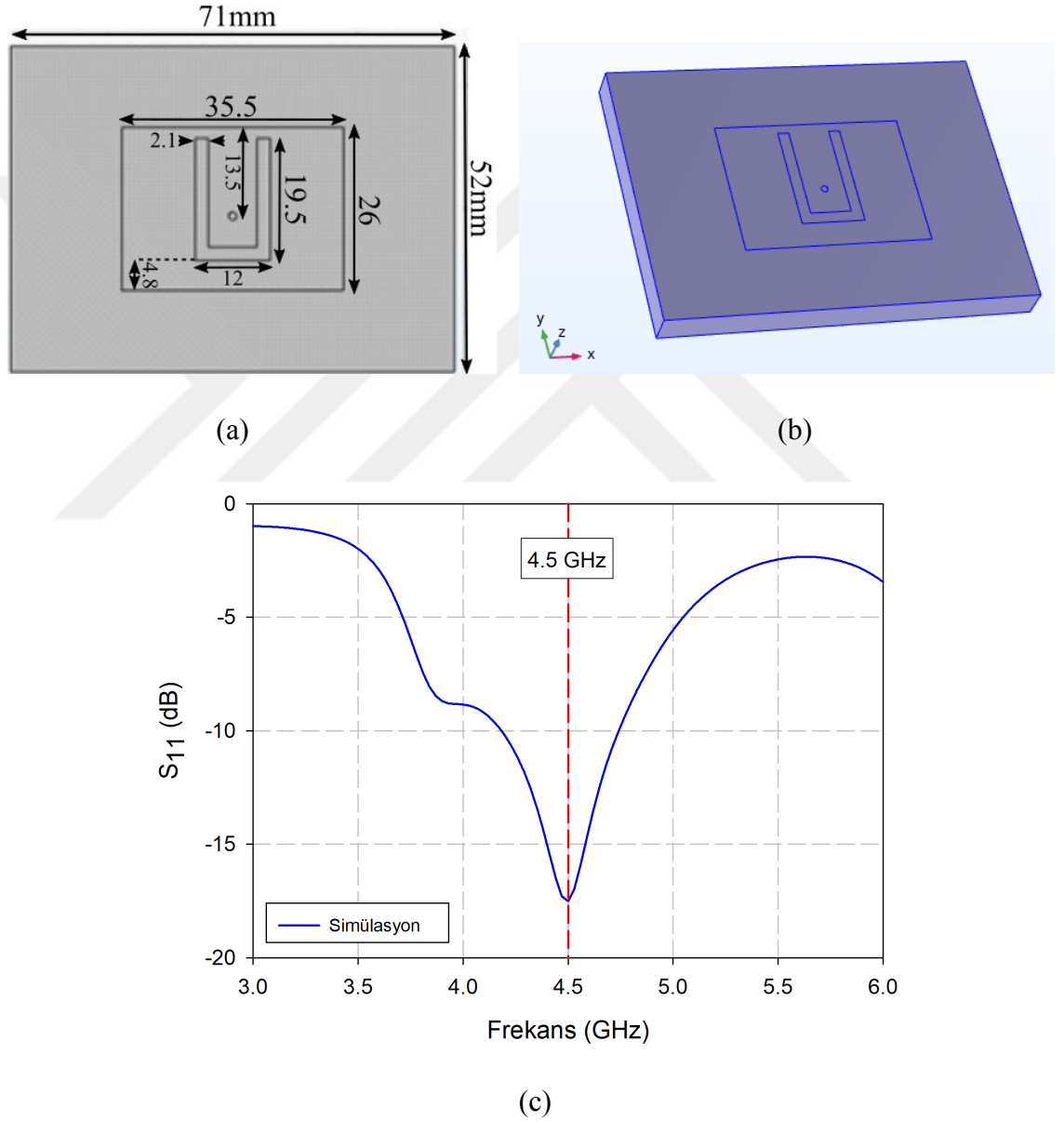


(c)

Şekil 4.5. (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

U-yuvalı mikroşerit antenin, anten boyutlarında küçülme sağladığını Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'teki çalışmalarla gördükten sonra literatürde bulunan bazı u-yuvalı anten tasarımlarının çizimleri gerçekleştirilmiştir. Burada amaç çalışılacak olan anten türünü

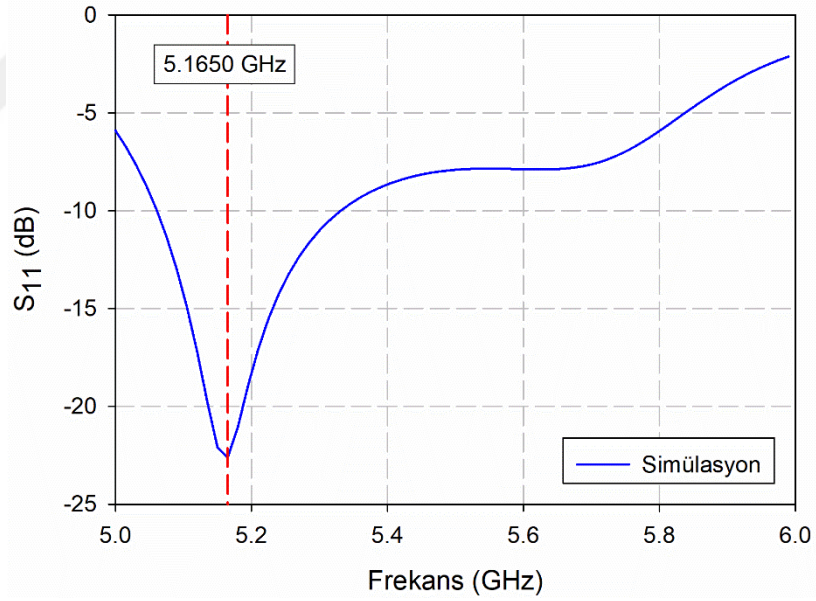
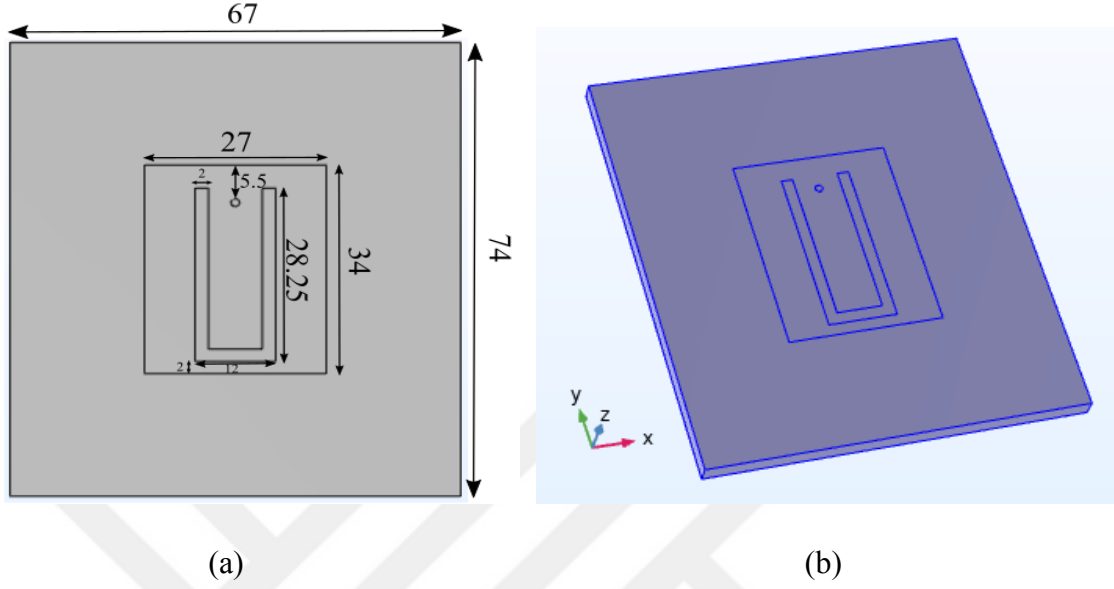
tanımak, tasarım ve üretim aşamalarında ön bilgi sahibi olmaktır. Bu doğrultuda ilk olarak Mok ve arkadaşlarına ait çalışmadan [17] örnek alınarak 71x52 mm ölçülerinde 6 mm kalınlığında ve koaksiyel beslemeli u-yuvalı yama antenin simülasyonu yapılmıştır. Yapılan tasarıma ait parametre ölçüleri, COMSOL görüntüsü ve simülasyon sonucu Şekil 4.6’te verilmiştir. Buradan u-yuvalı anten tasarımlarında alt taban kalınlığı artırılarak bant genişliğinin artırılabilceği bilgisi edinilmiştir.



Şekil 4.6. (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler[17], (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

Bir başka çalışma olan, Khidre ve arkadaşlarının yaptıkları [69] 67x74 mm ölçülerinde, 3.175 mm kalınlığında, Rogers RT/Duroid alt taban malzemesi kullanılarak tasarlanan

antenin parametre değerleri, tasarım gorunts ve simülasyon sonucu Şekil 4.7’de gosterilmektedir.



(c)

Şekil 4.7. (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler [69], (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

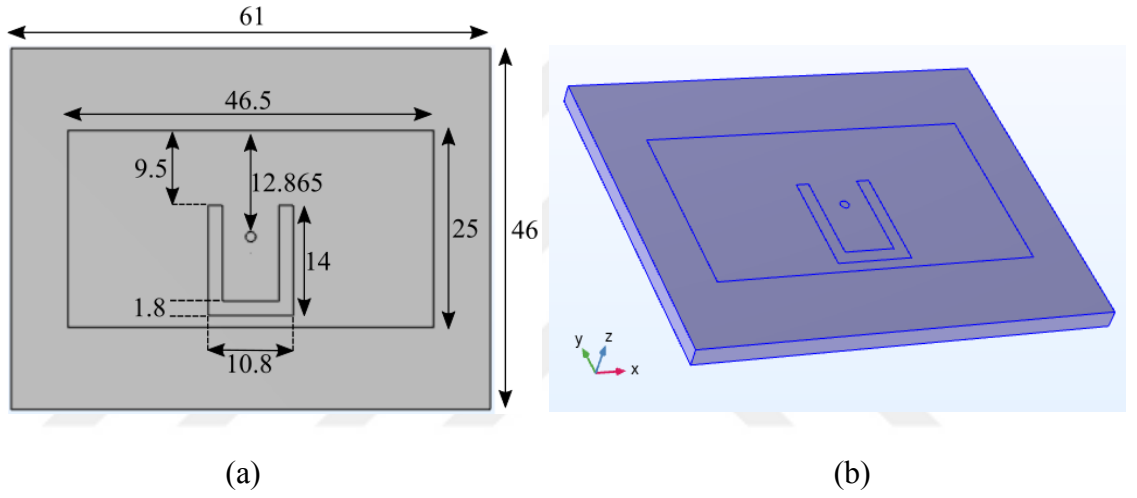
Yeterli u-yuvalı anten bilgisi edinildikten sonra, daha önce yapılan literatür tasarımları da goz önünde bulundurularak özgün anten tasarımı çalışmalarına başlanmıştır.

Tez kapsamında u-yuvalı anten için öncelikle 2.4-2.5 GHz bant aralığını kapsayacak bir anten tasarlamak hedeflenmiştir. Bu sebeple başlangıç aŐamasında bu değerleri



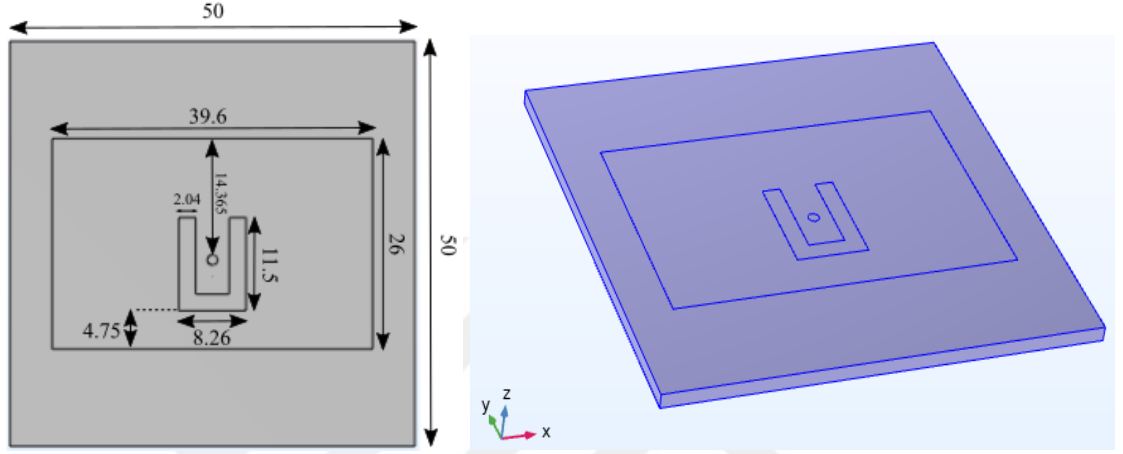
kapsayacak bir anten tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaç göz önünde bulundurularak çizilen tasarımlar ve simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir.

2.4 mm kalınlığında 61x46 mm boyutlarında u-yuvalı bir yama anten tasarımı yapılmıştır. Antenin  $\epsilon_r$ 'si 4.5 olarak belirlenmiş ve koaksiyel besleme yapılmıştır. Anten parametreleri Şekil 4.8 (a)'da gösterildiği gibidir. Şekil 4.8 (b)'de söz konusu tasarıma ait COMSOL görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.8 (c)'de de gösterildiği gibi simülasyon sonucunda antenin 2.485 GHz'de rezonans frekansına sahiptir. Anten, 2.445-2.54 GHz (95 MHz) bant genişliğine sahiptir.



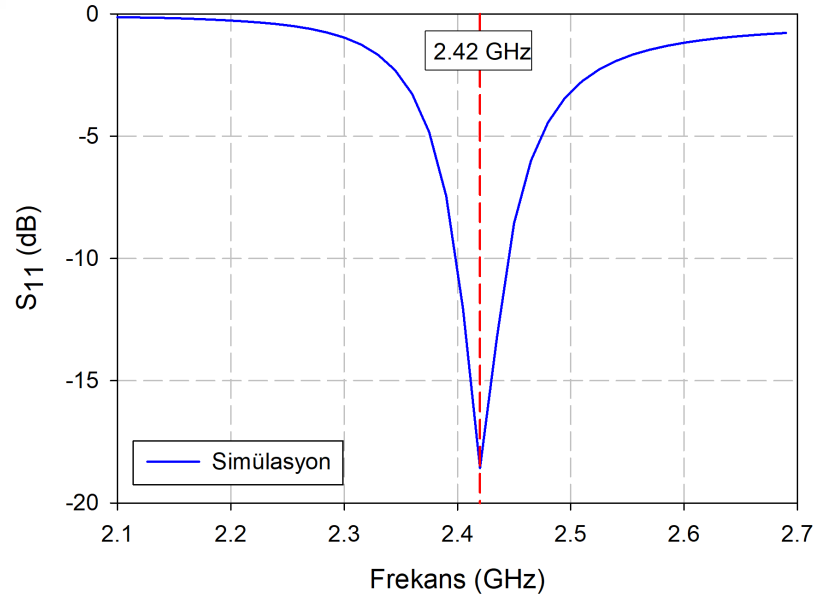
Şekil 4.8. (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

1.6 mm kalınlığında, 50x50 mm boyutlarında,  $\epsilon_r$  değeri 4.5 olan bir başka anten tasarımı yapılmıştır. Tasarım ve parametreleri Şekil 4.9 (a), (b)'de gösterilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği Şekil 4.9 (c)'de gösterilmektedir. Anten, 2.42 GHz'de rezonans frekansına sahiptir ve 2.398-2.445 GHz arasında 47 MHz'lik bir bant genişliğinde olduğu görülmüştür.



(a)

(b)



(c)

Şekil 4.9. (a) U-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

Tasarlanan antenler her ne kadar iyi ve kullanılabilir antenler olsalar da tez kapsamında ilk hedeflerden olan 2.4-2.5 GHz bant aralığını tam olarak kapsayamadıkları için tezin

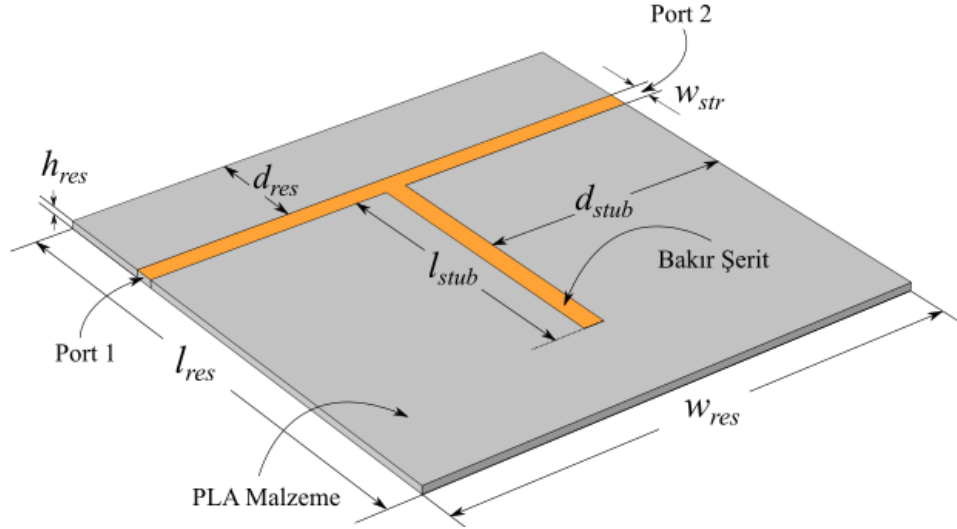
amacına ulaşması açısından kullanıma uygun değillerdi. Bu sebeplerden ötürü tasarlanacak olan antene başka konfigürasyonlar (örneğin, daha kalın ya da farklı bir alt taban malzemesi gibi) ekleyerek bu sorunların önüne geçilebileceği düşünülmüştür.

Bu doğrultuda PLA'nın  $\epsilon_r$  değerinin tam olarak hesaplanabilmesi için Başbuğ [70]'te önerilen yöntem kullanılarak tez çalışmasına uygun uyarlaması yapılmıştır. Bu yöntemde PLA malzemesinden oluşan bir yapı için stub rezonatörü modellenir. Bahsi geçen model Şekil 4.10'de gösterilmiştir.

Bir iletim hattının  $\epsilon_r$ 'si, rezonans frekansı ve stub uzunluğunun belirlenmesi ile bulunabilir. Rezonans frekansları bilinen bir iletim hattının, aşağıdaki denklem kullanılarak  $\epsilon_{eff}$  değeri hesaplanır.

$$\epsilon_{eff} = \left( \frac{n \cdot c}{4 \cdot f_n \cdot l_{stub}} \right)^2, n = 1, 3, 5, \dots \quad (4.1)$$

Burada,  $n$  rezonans indeksi,  $c$  ışık hızı,  $f_n$  rezonans frekansı,  $l_{stub}$  stub uzunluğudur.



Şekil 4.10. PLA malzemesinin bağlı  $\epsilon_r$  değerinin hesaplanması için T-rezonatör modeli [70]

Buradan  $\epsilon_{eff}$  değeri kullanılarak aşağıdaki formül ile  $\epsilon_r$  değeri hesaplanır.

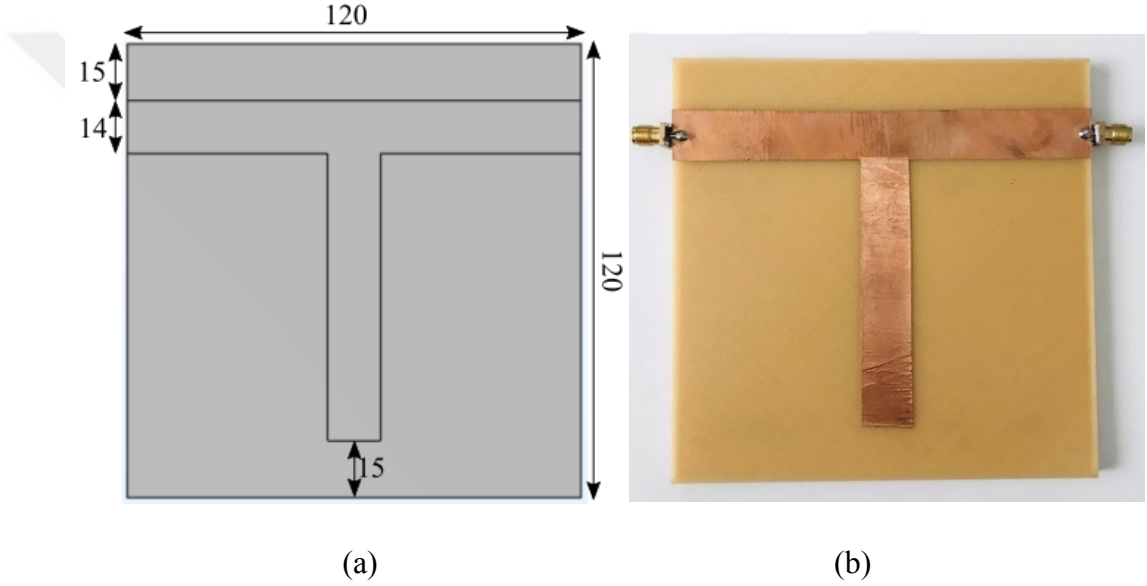
$$\epsilon_r = \frac{k_s(2\epsilon_{eff} - 1) + 1}{k_s + 1} \quad (4.2)$$

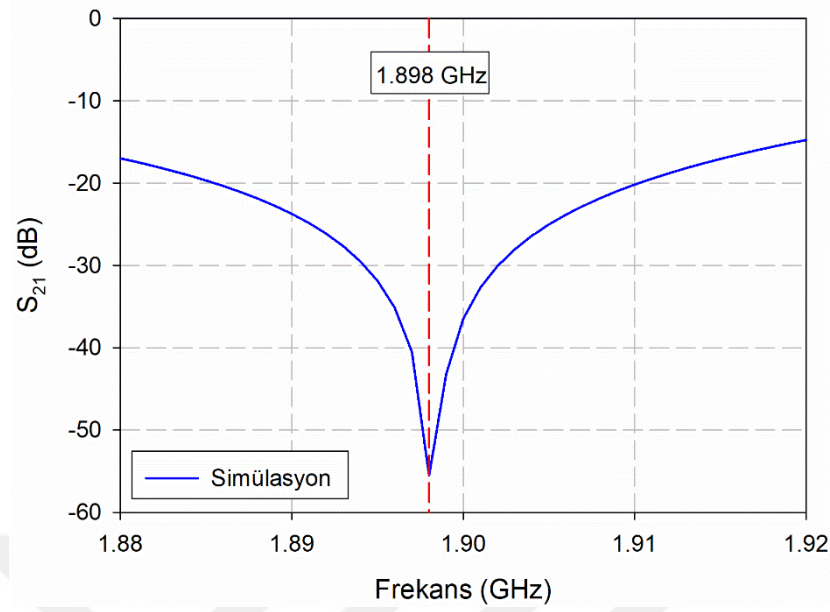
burada  $k_s$ ,

$$k_s = \sqrt{1 + 12 \left( \frac{h_{res}}{w_{str}} \right)} \quad (4.3)$$

Burada,  $h_{res}$  ve  $w_{str}$  sırasıyla PLA'nın kalınlığı ve mikroşerit hattın genişliğidir [70].

Bu bilgiler doğrultusunda COMSOL programında ölçüleri 120x120 mm olan, 5 mm kalınlığında bir T-rezonatör çizilerek simülasyon sonuçları kaydedilmiştir. Daha sonra 3B yazıcı kullanılarak PLA çıktısı alınmıştır. İletken kısımlar için bakır bant kullanılarak ve ölçüleri göz önünde bulundurularak T şekli verilmiştir. Bahsedilen tasarım görüntüleri ve simülasyon sonucu Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



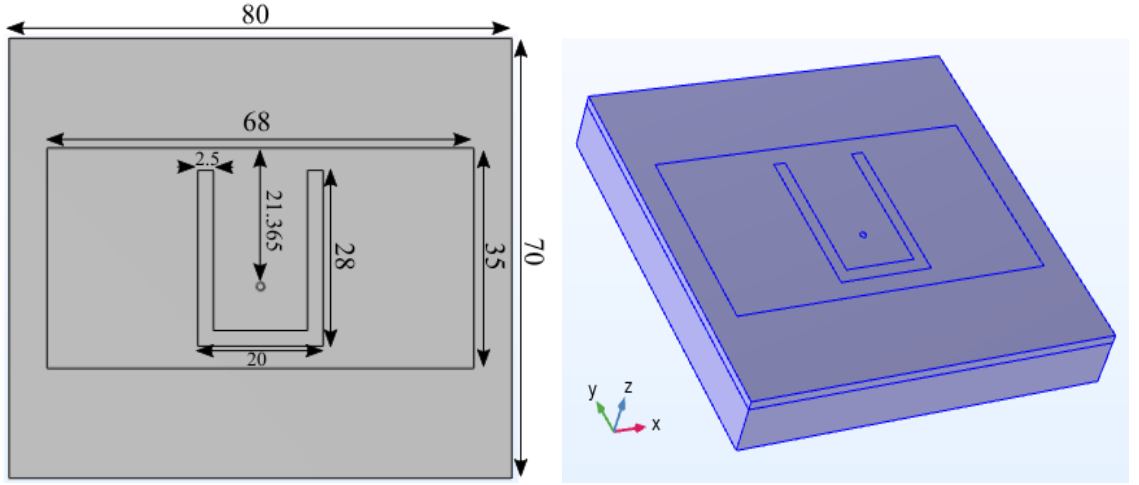


(c)

Şekil 4.11. (a) PLA malzemesinin  $\epsilon_r$  değerinin hesaplanması için çizilen T-rezonatör modeli, (b) Bakır iletken ve PLA ile gerçekleştirilmiş T-rezonatör, (c) COMSOL'da çizimi yapılan T-rezonatörün  $S_{21}$  simülasyon sonucu

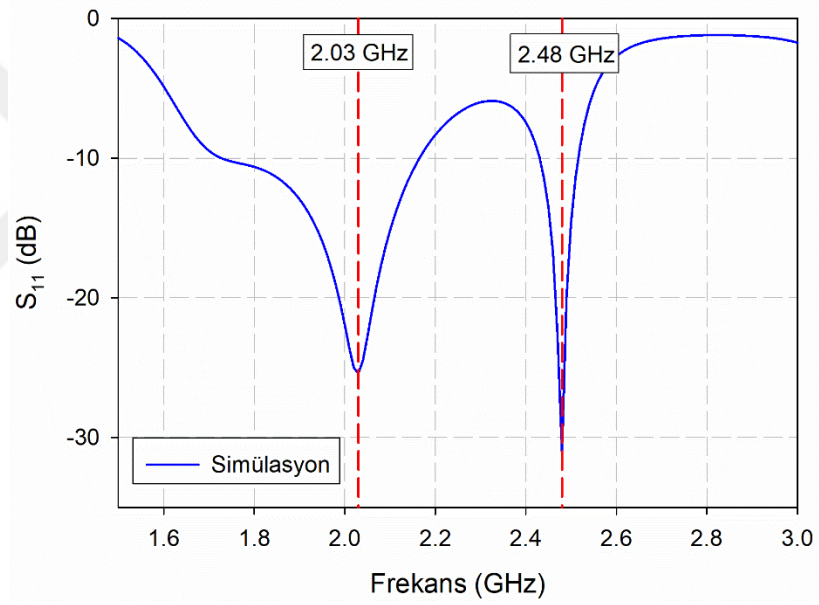
Gerçekleştirilen T-rezonatörün VNA'da görülen  $S_{21}$  grafiği ile COMSOL'da elde edilen  $S_{21}$  grafiği karşılaştırılarak PLA'nın  $\epsilon_r$ 'si 2.62 olarak belirlenmiştir.

U-yuvalı mikroşerit antenlerde taban malzemesi kalınlığının bant genişliğini ciddi oranda etkilediği bilgisi daha önceki çalışmalar ile edinilmişti. Bu doğrultuda PLA'nın  $\epsilon_r$  değerinin bulunmasından sonraki aşamada alt taban malzemesi olarak kullanılan FR4 malzemesinin altına PLA filamenti eklenmesi yapılarak anten kalınlığı artırılmış ve simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Anten, 80x70 mm boyutlarında ve kalınlığı, 1.6 mm'si FR4 ve 8.4 mm'si PLA olarak tasarlanmıştır. Tasarıma ait parametre ölçüleri ve COMSOL çizimi Şekil 4.12 (a), (b)'de verilmiştir. Simülasyon sonucu Şekil 4.12(c)'de gösterilmiştir. Bu tasarım ile bant genişliğinin oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Söz konusu anten tasarımının Şekil 4.13'deki ışın diyagramına bakıldığında z yönünde bir ışın yapıldığı görülmektedir. Anten, rezonans frekansı olan 2.03 GHz'de 7 dBi kazançla sahiptir. Bir diğer rezonansı olan 2.48 GHz'de ise anten kazancı 4.92 dBi olarak elde edilmiştir.



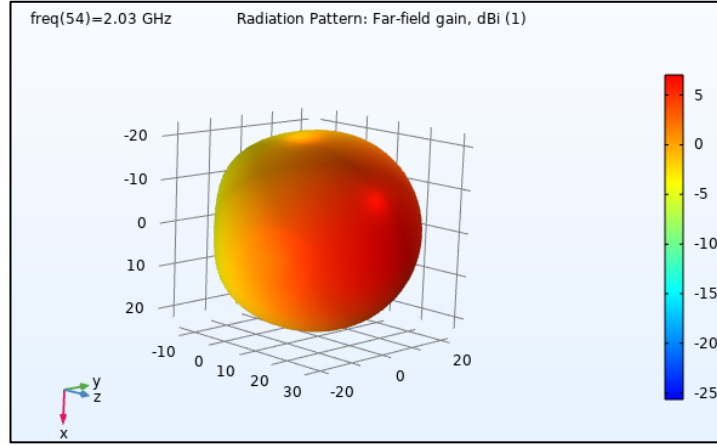
(a)

(b)



(c)

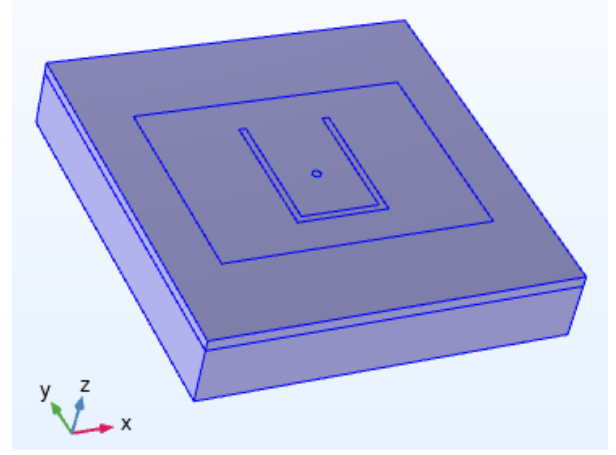
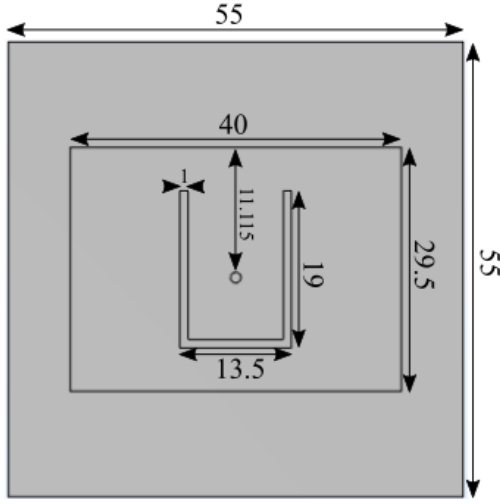
Şekil 4.12. (a) Tasarlanan u-yuvalı yama antene ailt ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği



Şekil 4.13. Tasarlanan antenin ışınma diyagramı

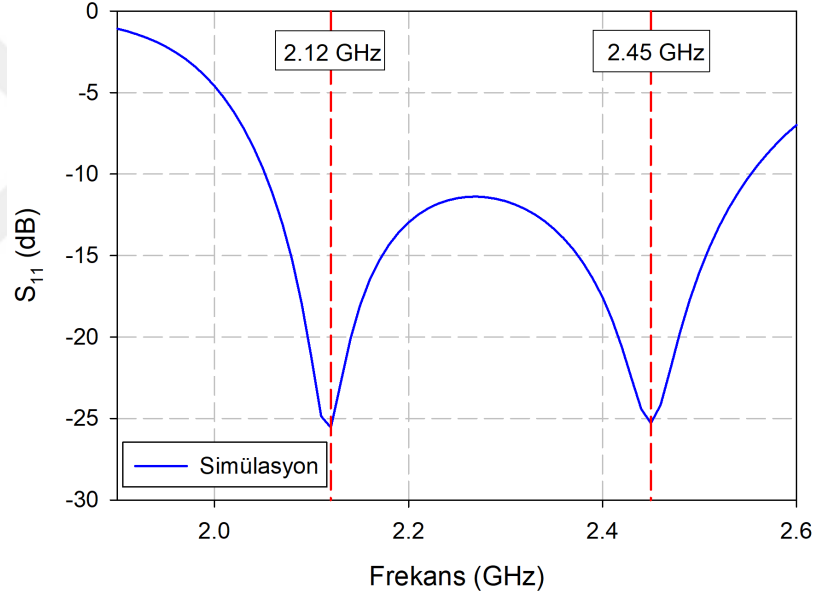
Bant genişliği artırıldıktan sonra tezin hedefleri doğrultusunda gerekli olan 2.4-2.5 GHz bant aralığını kapsayan, yüksek kazançlı ve daha küçük boyutlarda anten tasarımı yapma çalışmalarına geçilmiştir.

Toplam anten kalınlığı 10 mm ( $\epsilon_r = 1.6$  mm, PLA =8.4 mm) olan 55x55 mm boyutlarında ve diğer anten parametreleri Şekil 4.14 (a)'da verilmiş olan bir anten tasarımı daha yapılmıştır. Şekil 4.14 (b) antenin COMSOL programındaki çizimi verilmiştir. Tasarımda kullanılmış olan FR4 taban malzemesi için T-rezonatör yöntemi kullanılarak  $\epsilon_r$  hesaplaması yapılmış ve 4.15 değeri elde edilmiştir. Bu sebeple bu aşamadan itibaren FR4 malzemesi için  $\epsilon_r$  değeri 4.15 olarak alınmıştır. Bu anten tasarımı ile hedeflenen bant genişliği aralığı elde edilmiştir. Tasarlanan anten 2.12 GHz'de ve 2.45 GHz'de rezonansa sahiptir. Bu iki noktadaki kazanç değerleri sırasıyla 6.31 dBi ve 6.56 dBi'dir. Şekil 4.15'de de gösterildiği gibi antenin yaptığı ışınma z yönündedir.



(a)

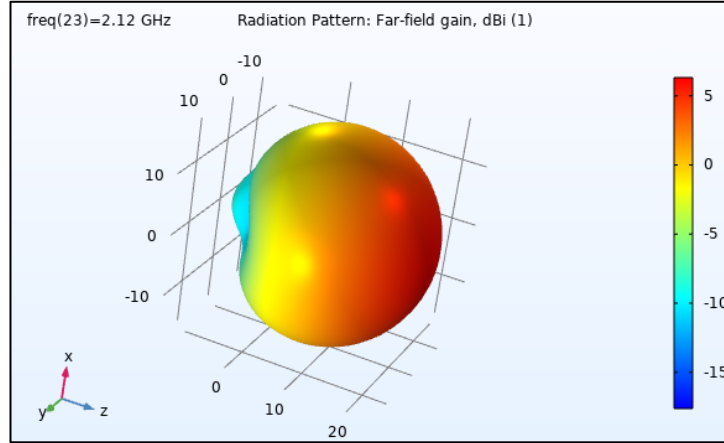
(b)



(c)

Şekil 4.14. (a) Tasarlanan u-yuvalı yama antene ailt ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

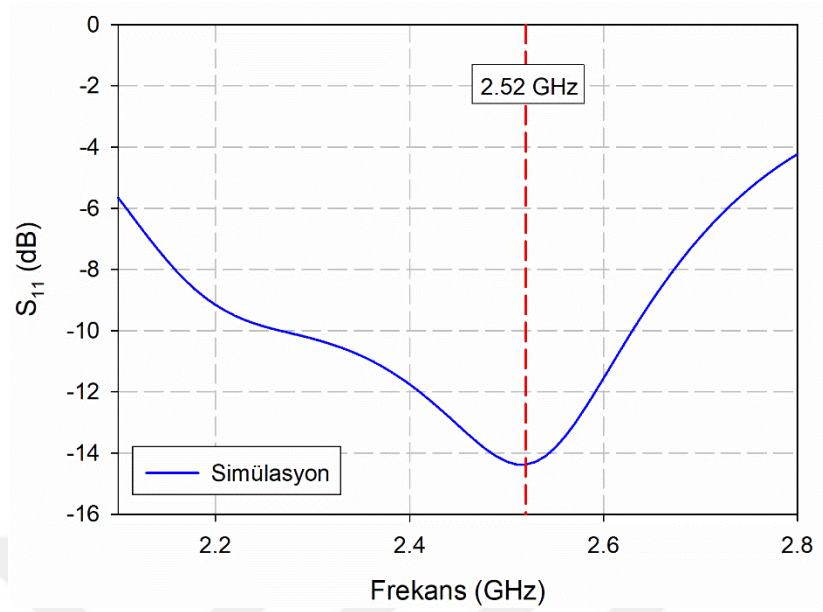




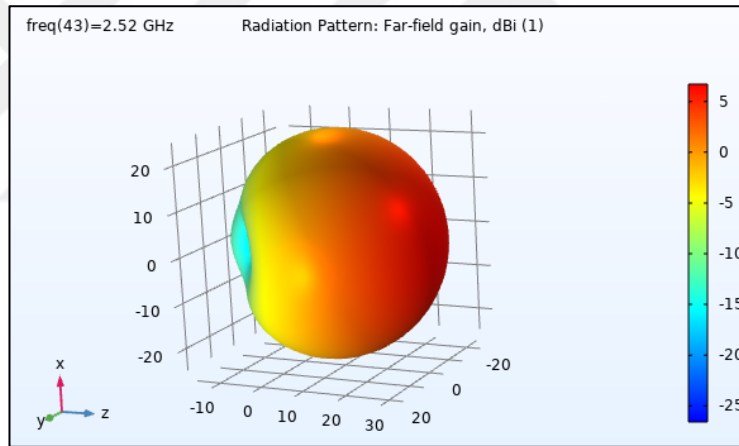
Şekil 4.15. Tasarımı yapılan antene ait ışınma diyagramı

Şekil 4.14'te gösterilmiş olan tasarımın u-yuvalı yama anten parametreleri aynen kullanılarak PLA kalınlığı 5 mm'ye düşürülüp tasarım simüle edilmiştir. Bu tasarımın  $S_{11}$  grafiği Şekil 4.16'da gösterilmektedir.

Grafikten de anlaşılacağı gibi küçük boyutlarda bir tasarım ile 2.4-2.5 GHz bant aralığında çalışabilen anten elde edilmiştir. Son aşamada toplam anten kalınlığı 6.6 mm ve 55x55 mm boyutlarında, geniş bantlı bir anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu antene ait ışınma diyagramı Şekil 4.17'de sunulmuş olup 2.52 GHz'de anten kazancı 6.54 dBi'dir. Bu anten tasarımının sonuçları ile tez hedeflerinden olan 2.4-2.5 GHz bant aralığı ve küçük boyut özelliklerine sahip bir anten elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra tezin bir diğer hedefi ve en önemlisi olan kazanç ile alakalı çalışmalara devam edilmiştir.



Şekil 4.16. PLA kalınlığı 5 mm olan u-yuvalı antene ait  $S_{11}$  grafiği

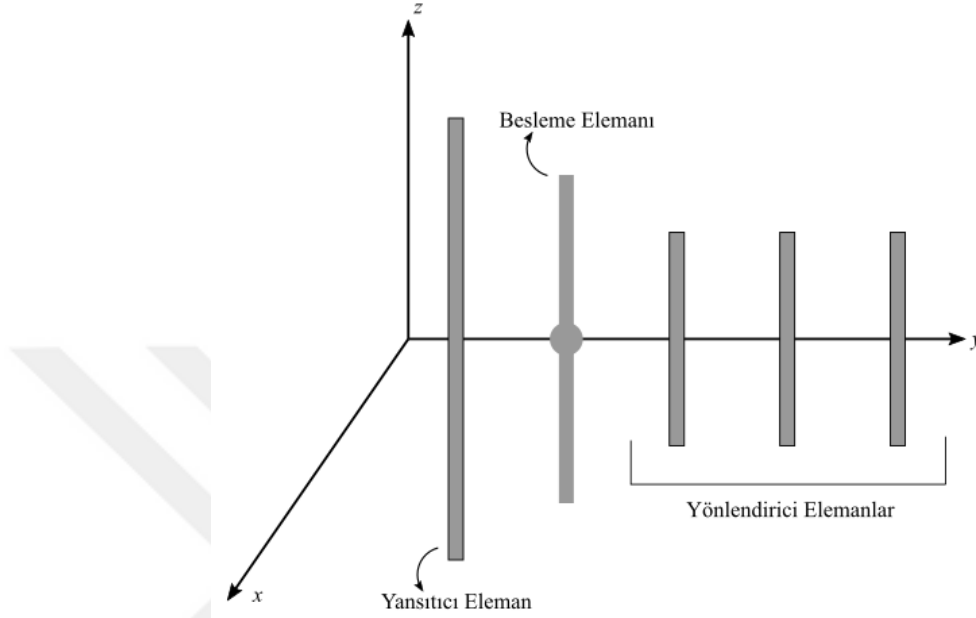


Şekil 4.17. PLA kalınlığı 5 mm olan u-yuvalı antene ait ışınma diyagramı

Şimdiye kadar tasarlanmış olan antenlerin kazanç değerleri yaklaşık 6-7 dBi idi. Bu değerlerin iyi ve yüksek kazançlar olduğunu söylemek mümkündür. Fakat tezin devamında bu değerleri daha da yükseltebilmek adına çalışmalar yapılmıştır. Kazanç artırmada Yagi-Uda yama anten modelinin çalışma prensibinden faydalanılmıştır.

Yagi-Uda yama anten modeli 1920'lerde Shintaro Uda tarafından Japonca olarak açıklanmış ve daha sonra Hidetsugu Yagi tarafından İngilizce'ye çevrilmiştir. Genellikle VHF (30-300 MHz) – UHF (300 -3000 MHz) frekans aralıklarında kullanılırlar. Bu anten bir dizi anten türüdür ve üç ana elemandan oluşur. Bunlar sırasıyla yansıtıcı, besleme ve yönlendirici elemanlardır. Üç yönlendirici elemandan oluşan bir Yagi-Uda anten modeli

Şekil 4.18’de gösterilmektedir. Uygulamada yönlendirici elemanlar yönlülüğü artırarak kazancı yükseltir. Yönlendirici elemanların uzunluğu, mesafesi ve adedi elbette ki kazancı etkileyen faktörlerdendir.



Şekil 4.18. Yagi-Uda anten modeli

Yagi-Uda antenlerinin sahip olduğu bu yönlendirici elemanlar ile kazanç artırabilme özelliği daha önce tasarımı yapılmış olan u-yuvalı yama anten üzerinde denenmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Tablo 4.1’de yönlendirici yarıçapı 1 mm’de ve uzunluğu 35 mm’de sabit tutulup adedi artırıldığında kazanç ve bant genişliği değerleri gösterilmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere yönlendirici sayısının artırılması hem kazancı hem bant genişliğini artırmaktadır. Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te ise sırasıyla iki ve üç adet yönlendirici eklenmiş ve bunların yarıçapları değiştirilerek yine kazanç ve bant genişliği değişimleri gözlemlenmiştir. Her iki tablodaki yönlendiricilerin uzunlukları 35 mm’de sabit tutulmuştur. Yönlendirici sayısını artırmak da kazancı ve bant genişliğini artıran bir metottur. Tez kapsamında u-yuvalı antene en fazla 3 adet yönlendirici eklenerek simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyonlarda yönlendirici elemanlar iletken olarak ayarlanmıştır. Bu sayıyı artırarak kazanç daha yüksek seviyelere çekilebilir.

Tablo 4.1. 1 mm yarıçapa sahip yönlendirici eklenen u-yuvalı yama antene ait kazanç ve bant genişliği değerleri

| Yönlendirici Sayısı | En Yüksek Kazanç | Bant Genişliği               |
|---------------------|------------------|------------------------------|
| 1                   | 6.92 dBi         | 2.18-2.61 GHz<br>(430 MHz)   |
| 2                   | 7.28 dBi         | 2.15-2.66 GHz<br>(510 MHz)   |
| 3                   | 7.73 dBi         | 2.168-2.682 GHz<br>(514 MHz) |

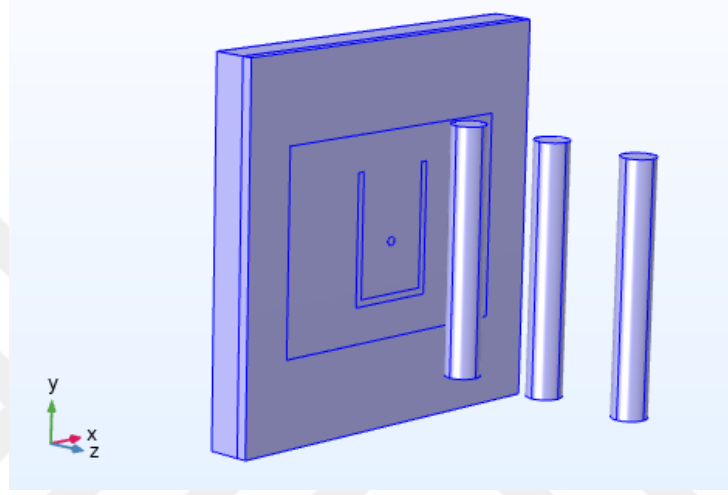
Tablo 4.2. U-yuvalı yama antene eklenen iki adet yönlendiricinin yarıçapları değiştirildiğinde elde edilen kazanç ve bant genişliği değerleri

| Yönlendirici Yarıçapı | En Yüksek Kazanç | Bant Genişliği               |
|-----------------------|------------------|------------------------------|
| 1 mm                  | 7.28 dBi         | 2.15-2.66 GHz<br>(510 MHz)   |
| 1.5 mm                | 7.37 dBi         | 2.15-2.655 GHz<br>(505 MHz)  |
| 2 mm                  | 7.41 dBi         | 2.143-2.662 GHz<br>(519 MHz) |
| 2.5 mm                | 7.37 dBi         | 2.142-2.64 GHz<br>(498 MHz)  |

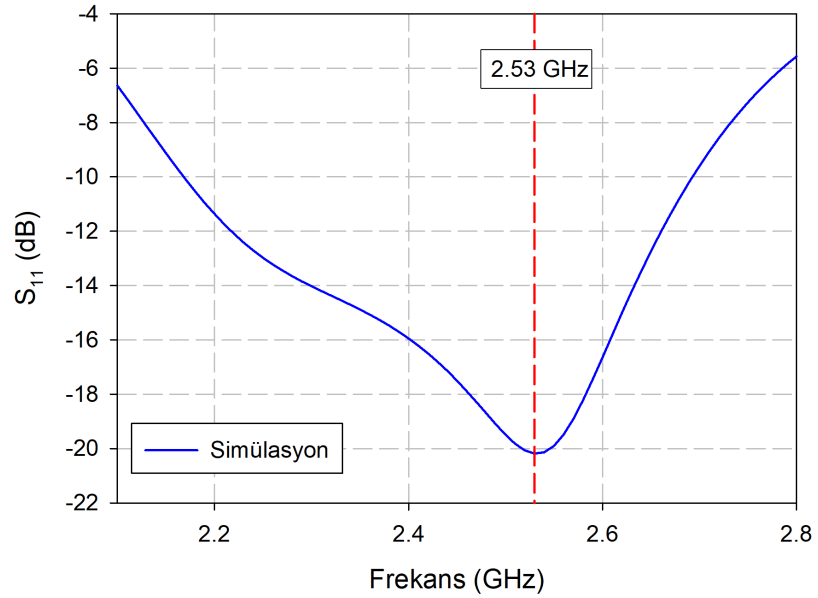
Tablo 4.3. U-yuvalı yama antene eklenen üç adet yönlendiricinin yarıçapları değiştirildiğinde elde edilen kazanç ve bant genişliği değerleri

| Yönlendirici Yarıçapı | En Yüksek Kazanç | Bant Genişliği               |
|-----------------------|------------------|------------------------------|
| 1 mm                  | 7.73 dBi         | 2.168-2.682 GHz<br>(514 MHz) |
| 1.5 mm                | 7.91 dBi         | 2.165-2.69 GHz<br>(525 MHz)  |
| 2 mm                  | 8.02 dBi         | 2.17-2.69 GHz<br>(520 MHz)   |
| 2.5 mm                | 8.11 dBi         | 2.165-2.693 GHz<br>(528 MHz) |

Son aşamada Şekil 4.19'da gösterilmekte olan u-yuvalı yama anten hedeflenen tüm özellikleri kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Anten Şekil 4.14'te gösterilmiş olan geometriye ve toplamda 6.6 mm kalınlığa sahiptir. Ayrıca kazancı artırmak için 3 adet 2.5 mm yarıçapa ve 35 mm uzunluğa sahip yönlendirici eklenmiştir. Söz konusu anten 528 MHz'lik bir bant genişliğine sahiptir. Anten, rezonans frekansı olan 2.53 GHz'de 8.02 dBi ve en yüksek 2.6 GHz'de 8.11 dBi kazanca sahiptir.



Şekil 4.19. Üç adet yönlendirici elemanı bulunan u-yuvalı yama antenin tasarım görüntüsü



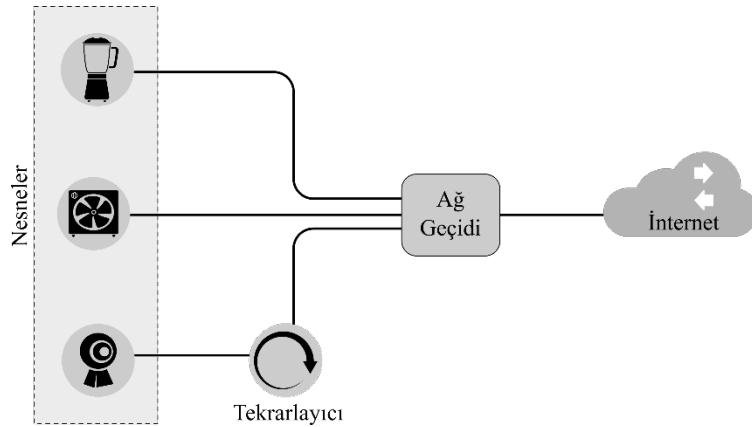
Şekil 4.20. Tasarlanan antene ait  $S_{11}$  grafiği

## BÖLÜM 5

### TEKRARLAYICI ANTEN SİSTEMİ

Haberleşme yaygın olarak insan-insan ve insan-cihaz arasında gerçekleştirilmektedir. Günümüzdeki teknolojik gelişmeler yeni bir haberleşme çifti olarak cihaz-cihaz arasındaki bilgi aktarımını ön plana çıkarmaya başlamıştır. Bu durumun sonucu olarak da Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramı yaygınlık kazanmıştır [71]. IoT terimi ilk olarak 1999 yılında Kevin Ashton tarafından kullanılmıştır. IoT dünyası, var olan her şeyin birbirine bağlanabildiği ve iletişim kurabildiği bir teknolojiyi ifade eder. Söz konusu iletişim kurma ve bağlanabilme yeteneği nesnelere üzerindeki sensörler veya aktüatörler ile kablolu ya da kablosuz olarak gerçekleştirilebilir [72]. 2009 yılında internete bağlı olan cihaz/nesne sayısı dünya üzerindeki insan sayısını geçmiştir. Bu dönemden itibaren IoT teknolojisinin önemi ve kullanım alanları hızla artmaya başlamıştır.

IoT uygulamaları Şekil 5.1’de gösterildiği gibi üç ana ögeden oluşmaktadır. Bunlar ağ geçidi, tekrarlayıcı ve nesnelere dir. Bunlar arasında en temel öge ise nesnelere dir. Nesnelere dahil oldukları ağ yapılarındaki ağ geçidi cihazı ile internete ulaşım sağlarlar. Tekrarlayıcılar ise kapsama alanını genişleterek daha uzak mesafelere ulaşabilmek ve nesneye erişimi kolaylaştırmak için tercih edilen etkili yöntemlerden biridir.

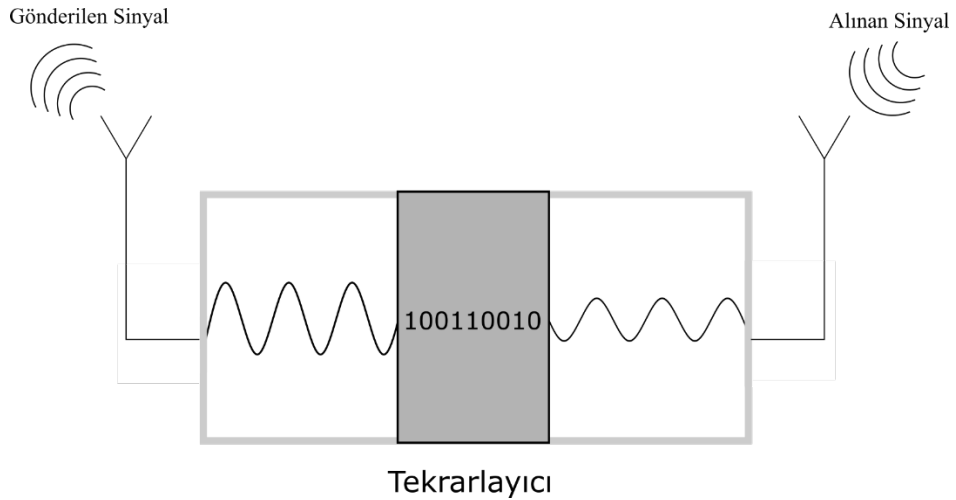


Şekil 5.1. IoT uygulamalarının temel yapısı

IoT teknolojisinin yaygın olarak kullanıldığı beş ana alan şu şekilde sıralanabilir,

1. Radyo frekansı tanımlaması (RFID)
2. Kablosuz sensör ağları (WNS)
3. Ara katman yazılımı
4. Bulut bilişim
5. IoT uygulama yazılımı [73].

Radyo frekanslarının radyo istasyonları ile verimli bir iletişim kurabilmeleri için coğrafi konum oldukça önemlidir [43]. Çünkü coğrafi konuma bağlı olarak ortamda bulunan engel olarak isimlendirebileceğimiz çeşitli unsurlar (ağaçlar, dağlar, bina tipi yapılar) görüş hattı (LOS) iletişimini sınırlayarak RF'lerin kapsama alanını daraltır. Dünya nüfusunun artması ve dolayısıyla iletişim kurulması gereken mesafelerin artması sebebiyle kablosuz ağ sistemlerinde alıcı ve verici arasındaki yol kayıplarının azaltılması çalışmaları önem kazanmıştır. Bu soruna çoğu zaman kullanılan bir çözüm olarak tekrarlayıcılar gösterilebilir. IoT sistemlerinde yaygın olarak kullanılan tekrarlayıcıların temel çalışma mantığı, Şekil 5.2'de de gösterildiği gibidir. Klasik tekrarlayıcıların aksine IoT tekrarlayıcılar kendisine ulaşan analog sinyali sayısal forma çevirir. Daha sonra sinyali tekrar analog forma çevirir ve modülasyona tabi tutarak alıcıya iletir. Temel mantık olarak klasik tekrarlayıcılar ile aynı amaca hizmet eder ancak sayısal veriye ulaştığı için veri üzerinde değişiklik yapma, filtreleme veya hedef seçme avantajlarını bu teknik içerisinde barındırır.

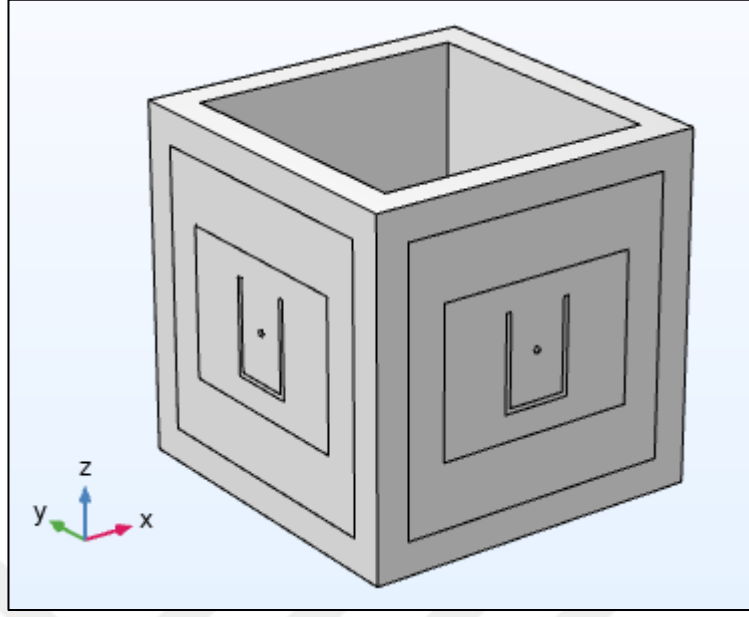


Şekil 5.2. Klasik çift RF katlı tekrarlayıcı modüle ait çalışma prensibi

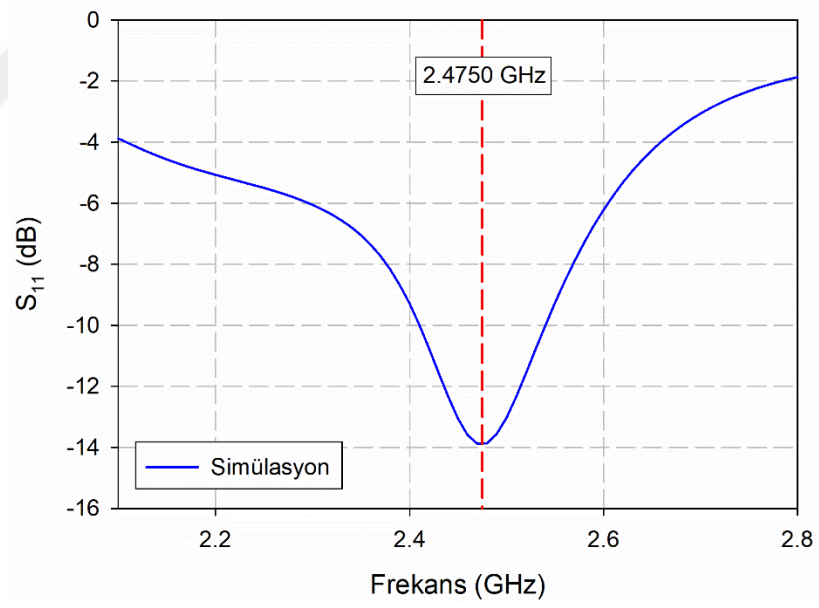
Bu bölümde 2.4-2.5 GHz frekans aralığını kapsayacak şekilde bir tekrarlayıcı anten sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tekrarlayıcı anten sistemi dört farklı yöne anahtarlanabilen yönlü bir anten tasarımını içerir. Tekrarlayıcının bahsedilen anahtarlama işlemini gerçekleştirebilmesi ve dört yönün herhangi birinden aldığı sinyali başka bir yöne iletebilmesi için dört yöllü SP4T dijital RF anahtarlama elemanı (HMC241AQS16) kullanılmıştır. Söz konusu anahtarlama elemanı 16 bacağına sahip, düşük maliyetli, yansıtıcı olmayan bir anahtardır.

Tekrarlayıcı anten sistemi için çalışmalara kutu tasarımı ile başlanmıştır. Tekrarlayıcıya ait kutunun üzerinde FR4 malzemesi ile üretilen dört adet u-yuvalı mikroşerit anten kullanılmıştır. Kutu, 3B yazıcı kullanılarak PLA malzemesi ile imal edilmiştir. Şekil 4.14'te gösterilmiş olan anten tasarımı parametreleri, COMSOL programı kullanılarak tasarlanan tekrarlayıcı kutusunda kullanılmıştır. Kutu kalınlığı 6.6 mm olarak ayarlanmış ve anten kutunun dış yüzeyine gömülerek düz bir yapı elde edilmiştir. Antenlerden biri enerjilendirilerek COMSOL programında simüle edilmiş ve yansıma katsayısı grafiği ile ışın diyagramı sonuçları gözlemlenmiştir. Tasarıma ait yansıma katsayısı grafiği Şekil 5.4'te ve ışın diyagramı Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Tasarımın 2.41-2.54 GHz'de 130 MHz'lik bir bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Işın diyagramına bakıldığında -y yönünde ışın yapmaktadır. Kazanç ise rezonans frekansı olan 2.47 GHz'de 7.08 dBi'dir.

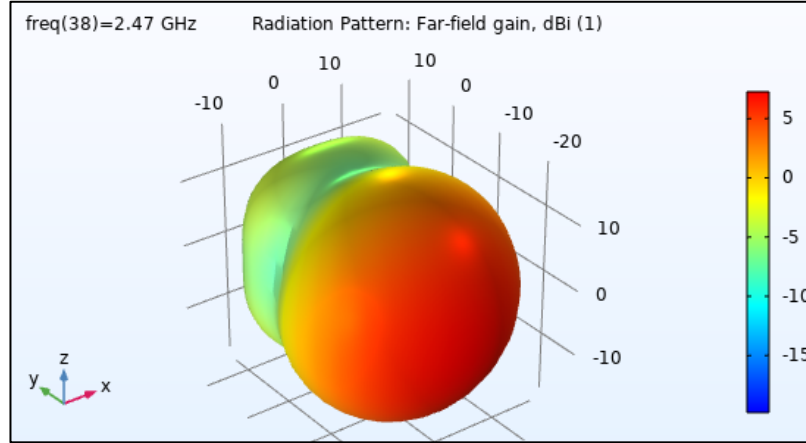




Şekil 5.3. Tekrarlayıcı anten sistemi için gerçekleştirilen anten ve kutu tasarımının COMSOL programında görüntüsü



Şekil 5.4. Tekrarlayıcı anten sistemindeki bir antenin simüle edilmesi ile elde edilen  $S_{11}$  grafiği



Şekil 5.5. Tekrarlayıcı anten sistemindeki antenlerden birinin simüle edilmesi ile elde edilen üç boyutlu ışınma diyagramı

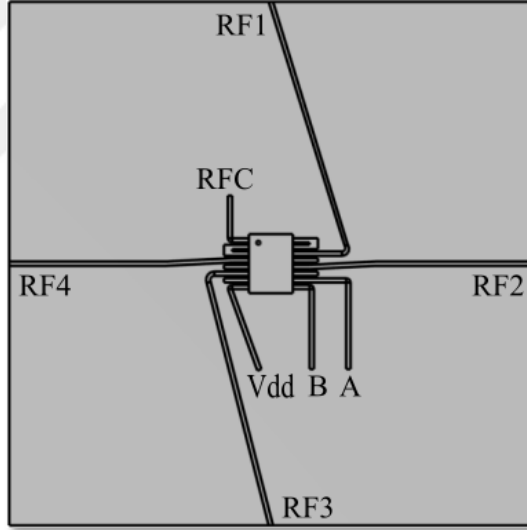
Tekrarlayıcı anten sisteminde iki ana eleman vardır. Birincisi tekrarlayıcı üzerine yerleştirilecek antenler ve ikincisi 1 giriş 4 çıkış yoluna sahip SP4T'dir. SP4T devre kartının RFC bacağına bağlanan NRF, kablosuz iletişimden sorumludur. İzolasyonu üst noktaya çıkarmak amacıyla tüm GND bacakları toprağa bağlanır. RF1, RF2, RF3, RF4 bacaklarından hangisinden çıkış alınacak ise Tablo 5.1'de gösterildiği gibi A, B bacaklarına gerekli TTL anahtarlama seviyeleri uygulanır.

Tablo 5.1. SP4T sinyal yolu kontrol tablosu

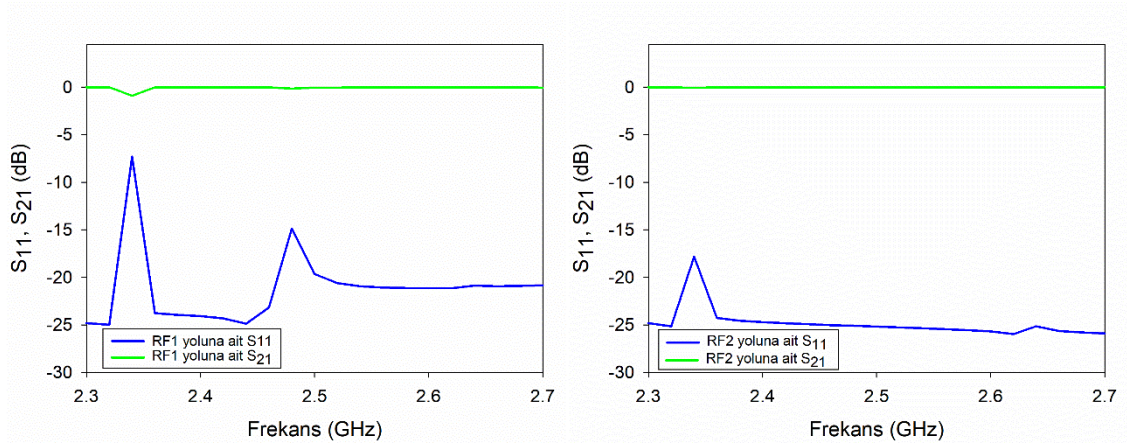
| Kontrol Girişi |       | Sinyal yol durumu |
|----------------|-------|-------------------|
| A              | B     | RFCOM'a           |
| PASİF          | PASİF | RF1               |
| AKTİF          | PASİF | RF2               |
| PASİF          | AKTİF | RF3               |
| AKTİF          | AKTİF | RF4               |

Devre kartının tasarımında yol kalınlıkları, HMC241AQS16 entegresinin bacak kalınlığı ile aynı olacak şekilde 0.41 mm olarak ayarlanmıştır. Entegre bacak kalınlığı ile hat kalınlığının aynı olması, oluşabilecek süreksizliklerin önüne geçmektedir. Kart, tekrarlayıcı kutusunun içine rahatça girecek şekilde 53x53 mm boyutlarında tasarlanmıştır. Kart üzerindeki yollar sonraki aşamada antenlere entegre edileceği için bu durum göz önünde bulundurularak yolların çiziminde kenar orta noktaları baz alınmıştır. Tasarım görüntüsü ve bacak bağlantıları Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Boşta kalan bacaklar GND'leri ifade etmektedir.  $\epsilon_r$ 'si 10 olan Rogers AD1000 taban malzemesi

üzerine tasarlanan devre kartının COMSOL programında çizimi gerçekleştirilerek çıkış yollarına ait  $S_{21}$  ve  $S_{11}$  grafikleri elde edilmiştir. Tasarımı yapılan SP4T kartının yollarına ait simülasyonlarında araya girme kaybının bir göstergesi olarak dB formundaki  $S_{21}$  değerlerinin olabildiğince sifıra yakın olması istenmektedir.  $S_{11}$  grafiği ise yansımayı temsil ettiği için burada mümkün olduğu kadar düşük seviyeler hedeflenmektedir. Bu doğrultuda Şekil 5.7’de sunulan RF1, RF2, RF3 ve RF4 yollarına ait grafikler incelendiğinde arzu edildiği gibi tüm yolların  $S_{21}$  değeri 0’a oldukça yakındır. Yolların  $S_{11}$  sonuçları için ise, RF2 ve RF4 yollarının RF1 ve RF3 yollarına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür. Ancak RF1 ve RF3 hatlarının simülasyon sonuçlarının da kabul edilebilir seviyelerde olduğu açıktır. Bu farklılığın tasarımda, zorunluluk gereği RF1 ve RF3 yollarının kavisli bir şekilde çizilmiş olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

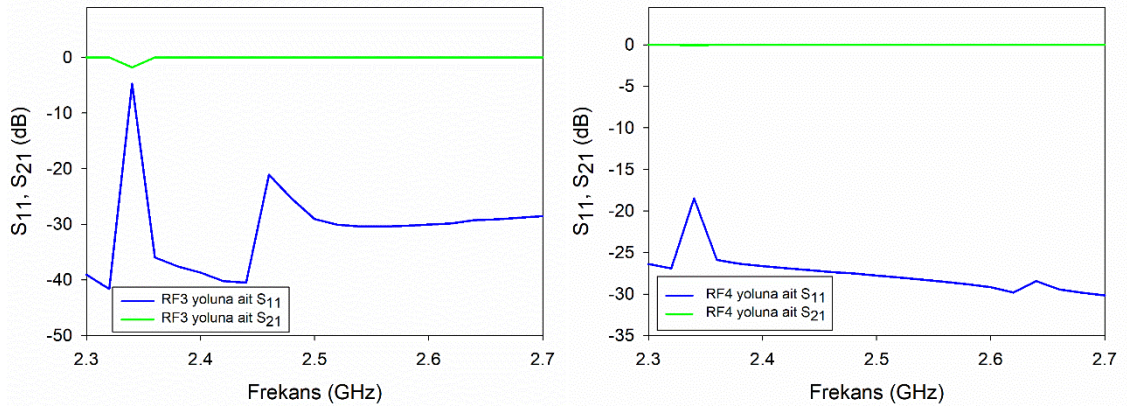


Şekil 5.6. SP4T devre kartına ait tasarım



(a)

(b)



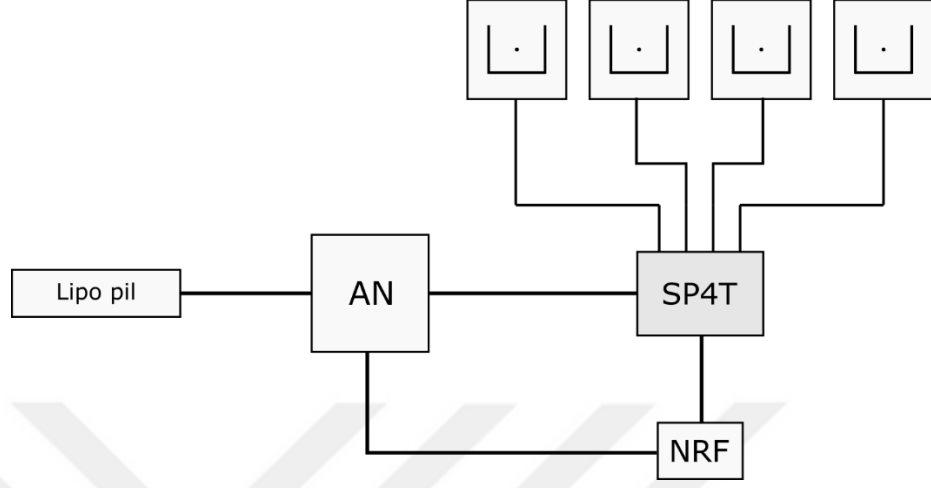
(c)

(d)

Şekil 5.7. SP4T devre kartının (a) RF1 yoluna ait S<sub>11</sub> ve S<sub>21</sub> grafiği, (b) RF2 yoluna ait S<sub>11</sub> ve S<sub>21</sub> grafiği, (c) RF3 yoluna ait S<sub>11</sub> ve S<sub>21</sub> grafiği, (d) RF4 yoluna ait S<sub>11</sub> ve S<sub>21</sub> grafiği

Bölüm 3.1’de belirtilmiş olan sebeplerden ötürü tekrarlayıcı anten sisteminde de AN mikrokontrolcü kart kullanılmıştır. AN, tekrarlayıcı anten sistemi içerisinde SP4T’nin anahtarlama işlemini üstlenir. AN ayrıca NRF’ten gelen verileri SPI arabirimi yardımı ile alır ve tekrar gönderilmek üzere NRF’e aynı yolla iletme görevini yürütür. Kablosuz haberleşme için SP4T kartında bulunan HMC241AQS16 entegresinin RFC bacağına NRF monte edilmiştir. NRF aynı zamanda sinüzoidal dalga şeklinde gelen sinyali dijital dönüşürme işleminde de görev almaktadır. Tekrarlayıcı anten sistemine ait blok şeması Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Güç kaynağı olarak lipo pil kullanılmıştır ve kullanılan pil 2S özellikli bir bataryadır. SP4T, AN, NRF ve lipo pil tekrarlayıcı anten sistemi için

tasarlanan kutunun içine yerleştirilmiştir. Bu sebeple sistemde kullanılacak olan cihazların küçük boyutlarda olmasına ve tasarlanmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 5.8. Tekrarlayıcı anten sistemi blok şeması

Tekrarlayıcı sisteminin genel yapısına ve ölçüm sonuçlarına Bölüm 7’de yer verilmiştir.

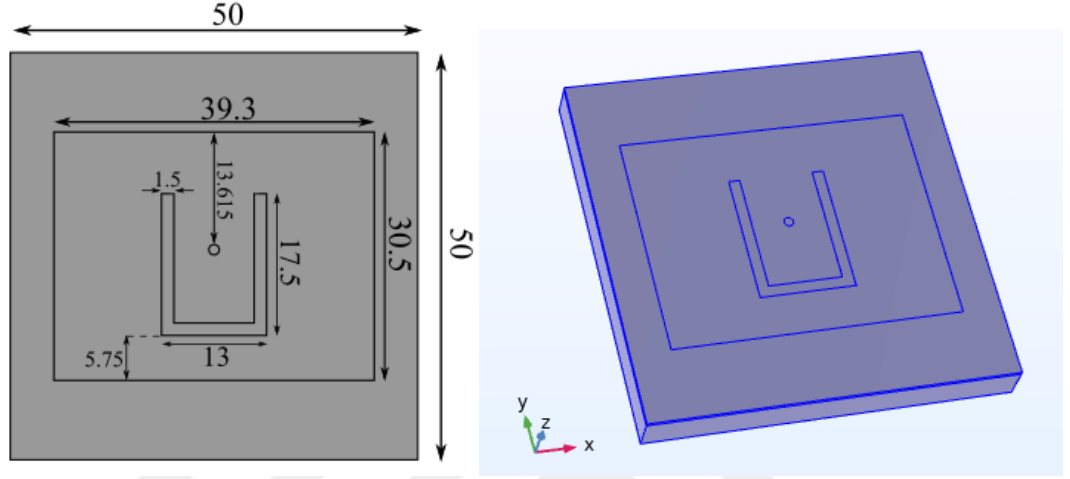
## BÖLÜM 6

### U-YUVALI SİLİNDİRİK ANTEN TASARIMI

Yüzey uyumlu antenler, bir cihaza, bir nesneye veya bulunduğu ortama şekil olarak uyum sağlayabilen konformal antenlerdir. Bu tür antenler, silindirik, küresel veya başka bir yapıda olabilirler [74]. Son yıllarda sosyal ağların artık hayatımızın içinde olması ve insanların yaşamlarının göz önünde olması modern yaşam hayatını arzu edilir bir hale getirmiştir. Doğal olarak bu, kullanılan ürünlerin sadece performansına değil aynı zamanda estetik görüntüsüne de bakılmasına sebep olmuştur. Bu bağlamda kavisli bir yüzeyde herhangi bir cihazdan çıkacak olan anten görüntüsünün hoş karşılanmaması gibi durumlarla karşılaşılabilir. Bazı sistemlerde ise antenin monte edileceği yerin düzlemsel olmaması, antenin kullanılacağı yere bağlı olarak gizlenmek isteniyor olması veya sürtünmenin azaltılmasının amaçlanması gibi sebeplerle düzlemsel anten yerine silindirik yapıda antenler tercih edilebilmektedir [75, 48]. Düzlemsel olmayan silindirik yüzeylere düzlemsel antenlerin yerleştirilmesi yapısal olarak süreksizlikler oluştururlar ve bunun, istenmeyen bir durum olması SA yapılarına yönelimi artırmıştır [76]. Modern bir askeri uçağa bakıldığında üzerinde yön tayini, iletişim, radar gibi çeşitli sistemler için kullanılan yaklaşık olarak 70 adet anten bulundurur. Durum böyle iken bir uçakta düzlemsel antenlerin kullanılması hem sürtünmeye ve buna bağlı olarak yakıt tüketiminin artmasına hem de estetiğinin bozuk olmasına sebep olacaktır. Bu gibi durumlarda SA'lar alternatif bir çözüm olmaktadır [74]. Bununla birlikte SA'lar, uydu iletişiminde, ulaşımında bir hızlı trende veya bir aracın bir parçasında da kullanılabilirler [48]. Mikroşerit antenlerin düşük profil, düşük maliyet ve üretim kolaylığı gibi avantajları olması ve düzlemsel olmayan yüzeylere uyumlu bir yapıya sahip olması sebebiyle SA yapılarında da çokça tercih edilen bir modeldir [77]. Bu kapsamda bu bölümde kompakt bir yapıya sahip olmasına dikkat edilerek silindirik yapıda konformal u-yuvalı mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.

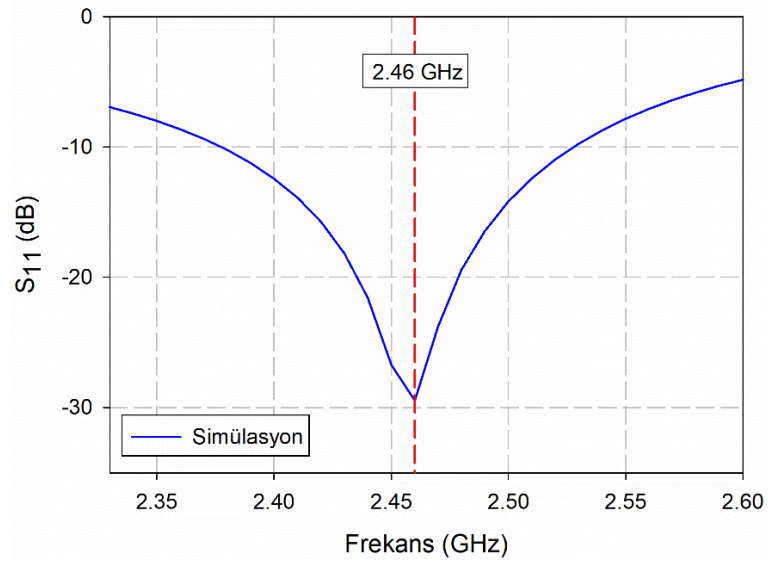
Bu tez çalışmasının tüm SA tasarımı çalışmalarında kalınlığının düşük olması ve bükülebilir olması sebebiyle  $\epsilon_r$ 'si 10 olan Rogers AD1000 taban malzemesi kullanılmıştır. Çalışmalara öncelikle düzlemsel u-yuvalı bir mikroşerit anten tasarımı yapılarak başlanmıştır. Tasarlanan antende bant genişliğini ve kazancı artırmak için Rogers AD1000 altında PETG malzemesi kullanılmıştır. Bölüm 4'te bahsedilmiş olan,

arzu edilen malzemenin T-rezonatör yöntemiyle  $\epsilon_r$ 'sini bulma çalışması PETG filamenti için de gerçekleştirilmiş ve PLA filamenti ile aynı değer olan 2.62 elde edilmiştir. Tasarlanan antenin PLA kalınlığı 5 mm olarak ayarlanmıştır. Tasarıma ait parametre değerleri, tasarımın COMSOL görüntüsü ve simülasyon sonucu Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



(a)

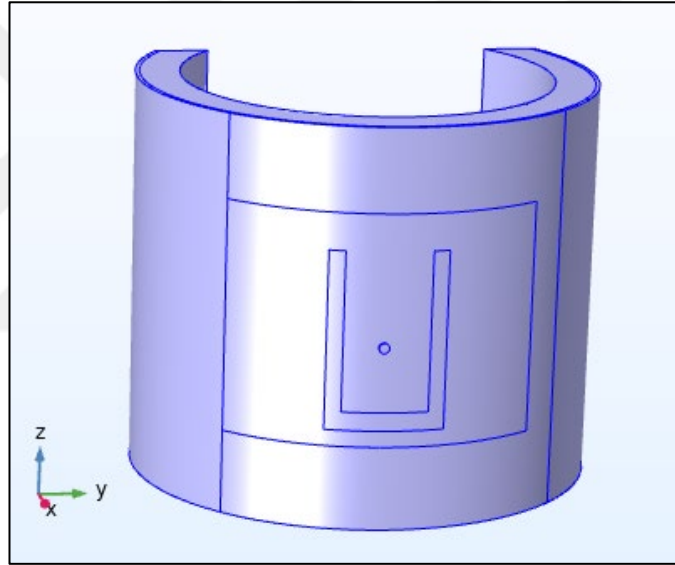
(b)



(c)

Şekil 6.1. (a) Tasarlanan u-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Antenin COMSOL programında oluşturulan modeli, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

USMA için yapılan ön çalışmadan sonra asıl tasarıma geçilerek Şekil 6.1'deki parametre değerleri aynen kullanılarak silindirik bir yapıya dönüştürülmüştür. Bu parametre değerleri kullanılarak yapılan USMA'nın sağlıklı sonuçlar vermemiş olması sebebiyle parametreler değiştirilerek SA üzerinden yeni bir tasarım yapılmıştır. Tasarımın COMSOL programında çizilmiş bir görüntüsü Şekil 6.2'de gösterilmektedir. Antene ait parametre bilgileri ise Tablo 6.1'de verilmiştir. Söz konusu antenin  $S_{11}$  grafiği Şekil 6.3'te gösterilmiş olup 2.372-2.568 GHz arasında 196 MHz bant genişliğine sahiptir. Antenin Şekil 6.4'teki ışın diyagramına bakıldığında x yönünde ışın yapmaktadır ve rezonans frekansı olan 2.475 GHz'de 4.75 dBi kazanç değeri görülmüştür. Antene ait en yüksek kazanç değeri ise 2.45 GHz'de 4.76 dBi'dir.

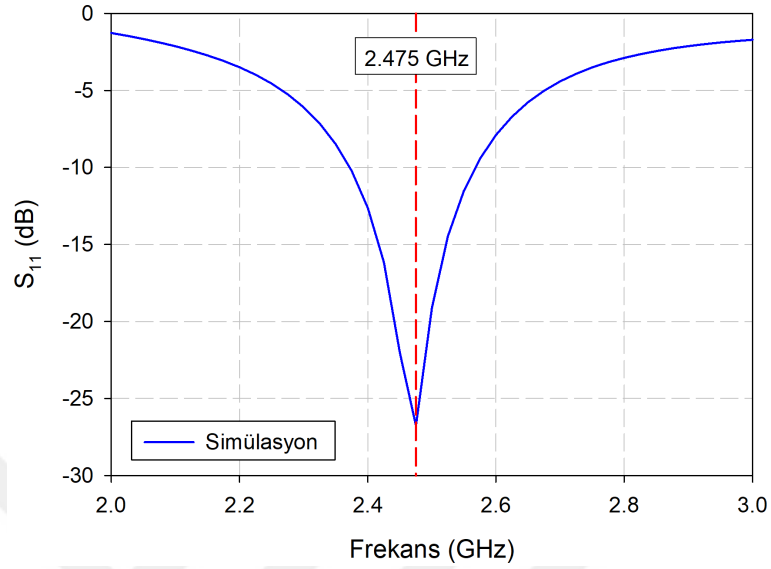


Şekil 6.2. Tasarlanan USMA'nın COMSOL programında görüntüsü

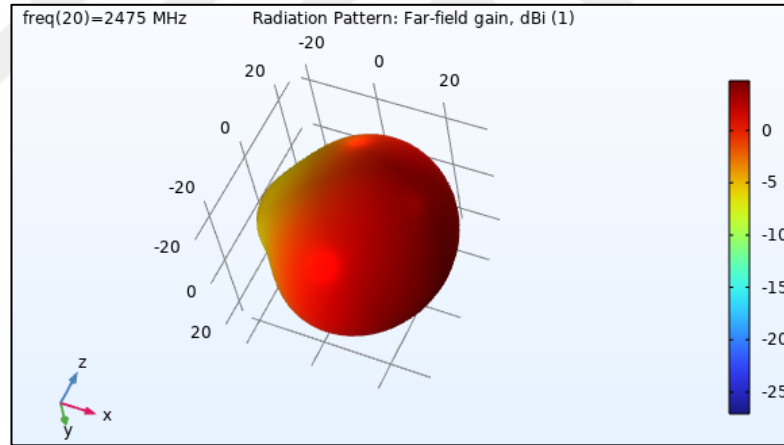
Tablo 6.1. Tasarlanan USMA'ya ait parametre ölçüleri

| Parametre | Açıklama                        | Uzunluk (mm)                |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------|
| R         | Anten yarıçapı                  | 29                          |
| L         | Yamanın uzunluğu                | 29                          |
| W         | Yamanın genişliği               | 37.14                       |
| $L_s$     | Yuva uzunluğu                   | 22.31                       |
| $W_s$     | Yuva genişliği                  | 14.48                       |
| $L_p$     | Yuva ile yama arasındaki mesafe | 2.046                       |
| d=m       | Yuva kalınlığı                  | 1.94                        |
| H         | Toplam anten kalınlığı          | 6.6<br>(PLA:5, AD1000:0.51) |



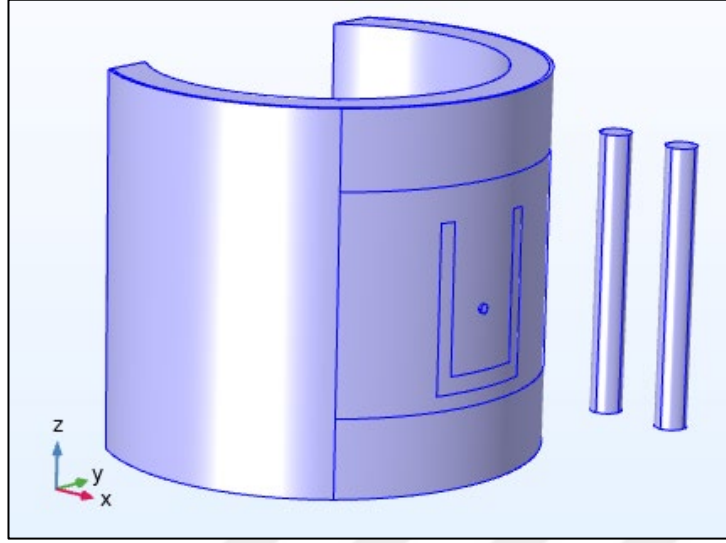


Şekil 6.3. Tasarlanan USMA'ya ait  $S_{11}$  grafiği

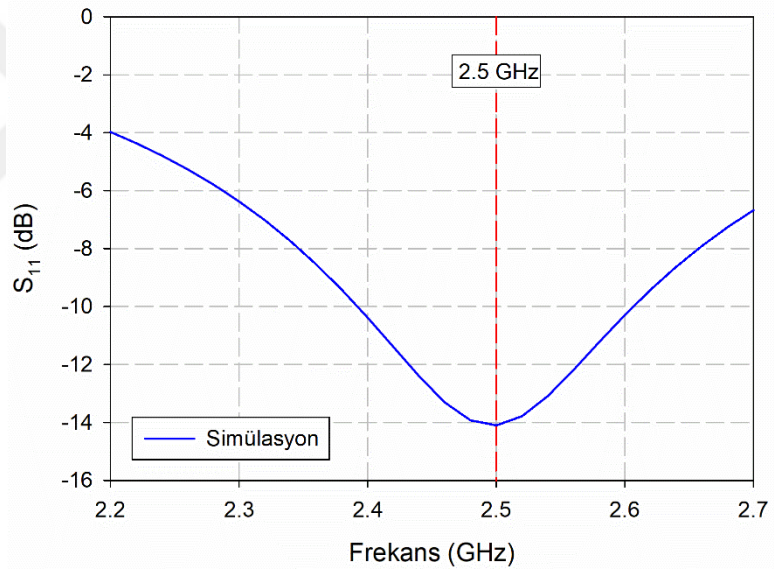


Şekil 6.4. Tasarlanan USMA'nın üç boyutlu ışıma diyagramı

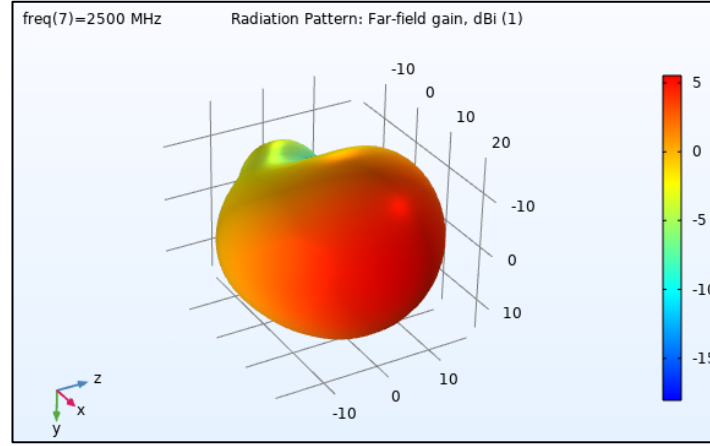
Antenin kazancını artırmak için daha önce Bölüm 4'te bahsedilmiş ve denenmiş olan yönlendirici ekleme yöntemi burada da kullanılmıştır. İki adet yönlendirici çubuk kullanılarak kazanç artırılmıştır. Yönlendirici olarak kullanılan çubukların yarıçapı 2 mm ve uzunluğu 35 mm 'dir. Yönlendiriciler arası mesafe COMSOL programının parametrik tarama özelliğinden faydalanılarak 10 mm olarak belirlenmiştir. Antenin üç boyutlu olarak çizilmiş görüntüsü Şekil 6.5'te sunulmuştur. Söz konusu antenin  $S_{11}$  grafiği Şekil 6.6'da verilmiştir. Anten, 2.392-2.607 GHz arasında 215 MHz'lik bir bant genişliğine sahiptir. Şekil 6.7'de gösterilmekte olan antenin ışıma diyagramından x yönünde ışıma yaptığı görülmektedir. Rezonans frekansında 5.37 dBi anten kazancına sahiptir.



Şekil 6.5. Yönlendirici eklenmiş USMA'nın COMSOL görüntüsü



Şekil 6.6. Yönlendirici eklenmiş USMA'ya ait  $S_{11}$  grafiği



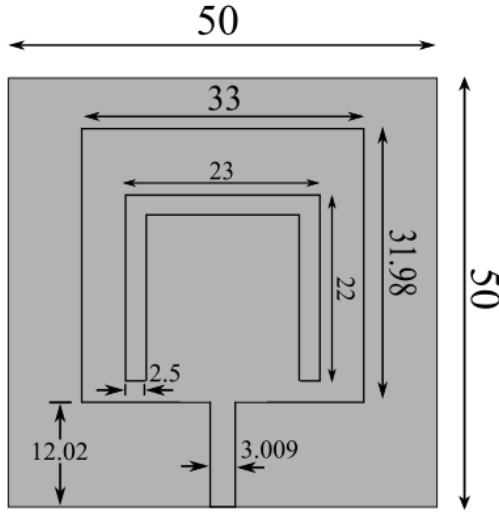
Şekil 6.7. Yönlendirici eklenmiş USMA'ya ait üç boyutlu ışınma diyagramı

## BÖLÜM 7

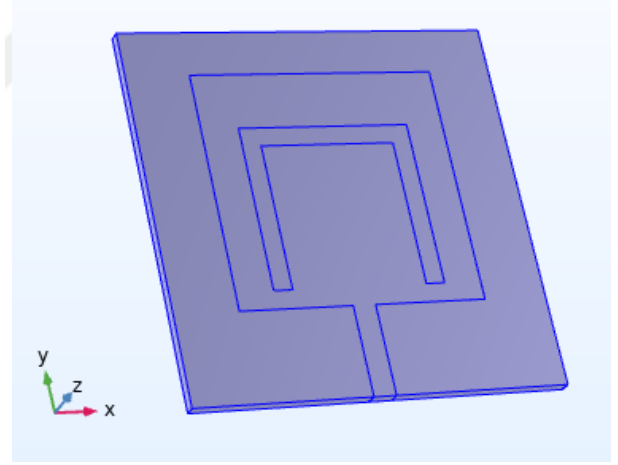
### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 7.1. Üç Boyutlu Anten Işıma Diyagramı Test Sonuçları

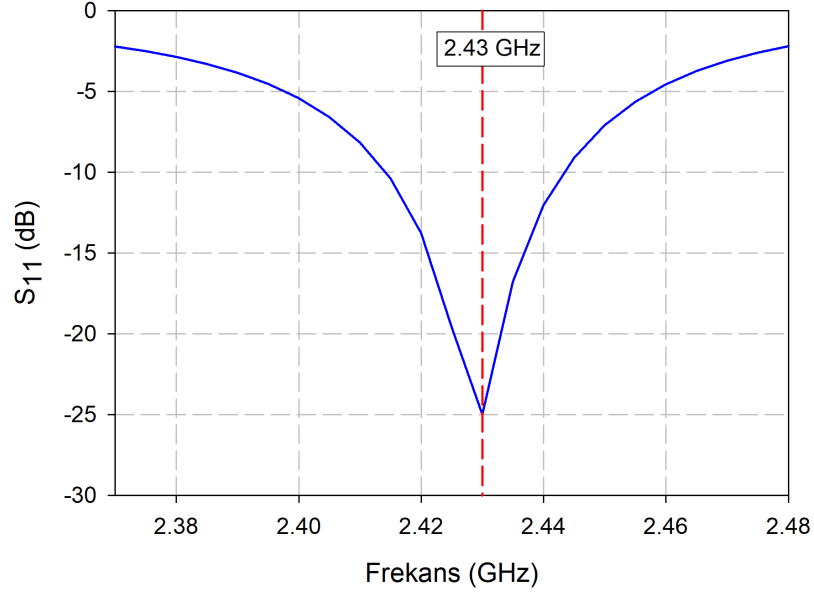
Bu bölümde geliştirilen üç boyutlu anten ışın diyagramı ölçüm sistemini test etmek için mikroşerit beslemeli ve u-yuvalı bir mikroşerit anten tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1’de söz konusu antene ait parametre ölçüleri tasarımın COMSOL görüntüsü ve simülasyon sonuçları gösterilmektedir. COMSOL programında simülasyonu gerçekleştirilen antenin tasarımında taban malzemesi olarak,  $\epsilon_r$ 'si 4.15 ve kalınlığı 1.6 mm olan FR4 taban malzemesi kullanılmıştır. Besleme hattı  $50 \Omega$  karakteristik empedansa sahip ve 3 mm genişliğindedir. Bu parametre değerleri ile tasarlanan söz konusu mikroşerit anten 2.43 GHz frekansında rezonans durumuna ulaşmaktadır.



(a)



(b)

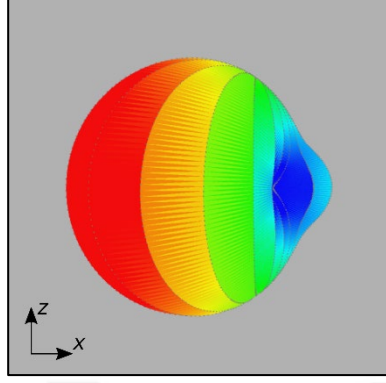


(c)

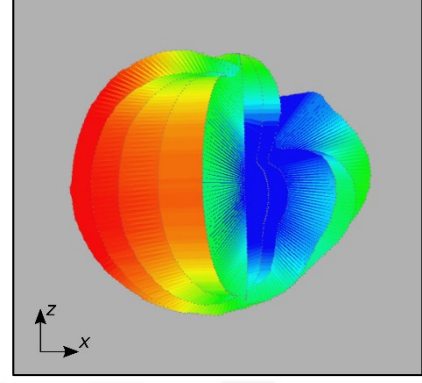
Şekil 7.1. (a) Tasarlanan u-yuvalı yama antene ait ölçüler, (b) Ölçüm ve simülasyon sonuçları değerlendirilen u-yuvalı mikroşerit anten, (c) Simülasyon sonucunda elde edilen  $S_{11}$  grafiği

Anten ölçümleri için mikroşerit anten Resim 3.3'te görüldüğü gibi uygun bir destek ve sıcak silikon yardımı ile alıcı sistem üzerine sabitlenmiştir. Sabitleme yüksekliği belirlenirken antenin dönüş mekanizmasının merkezinde olması kriterine dikkat edilmiştir. Alıcı antenin kendi etrafındaki dönüşü 200 adım ve yarım daire irtifa dönüşü 10 adım olarak belirlenmiştir. Merkez bilgisayar tarafından kablosuz haberleşme kanalı ile verilen başlama komutları neticesinde gerçekleşen ölçümlerde elde edilen sonuçlar yine kablosuz haberleşme yöntemi ile otomatik olarak elde edilmiştir. Java programlama dili kullanılarak geliştirilen program sayesinde elde edilen sonuçlarla üç boyutlu çizimler elde edilmiştir. Çizimler Şekil 7.2'de görüldüğü gibi iki farklı düzlem üzerinden değerlendirilmiştir. Şekil 7.2 (a) ve (b)'de  $x$ - $z$  düzlemi dikkate alınarak elde edilen, sırasıyla COMSOL simülasyonu ve ölçüm sonuçları bulunmaktadır. Genel olarak simülasyon ve ölçüm sonuçlarının örtüştüğü özellikle genlik değerleri dikkate alınarak söylenebilir. Şekil 7.2 (b)'deki ölçümün geri demetteki kısmi uyumsuzluğunun kapalı mekan ölçümlerinin geri yansımalarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu çalışmayı takip eden araştırmalarda açık alan çalışmalarında bu husus üzerinde özellikle durulacaktır. Şekil 7.2 (c) ve (d)'de ise  $y$ - $z$  düzlemi dikkate alınarak elde edilen sırasıyla COMSOL simülasyonu ve ölçüm sonuçları bulunmaktadır. COMSOL yazılımının elde

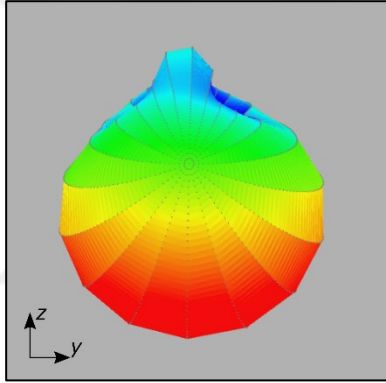
ettiği sonuç ile imal edilen kablosuz üç boyutlu ölçüm sisteminin sonucunun büyük oranda örtüştüğü söylenebilir.



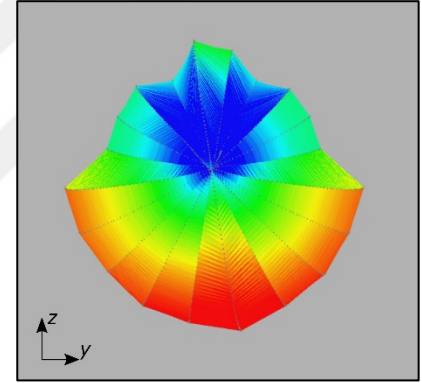
(a)  $x$ - $z$  düzlemi (Comsol)



(b)  $x$ - $z$  düzlemi (Ölçüm)



(c)  $y$ - $z$  düzlemi (Comsol)



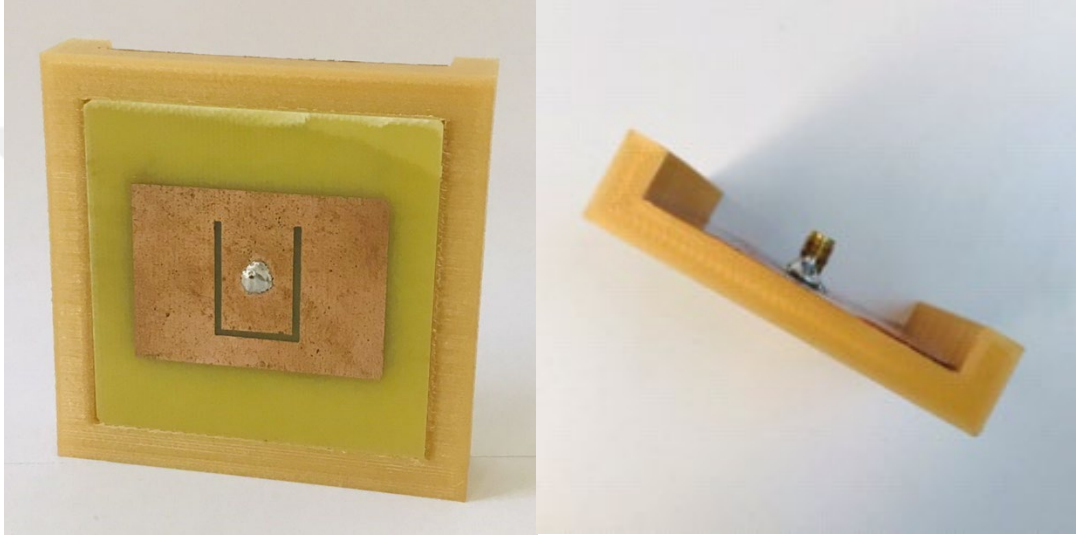
(d)  $y$ - $z$  düzlemi (Ölçüm)

Şekil 7.2. (a) U-yuvalı mikroşerit antenin  $x$ - $z$  düzlemindeki Comsol simülasyonu, (b) kablosuz üç boyutlu anten diyagramı sisteminin  $x$ - $z$  düzlemindeki ölçüm sonuçları, (c) U-yuvalı mikroşerit antenin  $x$ - $z$  düzlemindeki Comsol simülasyonu, (d) kablosuz üç boyutlu anten diyagramı sisteminin  $x$ - $z$  düzlemindeki ölçüm sonuçları

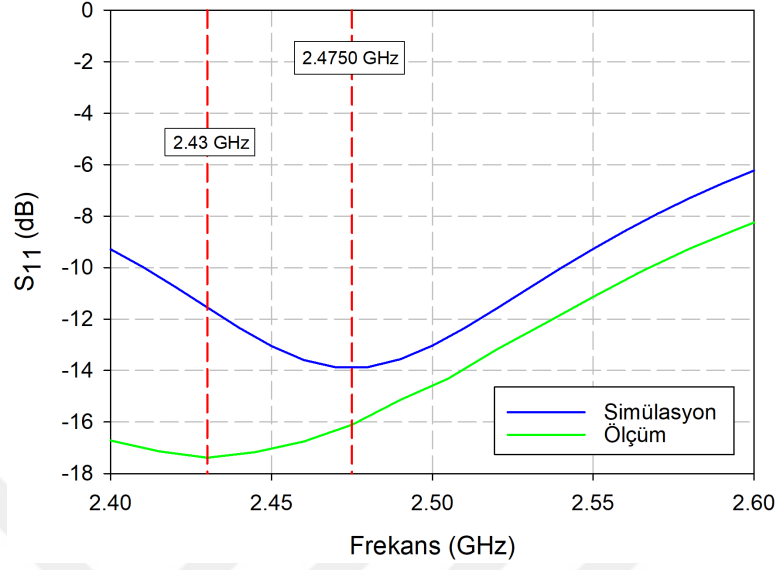
## 7.2. Tekrarlayıcı Anten Sisteminin İmalat ve Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde geliştirilen tekrarlayıcı anten sisteminin imalat aşamaları, genel yapısı ve ölçüm sonuçları verilmiştir. Tasarlanan tekrarlayıcı anten sistemi imal edilmeden önce kutu şeklindeki sistemin bir kısmı imal edilerek ara sonuç değerlendirmesi yapılmıştır. İmal edilen anten tasarımının fotoğrafı Resim 7.1’de gösterilmektedir. 3B yazıcı kullanılarak PLA filamentini çıktı alınmıştır. PLA’nın arka kısmına toprak görevi görmesi için bakır bant yapıştırılmıştır. FR4 taban malzemesi kullanılarak u-yuvalı anten basımı gerçekleştirilmiştir. Son olarak portun lehimlemesi gerçekleştirilerek VNA yardımı ile  $S_{11}$  parametre ölçümü alınmıştır. Şekil 7.3’te tasarıma ait ölçüm sonuçlarının simülasyon

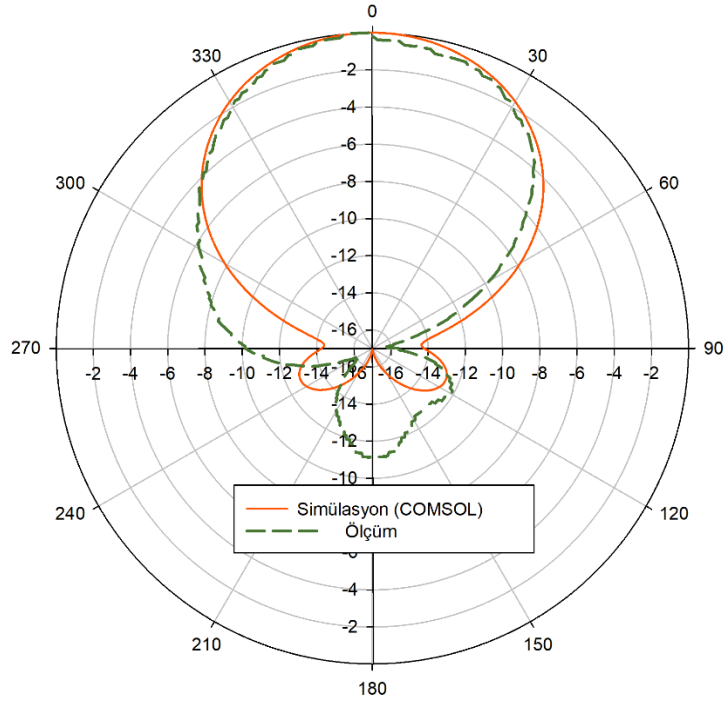
sonuçları ile karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. Hem ölçüm hem de simülasyon sonuçlarının oldukça başarılı olduğu ve hedeflenen 2.4-2.5 GHz aralığının bant genişliği itibariyle özellikle ölçüm sonucunda çok iyi kapsandığı görülmektedir. Şekil 7.4'te ise yarım kutu tekrarlayıcı anten tasarımına ait ışınma diyagramının simülasyon ve ölçüm sonuçları verilmiştir. Işınma diyagramı ölçümü bu tez kapsamında sunulan diyagram ölçüm sisteminin iki boyutlu ölçüm özelliği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir.



Resim 7.1. Tekrarlayıcı için tasarlanan antenin yüzey üzerindeki konumu ve port bağlantı noktası



Şekil 7.3. Yarım kutu tekrarlayıcı anteni tasarımının  $S_{11}$  parametresi simülasyon ve ölçüm sonuçları



Şekil 7.4. Yarım kutu tekrarlayıcı anten tasarımına ait ışım diyagramının ölçüm ve simülasyon sonuçları

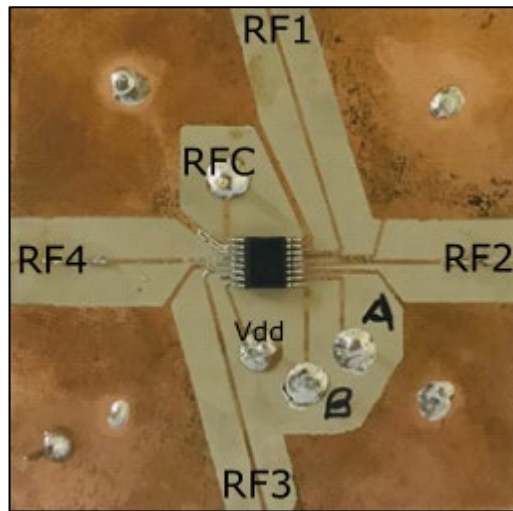


Yarım kutudan sağlıklı sonuçların alınmasından sonra tekrarlayıcının tam hali imal edilmiştir. Tekrarlayıcıya ait kutu üzerine basımı gerçekleştirilen 4 adet u-yuvalı anten entegre edilmiştir. İmal edilen tekrarlayıcı modüle ait görüntü Resim 7.2’de verilmiştir.



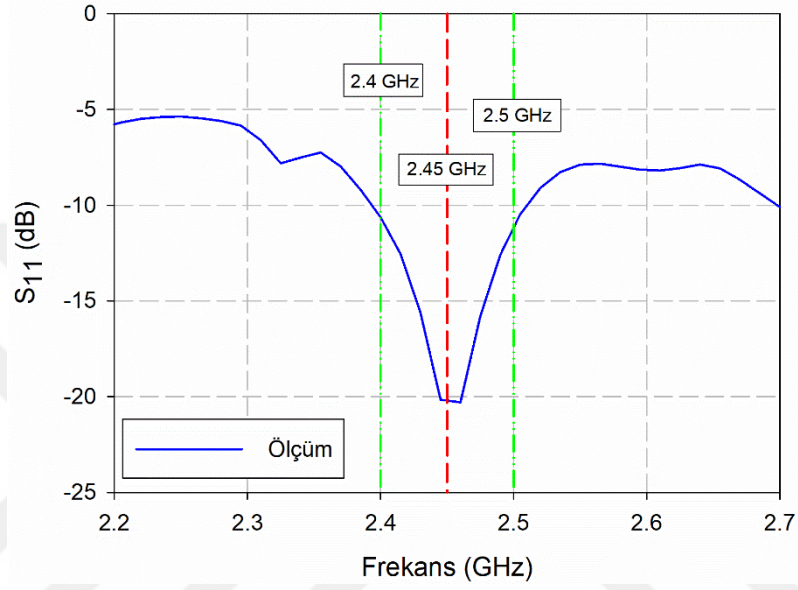
Resim 7.2. İmal edilen tekrarlayıcı anten modülü

Tekrarlayıcı anten sistemi için gerekli olan anten ve kutu tasarımı gerçekleştirildikten sonra dört farklı yöne anahtarlama yapabilmek amacıyla SP4T kart tasarımı ile ilgili çalışmalara başlanmıştır. SP4T kartı için Rogers AD1000 malzemesi kullanılarak basım işlemi gerçekleştirilmiştir. Basımı gerçekleştirilen SP4T kartı Resim 7.3’te gösterilmektedir.



Resim 7.3. SP4T tasarım çıktısı

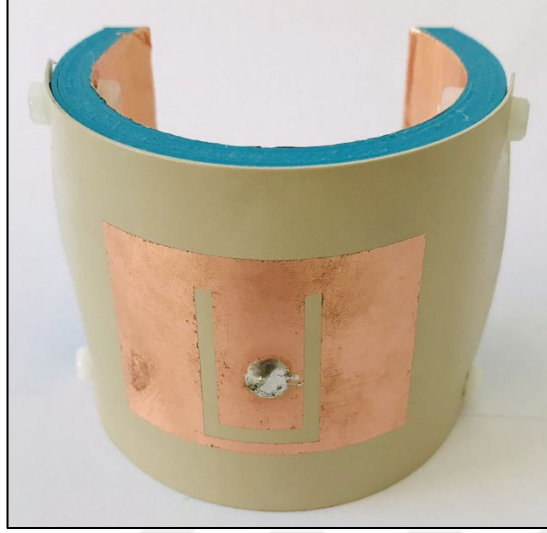
SP4T kartının RF4 yolu için VNA yardımıyla yapılan  $S_{11}$  ölçüm sonucu Şekil 7.5'te sunulmuştur. Grafik üzerindeki rezonans frekans 2.45 GHz'te ve bant genişliği 2.4-2.5 GHz arasında gerçekleşmektedir. Verilen grafikten de anlaşılacağı üzere tasarlanan anten ve SP4T anahtarlama sistemi tekrarlayıcı modül ile birlikte uyum içerisinde çalışabilecek nitelikte ve hedeflenen bant aralığını tam olarak kapsayan bir çalışma karakterindedir.



Şekil 7.5. Tekrarlayıcıya monte edilmiş SP4T üzerindeki RF4 yoluna bağlı U-yuvalı antenin örnek  $S_{11}$  ölçüm grafiği

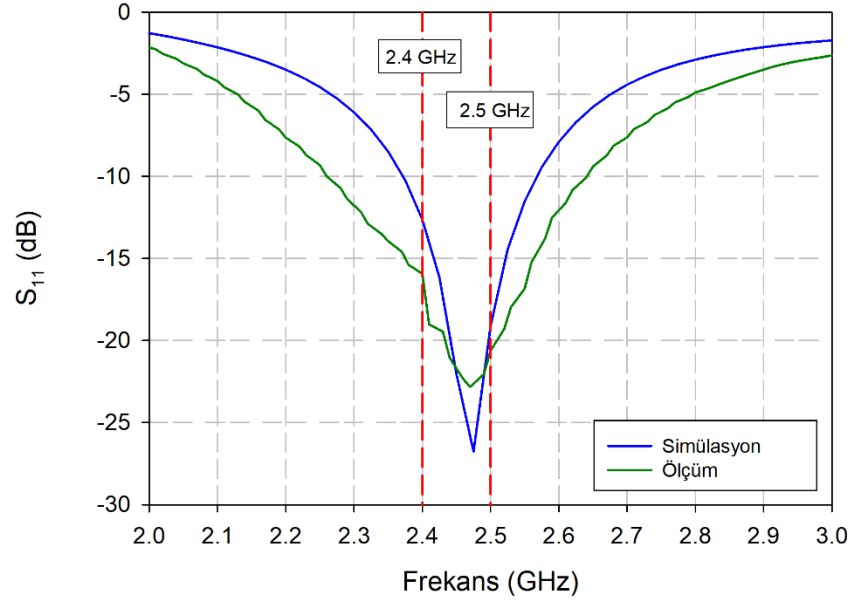
### 7.3. U-yuvalı Silindirik Anten İmalatı ve Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde, Bölüm 6'da tasarımı gerçekleştirilmiş olan USMA'nın imal edilmesi ve ölçüm sonuçları ile alakalı bilgiler verilmiştir. İmal edilen USMA yapısı Resim 7.4'te gösterilmektedir. 3B yazıcı yardımıyla PETG filamenti ile silindirik formda bir yapı elde edilmiştir. PETG üzerine Rogers AD1000 taban malzemesi kullanılarak u-yuvalı anten basımı gerçekleştirilmiştir. Rogers AD1000'in sabitlenmesi için dört adet plastik vida kullanılmıştır. Toprak görevi görmesi için yapının iç kısmına bakır bant yapıştırılarak port lehimlemesi gerçekleştirilmiştir.

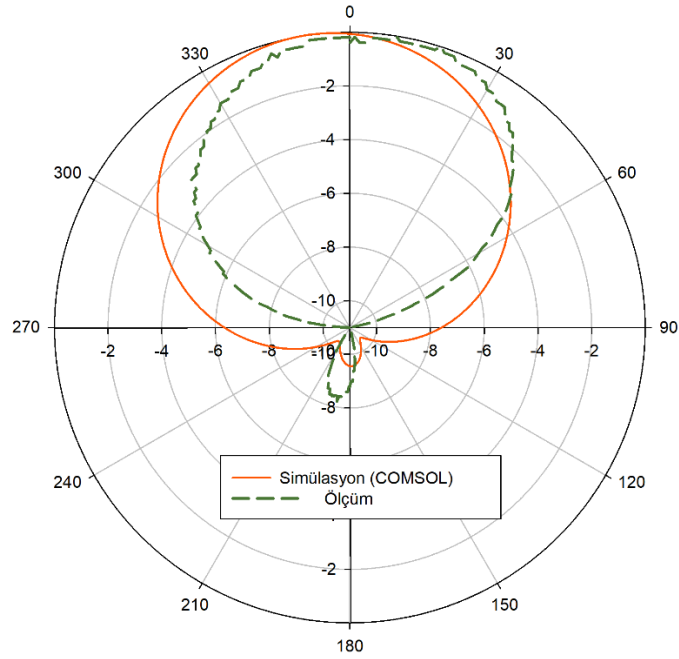


Resim 7.4. İmal edilen silindirik u-yuvalı anten

Simülasyon sonucu 2.475 GHz’de rezonansa giren antenin ölçüm sonucu da aynı yerde rezonans frekansı değerini göstermiştir. Şekil 7.6’da da görüldüğü gibi ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında oldukça iyi bir örtüşme olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 7.7’de USMA’ya ait ışınma diyagramının ölçüm ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Işınma diyagramı ölçümü, bu tez kapsamında önerilen ışınma diyagramı ölçüm sistemi kullanılarak simülasyon sonucu ile karşılaştırma yapmak amacıyla iki boyutlu olarak elde edilmiştir. Şekil 7.7’de sunulan simülasyon ve ölçüm sonuçlarının ışınma diyagramı temel unsurları açısından yeterince örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 7.6. U-yuvalı silindirik antene ait  $S_{11}$  parametresinin simülasyon ve ölçüm sonuçları



Şekil 7.7. U-yuvalı silindirik antene ait ışıma diyagramının ölçüm ve simülasyon sonuçları

## BÖLÜM 8

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında özgün u-yuvalı mikroşerit anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda temel olarak yüksek kazançlı, küçük boyutlarda ve geniş bant özelliğine sahip antenler hedeflenmiştir. Mikroşerit antenlerde taban malzemesinin kalınlığının kazanç ve bant genişliğine olumlu etkisi dikkate alınarak, tasarımlarda malzeme kalınlığını artırma yoluna gidilmiştir. Bu amaçla klasik FR4 taban malzemesi ve 3B yazıcı kullanılarak oluşturulan PLA yapılar tasarımların temel elemanları olarak dikkate alınmıştır.  $\epsilon_r$ 'si 2.62 olan PLA filamentinin anten tasarımında kullanılmasıyla anten kalınlığı artırılmış ve böylece antenin kazanç ve bant genişliği değerleri iyileştirilmiştir. Daha sonra Yagi-Uda anten türü çalışma mantığı örnek alınarak tasarımı yapılan antende yönlendirici elemanlar kullanılmıştır. Böylece anten kazancı 6.54 dBi'den 8.11 dBi seviyesine kadar yükseltilebilmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen bir diğer çalışma, simülasyonu yapılarak imal edilen anten tasarımlarının üç boyutlu ışın diyagramlarının elde edilebildiği bir ölçüm sistemi prototipi üretimidir. Bir antenin ışın karakteristiğinin ölçüm ile elde edilmesi için yankısız bir ortama ve hem irtifa hem de istikamet açılarında uyumlu olarak hareket edebilen bir mekanizmaya ihtiyaç duyulur. Bu ihtiyaçlardan yankısız ortam sorunu göz önünde bulundurularak, kapalı alanlarda yatay pozisyonda açık alanlarda dikey pozisyonda kullanıma uygun bir ölçüm sistemi imal edilmiştir. Böylece oldukça maliyetli olan yankısız ortam ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Geliştirilen ölçüm sisteminin bir diğer avantajı ise bileşenler arasında kablo bağlantılarının olmaması ve bileşenlerin modülerliğidir. Bu özellik ile sistemin hareket kabiliyeti artırılmıştır. COMSOL programı kullanılarak tasarlanan ve sonrasında üretilen bir antenin ışın diyagramı önerilen sistem ile ölçülmüştür. Elde edilen üç boyutlu ışın diyagramları incelendiğinde ölçüm sonucunun simülasyon sonucu ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. İlerleyen zamanlarda bu sistem küçük parçalara ayrılarak daha taşınabilir bir formda tasarlanabilir.

Yine bu tez kapsamında, uzak mesafelerle haberleşme gereksinimi veya iki konum arasında engel bulunması gibi sebeplerden ötürü bir tekrarlayıcı anten sistemi tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu tekrarlayıcı modül sinüzoidal dalga şeklinde herhangi bir yönden aldığı sinyali demodüle ederek sayısal veriye çevirir. Ardından istenilen yönde

tekrar göndermek amacıyla bu sayısal veriyi sinüzoidal biçime çevirerek modüle eder. Bu süreç tekrarlayıcı içerisinde kullanılan haberleşme modülü sayesinde gerçekleştirilmektedir. Üzerinde bulundurduğu dört adet u-yuvalı anten sayesinde herhangi bir yönden sinyal alabilmektedir. İçerisinde bulundurduğu SP4T entegresi aracılığıyla anahtarlama işlemini gerçekleştirmektedir. Bu sayede alınan sinyal istenilen yönde iletilebilmektedir. Küçük boyutlarda kutu şeklinde tasarımı yapılan tekrarlayıcı modül bu özelliği ile de oldukça kullanışlı bir yapıdadır. İlerleyen zamanlarda bu sistem geliştirilerek modül içerisinde kullanılan alıcı verici haberleşme modülü ve mikroişlemci sayesinde veri kaydetme ve filtreleme gibi özellikler de eklenebilir.

Son olarak tez kapsamında u-yuvalı silindirik yapıda konformal bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yapı düzlemsel olmayan silindirik ortamlarda kullanıma elverişli olarak tasarlanmıştır. Silindirik antenin geometrisi COMSOL programının sahip olduğu parametrik tarama tekniği kullanılarak optimize edilmiştir. Tasarımda esnek bir yapıya sahip olması sebebiyle Rogers AD1000 taban malzemesi kullanılmıştır. Kazanç ve bant genişliği artışı sağlamak için 3B yazıcı yardımıyla PETG filament kullanılmıştır. Küçük boyutlardaki bu tasarım imal edildikten sonra bir VNA yardımıyla antenin giriş portunun yansıma katsayısı ölçülmüştür. Ayrıca bu tez kapsamında önerilen ölçüm sistemi ile ışın diyagramı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm ve simülasyon sonuçlarının uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Son aşamada kazanç değerinin yükseltilmesi için daha önce tez kapsamında kullanılan yönlendirici eleman tekniği dikkate alınarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sayesinde anten kazancı 4.76 dBi değerinden 5.37 dBi seviyesine yükseltilmiştir.

## KAYNAKÇA

1. Brandissou J. P., Maes P., Ongareau E., Sillon J. C., Wyrwinski J., “A 30 MHz - 18 GHz fully automated far - field antenna measurement system”, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, s. 178-182, Irvine, CA, ABD, 1993.
2. Taygur M. M., Bař S., Yumrukaya E., Miran E. A. ve Günel S., “Low-cost FPGA based antenna pattern measurement system”, *International Conference on Applied Electronics*, Pilsen, Czech Republic, 2013.
3. Kittiwittayapong S., Phaebua K., Sittithai P. ve Lertwiriayaprapa T., “Low-cost planar near-field to far-field measurement system for a small antenna”, *13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, s. 1-3, Chiang Mai, Thailand, 2016.
4. Patel K., Jones R. ve Elsherbeni A., “A cost-effective far-field antenna pattern measurement system”, *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, s. 1-2, Denver, CO, USA, 2018.
5. Emin B. ve Basbug S., “A low cost measurement system for antenna radiation patterns with logarithmic RF detector”, *International Turkic World Congress on Science and Engineering*, s. 800-808, Niğde, 2019.
6. Schreiber J., “Antenna pattern reconstitution using unmanned aerial vehicles (UAVs)”, *IEEE Conference on Antenna Measurements Applications (CAMA)*, s. 1-3, Syracuse, NY, USA, 2016.
7. Virone G. et al, “Antenna pattern verification system based on a micro antenna pattern verification system based on a micro unmanned aerial vehicle (UAV)”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 169-172, 2014.
8. Paonessa F. et al, “UAV-based pattern measurement of the SKALA”, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*, s. 1372-1373, Vancouver, BC, Canada, 2015.
9. Schrader T., Bredemeyer J., Mihalachi M., Rohde J. ve Kleine-Ostmann T., “Concept and design of a UAS-based platform for measurements of RF signal-in-space”, *Adv. Radio Sci.*, 14, 1-9, 2016.
10. Fritzel T., Strauß R., Steiner H-J., Eisner C. ve Eibert T., “Introduction into an UAV-based near-field system for in-situ and large-scale antenna measurements”, *IEEE*

*Conference on Antenna Measurements Applications (CAMA)*, s. 1-3, Syracuse, NY, USA, 2016.

11. Paonessa F., Virone G., Bolli P. ve Lingua A. M., “UAV-based antenna measurements: Scan strategies”, *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, s. 1303-1305, Paris, France, 2017.
12. Lopez Y. A., Cappellin C., Las-Heras F. ve Breinbjerg O., “On the comparison of the spherical wave expansion-to-plane wave expansion and the sources reconstruction method for antenna diagnostics”, *Progress In Electromagnetics Research*, 87, 245-262, 2008.
13. Razavi S. F. ve Rahmat-Samii Y., “A new look at phaseless planar near-field measurements: limitations, simulations, measurements, and a hybrid solution”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 49 (2), 170-178, 2007.
14. Liu H., He Y. ve Wong H., “Printed U-slot patch antenna for 60 GHz applications”, *IEEE International Workshop on Electromagnetics; Applications and Student Innovation (iWEM)*, 153-155, Kowloon, 2013.
15. Verma S. ve Ansari J. A., “Analysis of U-slot loaded truncated corner rectangular microstrip patch antenna for broadband operation”, *International Journal of Electronics and Communications(AEÜ)*, 69 (10), 1483-1488, 2015.
16. Li, X., ve Li, C., “Design of high gain multiple U-slot microstrip patch antenna for wireless system”, *International Conference on Computational Problem-Solving*, s. 256-259, Li Jiang, China, 2010.
17. Mok, W. C., Wong, S. H., Luk, K. M., ve Lee, K. F., “Single-layer single-patch dual-band and triple-band patch antennas”, *IEEE Transactions On Antennas and Propagation*, 61 (8), 4341-4344, 2013.
18. Darimireddy, N. K., Reddy, R. R., ve Prasad, A. M., “Design of triple-layer double U-slot patch antenna for wireless applications”, *Journal of Applied Research and Technology*, 13 (5), 526-534, 2015.
19. Chen, H. M., Sze, J. Y., ve Lin, Y. F., “A broadband rectangular microstrip antenna with a pair of U-shaped slots”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 27 (5), 369-370, 2000.
20. Ata, O. W., Salamin, M., ve Abusabha, K., “Double U-slot rectangular patch antenna for multiband applications”, *Computers & Electrical Engineering*, 84, 2020.



21. Varma, R., Ghosh, J., ve Bhattacharya, R., “A compact dual frequency double U-slot rectangular microstrip patch antenna for WiFi/WiMAX”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 59 (9), 2174-2179, 2017.
22. Murugan, N. A., Balasubramanian, R., ve Patnam, H. R., “Printed ultra-wideband monopole U-slotted antenna for triple band-rejection”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 30 (12), 1532-1544, 2016.
23. Jeong, G., Yoon, J. H., Lee, S. M., ve Kwak, K. S., “Design of multiple U-shaped slot microstrip patch antenna in Hiper-LAN band”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 40 (5), 368-370, 2004.
24. Dehbashi, R., Atlasbaf, Z., ve Forooraghi, K., “New compact size microstrip antennas with harmonic rejection”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 5, 395-398, 2006.
25. Lee, K. F., Yang, S. L. S., ve Kishk, A. A., “Dual-and multiband U-slot patch antennas”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 645-647, 2008.
26. Elsewe, M. M., Dandu, V. K., ve Chatterjee, D., “Ultra-wideband low profile, U-slot microstrip patch antennas: L-probe feed design guidelines”, *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 31 (11), 1322-1329, 2016.
27. Chai, W., Zhang, X., ve Liu, J., “A novel wideband antenna design using U-slot”, *PIERS online*, 3 (7), 1067-1070, 2007.
28. Kidder, C., Li, M. Y., ve Chang, K., “Broad-band U-slot patch antenna with a proximity-coupled double/spl Pi-shaped feed line for arrays”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1, 2-4, 2002.
29. Deshmukh, A. A., ve Ray, K. P., “Compact broadband slotted rectangular microstrip antenna”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 1410-1413, 2009.
30. Surmeli, K., Basaran, E., Aksoy, S., ve Turetken, B., “A compact design of a wideband three layer U-slot stacked patch antenna”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 57 (3), 727-729, 2015.
31. Guo, Y. X., Shackelford, A., Lee, K. F., ve Luk, K. M., “Broadband quarter-wavelength patch antennas with a U-shaped slot”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 28 (5), 328-330, 2001.

32. Clenet, M., Ravipati, C. B., ve Shafai, L., “Bandwidth enhancement of U-slot microstrip antenna using a rectangular stacked patch”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 21(6), 393-395, 1999.
33. Kim, J. Y., Ha, S. J., Kim, D., Lee, B., ve Jung, C. W., “Reconfigurable beam steering antenna using U-slot fabric patch for wrist-wearable applications”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 26 (11-12), 1545-1553, 2012.
34. Mandal, K., ve Sarkar, P. P., “A compact low profile wideband U-shape antenna with slotted circular ground plane”, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 70 (3), 336-340, 2016.
35. Morshed, K. M., Karmokar, D. K., ve Esselle, K. P., “Low profile single-layer U-slot loaded shorted-patch antenna for wireless communications”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 59 (9), 2224-2226, 2017.
36. İnternet: Adeunis Firması “Repeater SIGFOX: network infrastructure”, <https://www.adeunis.com/en/produit/repeater-sigfox-network-infrastructure/>.
37. İnternet: CitySys Firması “IoT Repeater PLC”, <https://citysys.oms-is.eu/catalogue/communication-bus/iot-repeater-plc/>.
38. İnternet: Pantech Solutions Firması “Wi-Fi Repeater using NodeMCU to connect all your IoT Devices -NodeMCU Mini Projects”, <https://www.pantechsolutions.net/wi-fi-repeater-using-nodemcu-to-connect-all-your-iot-devices-nodemcu-mini-projects>.
39. İnternet: Atim Firması “Extended LoRaWAN network coverage”, <https://www.atim.com/en/produits/lorawan-network-repeater/>.
40. İnternet: Khomp Firması “Infrared Repeater”, <https://www.khomp.com/en/produito/repeater-infrared-zigbee/>.
41. Kim, E. H., Lee, K., Park, T. J., ve Son, H. W., “Unlicensed-band Single-hop LPWA Repeater for Smart-city IoT Applications” *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, s. 446-448, Jeju Island, Korea, 2021.
42. Sisinni, E., Carvalho, D. F., Ferrari, P., Flammini, A., Silva, D. R. C., ve Da Silva, I. M., “Enhanced flexible LoRaWAN node for industrial IoT”, *14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, s. 1-4, Imperia, Italy, 2018.

43. Emin, B., ve Başbug, S., “Digital Repeater Design for Single Chip Radio Transceiver”, *International Turkic World Congress on Science and Engineering*, s. 791-799, Niğde, Turkey, 2019.
44. Sahoo, R., “A Batman shaped Conformal Antenna for WiMAX Application”, *11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, s. 1-4, Kharagpur, India, 2020.
45. Le Goff, D., Song, Y., Riondet, G., ve Mouthaan, K., “Conformal and Lightweight 2.4 GHz ISM Band Patch Antenna on Silicone Sponge Rubber”, *2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, s. 1-4, Bucharest, Romania, 2020.
46. Sachdeva, V., Mishra, P. K., Sharma, D., ve Gupta, S. D.,” Design of antenna conformal to cylindrical surface for aircrafts”, *Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, s. 33-36, Gwalior, India, 2015.
47. Liu, X., Chen, Y., Jiao, Y., ve Zhang, F., “Conformal low-profile e-shaped patch antenna with unequal thickness substrate”, *International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, s. 624-627, Hangzhou, China, 2007.
48. Chauhan, B., ve Negi, A., “A conformal microstrip patch antenna on cylinder back-to-back E and U shape slot for triple band operation”, *6th International Conference-Cloud System and Big Data Engineering (Confluence)*, s. 670-674, Noida, India, 2016.
49. Kashiwa, T., Onishi, T., ve Fukai, I., “Analysis of microstrip antennas on a curved surface using the conformal grids FD-TD method”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 42 (3), 423-427, 1994.
50. Sahoo, R., Vakula, D., ve Sarma, N. V. S. N., “A dual U slot conformal antenna for Wi-Fi application”, *AMTA Proceedings*, s. 1-4, Austin, TX, USA, 2016.
51. Soily, S., Mazumder, R. K., ve Ali, K., “Design and simulation of two conformal arrays with dual patch and quadruple patch antenna elements”, *IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, s. 1-3, Chiang Mai, Thailand, 2015.
52. Mitra, D., et al, “Conductive electrifi and nonconductive ninjaflex filaments based flexible microstrip antenna for changing conformal surface applications”, *Electronics*, 10 (7), 821, 2021.

53. Yi, H., ve Boyle, K., “Antennas from theory to practice, 1st ed.”, *Wiley-Interscience*, s. 379, USA, 2008.
54. Balanis, C. A., “Antenna Theory, 3rd ed.”, *Wiley-Interscience*, s. 1023, USA, 2013.
55. Johnson, H., Richard C., “Antenna Engineering Handbook, 3rd ed.”, *Mc Graw Hill*, s.756, 1993.
56. Çalışkan, A., “Geniş bantlı TEM ve ridged horn anten dizisi tasarımı”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, s. 84, İstanbul, 2014.
57. Emin B., “Uzak Mesafe Haberleşmesi İçin Yönlü Anten”, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, s. 83, Nevşehir, 2019.
58. İnternet: Analog Devices Firması “AD8318 Datasheet and Product Info ”  
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD8318.pdf>.
59. İnternet: Analog Devices Firması “ADF4351 Datasheet and Product Info ”  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/455859/AD/ADF4351.html>.
60. Fang, D. G. , “Antenna theory and microstrip antennas”, *CRC Press*, s. 308, 2010.
61. Sharma, S. K., Shafai, L., ve Jacob, N., “Investigation of wide-band microstrip slot antenna”, *IEEE Transactions on Antennas And Propagation*, 52 (3), 865-872, 2004.
62. Qu, S. W., Li, J. L., Chen, J. X., ve Xue, Q., “Ultrawideband strip-loaded circular slot antenna with improved radiation patterns”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(11), 3348-3353, 2007.
63. Li, P., Liang, J., ve Chen, X., “Study of printed elliptical/circular slot antennas for ultrawideband applications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(6), 1670-1675, 2006.
64. Chen, W. S., ve Hsieh, F. M., “Broadband design of the printed triangular slot antenna”, *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, s. 3733-3736, Monterey, CA, USA, 2004.
65. Chen, W. L., Wang, G. M., ve Zhang, C. X., “Bandwidth enhancement of a microstrip-line-fed printed wide-slot antenna with a fractal-shaped slot”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57 (7), 2176-2179, 2009.
66. Chang, T. H., ve Kiang, J. F., “Compact multi-band H-shaped slot antenna”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61 (8), 4345-4349, 2013.

67. Darimireddy, N. K., Reddy, R. R., ve Prasad, A. M., “Design of triple-layer double U-slot patch antenna for wireless applications”, *Journal of Applied Research and Technology*, 13 (5), 526-534, 2015.
68. Gultekin, S. S., ve Uzer, D., “Modelling of physical slot parameters with Artificial Neural Networks for U-slot rectangular microstrip patch antennas”, *Scientific Research and Essays*, 6 (17), 3675-3683, 2011.
69. Khidre, A., Lee, K. F., Elsherbeni, A. Z., ve Yang, F., “Wide band dual-beam U-slot microstrip antenna”, *IEEE transactions on antennas and propagation*, 61 (3), 1415-1418, 2013.
70. Basbug, S., “Design and implementation of I-slot conformal circular patch antenna on sphere structure”, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31 (6), 1-11, 2021.
71. Farooq, M. U., Waseem, M., Mazhar, S., Khairi, A., ve Kamal, T., “A review on internet of things (IoT)”, *International journal of computer applications*, 113 (1), 1-7, 2015.
72. Madakam, S. et al, “Internet of Things (IoT): A literature review”, *Journal of Computer and Communications*, 3 (05), 164, 2015.
73. Lee, I., ve Lee, K., “The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises”, *Business horizons*, 58 (4), 431-440, 2015.
74. Josefsson, L., ve Persson, P., “Conformal array antenna theory and design”, *John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey*, s. 488, USA, 2006.
75. Piper, B. R., ve Bialkowski, M. E., “Modelling the distortions to manufacture spherical conformal microstrip antennas” *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, 4, s. 3525-3528, Monterey, CA, USA, 2004.
76. Yinusa, K. A., “A dual-band conformal antenna for GNSS applications in small cylindrical structures”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17 (6), 1056-1059, 2018.
77. Qing, L., Xiaowen, X., ve Mang, H., “Analysis of a probe-fed cylindrically conformal microstrip patch antenna using the conformal FDTD algorithm”, *International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, s. 876-879, Hangzhou, China, 2007.