

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

**UZAK MESAFE HABERLEŞMESİ İÇİN YÖNLÜ ANTEN
TASARIMI**

**Tezi Hazırlayan
Berkay EMİN**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Suad BAŞBUĞ**

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

**Ekim 2019
NEVŞEHİR**

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

**UZAK MESAFE HABERLEŞMESİ İÇİN YÖNLÜ ANTEN
TASARIMI**

**Tezi Hazırlayan
Berkay EMİN**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Suad BAŞBUĞ**

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

**Ekim 2019
NEVŞEHİR**

Dr. Öğr. Üyesi Suad BAŞBUĞ danışmanlığında Berkay EMİN tarafından hazırlanan "Uzak Mesafe Haberleşmesi İçin Yönlü Anten Tasarımı" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

11/11/2019

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Adnan GÖRÜR



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet YEŞİLBUDAK



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Suad BAŞBUĞ



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 13.11.2019 tarih ve 69-672 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

13/11/2019
Prof. Dr. Şahlan ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü



TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Berkay EMİN

TEŞEKKÜR

Bu tezde ve buna bağlı olarak yaptığım diğer çalıőmalarımnda bana yol gösteren ve hiçbir yardımını esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübeleriyle bana her konuda ışık tutan sayın danıőman hocam Dr. Öğr. Üyesi Suad BAŞBUğ’a teőekkürlerimi sunarım.

Emeklerinin karőılıęını ödeyemeyeceğim çok kıymetli anneme, babama ve ağabeyime, gösterdiği sabır ve verdiği destek için kıymetli arkadaőım Eda Hanım’a, teőekkürü bir borç bilirim.



UZAK MESAFE HABERLEŞMESİ İÇİN YÖNLÜ ANTEN TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)

Berkay EMİN

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2019

ÖZET

Bu tez çalışmasında sayısal sinyal tekrarlayıcılar için çift taraflı monopol Yagi-Uda ve mikroşerit anten tasarımları sunulmuştur. Her iki anten tasarımı için de yüksek yönlülük ve 2.4 GHz frekansında çalışabilme özellikleri temel hedef olarak belirlenmiştir. Ayrıca, antenlerin ışın diyagramlarını ölçebilmek için düşük maliyetli bir anten ışın diyagramı ölçüm sistemi de tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarlanan ölçüm sistemi yardımıyla 35 MHz ile 4400 MHz frekans aralığındaki antenlerin ışın diyagramları elde edilebilmektedir. Bu çalışmalara ek olarak, imal edilen antenlerin performanslarını gerçek bir uygulamada test edebilmek için, sayısal sinyal tekrarlayıcıları içeren bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistem yardımı ile söz konusu antenlerin performans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ışın diyagramı ve yansıma katsayısı ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal sinyal tekrarlayıcıları ile gerçekleştirilen test sonuçlarında ise yüksek yönlülüğe sahip anten tasarımlarının, uzak mesafelere veri aktarımı için oldukça elverişli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sinyal Tekrarlayıcı, Yönlü Mikroşerit, Monopol Yagi-Uda, Anten ölçüm sistemi.

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Suad BAŞBUĞ
Sayfa Adeti: 67

DIRECTIONAL ANTENNA DESIGN FOR DISTANCE COMMUNICATION
(M. Sc. Thesis)

Berkay EMIN

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2019

ABSTRACT

In this thesis, designs of monopole bidirectional Yagi-Uda and microstrip antennas are proposed for digital signal repeaters. For both antenna designs, high directivity and working at 2.4 GHz frequency features are determined as the main purpose. Additionally, a low cost antenna pattern measurement system is designed and manufactured to measure the antenna radiation patterns. The radiation patterns of the antennas in between 35 MHz and 4400 MHz frequency can be achieved with the help of the designed measurement system. In addition to these works, a system that includes digital repeaters is designed in order to test the manufactured antennas in a real application. By means of this system, the performance tests of the designed antennas are performed. It is observed that the obtained results of the radiation pattern and reflection coefficient measurements are in accord with those of the simulations. It is also concluded that the designed antennas that have high directivity are very suitable to transmit data to long distances at the end of experiments with the digital signal repeaters.

Keywords: Signal Repeater, Directional Microstrip, Monopole Yagi-Uda, Antenna measurement system.

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Suad BAŞBUĞ

Page Number: 67

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
RESİMLER LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	3
1.2. Literatür Özeti.....	3
BÖLÜM 2	
ANTEN İŞİMA DİYAGRAMI ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	6
2.1. Sinyal Üretici.....	6
2.2. RF Sinyal Algılayıcı.....	7
2.3. Ölçüm Metodu.....	8
BÖLÜM 3	
SAYISAL TEKRARLAYICI.....	11
3.1. Görüş Hattı Haberleşmesi.....	11
3.2. Yakın Görüş Hattı Haberleşmesi.....	12
3.3. Görüş Hattı İletimi Olmayan Haberleşme.....	12

3.4. nRF24L01 Tek Çipli Radyo Alıcı-Verici.....	13
3.5. Sinyal Tekrarlayıcı Modelleri	14
3.5.1. Tek antenli sayısal sinyal tekrarlayıcı	14
3.5.2. Çift antenli sayısal sinyal tekrarlayıcı	15
BÖLÜM 4	
ANTENLER VE ÖZELLİKLERİ.....	16
4.1. Anten	16
4.2. Anten Özellikleri	17
4.2.1. Antenlerin eşdeğer devre ile gösterimi.....	17
4.2.2. Anten alan bölgeleri	18
4.2.3. Anten karakteristik parametreleri.....	20
4.2.3.1. Işıma diyagramı	20
4.2.3.2. Işıma gücü ve direnci	21
4.2.3.3. Işıma verimi.....	22
4.2.3.4. Anten yönlülüğü ve kazancı	23
4.2.3.5. Kutuplanma	23
4.2.3.6. Giriş empedansı.....	24
4.2.3.7. Anten etkin yüzeyi.....	25
4.2.3.8. Duran dalga oranı	25
4.2.3.9. Bant genişliği.....	25
4.2.3.10. Demet genişliği.....	26
4.3. Anten Çeşitleri.....	26
4.3.1. Monopol anten.....	27
4.3.2. Mikroşerit anten	28
4.3.3. Yagi-Uda anten.....	32
4.4. Anten Tasarımı ve Analizi	33

4.4.1. Monopol Yagi-Uda anten tasarımı	34
4.4.2. Mikroşerit anten tasarımının temel parametreleri	36
4.4.2.1. Çalışma frekansı	36
4.4.2.2. Dielektrik sabiti	36
4.4.2.3. Dielektrik malzemenin yüksekliği.....	36
4.4.3. Yönlü mikroşerit anten tasarımı	37
BÖLÜM 5	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
5.1. Anten Işıma Diyagramı Ölçümü	41
5.2. Sayısal Sinyal Tekrarlayıcıların Performanslarının Ölçülmesi	44
5.3. Monopol Yagi-Uda Anten.....	50
5.4. Yönlü Mikroşerit Anten	55
BÖLÜM 6	
SONUÇ VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	67

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1.	Monopol Yagi-Uda antene ait fiziksel değerler	35
Tablo 4.2.	Yönlü mikroşerit antene ait fiziksel değerler	38
Tablo 5.1.	Bina içi LOS ölçüm sonuçları	46
Tablo 5.2.	Bina içi nLOS ölçüm sonuçları	47
Tablo 5.3.	Dış mekan LOS sonuçları.....	48
Tablo 5.4.	Dış mekan nLOS sonuçları.....	49
Tablo 5.5.	Monopol Yagi-Uda antenli sayısal sinyal tekrarlayıcısının dış mekan LOS ölçüm sonuçları.....	53
Tablo 5.6.	Monopol Yagi-Uda antenli sayısal sinyal tekrarlayıcısının dış mekan nLOS ölçüm sonuçları.....	55
Tablo 5.7.	Yönlü mikroşerit antenli sayısal sinyal tekrarlayıcısının dış mekan LOS ölçüm sonuçları	59
Tablo 5.8.	Yönlü mikroşerit antenli sayısal sinyal tekrarlayıcısının dış mekan nLOS ölçüm sonuçları	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Tasarlanan anten ölçüm sisteminin genel görünümü	8
Şekil 2.2.	Verici ünite şeması	9
Şekil 2.3.	Alıcı ünitenin şeması	9
Şekil 3.1.	Görüş hattı haberleşmesi	11
Şekil 3.2.	Yakın görüş hattı haberleşmesi	12
Şekil 3.3.	Görüş hattı iletimi olmayan haberleşme	12
Şekil 3.4.	Tek antenli tekrarlayıcı modeli	14
Şekil 3.5.	Çift antenli tekrarlayıcı modeli	15
Şekil 4.1.	Verici antenin eşdeğeri devresi	17
Şekil 4.2.	Alıcı antenin eşdeğeri	18
Şekil 4.3.	Antenin alan bölgeleri	19
Şekil 4.4.	Işıma diyagramı	21
Şekil 4.5.	Anten devre modeli	22
Şekil 4.6.	Anten yerleşimine göre kutuplanma değişimi	23
Şekil 4.7.	Anten ve anten beslemesinin empedans dağılımı	24
Şekil 4.8.	Demet genişlikleri	26
Şekil 4.9.	Mikroşerit antenlerin genel yapısı	29
Şekil 4.10.	Mikroşerit yama anten tipleri	30
Şekil 4.11.	Mikroşerit antenin besleme yapısı	30
Şekil 4.12.	Genel Yagi-Uda anten şeması	32
Şekil 4.13.	COMSOL Multiphysics kullanıcı ara yüzü	34
Şekil 4.14.	Monopol Yagi-Uda antene ait fiziksel değerler	35
Şekil 4.15.	Monopol Yagi-Uda antenlerin COMSOL programındaki görünümü	36
Şekil 4.16.	Yönlü mikroşerit antene ait fiziksel değerler	39
Şekil 4.17.	Tasarlanan yönlü mikroşerit antenin görünümü	40
Şekil 4.18.	Tasarlanan antenin COMSOL programındaki analize hazır görünümü	40
Şekil 5.1.	Modellenen yama anten	41
Şekil 5.2.	İmal edilen mikroşerit yama antenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarına ait ışımaya diyagramlarının karşılaştırılması	42

Şekil 5.3.	Modellenen monopol anten	43
Şekil 5.4.	İmal edilen monopol antenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarına ait ışım diyagramları.....	44
Şekil 5.5.	LOS ölçümü için bina içi planı.....	45
Şekil 5.6.	nLOS bina içi ölçüm planı.....	46
Şekil 5.7.	LOS dış mekan ölçüm planı	48
Şekil 5.8.	nLOS dış mekan ölçüm planı	49
Şekil 5.9.	Monopol Yagi-Uda'ya ait ölçüm ve simülasyon S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması.....	51
Şekil 5.10.	Tasarlanan monopol Yagi-Uda antene ait 3 boyutlu ışım diyagramı	51
Şekil 5.11.	İmal edilen monopol Yagi-Uda antenine ait ışım diyagramı.....	52
Şekil 5.12.	İmal edilen monopol Yagi-Uda anteni ile LOS dış mekan ölçüm planı .	53
Şekil 5.13.	İmal edilen monopol Yagi-Uda anteni ile LOS dış mekan ölçüm planı .	54
Şekil 5.14.	Yönlü mikroşerit antene ait ölçüm ve simülasyon S_{11} sonuçların karşılaştırılması.....	57
Şekil 5.15.	Tasarlanan yönlü mikroşerit antene ait üç boyutlu ışım grafiği	58
Şekil 5.16.	İmal edilen yönlü mikroşerit antene ait ışım örüntüleri.....	58
Şekil 5.17.	Yönlü mikroşerit anten ile LOS dış mekan ölçüm planı	59
Şekil 5.18.	İmal edilen yönlü mikroşerit anten ile nLOS dış mekan ölçüm planı	60

RESİMLER LİSTESİ

Resim 2.1.	ADF4351 Sinyal üreteç modül.....	7
Resim 2.2.	AD8318 RF logaritmik sensör modül	7
Resim 3.1.	nRF24L01 çeşitleri	13
Resim 5.1.	İmal edilen yama anten.....	41
Resim 5.2.	İmal edilen monopol anten	43
Resim 5.3.	İmal edilen tek antenli ve çift antenli sinyal tekrarlayıcıya ait fotoğraflar	45
Resim 5.4.	İmal edilen çift taraflı monopol Yagi Uda anten.....	50
Resim 5.5.	İmal edilen taraflı mikroşerit antenin fotoğrafı	56
Resim 5.6.	Çift taraflı haberleşmede kullanılacak yönlü mikroşerit anten sistemi ...	56

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

RF	Radyo frekansı (Radio Frequency)
dB	Desibel
LOS	Görüş hattı iletimi (Line of Sight)
nLOS	Görüş hattı iletimi olmayan haberleşme (Non Line Of Sight)



BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanlık tarihi incelendiğinde insanlar birbirleriyle çeşitli şekillerde iletişim halinde olmaya ve etkileşim kurmaya çalışmışlardır. İnsanlar haberleşmeye dair gereksinimlerini karşılamak ve yaşamlarını kolaylaştırmak maksadıyla tarih boyunca devamlı gelişim içinde olmuşlardır. İnsanlık tarihinin başlarında insanlar uzun mesafelerde, oldukça yüksek sesler çıkararak iletişim kurmaya çalışmışlar ancak insan sesinin yetersizliği sebebiyle birtakım aletlerin yardımıyla daha güçlü sesler meydana getirerek iletişim kurabilmişlerdir. Ateşin bulunmasıyla beraber ateşi ve ateşle birlikte ortaya çıkan dumanı, sonraki yıllarda ise bayrak ve ışık gibi araçları kullanarak uzak mesafelerde iletişim kurmayı başarmışlardır. 1793 yılında telgrafın icadını, 1837 yılında elektrikli telgraf ve 1876 yılında telefonun icadını izlemiş, böylelikle insanoğlu seslerini elektrikli teller kullanarak uzak mesafelere kolaylıkla iletebilmişlerdir. Devam eden yıllarda elektromanyetik enerji tel yardımı olmadan daha da uzak mesafelere iletebilmiş ve böylece kablosuz haberleşmenin devri başlamıştır. Maxwell'in 1864 yılında elektromanyetik dalgaların varlığını teorik olarak ispatlamasından iki sene sonra Hertz elektromanyetik dalgaların varlığını pratik anlamda ispatlamıştır. Hertz ortaya koyduğu deneyde verici anten olarak alternatif gerilim kaynağına bağlı bir dipol anten kullanmıştır. Gerilim belirli bir seviyeye ulaştığı zaman verici antenin iki ucu arasında bir ark oluşmuştur. Vericide oluşan bu arkla neredeyse eş zamanlı olarak, alıcı antenin uçları arasında da başka bir ark oluştuğu gözlemlenmiştir. Böylelikle vericide meydana gelen enerji kablosuz bir şekilde alıcıya gönderilmiştir. Marconi 1897 yılında vericiden alıcıya kısa mesafelerde verileri kablosuz olarak aktarmayı başarmıştır. Kıtalar arasında kablosuz verilerin aktarımı çalışması ise 1901 senesinde gerçekleştirilmiştir. Marconi, İngiltere'nin Cornwall şehrinden yaklaşık olarak 3500 km mesafede bulunan Kanada'nın Newfoundland eyaletine Mors Kodu kullanarak S harfini ulaştırmayı başarmıştır. Verici anten için toprağa bağlanmış olarak dikey birkaç tane uzun tel kullanmıştır. Alıcı anten olarak ise yaklaşık 200 m uzunluğunda bir teli hava ile yer arasında germek yeterli olmuştur. Marconi ve Hertz'in yaptıkları bu çalışmalar kablosuz haberleşme teknolojisinde oldukça kayda değer bir yere sahip olmuşlardır. Şu anki ismiyle dipol olarak da bilinen

anten, diğer adıyla Hertz dipolü, yine şu anki ismiyle monopol anten olarak adlandırılan anten ise Marconi anteni şeklinde literatürde yerini almıştır. Elektriksel sinyalleri elektromanyetik dalgalara dönüştüren antenlere verici anten adı verilir. İletimin yapıldığı ortamda yer alan ve elektromanyetik dalgaları elektrik sinyallerine dönüştüren antenlere ise alıcı anten adı verilir. Kablosuz haberleşmenin en önemli unsuru olan antenler üzerindeki araştırmalar Marconi'nin çalışmalarından sonra başlamıştır.

Bölüm 2'de üretilen antenlerin uzak alan ışıma diyagramını elde edebilmek amacıyla logaritmik RF algılayıcı kullanarak düşük maliyetli bir ölçüm sistemi tasarımına yer verilmiştir. Anten ışıma diyagramını elde edebilmek için alıcı ve verici ünitelerin tasarımı yapılmış ve üretimi gerçekteştirilmiştir. Sistem, 35 MHz ile 4400 MHz frekans aralığında sinyal üreten, ürettiği sinyali piramit anten vasıtasıyla test antenine gönderen bir verici ünitesinden ve test edilen anteni 360 derece döndürerek gelen sinyalleri algılayan alıcı ünitesinden oluşmaktadır. Ölçüm sistemi ölçülen verileri doğrudan bilgisayara veya telefona Bluetooth yardımı ile gönderme imkanı sağlamıştır.

Bölüm 3'te sayısal sinyal tekrarlayıcı tasarımına yer verilmiştir. Bu bölümün amacı imal edilen antenlerin performanslarını gerçekte bir uygulamada test edebilmektir. Bu sistem yardımı ile söz konusu antenlerin performans ölçümleri gerçekteştirilmiştir. Bu ölçümler için tek antenli ve çift antenli olmak üzere iki farklı sayısal sinyal tekrarlayıcı tasarımına yer verilmiştir. Sinyal tekrarlayıcının iç yapısında sinyalleri göndermek ve alabilmek amacıyla nRF24L01 tek çipli radyo alıcı-vericisi kullanılmıştır.

Bölüm 4'te ise iki farklı anten tasarımına yer verilmiştir. Bu antenlerin 2.4 GHz frekansında çalışabilme ve yüksek yönlülüğe sahip olma niteliklerini taşıması hedeflenmiştir. Antenlerin maksimum yönlülüğe ulaşabilmesi için antenlere belirli mesafelerde yöneltici elemanlar yerleştirilmiştir. Tasarlanan bu antenler imal edilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Tasarlanan antenlerin geri dönüş kayıpları ve yönlülükleri incelenmiştir.

Tez genelinde tasarlanan ve imal edilen tüm sistemler Bölüm 5'te fotoğrafları ve deneysel sonuçları ile birlikte sunulmuştur.

1.1. Amaç ve Kapsam

Haberleşme teknolojisinin en önemli noktalarından birisi kesintisiz iletişimidir. Ancak verici ve alıcı kaynaklar arasında bulunan engeller nedeniyle veri iletişimi sağlıklı bir şekilde gerçekleşemeyebilir. Bu doğrultuda kapsama alanı ve sinyal kalitesini artırmak için sayısal sinyal tekrarlayıcı tasarımı ve üretimi önem arz etmektedir.

Tezin en önemli odak noktası çeşitli nedenlerle zayıflayan sinyali güçlendirmek amacıyla kullanılan sinyal tekrarlayıcılar için çift taraflı anten tasarımlarını geliştirmektir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde 3 boyutlu yazıcı teknolojilerinden faydalanılarak yönlü elemanlara sahip yönlü mikroşerit anten tasarımı ve imalatına rastlanmamıştır. Bunun sebebi olarak 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin, henüz yeterince yaygınlaşmamış olması gösterilebilir. Tasarlanacak olan antenlerin yönlülük değerleri büyük bir öneme sahiptir. Belirlenen mesafelere göre yerleştirilen yönlü elemanlar ile antenlerin yüksek yönlülüğe ulaşması amaçlanmıştır. Bu tez kapsamında sayısal sinyal tekrarlayıcılarda kullanılacak monopol Yagi Uda ve yönlü mikroşerit anten tasarımları hedeflenmektedir. Tasarlanacak antenler vasıtasıyla uzak mesafelere veri aktarımı başlıca hedefler arasındadır.

1.2. Literatür Özeti

Hristov ve arkadaşları, 2001 yılında tekrarlayıcıları pasif ve aktif olarak kategorize etmişlerdir. Pasif tekrarlayıcının elektromanyetik dalgaların yayılmasına yardımcı olabileceğini öne sürmüşlerdir [1]. Böylece iç mekânlarda duvar gibi engellere karşı sinyalin kapsama alanı artırılmıştır. Huang ve arkadaşları 2004 yılında binalardaki sinyallerin kapsama alanını artırabilmek için tekrarlayıcı kullanımı önermişlerdir [2]. Böylece kullanılan sinyal tekrarlayıcı vasıtasıyla sinyallerin gücünü yükselterek sinyalin kapsama alanını artırmışlardır. Birden çok tekrarlayıcı kullanımında kapsama alanının daha fazla artırılabilirliğini belirtmişlerdir [2]. Lee ve arkadaşları 2010 yılında 3G bina içi sinyal tekrarlayıcı için anten tasarımı sunmuşlardır [3]. Bu tasarımda, gönderilen ve alınan sinyallerin aynı frekansta olması durumunda, olası parazitleri engellemek için alıcı ve verici arasında daha fazla yalıtım kullanılması gerektiği bildirilmiştir [4]. Eğer gerçek zamanlı veri aktarımı çok önemli değilse veya vericiden alıcıya aktarılan verinin değiştirilmesi gerekiyorsa, dijital tekrarlayıcı ile kapsama alanının genişletilmesinin iyi bir alternatif olduğu öne sürülmüştür [5,6]. Oh ve arkadaşları 2014 yılında sinyal

kapsamını artırarak, dalga yayılımını yönetmek için mikro radyo tekrarlayıcı örneği sunmuşlardır [7]. Ali ve arkadaşları 2009 yılında bir elektromanyetik dalganın engelden geçmesi ve sinyalin bir alıcı antene ulaşması için pasif tekrarlayıcı tasarımı gerçekleştirmişlerdir [8].

Anten ışınma diyagramını ölçebilmek amacıyla, Brandissou ve arkadaşları 1993 yılında 30 MHz'den 18 GHz'e kadar tamamen otomatik bir sistem geliştirmişlerdir. İlk parametreler operatörler tarafından klavye ile girildikten sonra tüm ölçümler otomatik olarak yapılmaktadır [9]. Taygur ve arkadaşları 2013 yılında eğitim amaçlı FPGA'ya dayanan düşük maliyetli bir ölçüm sistemi önermişlerdir. Önerilen sistem otomatik bir mekanizmadır. Devrede AD8318 logaritmik detektör kullanılmıştır [10]. Kittiwittayapong ve arkadaşları 2016 yılında tasarlanan anten ölçüm sistemi ile yakın alan ölçümlerinin yanı sıra uzak alan ölçümleri de sunmuşlardır. Sunulan sistemin en önemli özelliği özellikle küçük nesnelere yayılan elektromanyetik dalgaları ölçebilmesidir [11]. Patel ve arkadaşları 2018 yılında önerdikleri sistem ile 700 MHz - 18 GHz frekanslarında çalışan anten desenlerini ölçmüşlerdir. Temelde tasarlanan sistem bir bilgisayar tarafından kontrol edilir. Bilgisayar, verici antenin doğrusal hareketlerini ve test edilen antenin dairesel hareketlerini yönetir [12]. Leach ve Paris bir antenin uzak alan ışınma diyagramını, anteni çevreleyen dairesel bir silindirin yüzeyi üzerindeki prob ile ölçmek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir [13]. Brown ve arkadaşları 2011 yılında 2.4 GHz'deki antenlerin kazanç ve ışınma örüntüsünü ölçmek için düşük maliyetli bir ölçüm sistemi tasarımı sunmuşlardır [14]. Junfithrana ve arkadaşları 2017 yılında mikrokontrolör ve bilgisayar programına dayalı otomatik bir anten ışınma örüntüsü ölçüm sistemi önermişlerdir. Önerilen sistem iki eksenli bir konumlandırıcıdan oluşmaktadır. Konumlandırıcıların pozisyonuna göre ölçüm alınmaktadır [15]. Rehman ve arkadaşları 2016 yılında 600 MHz'den 26 GHz'e kadar ışınma örüntüsünü ölçebilen otomatik bir sistem tasarlamışlardır [16].

Tarascenko 2018 yılında 9.3 GHz çalışma frekansında monopol Yagi-Uda anten tasarlamıştır [17]. Hu ve arkadaşları 2015 yılında UHF bandında çalışan bir prototip monopol Yagi üretmişlerdir [18]. Jiang ve arkadaşları 3-D metalize püskürtme yöntemi ile anten üretimi gerçekleştirmişlerdir. Anten 10.5 GHz frekans bandında çalışmaktadır. Küçük ve taşınabilir olması başlıca avantajları arasındadır [19]. He ve arkadaşları 2017 yılında Aerosol Jet yazıcı sistemi ile 24 GHz'de çalışan Yagi-benzeri anten üretimi

gerçekleştirmiş [20], Nascimento ve arkadaşları 2008 yılında GPRS uygulamaları için düşük maliyetli bir monopol Yagi-Uda dizisinin tasarımıını sunmuşlardır. Monopoller bir FR4 taban ile yer düzlemine dik olacak şekilde monte edilmiştir [21].

1955 yılında Gutton ve Baissinot ilk mikroşerit yapının patentini almışlardır [22]. İlk mikroşerit anten haberleşme denemeleri 1970’li yıllarda Munson tarafından füze veri sistemi üzerinde yapılmıştır. 1972 yılında Howell [23] ve 1974 yılında Munson kolay uygulanabilir ilk mikroşerit anten yapısını ortaya koymuşlardır [24]. Mikroşerit antenin gelişimi baskı devre teknolojisi ile birlikte hız kazanmıştır. Cheng ve Sheng 2017 yılında 1.7 GHz – 2.5 GHz frekans bandında çalışacak geniş bant yönlü bowtie dipol anten önermişlerdir. Bu antenin imalatında baskı teknolojisinden yararlanılmıştır [25].

BÖLÜM 2

ANTEN IŞIMA DİYAGRAMI ÖLÇÜM SİSTEMİ

Empedans bant genişliği ve ışıma örüntüsü bir antenin önemli iki parametresidir. Empedans bant genişliği vektör ağ analizörü ile elde edilebilir. Ancak uzak alan ışıma örüntüsü ölçümü kolay değildir. Çoğu zaman bu ışıma örüntüsü ölçümü bir mekanik sistem yardımıyla elde edilmektedir. Uygun bir ölçüm yapabilmek amacıyla verici ve alıcı sistem birlikte çalışırlar. Bundan dolayı da ışıma örüntüsü ölçüm sistemleri oldukça pahalıdır.

Bu bölümde, antenlerin uzak alan ışıma diyagramını ölçmek amacıyla bir logaritmik RF algılayıcı kullanılarak düşük maliyetli ölçüm sistemi tasarımına yer verilmiştir. Sistemin verici kısmı mikrokontrolör tarafından kontrol edilen sinyal üreticiyi içermektedir. Sinyal üretici ise kontrplak ve alüminyum bant ile geliştirmiş olduğumuz 2.4 GHz'lik yönlü bir piramit antene bağlıdır. Sistemin alıcı kısmı ise test antenini, mikrokontrolörü, step motoru, kızılötesi konum sensörünü, Bluetooth modülünü ve logaritmik RF sensörünü içerir. Ölçüm sistemi Bluetooth yardımıyla uzaktan başlatılabilmektedir. Step motor, aynı pozisyona gelinceye kadar test altındaki anteni tutan masayı döndürür. Bu hareket sırasında verici elektromanyetik dalgaları gönderir ve alıcı kısım ise gelen dalgaların güç seviyesini ölçer. Ölçülmüş değerler mikrokontrolörde saklanır ve ölçümden hemen sonra Bluetooth yardımıyla bilgisayara veya akıllı telefona veriler gönderilir [26].

2.1. Sinyal Üretici

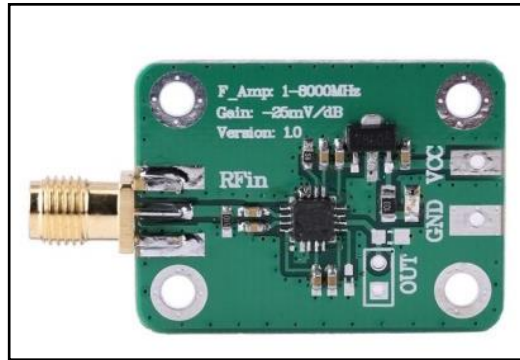
Sinyal üreticiler genellikle alıcıların ve amplifikatörlerin testinde sinyal kaynağı olarak kullanılırlar. Sinyal üreticiler, RF ve mikrodalga uygulamalarında kullanılan temel cihazlar arasındadır. Bu tez çalışmasında verici tarafında kullandığımız ADF4351 sinyal üretici modül 35 MHz ile 4400 MHz frekans aralığı çıkışına sahip voltaj kontrollü osilatöre sahiptir [44]. Uygulamalar için gerekli olan frekans, yazılım vasıtasıyla mikrokontrolör tarafından kontrol edilmektedir. Resim 2.1'de sinyal üreteç modülü görülmektedir.



Resim 2.1. ADF4351 Sinyal üreteç modül

2.2. RF Sinyal Algılayıcı

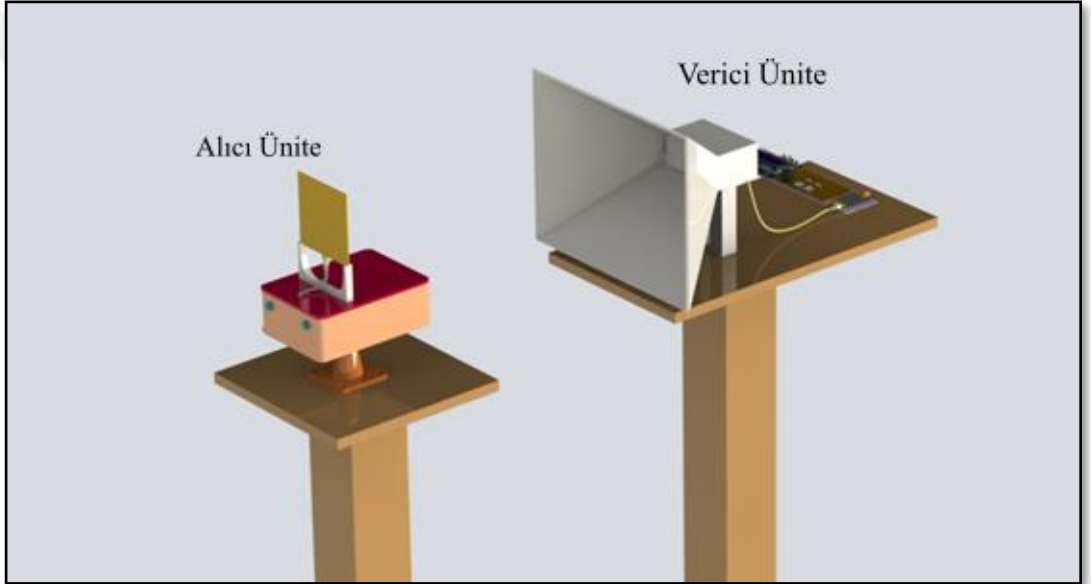
RF elektronik sistemlerin kullanımı hayatın her alanında giderek daha çok yer almaktadır. Sistemin verimli çalışmasına etki eden en önemli faktör de işaret alma-gönderme kalitesidir. Bu çalışmada alıcı kısımda gelen sinyalin seviyesini ölçmek amacıyla AD8318 modülü kullanılmıştır. AD8318 modülü RF giriş sinyallerinin seviyelerine göre logaritmik çıkış voltajı verebilen desibel (dBm) ölçekli amplifikatördür [43]. Bu modül 1 MHz ile 8 GHz frekanslarındaki elektromanyetik dalgaları algılayabilmektedir. Resim 2.2’de RF sinyal algılayıcı görülmektedir.



Resim 2.2. AD8318 RF logaritmik sensör modül

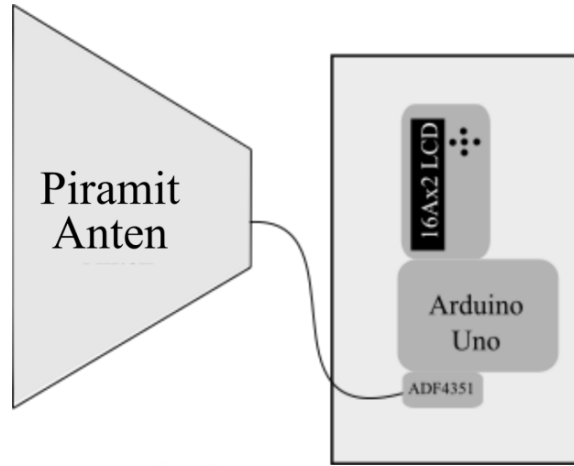
2.3. Ölçüm Metodu

Anten ışıma diyagramı ölçümü için verici ve alıcı olarak kullanılan iki temel kısım çok önemlidir. Genellikle test altındaki anten alıcı tarafa konulur. Çoğunlukla tek fiziksel hareket alıcı tarafındadır. Bir step motor, alıcı modülü ile birlikte test altındaki anteni 360° döndürür. Alıcı ünitenin tüm parçaları, hareket eden platform üzerindedir. Hareketli birimin tamamı 2S'lik bir lipo pil ile beslenir. Ölçüm verileri bir HC-06 Bluetooth modülü ile bilgisayara veya akıllı telefona aktarılır. Tasarlanan sistem Şekil 2.1' de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Tasarlanan anten ölçüm sisteminin genel görünümü

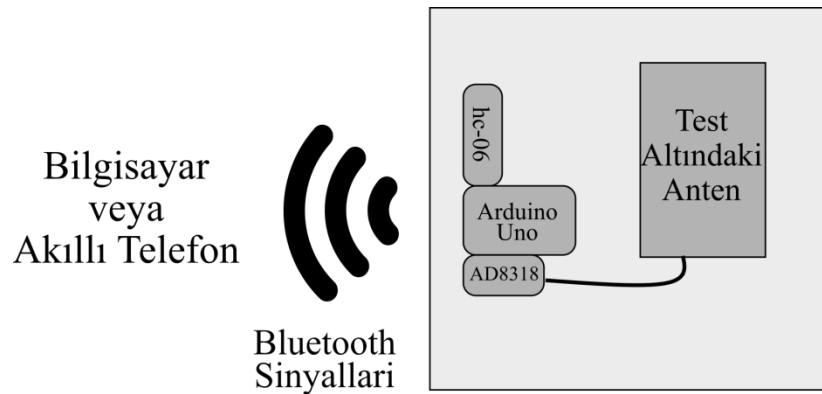
Verici ünite ADF4351, Arduino Uno, RF amplifikatör, altı tuş takımlı 16x2 LCD ve bir piramit antene sahiptir. Piramit anten 2.4 GHz frekansı için tasarlanmıştır. Tasarlanan verici ünite Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Verici ünite şeması

Operatör, verici ünite üzerinde bulunan LCD modülünün tuş takımını kullanarak 35 MHz ile 4400 MHz aralığındaki herhangi bir frekans değerini girebilir. Girilen frekans değeri Arduino Uno ile yorumlanarak ADF4351 modülü ayarlanır. Piramit anten ise ADF4351'den gelen elektromanyetik dalgaları alır ve alınan RF sinyallerini alıcı tarafına gönderir.

Alıcı tarafındaki sistemin en önemli kısmı, AD8318'e dayalı bir devredir. AD8318, 1 MHz - 8 GHz 70 dB logaritmik dedektördür. Alıcı tarafında ayrıca bir Arduino Uno, Arduino Nano, step motor, step motor sürücüsü, kızılötesi konum sensörü ve HC-06 Bluetooth modülü bulunur. Şekil 2.3'te alıcı sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Alıcı ünitenin şeması

Ölçüme başlamak için, Arduino Nano, step motoru kontrol eden Arduino Uno'ya komut gönderir. Dairesel hareket başladığında, AD8318, test anteni tarafından alınan

RF sinyallerini ölçmeye başlar ve bu ölçümlere göre analog logaritmik değerleri üretir. Analog sinyaller Arduino Nano tarafından uygun dijital değerlere dönüştürülür. Bu değerler programda bir dizi içerisinde saklanır ve ölçüm yapıldıktan sonra, bilgisayara ya da akıllı telefona HC-06 Bluetooth modülü ile gönderilir. Bilgisayarda ve akıllı telefonda çalışan yazılım, ücretsiz kaynaklardan kolayca elde edilebilen bir Bluetooth terminalidir. Ölçüm, bilgisayar ya da akıllı telefon aracılığıyla Bluetooth iletişimi üzerinden operatör tarafından da başlatılabilir. Herhangi bir olası girişimi önlemek için, ölçüm sırasında Bluetooth kullanılmaz.

Önerilen sistem 2.4 GHz ölçümleri için uyarlanmıştır. Böylece alıcı ve verici sistemin birlikte çalışmasıyla düşük maliyetli bir anten ışına diyagramı ölçüm sistemi tasarlanmıştır [26].

BÖLÜM 3

SAYISAL TEKRARLAYICI

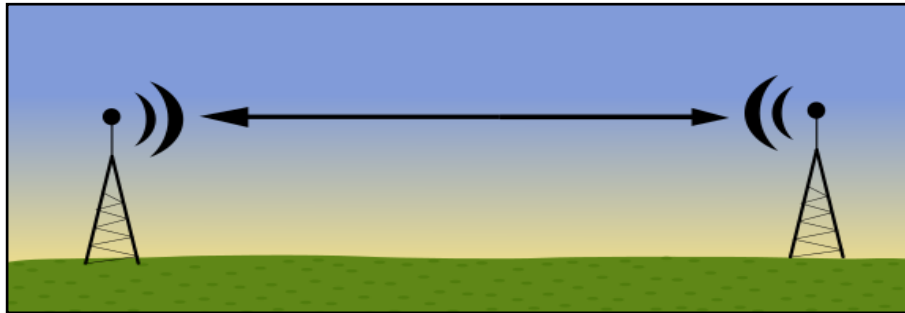
Bu bölümde sinyallerin kapsama alanını genişletmek, çeşitli sebeplerle zayıflamış olan sinyali kuvvetlendirmek ve sağlıklı bir veri haberleşmesi yapabilmek amacıyla tek çipli sayısal sinyal tekrarlayıcı tasarımı yer almaktadır.

Sürekli gelişen kablosuz haberleşme teknolojisi içinde sinyallerin uzak mesafeye gönderilmesi önem arz etmektedir. Ancak alıcı ile verici arasında bulunan engeller ve coğrafi etkenler nedeniyle kapsama alanı daralmaktadır. Sinyallerin kapsama alanını artırmak amacıyla sayısal sinyal tekrarlayıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. İki istasyon arasına yerleştirilen bir tekrarlayıcı RF haberleşmesini sürdürebilmek için en sağlıklı çözümlerden birisidir.

Bu bölümde 2.4 GHz frekansta çalışan Nordic nRF24L01 tek çipli radyo alıcı-vericisi kullanılarak sayısal sinyal tekrarlayıcı modelleri önerilmiştir. Tekrarlayıcılar temel olarak alıcı-verici modülü, anten ve bir mikrokontrolör içermektedir [27].

3.1. Görüş Hattı Haberleşmesi

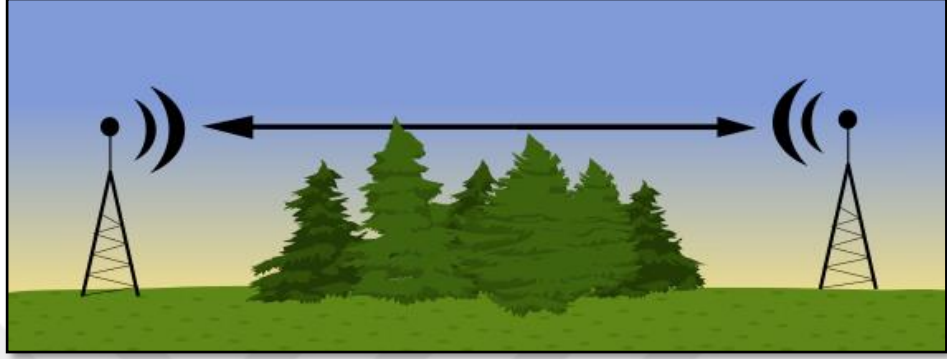
Alıcı ve verici antenlerin birbirlerini görebileceği şekilde yapılan kablosuz haberleşmedir. Bu iletim biçimi kablosuz haberleşme için en ideal durumdur. Alıcı ve verici antenlerin birbirlerini göreceği şekilde konumlandırılmasıyla oluşturulan radyo link sistemleri görüş hattı haberleşmesi (LOS) yaparlar. Şekil 3.1'de görüş hattı haberleşmesi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Görüş hattı haberleşmesi

3.2. Yakın Görüş Hattı Haberleşmesi

Alıcı ile verici antenlerin arasındaki kısmen engellenmiş bir hattı tanımlamak için yakın görüş hattı terimi (NLOS) kullanılır. Bu haberleşmeyi doğal ve yapay etkenler kısmen engeller. Şekil 3.2’de yakın görüş hattı haberleşmesi gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Yakın görüş hattı haberleşmesi

3.3. Görüş Hattı İletimi Olmayan Haberleşme

Alıcı veya verici antenin doğrudan görüş hattında olmadığı bir hattı tanımlamak için görüş hattı iletimi olmayan haberleşme (nLOS) terimi kullanılır. Alıcı ve verici antenler arasında bulunan yüksek binalar, ağaçlar ve coğrafi şartlar gibi engeller radyo sinyalinin kısmen veya tamamen yayılmasını zorlaştırır. Bu engellerden bazıları radyo sinyallerini soğururken bazıları da radyo sinyallerini yansıtır. Bunların hepsi de sinyalin iletim yeteneğini zayıflatır. Böyle durumlarda çeşitli noktalarda sayısal sinyal tekrarlayıcılar kullanılır. Böylece sinyal, veri kaybı veya iletim kalitesi kaybı olmadan iletilir. Şekil 3.3’te görüş hattı olmayan haberleşme gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Görüş hattı iletimi olmayan haberleşme

3.4. nRF24L01 Tek Çipli Radyo Alıcı-Verici

Nordic firması tarafından üretilen nRF24L01 kablosuz iletişim modülü, 2.4 GHz frekans bandında kablosuz haberleşmeye olanak sağlayan düşük güç tüketimine sahip bir modüldür. Maksimum 2 Mbps haberleşme hızına sahip olup, SPI arabirimini destekler. nRF24L01 modülü hem alıcı, hem de verici görevinde kullanılabilir. Hangisinin alıcı, hangisinin verici olacağına yazdığımız yazılım ile karar verilebilir. nRF24L01 aynı zamanda çift taraflı haberleşme yapmak için, tek bir modül hem alıcı hem de verici olarak da kullanılabilir. Kütüphane desteği sayesinde kullanımı da kolaydır. Mikrokontrolörler ile nRF24L01 modülü arasındaki komut alışverişleri SPI arabirimi üzerinden gerçekleştirilir. SPI bir haberleşme standartıdır ve pek çok tüm devre tarafından donanımsal olarak desteklenmektedir. nRF24L01 modülü 125 tane farklı kanala sahiptir. Bu modül 2.400 GHz - 2.525 GHz arasındaki frekanslarda çalışabilir [42].



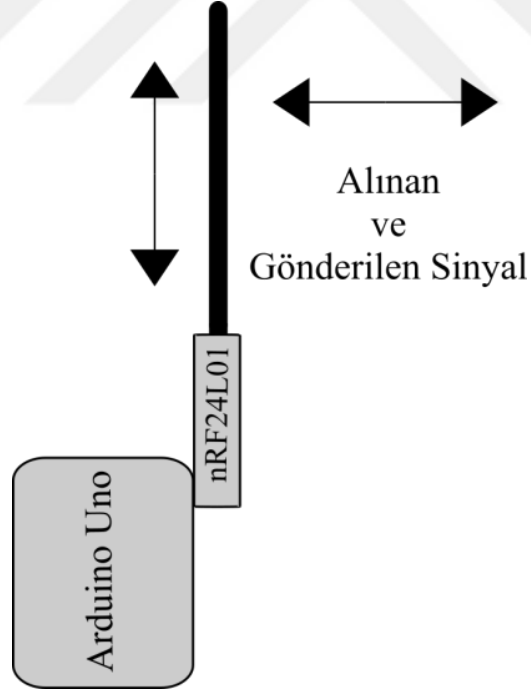
Resim 3.1. nRF24L01 çeşitleri

3.5. Sinyal Tekrarlayıcı Modelleri

Bu tez çalışmasında sayısal sinyal tekrarlayıcı olarak iki farklı model önerilmiştir. Bunlardan birincisi tek antenli sayısal sinyal tekrarlayıcı diğeri ise çift antenli sayısal sinyal tekrarlayıcı modelleridir. Her iki tekrarlayıcıda da nRF24L01 modülü ve klasik çok yönlü antenler kullanılmıştır [27].

3.5.1. Tek antenli sayısal sinyal tekrarlayıcı

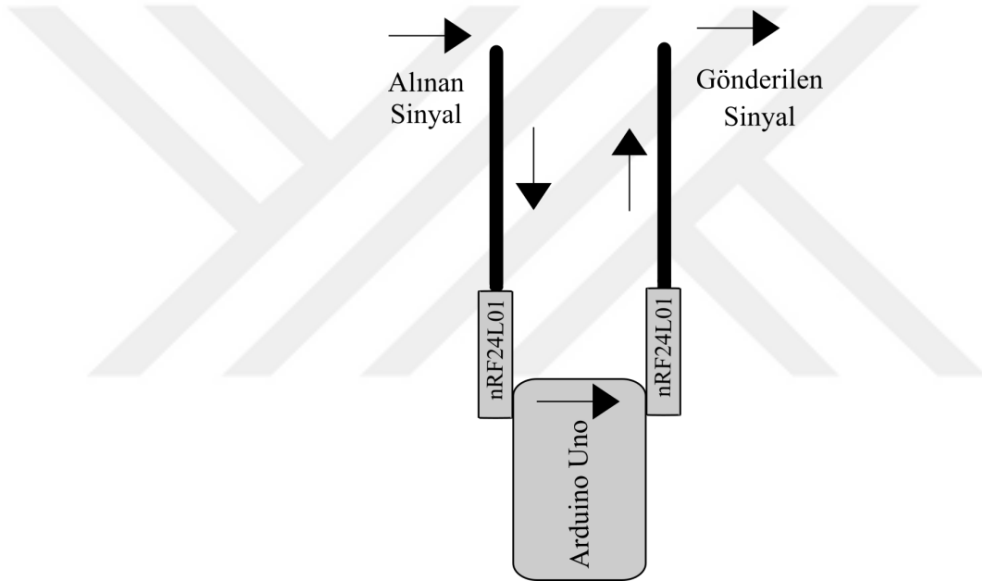
Tek antenli sayısal sinyal tekrarlayıcı sadece bir tane nRF24L01 modülüne ve antene sahiptir. Arduino Uno bu sistem için ana mikrokontrolördür ve veri akışını yönetir. Şekil 3.4'te gösteriliği gibi nRF24L01 modülü, bu tekrarlayıcı modelinde, hem alıcı hem de verici görevinde kullanılır. Ana verici istasyondan gelen sinyaller tek antenli tekrarlayıcı tarafından alınır. Alınan veriler tekrar tek antenli tekrarlayıcı tarafından ana alıcı istasyona gönderilir. Bu iletişimde RF sinyallerinin alınması ve iletilmesi asenkron dur [27].



Şekil 3.4. Tek antenli tekrarlayıcı modeli

3.5.2. Çift antenli sayısal sinyal tekrarlayıcı

Çift antenli sayısal sinyal tekrarlayıcı iki tane nRF24L01 modüllerine ve antenlere sahiptir. Arduino Uno bu sistem için ana mikrokontrolördür ve veri akışını yönetir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi nRF24L01 modüllerinden birisi alıcı diğeri ise verici olarak kullanılmaktadır. Ana verici istasyondan gelen sinyaller alıcı modül vasıtasıyla alınır. Bu alınan veriler gönderici modül üzerinden ana alıcı istasyona gönderilir. Temel olarak tekrarlayıcı, orijinal verileri değiştirmez. Bununla birlikte, eğer biri verileri filtrelemek veya ona fazladan veri eklemek isterse; sistem, dijital özelliğinden dolayı her iki işleme de izin verir. RF sinyallerinin alınması ve iletilmesi senkronundur [27].



Şekil 3.5. Çift antenli tekrarlayıcı modeli

BÖLÜM 4

ANTENLER VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde öncelikle anten ve anten parametreleri hakkında temel bilgiler verilmiştir. Daha sonra bizim tasarladığımız çift taraflı monopol Yagi-Uda anten ve yönlü mikroşerit anten olmak üzere iki farklı antene yer verilmiştir. Temel amaç yüksek yönlülüğe sahip çift taraflı antenleri tasarlayıp imal etmektir. Bu doğrultuda uzak mesafelere sinyal aktararak kapsama alanının artırılması hedeflenmiştir.

Bu bölümde tasarlanan antenler 2.4 GHz frekansında çalışmakta olup, Bölüm 3'te yer verilen sayısal sinyal tekrarlayıcı modüllerinde kullanılabilir. Böylece antenlerin performansları gerçek bir haberleşme sistemi üzerinde test edilebilir.

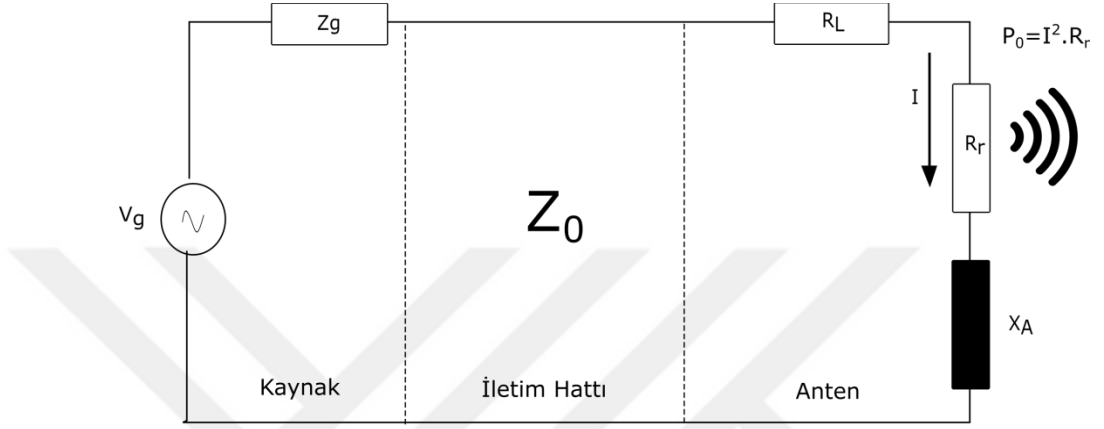
4.1. Anten

Antenler, elektromanyetik dalgaları alan veya yayan aygıtlardır. Elektromanyetik dalgaları alma ve verme durumuna göre alıcı ve verici antenlerden söz edilebilir. Elektrik sinyalini elektromanyetik sinyale çevirip yayın yapabilen anten tipine verici anten denir. Verici anten tarafından yapılan elektromanyetik dalga yayını toplayarak elektriksel sinyale çeviren anten tipine ise alıcı anten denir [28]. Kullanım amaçlarına göre farklı karakteristik özelliklere sahip çok sayıda anten çeşidi bulunmaktadır. Aynı tip antenlerin alıcı ve verici karakteristikleri aynıdır. Buna antenlerin karşılıklık özelliği denir. Uzun mesafeler arasındaki veri haberleşmesi her zaman kablolar vasıtası ile mümkün olmamaktadır, çoğu kez de gerçekleştirilmesi zor ve masraflı olmaktadır. Ayrıca uzun hatların montajının ve bakımının yapılması birçok teknik problemi de beraberinde getirmektedir. Bunun için gelişen teknoloji ile birlikte veri iletişiminin kablosuz yapılması önem arz etmektedir. Kablosuz veri iletişimini sağlayabilmek için elektromanyetik sinyalleri boşluğa gönderecek bir elemana yani antene ihtiyaç vardır. Aynı zamanda ortamdaki elektromanyetik dalgaların anlamlı olanlarını alıp, elektriksel sinyale çevirme görevi de antene aittir [29].

4.2. Anten Özellikleri

4.2.1. Antenlerin eşdeğer devre ile gösterimi

Alıcı ve verici anten modelleri için, Şekil 4.1’de verici antenin devre eşdeğeri, Şekil 4.2’de alıcı antenin devre eşdeğeri görülmektedir.



Şekil 4.1. Verici antenin eşdeğeri devresi

V_g : Verici devrenin çıkış gerilimi (Volt)

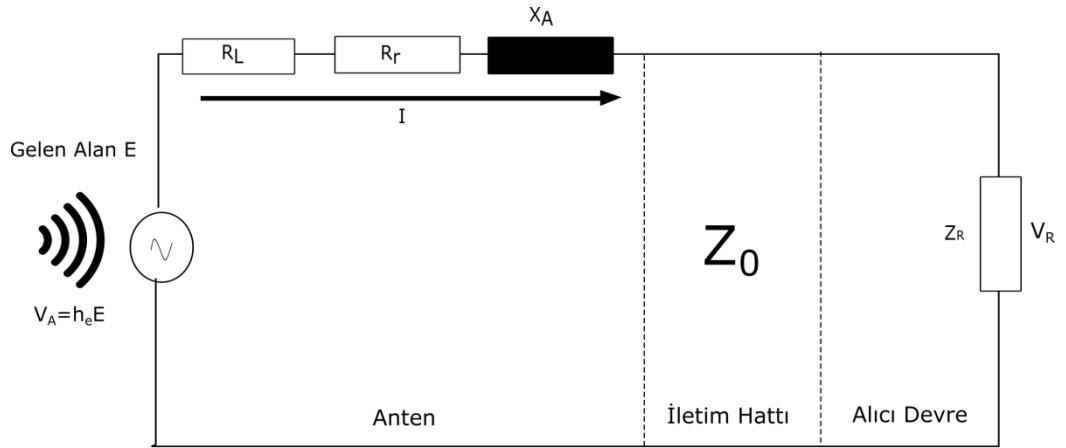
Z_g : Verici devrenin empedansı (Ohm)

Z_0 : Antene giden hattın karakteristik empedansı (Ohm)

R_L : Kayıp direnci (Ohm)

R_r : Radyasyon direnci (Ohm)

X_A : Anten reaktansı (Ohm)



Şekil 4.2. Alıcı antenin eşdeğer devresi

$V_A = h_e E$: Gelen dalga ile indüklenen gerilim (Volt)

h_e : Etkin anten uzunluğu (metre)

E : Gelen dalganın elektrik alan şiddeti (Volt/metre)

V_R : Alıcı devreye aktarılan gerilim (Volt)

$Z_R = R_R + jX_R$: Alıcı devre giriş empedansı (Ohm)

R_R : Alıcı devre giriş direnci (Ohm)

X_R : Alıcı devre giriş reaktansı (Ohm)

4.2.2. Anten alan bölgeleri

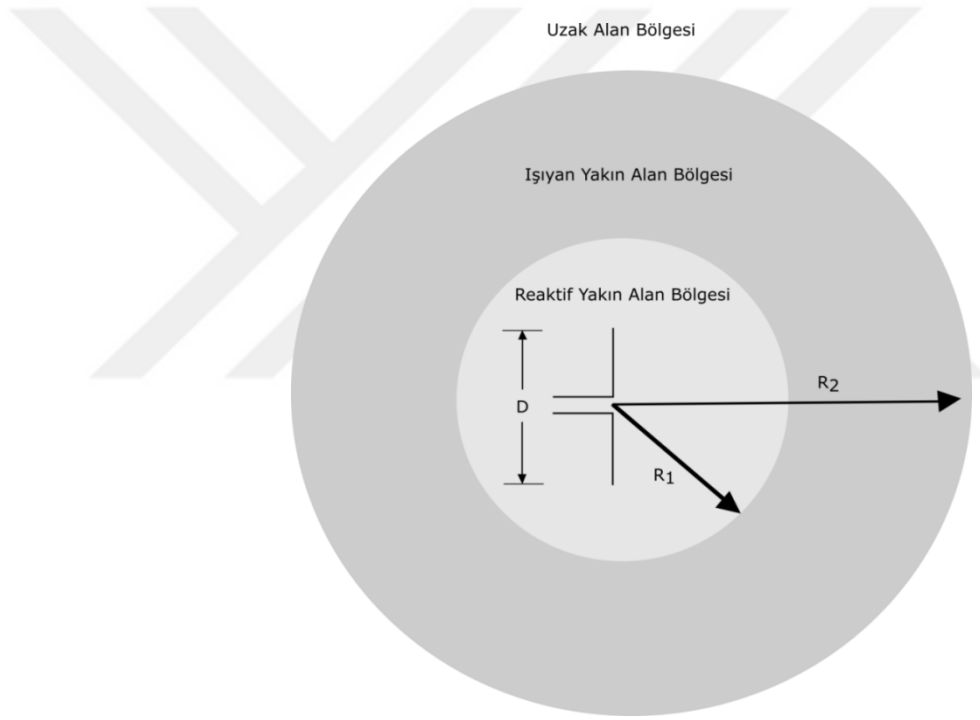
Anteni çevreleyen boşluk;

- Reaktif Yakın Alan
- Işıyan Reaktif Yakın Alan
- Uzak Alan

olmak üzere üç bölgeye ayrılır.

Reaktif Yakın Alan, antene çok yakın olan bölge olarak nitelendirilebilir. Reaktif bölgede enerji anten yüzeyine yakın yerde depo edilir. Depo edilen bu enerjinin baskın olduğu ve antenin hemen etrafını saran bölgeye reaktif yakın alan ismi verilir. Uzak alan ve reaktif yakın alan arasında kalan, ışılan dalgalardan oluşan ve açılal alan dağılımının

antene olan mesafeye bağılı olduğu alan tipine “Işıyan Yakın Alan” denilmektedir [28]. Şekil 4.3’te anten alan bölgeleri yer almaktadır. Uzak alan bölgesi ise ışıyan dalgaları kapsayan, antene olan uzaklığı diğer bölgelerden daha fazla olan bölgedir [28]. Elektrik ve manyetik alan bileşenleri düzlemsel dalga özelliği göstermeyen bölgeye yakın alan denilmektedir. Bu nedenle yakın alan bölgesinde hesaplamalar daha kompleks ve ölçümleri zordur. Uzak alanda ise düzlem dalga yaklaşımı yapılabilmektedir. Farklı cins antenlerin yakın ve uzak alan tanımları farklıdır. Bu farklılık antenin boyutları, frekans vb. gibi parametreler cinsinden belirlenmektedir [29,30].



Şekil 4.3. Antenin alan bölgeleri

D : Antenin uzunluğu

R_1 : Reaktif yakın alan bölgesinin yarıçapı

R_2 : Işıyan yakın alan bölgesinin yarıçapı

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (4.1)$$

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.2)$$

Formül 4.1 ve 4.2'den de anlaşılacağı üzere, Reaktif yakın alan bölgesi ve ışıyan yakın alan bölgesi anten uzunluğuna ve dalga boyuna bağlı olduğu görülmektedir [28].

Elektrik alan ve manyetik alan hesapları çoğunlukla uzak alan bölgelerinde yapılır. Ancak yakın alan bölgelerinde yapılan ölçümler sadece ölçümü yapıldığı noktada geçerlidir. Yakın alanda yapılan başka bir noktadaki ölçüm farklılık gösterir. Bu da yakın alandaki ölçümlerin kararsız olmasına neden olur [29].

4.2.3. Anten karakteristik parametreleri

Haberleşme sistemlerinin kalitesini ve karakteristik özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerden birisi şüphesiz antenlerdir. Mümkün olduğu kadar kalitenin yüksek olması için haberleşme yapılacak koşullara uygun tasarlanmış antenler seçilmelidir. Ortam koşulları iyi tahlil edilmeden tasarlanacak olan anten, düşük performans gösterecek ve haberleşme kalitesi istenilen düzeylere ulaşamayacaktır [29].

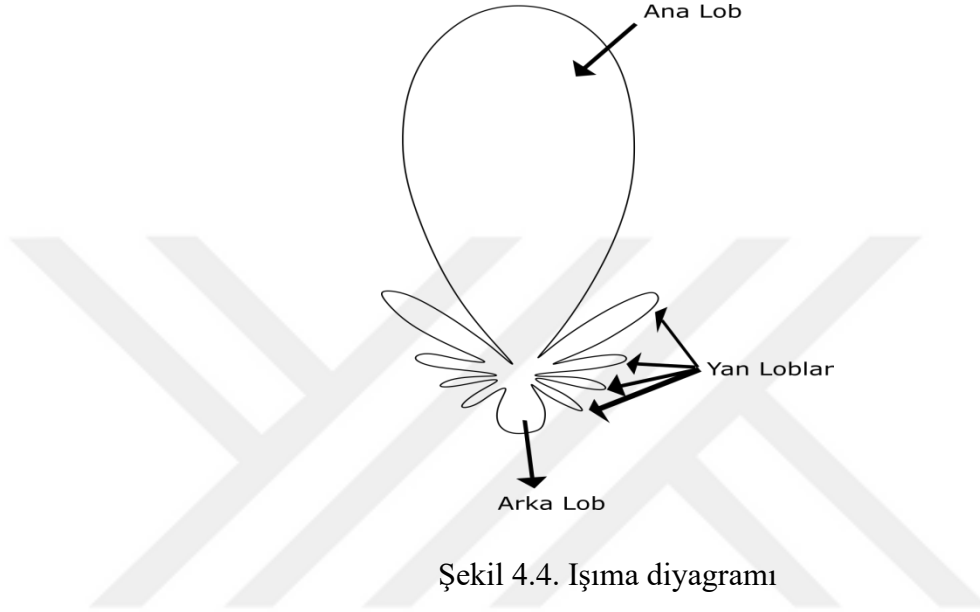
Anten karakteristik parametrelerini genel olarak şu başlıklar altında toplayabiliriz [30,31];

- Işıma diyagramı
- Işıma gücü
- Işıma direnci
- Işıma verimi
- Anten yönlülüğü
- Anten kazancı
- Kutuplanma
- Giriş empedansı
- Anten etkin yüzeyi
- Duran dalga oranı
- Bant genişliği
- Demet genişliği

4.2.3.1. Işıma diyagramı

Antenin hangi yönde ışınım yaptığına ana lob, yan lob ve arka lobları belirterek grafiksel ifadelerle gösterilmesine ışınım diyagramı denir [28,30]. Işıma diyagramı alan şiddetine bağlı bir ölçüttür. Antenden yayılan gücün sabit bir uzaklıktaki açısal

değişimini gösterir. Bir anten ışınım diyagramı bizlere antenin hangi yöne doğru ne kadar ışınım yaptığını, ışınımın güç ve kazanç bilgilerini verir. Üç boyutlu bir ışınım diyagramı, antenin yatay ve dikey tüm açılarını içerebilir. Şekil 4.4'te bir antenin iki boyutlu ışınım diyagramı verilmiştir. İki boyutlu ışınım diyagramları üç boyutlu ışınım diyagramlarının belli düzlemlerdeki kesitleridir.

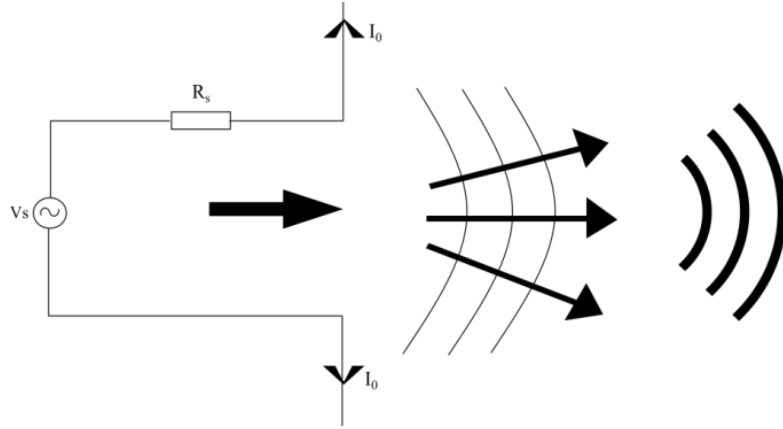


Şekil 4.4. Işınım diyagramı

Işınım diyagramı ana lob, yan loblar ve arka lobdan oluşmaktadır. Ana lob, antenin ışınım yaptığı esas yönü göstermektedir. Ana lobun 180 derece ters yönünde arka lob bulunmaktadır. Yan loblar ise anten ışınım yaparken diğer yönlerde yayılan elektromanyetik dalgalar nedeniyle oluşan istenmeyen ışınım alanlarıdır. İzotropik bir anten her yöne eşit ışınım yaptığı kabul edilen anten çeşididir. Pratikte böyle bir anten yoktur, fakat anten yönlülüğü ve kazancı hesaplanırken izotropik anten dikkate alınır [28].

4.2.3.2. Işınım gücü ve direnci

Antenin uzaya yaydığı güce ışınım gücü denir ve ortalama poynting vektörünün tüm uzay üzerindeki integrali hesaplanarak açıklanır. Antenin ışınım gücü, anten uzunluğu, dalga boyu ve dolayısıyla çalışma frekansına bağlıdır. Anten ışınımı üç boyutlu uzayda ve küresel koordinat sisteminde iki açı ile belirtilmektedir. θ açısı z – eksenine (dikey) ile ϕ açısı ise x – eksenine (yatay) ile olan açıdır. Bu açılara anten mühendisliğinde dikey ve yatay düzlemler denilmektedir [29,30].



Şekil 4.5. Anten devre modeli

Şekil 4.5’de gösterilen devre modelinde;

Vs: Kaynak gerilimi (AC) [V]

Rs: Kaynak iç direnci [ohm]

R_{ış}: Işıma direnci [ohm]

I₀: Anten üzerindeki akım [A] olarak sembolize edilmiştir.

Işıma direnci toplam ışıyan gücün akımın karesine oranı ile elde edilir.

$$R_r = \frac{P_{ışıma}}{I^2} \quad (4.3)$$

4.2.3.3. Işıma verimi

Antenin kaynaktan çektiği gücün bir kısmı ısı olarak antende harcanmakta iken bir kısmı da empedans uyumsuzluğu sebebiyle ışıma gücüne katılmayıp yansımalarla sebep olmaktadır. Bundan dolayı gücün bir kısmı kayıp enerji olarak harcanırken diğer kalan enerji ise ışıma gücünün büyüklüğünü oluşturmaktadır. Işıma gücünün kaynaktan çekilen güce oranı Formül 4.4’te ifade edildiği gibi ışıma verimi olarak tanımlanmaktadır ve e_r ile gösterilir. Antendeki kayıp ve uyumsuzluk az oldukça verim o kadar yüksek olmaktadır [29,30].

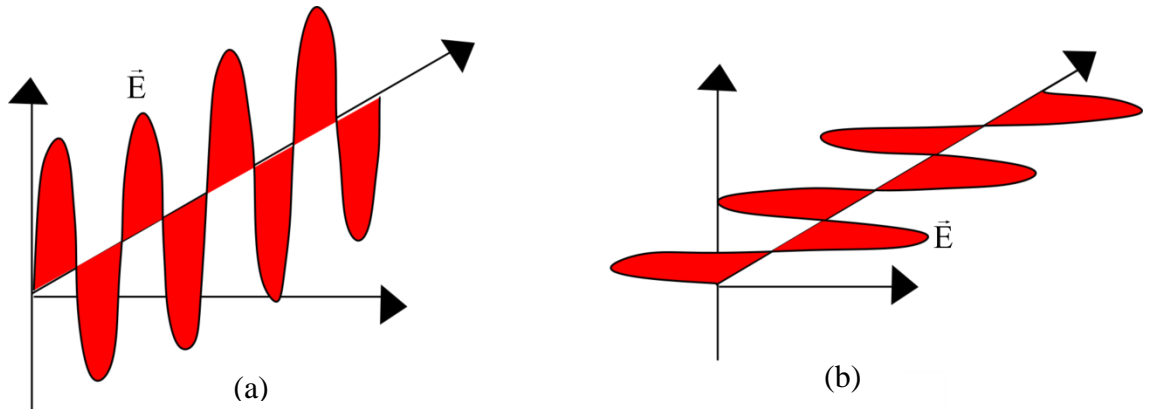
$$e_r = \frac{P_{ışıma}}{P_{kaynak}} \quad (4.4)$$

4.2.3.4. Anten yönlülüğü ve kazancı

Antenin belirli bir doğrultuda yaptığı ışınım yoğunluğunun tüm doğrultulara yaptığı ortalama ışınım yoğunluğuna oranına anten yönlülüğü denir [28]. Anten yönlülüğü ve kazancı, referans anten olan izotropik antene göre tanımlanan iki önemli parametredir. Bir noktadaki ışınım gücünün aynı noktada izotropik bir antenin ışınım gücüne oranı olarak da ifade edilebilir [32]. Anten yönlülüğü analitik olarak hesaplanabilmesine karşın kazanç ancak referans antene göre yapılan ölçümlerle bulunabilmektedir. Kayıpsız antenlerde yönlülük, aynı zamanda anten kazancıdır. Ancak kayıplı antenlerde kazanç, yönlülük ile verimin çarpımına eşittir [29,30].

4.2.3.5. Kutuplanma

Kutuplanma, bir elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünün zamanla yaptığı hareket olarak açıklanmaktadır. Genellikle kutuplanma, maksimum kazanç yönündeki kutuplanma olarak alınır. Antenin farklı bölgelerinde farklı kutuplanmalar görülür. Antenlerin haberleşebilmesi için alıcı ve verici antenlerin her ikisinin de kutuplanmalarının uygun olması gerekmektedir. Antenin yerleştirilme yönüne bağlı olarak elektrik alanın, dolayısıyla kutuplanmanın yönü de değişir. Şekil 4.6 (a) 'da dik olarak yerleştirilen bir antenin kutuplanması, Şekil 4.6 (b)'de ise aynı antenin yatay bir şekilde yerleştirilmesi sonucu oluşan kutuplanması gösterilmiştir.



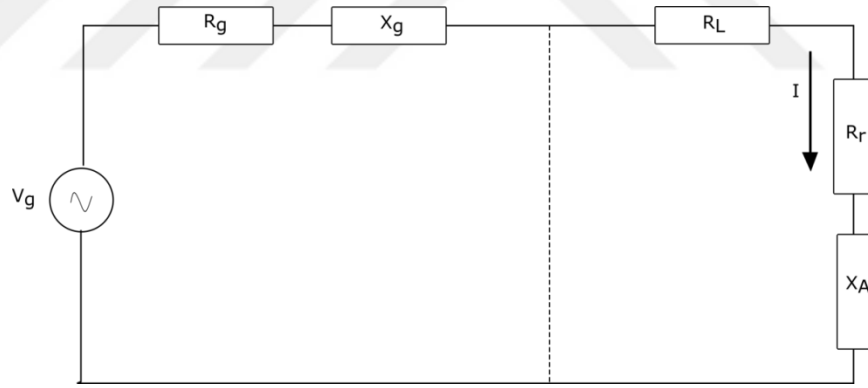
Şekil 4.6. Anten yerleşimine göre kutuplanma değişimi

Eğer kutuplanma kayıpları ile karşılaşıyorsa, antenin kutuplanması değiştirilerek kayıplardan kurtulmaya çalışılır. Genel olarak, doğrusal, dairesel ve eliptik olmak üzere üç tür kutuplanma çeşidi vardır. Eğer uzaydaki bir noktada elektrik alanı tanımlayan

vektör zamanın bir fonksiyonu olarak daima bir çizgi boyunca yönlendirse, alan doğrusal kutupludur. Buna karşılık elektrik alanın bir elips çizdiği durumda ise alan eliptik kutuplu olmuş olur. Doğrusal ve dairesel kutuplanmalar eliptik kutuplanmanın özel formlarıdır.

4.2.3.6. Giriş empedansı

Giriş empedansı, antenin terminallerinde bulunan gerilimin o noktadaki akımına oranıdır. Başka bir ifadeyle iletimde belirli bir noktada uygun elektrik alan ve manyetik alanların birbirine oranı olarak tanımlanmaktadır [30]. Antenin giriş empedansı ile iletim hattının karakteristik empedansı uygun olursa iletim hattı ve anten arasındaki enerji transferi maksimum olarak sağlanabilir. Anten giriş empedansı ile iletim hattı karakteristik empedansı uygunluğu sağlanamadığında, anten terminalinde kaynağa doğru yürüyen ve yansıyan dalga oluşur. Geriye dönen bu enerji anten sisteminde kayıplara sebep olur. Şekil 4.7’de anten ve anten beslemesinin empedans dağılımı görülmektedir [29,30].



Şekil 4.7. Anten ve anten beslemesinin empedans dağılımı

$Z_A = R_A + jX_A$: Anten empedansı (Ohm)

$R_A = R_r + R_L$: Anten direnci (Ohm)

R_r : Radyasyon direnci (Ohm)

R_L : Kayıp direnci (Ohm)

X_A : Anten reaktansı (Ohm)

V_g : Kaynak çıkış gerilimi (Volt)

$Z_g = R_g + jX_g$: Kaynak empedansı (Ohm)

R_g : Kaynak direnci (Ohm)

X_g : Kaynak reaktansı (Ohm)

4.2.3.7. Anten etkin yüzeyi

Antenler alıcı ve verici olarak kullanılırken bir ışına yaparlar. Bu ışına belirli bir şiddette olur ve çevreye yayılan güçle doğru orantılıdır. Anten etrafında elektromanyetik dalgaların yayılımını engelleyen, yansıtan veya soğuran birçok etken bulunmaktadır. Bu engeller elektromanyetik dalganın uzaklara gitmesini engelleyeceği gibi dalganın bozulmasına ve gücünü kaybetmesine sebep olur. Gücü azalan elektromanyetik dalgaları almak için farklı yüzeyler veya farklı yüzey boyutlarına sahip antenler geliştirilmiştir. Yüzey alanı büyüdükçe uzak mesafelerden gelen gücünü kaybetmiş elektromanyetik dalgaları almak mümkün olur [32].

4.2.3.8. Duran dalga oranı

Duran dalga oranı antenden yansıyan gücü tanımlayan, yansıma katsayısının bir formülüdür ve $VSWR$ ile gösterilir. $VSWR$, voltaj duran dalga oranı anlamına gelir. Bazı kaynaklarda bu oran SWR olarak da ifade edilir. $VSWR$ aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (4.5)$$

Burada;

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (4.6)$$

Formül 4.6' da bulunan Z_{in} antenin giriş empedansı, Z_0 ise iletim hattının karakteristik empedansı ifade etmektedir. $VSWR$, antenler için her zaman gerçek ve pozitif bir sayıdır. $VSWR$ ne kadar küçük olur ise anten, iletim hattına o kadar iyi eşleşir [30].

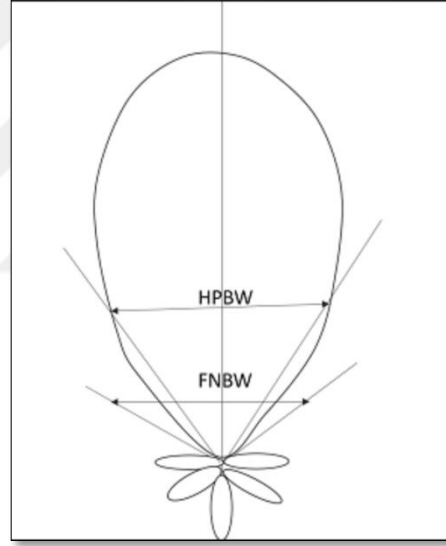
4.2.3.9. Bant genişliği

Bant genişliği, antenin elektromanyetik dalga yayabildiği veya alabildiği frekans bandının genişliği olarak tanımlanabilir. Bant genişliği genellikle antenin kullanım amacına uygun olarak belirlenir. Anten uygulamalarında yansıma katsayısı olan S_{11}

parametresinin genellikle -10 dB'nin altındaki değerler için bant genişliği hesaplanmaktadır [32].

4.2.3.10. Demet genişliği

Demet genişliği anten örüntüsü ile ilgili bir parametredir. Bir anten ışıma diyagramında temel olarak iki çeşit demet genişliği bulunmaktadır. En çok kullanılan demet genişliği ifadesi, yarı güç demet genişliği (HPBW) dir. HPBW, gücün yarıya düştüğü iki yön arasındaki açı olarak tanımlanır. Bir diğer demet genişliği ifadesi ise ışıma diyagramının ilk sıfırları arasındaki açısal genişliktir ve ilk sıfır demet genişliği (FNBW) olarak adlandırılır. Demet genişliği yönlü bir anten için kalite ölçüsüdür. Demet genişliği arttıkça yan demet seviyeleri azalır [30]. Şekil 4.8'de demet genişlikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Demet genişlikleri

4.3. Anten Çeşitleri

Kablosuz iletişiminin yapılması amacıyla geçmişten günümüze kadar binlerce anten çeşidi geliştirilmiştir. Geliştirilen antenler farklı ölçütlere ve özelliklerine göre genel olarak şu başlıklar altında sınıflandırılabilir [31]:

- Bant genişliğine göre
- Polarizasyona göre
- Rezonans durumuna göre
- Eleman sayısına göre.

Fiziksel yapılarına göre antenler tel tipi antenler ve açıklık tipi antenler olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilirler. Genel olarak, tel tipi ve açıklık tipi antenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Tel tipi antenler

- Dipol antenler
- Monopol antenler
- Halka (çember) antenler (loop antennas)
- Helisel (sarmal) antenler
- Yagi – Uda antenleri
- Log – periyodik antenler
- Spiral antenler

Açıklık tipi antenler

- Piramit Antenler
- Reflektör antenler (Parabolik reflektör antenler) ve lens antenleri
- Slot (yarık, aralık) antenler
- Yama (patch) antenler (mikroşerit antenler) [33].

Tel tipi antenler ve açıklık tipi antenler istenilen koşulda ışımaya yapabilmeleri amacıyla bazı belirlenen kurallara uygun olarak üretilirler. Kullanım amacına göre her bir anten farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Bundan dolayı antenlerden en iyi derecede yararlanabilmek için o antene ait özelliklerin iyi tahlil edilmesi gerekmektedir ve bu sonuçlar neticesinde kullanım koşullarına en uygun anten tercih edilmelidir. Bu bölümde başlıklar halinde sıralanan anten çeşitleri arasında, sıklıkla kullanılan yönlü monopol ve mikroşerit antenlerin yapısı, özellikleri, çeşitleri ve kullanım alanlarıyla ayrıntılı bir şekilde anlatılıp, bu antenlerin simülasyon programlarıyla çeşitli analizleri gösterilecektir [33].

4.3.1. Monopol anten

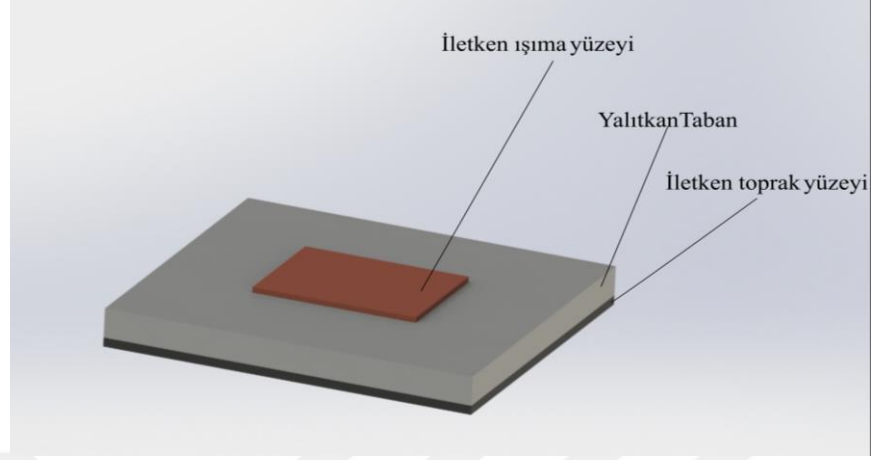
Monopol anten 1895'te Guglielmo Marconi tarafından üretilmiştir. Marconi yaptığı deneyde vericinin bir ucunu havaya doğru yönelmiş telin ucuna, diğer ucunu ise toprağa bağlamış ve daha uzak mesafelere sinyal gönderebileceğini keşfetmiştir. Bundan dolayı

bu tip antenlere literatürde Marconi anteni de denmektedir. Genellikle dielektrik levha üzerinde dik olarak ve iletken plaka ile temas ettirilmeden yerleştirilen çeyrek dalga boyunda ($\lambda/4$) düz bir metal çubuktan oluşur. Anten çubuğu uzunluğunun $\lambda/4$ 'e eşit olması veya $\lambda/4$ 'ün tam katları şeklinde olması anteni rezonans hale getirir. Böylece maksimum dalga yayma ya da dalga alma gerçekleştirilir. Monopol antenler yönsüz ışıma örüntüsüne sahiptir.

4.3.2. Mikroşerit anten

Mikroşerit antenin tarihçesine bakacak olursak ilk olarak mikroşeritli elemanların anten olarak kullanılabilceği fikri 1953 yılında Deschamps tarafından ortaya atılmıştır [34]. Mikroşerit alanında ilk patent 1955 yılında Fransa'da Gutton ve Baissinot tarafından alınmıştır [29,34]. Fakat 19 yıl boyunca kullanılabilir bir anten üretilmemiştir. Bunun nedeni ise o zamanın teknolojisi ile henüz iyi dielektrik tabanların mevcut olmamasıdır. Aradan geçen 19 yılın sonunda dielektrik taban malzeme teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte 1970'li yılların başında Munson ve Howell tarafından ilk mikroşerit anten üretimi yapılmıştır [23,29]. Üretilen bu antenler uzay teknolojilerinde kullanılmıştır. Mikroşerit antenlerin üretiminin kolay olması ve bu antenlerin maliyetinin düşük olması gibi avantajları olduğunun görülmesiyle mikroşerit antenlerin tasarımlarının geliştirilmesi için pek çok araştırma yapılmıştır.

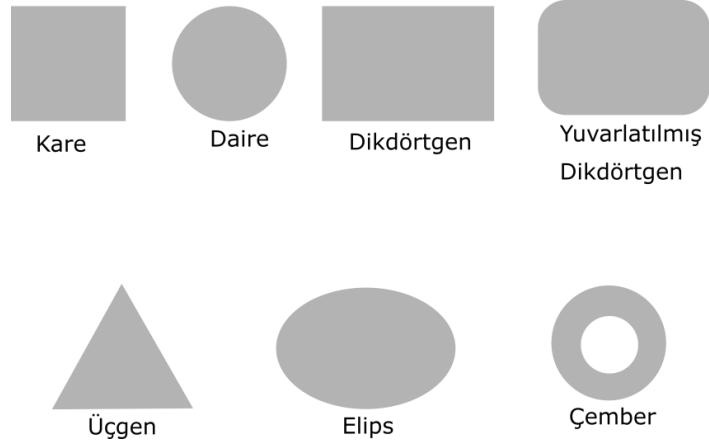
Mikroşerit antenlere standart getirmek amacıyla 1979 yılında New Mexico State Üniversitesinde ilk uluslararası toplantı düzenlenmiştir [29,30]. 1970 yılından sonra mikroşerit antenlerin popülaritesi artmıştır. İlerleyen 1980'li yıllarda mikroşerit antenlerin üretim işlemlerinin temeli atılmıştır [29,35]. Mikroşerit antenlerin üretilmesi ve kullanımının kolaylığı gibi nedenlerden dolayı elektronik cihazlarda ve haberleşme teknolojilerinde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Mikroşerit antenlerin genel yapısı Şekil 4.8'de görüldüğü gibi çift taraflı taban malzemesi, bu malzemenin bir yüzeyinde iletken ışıma yüzeyi, diğer yüzeyi ise iletken toprak tabakasından oluşur.



Şekil 4.9. Mikroşerit antenlerin genel yapısı

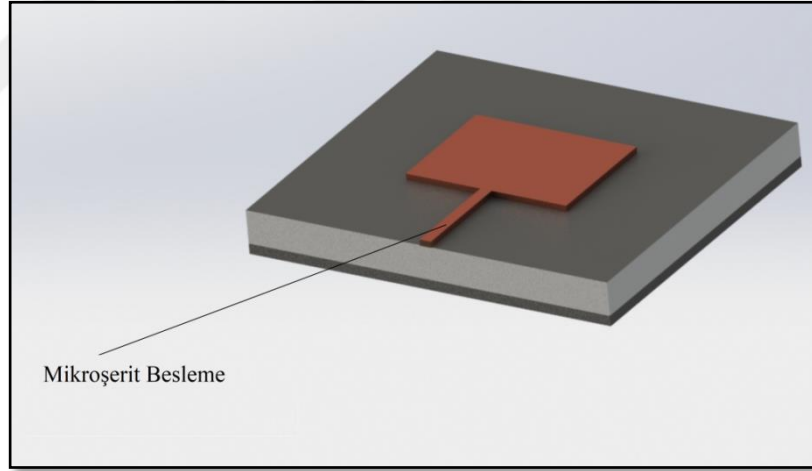
Mikroşerit antenin ışıma performansını direkt etkileyen parametreler ışıma elemanının boyutları ve biçimi, taban malzemesinin kalınlığı ve dielektrik sabitidir. Dielektrik taban malzemesi tasarlanan devreye uygun olarak isteğe göre seçilebilir. Bu malzeme imalatında alumina, kuartz gibi malzemeler kullanılır. Fakat bu malzemelerin fiyatlarının yüksek olması nedeniyle genellikle daha ucuz olan FR-4 malzeme kullanılır. Dielektrik malzemelerin dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı o malzemenin kalitesini belirler. Kayıp tanjantın değeri arttıkça anten verimi azalır [28].

Mikroşerit antenlerde dielektrik taban malzemesinin bir yüzü tamamen toprak düzlemi ile kaplanmış olup diğer tarafında herhangi bir geometriye sahip olan düzlemsel iletken bir şerit bulunmaktadır. Bu şeridin yapısı antenin özelliklerini belirler. Günümüzde geometrik şekiller ve özel tasarımlar ile mikroşerit anten tasarımı yapılmaktadır. Bu geometrilerden en çok kullanılanları kare, dairesel, eliptik ve halka şeklinde olanlardır [36]. Şekil 4.9'da yaygın olarak kullanılan yama tipleri görülmektedir. Bunların dışında farklı şekillerde yama tipleri de bulunmaktadır.



Şekil 4.10. Mikroşerit yama anten tipleri

Antenin besleme noktası, ışımının gerçekleştiği yama ile aynı yüzeydedir. Besleme noktası bu şekilde doğrudan bağlıdır. Işıma yüzeyi besleme hattının genişliğine göre daha kalındır. Mikroşerit beslemenin basitlik, ergonomik yapı ve üretim kolaylığı gibi avantajları vardır. Şekil 4.10'da mikroşerit besleme yapısı görülmektedir.



Şekil 4.11. Mikroşerit antenin besleme yapısı

Mikroşerit antenler, diğer antenlere göre birçok avantajlara sahiptir. Mikroşerit antenlerin avantajları şunlardır;

- Genellikle küçük boyutlara sahiptir.
- Üretim aşaması kolaydır.
- Mekanik dayanıklılıkları yüksektir.
- Boyutlarının küçük olmasından dolayı montajı kolaydır.

- Gelişen dielektrik taban malzeme teknolojisi ile esnek yüzeylere uygun anten tasarlamak mümkündür.
- Uydu ve güdümlü füze gibi cihazların yapısını etkilemeden kolayca monte edilebilir.
- Mono veya çoklu frekans bantlarında çalışabilirler.
- Besleme yerinde yapılan modifikasyonlar ile doğrusal veya dairesel polarizasyonlu ışına yapabilirler.

Mikroşerit antenlerin dezavantajları ise;

- Bant genişlikleri dardır.
- Verimlilikleri ve kazançları düşüktür.
- Maksimum kazancın pratik sınırları yaklaşık 20 dB'dir.
- Işıma yapan elemanlar ve besleme arasındaki yalıtım zayıftır.
- Boyuna dizi ışına performansı zayıftır.
- Düşük polarizasyon saflığına ve tarama performansına sahiptirler [29].

Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte mikroşerit antenler hakkında yapılan bilimsel çalışmalar ve gelişmeler ile mikroşerit antenlerin kullanılabilirlik alanları sürekli genişlemektedir [28].

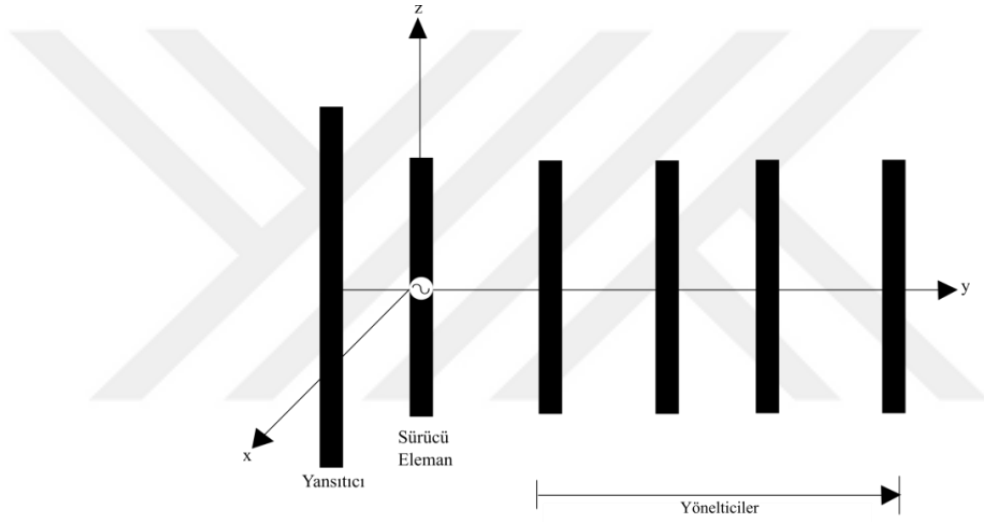
Mikroşerit antenlerin bazı uygulama alanları şunlardır;

- Kablosuz sistemler,
- Uydu haberleşmesi,
- Gezgin haberleşme,
- Güdümlü füzeler,
- Biomedikal ölçümler,
- Uzaktan algılama sistemleri,
- Hastalık tanı sistemleri [29].

4.3.3. Yagi-Uda anten

Bu antenin orijinal tasarımı ve çalışma prensibi Shintaro Uda tarafından 1926 yılında ilk önce Japonca olarak yayınlanmıştır. Daha sonra Hidetsugu Yagi bu antenin çalışma prensibini İngilizce olarak açıklamıştır [37]. Bu makale klasik kabul edilmiş ve genel bir terim olarak Yagi-Uda anteni şeklinde kullanılmaya başlamıştır.

Yagi-Uda anteni HF (3-30 MHz), VHF (30-300 MHz) ve UHF (300-3000 MHz) bantlarında kullanılır. Bu anten Şekil 4.11'de gösterildiği gibi bir dizi doğrusal dipol elemandan oluşur.



Şekil 4.12. Genel Yagi-Uda anten şeması

Yöneltilerin ve yansıtıcıların uzunlukları, çapları ve bunlar arasındaki mesafeler antenin özelliklerini belirler. Genellikle Yagi-Uda antenleri düşük giriş empedansına ve nispeten dar bant genişliğine sahiptir.

Yagi-Uda anteni için genellikle ortak besleme elemanı katlanmış dipoldür. Beslemenin uygulandığı antenin önündeki parazitik elemanlar yönlendirici olarak işlev görürken, arkasındaki elemanlar yansıtıcı olarak görev yapar. Yönlendirici elemanlar besleme elemanından biraz küçük, yansıtıcı elemanlar ise besleme elemanından biraz daha büyüktür.

4.4. Anten Tasarımı ve Analizi

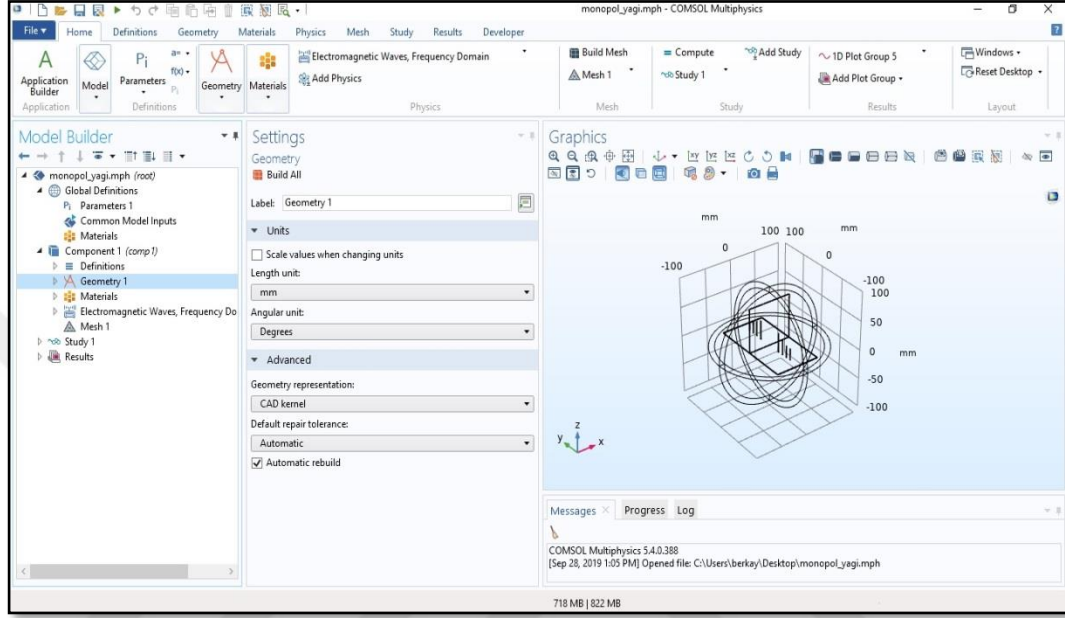
COMSOL Multiphysics, herhangi bir fizik tabanlı sistemin modellenmesi ve simülasyonu için mühendislik, tasarım ve sonlu elemanlar analiz yazılımı ortamıdır [38]. Başka bir ifadeyle, Comsol kısmi diferansiyel denklemlere dayalı her türlü bilimsel ve mühendislik problemini modellemek ve çözmek için güçlü ve etkileşimli bir ortamdır. COMSOL Multiphysics simülasyon modelleme sürecindeki tüm adımları kolaylaştırır. Mekanik ve elektromanyetik için önceden tanımlanmış çeşitli uygulamalara ve analizlere kolaylıkla ulaşılabilir. COMSOL Multiphysics programı, hesaplama yöntemi olarak sonlu elemanlar metodunu kullanmaktadır. Sonlu elemanlar metodu mühendislik ile ilgili karmaşık problemlerin çözülebilmeye imkân sağlayan nümerik bir metottur. Dünyadaki tüm nesnelere buldukları düzlemde sonsuz sayıda nokta içerirler. Sonlu elemanlar metodu ise adından da anlaşılacağı gibi nesnelere sonlu sayıda noktaya ayırarak çözüme gitmeye çalışır. Bu metot ile ilgili ilk çalışmaların Courant tarafından yapıldığı kabul edilmektedir. Simülasyon programlarından önce sonlu elemanlar metodu ile çözüm elle yapılmakta idi. Bu yüzden nesnelere karmaşıklıklarına göre 10-100 parçaya bölünebiliyor fakat hassas çözüm yapılamıyordu. Ancak teknolojik gelişmeler sayesinde eleman sayısı ve buna bağlı olarak çözümdeki hassasiyet arttı. Bugün bir uçak kanadı, uzay mekiği ya da bir otomobil 15-20 milyon elemana bölünebilir ve bilgisayarla nümerik olarak hesaplanabilir. COMSOL Multiphysics yazılımı birçok uygulama alanında kullanılabilir. Biz bu çalışmada Comsol programının RF modülünü kullanarak anten tasarımlarımızı gerçekleştirdik. RF modülü aşağıdaki başlıkları kapsamaktadır;

- Antenler
- Filtreler
- Radyo-Frekans
- Elektromanyetik
- Mikrodalga

COMSOL Multiphysics yazılımı; basit bir monopol antenden, kompleks dizilerin dizaynına kadar geniş bir yelpazede optimizasyon çalışması ve performans görüntülemesinde tercih edilen bir yazılımdır. Antenlerin 2D ışınma örtüsü, 3D yönlülük ölçümü, demet genişliği, S parametreleri, VSWR, Smith abağı gösterimleri gibi birçok

anten ölçümleri özellikleri bu simülatör sayesinde görüntülenebilir, parametrik çözüm ile optimize edilebilir [39].

Şekil 4.12’de COMSOL Multiphysics kullanıcı ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 4.13. COMSOL Multiphysics kullanıcı ara yüzü

4.4.1. Monopol Yagi-Uda anten tasarımı

Bu bölümde 2.4 GHz frekans bandında çalışacak, çift beslemeli çift taraflı monopul Yagi-Uda anten tasarımı yapılacaktır. Tasarlanan antenin, geleneksel dipol antene göre yönlülüğünün daha fazla olması esas amaçlardan biridir. Yapılan anten tasarımında bir yansıtıcı yüzey ve yönleticiler sayesinde yönlülüğünün artırılması planlanmıştır. Böylece çift taraflı monopul Yagi-Uda anten tasarımı ile iletişimin kalitesinin artırılması hedeflenmiştir.

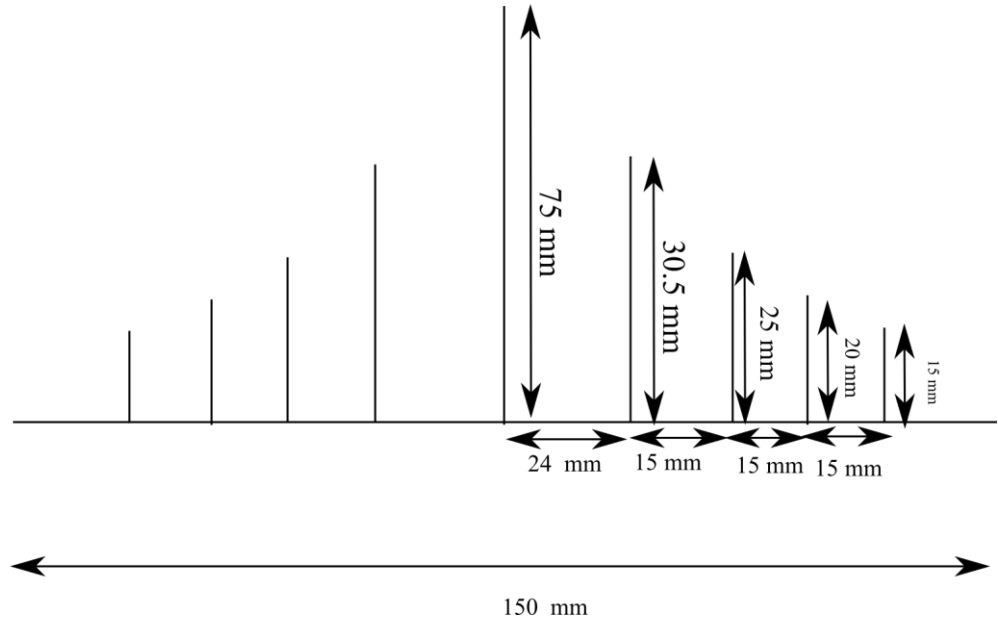
Monopol Yagi-Uda anten tasarımında önemli parametreler besleyici eleman uzunluğu, yansıtıcı genişliği ve uzunluğu, yönleticilerin uzunlukları, sayıları ve aralarındaki mesafelerdir.

Yagi antenlerde yönlülüğü artırmak için yönleticiler eklenir. Tasarladığımız antende her bir yön için üç yönleticiler kullanılmaya karar verilmiştir. Yönleticiler elemanlarının boyutları, yönleticiler arası mesafe, taban uzunluğu, taban genişliği, reflektör uzunluğu ve genişliği Comsol programında bulunan parametrik sweep özelliği

kullanılarak belirlenmiştir. Bu özellik sayesinde adım adım taranan her bir uzunluk değeri antenin en iyi ışınma yaptığı nokta dikkate alınarak belirlenmiştir. Antenin yapısındaki simetriden faydalanılarak tek bir yönde gerçekleştirilen tasarım diğer yön içinde aynen kullanılmıştır. Antene ait fiziksel değerler Tablo 4.1’de ve Şekil 4.14’te görülmektedir.

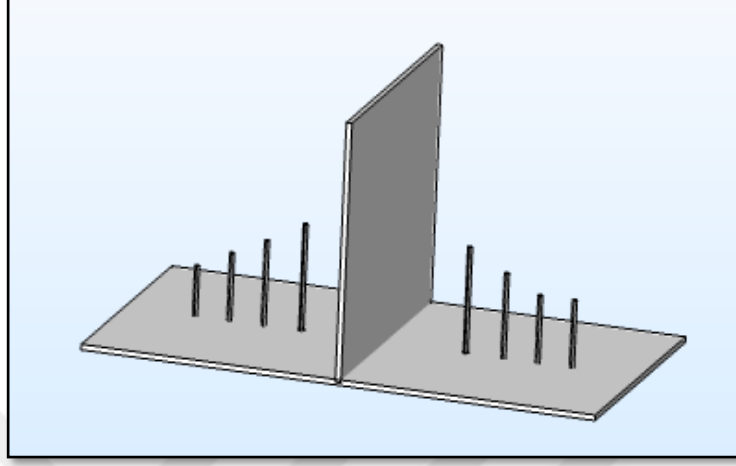
Tablo 4.1. Monopol Yagi-Uda antene ait fiziksel değerler

Alt tabaka malzemesi	FR-4
Taban uzunluğu	150 mm
Taban genişlik	80 mm
Reflektör Uzunluğu	75 mm
Reflektör Genişliği	80 mm
Birinci yönlendirici eleman uzunluğu	25 mm
İkinci yönlendirici eleman uzunluğu	20 mm
Üçüncü yönlendirici eleman uzunluğu	15 mm
Yönlendirici elemanlar arası mesafe	15 mm
İlk yönlendirici eleman ile reflektör arası mesafe	24 mm
Besleyici eleman uzunluğu	30.5 mm



Şekil 4.14. Monopol Yagi-Uda antene ait fiziksel değerler

Simülasyon programında tasarlanan antenin üç boyutlu görünüşü Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Monopol Yagi-Uda antenlerin COMSOL programındaki görünümü

Tasarım esnasında, antenin 2.4-2.5 GHz frekans aralığında çalışmasına ve yönlülüğünün mümkün olduğu kadar yüksek olmasına dikkat edilmiştir.

4.4.2. Mikroşerit anten tasarımının temel parametreleri

Mikroşerit anten tasarımında belirlenmesi gereken temel parametreler çalışma frekansı, dielektrik sabiti ve dielektrik profilin yüksekliğidir.

4.4.2.1. Çalışma frekansı

Antenin hangi frekans bandı aralığında daha verimli şekilde çalışabileceğini gösterir. Yani antenin rezonans frekansı değer aralığını ifade eder.

4.4.2.2. Dielektrik sabiti

Seçilecek dielektrik taban malzemesinin dielektrik sabiti antenin performansı konusunda çok etkilidir. Mikroşerit anten tasarımında kullanılan dielektrik malzemelerin dielektrik sabitleri genellikle $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığındadır. Burada ϵ_r göreceli dielektrik sabitini göstermektedir [40].

4.4.2.3. Dielektrik malzemenin yüksekliği

Dielektrik malzemenin kalınlığı devrenin kalınlığını oluşturmaktadır. Dielektrik malzemenin bir yüzünü topraklama diğer yüzünü de mikroşerit anten oluşturmaktadır.

Dielektrik malzemenin kalınlığı genellikle $h \leq \lambda_0$ olmak üzere $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ aralığında seçilir. Burada h dielektrik malzemenin kalınlığını λ_0 ise boş uzay dalga uzunluğunu ifade etmektedir [28].

Bu çalışmada gerçekleştirilecek tasarımların odak noktası yönlü mikroşerit anten olacaktır. Bu doğrultuda öncelikle koaksiyel beslemeye sahip bir mikroşerit yama anten tasarımı yapılacaktır. Daha sonra antenin yönlülüğünü artırmak için yöneltici elemanlar yerleştirilecektir. Yöneltici elemanların konumları Comsol yazılımı yardımı ile belirlenecektir. Yöneltici elemanlar üç boyutlu yazıcı ile imal edilen destekler sayesinde konumlandırılacaktır.

4.4.3. Yönlü mikroşerit anten tasarımı

2.4 GHz frekansında çalışabilen ve yüksek yönlülüğe sahip olan yönlü mikroşerit anten tasarımının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Belirli bir mesafeye göre yerleştirilen yöneltici elemanlar sayesinde antenin yüksek yönlülüğe ulaşması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda yöneltici elemanların konumları Comsol yazılımının parametrik süpürme özelliği sayesinde belirlenmiştir. Belirlenen mesafelere uygun olarak 3 boyutlu yazıcı ile konumlandırılma yapılmıştır. Böylece antenin haberleşme mesafesinin artırılması amaçlanmıştır.

Mikroşerit anten tasarımında çalışma frekansı, bant genişliği, dielektrik sabiti ve dielektrik tabakanın kalınlığı gibi temel parametreler dikkate alınmalıdır. Ayrıca tasarlayacağımız antenin yüksek yönlülüğe sahip olması gerekmektedir. Tasarlanan devrenin ucuz olması, kolay bulunabilmesi ve antenin üretim aşamasının basit olması nedeniyle taban malzemesi olarak 4.2 dielektrik sabitine sahip 1.60 mm kalınlığında FR4 epoksi taban malzemesi kullanılmıştır.

Antenin boyutlarının belirlenmesinde öncelikle aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır [41].

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.6)$$

Eğer $\frac{w}{h} \geq 1$ ise ϵ_{ref} (efektif dielektrik sabiti), Eşitlik 4.7' den bulunur.

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{12h}{w}}} \quad (4.7)$$

$1 \leq \epsilon_{ref} \leq \epsilon_r$ ise;

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (4.8)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (4.9)$$

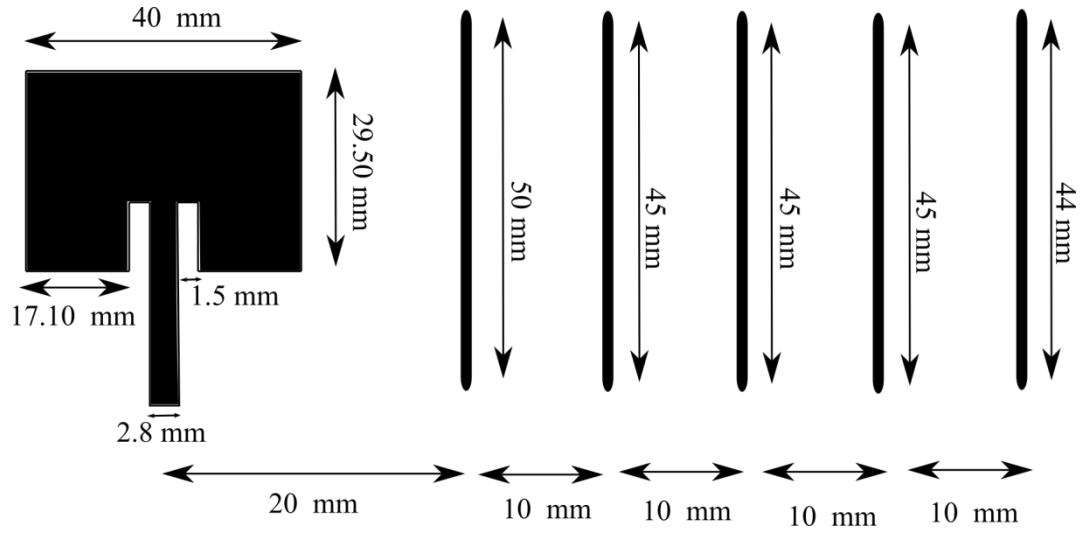
$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4.10)$$

Burada W yama genişliğini, L yamanın uzunluğunu, h dielektrik malzemenin kalınlığı, ΔL saçak değerini, c ışık hızını, f_0 çalışma frekansını ifade etmektedir.

Yöneltici elemanların uzunluğu ise, mikroşerit antene olan uzaklığı ve birbiri arasında olan mesafe değerleri Comsol programının parametrik süpürme özelliği sayesinde belirlenmiştir. Antene fiziksel değerler Tablo 4.2’de ve Şekil 4.16’de görülmektedir.

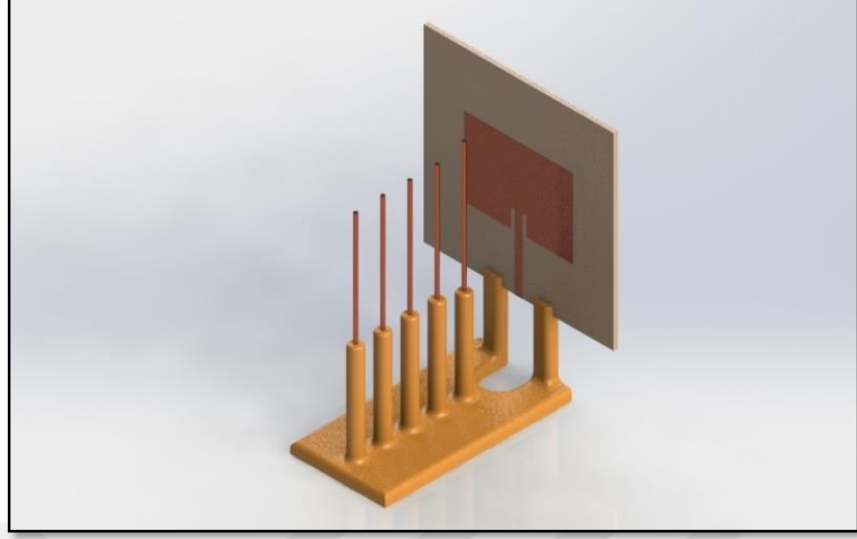
Tablo 4.2. Yönlü mikroşerit antene ait fiziksel değerler

Alt tabaka malzemesi	FR-4
Malzemeye özgü dielektrik sabiti (ϵ_r)	4.2
Dielektrik malzeme kalınlığı	1.60 mm
Dielektrik malzeme genişliği	29.50 mm
Dielektrik malzeme uzunluğu	40 mm
Besleme şerit genişliği	2.80 mm
Birinci yöneltici eleman uzunluğu	50 mm
İkinci yöneltici eleman uzunluğu	45 mm
Üçüncü yöneltici eleman uzunluğu	45 mm
Dördüncü yöneltici eleman uzunluğu	45 mm
Beşinci yöneltici eleman uzunluğu	45 mm
Yöneltici elemanlar arası mesafe	10 mm
İlk yöneltici eleman ile mikroşerit anten arası mesafe	20 mm

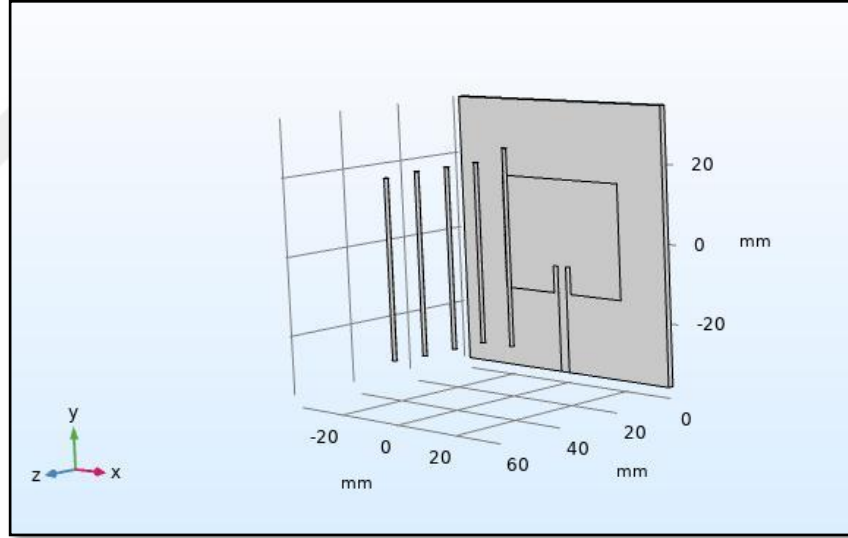


Şekil 4.16. Yönlü mikroşerit antene ait fiziksel değerler

Belirlenen mesafe değerindeki elemanları düzleme yerleştirmek için üç boyutlu yazıcı ile parça imalatı yapılmıştır. Antenin desteklerle birlikte tasarım görünümü ve Cmsol programındaki analiz edilmeye hazır görünümü sırasıyla Şekil 4.17’de ve Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Tasarlanan yönlü mikroşerit antenin görünümü



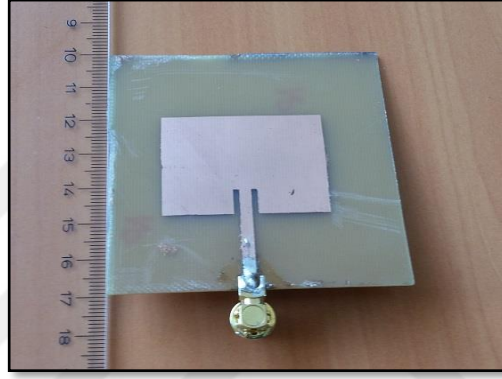
Şekil 4.18. Tasarlanan antenin COMSOL programındaki analize hazır görünümü

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

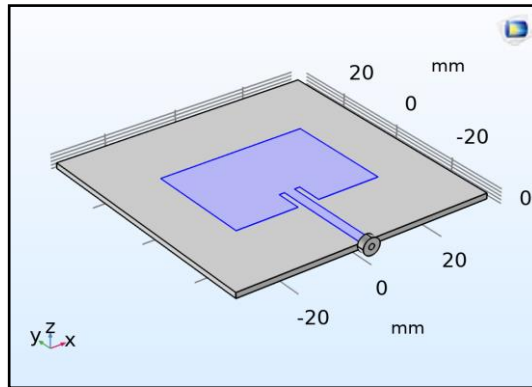
5.1. Anten Işıma Diyagramı Ölçümü

Bölüm 2’de anlatılan anten ışınım diyagramı ölçüm sistemini doğrulamak amacıyla ilk olarak Jaget Singh’in makalesinde sunulan 2.4 GHz iç beslemeli mikroşerit yama anten imal edilmiştir [41]. İmal edilen antenin fotoğrafı Resim 5.1’de gösterilmektedir.



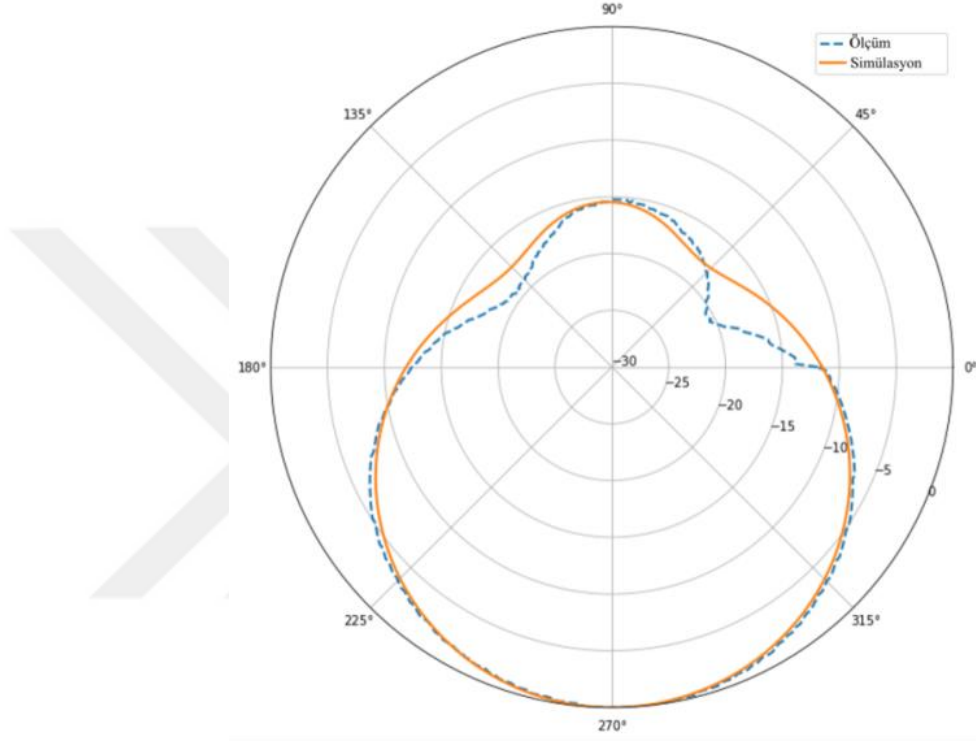
Resim 5.1. İmal edilen yama anten

Antenin üretimi 4.20 dielektrik sabitine sahip, 1.60 mm kalınlığındaki FR4 taban malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. İmal edilen antene ait simülasyonlar Comsol yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Modellenen yama anteni Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



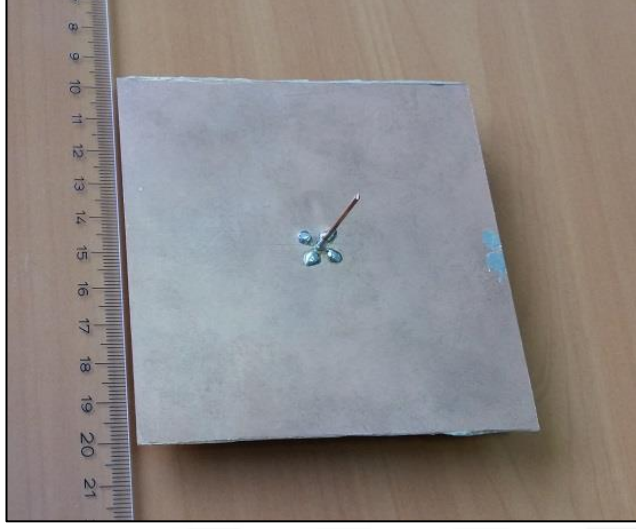
Şekil 5.1. Modellenen yama anten

Simülasyon sonucunda elde edilen ışına diyagramı ile ölçüm sonucunda elde edilen normalize edilmiş ışına diyagramı karşılaştırılmalı olarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Ana lob z eksenini yönündedir. Şekilde de gösterildiği gibi ölçüm sonuçları simülasyon sonuçlarına oldukça yakındır. Özellikle ana lob ve arka lobların benzerlikleri oldukça iyidir.



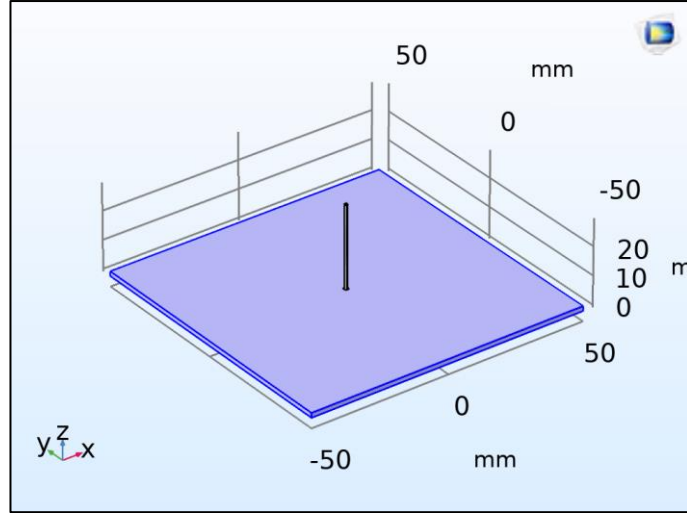
Şekil 5.2. İmal edilen mikroşerit yama antenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarına ait ışına diyagramlarının karşılaştırılması

Bölüm 2’de anlatılan anten ışına diyagramı ölçüm sistemini doğrulamak amacıyla ayrıca 2.4 GHz frekansında çalışan monopoll bir anten imal edilmiş ve ölçümü yapılmıştır. İmal edilen antenin fotoğrafı Resim 5.2’de gösterilmiştir.



Resim 5.2. İmal edilen monopol anten

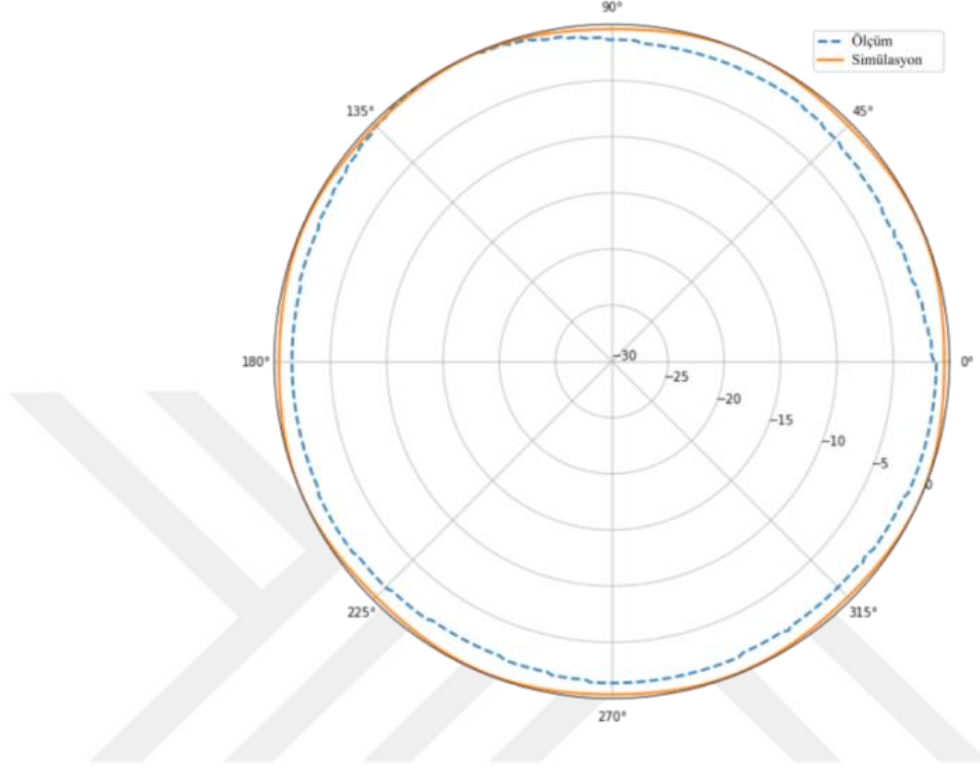
Antenin üretimi 4.2 dielektrik sabitine sahip, 1.60 mm kalınlığındaki FR4 taban malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Zemin düzlemi, 100x100 mm boyutlarındadır. Telin yarıçapı ve uzunluğu sırasıyla 0.5 mm ve 29 mm'dir. İmal edilen antene ait simülasyonlar Comsol yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Modellenen monopol anteni Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Modellenen monopol anten

Simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Şekilde de gösterildiği gibi ölçüm ve simülasyon sonuçları birbirlerine oldukça yakındır. Simülasyon ve ölçüm

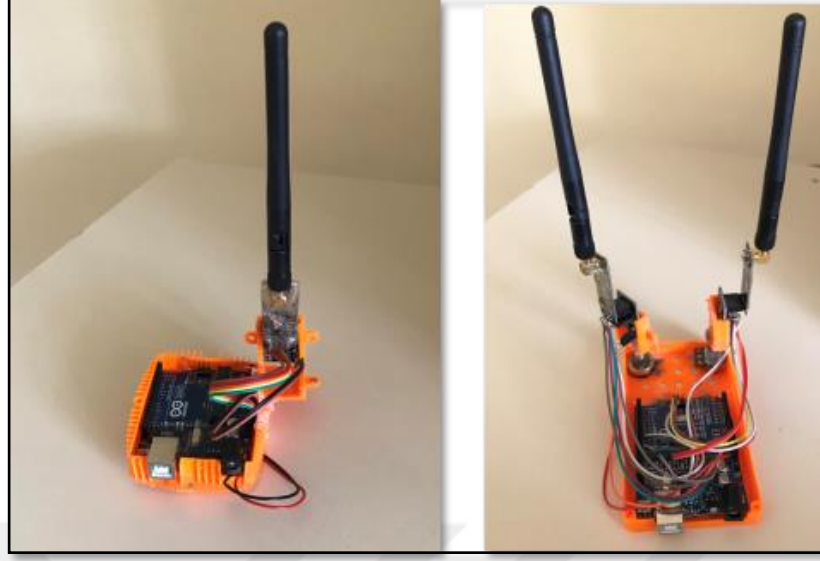
sonuçları arasındaki küçük farklılıkların, ölçümlerin yankısız bir ortamda yapılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.4. İmal edilen monopol antenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarına ait ışıma diyagramları

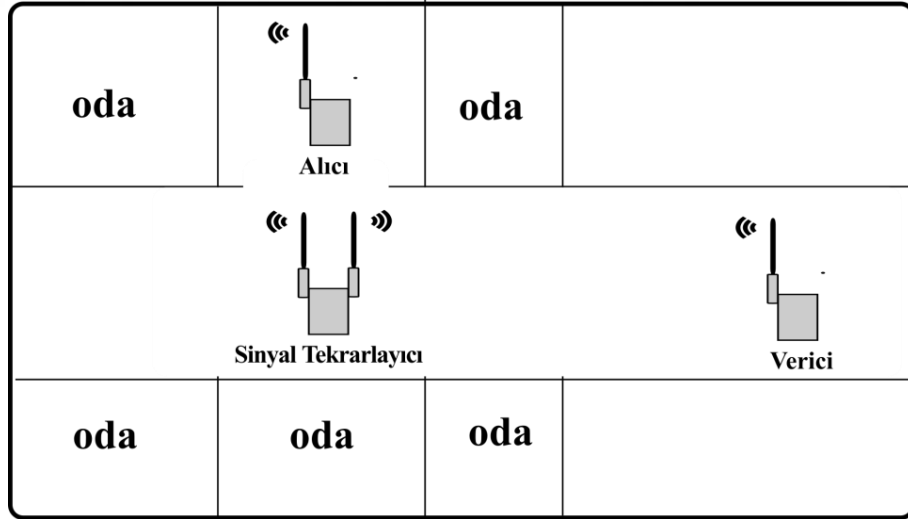
5.2. Sayısal Sinyal Tekrarlayıcıların Performanslarının Ölçülmesi

Bölüm 3'te ayrıntıları verilen sayısal sinyal tekrarlayıcılarının performanslarını test etmek için açık alanda ve kapalı alanda ölçümler yapılmıştır. İmal edilen sayısal sinyal tekrarlayıcılar Resim 5.3'te gösterilmektedir. Bu tekrarlayıcılarda geleneksel dipol anten kullanılmıştır.



Resim 5.3. İmal edilen tek antenli ve çift antenli sinyal tekrarlayıcıya ait fotoğraflar

İlk ölçüm Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binasında yapmış olduğumuz bina içi ölçümüdür. Bina içi ölçümü LOS ve nLOS ölçümlerini ihtiva etmektedir. Bina içi LOS ölçüm planı Şekil 5.5 'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5. LOS ölçümü için bina içi planı

Ölçüm planında görüldüğü gibi verici bölüm binasının lobisindedir. Alıcı ise öğretim elemanı odasındadır. Alıcı ve verici birbirini görmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. İmal ettiğimiz tek ve çift antenli sayısal sinyal tekrarlayıcılar ise alıcı ve vericiyi görebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Ölçüm yapılırken performans kriteri olarak saniyede alınan paket sayısı belirlenmiştir.

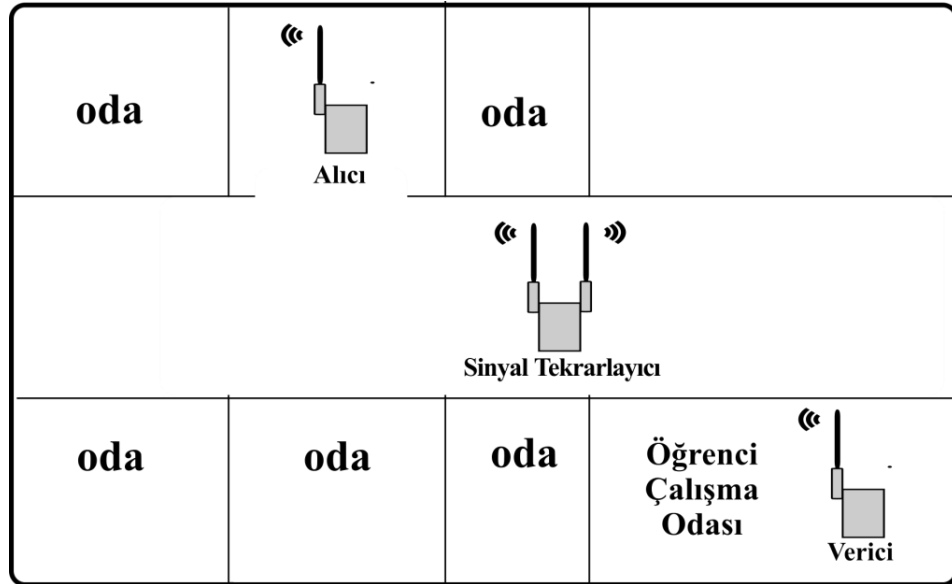
İlk ölçüm tekrarlayıcı olmadan gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm ise tek antenli tekrarlayıcının Şekil 5.5'te gösterilen yere yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak tek antenli tekrarlayıcı yerine çift antenli tekrarlayıcı yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı ölçümün sonucu Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Bina içi LOS ölçüm sonuçları

Tekrarlayıcısız	Tek Antenli Tekrarlayıcı	Çift Antenli Tekrarlayıcı
0	315	415

Tablo 5.1'de görüldüğü gibi bina içi LOS iletiminde tekrarlayıcı olmadan veri iletimi gerçekleştirilememektedir. Tek antenli ve çift antenli tekrarlayıcılar iletişimi başarıyla sağlamalarına rağmen, çift antenli tekrarlayıcı kullanılarak elde edilen ortalama paket sayısı, tek antenli tekrarlayıcıya göre daha yüksektir.

İkinci ölçüm bina içi nLOS ölçümlerini ihtiva etmektedir. Bina içi nLOS ölçümü için yerleşim planı Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. nLOS bina içi ölçüm planı

Bina içi nLOS ölüm planında sinyal tekrarlayıcı hem alıcıyı hem de vericiyi görmeyecek Şekilde konumlandırılmıştır. Ölüm yapılırken önceki sistemle aynı Şekilde performans kriteri olarak saniyede alınan paket sayısı dikkate alınmıştır. İlk olarak ölüm tekrarlayıcı olmadan gerçekleştirilmiştir. İkinci lm ise tek antenli tekrarlayıcı Şekil 5.6'daki plan üzerinde gösterilen yere konulduktan sonra gerçekleştirilmiştir. Son olarak tek antenli tekrarlayıcı yerine çift antenli tekrarlayıcı yerleştirilerek ölüm gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı ölüm n sonuu Tablo 5.2'de gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Bina içi nLOS ölüm sonuçları

Tekrarlayıcısız	Tek Antenli Tekrarlayıcı	ift Antenli Tekrarlayıcı
0	311	427

Tablo 5.2'de grldğu gibi bina içi nLOS iletiminde tekrarlayıcı olmadan veri iletimi gerçekleştirilememektedir. Tek ve çift antenli tekrarlayıcılar iletişimi başarıyla sağlamalarına rağmen, çift antenli tekrarlayıcı kullanılarak elde edilen ortalama paket sayısı, tek antenli tekrarlayıcıya göre daha yüksektir.

Tekrarlayıcıların performansını test etmek için açık alanda ölümler yapılmıştır. lmler Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Kampüs Stadyumu yakınında gerçekleştirilmiştir. Dış mekan ölüm  LOS ve nLOS ölümlerini ihtiva etmektedir. Dış mekan LOS lm  Şekil 5.7'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. LOS dış mekan ölçüm planı

Ölçüm planında görüldüğü gibi verici, alıcı ve imal ettiğimiz tek ve çift antenli sinyal tekrarlayıcılar birbirini görebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Ölçüm yapılırken önceki sistemle aynı şekilde performans kriteri olarak saniyede alınan paket sayısı dikkate alınmıştır. İlk ölçüm tekrarlayıcı olmadan gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm ise tek antenli tekrarlayıcı Şekil 5.7'deki plan üzerinde gösterilen yere konulduktan sonra gerçekleştirilmiştir. Son olarak tek antenli tekrarlayıcı yerine çift antenli tekrarlayıcı yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Çift antenli sinyal tekrarlayıcıya dış mekan ölçüm esnasında alıcı ve verici antenler arasında alüminyum malzeme ile yalıtım sağlanmıştır. Bu üç farklı ölçümün sonucu Tablo 5.3'te gösterilmektedir.

Tablo 5.3. Dış mekan LOS ölçüm sonuçları

Tekrarlayıcısız	Tek Antenli Tekrarlayıcı	Çift Antenli Tekrarlayıcı
12	291	450

Tablo 5.3'te gösterildiği gibi dış mekan LOS ölçümünde çift antenli sinyal tekrarlayıcı performansının, tek antenli sinyal tekrarlayıcı performansına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

İkinci dış mekan ölçümü ise nLOS ölçümlerini ihtiva etmektedir. Dış mekan nLOS ölçümü Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.8. nLOS dış mekan ölçüm planı

Ölçüm planında görüldüğü gibi verici ve alıcı istasyonlar arasında stadyum bulunmaktadır. İmal ettiğimiz tek ve çift antenli sinyal tekrarlayıcılar alıcı ve verici istasyonları görebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Ölçüm yapılırken önceki sistemle aynı şekilde performans kriteri olarak saniyede alınan paket sayısı dikkate alınmıştır. İlk ölçüm tekrarlayıcı olmadan gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm ise tek antenli tekrarlayıcı Şekil 5.8'deki plan üzerinde gösterilen yere konulduktan sonra gerçekleştirilmiştir. Son olarak tek antenli tekrarlayıcı yerine çift antenli tekrarlayıcı yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı ölçümün sonucu Tablo 5.4'te gösterilmektedir.

Tablo 5.4. Dış mekan nLOS ölçüm sonuçları

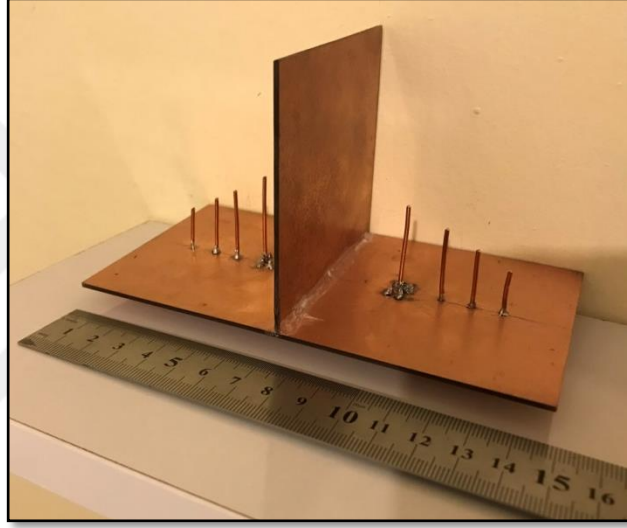
Tekrarlayıcısız	Tek Antenli Tekrarlayıcı	Çift Antenli Tekrarlayıcı
0	276	370

Tablo 5.4'te gösterildiği gibi dış mekan nLOS ölçümünde çift antenli sinyal tekrarlayıcının performansı, tek antenli sinyal tekrarlayıcıya göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Bina içi ve dış mekanda yapılan ölçümlerde görüldüğü üzere çift antenli sinyal tekrarlayıcı, tek antenli sinyal tekrarlayıcıya göre daha iyi performans sergilemiştir. Böylece 2.4 GHz'de iletişim kapsamı genişletilmiştir.

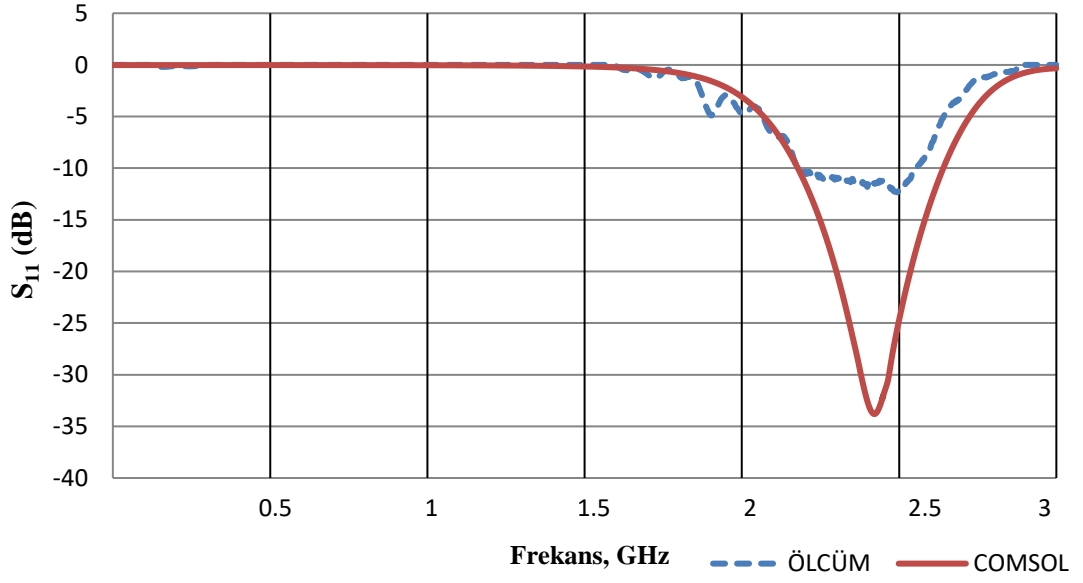
5.3. Monopol Yagi-Uda Anten

Bölüm 3'te tasarlanan sayısal sinyal tekrarlayıcısında kullanılmak üzere monopol Yagi-Uda anten tasarımı yapılmıştır. Simülasyon çalışması sonucu imal edilen devrenin fotoğrafı Resim 5.4'te gösterilmiştir. İmalat 4.2 dielektrik sabitli 1.60 mm kalınlığındaki FR4 taban malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yöneltiler elemanlar ise 1.37 mm çapında bakır tel kullanılarak imal edilmiştir. Üretilen anteni ölçebilmek için 50 ohm SMA konnektör kullanılmıştır. Ölçümler miniVNA Tiny Vector Network Analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



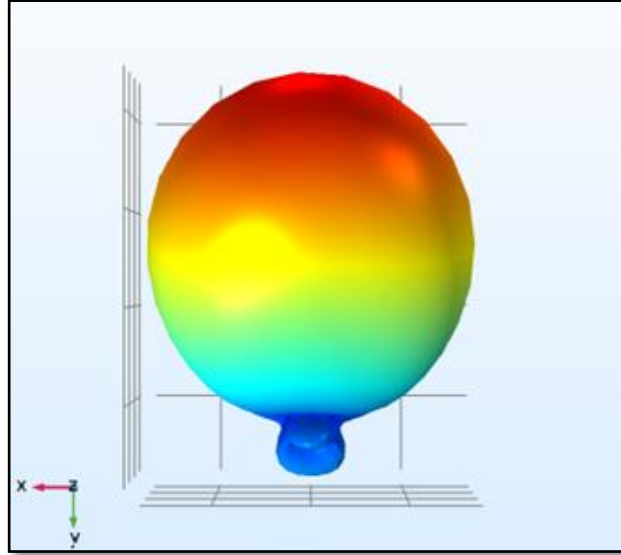
Resim 5.4. İmal edilen çift taraflı monopol Yagi Uda anten

Üretilen antenlere ait ölçüm-simülasyon sonuçları Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre; 2.45 GHz frekansında geri dönüş kaybı 12,53 dB olarak ölçülmüştür. Simülasyon sonucuna göre ise geri dönüş kaybı 31.468 dB olarak hesaplanmıştır.



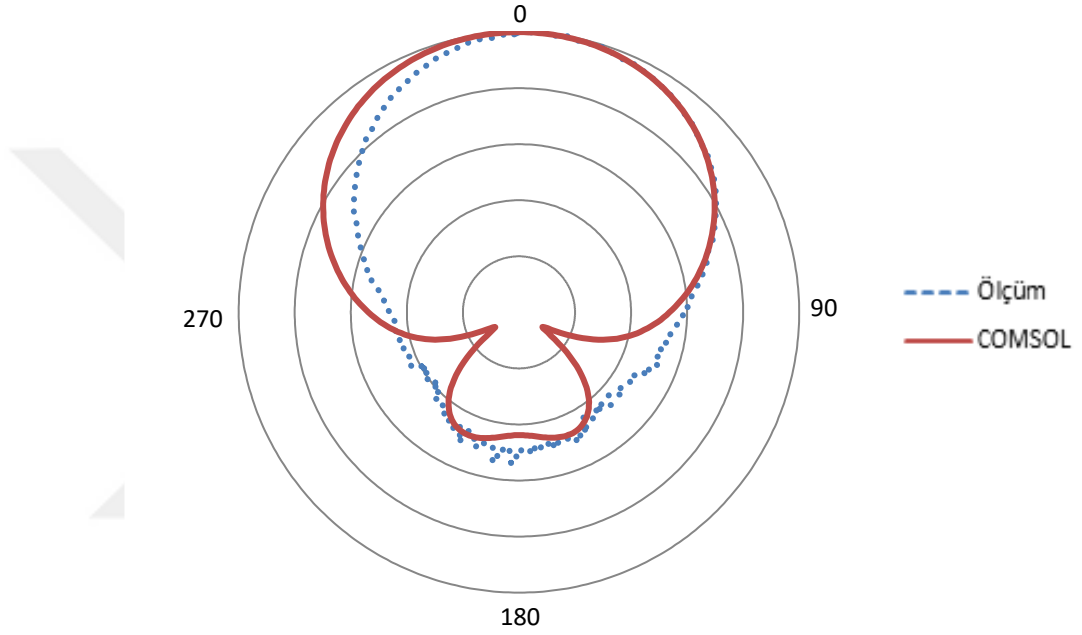
Şekil 5.9. Monopol Yagi-Uda'ya ait ölçüm ve simülasyon S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarlanan monopol Yagi-Uda antene ait 3 boyutlu ışınım diyagramı Şekil 5.10'de gösterilmektedir. 3 boyut grafiğine göre -y yönünde yönlülük 7,837 dB dir.



Şekil 5.10. Tasarlanan monopol Yagi-Uda antene ait 3 boyutlu ışınım diyagramı

Ayrıca, Bölüm 2’de tasarlamış olduğumuz anten ölçüm sistemiyle, üretimini gerçekleştirdiğimiz monopol Yagi-Uda anteninin ışıma örüntüsü ölçülmüştür. Simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Şekilde de gösterildiği gibi ölçüm sonuçları simülasyon sonuçlarına oldukça yakındır. Özellikle ana lob ve arka lobların sonuçları çok iyidir. Küçük farklılıklar, ölçümlerin yankısız bir ortamda yapılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.11. İmal edilen monopol Yagi-Uda antenine ait ışıma diyagramı

İmal ettiğimiz monopol Yagi-Uda antenin performansını test edebilmek için Bölüm 3’te üretimi gerçekleştirilen sayısal sinyal tekrarlayıcılar ile açık alanda ölçümler yapılmıştır. Ölçümler Yozgat Spor Vadisi’nde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler dış mekan LOS ve nLOS ölçümlerini içermektedir. Dış mekan LOS ölçümü Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. İmal edilen monopol Yagi-Uda anteni ile LOS dış mekan ölçüm planı

Ölçüm planında görüldüğü gibi verici, alıcı ve sayısal sinyal tekrarlayıcı birbirini görebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Sayısal sinyal tekrarlayıcılar için imal ettiğimiz monopol Yagi-Uda anteni kullanılmıştır. Ölçüm yapılırken performans kriteri olarak saniyede alınan paket sayısı dikkate alınmıştır. İlk ölçüm tekrarlayıcı olmadan gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm ise tek antenli tekrarlayıcı Şekil 5.12'deki plan üzerinde gösterilen yere konulduktan sonra gerçekleştirilmiştir. Son olarak tek antenli tekrarlayıcı yerine çift antenli tekrarlayıcı yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı ölçümün sonucu Tablo 5.5'te gösterilmektedir.

Tablo 5.5. Monopol Yagi-Uda antenli sayısal sinyal tekrarlayıcısının dış mekan LOS ölçüm sonuçları

Tekrarlayıcısız	Tek Antenli Tekrarlayıcı	Çift Antenli Tekrarlayıcı
5	294	625

Dış mekan LOS ölçümünde monopol Yagi-Uda çift antenli sinyal tekrarlayıcının, Bölüm 3’te kullanılan dipol çift antenli sinyal tekrarlayıcıya göre performansının daha yüksek olduğu görülmüştür.

İkinci dış mekan ölçümü ise nLOS ölçümlerini içermektedir. Dış mekan nLOS ölçümü Şekil 5.13’te gösterilmektedir.



Şekil 5.13. İmal edilen monopol Yagi-Uda anteni ile LOS dış mekan ölçüm planı

Ölçüm planında görüldüğü gibi verici ve alıcı istasyonlar arasında engel bulunmaktadır. İmal ettiğimiz sinyal tekrarlayıcı, alıcı ve verici istasyonları görebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Sayısal sinyal tekrarlayıcılarda imal ettiğimiz monopol Yagi-Uda anteni kullanılmıştır. Ölçüm yapılırken performans kriteri olarak saniyede alınan paket sayısı dikkate alınmıştır. İlk ölçüm tekrarlayıcı olmadan gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm ise tek antenli tekrarlayıcı Şekil 5.13’teki plan üzerinde gösterilen yere konulduktan sonra gerçekleştirilmiştir. Son olarak tek antenli tekrarlayıcı yerine çift antenli tekrarlayıcı yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı ölçümün sonucu Tablo 5.6’da gösterilmektedir.

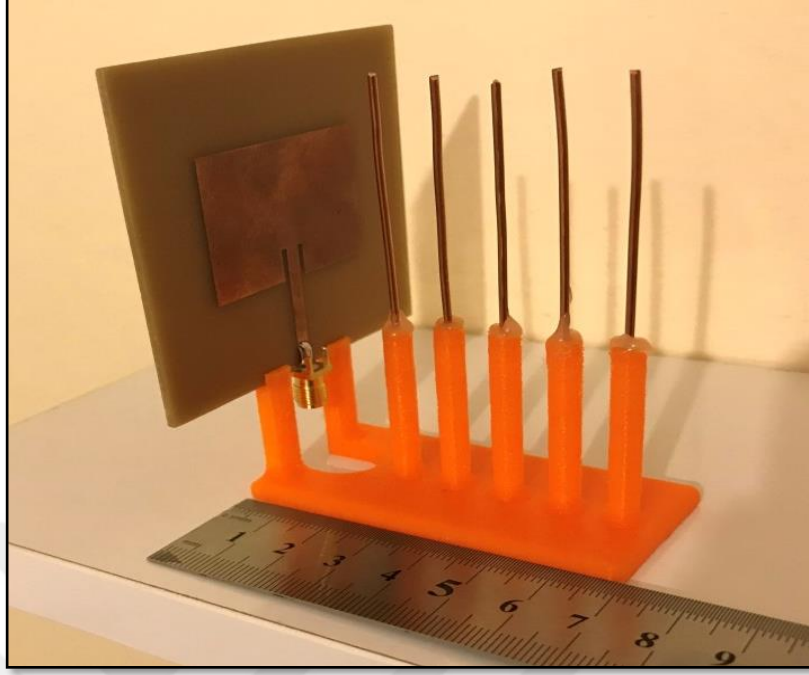
Tablo 5.6. Monopol Yagi-Uda antenli sayısal sinyal tekrarlayıcısının dış mekan nLOS ölçüm sonuçları

Tekrarlayıcı	Tek Antenli Tekrarlayıcı	Çift Antenli Tekrarlayıcı
7	272	422

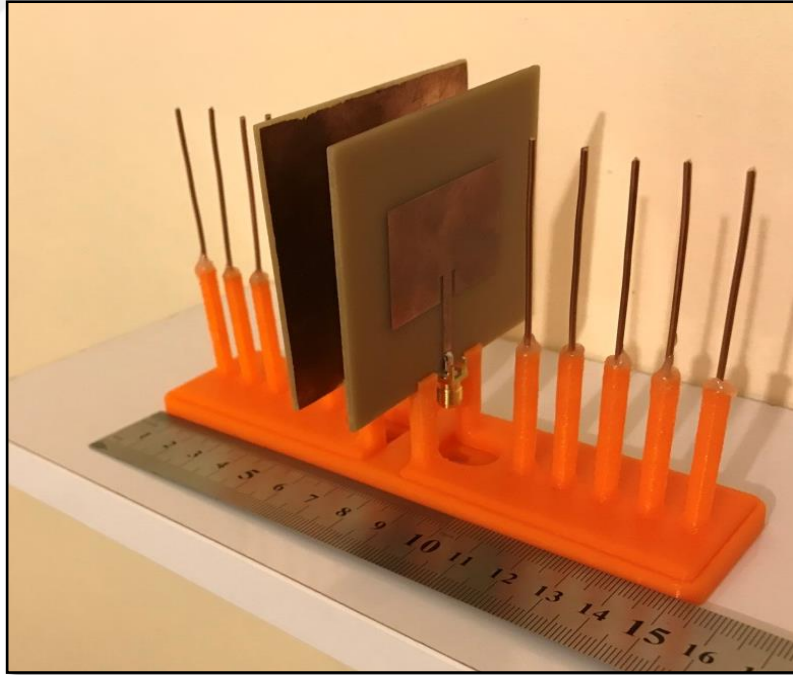
Dış mekan nLOS ölçümünde monopol Yagi – Uda çift antenli sinyal tekrarlayıcısının performansının Bölüm 3’te kullanılan dipol çift antenli sinyal tekrarlayıcıya göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Dış mekanda yapılan her iki ölçümde de görüldüğü üzere monopol Yagi – Uda çift antenli sinyal tekrarlayıcı, Bölüm 3’te kullanılan dipol çift antenli tekrarlayıcıya göre daha iyi performans sergilemiştir. Böylece 2.4 GHz’de iletişim kapsamı daha da genişletilmiştir.

5.4. Yönlü Mikroşerit Anten

Bölüm 3’te tasarlanan çift antenli sayısal sinyal tekrarlayıcıda kullanılmak üzere Bölüm 4’te yönlü mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanıp imal edilen antenin fotoğrafı Resim 5.5’te gösterilmiştir. İmalat 4.2 dielektrik sabitine sahip 1.60 mm kalınlığındaki FR4 taban malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yöneltiler elemanlar ise 1.37 mm çapında bakır tel kullanılarak imal edilmiştir. Üretilen anteni ölçebilmek için 50 ohm SMA konnektör kullanılmıştır. Ölçümler miniVNA Tiny Vector Network Analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Resim 5.6, tasarlanıp imal edilen iki adet yönlü mikroşerit antenin sırt sırta yerleştirilerek sayısal tekrarlayıcı sistemde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiş biçimi gösterilmektedir.

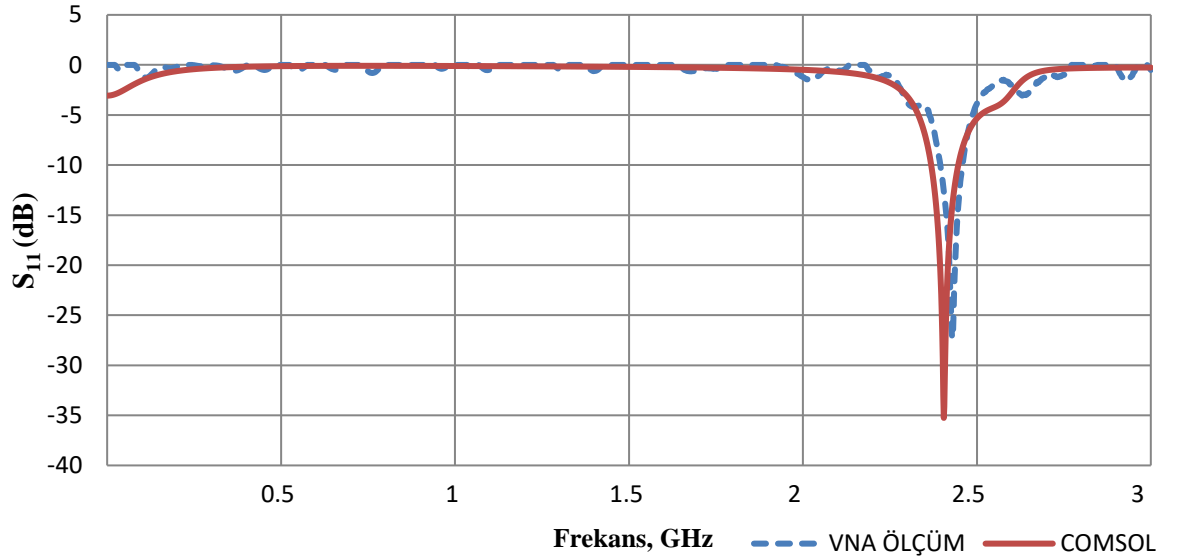


Resim 5.5. İmal edilen yönlü mikroşerit antenin fotoğrafı



Resim 5.6. Çift taraflı haberleşmede kullanılacak yönlü mikroşerit anten sistemi

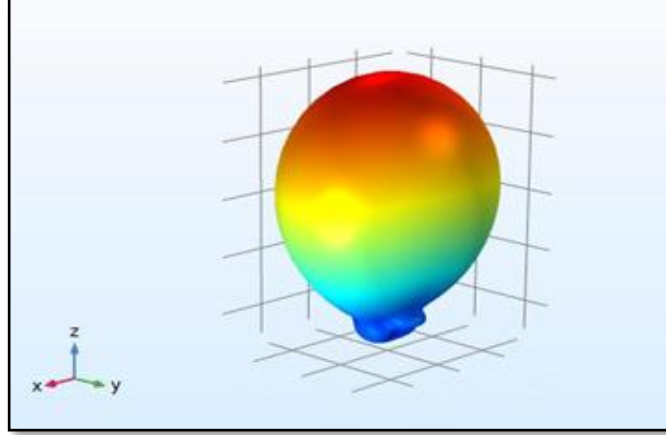
Üretilen antenlere ait ölçüm-simülasyon sonuçları Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Simülasyon sonucuna göre; 2.42 GHz frekansında geri dönüş kaybı 35.879 dB, deney sonucuna göre 2.44 GHz frekansında geri dönüş kaybı 28,391 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.14. Yönlü mikroşerit antene ait ölçüm ve simülasyon S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması

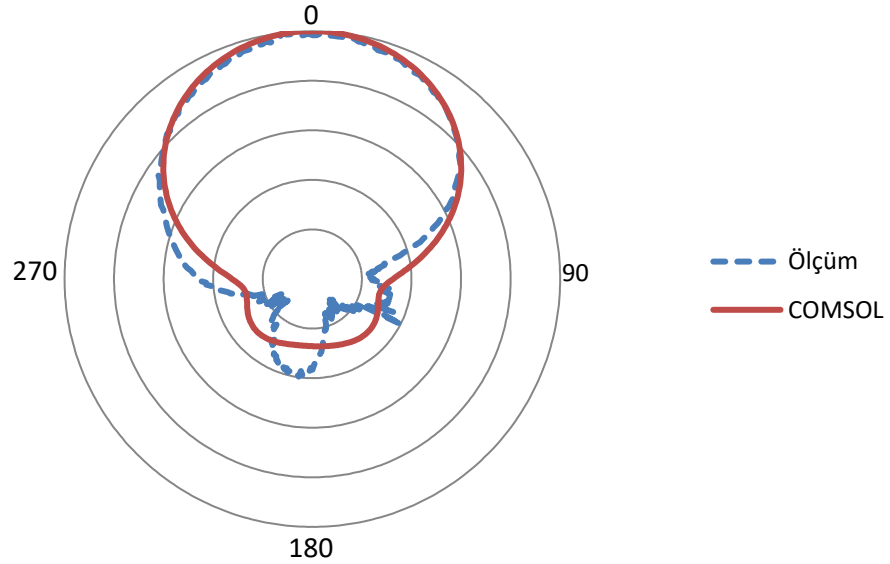
Şekil 5.14'te açıkça görüldüğü üzere ölçüm sonucu ile simülasyon sonucunun çok iyi örtüştüğü görülmektedir.

Tasarlanan mikroşerit antene ait üç boyutlu ışınma grafiği Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Tasarlanan yönlü mikroşerit antenin maksimum yönlülüğü z yönünde olup 9.182 dB değerindedir.



Şekil 5.15. Tasarlanan yönlü mikroşerit antene ait üç boyutlu ışıma grafiği

Bu bölümde, Bölüm 2’de tasarlamış olduğumuz anten ölçüm sisteminde, Bölüm 4’te üretimini gerçekleştirdiğimiz yönlü mikroşerit antenin ışıma örüntüsü ölçülmüştür. Simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Şekilde de gösterildiği gibi ölçüm sonuçları simülasyon sonuçlarına oldukça yakındır. Küçük farklılıkların, ölçümlerin yankısız bir ortamda yapılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.16. İmal edilen yönlü mikroşerit antene ait ışıma örüntüleri

İmal ettiğimiz yönlü mikroşerit antenin performansını test edebilmek için Bölüm 3’te üretimi gerçekleştirilen sayısal sinyal tekrarlayıcılar ile açık alanda ölçümler yapılmıştır.

Ölçümler Yozgat Spor Vadisi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler dış mekan LOS ve nLOS ölçümlerini içermektedir. Dış mekan LOS ölçüm planı Şekil 5.17'de gösterilmektedir.



Şekil 5.17. Yönlü mikroşerit anten ile LOS dış mekan ölçüm planı

Ölçüm planında görüldüğü gibi verici, alıcı ve sayısal sinyal tekrarlayıcı birbirini görebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Sayısal sinyal tekrarlayıcılarda, imal ettiğimiz yönlü mikroşerit anten kullanılmıştır. Ölçüm yapılırken performans kriteri olarak saniyede alınan paket sayısı dikkate alınmıştır. İlk ölçüm tekrarlayıcı olmadan gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm ise tek antenli tekrarlayıcı Şekil 5.17'deki plan üzerinde gösterilen yere konulduktan sonra gerçekleştirilmiştir. Son olarak tek antenli tekrarlayıcı yerine çift antenli tekrarlayıcı yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı ölçümün sonucu Tablo 5.7'de gösterilmektedir.

Tablo 5.7. Yönlü mikroşerit antenli sayısal sinyal tekrarlayıcısının dış mekan LOS ölçüm sonuçları

Tekrarlayıcısız	Tek Antenli Tekrarlayıcı	Çift Antenli Tekrarlayıcı
0	375	761

Dış mekan LOS ölçümünde yönlü mikroşerit antenli sinyal tekrarlayıcının, yönlü Yagi-Uda antenli sinyal tekrarlayıcıya göre performansının daha yüksek olduğu görülmektedir.

İkinci dış mekan ölçümü ise nLOS ölçümlerini içermektedir. Dış mekan nLOS ölçümü Şekil 5.18’de gösterilmektedir.



Şekil 5.18. İmal edilen yönlü mikroşerit anten ile nLOS dış mekan ölçüm planı

Ölçüm planında görüldüğü gibi verici ve alıcı istasyonlar arasında çeşitli engeller bulunmaktadır. İmal ettiğimiz sinyal tekrarlayıcı, alıcı ve verici istasyonları görebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Sayısal sinyal tekrarlayıcılarda imal ettiğimiz yönlü mikroşerit anten kullanılmıştır. Ölçüm yapılırken performans kriteri olarak saniyede alınan paket sayısı dikkate alınmıştır. İlk ölçüm tekrarlayıcı olmadan gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm ise tek antenli tekrarlayıcı Şekil 5.18’deki plan üzerinde gösterilen yere konulduktan sonra gerçekleştirilmiştir. Son olarak tek antenli tekrarlayıcı yerine çift antenli tekrarlayıcı yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı ölçümün sonucu Tablo 5.8’de gösterilmektedir.

Tablo 5.8. Yönlü mikroşerit antenli sayısal sinyal tekrarlayıcısının dış mekan nLOS ölçüm sonuçları

Tekrarlayıcısız	Tek Antenli Tekrarlayıcı	Çift Antenli Tekrarlayıcı
0	380	520

Dış mekan nLOS ölçümünde yönlü mikroşerit antenli sinyal tekrarlayıcısının, monopollü Yagi-Uda antenli sinyal tekrarlayıcıya göre performansının daha yüksek olduğu görülmektedir. Böylece 2.4 GHz’de iletişim kapsamı daha da genişletilmiştir.



BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında sayısal sinyal tekrarlayıcılar için çift taraflı monopol Yagi-Uda ve mikroşerit anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. 2.4 GHz frekansında çalışabilen ve yüksek yönlülüğe sahip olan anten tasarımları ortaya konulmuştur. Tasarım çalışmaları esnasında bir simülatör kullanılmış ve deneysel çalışmalar öncesinde geri dönüş kaybı, merkez frekansı ve yönlülük özelliklerinin en iyi değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda monopol Yagi-Uda anten ve yönlü mikroşerit antenler üretilmiştir. Antenler FR-4 taban malzemesi kullanılarak imal edilmiştir. İmal edilen devrelerin geri dönüş kayıpları Vektör Network Analizör sayesinde ölçülmüştür, simülasyon sonuçlarıyla uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. Böylece antenlerin kapsama alanı artırılmış olup uzak mesafelere veri aktarımı için uygun oldukları sonucuna varılmıştır.

Bu tez kapsamında tasarlanmış olduğumuz anten ölçüm sistemi yardımıyla tasarlanan antenlerin ışınma örüntüleri ölçülmüştür. Ölçülen ışınma örüntüleri ile simülasyon sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. İmal edilen antenlerin performanslarını gerçek bir uygulamada test edebilmek amacıyla sayısal sinyal tekrarlayıcılar kullanılmıştır ve 2.4 GHz de kapsama alanı artırılmıştır. Devre analizörü, ışınma diyagramı ölçümü ve sayısal sinyal tekrarlayıcıları ile gerçekleştirilen testlerin sonuçlarına göre yüksek yönlülüğe sahip anten tasarımlarının başarıyla gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda farklı merkez frekanslarına ve yönlülüğe sahip anten tasarımlarına yer verilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Hristov, H. D., Feick, R., ve Grote, W., “Improving indoor signal coverage by use of through-wall passive repeaters,” *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. 2001 Dig. Held conjunction with Usn. Natl. Radio Sci. Meet.*, 158–161, 2001.
- [2] Huang, Y., Yi, N., ve Zhu, X., “Investigation of using passive repeaters for indoor radio coverage improvement,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, vol. 2, 1623–1626, 2004.
- [3] Lee, Y., Ha, J., ve Choi, J., “Design of a Wideband Indoor Repeater Antenna With High Isolation for 3G Systems,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 697–700, 2010.
- [4] Diaz, E., Grau, A., De Luis, J. R., De Flaviis, F., ve Jofre, L., “Isorefrequency-reconfigurable 8-bit RF repeater,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 1239–1242, 2011.
- [5] Malek, S. A., “Real-Time alpine measurement system using wireless sensor networks,” *Sensors (Switzerland)*, 17(11), 1–30, 2017.
- [6] Mitchell, K., Dang, N., Liu, P., Rao, V. S., ve Pottinger, H. J., “Web-controlled wireless network sensors for structural health monitoring,” in *SPIE’s 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, 2001, 234–244.
- [7] Oh, J., Thiel, M., ve Sarabandi, K., “Wave-propagation management in indoor environments using micro-radio-repeater systems,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 56(2), 76–88, 2014.
- [8] Ali, A., Coustou, A., ve Aubert, H., “Wide band passive repeaters: Design and measurements,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, 2(1), 1–4, 2009.
- [9] Brandissou, J. P., Maes, P., Ongareau, E., Sillon, J. C., ve Wyrwinski, J., “A 30MHz-18GHz Fully automated far-field antenna measurement system,” *1993 IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, 178–182, 1993.
- [10] Taygur, M., Baş, S., Yumrukaya, E., E. Miran, A., ve Günel, S., “Low-cost FPGA based antenna pattern measurement system,” *Int. Conf. Appl. Electron.*,

1–4, 2013.

- [11] Kittiwittayapong, S., Phaebua, K., Sittithai, P., ve Lertwiriyaprapa, T., “Low-cost planar near-field to far-field measurement system for a small antenna,” *13th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol. ECTI-CON*, 1-3,2016.
- [12] Patel, K., Jones, R., ve Elsherbeni, A., “A cost-effective far-field antenna pattern measurement system,” *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, 33(10), 1152–1153, 2018.
- [13] Leach, W. M. ve Paris, D. T., “Probe Compensated Near-Field Measurements on a Cylinder,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 21(4), 435–445, 1973.
- [14] Brown, B. C., Goora, F. G., ve Rouse, C. D., “The design of an economical antenna-gain and radiation-pattern measurement system,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*,53(4),188–200, 2011.
- [15] Junfithrana, A. P., Rahardjo, E. T., ve Zulkifli, F. Y., “Development of automated antenna radiation pattern measurement using rotator application model to increase accuracy,” *3rd Int. Conf. Comput. Eng. Des. ICCED 2017*, 1–5, 2018.
- [16] Rehman, A., “Development of a cost effective antenna radiation pattern measurement setup,” *Mediterr. Microw. Symp.*,1–4, 2017.
- [17] Tarascenko, N. V., “Compact Printed Yagi Antennas with Monopole Driver,” *14th Int. Sci. Conf. Actual Probl. Electron. Instrum. Eng. APEIE 2018 - Proc.*, 289 - 291, 2018.
- [18] Hu, Z., Shen, Z., Wu, W., ve Lu, J., “Low-Profile Top-Hat Monopole Yagi Antenna for End-Fire Radiation,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 63(7), 2851–2857, 2015.
- [19] Jiang, W., Jin, Y., Wang, T., Huang, Y., ve Wang, G., “3-D printed X-band Yagi-Uda antenna,” *IEEE Radio Wirel. Symp. RWS*, 290–292, 2018.
- [20] He, Y., Oakley, C., Chahal, P., Albrecht, J., ve Papapolymerou, J., “Aerosol Jet printed 24 GHz end-fire quasi-Yagi-Uda antenna on a 3-D printed cavity substrate,” *Int. Work. Antenna Technol. Small Antennas, Innov. Struct. Appl.*

iWAT 2017, 179–182, 2017.

- [21] Nascimento, D. C., Schildberg, R., ve Da, J. C., “Low-cost Yagi-Uda monopole array,” *IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Natl. Radio Sci. Meet. APSURSI*, 8–11, 2008.
- [22] Stutzman, W., “*Antenna Theory and Design 3th Ed.*” Wiley, s.848, New York, 2012.
- [23] Howell, J., “Microstrip antennas,” in *1972 Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1972, 177–180.
- [24] Munson, R. E., “Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 74–78, 1974.
- [25] Cheng, Y. ve Sheng, B., “A printed bowtie dipole broadband directional antenna,” *IEEE 6th Asia-Pacific Conf. Antennas Propagation, APCAP 2017 - Proceeding*, 1–3, 2018.
- [26] Emin, B., ve Başbuğ S., “A Low Cost Measurement System for Antenna Radiation Patterns with Logarithmic RF Detector,” *Int. Turkic World Congr. Sci. Eng.*, 800–808, 2019.
- [27] Emin, B., ve Başbuğ S., “Digital Repeater Design for Single Chip Radio Transceiver,” *Int. Turkic World Congr. Sci. Eng.*, 791–799, 2019.
- [28] John, N., “*Antenna Theory: Analysis and Design.*” Wiley, s.478, New York, 2015.
- [29] Çekingen M., “Toprak yüzeyli genişbant mikroşerit anten tasarımı,” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.30-45, İstanbul, 2011.
- [30] Balanis, C. A., “*Antenna Theory.*” Wiley-Interscience, s.1023, USA, 2013.
- [31] Huang, K. B., “*Antennas from theory to practice.*” Wiley-Interscience, s.215, USA, 2008.
- [32] Johnson, H., Richard C., “*Antenna Engineering Handbook.*” , Mc Graw Hill,

s.475-490 1993.

- [33] Güngör, İ., “Frekans seçici yüzeyler kullanarak iki farklı frekansta istenilen ışınım desenlerine sahip reflektör anten tasarımı,” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.23-39, İstanbul, 2012.
- [34] Deschamps ve G. A., “Microstrip Microwave Antennas,” *Proc. Third Symp. USAF Antenna Res. Dev. Program, Oct*, 18(22), 1953.
- [35] Baissinnot, H., Gutton, G., “Flat Aerial for Ultra High Frequencies,” 1955.
- [36] Garg, A. I., Bhartia, P., Bahl, I. J., “Microstrip Antenna Design Handbook,” *Mc Graw Hill*, s.845,2001.
- [37] Yagi, H. ve Uda, S., “Projector of the Sharpest Beam of Electric Waves,” *Proc. Imp. Acad.*, 2(2), 49–52, 1926.
- [38] “Comsol Multiphysics, User’s Manuel, Version 5.4, Comsol Multiphysics Software, USA, June 2018.
- [39] Güler, L., “Comsol Multiphysics ile mikro ejektör tasarımı,” *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.47-53, İzmir, 2012.
- [40] Çetme E., “Yarıklı mikroşerit yama anten dizaynı,” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s47-53, İstanbul, 2009.
- [41] Singh, J., “Inset feed microstrip patch antenna,” *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput. ,IJCSMC 2016*, 5(2), 324–329, 2016.
- [42] İnternet: Nordic Semiconductor Firması “nRF24L01 Datasheet and Product Info”
<https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series>
- [43] İnternet: Analog Devices Firması “AD8318 Datasheet and Product Info ”
<https://www.analog.com/en/products/ad8318.html>
- [44] İnternet: Analog Devices Firması “ADF4351 Datasheet and Product Info ”
<https://www.analog.com/en/products/adf4351.html>

ÖZGEÇMİŞ

Berkay EMİN 24.04.1995 yılında Yozgat'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Yozgat'ta tamamladı. 2013 yılında lisans öğrenimine başladığı Yozgat Bozok Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında fakülte birincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği anabilim dalında tezsiz yüksek lisansa başladı ve başarı ile tamamladı. 2017 yılında Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisansa başladı. Halen ise mühendislik çalışmalarına devam etmektedir.

Tel: +90 536 512 17 71

e-posta : berkayeminn@gmail.com

Yayınlar:

1. Emin B. ve Başbuğ, S., "A Low Cost Measurement System for Antenna Radiation Patterns with Logarithmic RF Detector", *Int. Turkic World Congr. Sci. Eng.*, 800–808, 2019.
2. Emin B. ve Başbuğ, S., "Digital Repeater Design for Single Chip Radio Transceiver", *Int. Turkic World Congr. Sci. Eng.*, 791–799, 2019.
3. Emin B. ve Başbuğ, S., "Anten Dizilerinin Optimizasyonu için NEC2 Tabanlı Bir Tasarım Metodu" , *ELECO*, 563-567,2018.