



T.C.

DOĞUŞ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM

DALI

**QO-100 UYDUSU İLE ÇİFT YÖNLÜ HABERLEŞME  
SAĞLAYACAK SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan

**ÖMER OSMAN POLAT**

İstanbul, 2024



T.C.

DOĞUŞ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM

DALI

**QO-100 UYDUSU İLE ÇİFT YÖNLÜ HABERLEŞME  
SAĞLAYACAK SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan

**ÖMER OSMAN POLAT**

**202191028003**

**0009-0005-3137-1626**

Danışman

**Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül PEKMEZCİ**

İstanbul, 2024

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “ QO-100 UYDUSU İLE ÇİFT YÖNLÜ HABERLEŞME SAĞLAYACAK SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ ” başlıklı bu çalışmamın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullanıldıkları her eserin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını, patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

Ömer Osman Polat

09.10.2024



## YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV TUTANAĞI

|                 |           |
|-----------------|-----------|
| Doküman No      | FR.1.26   |
| Yürürlük Tarihi | 1.11.2017 |
| Revizyon Tarihi | 4.12.2020 |
| Revizyon No     | 2         |
| Sayfa           | 1 / 1     |

### LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Tarih : 09.10/2024

Anabilim/Anasanat Dalı : Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Öğrencinin Adı Soyadı : Ömer Osman Polat

Öğrenci No : 202191028003

Tez Danışmanının Adı Soyadı : Dr. Öğretim Üyesi Ayşegül Pekmezci

İkinci Tez Danışmanının Adı Soyadı : .....

Tezin Başlığı : QO-100 UYDUSU İLE ÇİFT YÖNLÜ HABERLEŞME  
SAĞLAYACAK SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ

Doğuş Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin 32.Maddesi uyarınca  
yapılan değerlendirmeler sonunda;



tezin kabul  
edilmesine



tezde düzeltme  
verilmesine



tezin  
reddedilmesine

oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile karar verilmiştir. Gereği için arz olunur.

**Danışman Üye**

Dr. Öğretim Üyesi Ayşegül Pekmezci

**Üye**

Prof. Dr. Çağatay ULUIŞIK

**Üye**

Doç.Dr. Lida Kouhalvandi

**Üye**

**Anabilim/Anasanat Dalı Başkanı Onayı: Prof. Dr. Şahram MİNAYİ**

Doğuş Üniversitesi ("Üniversite") olarak kişisel verilerinizin güvenliği hakkında azami hassasiyet göstermekteyiz. Üniversite olarak, Üniversite ile ilişkili tüm şahıslara ait her türlü kişisel verinin 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu ("KVK K.")'na uygun olarak işlenmesine ve gizliliğinin sağlanmasına büyük önem vermekteyiz. Anayasal m.20/3 ile tanımlanan "kişisel verilerinizin korunmasını isteme" hakkınızın bilincinde olarak, KVK K. kapsamında tanımlı "Veri Sorumlusu" sıfatıyla, kişisel verilerinizi mevzuata uygun şekilde işlemekteyiz. Daha geniş açıklama için Doğuş Üniversitesi <https://www.dogus.edu.tr/hakkimizda/kisisel-verilerin-korunmasi>

As Doğuş University ("University"), we show maximum sensitivity about the security of your personal data. As a university, we attach great importance to the processing and confidentiality of all personal data of all individuals associated with the University in accordance with the Law No. 6698 on Protection of Personal Data ("KVK K."). Being aware of your right to "ask for the protection of your personal data" recognized by the constitution article 20/3, as "Data Controller" defined within the scope of KVK K., we process your personal data in accordance with the legislation. For a broader explanation you can visit <https://www.dogus.edu.tr/hakkimizda/kisisel-verilerin-korunmasi>

hakkımızda: about us kişisel-verilerin-korunmasi: protection of personal data

(Form No: FR-001, Revizyon Tarihi:30.09.2016, Revizyon No:00)

Adı ve Soyadı : Ömer Osman POLAT  
Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül PEKMEZCİ  
Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans Tezi / 09.10.2024  
Alan : Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği  
Anahtar Kelimeler : QO-100, Es'hail 2, Uydu Haberleşmesi, Anten Tasarımı, Mikroşerit Anten

## ÖZET

### QO-100 UYDUSU İLE ÇİFT YÖNLÜ HABERLEŞME SAĞLAYACAK SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ

Es'hail 2 / QO-100 (Qatar-OSCAR 100) uydusu sabit yörüngede  $26^\circ$  Doğu'ya yerleştirilen ve üzerinde amatör radyo hizmetlerinde kullanılmak üzere yukarı gönderme (uplink) frekansı 2.4 GHz, dinleme frekansı (downlink) ise 10.45 GHz olan iki adet doğrusal transponder bulunan bir yer sabit uydusudur. Düşük güçlü 250 kHz bant genişliğindeki (dar bant) transponder üzerinden ses, mors ve dijital iletişimi, 8 MHz bant genişliğindeki (geniş bant) transponder üzerinden ise amatör Dijital Video Yayını (DVB) gerçekleştirilebilmektedir.

Uydu üzerinden sinyal alımı için uydu anteninin üzerinde bulunan LNB (Low Noise Block)'nin çıkışına bir bias tee devresi ve bu devrenin çıkışına Rx alıcısı yerleştirmek yeterli olurken sinyal iletimi için, Tx verici ile birlikte LNB'nin ön kısmına uygun frekansta çalışabilecek bir Tx anten monte edilmelidir. Böylece, LNB ve Tx antenini birlikte monte ederek aynı uydu çanağı hem alım hem de iletim için kullanılabilir.

Bu tez kapsamında, Es'hail 2 / QO-100 uydusu üzerinde bulunan dar bant transponder'i kullanılarak sinyal iletimi yapılmıştır. Sinyal iletimi için gereken Tx anteni olarak 2.4 GHz frekansında çalışacak mikroşerit anten tasarlanıp üretimi yapılmıştır. Tasarlanan bu anten çanak antenin üzerindeki LNB'nin önüne monte edilerek sinyal iletiminin sağlanması planlanmaktadır. Uydu ile haberleşme sağlandıktan sonra, alınan ve iletilen sinyalleri hem alıcı hem verici olarak kullanılan yazılım tanımlı radyo alıcısı (SDR) ile gözlemleyerek sinyalin çift yönlü iletiminin gerçekleşip gerçekleşmediği gözlemlenecektir.

Bu tez çalışması ile, QO-100 uydusunun doğal afet anlarında kesintiye uğrayan haberleşme ağlarına (cep telefonu, internet vb.) alternatif olarak acil durumlarda sesli görüşmelerin yapılabileceği bir haberleşme sistemi olarak kullanılması hedeflenmiştir.

Name and Surname : Ömer Osman POLAT  
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ayşegül PEKMEZCİ  
Degree and Date : Master's Thesis / 09.10.2024  
Major : Electronics and Communication Engineering  
Key Words : QO-100, Es'hail 2, Satellite Communication, Antenna Design,  
Microstrip Antenna

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND ANALYSIS OF A SYSTEM FOR TWO-WAY COMMUNICATION VIA THE QO-100 SATELLITE**

Es'hail 2 / QO-100 (Qatar-OSCAR 100) satellite is a geostationary satellite positioned at 26° East and has two linear transponders with an uplink frequency of 2.4 GHz and a downlink frequency of 10.45 GHz for amateur radio services. The narrowband transponder with a low power 250 kHz bandwidth supports voice, Morse, and digital communication, while the wideband transponder with an 8 MHz bandwidth supports amateur Digital Video Broadcasting (DVB).

To receive signals via the satellite, it is sufficient to place a bias tee circuit at the output of the LNB (Low Noise Block) on satellite dish followed by an Rx receiver at the output of this circuit. For signal transmission, a Tx antenna operating at an appropriate frequency must be mounted in front of the LNB along with the Tx transmitter. Thus, by mounting the LNB and Tx antenna together, the same satellite dish antenna can be used for both reception and transmission.

Within the scope of this thesis, signal transmission was achieved using the narrowband transponder on the Es'hail 2/QO-100 satellite. A microstrip antenna operating at 2.4 GHz was designed and manufactured as the Tx antenna required for signal transmission. It is planned to mount this designed antenna in front of the LNB on satellite dish antenna to ensure signal transmission. After the communication with satellite is established, it will be observed via the software-defined radio receiver (SDR) used as both receiver and transmitter whether the two-way transmission of signal is achieved.

The goal of this thesis is to utilize the QO-100 satellite as an alternative communication system for voice calls in emergencies when conventional communication networks (such as mobile phones, internet, etc.) are disrupted during natural disasters.

## İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

### ÖZET

### ABSTRACT

|                        |     |
|------------------------|-----|
| TABLolar LİSTESİ ..... | iii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ ..... | iv  |
| KISALTMALAR .....      | vi  |
| GİRİŞ .....            | 1   |

## BİRİNCİ BÖLÜM

### UYDULAR

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1.1. Uydular .....               | 5 |
| 1.2. Yörüngeler .....            | 6 |
| 1.3. Kullanılan Yörüngeler ..... | 7 |
| 1.4. QO-100 Uydusu .....         | 9 |

## İKİNCİ BÖLÜM

### HABERLEŞME DONANIMLARI

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 2.1. Uydu Haberleşme Sistemi Temel Blokları ..... | 12 |
| 2.2. Downlink Blok Diyagram .....                 | 14 |
| 2.2.1. Çanak Antenler .....                       | 15 |
| 2.2.2. SDR .....                                  | 15 |
| 2.2.3. Bias Tee .....                             | 16 |
| 2.2.4. LNB .....                                  | 17 |
| 2.3. Uplink Blok Diyagram .....                   | 18 |
| 2.4. Tüm Sistemin Yapısı .....                    | 19 |

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### YER İSTASYONU PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| 3.1. Anten Bakış Açılarının Hesaplanması ..... | 20 |
|------------------------------------------------|----|

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 3.2. Uydu ve Yer İstasyonu Arasındaki Mesafe .....  | 23 |
| 3.3. Anten Eğim Açısı (Tilt Angle) .....            | 24 |
| 3.4. Polarizasyon Eğim Açısı (LNB Tilt Angle) ..... | 25 |
| 3.5. Yayılım Zaman Gecikmesi .....                  | 26 |

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1. Giriş .....                                                              | 28        |
| 4.2. Antenlerin Temel Prensipleri.....                                        | 28        |
| 4.2.1. Yayılım (Işıma) Örüntüsü.....                                          | 28        |
| 4.2.2. Yönlülük .....                                                         | 29        |
| 4.2.3. Anten Verimliliği.....                                                 | 29        |
| 4.2.4. Anten Kazancı .....                                                    | 29        |
| 4.2.5. Polarizasyon.....                                                      | 29        |
| 4.2.6. Bant Genişliği .....                                                   | 30        |
| 4.2.7. Gerilim Duran Dalga Oranı (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)<br>..... | 30        |
| 4.3. Mikroşerit Antenler .....                                                | 31        |
| 4.3.1. Mikroşerit Antenlerin Şekil ve Boyut Özellikleri .....                 | 31        |
| 4.3.2. Mikroşerit Anten Besleme Yöntemleri.....                               | 32        |
| 4.4. Anten İhtiyacı .....                                                     | 33        |
| 4.5. Antenin Tasarlanması ve Analizi.....                                     | 37        |
| 4.5.1. Prototip 1 .....                                                       | 37        |
| 4.5.2. Prototip 2 .....                                                       | 40        |
| 4.5.3. Prototip 3 .....                                                       | 42        |
| 4.6. Tasarlanan Antenin Sonuçlarının Kıyaslanması.....                        | 45        |
| 4.7. Tasarlanan Antenin Üretilmesi .....                                      | 47        |
| 4.8. Tasarlanan Antenin Gerçek Ortamda Test Edilmesi .....                    | 50        |
| <b>SONUÇ .....</b>                                                            | <b>55</b> |
| <b>KAYNAKÇA.....</b>                                                          | <b>56</b> |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                              | Sayfa No. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| tablo 1. Qo-100 Uydusu Frekans Bantlarının Kullanım Alanları .....                                           | 11        |
| Tablo 2. Yer İstasyonunun Ve Uydunun Bulunduğu Konuma Göre Azimut Açısının Belirlenmesi .....                | 23        |
| Tablo 3. Qo-100 Uydusunun Özellikleri Ve Yer İstasyonundaki Anten İçin Ayarlama Açılarının Hesaplanması..... | 27        |
| Tablo 4. Prototip 1'e Ait Ölçüler.....                                                                       | 38        |
| Tablo 5. Prototip 1'e Ait Minimum $S_{11}$ Ve Swr Değerleri.....                                             | 39        |
| Tablo 6. Prototip 2'ye Ait Ölçüler.....                                                                      | 40        |
| Tablo 7. Prototip 2'ye Ait Minimum $S_{11}$ Ve Swr Değerleri.....                                            | 42        |
| Tablo 8. Prototip 3'e Ait Ölçüler.....                                                                       | 43        |
| Tablo 9. Prototip 3'e Ait Minimum $S_{11}$ Ve Swr Değerleri.....                                             | 44        |
| Tablo 10. Tasarlanan Prototiplerin 2.4 Ghz'te $S_{11}$ Değerlerinin .....                                    | 46        |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                    | Sayfa No. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Şekil 1. Dar Bant Transponder Bant Planı.....                                                      | 10        |
| Şekil 2. Uydu Haberleşmesi Sistemi Temel Blok Şeması .....                                         | 12        |
| Şekil 3. Downlink Blok Diyagram .....                                                              | 14        |
| Şekil 4. Bias Tee Devresi İçin a) Sinyalin Geçmediği Durum ve b) Voltajın Geçmediği Durum .....    | 17        |
| Şekil 5. Uplink Blok Diyagram .....                                                                | 18        |
| Şekil 6. Uplink ve Downlink Blok Diyagramı .....                                                   | 19        |
| Şekil 7. GEO Uydusu İçin Anten Bakış Açıları .....                                                 | 21        |
| Şekil 8. Yer İstasyonunun ve Uydunun Bulunduğu Konuma Göre Azimut Açısı Koşulları.....             | 22        |
| Şekil 9. Yer İstasyonundan Uyduya Olan Mesafenin Gösterimi.....                                    | 23        |
| Şekil 10. Kutupsal Montajlı Antenin İçin (a) Görüş Açısı Gösterimi, (b) Eğim Açısı Gösterimi ..... | 24        |
| Şekil 11. LNB Anten Yapısı.....                                                                    | 34        |
| Şekil 12. LNB Blok Diyagramı .....                                                                 | 34        |
| Şekil 13. LNB Önündeki Yama Anten .....                                                            | 35        |
| Şekil 14. Prototip 1'e Ait Anten Tasarımı .....                                                    | 37        |
| Şekil 15. Prototip 1'e Ait $S_{11}$ Grafiği.....                                                   | 38        |
| Şekil 16. Prototip 1'e Ait SWR Grafiği.....                                                        | 39        |
| Şekil 17. Prototip 2'ye Ait Anten Tasarımı .....                                                   | 40        |
| Şekil 18. Prototip 2'ye Ait $S_{11}$ Grafiği.....                                                  | 41        |
| Şekil 19. Prototip 2'ye Ait SWR Grafiği.....                                                       | 41        |
| Şekil 20. Prototip 3'e Ait Anten Tasarımı .....                                                    | 42        |
| Şekil 21. Prototip 3'e Ait $S_{11}$ Grafiği.....                                                   | 43        |
| Şekil 22. Prototip 3'e Ait SWR Grafiği.....                                                        | 44        |
| Şekil 23. Prototip 3'e Ait 2D Pattern .....                                                        | 45        |
| Şekil 24. Tasarlanan Prototiplerin $S_{11}$ Değerlerinin Karşılaştırılması .....                   | 46        |
| Şekil 25. Transfer Kâğıdı Kullanarak Ütü İle Plakete Basılması .....                               | 47        |
| Şekil 26. Plaket Üzerinde İstenilen Alana Baskı Yapılması.....                                     | 47        |
| Şekil 27. Plaketin Asit Karışımına Batırılması .....                                               | 48        |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 28. Asit İşlemi Sonrası Plaketin Temizlenmesi.....                                                                       | 48 |
| Şekil 29. Plaketin (a) Önden Görünüş (b) Arkadan Görünüş .....                                                                 | 49 |
| Şekil 30. Antenin LNB'nin Önüne Takılması (a) Önden Görünüş, (b) Arkadan Görünüş .....                                         | 49 |
| Şekil 31. (a) Offset Çanak Antenin Kurulumu, (b) Koruma Kutusunun Takılması..                                                  | 50 |
| Şekil 32. Kutunun İçine Sistemin Kurulumu.....                                                                                 | 51 |
| Şekil 33. Voltaj Dağıtımı ve Bias Tee Bağlantısı.....                                                                          | 52 |
| Şekil 34. Tx Antenin Kablo Bağlantısı (a) Arkadan Görünüş (b) Yandan Görünüş .                                                 | 52 |
| Şekil 35. SDR Console Programı Üzerinde Frekansın Ayarlanması ve Tx Yapılması .....                                            | 53 |
| Şekil 36. Web SDR Üzerinde (a) Gelen Tüm Sinyallerin Görüntülenmesi, (b) Gönderilen Sinyalin Karşılığının Görüntülenmesi ..... | 54 |

## KISALTMALAR

|             |                          |
|-------------|--------------------------|
| <b>DC:</b>  | Direct Current           |
| <b>DVB:</b> | Digital Video Band       |
| <b>ESA:</b> | European Space Agency    |
| <b>GEO:</b> | Geosynchronous Satellite |
| <b>LEO:</b> | Low Earth Orbit          |
| <b>LNB:</b> | Low Noise Block          |
| <b>MEO:</b> | Medium Earth orbit       |
| <b>RF:</b>  | Radio frequency          |
| <b>Rx:</b>  | Receive                  |
| <b>SDR:</b> | Software Defined Radio   |
| <b>SHF:</b> | Super High Frequency     |
| <b>SOS:</b> | Save Our Souls           |
| <b>TV:</b>  | Television               |
| <b>Tx:</b>  | Transmit                 |

## GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan itibaren haberleşme ihtiyacı hissetmiş ve bunun için çok sayıda farklı haberleşme yöntemleri geliştirmiştir. Her ne kadar farklı haberleşme yöntemleri kullanılsa da haberleşmenin temelinde farklı formlardaki bilginin bir noktadan (verici) diğer bir noktaya (alıcı) herhangi bir iletim ortamı aracılığıyla iletilmesi yatar. Geçmişten günümüze kadar, çok farklı türde ve sayıda haberleşme çeşitleri kullanılmış olsa da teknolojinin gelişimiyle bu çeşitlilik artmaya devam etmektedir.

Örneğin ilk zamanlardaki haberleşme, belirli bir mesafede bulunan insanlar arasında duman, ateş veya sesin çeşitli yöntemler kullanarak iletimiyle sağlanmaktaydı. Ancak, elektriğin keşfi ve kullanımının yaygınlaşmasıyla farklı yöntemler gelişmeye başladı ve böylece bilginin çok daha uzak mesafelere (kıtalar arası hatta gezenler arası) taşınabilmesi-iletilmesi mümkün oldu.

İlk bilgi akışı, Mors kodları ile bilginin elektriksel olarak iletilmesiyle gerçekleşti. Elektriğin yaygınlaşmasıyla birlikte 1800'lü yılların başında telgraf ve telefon, 1900'lü yıllarda ise radyo haberleşmesi yapılmaya başlandı [1].

Haberleşme sistemleri, istenilen iletişim türüne göre tasarlanır. Değişik iletişim türlerine şu örnekler verilebilir: (a) Birbirinden uzakta A ve B kişileri birbirlerine mesaj göndermek isterlerse, hat adı verilen bir bilgi aktarım kablosu kullanılabilir. (b) Eğer birbirleri ile iletişim kurmak isteyen birçok kişi varsa, bir ya da birkaç merkezi anahtarlama istasyonu bulunan bir telefon sistemi kullanılabilir. (c) Kısa uzaklıklar içinde birbirlerine bilgi iletme isteyen az sayıda kullanıcı varsa ve bunlar sürekli yer değiştiriyorlarsa, alıcı-verici olarak da adlandırılan bir çeşit radyo iletişimi gereklidir. (d) Çok sayıda kullanıcıya bilgi göndermek isteyen tek bir kaynak varsa, bir radyo ya da TV vericisi kullanılabilir. Bu durumda, haberleşme sistemi tek bir kaynak ve çok sayıda alıcıdan oluşur [2]. Temelde bu yöntemler aynı kalsa da yeni teknolojiler eklenerek kullanılmaya devam edilmiştir.

Günümüzde teknolojinin gelişimiyle popüler hale gelen haberleşme yöntemlerinden biri olarak kablosuz haberleşmeyi örnek gösterebiliriz. Birçok alanda

tercih edilen kablosuz haberleşmenin kullanıldığı bir diğer alan ise uydu haberleşmesidir.

Uydu haberleşmesi, yer istasyonları arasında veri iletimi sağlamak için insan yapımı yapay uyduların kullanıldığı bir teknolojidir. Bu sistem, alçak yörüngeden jeosenkron yörüngeye kadar farklı yüksekliklerdeki uydular aracılığıyla çalışır. Televizyon yayınları, telefon görüşmeleri, internet erişimi, askeri ve hava trafiği kontrolü gibi birçok alanda kullanılır.

Geniş kapsama alanları sayesinde geniş coğrafi bölgelere hizmet verebilen uydu haberleşme sistemleri, altyapının yetersiz veya eksik olduğu bölgelerde avantaj sağlar. Ayrıca, doğal afetler veya acil durumlarda karasal iletişim ağlarının zarar görmesi durumunda kritik bir rol oynar.

Yapay uydu fikri, 1957 yılında SPUTNIK-1'in fırlatılmasıyla hayata geçti. Bu dönemde uydu haberleşmesinin getirdiği kolaylıklar ve ekonomik kazançlar dikkat çekmiş, araştırma ve geliştirme faaliyetlerine verilen önem artmıştır. Gerçek anlamda ilk aktif uydu olan Explorer-1, 1958 yılında NASA'nın SCORE projesi kapsamında yörüngeye yerleştirilmiştir. Başlangıçta askeri amaçlı kullanılan bu uydular, ticari uydu haberleşmesinin de öncüsü olmuştur [2].

1960'ların başında uyduların güvenilirliği sınırlıydı ve veri kullanımı tam anlamıyla gerçekleştirilemiyordu. Ancak, 1963 yılında uyduların üç eksende kontrol edilebilmesi ve yüzeylerinin sabit tutulabilmesi ile veri kullanımı cazip hale gelmiştir.

1964 yılına kadar AT&T'nin iki TELSTAR, iki RELAY ve iki SYNCOM uydusu orta yörüngede (yaklaşık 5.600 km) faaliyet göstermekteydi. 1965 yılında COMSAT firmasının ilk uydusu EARLYBIRD, ABD'deki Cape Caneveral üssünden GEO yörüngesine fırlatılmıştır. Bu gelişme, küresel uydu haberleşme çağının başlangıcı olarak kabul edilir. Avrupa'da İngiltere, Fransa ve Almanya gibi ülkelerde yer istasyonları kurulmuş ve 19 ülkenin katılımıyla, 20 Ağustos 1964 tarihinde INTELSAT (Uluslararası Haberleşme Uyduları Organizasyonu) adıyla en büyük ve kapsamlı uydu organizasyonu kurulmuştur. INTELSAT bugün 52 haberleşme uydusundan oluşan bir filo işletmekte ve TV yayıncılığı, data ve haberleşme hizmeti vermektedir [3].

Avrupa’da TV yayıncılığı, data ve haberleşme hizmetleri için 1977 yılında Avrupa Uydu Haberleşme Organizasyonu (EUTELSAT) kurulmuştur. EUTELSAT, Avrupa, Orta Doğu ve Kuzey Afrika kıtalarına hizmet sunmaktadır ve bugün 39 uydu ile faaliyet göstermektedir. 1979 yılında, yeni nesil uyduları ve 35 ülkede kurulu olan 50 kıyı yer istasyonu üzerinden mobil iletişim servisi veren Birleşmiş Milletler Uluslararası Denizcilik Organizasyonu (INMARSAT) kurulmuştur. INMARSAT, gemicilik, uçak endüstrisi, deniz aşırı ve karasal mobil endüstrilere telefon, teleks, data ve faks gibi hizmetler sağlayan uluslararası bir uydu konsorsiyumudur. Ayrıca, mobil terminallere, deniz ve hava araçlarına internet, elektronik posta, kısa mesaj ve acil durum çağrı (SOS) hizmetleri sunmaktadır [4].

Uydu teknolojisi alanındaki son gelişmelerle birlikte günümüze kadar çeşitli uygulamalar için birçok uydu fırlatılmıştır. Görece yakın bir tarihte amatör radyo uygulaması için fırlatılmış bu uydulardan biri ise Es'hail 2 uydusudur. Bu uydu, aynı zamanda Qatar-OSCAR 100 veya QO-100 olarak da bilinen, 15 Kasım 2018'de SpaceX Falcon 9 roketi ile fırlatılan Katar’a ait bir uydudur. Bu uydu, Japonya’da Mitsubishi Electric şirketi tarafından inşa edilmiş olup, 26° Doğu boylamında yersabit (GEO) bir yörüngede konumlanmıştır. Es'hail 2, Orta Doğu ve Kuzey Afrika bölgesine doğrudan eve televizyon hizmetleri sunmayı amaçlamaktadır. Es'hail 2 / QO-100 (Qatar-OSCAR 100) uydusu televizyon, hükümet hizmetleri ve ticari içerik dağıtımı için doğrudan yayın hizmetleri sağlamak üzere tasarlanmış 24 adet Ku-bandı ve 11 adet Ka-bandı transponderine sahiptir. Ticari hizmetlerin yanı sıra, dünya çapında amatör telsizcilerin haberleşmesi için kullanılan bu uyduda 250 kHz bant genişliğindeki (dar bant) transponder üzerinden ses, mors ve dijital iletişimi, 8 MHz bant genişliğindeki (geniş bant) transponder üzerinden ise amatör Dijital Video Yayını (DVB) gerçekleştirilebilecek uplink için 2.4 GHz ve downlink için 10.45 GHz frekanslarında çalışan 2 adet doğrusal transponder bulunmaktadır [5]. Dolayısıyla, bu çok yönlü uydu sadece ticari ve hükümet hizmetleri sunmakla kalmayıp, amatör radyo operatörleri için de önemli bir kaynak teşkil etmektedir. Öyle ki, konuyla yakından ilgilenen bir takım proje toplulukları ve grupları amatör telsizcilik aktivitesi kapsamında zaman zaman Eshail’2 uydusu ile haberleşme etkinlikleri düzenlemektedir [6-7].

Literatürde ise bu uydu ile ilgili olarak sınırlı sayıda çalışma bulunmakta ve çoğu sadece anten tasarımını içermektedir [8-12]. Chandan vd. [8] yayımladığı çalışmada Es'hail 2 uydusu için yer istasyonu düzeneğinin kurulumunu incelemiş ancak burada çift yönlü ses iletimi için POTY anten kullanmıştır. Bu tezde ise Eshail'2 uydusu ile haberleşmeyi sağlayacak yer istasyonu düzeneğinin kurulumu için gerekli prosedürler ve hesaplamalar detaylı olarak anlatılmış ve çift yönlü sinyal iletimi için 2.4 GHz'te çalışacak bir mikroşerit anten tasarımı ile literatüre katkı sağlanmıştır.

Tezin ilk bölümünde uydular ve yörüngeleri hakkında temel bilgileri sunulmakla beraber Es'hail 2 uydusu hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bölüm 2'de ise Uydu haberleşme sistemlerindeki temel blokları ve uydu haberleşme sisteminin kurulumu basitçe anlatılmaktadır. Bir sonraki bölümde yer istasyonunun kurulumu esnasında gereken parametreler ve hesaplamaları verilmiştir. Bölüm 4'te mikroşerit antenlerden kısaca bahsedilerek çift yönlü iletişimi sağlayacak mikroşerit anten tasarımı anlatılmış ve elde edilen farklı prototipteki antenler karşılaştırılarak en uygun antenin seçilmesiyle sistem gerçek ortamda test edilmiştir. Son bölümde ise yapılan çalışma değerlendirilerek gelecekte yapılabilecek çalışmalar önerilmiştir.

## BİRİNCİ BÖLÜM

### UYDULAR

Bu bölümde, uydular hakkında kısaca bilgi verilmiş ve uydu haberleşmesi esnasında kullanılan yörüngeler tanıtılmıştır. Bölümün sonunda çift yönlü haberleşme sağlanacak olan Es'hail 2 uydusu hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

#### 1.1. Uydular

Uydu, gökbilim alanında bir gezegenin çekiminde kalarak onun etrafında dolaşan daha küçük gezegen olarak tanımlanır. Bu tipteki doğal uyduların en bilinen örneği ise dünyanın çevresinde belli bir dönüş eksenini etrafında dönen Ay'dır. Haberleşmede ise uydular, insanlar tarafından geliştirilerek bir roket aracılığıyla fırlatılıp dünya yörüngesine yerleştirilen cihazlar olarak tanımlanır. Bu uydular kablolu alıcı ve vericiye sahip yapay uydulardır.

17. yüzyılda Galileo Galilei, Jüpiter'in etrafındaki uyduları el yapımı teleskobuyla gözlemleyebilmişti. Bu gözlemi neticesinde gezegenlerin güneşin etrafını çevrelemesinin yanı sıra gezegenlerin de etrafını çevreleyen uyduların olduğunu fark etti. Ancak, insanoğlunun ilk yapay uydu fikri İngiliz bilim insanı Arthur C. Clarke tarafından 1945 yılında "Wireless World" dergisinde yayınladığı makalesinde ortaya atılmış oldu [13]. Clarke, bu makalesinde yaklaşık 42000 km yarıçaplı dairesel bir ekvator yörüngesinde bulunan uydunun dünya ile eşleşen bir açısal hıza sahip olacağını ve böylece dünyanın yüzeyindeki sabit bir nokta üzerinde hareketsiz görüneceğini gözlemlemiştir.

İletişim için ya birbirini gören iki noktaya ya da bu iki noktayı birden görebilen üçüncü bir noktaya ihtiyaç vardır. Dolayısıyla, Clarke'ın bahsettiği böyle bir yörüngedeki yapay uydu, iletişim için üçüncü bir nokta gibi davranıp uydunun görüş alanı içindeki dünyanın herhangi bir yerinden yine uydunun görüş alanı içindeki dünya yüzeyinde bulunan herhangi bir yere sinyal gönderebilir ve alabilir. Yeryüzünün dairesel bir yapıda olması, binalar, dağlar, vb. fiziksel engeller bu iki noktanın doğrudan birbirini görmesini engellemektedir. Bu sebeple, sürekli artan mesafeler, fiziksel engeller ve hatta kapasitenin mümkün olan en düşük maliyetle sağlanabilmesi

için haberleşme ve teknoloji alanındaki gelişmelerin sonucunda uydu haberleşmesi ortaya çıkmıştır.

Böylece, Dünya yörüngesine 1957 yılında fırlatılan ilk yapay uydu olan Sputnik 1 ile uzay çağı başlamış olup, sonraki yıllardan günümüze kadar binlerce uydu Dünya'dan fırlatılmıştır [14].

Fırlatılan bu uydular özellikle haberleşme, uzaydan algılama, görüntüleme, konum belirleme, meteorolojik olayların gözlemlenmesi gibi çeşitli alanlarda faaliyet göstermektedirler. Dolayısıyla gerçekleştirdikleri görevlere göre ve konumlandırıldıkları yörüngeye göre sınıflandırılırlar.

## **1.2. Yörüngeler**

Uyduların fırlatıldıktan sonra belirli ve kontrollü dönme hareketini izlediği yola yörünge denmektedir. Fırlatılan tüm iletişim uydularının görevlerini başarılı bir şekilde yerine getirmesinin en önemli koşulu uygun bir yörüngeye yerleştirilmesidir.

Uyduların uygun yörüngelere yerleştirilmesi, uydu üzerinden verilecek hizmetin kapsama alanı ve operasyonel özelliklerinin belirlenmesi konusunda önemli rol oynamaktadır.

Uydu yörüngelerinin belirlenmesi, Kepler tarafından geliştirilen ve 1665 yılında Newton tarafından desteklenen hareket kanunlarına dayanmaktadır. Yerçekimi dünyanın merkezine doğru iken, yörünge hızı uyduyu dünyadan uzaklaştırma yönündedir [3]. Böylece uydunun yeryüzü etrafında dönmesiyle oluşan merkezkaç kuvvetinin yeryüzünün çekim kuvvetiyle dengelenmesi sonucu uydu yörüngede kalır.

Kepler yasaları, uzayda kütle çekimi yoluyla etkileşime giren iki cisme genel olarak uygulanır. Bu iki cisimden daha kütleli olanı birincil, diğeri ise ikincil veya uydu olarak adlandırılır [15]. Buna göre,

1. Keplerin birinci yasası, bir uydunun iki odak noktasından birinde Dünya'nın kütle merkezinin olduğu eliptik bir yörüngede hareket ettiğini gösterir. Bir elipsin iki odak noktası vardır ve bu iki cisimli sistem için kütle merkezi her zaman bu odaklardan biridir. Uyduya göre Dünyanın kütlesi daha büyük olduğu için ağırlık merkezi Dünyanın merkezi ile

çakışır. Bu sebeple elipsin iki odak noktasından biri Dünya'nın kütle merkezi olacaktır.

2. Kepler'in ikinci yasası ise bir uydunun eşit zaman aralıklarında yörünge düzleminde kütle merkezinde odaklanmış eşit alanları tarayacağını belirtir. Bu eşit alan yasasına göre uydu, dünyadan daha uzakta olduğunda kat edeceği mesafe daha uzun sürerken dünyaya daha yakın olduğunda kat edeceği mesafe daha kısa sürecektir. Bu özellik, uydunun dünyadan görülebileceği süreyi artırmak için kullanılır.
3. Kepler'in üçüncü yasası, ilk iki yasanın bilinen gezegenler için kanıtlanmasından sonra eklenmiştir. Üçüncü yasa, gezegenin Güneş etrafında bir tam tur dönüşü için geçen sürenin yani periyodunun karesi ile Güneş ve gezegenin birbirine olan ortalama mesafesinin küpü arasında bir orantı olduğunu gösterir. Bu yasa da diğer iki yasa gibi uydu dünya ilişkisine uyarlanacak olursa uydunun bulunduğu yörünge periyodunun yörünge büyüklüğüyle orantılı olduğunu söylenebilir.

### **1.3. Kullanılan Yörüngeler**

Bir önceki bölümde bahsedilen bu yasaların dünya-uydu yörüngesi kapsamında kullanılması sonucu yörünge büyüklüğü, şekli, dünyaya olan mesafesi gibi özelliklerinin hesaplanabilmesini sağlayan bazı yörünge parametreleri tanımlanmıştır [15]. Tanımlanan bu yörünge parametreleri ile uydu yörüngesinin konumu benzersiz bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu yörünge parametrelerinin çeşitli kombinasyonlarıyla olası birçok uydu yörüngesi daha oluşturulabilir. Ancak, uzaya fırlatılarak yörüngeye yerleştirilen uyduların belirli bir amaç için gönderilmiş olması kullanılacak olan yörünge sayısını oldukça sınırlandırmıştır [16]. Uyduların görev yapacakları yörünge şekli ve yüksekliğine bağlı olarak izledikleri yörüngeleri temelde aşağıdaki gibi gruplandırabiliriz [17]:

1. LEO (Low Earth Orbit - Alçak Yörünge)
2. MEO (Medium Earth Orbit - Orta Yörünge)
3. HEO (High Elliptical Orbit- Yüksek Yörünge)

#### 4. GEO (Geostationary Earth Orbit – Yer Sabit Yörünge)

İsminden de anlaşılacağı üzere LEO uyduları, diğer yörünge tiplerine göre dünyaya daha yakın bir yörüngede dönen uydulardır. Yörünge yükseklikleri 160-2500 km arasında değişmektedir. Yörüngede kalabilmeleri için hızlı hareket etmeleri gerekir, bu sebeple kapsama alanları 10-15 dakika içerisinde değişir. Bu sebeple LEO uyduları alçak yörüngelere sahip olmalarına rağmen telekomünikasyon için tercih edilmezler.

MEO uyduları ise 10000-20000 km arasındaki yükseklikte bulunan uydulardır ve genellikle yer pozisyon konum belirleme hizmetleri için kullanılırlar.

HEO uyduları, daha çok yüksek enlem veya kutup kapsamı için kullanılırlar. Eliptik yörünge sebebiyle dünyaya bir kutup bölgesi üzerinde daha çok yaklaşırken diğer kutup bölgesinde dünyadan çok daha uzak bir noktadan geçer. Dolayısıyla, diğer uyduların erişemediği bölgelerde ve daha uzun temas süreleri gerektiren yüksek enlem bölgelerinde kapsama sağlamak için kullanılırlar.

Özellikle haberleşme uyduları arasında en popüler olan ve en sık kullanılan uydu ise GEO uydularıdır. Diğer uydu türlerinin aksine GEO uyduları, Dünya etrafında sabit bir yörüngeye oturtulur ve Dünya ile dönme periyotunun ve açısının eşitlenmesiyle, yerdeki bir konum üzerinde sabit bir şekilde kalırlar. Dünya ile birlikte dönebilmesi 3 km/s'lik bir hızla yaklaşık 35786 km yükseklikteki bir yörüngede olması gerekmektedir. Diğer uydu tiplerine kıyasla dünya yüzeyine en uzak uydudur. Bu uzaklık sayesinde daha yüksek bir yörüngeden daha geniş alanlar kaplanmış olur ve 3 adet GEO uydusuyla birlikte bile tüm Dünya kapsama alınabilir.

Günümüzde haberleşme için kullanılacak olan uydular büyük uydulardır ve Ekvator düzlemindeki bu yer sabit yörüngeye (GEO) oturtulmaktadırlar. Böylece uydu üzerindeki anten, görev yapacağı ülke ya da bölge üzerinde sabit kalarak iletişim mümkün hale gelecektir. GEO yörüngesine yerleştirilmiş bir haberleşme uydusunun kapsama alanı Dünya'nın yaklaşık 1/3'ü kadardır. Böylece GEO yörüngesine yerleştirilmiş birçok aktif uydu sayesinde geniş bölgelere TV / radyo yayını, veri transferi ve internet hizmetleri kolaylıkla yapılabilir.

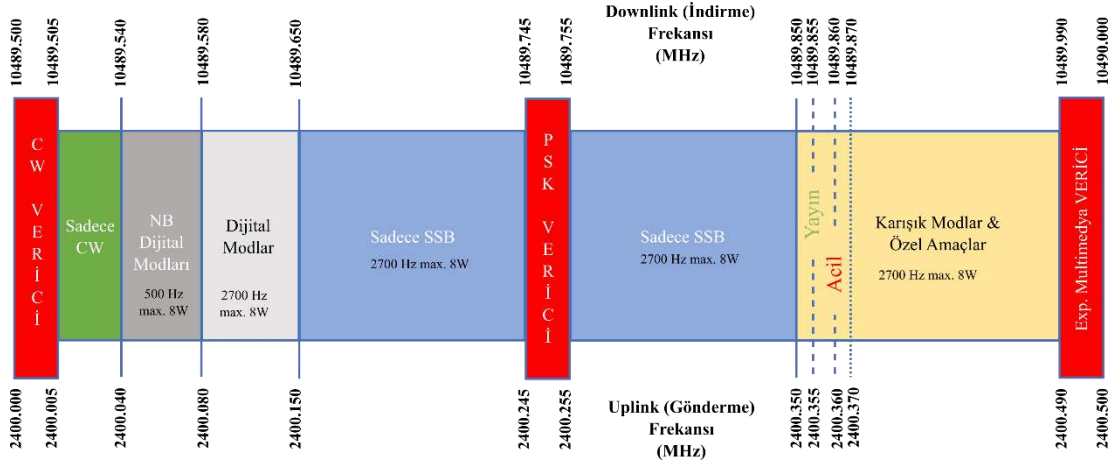
Aşağıdaki bölümde bu tez kapsamında çift yönlü sinyal iletimi için kullanılacak olan GEO yörüngesine yerleştirilmiş uydulardan biri olan Es'hail2 uydusu tanıtılmıştır. Literatürde diğer uydu yörüngeleri ve bu yörüngelere fırlatılan uyduların kullanım alanları ile ilgili daha detaylı bilgi bulunabilir [18-20].

#### **1.4. QO-100 Uydusu**

Es'hail-2 yani QO-100 uydusu 15 Kasım 2018 tarihinde SpaceX Falcon 9 roketi ile Kennedy Uzay Merkezinden fırlatılarak 26° Doğu'da sabit yörüngeye yerleştirilen ve üzerinde ilk amatör radyo aktarıcılar (transponder) bulunan bir yer sabit yörünge (GEO) uydusu özelliği taşımaktadır. Es'hail-2 uydusu Katar Uydular Şirketi (Es'hailSat), Katar Amatör Telsiz Topluluğu (QARS) ve AMSAT Deutschland'ın (AMSAT-DL) bir ortak projesidir ve uyduya ait sistemler MELCO (Mitsubishi Electric Corporation) tarafından üretilmiştir [5].

TV yayınları ve haberleşme için planlanan bu uyduya, Katar Amatör Telsiz Topluluğu tarafından finanse edilerek uydu üzerinden telsiz haberleşmesinin sağlanabileceği sistemler eklenmiştir.

Üzerinde amatör telsizcilerin kullanımına açık olan amatör radyo transponderler'ini barındıran uydu, 2400 MHz ve 10450 MHz frekanslarında sırasıyla uplink ve downlink için kullanılmak üzere iki adet transponder'a sahiptir. 250 kHz bant genişliğine sahip transponder darbant transponder'ı olarak tanımlanmıştır ve daha çok amatör telsizciler için ses iletiminde kullanılır. Zamanla bu darbant transponder'ın kapasitesi 500 kHz'ye yakın bir bant genişliğine çıkartılmıştır. Geniş bant transponder'ı olarak adlandırılan diğer transponder ise 8 MHz bant genişliğine sahiptir ve daha çok amatör televizyon yayınına olanak sağlar. Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu, Brezilya'dan Tayland'a kadar dünyanın üçte birlik kısmını içine alan geniş bir kapsama alanına sahip QO-100 uydusu için dar bant transponder bant planı aşağıdaki Şekil 1'de gösterilmiştir [21].



**Şekil 1. Dar Bant Transponder Bant Planı**

**Kaynak:** [21] Amsat-dl, “Neuer QO-100 Bandplan.” [Çevrimiçi]. <https://amsat-dl.org/neuer-qo-100-bandplan/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).

Bu bant planına bakıldığında 10489.500 – 10490 MHz ve 2400 – 2400.5 MHz bant aralıklarında alıcı (Rx) ve verici (Tx) frekans planlarının birbirini karşıladığı görülmektedir. Örneğin 2400.150 MHz frekansında verici yayın yapan bir istasyonun, başka bir istasyon tarafından dinlenmesi için alıcının 10489.650 MHz frekansında dinleme yapması gerekir.

Bant planını daha dikkatli inceleyecek olursak, üzerinde üç tane işaret sinyali olduğu görülmektedir. Bu işaret sinyallerine Beacon sinyali adı verilir ve uyduları tanımlamak için kullanılan sabit frekanslı, sabit güçte bulunan modüle edilmemiş bir uydu sinyalidir. Bunlardan iki tanesi bandın sağ ve solunda yer alırken bir tanesi bandın tam ortasında yer almaktadır. Sol taraftaki beaconda sürekli dalga (CW) yani mors olarak uydu ile ilgili tanımlar yayınlanmaktadır. Sağ taraftaki beacon ise deneysel Beacon olup ortadaki beacon PSK modüleli Beacon sinyalidir. Transponder bant genişliğinin iki sınırının, özellikle alt ve üst Beacon sınırlarının, ötesinde hiçbir iletim yapılmamalıdır. Dar bant transponderına ait bant planında görülen verici (uplink) ve alıcı (downlink) frekansları ve bu bant aralıklarının kullanım amaçları aşağıdaki Tablo 1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1. QO-100 Uydusu Frekans Bantlarının Kullanım Alanları**

| <b>Uplink</b>              |                        | <b>Downlink</b>            |                        |                            |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| <b>Başlangıç<br/>(MHz)</b> | <b>Bitiş<br/>(MHz)</b> | <b>Başlangıç<br/>(MHz)</b> | <b>Bitiş<br/>(kHz)</b> | <b>Kullanım Amacı</b>      |
|                            |                        | 10489.500                  | 10489.505              | Güvenlik Bandı             |
| 2400.005                   | 2400.040               | 10489.505                  | 10489.540              | Mors Haberleşmesi          |
| 2400.040                   | 2400.080               | 10489.540                  | 10489.580              | 500 Hz Dijital Haberleşme  |
| 2400.080                   | 2400.150               | 10489.580                  | 10489.650              | 2700 Hz Digital Haberleşme |
| 2400.150                   | 2400.245               | 10489.650                  | 10489.745              | 2700 Hz SSB Haberleşmesi   |
|                            |                        | 10489.745                  | 10489.755              | Güvenlik Bandı             |
| 2400.255                   | 2400.350               | 10489.755                  | 10489.850              | 2700 Hz SSB Haberleşmesi   |
| 2400.350                   | 2400.495               | 10489.850                  | 10489.995              | Özel Kullanım              |
|                            |                        | 10489.995                  | 10490.000              | Güvenlik Bandı             |

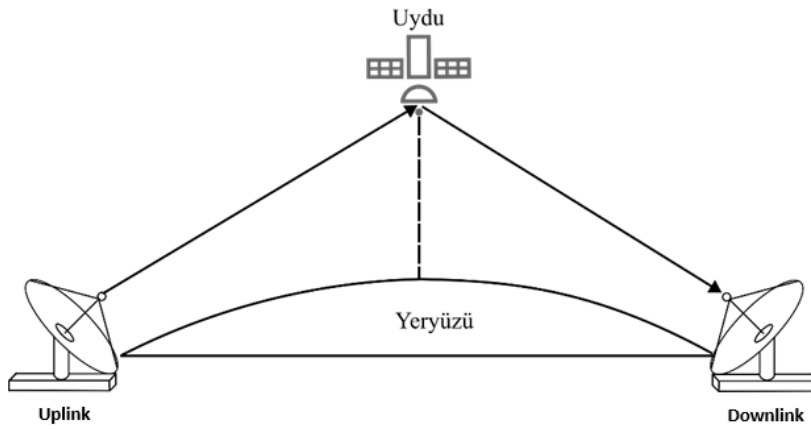
## İKİNCİ BÖLÜM

### HABERLEŞME DONANIMLARI

Haberleşmede uyduların temel amacı, uydu üzerindeki transponderlar aracılığıyla gelen sinyalleri uygun frekansta alma ve gönderme işlemlerini yaparak yer istasyonundan gelen sinyalleri başka bir yer istasyonuna göndermektir. Dolayısıyla uydu haberleşme sistemlerinin basitçe bir uydu ve bu uydu ile bağlantı sağlayan yer istasyonlarından oluştuğu söylenebilir. Bu bölümde uydu haberleşme sisteminin temel blokları ve sistem için gerekli düzeneğin alıcı (downlink) ve verici (uplink) istasyonları açısından kurulumu anlatılmıştır.

#### 2.1. Uydu Haberleşme Sistemi Temel Blokları

Uydu haberleşme sistemlerinde uydu ile yer istasyonu arasında oluşan bağlantılar iki gruba ayrılabilir: i) yer istasyonundan uyduya olan bağlantı ve ii) uydudan yer istasyonuna olan bağlantı. Bu bağlantılar esnasında verici yer istasyonu kendine gelen sinyali belirli bir frekansta uydu transponder'ına gönderir ve uydu üzerindeki bu transponder gelen sinyali uygun frekansa dönüştürerek kapsama alanı içerisindeki alıcı yer istasyonuna iletir. Dolayısıyla bu iki bağlantı sırasıyla uplink hattı ve downlink hattı olarak adlandırılır. Bu durum aşağıdaki Şekil 2'de temel blok şemalarıyla basitçe resmedilmiştir.



Şekil 2. Uydu Haberleşmesi Sistemi Temel Blok Şeması

Yer istasyonu, verici ve alıcı olmak üzere iki farklı görev için tasarlanır. Bazı durumlarda yer istasyonu hem alıcı hem de verici olarak görev yapar. Bazı durumlarda ise tek bir verici istasyonu birden fazla alıcı istasyona hizmet verir. Yer istasyonu çeşitleri coğrafi konuma göre ve ihtiyaç durumuna göre değişiklik gösterebilir.

Uydu haberleşmesinde sinyalin yer istasyonundan uyduya yeterli güçte ulaşabilmeleri için geniş açılı antenlere ve güçlü miktarda mikrodalga sinyalleri kullanma ihtiyacı vardır. Bu sebeple, bir uydu haberleşme sisteminde verici yer istasyonundan uydu transponderı'na gönderilecek sinyal için uplink yapısında uygun modülasyonda gelen sinyal, uygun frekansa yükseltilip yüksek güçlü amfiler kullanılarak, Tx anteni üzerinden uyduya gönderilmektedir.

Uydu üzerindeki transponder ise yer istasyonunun gönderdiği sinyali alıp gerekli işlemleri gerçekleştirerek tekrar yeryüzüne gönderen aktif çalışan bir donanımdır. Haberleşme sağlanan uydular frekansa ve kullanım amacına bağlı olarak farklı frekanslarda bant genişliklerine sahip birden fazla transponder'a sahip olabilirler. Uydu haberleşmesinde en çok kullanılan transponder, frekans çevirici transponderdir. Bu tipteki transponderlar RF sinyalini alıp, taşıyıcı frekansını değiştirerek, kuvvetlendirilip yer yüzüne tekrar gönderir [3]. Uydu haberleşmesinde kullanılan bir diğer çeşit transponder ise sabit işlemli transponderdir. Bu tipteki transponderlar, kendine gelen sinyali, güçlendirip gönderebildiği gibi, bu RF sinyal üzerinde sinyali güçlendirme, hata düzeltme veya yeniden biçimlendirme gibi bazı işlemleri de yapabilmektedir.

Uydu haberleşmesi sistemindeki downlink yapısında ise uydudan gelen sinyaller alınıp yer istasyonunda birtakım cihazlar yardımıyla çözümlemeler yapılarak sinyal işlenir. Bu çözümleme işlemi bu tezde kullandığımız bir SDR ile olabileceği gibi gelen TV yayınları için kullanılan uydu alıcısı aracılığıyla da olabilir. Bir downlink yapısına bakıldığında, parabolik veya ofset çanak antenin üzerine takılı olan LNB ile toplanan sinyaller filtreleme ve düşük gürültülü yükselteçlerden geçirilerek uygun frekansa indirgenip demodüle edilerek anlamlı hale getirilmektedir [20].

Aşağıdaki bölümlerde Es'hail 2 uydusu ile haberleşmenin sağlanabilmesi için gerekli düzeneğin kurulumunda kullanılan cihazlar ve sistemin kurulumu uplink / downlink hatları için ayrı ayrı anlatılmıştır.

## 2.2. Downlink Blok Diyagram

Uyduların yapıları gereği dünyadan uzak konumlandırılması ve belli açılarda sabit kalmaları sebebiyle gönderdikleri sinyallerin alınabilmesi için uyduya odaklanmış antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu antenler, günlük dilde çanak anten olarak bilinmekte ancak literatürde daha çok parabolik ve offset antenler olarak ifade edilmektedir [32].

Aşağıdaki şekilde blok diyagramlardan oluşan bir downlink yapısı gösterilmektedir. Buna göre, bir downlink hattının ilk aşamasında uydudan (QO-100 uydusu) gelen sinyali toplayacak olan uyduya odaklanmış bir offset çanak anten ve antenin kol kısmında ise PLL destekli bir LNB bulunmaktadır.



**Şekil 3. Downlink Blok Diyagram**

LNB (Low Noise Block, Düşük Gürültülü Blok), uydudan gelen sinyallerin alınmasını sağlayan, offset ya da parabolik çanağın merkezine odaklanmış bir şekilde sabitlenen aktif bir elemandır. Uzaktan gelen Rf sinyali çanağın merkezine bakan ara frekansa (IF) sahip LNB üzerinde toplanır ve LNB'nin çıkışında içbirim ekipmanlarının çalışabileceği düşük frekanslara dönüştürülür.

Bu düşürülen sinyal bias tee adı verilen basit LC filtre devresine girer. Buradaki filtre devresinin amacı LNB'ye çalışabilmesi için uygun voltajı göndermek, LNB'nin çıkışındaki düşük frekanslı sinyalin bobin sayesinde DC kaynak tarafına gitmesini engellemek ve SDR'ın Rx girişine kondansatör sayesinde de voltaj geçişini engelleyerek sadece RF sinyalin geçmesini sağlamaktır. Böylece SDR'ın Rx girişine gelen sinyal artık bilgisayar üzerinden ücretsiz ve Tx yapabilme imkânı sunan SDR Console programı ile yönetilebilir. Aşağıda downlink hattı için gereken cihazlar kısaca tanımlanmıştır.

### 2.2.1. Çanak Antenler

Uydudan gelen RF sinyallerin LNB'nin üzerinde tek bir noktada odaklayabilmek için metal türevi sac plakadan yapılmış yansıtıcı çanak antenler kullanılır. Antenin büyüklüğü, sinyalin alınmasının planlandığı uyduya, çevre koşullarına ve kurulacak coğrafi konuma göre seçilir. Temel olarak 2 tipte olan bu antenler, Parabolik Çanak ve Offset Çanak olarak iki grupta toplanabilirler.

Parabolik Çanak anten, genellikle SHF (Super High Frequency yani Süper Yüksek Frekans) 3 – 30 GHz aralığında kullanılır. Antenin fiziksel yapısı parabolün eğriliğinden gelmektedir. Merkez noktasına odaklı bir verici ya da alıcı kullanılarak uzak mesafelerdeki uydu sinyallerini alıp göndermede kullanılmaktadır. Antenin boyutunun büyümesi, kazancı ile doğru orantılıdır. Ama boyut büyüdüğü zaman, yön ayarlarının yapılması zor olacağından ekstra ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır [25].

Bir haberleşme uydusundan yer yüzüne gönderilen sinyalleri algılamada genellikle offset çanak antenler yaygın olarak kullanılır. Bu antenler aynı zamanda uyduya sinyalin iletimi için de kullanılabilirler. Bir downlink hattı için kullanılacak antenin LNB'sinin ön kısmına uygun frekansta çalışabilecek bir Tx anteni monte edilerek tek bir çanak anten ile hem uplink hem de downlink işlemi gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla sinyalin uyduya gönderilebilmesi için LNB önüne konulacak bu antenin tipi önemlidir. Bu tez kapsamında Es'hail 2 uydusuna sinyal iletimini sağlanabilmesi için gereken anten tasarımı detaylı olarak 4. Bölümde anlatılmıştır.

### 2.2.2. SDR

SDR (Software Defined Radio yani yazılım tanımlı radyo), kablosuz iletişimin tek veya çift yönlü sağlanabilmesi amacıyla üretilmiş, bilgisayara bağlanabilen ve kendine özgü açık kaynak kodlu programlar ile kullanılabilen cihazlardır. Bu cihazlar belirli frekans aralığında dinleme yapabilir ve eğer Tx çıkışına sahip iseler düşük güçlerde çıkış yapabilirler. Başka bir ifade ile havadaki RF sinyalleri bilgisayar üzerinden anlamlı hale getirebileceğimiz iletişim sistemidir [22].

Temel olarak SDR'ler Rx olarak kullanılmakta olup, cihazın üzerindeki işlemci özelliğine göre belli aralıklardaki RF sinyalini, üzerindeki komponentler aracılığıyla

özümleyebilen ve bu özömlenen sinyalleri bilgisayar üzerindeki yazılımlar aracılığıyla erişmemizi sağlayan cihazlardır.

Genel olarak bu cihazların iç yapısında RF ve işleme katı olarak adlandırılan iki ana blok bulunmaktadır. RF katı dış antenden gelen havadan alınan sinyal uygun bir şekilde güçlendirme ve filtreleme işlemini yaptıktan sonra sinyal işleme katına gönderilir ve burada analog dijital çevirici üzerinden işleme alınarak ilgili filtreye aktarılıp USB portu üzerinden bilgisayardaki programla haberleştirilmiş olur.

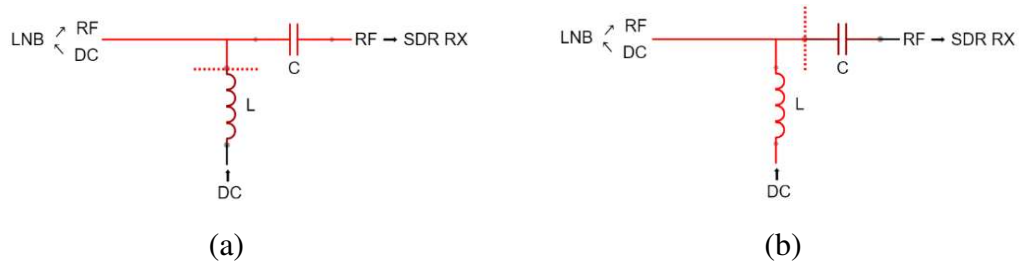
Bu tez için kullanmış olduğumuz SDR, ADALM-PLUTO (Etkin Öğrenme Modülü- PlutoSDR) adlı Analog Devices tarafından geliştirilmiş yazılım tanımlı radyo (SDR) cihazıdır. Bu cihaz, RF uygulamaları için kullanılabilecek, taşınabilir ve düşük maliyetli bir SDR platformudur ve RF iletişimi, RF test ve ölçümü ve RF prototipleme gibi işlemlerin kolayca yapılmasını sağlamaktadır [23].

ADALM-PLUTO, standart SDR'lerden farklı olarak üzerinde hem Rx hem de Tx devresinin bulunması sebebiyle çift yönlü iletişim yapılmasına olanak sağlar. Cihaza gelen Tx sinyali uygun filtreden geçerek dijital analog çeviriciye girip analog sinyale çevrildikten sonra güç amfisi aracılığı ile antene iletilmektedir. Rx tarafında ise antenden alınan analog sinyal uygun şekilde filtrelenerek analog dijital çeviriciye girip dijitale çevrildikten sonra filtelenir. Kullanımı ve erişimi kolay olan bu cihaz 325 MHz ile 3.8 GHz frekans aralığında sinyal gönderip alabilen esnek bir yapıya sahiptir ve bilgisayara bağlantısı zerindeki USB portundan yapıldığı takdirde ekstra bir güç beslemesine ihtiyaç duyulmamaktadır.

### **2.2.3. Bias Tee**

Bias tee devresi DC ve RF sinyali birbirinden ayıran basit bir bobin kondansatör birleşiminden oluşan devredir. Bu devrenin amacı DC kaynağın RF tarafına ve RF sinyalinin DC kaynağa geçmesine izin vermemesidir. Şekil 4a'da görüldüğü üzere LNB den gelen RF sinyal bobinin üzerinden geçemeyip, kondansatörün üzerinden geçerek SDR'nin Rx girişine ulaşabilmektedir. Şekil 4b'de ise DC kaynaktan çıkan gerilim bobin üzerinden geçerek, kondansatör üzerinden geçemeyip LNB'nin beslemesini yapmaktadır. Dolayısıyla, bobin üzerinden geçen DC

voltaj, kondansatör üzerinden geçemeyip LNB ye gidecek ve SDR'nin Rx girişine gelemeyecektir. Aynı zamanda LNB den gelen RF sinyal kondansatör üzerinden geçip SDR'nin Rx girişine ulaşacak ve bobin sayesinde DC kaynağına geçemeyecektir [24].



**Şekil 4. Bias Tee Devresi İçin a) Sinyalin Geçmediği Durum ve b) Voltajın Geçmediği Durum**

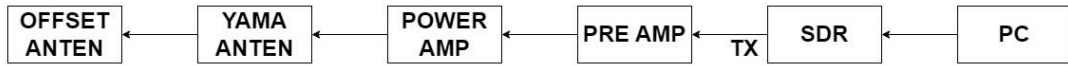
#### 2.2.4. LNB

LNB'nin temel görevi uzaktan gelen ve zayıflamış olan RF sinyallerini güçlendirmek ve ardından frekans dönüşümünü yapmaktır. Çanak üzerinden LNB'ye yansıtılan RF sinyali ilk olarak LNB'nin içerisindeki bir filtreden geçirilir ve burada istenen bant aralığındaki sinyaller geçer. Bu bant aralığında olan fakat güç olarak zayıflamış olan sinyaller düşük gürültü yükselticilerinden (LNA) geçirilerek güçlendirilir. Burada güçlendirme işlemi hem LNB'ye ilk giren yüksek frekanslı sinyale hem de frekans dönüşümünden sonra iç birim ünitesine gönderilmeden önce düşük frekanslı olan sinyale uygulanır. Frekans dönüştürme işleminde LNB'nin çıkışındaki frekans LNB'nin orta frekansı (IF) ile bağlantılıdır. Örneğin, QO-100 uydusundan gelen 10489.5 – 10490 MHz aralığındaki RF sinyali 9750 MHz orta frekansına (IF) sahip LNB üzerinde toplanarak LNB çıkış frekansı 739 MHz'e düşürülür. Burada uydudan gelen sinyalin başlangıcını 10489.5 MHz alırsak ve kullandığımız LNB'nin IF frekansı olan 9750 MHz'i bu frekanstan çıkarırsak 739.5 MHz elde ederiz. Sinyalin bitiş frekansını 10490 MHz aldığımızda ise LNB çıkışındaki üst frekansımız 740 MHz olur. Buna bağlı olarak SDR üzerinde ilk bakmamız gereken frekans aralığı hata payı ve olası sapmalar göze alındığında 739.5 – 740 MHz aralığı olacaktır.

Ayrıca, çanak üzerinden LNB'ye yansıtılan RF sinyali, LNB'nin girişindeki horn benzeri yapıdan içeri girerek gelen sinyalin horizontal ya da vertical olması durumuna göre ilgili anten üzerinde toplanır. LNB'ler alıcı devrelerinden beslenerek çalışırlar. Böylece, alıcı devresinden uygulanan voltaj değerine göre (13V / 18V) LNB'nin sinyal polarite seçimi değişecektir: Dikey polarize transponderlarını ayarlamak için 13V ve Yatay polarize transponderlarının ayarlamak için 18V uygulanır. QO-100 uydusundan gelen sinyaller dikey polarizasyonda oldukları için bu tezde kullanılan LNB'yi bias tee devresi üzerinden 13V ile besleyerek gelen dikey polarize sinyaller toplanabilecektir.

### 2.3. Uplink Blok Diyagram

Uydu haberleşmesi çift yönlü olarak yapıldığından haberleşme sistemi için öncelikle sinyal gönderme düzeneğinin kurulması gerekmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere SDR olarak kullanılan Adam Pluto cihazı çift yönlü haberleşmeye uygun bir yapıda olup tek bir SDR üzerinden çift yönlü haberleşme yapılabilir. Şekil 5'te bir uplink hattının blok diyagramlarla ifadesi gösterilmektedir.

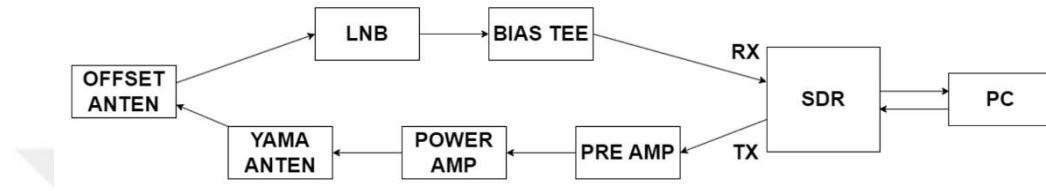


Şekil 5. Uplink Blok Diyagram

Şekil 5'te görüldüğü üzere SDR'ın üzerinde mevcut bulunan Tx portu üzerinden gerekli ara elemanlar kullanılarak LNB önüne konulacak uygun frekanstaki anten ile sinyalin uyduya gönderilebilmesi sağlanır. Yeryüzü ve uydu arasında bulunan mesafe SDR'ların çıkış gücünün ulaşabileceği bir mesafe olmadığından ara eleman olarak amfi devreleri ve bu amfi devrelerinin önüne de pre amfi (ön yükseltici) devreleri kullanılması gerekmektedir. SDR'ın Tx çıkışı ile power amfi arasına bağlanan Novate markasına ait SKY65135 pre amfi devresinin amacı SDR'nin çıkışındaki sinyali power amfinin girişine uygunlaştırmaktır. Ana yükseltici olarak kullanılan Edup markasına ait EP-AB003 model yükseltici ise 2.4 – 2.5 GHz frekans aralığında giren sinyali güçlendirerek 8W çıkış sinyali oluşturur [26-27].

## 2.4. Tüm Sistemin Yapısı

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi bir uydu ile haberleşme uygun antenlerin kullanımıyla çift yönlü olarak tek bir çanak anten üzerinden gerçekleştirilebilir. QO-100 uydusuna sinyal gönderme ve alma işlemi için tüm sistem yukarıda özetlenen uplink ve downlink bağlantılarının tek bir anten ve SDR üzerinde birleştirilmesiyle sağlanır. Bu tüm sistem tasarımını aşağıdaki Şekil 6’da gösterilen blok diyagramla özetleyebiliriz.



Şekil 6. Uplink ve Downlink Blok Diyagramı

Buna göre, öncelikle yer istasyonu düzeneği için kurulan çanak anten haberleşme sağlanacak uyduya yönlendirilir. Yönlendirilmiş çanak antenin önünde bulunan LNB’den gelen sinyali taşıyan kabloyu bias tee devresinin RF+DC girişine, voltaj beslemesi de DC girişine bağlanır. Bias tee devresinin RF çıkışı ise Tx ve Rx özelliği taşıyan SDR cihazının Rx girişine bağlanır. Ardından SDR’n çıkışındaki sinyaller bilgisayar üzerinden SDR Console yazılımı ile gözlemlenir.

Uyduya sinyalin iletimi için ise öncelikle SDR Console yazılımı üzerinden sinyali SDR cihazına gönderilir ve cihazın Tx çıkışı sinyalinin iletilebilmesi için gerekli amfi devrelerine bağlanarak sinyalin gücü arttırılır. Amfi devresinin çıkışı ise LNB’nin önüne monte edilmiş uygun frekansta çalışacak şekilde tasarlanan yama antenin girişine bağlanır ve sinyalin anten aracılığıyla uyduya iletilmesi gerçekleşir. Böylece yer istasyonunda kurduğumuz tek bir çanak anten hem alıcı hem de verici olarak kullanılmış olacaktır.

Bir sonraki bölümlerde yer istasyonunun kurulumunda gerekli parametrelerin hesaplanması ve sinyal iletimi için kullanılacak olan 2.4 GHz uplink frekansında çalışacak mikroşerit anten tasarımı sistemin kurulumu ile birlikte daha detaylı olarak ele alınmıştır.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### YER İSTASYONU PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

Yer istasyonu için hem alıcı hem verici aynı lokasyonda seçilmiştir. Derece, dakika, saniye (DMS) cinsinden verilen enlem/boylam koordinat noktaları aşağıdaki dönüşüm ile ondalık dereceye (DD) dönüştürülebilir.

$$\text{DMS} / \text{DD dönüşümü} = 1^\circ = 60' = 3600'' \quad (1)$$

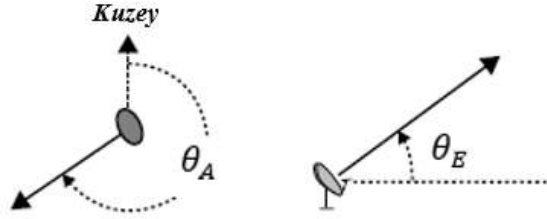
Haberleşme uyduları için yeryüzünde bulunan antenin uyduya yönlendirilmesi esnasında yer istasyonu anteni olarak adlandırılan bu antenin azimut (yatay) ve yükseklik açılarının bilinmesi gerekir. Bu açılar doğru bir şekilde ayarlandığı takdirde anten uyduya yönlendirilmiş olur. Yer istasyonundaki bir antenin uyduya yönlendirilirken gereken hesaplamalar aşağıda kısaca anlatılmış ve bölüm sonunda örnek bir yer istasyonu koordinatı için ayarlama açıları hesaplanarak Tablo 3'te sunulmuştur.

#### 3.1. Anten Bakış Açılarının Hesaplanması

Yer istasyonundaki bir antenin belli bir yörüngede bulunan uyduya yatayda ve düşeyde yaptığı açılara sırasıyla azimut (azimuth) ve yükseklik (elevation) açıları denir. Bu açılar yer istasyonundaki anten için uyduya bakış açıları olarak adlandırılır.

Azimut açısı ( $\theta_A$ ), pusulada  $0^\circ$ 'nin Kuzey,  $180^\circ$ 'nin de Güney istikametini gösterdiği kabul edilerek, yer istasyonundaki antenin saat yönünde dönüşü sonucu elde edilen açı olarak tanımlanır. Kısaca, Antenin bulunduğu noktadan kuzey kutup noktasına çizilen doğru ile yine anten noktasından subsatellite noktasına çizilen doğru arasında kalan açıdır. Açı saat yönünde artar. Yükseklik açısı ( $\theta_E$ ), yer istasyonundaki antenin yukarı veya aşağı yönde yapmış olduğu hareketin sonucunda elde edilen açı olarak tanımlanır. Yerel yataya (local horizontal) göre belirlenir.

Aşağıdaki şekilde yer istasyonu referansına göre bakış açılarının geometrisi ve tanımları gösterilmektedir [3].



**Şekil 7. GEO Uydusu İçin Anten Bakış Açıları**

Yer istasyonunda bulunan bir antenin GEO yörüngesindeki bir uyduya bakış açılarını belirlemek için aşağıdaki üç bilgi gereklidir.

- 1-  $\phi_E$  ile ifade edilen yer istasyonu enlemi (Latitude)
- 2-  $\psi_E$  ile ifade edilen yer istasyonu boylamı (Longitude)
- 3-  $\psi_S$  ile gösterilen uydu boylamı (uydu altı noktasının boylamı olarak da adlandırılır)

Verilen bu bilgiler kullanılarak yükseklik açısı ( $\theta_E$ ) aşağıda verilen Denklem 2 ile kolaylıkla hesaplanabilir [28].

$$\theta_E = \tan^{-1} \left( \frac{\cos \gamma - \frac{R_E}{r}}{\sin \gamma} \right) \quad (2)$$

Burada,

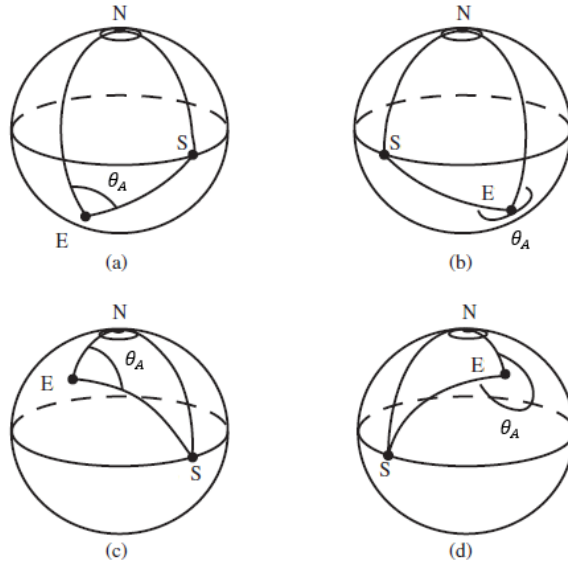
- $\cos \gamma = \cos \phi_E \cos \Delta\psi$
- $\Delta\psi$  = uydu boylamı ( $\psi_E$ ) ve yer istasyonu boylamı ( $\psi_S$ ) arasındaki fark (derece olarak)
- $\phi_E$  = yer istasyonunun enlemi (derece olarak)
- $R_E$  = dünyanın ekvator düzlemindeki yarıçapı (6378 km)
- $r$  = yörüngenin yarıçapı (GEO yörüngesi için yaklaşık 42200 km)

olarak tanımlanmıştır.

Azimet açısının hesaplanabilmesi için ise  $\theta_i$  ile tanımlanan bir ara açığa ihtiyaç duyulmaktadır. Yer istasyonunun konumuna ve uydunun yer istasyonunun bulunduğu noktaya göre konumuna bağlı olarak, Denklem 3'te verilen bu ara açı yardımıyla azimet açısı bulunur [28].

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \Delta\psi}{\sin \phi_E} \right) \quad (3)$$

Şekil 8, yer istasyonunun (E) ve uydunun dünya yüzeyindeki uydu altı noktasının (S) bulunduğu konuma göre dört azimet açısı koşulunu resmetmektedir. Bu koşullar yer istasyonunda durup uydu altı noktasının yönüne bakılarak belirlenir. Örneğin, yer istasyonu güney yarımkürede iken uydu altı noktası yer istasyonunun doğusunda ise bu yön kuzeydoğu (NE) olarak tanımlanır ve azimet açısı ara açığa eşit olur. Buradaki dört koşulun her birini ve ilgili azimet açısının nasıl belirlenebileceği Tablo 2'de verilmiştir [3].



**Şekil 8. Yer İstasyonunun ve Uydunun Bulunduğu Konuma Göre Azimet Açısı Koşulları**

**Kaynak:** [3] L. J. Ippolito Jr., *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance*. John Wiley & Sons Ltd, 2017.

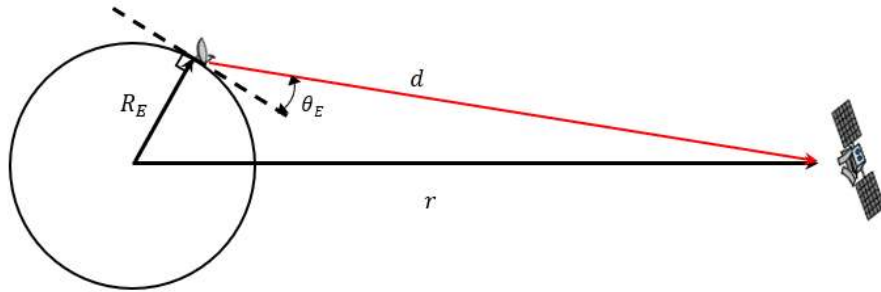
**Tablo 2. Yer İstasyonunun ve Uydunun Bulunduğu Konuma Göre Azimut Açısının Belirlenmesi**

| Yer istasyonunun konumu (ES) | Dünya yüzeyindeki uydu altı noktasının yer istasyonuna göre konumu (SS) | $\theta_A$       |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Güney                        | Uydu yer istasyonunun doğusunda (NE)                                    | $\theta_i$       |
| Güney                        | Uydu yer istasyonunun batısında (NW)                                    | $360 - \theta_i$ |
| Kuzey                        | Uydu yer istasyonunun doğusunda (SE)                                    | $180 - \theta_i$ |
| Kuzey                        | Uydu yer istasyonunun batısında (SW)                                    | $180 + \theta_i$ |

### 3.2. Uydu ve Yer İstasyonu Arasındaki Mesafe

Yer istasyonundan GEO yörüngesindeki uyduya olan mesafenin belirlenmesi, yer istasyonunun koordinatlarını, dünyanın yarıçapını ve yükseklik (elevation) açısını gerektirir. Yer istasyonu ile uydu arasındaki  $d$  mesafesi basit bir çizim ile Şekil 9'daki gibi resmedilmiştir ve yer istasyonundan uyduya doğru olan yükseklik açısı cinsinden ( $\theta_E$ ) aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [29]. Burada,  $R_E$  dünyanın ekvator düzlemindeki yarıçapı,  $r$  yörüngenin yarıçapı,  $\theta_E$  yükseklik açısıdır.

$$d = \sqrt{r^2 - (R_E \cos \theta_E)^2} - R_E \sin \theta_E \text{ (km)} \quad (4)$$



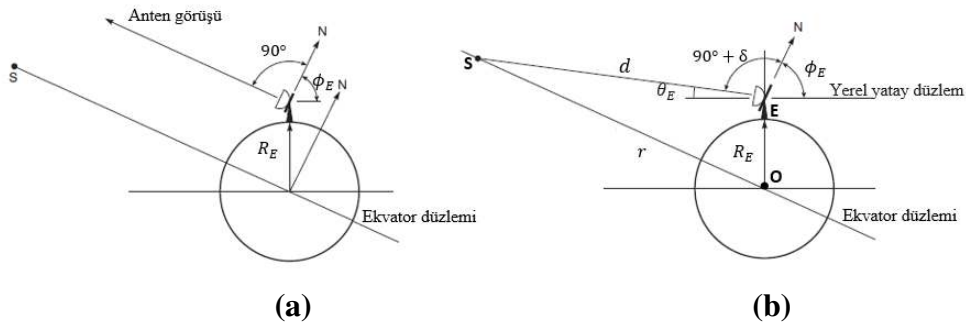
**Şekil 9. Yer İstasyonundan Uyduya Olan Mesafenin Gösterimi**

**Kaynak:** [29] B. R. Elbert, *Introduction to Satellite Communication*, Artech House, 1987.

### 3.3. Anten Eğim Açısı (Tilt angle)

Ev antenlerinin yönlendirilebilir olması gerektiğinde azimut ve yükseklik açıları için ayrı bir aktüatör kullanmak maliyetli olacaktır. Bunun yerine anteni dairesel bir yay üzerinde hareket ettiren tek bir aktüatör kullanılır. Bu antenler kutupsal montajlı antenler (polar mount) olarak bilinir ve genellikle bu antenler tek bir uyduyu doğru bir şekilde işaret eder. Bu sebeple bazı yönlendirme hataları görülebilir [30].

Kutupsal montajlı antenin çanağı, Şekil 10'da gösterildiği gibi, antenin görüş açısı bu eksene dik olacak şekilde kutupsal eksen adı verilen bir eksen üzerine monte edilir. Kutup tepesi ile yerel yatay düzlem arasındaki açı, yer istasyonu enlemine ( $\phi_E$ ) eşit olarak ayarlanmıştır. Böylece Şekil 10 a'da görüldüğü üzere anten görüşünün ekvator düzleme paralel olması sağlanır [30].



**Şekil 10. Kutupsal Montajlı Anten için (a) Görüş Açısı Gösterimi, (b) Eğim Açısı Gösterimi**

**Kaynak:** [30] D. Roddy, J. Linwood ve D. G. Long, *Satellite Communications*, 5. baskı, New York: McGraw Hill, 2024.

Ardından çanak anten, kutup tepesine göre  $\delta$  açısıyla anten görüşü yer istasyonunun güneyindeki bir uydu konumunu işaret edene kadar Şekil 10 b'de gösterildiği gibi eğilir. Bu  $\delta$  açısına eğim açısı (tilt angle) veya sapma açısı (declination angle) adı verilir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\delta = 90^\circ - \theta_E - \phi_E \quad (5)$$

Burada,  $\theta_E$  yükseklik açısıdır ve Uydu-Yer istasyonu-Dünyanın merkezi noktalarının birleşimiyle oluşan SEO üçgeni üzerinde bir takım trigonometrik işlemler

yapıldıktan sonra yer istasyonunun enlemine bağılı olarak denklem aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir. Elde edilen  $\delta$  açısı, ilk hizalama için yeterli doğrulukta olacaktır ve gerektiğinde hassas ayarlar yapılabilir.

$$\delta = 90^\circ - \arccos\left(\frac{r}{d} \sin\phi_E\right) - \phi_E \quad (6)$$

### 3.4. Polarizasyon Eğim Açısı (LNB Tilt Angle)

Verici bir antenin uzak alan bölgesinde yayılan dalga, enine elektromanyetik (TEM) dalganın özelliklerini alır ve verici antenden çok uzak mesafeler için bu TEM dalgalarının düzlem dalga olduğu düşünülebilir [27]. Böylece anten tarafından yayılan dalga, birbirine dik bir elektrik alan (**E**) vektörü ve bir manyetik alan (**H**) vektöründen oluşur ve bu iki alan vektörü aynı zamanda yayılma vektörüne (**k**) de diktir. Yani **E** ve **H** vektörleri **k** vektörüne dik açıda olan bir düzlemde yer alır. Yayılma yönüne doğru bakıldığında ise, **E**'den **H**'ye dönüş, bu vektörler için üçlü bir sağ el seti oluşturur.

Antenler için IEEE Standart Tanımlarına göre (*IEEE Standard Definitions for Antennas*), yayılan bir dalganın polarizasyonu, “yayılan bir elektromanyetik dalganın, elektrik alan vektörünün zamanla değişen yönünü ve göreceli büyüklüğünü tanımlayan özelliği; özellikle, uzayda sabit bir konumdaki vektörün uç noktası tarafından zamanın bir fonksiyonu olarak izlenen şekil ve yayılma yönü boyunca gözlemlendiği üzere izlendiği doğrultu.” olarak tanımlanmaktadır [31]. Özetle, belirli bir gözlem noktasında, zamanın bir fonksiyonu olarak anlık elektrik alan vektörünün uç noktası tarafından çizilen eğri dalganın polarizasyonunu belirler. Genel olarak elektrik alanının izlediği şekil bir elipstir ve bu durumda dalganın polarizasyonu eliptik olarak adlandırılır. Eliptik polarizasyonun doğrusal ve dairesel biçimde iki özel durumu mevcuttur ve bunlar elips şeklinin sırasıyla düz bir çizgiye veya daireye dönüşmesiyle elde edilebilirler [20].

Bir iletim sisteminde karşılıklı olarak alıcı / verici sistemlerin polarizasyon uyumlu olması önemlidir. Örneğin belirli bir polarizasyondaki dalgayı iletmek veya almak için tasarlanmış bir anten, dik polarizasyonda ne iletebilir ne de alabilir. Bu durumda polarizasyon uyumsuzluğu oluşmuş olur ve dolayısıyla veri kaybı yaşanır.

Eliptik veya dairesel polarizasyon için diklik durumu ters yönde dönüşler için, yani sağ-el ve sol-el polarizasyon için, oluşur. Doğrusal polarizasyon için ise elektrik alanın ekvator düzlemine dik olduğu dikey (V) polarizasyon ve elektrik alanın ekvator düzlemine paralel olduğu yatay (H) polarizasyon birbirine dik doğrusal polarizasyonu tanımlar [20].

Bu sebeple uydu haberleşme sistemleri için de yer istasyonu anten beslemesinin polarizasyonunun alınan dalga'nın polarizasyon düzlemi ile aynı hizada olması gerekir. Uydudaki polarizasyon düzlemi, uydu anteninin görüş açısını ve referans yönünü içerir. Bu referans yönü, önceki paragrafta açıklandığı gibi dikey (V) polarizasyon için ekvator düzlemine dik veya yatay (H) polarizasyon için ekvator düzlemine paraleldir. Yer istasyonundaki polarizasyon açısı ( $\varphi$ ), yer istasyonundaki yerel dikey ve anten görüş açısı ile oluşturulan düzlem ile polarizasyon düzlemi arasındaki açı olarak tanımlanır. Buna göre, ekvator düzlemine dik bir düzlemde bulunan uydudaki referans yönü için yer istasyonundaki polarizasyon açısı negatif çıkması saat yönünün tersine olduğunu gösterir.

### 3.5. Yayılım Zaman Gecikmesi

Link oluşturmada yayılma gecikmesi, verinin bir ortam üzerinden aktarılması için geçen süre olarak tanımlanabilir. Uydu haberleşme sistemlerinde yer istasyonu ile  $d$  mesafesindeki bir uydu arasındaki uplink / downlink bağlantısı üzerinden radyo dalgaları aşağıdakine eşit bir  $t$  yayılma süresi gerektirir:

$$t_{up/down} = \frac{d}{c} \quad (7)$$

Burada  $c$  ışık hızıdır ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) ve alt indis her bir uplink veya downlink için hesaplanan süreyi belirtir. Buna göre toplam yayılma gecikmesi, her bir bağlantıda oluşan gecikmelerin, yani uplink ve downlink yayılma gecikmelerinin toplamından oluşur [20].

**Tablo 3. QO-100 Uydusunun Özellikleri ve Yer istasyonundaki Anten İçin Ayarlama Açılarının Hesaplanması**

|                                                          |                                                                                                                                                                  |                                                                                     |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Uydunun yerleştiği yörünge                               | Geostationary earth orbit (GEO)                                                                                                                                  | Yörünge periyodu:<br>24 saat                                                        |
| Uydunun yörüngedeki koordinatı                           | $\psi_S = 26^\circ \text{ E}$                                                                                                                                    | E: East (Doğu)<br>N: North (Kuzey)                                                  |
| Yörünge yarıçapı                                         | $r \approx 42200 \text{ km}$                                                                                                                                     |                                                                                     |
| Dünyanın yarıçapı                                        | $R_E = 6378 \text{ km}$                                                                                                                                          |                                                                                     |
| Çalışma frekansları                                      | S-band                                                                                                                                                           | Uplink: 2.4-2.45 GHz                                                                |
|                                                          | X-band                                                                                                                                                           | Downlink: 10.45-10.5 GHz                                                            |
| NB transponder için<br>(Analog yayın, ses iletimi)       | 250 kHz bant genişliği                                                                                                                                           | Uplink: 2400.05-2400.3 MHz<br>Downlink: 10489.55-10489.8 GHz                        |
|                                                          | kutuplanma                                                                                                                                                       | Uplink: RHCP / Downlink: V                                                          |
| WB transponder için<br>(Dijital yayın, görüntü iletimi)  | 8 MHz bant genişliği                                                                                                                                             | Uplink: 2401.5-2409.5 MHz<br>Downlink: 10491-10499 GHz                              |
|                                                          | kutuplanma                                                                                                                                                       | Uplink: RHCP / Downlink: H                                                          |
| Hem alıcı hem verici olan yer istasyonunun koordinatları | DMS (degrees, minutes, seconds)                                                                                                                                  | Enlem: $40^\circ 56' 31'' \text{ N}$<br>Boylam: $29^\circ 6' 55'' \text{ E}$        |
|                                                          | DD (decimal degrees)                                                                                                                                             | $\phi_E = \text{Enlem: } 40.9421^\circ$<br>$\psi_E = \text{Boylam: } 29.1155^\circ$ |
| Yükseklik açısı ( $\theta_E$ ):                          | $\theta_E = \tan^{-1} \left( \frac{\cos \gamma - \frac{R_E}{r}}{\sin \gamma} \right)$ $\cos \gamma = \cos \phi_E \cos \Delta\psi$ $\Delta\psi = \psi_E - \psi_S$ | $\theta_E = 42.61^\circ$                                                            |
| Azimut açısı ( $\theta_A$ ):                             | $\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \Delta\psi}{\sin \phi_E} \right)$ <p>Uydu, yer istasyonun batısındadır:</p> $\theta_A = 180^\circ + \theta_i$            | $\theta_A = 184.90^\circ$                                                           |
| Uydunun uzaklığı (d):                                    | $d = \sqrt{r^2 - (R_E \cos \theta_E)^2} - R_E \sin \theta_E \text{ (km)}$                                                                                        | 37587.93 km                                                                         |
| Eğim açısı ( $\delta$ ):                                 | $\delta = 90^\circ - \arccos \left( \frac{r}{d} \sin \phi_E \right) - \phi_E$                                                                                    | $-6.33^\circ$                                                                       |
| Polarizasyon açısı/<br>LNB açısı ( $\varphi$ ):          | $\tan \varphi = \frac{\sin(\Delta\psi)}{\tan(\phi_E)}$                                                                                                           | 3.70                                                                                |
| Yayılma gecikmesi                                        | $t_{up/down} = \frac{d}{c}$                                                                                                                                      | 250.59 ms                                                                           |

## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**

### **MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI**

#### **4.1. Giriş**

Antenler, çeşitli kaynaklarda, temelde radyo dalgalarını yaymayı sağlayan, başka bir kaynaktan gelen radyo dalgalarını ise toplamaya yarayan, metal gövdeli bir cihaz olarak tanımlanırlar. Bu tanımdan yola çıkarak antenlerin ortam ve elektronik aygıtlar arasında bir köprü konumunda olduğu söylenebilir. Elektronik aygıt ile anten arasında bulunan iletim hattı, koaksiyel bir kablo hattı veya içi boş bir borudan oluşmaktadır. Bu hat sayesinde giden ya da gelen dalgaların antene iletimi sağlanmaktadır. Dalgaların gitmesi ya da gelmesi durumunu anten için uyarlırsak, giden dalgalar için verici anten; gelen dalgalar için alıcı anten isimlendirmesi yapılabilir [32].

#### **4.2. Antenlerin Temel Prensipleri**

Bir antenin performansını tanımlamak için çeşitli parametrelerin tanımları gereklidir. Bazı parametreler birbiriyle ilişkilidir ve anten performansının tam tanımı için tümü belirtilmek zorunda değildir. Fakat aynı zamanda bu parametrelerin ayrı ayrı ele alınması güçtür ve bir parametre üzerinde yapılan optimizasyon diğer parametrelerin bozulmasına yol açabilmektedir. Antenlerin tasarımında dikkate alınması gereken temel parametreler: yayılım örüntüsü, yönlülük, anten verimliliği ve kazancı, polarizasyon, bant genişliği, ... vb. şeklinde sıralanabilir [32]. Aşağıdaki alt bölümlerde bu parametrelerden kısaca bahsedilmiştir.

##### **4.2.1. Yayılım (Işıma) Örüntüsü**

Antenin yayılım örüntüsü ya da anten örüntüsü, yayılma özelliklerinin bir uzay koordinat fonksiyonu kullanılarak ifade edilmesidir. Çoğu durumda, yayılım örüntüsü uzak alan bölgesinde (Fraunhofer – Far-Field) ve yön koordinatlarının bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Yayılma özellikleri arasında güç akısı yoğunluğu, yayılım yoğunluğu, alan kuvveti, yönlülük, faz veya polarizasyon bulunmaktadır [32].

#### 4.2.2. Yönlülük

Antenin yönlülüğü, yayılım yoğunluğu ile orantılı bir kavramdır ve antenden belirli bir yöndeki yayılım yoğunluğunun mümkün olan tüm yönlerin ortalaması alınmış yayılım yoğunluğuna oranlanması olarak tanımlanmaktadır. Ortalama yayılım yoğunluğu ise anten tarafından yayılan toplam gücün  $4\pi$ 'ye bölünmesine eşittir. Daha farklı bir ifadesi ise, izotropik olmayan yani 3-boyutta her yöne eşit ışıma yapmayan bir kaynağın yönlülüğü, belirli bir yönde ışıma yapan izotropik bir kaynağın ışıma yoğunluğuna oranına eşittir [32].

#### 4.2.3. Anten Verimliliği

Toplam anten verimliliği  $\epsilon_0$  ile gösterilmekte olup antenin yapısı ve iletim hattındaki kayıpları içermektedir. Bu kayıplar, iletim hattı ve anten arasındaki uyumsuzluktan ötürü veya dielektrik kayıpları nedeniyle ortaya çıkabilir. Bunlar hesaba katıldığında toplam verimlilik yansıma (uyumsuzluk) verimliliği, iletim verimliliği ve dielektrik verimliliğinin çarpımı şeklinde ifade edilir [32].

#### 4.2.4. Anten Kazancı

Antenin performansını belirlemek için en önemli kriterlerden biri antenin kazancıdır. Antenin kazancı ile antenin yönlülüğü birbiriyle ilişkilidir fakat anten kazancı yönlülüğün yanında antenin verimliliğini de hesaba katar. Anten kazancı, belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun, anten aldığı gücü izotropik olarak yayacak olsaydı ortaya çıkan ışıma yoğunluğuna oranı olarak tanımlanabilir. İzotropik olarak yayılan güç için ışıma yoğunluğu, antenin kullandığı gücün  $4\pi$ 'ye oranına eşittir [32].

#### 4.2.5. Polarizasyon

Antenin polarizasyonu antenden yayılan dalgaların polarizasyonları ile eşdeğerdir. Eğer yön belirtilmemiş ise anten kazancının maksimum olduğu yöndeki polarizasyon kabul edilir. Pratikte de antenden farklı yönlerde yayılan enerji

değişkenlik gösterdiğinden yayılım örüntüsünün farklı yerlerinde farklı polarizasyon değerleri ortaya çıkabilir.

Yayılan bir dalganın polarizasyonu, dalganın elektrik alan vektörünün zamanla değişen yönünü ve göreceli büyüklüğünü tanımlayan özelliğidir. Yani polarizasyon, anlık elektrik alanı temsil eden vektörün uç noktası tarafından izlenen eğridir. Dalganın elektrik alan vektörünün bileşenleri ve antenin yerleştirilme biçimi, bu dalganın polarizasyon çeşidini belirler. Eğer dalga lineer polarizasyonlu ise elektrik alan vektöründeki değişimler sadece x-ekseninde olacağı söylenebilir. Ayrıca x-ekseni yere paralel olarak düşünülürse, dalganın yatay (horizontal) polarize; elektrik alan y eksenini boyunca uzanıyor ise dalganın dikey (vertical) polarize olmaktadır [33].

#### **4.2.6. Bant Genişliği**

Temel anten parametrelerinden bir diğeri olan bant genişliği, antenin düzgün bir şekilde enerji yayabildiği veya alabildiği frekans aralığını tanımlar. Antenin karakteristik özelliklerine göre değişebilen frekans aralığı, merkez frekansı belirler ve merkez frekansın iki tarafında kalan değerler ise bant genişliği olarak adlandırılır. Geniş bantlı antenler için kabul edilebilir frekans aralığı üst-alt frekans değerlerinin oranı, dar bantlı antenler içinse merkez frekanstaki frekans farkının ( $f_{üst} - f_{alt}$ ) yüzde değeri olarak ifade edilir. Anten seçiminde, iletilecek veya alınacak frekansların aralığı ve bant genişliği göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin daha spesifik frekanslar yakalanmak isteniyorsa dar bantlı, daha geniş bir frekans aralığı için ise geniş bantlı antenler tercih edilmelidir [34].

#### **4.2.7. Gerilim Duran Dalga Oranı (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)**

Alıcı veya verici bir telsizin bir antene güç sağlayabilmesi için, telsizin ve iletim hattının empedansının antenin empedansı ile uyumlu olması gerekir. Bu uyumluluk için ise VSWR parametresi kullanılır. Bu parametre, anten ile bağlı olduğu telsiz ve iletim hattı ile empedans uyumunun niteliğini sayısal olarak ifade eden bir ölçüdür.

### 4.3. Mikroşerit Antenler

Mikroşerit antenler, düşük profilli, düz veya düz olmayan yüzeylerde kullanılabilen, baskı devre teknikleri kullanılarak oldukça kolay üretilen; farklı frekans, polarizasyon, ışıma örüntüsü, empedans değerleri alabilen çok yönlü bir anten türüdür. Hacim, maliyet, performans ve kurulum kolaylığı gibi özelliklerde diğer anten türlerinin önüne geçerek; uçaklar, uydular ve füzeler gibi araçlarda kullanımları yaygındır. Mikroşerit antenlerin dezavantajları arasında ise düşük verimlilik, düşük güç, yüksek Q faktörü (osilasyon verimliliği), zayıf polarizasyon saflığı, zayıf tarama performansı ve çok dar frekans bant genişliği bulunmaktadır. Ayrıca, verimlilik ve bant genişliğini artırmak için alt tabakanın yüksekliğini artırma gibi yöntemler kullanılabilir. Ancak yüksekliğin artırılması, arzu edilmeyen yüzey dalgalarını ortaya çıkartır. Bu dalgalar, yayılım örüntüsünü ve polarizasyon özelliklerini bozmaktadır. Avantaj ve dezavantajları sıralanan mikroşerit antenler, şekil, boyut özellikleri ve besleme türleri açısından ele alınabilir [35].

#### 4.3.1. Mikroşerit Antenlerin Şekil ve Boyut Özellikleri

Mikroşerit antenler, temelde ince bir dielektrik tabaka ile ayrılan iki paralel iletkenin basit bir formudur. Üst yüzey, ışıma yapmak için kullanılırken, alt yüzey topraklama için tasarlanmıştır. Aynı zamanda üst yüzey, şeklinden ötürü yama olarak da adlandırılabilir. Bakır veya altın gibi iletken malzemelerin çeşitli şekilleri kullanılarak, farklı özelliklere sahip ışıma yapan antenler elde edilebilir. Yama ve toprak düzlemi genellikle düzgün geometrilere sahiptir.

Mikroşerit antenlerde ışıma yapan elemanlar ve besleme hatları, dielektrik tabaka üstüne ışın ile kazıma yöntemiyle yerleştirilmişlerdir. Literatürde kare, dikdörtgen, ince şerit (dipol), dairesel, eliptik, üçgensel ya da diğer şekillerde tasarlanmış birden fazla tipte mikroşerit anten bulunmaktadır. Kare, dikdörtgen, dipol ve dairesel şeklindeki yamalar, üretim ve analizlerinin kolay olmasından ötürü tercih edilmektedirler. Dipoller, geniş bir bant genişliğine sahip olmaları ve daha az yer kapladıkları için tercih sebebi olabilirler [32].

#### 4.3.2. Mikroşerit Anten Besleme Yöntemleri

Mikroşerit antenleri beslemek için kullanılabilecek yöntemlerden bazıları mikroşerit besleme, koaksiyel besleme, açık kuplajlı ve yakınlık kuplajlı besleme olarak sıralanabilir. Bu yöntemler ise yama antene direkt temas eden ve yama antene direkt temas etmeyen yöntemler olarak ayrılabilir. Mikroşerit ve koaksiyel besleme yama antene temas ederek; açık ve yakınlık kuplajlı besleme ise yama antene direkt temas etmeyerek besleme yapmaktadırlar. Besleme yönteminin seçiminde, bant genişliği, polarizasyon, üretim kolaylığı ve özel anten tasarımının empedans uyumu gereksinimleri gibi faktörlere bağlıdır [32, 35, 36].

Mikroşerit besleme hattı, genellikle yamadan daha küçük bir genişliğe sahip olan iletken bir şerittir. Üretimi kolay olan bu hat, ek yerinin kontrolü ve empedansın eşleştirilmesi basit olduğundan avantaj sağlar. Ayrıca, modellemesi de oldukça basittir. Ancak, alt tabaka kalınlığı arttıkça, yüzey dalgaları ve sahte besleme ışıması gibi sorunlar ortaya çıkar. Bu durum, pratik tasarımlar için %2 ile %5 arasında bant genişliğini sınırlandırabilir.

Koaksiyel beslemenin gerçekleştirilmesi için biri iç, diğeri dış katman olmak üzere iki katmana ihtiyaç vardır. İçteki katman, ısıma yapan yama antene ulaşmak için alt tabakanın içinden geçmekte; dıştaki katman ise topraklama yüzeyine bağlanmaktadır. Aynı zamanda içteki katmana sonda da denmekte olup genellikle koaksiyel bir kablonun içinden geçerek yama antene ulaşmaktadır. Koaksiyel beslemenin imalatı ve empedans eşlemesi kolaydır. Düşük sahte ışımaya sahiptir ve bununla birlikte, bant genişliği dardır. Özellikle kalın alt tabakalar için modellenmesi daha zordur.

Açık kuplaj, tüm besleme yöntemleri arasından imal edilmesi en zor olanıdır ve dar bir bant genişliğine sahiptir. Bununla birlikte modellenmesi daha kolaydır ve koaksiyel beslemeden daha çok sahte ışımaya sahip olsa da yine de orta seviyededir. Bu tür bir beslemede, toprak düzlemi ile ayrılmış iki alt tabaka bulunur. Üst tabaka yama anten kısmına, alt tabaka ise alttan mikroşerit besleme hattına bağlanmaktadır. Genelde alt tabaka için dielektrik katsayısı yüksek olan bir madde, üst tabaka içinse kalın ve dielektrik katsayısı düşük bir madde kullanılmaktadır. Alt tabakalar arasındaki toprak düzlemi aynı zamanda mikroşerit besleme hattını ısıma yapan yama

antenden izole eder ve sahte ışımayı en aza indirerek anten örüntüsü oluşumunu ve polarizasyon saflığı sağlar.

Yukarıda bahsedilen yöntemlerden en geniş bant genişliğine sahip besleme yöntemi yakınlık kuplajlı besleme yöntemidir. Bununla birlikte modellemesi kolaydır ve düşük sahte ışımaya sahiptir. Mikroşerit antenlerde yakınlık kuplajlı besleme, besleme hattı ile ışıma yaması arasındaki elektromanyetik kuplajı kullanırken, açık kuplajlı besleme ise enerji transferi için zemin düzleminde bir açıklık kullanır.

#### 4.4. Anten İhtiyacı

Mikroşerit yama antenlerin tasarımı, özellikle uydu iletişimi gibi yüksek frekanslı ve hassas uygulamalarda, birden fazla parametrenin dikkatlice hesaplanmasını ve optimize edilmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu tez çalışmasında, mikroşerit yama antenlerin tasarımına yönelik kapsamlı analizler yapılmış, üretim süreçleri detaylı bir şekilde ele alınmış ve antenlerin performansı titizlikle test edilmiştir.

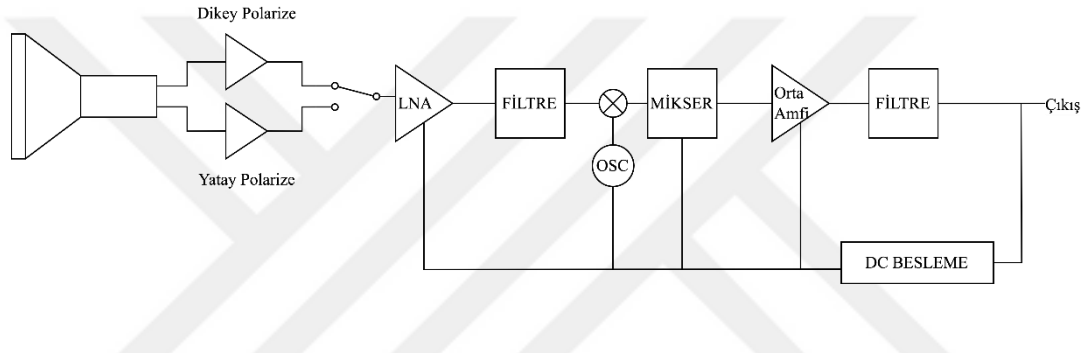
Tasarım çalışması yapılacak olan yama antenin normal yama antenlerden birtakım farkları bulunmaktadır. Yama anten 2.4 GHz frekansında uygun bir şekilde çalışabilmektedir. Ancak normal tip bir antenin kullanılması durumunda LNB'nin önü tamamen kapanacak ve downlink tarafı çalışmayacak hale gelebilecektir. Tasarımı yapılan antenlerin besleme hattı dışında bulunan diğer iki parça alanın sebebi, LNB'nin merkezinde bulunan dipol antenleri kapatmamasıdır.

Uplink ve downlink için aynı yansıtıcı çanak anten kullanılacağı için Tx yaparken kullanılacak anten yansıtıcı çanağın odak noktasında olmalıdır. Yansıtıcı çanağın odak noktası ise var olan LNB'nin bulunduğu kısımdır.

Şekil 11'de görüldüğü üzere LNB'nin içinde yatay ve dikey polarizede alıcı iki adet dipol tipinden anten bulunmaktadır. Bu antenlerin hangisinin alıcı olduğu normal şartlarda otomatik değişmektedir. Ancak bu çalışmada önceki bölümlerde bahsedilen bias tee devresinin voltajının değiştirilmesiyle, yani 13V kullanılarak dikey dipolün alıcı olarak kullanılması sağlanmıştır. Kullanılan LNB'nin iç yapısının basit bir blok şeması ise Şekil 12'de gösterilmiştir.

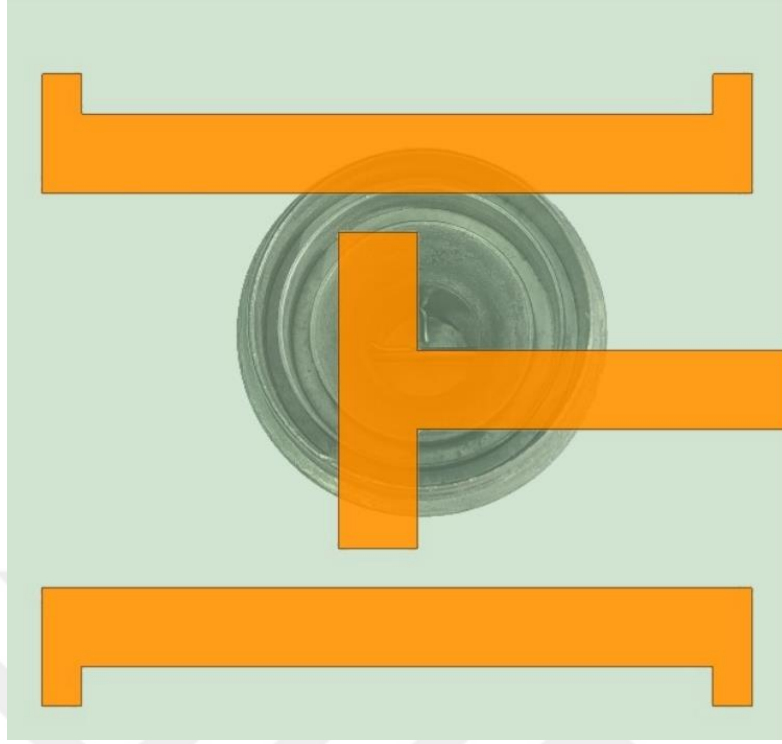


**Şekil 11. LNB Anten Yapısı**



**Şekil 12. LNB Blok Diyagramı**

Şekil 13'te olduğu üzere tasarımı yapılmış olan anten anlaşılabilirliği yüksek olması için görsel tasarım şeklinde yarı saydam olarak yerleştirilmiştir. Dikey olan dipol ortada bulunan yama yapının hemen sağ tarafında ince bir çubuk şeklinde görülmektedir. Böylece, bakır alanın kenarında kalarak üzerinde düşen sinyallerin geri yansımaları ya da üzerinde düşmemesi ortadan kalkmıştır.



**Şekil 13. LNB Önündeki Yama Anten**

Uydu iletişimde, verici ve alıcı arasındaki büyük mesafeler nedeniyle sinyalin güçlendirilmesi ve verimliliğinin artırılması kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, uydu iletişimde kullanılan uplink frekansının 2.4 GHz olduğu göz önüne alındığında, antenin çalışma frekansının bu değere göre optimize edilmesi gerekmektedir. 2.4 GHz frekansı, yüksek bant genişliği sağlaması, düşük gecikme süreleri sunması ve dünya genelinde lisanssız olarak kullanılabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir.

Anten tasarım sürecinde, elektromanyetik dalgaların yayılım özellikleri, dielektrik malzemenin elektriksel özellikleri ve antenin geometrik parametreleri gibi birçok faktör dikkate alınmıştır. Antenin boyutları, çalışma frekansıyla ters orantılı olduğundan, 2.4 GHz frekansında çalışan bir mikroşerit yama antenin boyutları uygun şekilde hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar sırasında, iletim hattı modeli ve boşluk modeli gibi analitik yöntemler kullanılmaktadır.

Tasarımda FR4 malzemesi kullanılmış olup, bu malzeme cam elyaf takviyeli epoksi bir laminattır ve dielektrik sabiti yaklaşık olarak 4.4'tür. FR4'ün seçilmesinin

başlıca nedenleri arasında düşük maliyeti, mekanik dayanıklılığı ve üretim kolaylığı bulunmaktadır. Ayrıca, FR4 malzemesinin 50  $\Omega$  empedans sağlama yeteneği, anten tasarımında empedans uyumunu kolaylaştırmaktadır. Ancak, yüksek frekanslı uygulamalarda FR4'ün dielektrik kayıp faktörü dikkate alınmalıdır, çünkü bu kayıplar antenin verimliliğini olumsuz etkileyebilir.

Antenin dış çerçevesi 100 mm x 100 mm boyutlarında belirlenmiştir. Bu boyutlar, antenin fiziksel sağlamlığını ve montaj kolaylığını sağlarken, aynı zamanda performans kriterlerini karşılamak üzere optimize edilmiştir. Antenin yama boyutları, besleme noktası konumu ve besleme hattının genişliği gibi geometrik parametreler, antenin çalışma frekansında en iyi performansı elde etmek için hassas bir şekilde ayarlanmıştır.

Çalışma sırasında Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulator) programı kullanılmıştır. Bu yazılım, elektromanyetik simülasyonlar yaparak antenin performansını tahmin etmeye olanak tanır. Simülasyonlar sırasında, farklı geometri ve parametreler üzerinde çeşitli denemeler yapılmıştır. Bu denemeler sayesinde, antenin yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ), bant genişliği, kazanç ve radyasyon paternleri gibi performans kriterleri analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, antenin gerçek dünya performansını yansıttığından, tasarım aşamasında gerekli optimizasyonlar yapılmıştır.

Anten tasarımında besleme teknikleri de önemli bir rol oynamaktadır. Mikroşerit yama antenlerde yaygın olarak kullanılan besleme yöntemleri arasında mikroşerit hat beslemesi, koaksiyel prob beslemesi, besleme hattı kullanımı ve yama üzerine doğrudan besleme gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada, empedans uyumunu sağlamak ve maksimum güç transferini gerçekleştirmek amacıyla mikroşerit besleme tekniği seçilmiştir. Besleme hattının konumu ve boyutları, antenin giriş empedansını 50  $\Omega$ 'a uyumlu hale getirmek için hassas bir şekilde ayarlanmıştır.

Antenin gerçek ortamda yapılan testi, antenin tasarım hedeflerini karşıladığını ve 2.4 GHz frekansında gönderilen RF beacon sinyalini uydura iletebildiğini göstermiştir. Ayrıca, antenin düşük yansıma katsayısı değerleri, empedans uyumunun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

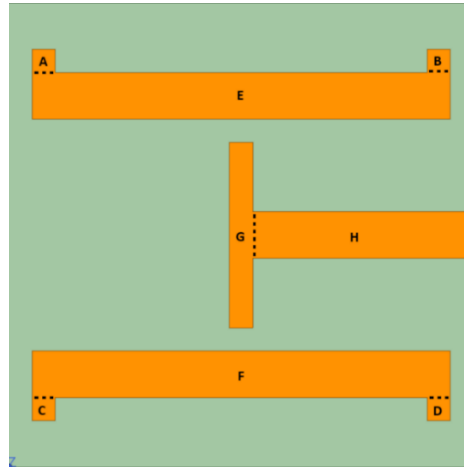
#### 4.5. Antenin Tasarlanması ve Analizi

Bilinen ve öncesinde iyi şekilde formülize edilmiş anten tasarımları yerine özgün bir tasarım yapılması ve tasarımın çeşitli parametrelerinin belirlenebilmesi hedeflenmiştir. Bu tasarım sırasında; tek bir çanak ile hem alma hem de gönderme işleminin yapılması istendiğinden alıcı tarafın, verici taraftan etkilenmemesine dikkat edilmiştir.

Farklı prototiplerde tasarlanan antenin yapısı Şekil 14’te olduğu gibi her prototip için ayrı ayrı çizdirilmiştir. Buna göre, tasarlanan anten üzerindeki A, B, C, D olarak adlandırılan alanlar yataydaki parçaların çıkıntılarının boyutlarıyla; E, H, F olarak adlandırılan alanlar yataydaki parçaların boyutlarıyla ve G olarak adlandırılan alan ise dikey yerleştirilen parçanın boyutlarıyla tanımlanan değişken parametrelerdir. Tasarlanan bu anten yapısı için belirtilen parametreler değiştirilerek çeşitli sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar **4.6 Tasarlanan Antenin Sonuçlarının Kıyaslanması** başlığı altında aşağıdaki bölümde karşılaştırılmıştır.

##### 4.5.1. Prototip 1

Prototip 1 için tasarlanan antenin yapısı Şekil 14’te gösterilmiş ve boyutları Tablo 4’te verilmiştir. Tabloda belirtilen x ve y değerleri, ilgili alanın yatay x-ekseni ve dikey y-eksenindeki milimetre cinsinden uzunluklarıdır. Yapılan simülasyonlar sonucunda yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ) ve duran dalga oranı (SWR) 1.25 – 3.5 GHz frekans aralığında sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16’da çizdirilmiştir.

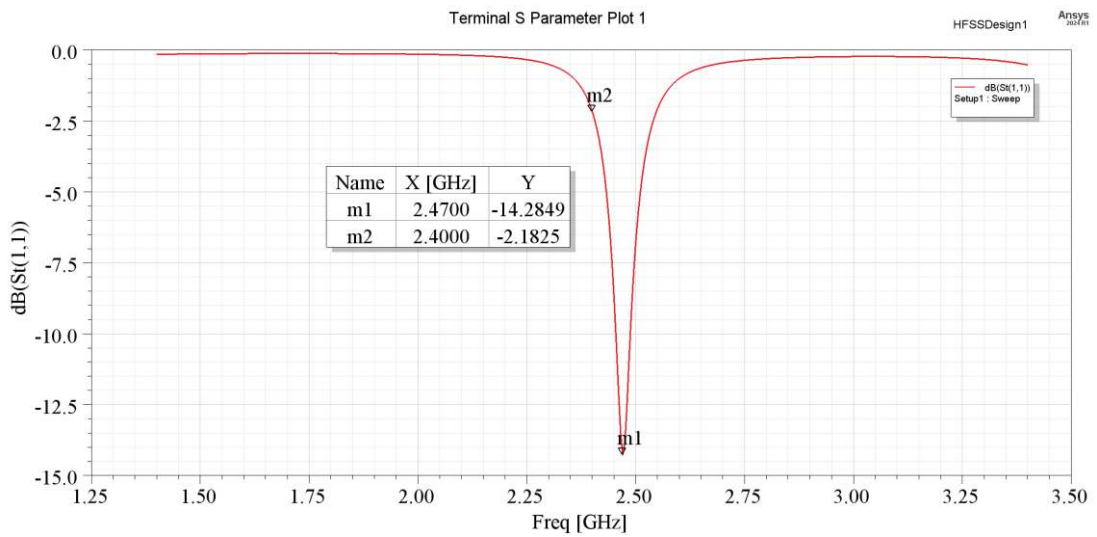


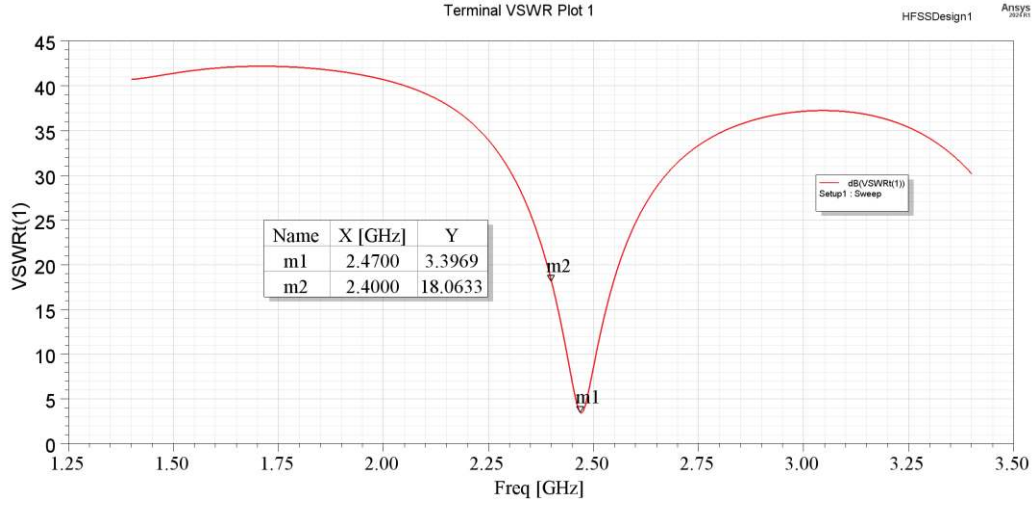
Şekil 14. Prototip 1’e Ait Anten Tasarımı

**Tablo 4. Prototip 1'e Ait Ölçüler**

| Prototip 1 |        |        |
|------------|--------|--------|
| ALAN       | x (mm) | y (mm) |
| A          | 5      | 5      |
| B          | 5      | 5      |
| C          | 5      | 5      |
| D          | 5      | 5      |
| E          | 90     | 10     |
| F          | 90     | 10     |
| G          | 5      | 40     |
| H          | 49     | 10     |

İlgili frekans aralığında çizdirilen  $S_{11}$  ve SWR grafiklerine bakıldığında minimum değerin m1 noktasıyla belirtilen 2.47 GHz frekansında olduğu görülmektedir. Yani m1 noktası  $S_{11}$  parametresinin en iyi olduğu noktayı göstermektedir. Ancak antenin çalışmasının istendiği 2.4 GHz frekansı ile arasında 70 MHz fark bulunmaktadır. Dolayısıyla çizilen grafiklere bakılacak olursa 2.4 GHz frekansındaki değerler hem  $S_{11}$  hem de SWR için oldukça yüksek olduğu açıkça gözlemlenebilir. Diğer yandan SWR'nin minimum değerinin de en iyi  $S_{11}$  değerinin elde edildiği frekans noktasında nispeten yüksek bir değerde olduğu söylenebilir.

**Şekil 15. Prototip 1'e Ait  $S_{11}$  Grafiği**



**Şekil 16. Prototip 1'e Ait SWR Grafiği**

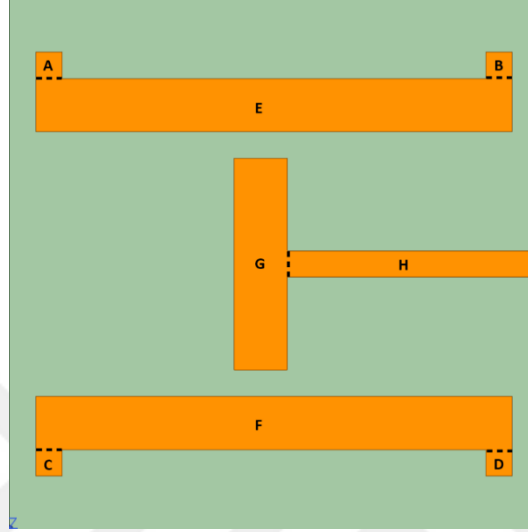
Çizdirilen her iki grafik için önemli olan bu frekans değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Tabloda belirtilen X ifadesi yatayda çizdirilen frekans değerlerini, Y ifadesi ise düşeyde çizdirilen  $S_{11}$  ve SWR değerlerini göstermektedir. Bant genişliğinin gösterildiği sütunda ise  $S_{11}$  değerinin -10 dB'ye karşılık geldiği frekans aralığının 33 MHz olduğu görülmektedir. Tüm bu sonuçları frekans yönünden karşılaştırdığımızda elde edilen en iyi  $S_{11}$  ve SWR değerlerinin olduğu frekansın istenilen frekansın çok üstünde olduğu görülmektedir. Bu sebeple, anten tasarımında belirtilen alan parametreleri değiştirilerek ikinci bir prototip çalışmasına geçilmiştir. Böylece, hangi alan parametrelerinin hangi değerleri değiştirdiği de gözlemlenebilmiştir.

**Tablo 5. Prototip 1'e Ait Minimum  $S_{11}$  ve SWR Değerleri**

| Ölçüm Noktası | X (Frekans) (GHz) | Y ( $S_{11}$ ) (dB) | Y (SWR)   | Bant Genişliği (MHz) ( $S_{11} = -10\text{dB}$ ) |
|---------------|-------------------|---------------------|-----------|--------------------------------------------------|
| m1            | 2.47              | -14.2849            | 3.3969:1  | 33                                               |
| m2            | 2.4               | -2.1825             | 18.0633:1 | -                                                |

#### 4.5.2. Prototip 2

Tasarlanan ikinci antenin prototipi Şekil 17’de gösterilmiştir. Tablo 6’da ise alan parametrelerinin x ve y uzunlukları mm cinsinden ifade edilmiştir.

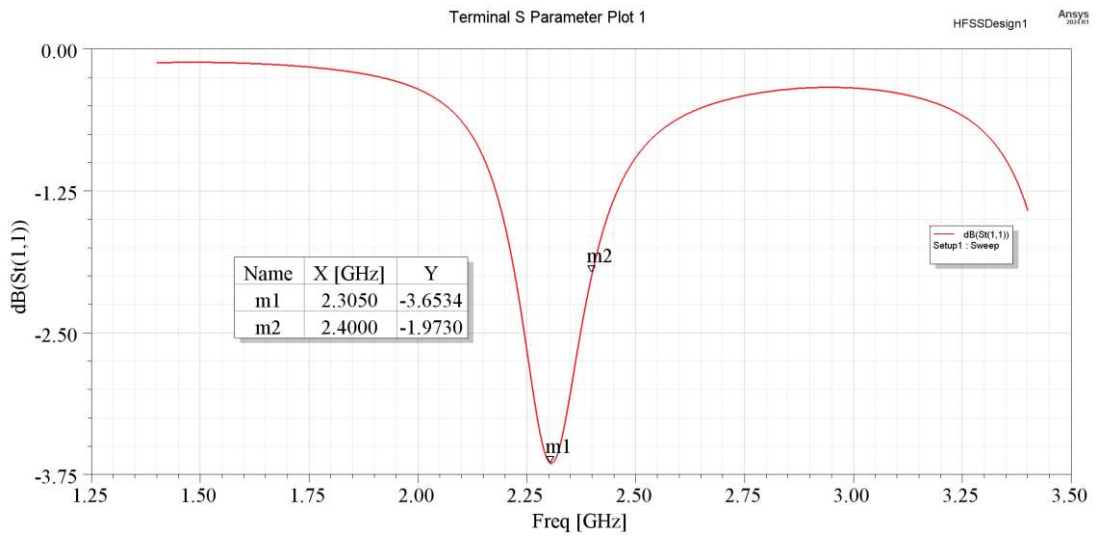


Şekil 17. Prototip 2’ye Ait Anten Tasarımı

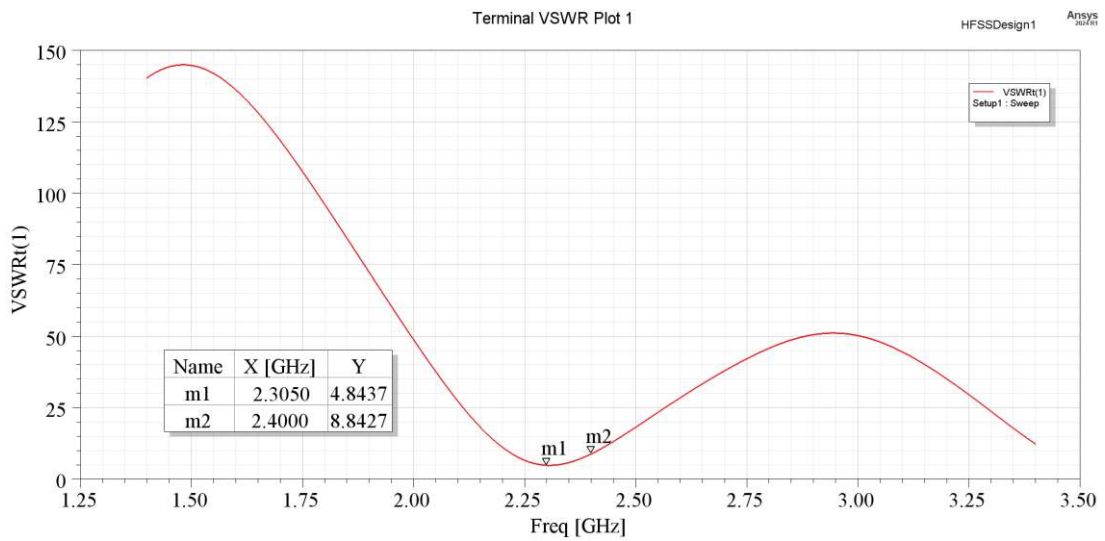
Tablo 6. Prototip 2'ye Ait Ölçüler

| Prototip 2 |        |        |
|------------|--------|--------|
| ALAN       | x (mm) | y (mm) |
| A          | 5      | 5      |
| B          | 5      | 5      |
| C          | 5      | 5      |
| D          | 5      | 5      |
| E          | 90     | 10     |
| F          | 90     | 10     |
| G          | 10     | 40     |
| H          | 49     | 5      |

Buna göre, ikinci prototipte besleme hattı üzerindeki H bölgesi 10 mm'den 5 mm'ye inceltiilmiş ve G bölgesi 5 mm'den 10 mm'ye kalınlaştırılmıştır. H bölgesinin yani ana besleme hattının inceltilmesi ve uç noktası olan G bölgesinin kalınlaştırılması en düşük  $S_{11}$  noktasını istenilen frekanstan daha düşük bir frekans noktasına çekmiştir. Yansıma katsayısının çizdirildiği Şekil 18'de görüldüğü üzere minimum  $S_{11}$  değeri birinci prototipe kıyasla -14 dB'den -3 dB'lere gelmiştir. Buna bağlı olarak Şekil 19'da çizdirilen SWR grafiği incelendiğinde birinci prototipe kıyasla bu değerin daha da arttığı görülmektedir.



**Şekil 18. Prototip 2'ye Ait  $S_{11}$  Grafiği**



**Şekil 19. Prototip 2'ye Ait SWR Grafiği**

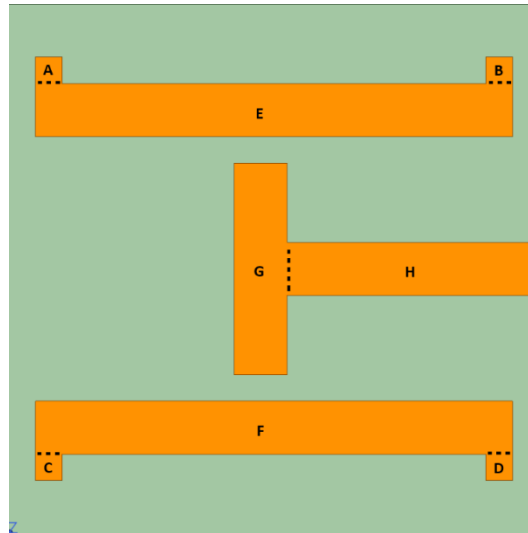
Tablo 7 ise ikinci prototip için elde edilen  $S_{11}$  değerinin hem minimum değerinin olduğu noktayı hem de istenilen 2.4 GHz frekansındaki değerini göstermektedir.  $S_{11}$  değerinin minimum olduğu frekanstaki değer -10 dB'den büyük olduğu için bu frekans noktasında bir bant genişliği belirtilmemiştir. Tablonun SWR sütununda ise her iki frekans noktasında elde edilen değerlerin yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu prototip ile istenen frekans değeri yine elde edilemediği için üçüncü bir prototip üzerinde daha çalışılmıştır.

**Tablo 7. Prototip 2'ye Ait Minimum  $S_{11}$  ve SWR Değerleri**

| Ölçüm Noktası | X (Frekans) (GHz) | Y ( $S_{11}$ ) (dB) | Y (SWR)  | Bant Genişliği (MHz) ( $S_{11} = -10\text{dB}$ ) |
|---------------|-------------------|---------------------|----------|--------------------------------------------------|
| m1            | 2.3050            | -3.6534             | 4.8437:1 | -                                                |
| m2            | 2.4               | -1.9730             | 8.8427:1 | -                                                |

#### 4.5.3. Prototip 3

Tasarlanan üçüncü antenin prototipi ise Şekil 20'de gösterilmiştir. Tablo 8'de de alan parametrelerinin x ve y uzunlukları mm cinsinden ifade edilmiştir.

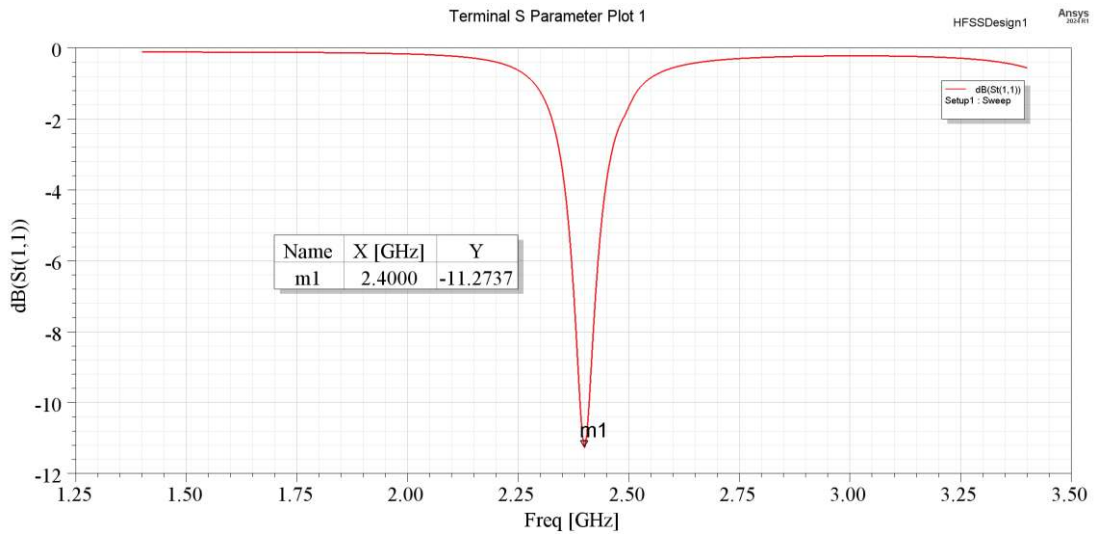


**Şekil 20. Prototip 3'e Ait Anten Tasarımı**

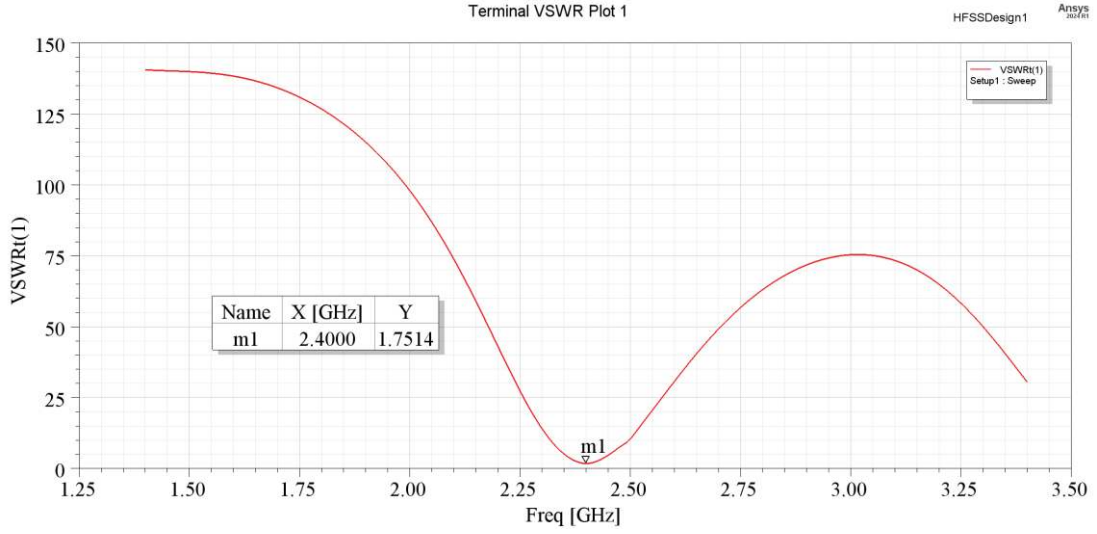
**Tablo 8. Prototip 3'e Ait Ölçüler**

| Prototip 3 |        |        |
|------------|--------|--------|
| ALAN       | x (mm) | y (mm) |
| A          | 5      | 5      |
| B          | 5      | 5      |
| C          | 5      | 5      |
| D          | 5      | 5      |
| E          | 90     | 10     |
| F          | 90     | 10     |
| G          | 10     | 40     |
| H          | 49     | 10     |

Bu prototip için ise besleme hattı üzerindeki H bölgesi 5 mm'den 10 mm'ye çıkarılmış ve G bölgesi 10 mm olarak tutulmuştur. H bölgesinin yani ana besleme hattının kalınlaştırılması ve uç noktası olan G bölgesiyle aynı kalınlıkta tutulması istenen 2.4 GHz frekansta en düşük  $S_{11}$  ve SWR değerini vermiştir. Bunun yanı sıra Şekil 21 ve Şekil 22'de görüldüğü üzere minimum  $S_{11}$  değeri -11,27 dB'lere kadar düşmüş ve SWR değeri 1.75'e inmiştir.



**Şekil 21. Prototip 3'e Ait  $S_{11}$  Grafiği**

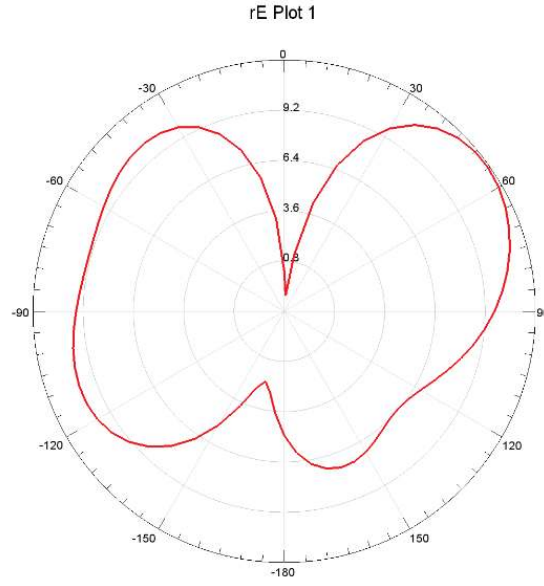


**Şekil 22. Prototip 3'e Ait SWR Grafiği**

Tablo 9 ise üçüncü prototip için elde edilen minimum  $S_{11}$  ve SWR değerlerini ve tasarlanan antenin sahip olduğu bant genişliğini göstermektedir. Buna göre, tasarlanan bu prototip antenin istenen 2.4 GHz frekansında çalışabilmesi için bu frekans noktasında elde edilen 2'nin altındaki SWR değerinin ve 20 MHz bant genişliğinin yeterli olacağı söylenebilir.

**Tablo 9. Prototip 3'e Ait Minimum  $S_{11}$  ve SWR Değerleri**

| Ölçüm<br>Noktası | X (Frekans)<br>(GHz) | Y ( $S_{11}$ )<br>(dB) | Y (SWR)  | Bant Genişliği (MHz)<br>( $S_{11} = -10\text{dB}$ ) |
|------------------|----------------------|------------------------|----------|-----------------------------------------------------|
| m1               | 2.4                  | -11.2737               | 1.7514:1 | 20                                                  |



**Şekil 23. Prototip 3'e Ait 2D Pattern**

Şekil 23'te Prototip 3'e ait 2D pattern çizimi bulunmaktadır. Ofset antenin merkezine bakan taraf theta açısının ( $\theta$ ) =  $90^\circ$  olduğu taraftır.  $\theta = 90^\circ$  iken kazanç yaklaşık 9 dB'dir. Bu grafik üzerinde dikey veya yatay düzlemdeki antenin kazancı gösterilebilmektedir. Bu grafik çizdirilirken theta ( $\theta$ ) ve phi ( $\phi$ ) açıları kullanılır. Burada,  $\theta$  açısı, dikey düzlemi ifade ederken  $\phi$  açısı ise yatay düzlemi ifade eder [32].

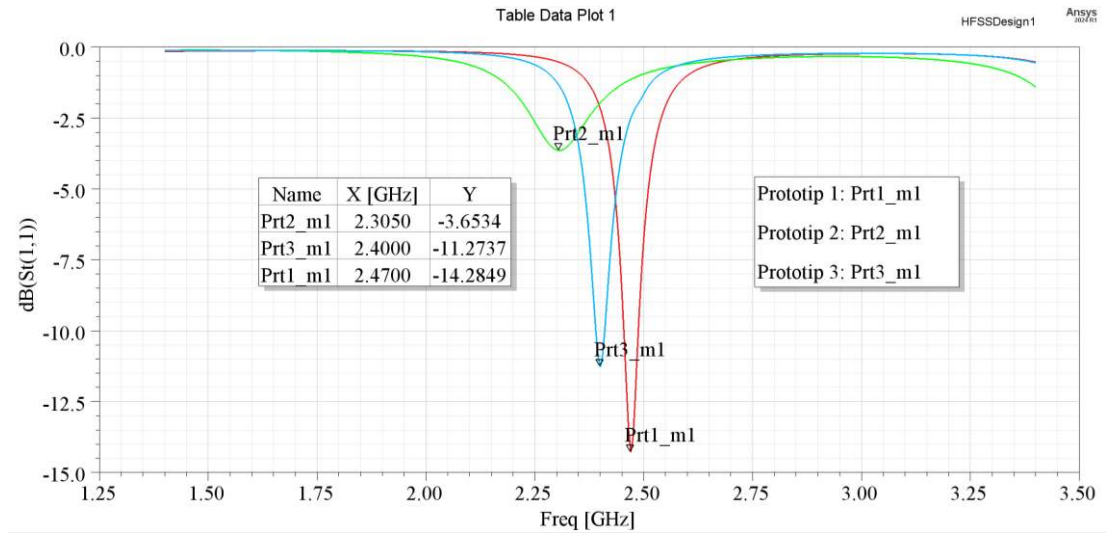
#### **4.6. Tasarlanan Antenin Sonuçlarının Kıyaslanması**

Tasarım çalışmaları yapılan antenlerin sonuçlarına bakıldığında 1 ve 2 numaralı prototipin istenilen 2.4 GHz frekansında çalışmadığı, 3 numaralı prototipin ise istenilen değerler arasında olduğu gözlenmiştir. 3 numaralı prototipin bant genişliği ( $S_{11} = 10$  dB iken ) ise 20 MHz olarak ölçülmüştür. Uydu üzerinde bulunan transponderin bant genişliği 500 kHz olduğundan, ölçümler sonucunda çıkan 20 MHz değeri fazlasıyla yeterli olacaktır. Bu sebeple tasarımsal olarak 3 numaralı prototipin  $S_{11}$ , SWR ve bant genişliği değerleri haberleşme açısından uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Aşağıdaki Tablo 10’da bu üç prototip için 2.4 GHz frekansında elde edilen değerler özetlenmiştir. Buna göre, en iyi sonuç 2.4 GHz frekansı için Prototip 3 ile elde edilmiştir. Şekil 24 ise 1.25 – 3.5 GHz frekans aralığında bu üç prototip için  $S_{11}$  değerlerinin frekansa göre çizimini göstermektedir. Burada, Prototip 1 için minimum değer Prt1\_m1 noktasıyla, Prototip 2 için Prt2\_m1 noktasıyla ve Prototip 3 için Prt3\_m1 noktasıyla belirtilmiştir. Şekilden de açıkça görüleceği üzere, tasarlanan antenin sadece H ve G alanlarında yapılan değişikliklerle, minimum  $S_{11}$  değerleri bu üç prototip için farklı frekanslarda çıkmaktadır. Bant genişlikleri açısından karşılaştırılacak olursa, Prototip 1 için en kötü, Prototip 3 için ise yeterli bir bant genişliğinin oluştuğu gözlemlenebilir.

**Tablo 10. Tasarlanan Prototiplerin 2.4 GHz’te  $S_{11}$  Değerlerinin Karşılaştırılması**

|            | $S_{11}$ (dB) | SWR       | Bant Genişliği (MHz) |
|------------|---------------|-----------|----------------------|
| Prototip 1 | -2.1825       | 18.0633:1 | -                    |
| Prototip 2 | -1.973        | 8.8427:1  | -                    |
| Prototip 3 | -11.2737      | 1.7514:1  | 20                   |



**Şekil 24. Tasarlanan Prototiplerin  $S_{11}$  Değerlerinin Karşılaştırılması**

#### 4.7. Tasarlanan Antenin Üretilmesi

Tasarımı yapılan antenin uygun ölçüleri belirlendikten sonra üretim aşamasına geçilmiştir. Burada, üretimine karar verilen anten tasarımı Prototip 3'teki tasarımıdır ve prototipin ölçüleri uygun formatta çizilerek çift kat bakır kaplı 2 katman FR4 üzerine aktarımı yapılmıştır. Buna göre, tasarlanan antenin üretim aşamaları aşağıdaki adımlar takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

**Adım 1:** Çizimi yapılan antenin transfer kağıdına baskısı alınır. Baskının alınmasının ardından FR4 üzerine koyularak sıcak ütü ile bir süre baskı uygulanır. Transferin gerçekleşmesinin ardından soğutulurak transfer kâğıdı çıkartılır.



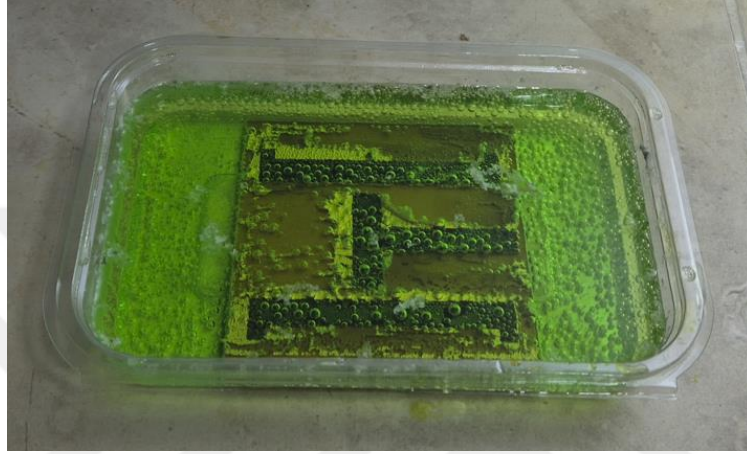
Şekil 25. Transfer Kâğıdı Kullanarak Ütü ile Plakete Basılması

**Adım 2:** Baskı yapılmış olan FR4 plakentinin üzerinde kalan artıklar çıkartılır. Siyah alanlarda eksik kalan noktalar var ise bunlar permanant kalemle tamamlanır. Ardından su ile temizliği yapılarak asit karışımı öncesi hazırlığı yapılır.



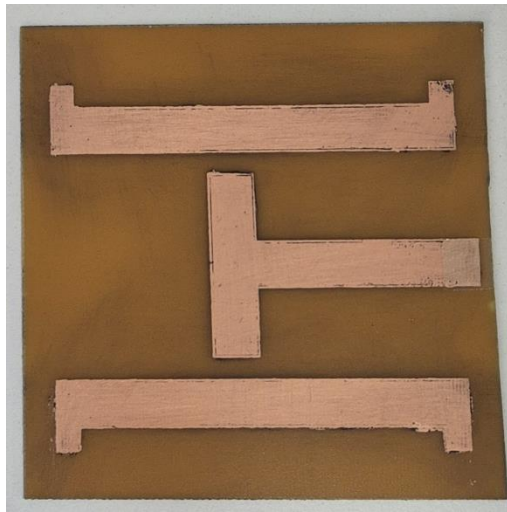
Şekil 26. Plaket Üzerinde İstenilen Alana Baskı Yapılması

**Adım 3:** Baskı yapılmış olan FR4 plaketin üzerinde istenmeyen alanların yok edilmesi için %50 Hidrojen klorür (yani tuz ruhu) ve %50 oranında Hidrojen peroksit karışımının içerisinde bir süre bekletilir ve düşük hızda vibrasyon uygulanarak tepkimenin hızlandırılması sağlanır. Şekilde görüldü üzere istenmeyen bakır yüzeylerin eridiği noktalarda hava kabarcıkları görülmektedir.



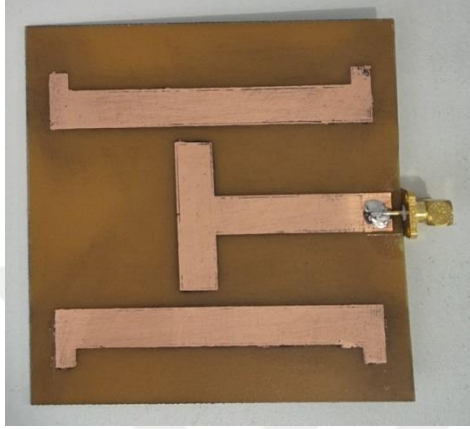
**Şekil 27. Plaketin Asit Karışımına Batırılması**

**Adım 4:** Karışımın içerisinde çıkan plaket, su ile durulandıktan sonra erimeyen bakır yüzeyin üzerinde bulunan siyah boya katmanını ince bir zımpara ile alınır.



**Şekil 28. Asit İşlemi Sonrası Plaketin Temizlenmesi**

**Adım 5:** Power amfinin çıkışına bağlamak için uygun bir konnektör antenin girişine lehimlenir. Açılan bakır yüzeyin oksidasyona uğramaması ve hava ile temasını engellemek için ince bir katman halinde vernik uygulaması yapılır. Aşağıdaki şekillerde antenin önden ve arkadan görünüşü bulunmaktadır.



(a)



(b)

**Şekil 29. Plaketin (a) Önden Görünüş (b) Arkadan Görünüş**

**Adım 6:** Uygulama testinin yapılabilmesi için LNB'nin ön tarafına yapılan bir çerçeve düzeneği ile anten yerine sabitlenir.



(a)



(b)

**Şekil 30. Antenin LNB'nin Önüne Takılması (a) Önden Görünüş, (b) Arkadan Görünüş**

#### 4.8. Tasarlanan Antenin Gerçek Ortamda Test Edilmesi

QO-100 uydusuna sinyal iletimi için gereken mikroşerit anten üretildikten sonra yer istasyonunun kurulumu ve üretilen antenin uydu haberleşme sistemi içerisindeki testi aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir.

**Adım 1:** İlk olarak offset çanak antenin kurulum süreçleri tamamlanır ve yön olarak QO-100 uydusuna çevrilir. QO-100 uydusu için yön tayininde bir LNB montajı yapılır ve anten yön bulucu cihazlar yardımıyla bu süreç tamamlanabilir. Anten yön bulucu cihazın olmaması durumunda ise uydu üzerinde hali hazırda yayında olan beacon frekansı SDR üzerinden dinlenerek bulunabilir. Uydudan gelen sinyalin LNB çıkışında dönüştüğü aralık olan 739 - 740 MHz arasını dinlenerek kolayca bulunabilmektedir. Bu frekans aralığında bulunacak beacon sinyali sonrası, antenin yönü doğru olduğu tespit edilebilmektedir.

**Adım 2:** SDR ve diğer ekipmanların içinde bulunacağı ve hava şartlarından etkilenmeyecek özelliklere sahip plastik bir kutunun antenin çok yakın bir alanına montajı yapılır. Power amfinin çıkışı ile anten arasındaki RF sinyalini taşıyacak kablounun boyunun uzaması sinyalde kayıplara neden olabileceğinden aradaki mesafe mümkün olduğunca kısa tutulmaya çalışılır. Adım 1 ve Adım 2 için görseller Şekil 31a ve Şekil 31b’ de gösterilmiştir.



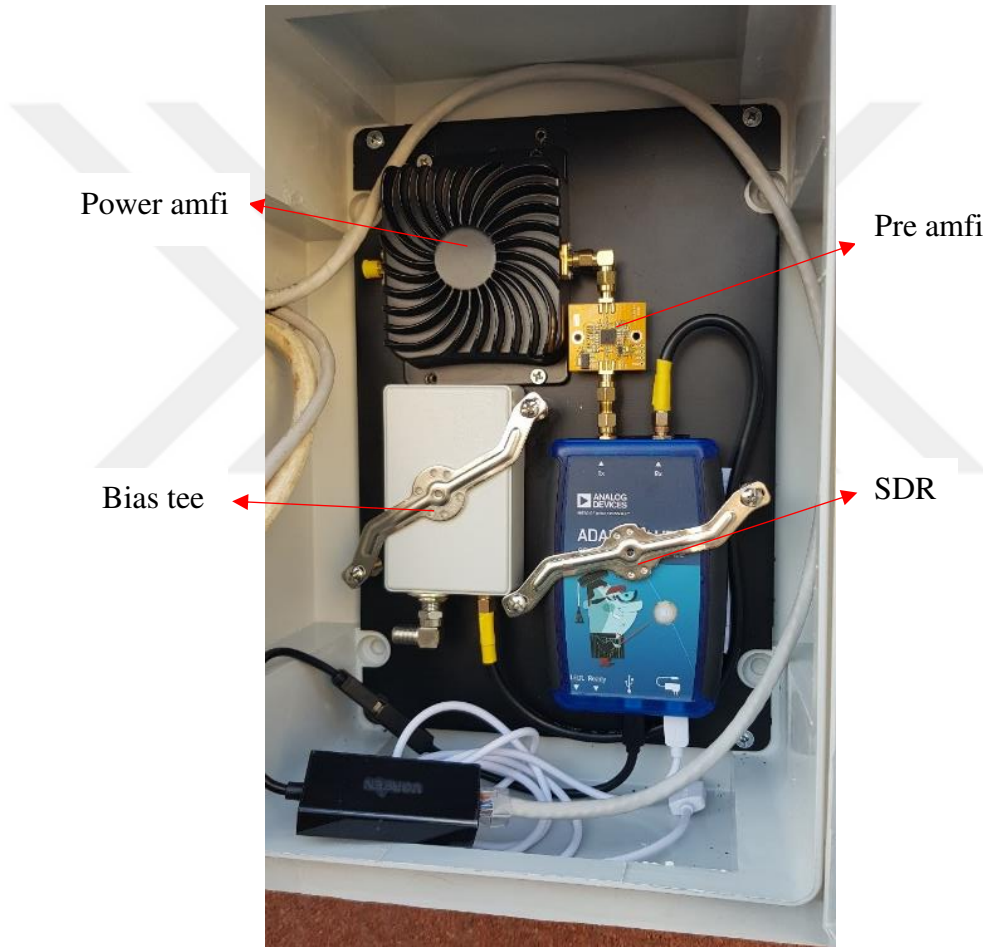
(a)



(b)

**Şekil 31. (a) Offset Çanak Antenin Kurulumu, (b) Koruma Kutusunun Takılması**

**Adım 3:** Bu kutunun içersine uplink ve downlink yapısında kullanacak olan ekipmanlar yerleştirilir. SDR cihazı üzerinde bulunan iki adet micro usb portun birinden 5V'luk güç beslemesi yapılır. Diğer USB portu ise yerel ağda erişimi kolaylaştırması için ethernet dönüştürücü ile ethernet protokolüne çevrilir. Bu sayede erişim daha kolay hale gelmektedir. Şekilde görüldüğü üzere SDR'ın Tx çıkışına öncelikle pre amfi bağlanır. Uygun konnektörler ile devamına power amfi bağlanır. Power amfinin çıkışında ise uygun bir RF kablo kullanarak antene sinyal iletilmiş olur.



**Şekil 32. Kutunun İçine Sistemin Kurulumu**

**Adım 4:** Bunların yanı sıra beyaz kutunun içerisinde gerekli olan voltaj dönüşümleri ve bias tee devresi bulunmaktadır. Sistem üstünde 13V ve 5V kullanılacağından bu dönüşümler kolayca yapılabilmektedir. Downlink tarafı için LNB den gelen kablo ilk

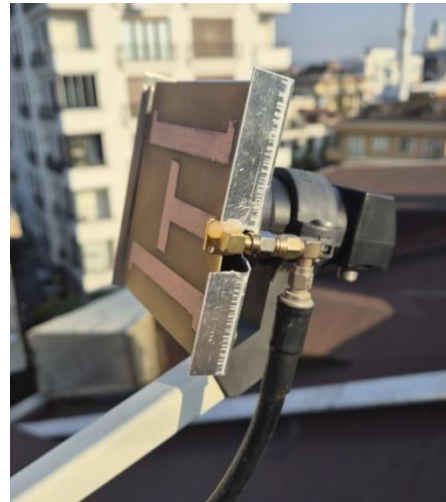
**Voltaj dağıtımı**

**Bias tee**

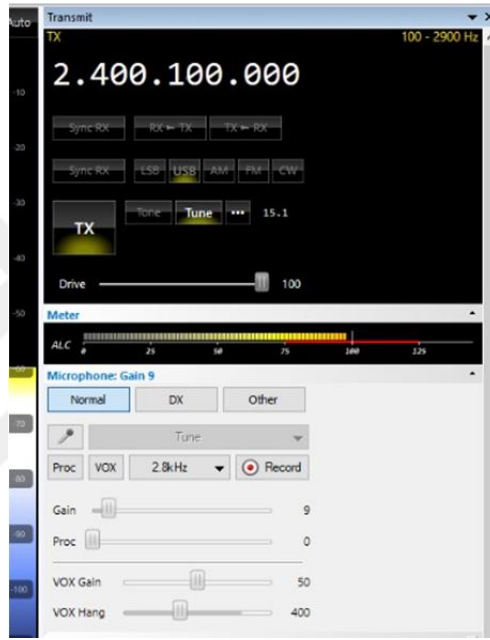
**Şekil 33. Voltaj Dağıtımı ve Bias Tee Bağlantısı**

**Adım 5:** Üretilen antenin gerçek ortam testlerinin yapılması için LNB üzerindeki ilgili alana şekillerde görüldüğü üzere montajı yapılır. Power amfiden gelen uygun özelliklerdeki RF kablo antene bağlanır. Aşağıdaki şekillerde Tx antenin LNB önüne montajının arkadan Şekil 34a ve yandan Şekil 34b’ de görülmektedir.

The left photograph shows a white satellite dish mounted on a black tripod. The dish has the 'NextStar' logo and 'SATELLITE SYSTEMS' printed on it. The right photograph is a close-up of a satellite receiver unit with a solar panel attached to its side. A black cable is connected to the receiver. The background of the right photo shows a cityscape with buildings.



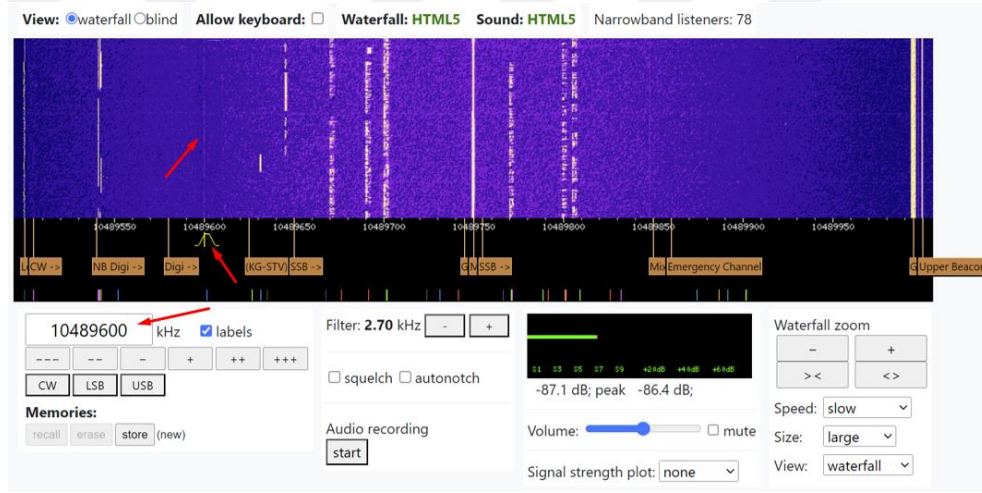
**Adım 6:** Bilgisayara kurulu olan SDR programı üzerinden ilgili frekans ayarlamaları şekildeki gibi yapılır. Bağlantıların kontrolü yapıldıktan sonra konnektörlerin sıkılığı kontrol edilir. RF konnektörlerin yeteri kadar sıkılı olmaması durumunda hem iletişim olmayacak hem de geri yansıyan RF sinyal çıkış katının üzerinde hasarlar oluşturabilecektir. SDR a bağlı olan ethernet kablosunun IP adresi arayüz üzerinden öğrenilir ve SDR Console programının girişinde bu tanımlama yapılarak cihaz bağlantısı yapılır.



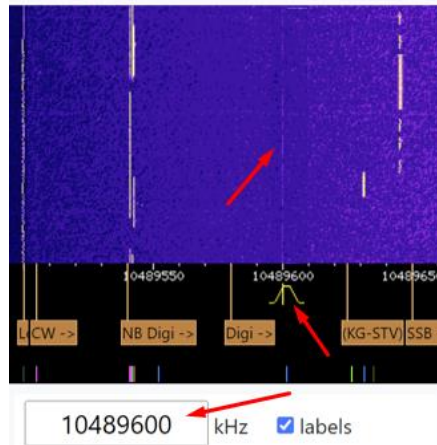
**Şekil 35. SDR Console Programı Üzerinde Frekansın Ayarlanması ve Tx Yapılması**

SDR Console programı üzerinde yapılan ayarlamaların akabinde 2400.100 MHz frekansında Beacon sinyali Tx yapılır ve uduya iletilir. Programın sağ tarafında bulunan Tx bölümü kısmında bu frekans ayarlamaları yapılarak Tx butonuna basılır ve Web SDR üzerinden ilgili frekans takip edilir. Şekil 36a'da web üzerinde gelen sinyallerin yayınlandığı Web SDR sayfası görülmektedir. Şekil 36b'de ise yayın yapmış olduğumuz 2400.100 MHz frekansının, frekans band planındaki downlink tarafında karşılığı olan 10489.600 MHz frekansı Web SDR üzerinde gözlemlenmektedir. Burada iletilen Beacon sinyali kırmızı ok ile işaretlenen kısımda görülebilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere frekans alanının bulunduğu kısımdaki sarı

imlecin hızası sinyalin uyduya ulaştığını göstermektedir. Bu sinyal ile diğer sinyalleri karşılaştırdığımızda, Şekil 36a'da görülebileceği üzere, gönderdiğimiz sinyalin kalınlığının gelen diğer sinyallere kıyasla daha dar bir alan kaplamasından dolayı bant genişliklerinde bir farklılık olduğu söylenebilir. Bu bant genişliği, tasarımı yapılan antenin sistemde çalışması için fazlasıyla yeterli olacaktır. Ancak sinyalin diğer sinyallere göre daha ince görünmesinin bir diğer sebebi tasarlanan antenin bant genişliği haricinde çıkış katında yer alan power amfi ile de alakalı olabilmektedir. Düzenekte kullanılan power amfi standart olarak kullanılan baz düzeyde bir cihazdır. Dolayısıyla, bu cihazın sinyal çıkış gücü daha yüksek çıkış gücüne sahip bir cihaz ile değiştirilmesi durumunda sinyal üzerinde bir iyileşme ve kesinti gibi problemlerin önüne geçilebileceği öngörülmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 36. Web SDR Üzerinde (a) Gelen Tüm Sinyallerin Görüntülenmesi, (b) Gönderilen Sinyalin Karşılığının Görüntülenmesi**

## SONUÇ

Bu tez çalışmasında QO-100 uydusunu kullanarak çift yönlü haberleşme yapılması için gerekli donanımsal yapılar, bu donanımsal yapıların bağlantı şekilleri ve çalışma prensipleri anlatılmış ve sinyal iletimi için gerekli 2.4 GHz frekansında çalışacak bir mikroşerit anten tasarlanarak sinyal iletiminin gerçekleşmesi sağlanmıştır.

Tasarım esnasında birçok prototip üzerine çalışılmış olup bunlardan üç tanesi burada sunulmuştur. Tasarlanan her bir anten prototipinin simülasyonu yapılarak  $S_{11}$  ve SWR değerleri frekansa karşılık çizdirilmiştir. Elde edilen sonuçlar her bir prototip için değerlendirildiğinde 3 numaralı prototipin 2.4 GHz çalışma frekansındaki  $S_{11}$  değerinin -11.2737 dB olduğu, SWR değerinin de 1.7514:1 olduğu görülmüştür. Bu çalışma frekansı için elde edilen bant genişliği ise 20 MHz değerindedir. Sinyal iletimi için QO-100 uydusunun dar bant transponderinin bant genişliğinin 500 kHz olması sebebiyle tasarlanan antenin bant genişliği yeterli olacaktır. Dolayısıyla, elde edilen bu sonuçlara göre, Prototip 3'ün QO-100 uydusuna sinyal gönderilmesi için uygun bir tasarım olduğu sonucuna varılmıştır. Karar verilen anten prototipinin üretimi gerçekleştirildikten sonra yer istasyonu düzeneğinde kullanılarak testinin yapılması sonucunda RF sinyalin temel düzeyde iletildiği beacon sinyali Web SDR üzerinden açıkça gözlemlenebilmiştir.

Mikroşerit antenlerin üretiminin kolay ve düşük maliyetli olması birden fazla noktasal yer istasyonunun kurulmasında pozitif rol oynayacaktır. Dolayısıyla, tasarlanan ve analizi yapılan bu mikroşerit antenin üretim ve kullanım kolaylığı göz önünde bulundurulacak olursa QO-100 uydusu ile olan haberleşmede kolaylıkla kullanılabileceği söylenebilir. Ayrıca farklı çıkış gücüne sahip sistemler üzerinde bu tasarlanan anten performansı gözlemlenerek, elde edilen sonuçlara göre bant genişliği, kazanç gibi anten parametreleri üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılabilir. Böylece, deprem gibi doğal afetlerde hali hazırda kullanılan haberleşme yöntemlerinin kullanım dışı kalması durumunda bu türden bir uydu haberleşmesiyle iletişimin kaldığı yerden devam etmesi sağlanabilir.

## KAYNAKÇA

- [1] B. P. Lathi ve Z. Ding, *Modern Digital and Analog Communication Systems*. Oxford University Press, 2010.
- [2] A. R. Aslan, N. Sözbir ve İ. Öz, *Uydu Haberleşmesi 101*. Ankara: Türksat A.Ş., 2024.
- [3] L. J. Ippolito Jr., *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance*. John Wiley & Sons Ltd, 2017.
- [4] J. N. Pelton, *Satellite Communications*. New York: Springer, 2012.
- [5] Es'hail, "2/QO-100." [Çevrimiçi]. Erişim: <https://amsat-dl.org/en/eshail-2-amsat-phase-4-a/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [6] Amsat-dl, "The Radio Amateur Satellite Corporation." [Çevrimiçi]. Erişim: <https://amsat-dl.org/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [7] Tamsat, "TAMSAT-Amatör Uydu Teknolojileri Derneği." [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.tamsat.org.tr/tr/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [8] M. N. Chandan ve diğerleri, "Establishment of Ground Station for Two-Way Communication via Geostationary Amateur Radio Satellite," *2022 IEEE Fourth International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAECC)*, IEEE, 2022, ss. 1-6.
- [9] W. A. Ritchie, "Minimizing Latency in Low Symbol Rate DVB-S2 Applications," *Proc. GNU Radio Conf.*, cilt 2, no. 1, ss. 6-6, Eyl. 2017.
- [10] R. Galuscak, M. Mazanek, P. Hazdra ve V. Kabourek, "A Dual-Band Reflector Feed in Coaxial Configuration for Satellite Communication," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, cilt 60, no. 5, ss. 89-94, 2018.

- [11] C. -I. Adomnitei, C. -E. Lesanu ve A. Done, “Long-Wire Directive S-Band Antenna,” *2022 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2022*, ss. 101-104, doi: 10.1109/DAS54948.2022.9786204.
- [12] D. R. Taylor, J. Walker, and B. Strunz, “Conversion of a Ku Band Link Ground Station for Ku/S Band Satellite Ranging & Time Transfer”, 2021 URSI GASS - 2021 General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, Aug. 28 - Sep. 4, 2021.
- [13] A. C. Clarke, “Extraterrestrial Relays,” *Wireless World*, cilt 51, ss. 305-308, 1945.
- [14] Robert W. Jones, *International Telecommunications Union, Handbook on Satellite Communications*, John Wiley & Sons, 2002.
- [15] D. Roddy, *Satellite Communications*, 4. baskı, New York: McGraw-Hill, 2006.
- [16] European Space Agency, “The European Space Agency: Types of Orbits,” 30 Mart 2020. [Çevrimiçi].  
[https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/Types\\_of\\_orbits](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits) (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [17] Elektrik-Elektronik Teknolojisi Müşterek Uydu Anten Tesisatı, Ankara: MEB, 2013. <https://megep.meb.gov.tr/?page=moduller> (Erişim: 03 Ağustos 2024).
- [18] European Space Agency, “The European Space Agency: Galileo Satellites.” [Çevrimiçi].  
[https://www.esa.int/Applications/Satellite\\_navigation/Galileo/Galileo\\_satellites](https://www.esa.int/Applications/Satellite_navigation/Galileo/Galileo_satellites) (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [19] O. Montenbruck ve E. Gill, *Satellite Orbits Models, Methods and Applications*, Springer Berlin, Heidelberg, 2000.
- [20] G. Maral, M. Bousquet ve S. Zhili, *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*, John Wiley & Sons Ltd, 2020.

- [21] Amsat-dl, “Neuer QO-100 Bandplan.” [Çevrimiçi]. <https://amsat-dl.org/neuer-qo-100-bandplan/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [22] RTL-SDR, [Çevrimiçi]. <https://www.rtl-sdr.com/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [23] Analog, “Adalm Pluto” [Çevrimiçi].  
<https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [24] S. Öztürk, “RTL-SDR ile Es’Hail 2/QO-100,” 6 Ocak 2021. [Çevrimiçi].  
<https://marsonearthproject.org/rtl-sdr-ile-eshail-2-qo-100-uydusunu-dinlemek/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [25] Wikipedia contributors, “Parabolic antenna,” Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2 Ocak 2024. [Çevrimiçi].  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Parabolic\\_antenna&oldid=1193246791](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Parabolic_antenna&oldid=1193246791). (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [26] “NOVATE SKY65135 RF Amplifier 2,4 GHz Module 1W.” [Çevrimiçi].  
<https://www.f5uii.net/en/actualites/novate-sky65135-amplifier-ebay-qo100-measure-tests-datasheet/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [27] Skyworks Solutions, Inc., “SKY65135-21: WLAN Linear Power Amplifier Data Sheet,” 6 Şub. 2009. [Çevrimiçi]. [https://www.f5uii.net/wp-content/uploads/2020/01/Skyworks\\_Solutions-SKY65135-21-datasheet.pdf](https://www.f5uii.net/wp-content/uploads/2020/01/Skyworks_Solutions-SKY65135-21-datasheet.pdf). (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [28] D. I. Dalgleish, *An Introduction to Satellite Communications*, Institution of Engineering and Technology, 1989.
- [29] B. R. Elbert, *Introduction to Satellite Communication*, Artech House, 1987.
- [30] D. Roddy, J. Linwood ve D. G. Long, *Satellite Communications*, 5. baskı, New York: McGraw Hill, 2024.

- [31] IEEE Standard 145-1983, “IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, cilt AP-31, no. 6, ss. 1–29, Kas. 1983.
- [32] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4. baskı, John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [33] “Anten Polarizasyonu.” [Çevrimiçi]. <https://uyduhaberlesme.com/polarizasyon/>. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [34] A. M. Mitofsky, “Antenna Characteristics.” [Çevrimiçi]. [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical\\_Engineering/Electro-Optics/Direct\\_Energy\\_\(Mitofsky\)/04%3A\\_Antennas/4.04%3A\\_Antenna\\_Ch](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Electro-Optics/Direct_Energy_(Mitofsky)/04%3A_Antennas/4.04%3A_Antenna_Characteristics)aracteristics. (Erişim: 03 Ekim 2024).
- [35] C. İbrahimpaşa ve S. Karamzadeh, “A New Patch Antenna Design for X Band Applications,” *Int. J. Electron. Mech. Mechatronics Eng.*, cilt 9, no. 3, ss. 1687-1696, 2019.
- [36] A. Rao, “*Fractal Microstrip Antenna for Enhancement of Bandwidth to Operate at Multi-Frequencies*,” Project, Visvesvaraya Technological University, Belagavi, 2019.