



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN KA
BANT FAZ DİZİNLİ ANTEN TASARIMI VE
JESENKRON UYDULARLA PERFORMANS
ANALİZİ

Batuhan KOYUNCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim
Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Batuhan KOYUNCU tarafından hazırlanan ‘‘Havacılık Uygulamaları için Ka Bant Faz Dizinli Anten Tasarımı ve Jeosenkron Uydularla Performans Analizi’’ adlı tez çalışması 24/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Lokman KUZU

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR

Üye

Prof. Dr. Emin Ünal

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. řerife Yurdagül KUMCU
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Batuhan KOYUNCU

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN KA BANT FAZ DİZİNLİ ANTEN TASARIMI VE JESENKRON UYDULARLA PERFORMANS ANALİZİ

Batuhan KOYUNCU

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR

2024, 123 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Emin Ünal

Prof. Dr. Lokman KUZU

Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR

Günümüzde havacılık endüstrisi, teknolojik gelişmeler sayesinde büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Bu dönüşümde, yolcu uçaklarındaki iletişim sistemlerinin güçlendirilmesi ve uçuş sırasında internet erişimi sağlanması önemli bir rol oynamaktadır. İnternet, hayatın birçok alanını etkilerken, seyahat sırasında da sürekli ve kesintisiz iletişim ihtiyacını karşılamak amacıyla havayolu taşımacılığında internet kullanımı önemli bir hale gelmiştir. "Havacılık Uygulamaları için Ka Bant Faz Dizinli Anten Tasarımı ve Joesenkron Uydularla Performans Analizi" başlıklı bu tez, yolcu uçakları içerisinde internet erişimini optimize etmek amacıyla uçak ile potansiyel bir joesenkron (GEO) haberleşme uydusu arasındaki iletişimi sağlayabilecek Ka Bant frekans aralığında mikroşerit dizi anten tasarımlarını ve simülasyonlarını içermektedir.

GEO uydularının havacılık sektöründeki iletişim altyapısındaki rolü de oldukça önemlidir. GEO uyduları, geniş coğrafi bölgelere hizmet sağlama kapasitesi ve yüksek bağlantı sürekliliği ile bilinmektedir. Bu tez çalışması, GEO uyduların yolcu uçakları ile yer istasyonları arasındaki iletişimlerinin analizlerini içermektedir.

Ka bant mikroşerit dizi antenler, yüksek frekanslı iletişim bantlarında geniş bant genişliği ve yüksek veri iletim hızları sunarak modern bir iletişim teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Bu antenlerin, yolcu uçaklarına entegre edilmesiyle birlikte, uçak içi iletişim sistemleri daha güçlü ve verimli bir hal almaktadır. Bu kapsamda tasarlanacak Ka bant faz dizinli mikroşerit anten tasarım optimizasyonları High Frequency Structural Simulator (HFSS) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bu simülasyon programı, antenlerin, filtre içeren karmaşık RF devrelerinin ve iletim hatlarının tasarımında yaygın olarak kullanılan bir simülasyon programıdır.

Tez kapsamında ayrıca Systems Tool Kit (STK) programı da kullanılarak potansiyel bir GEO uydu ile yolcu uçağı üzerine entegre edilmiş mikroşerit faz dizinli antenlerin haberleşme simülasyonları ve analizleri yapılacak ve link bütçesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Tezde tasarlanan 18 - 21 GHz ve 26-31 GHz frekans bandında çalışabilen iki adet faz dizinli mikroşerit anten, bu alanda yapılan iyileştirme çalışmalarına bir örnek teşkil etmektedir. Tezin sonuçları, havacılık endüstrisinin iletişim teknolojilerindeki gelişmelerine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Havacılık endüstrisinin bu teknolojik gelişmelere uyum sağlaması, daha güçlü ve güvenilir iletişim sistemleri aracılığıyla seyahat deneyimini önemli ölçüde iyileştirebilir ve sektöre yeni olanaklar sunabilir.

Anahtar Kelimeler: Anten, GEO, Ka Bant, Mikroşerit Faz Dizinli Anten, STK.

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN OF A KA BAND PHASED ARRAY SATCOM ANTENNA FOR AERONAUTICAL APPLICATIONS AND PERFORMANCE ANALYSIS WITH GEOSYNCHRONOUS SATELLITES

Batuhan KOYUNCU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL AND
ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Asis. Prof. Dr. Özgür DÜNDAR

2024, 123 Pages

**Jury
Prof. Dr. Emin Ünal
Prof. Dr. Lokman KUZU
Asis. Prof. Dr. Özgür DÜNDAR**

In today's aviation industry, a significant transformation is taking place thanks to technological advancements. In this transformation, strengthening communication systems in passenger aircraft and providing internet access during flights play a crucial role. While the internet influences many aspects of life, the use of the internet in air transportation has become increasingly important to meet the constant and uninterrupted communication needs during travel. This thesis, titled "Design of Ka-Band Phased Array Antennas for Aviation Applications and Performance Analysis with Geostationary Satellites," aims to optimize internet access within passenger aircraft by designing microstrip array antennas operating in the Ka-band frequency range that can facilitate communication between the aircraft and a potential geostationary (GEO) communication satellite.

The role of GEO satellites in the communication infrastructure of the aviation sector is also highly significant. GEO satellites are known for their capacity to provide services over wide geographical areas and high connectivity. The thesis includes analyses of communication between passenger aircraft and ground stations using these satellites.

Ka-band microstrip array antennas stand out as a modern communication technology, offering wide bandwidth and high data transmission rates in high-frequency communication bands. The integration of these antennas into passenger aircraft enhances the strength and efficiency of in-flight communication systems. The design optimization of Ka-band phased array microstrip antennas will be conducted using the High-Frequency Structural Simulator (HFSS) software. This simulation program is widely used for the design of antennas, complex RF circuits with filters, and transmission lines.

Additionally, within the scope of the thesis, the Systems Tool Kit (STK) program will be utilized to perform communication simulations and analyses for microstrip phased array antennas integrated into a passenger aircraft with a potential GEO satellite. Link budget analyses have also been conducted. The two phased array microstrip antennas designed in the thesis, capable of operating in the 18-21 GHz and 26-31 GHz frequency bands, serve as examples of improvement efforts in this field. The results of the thesis aim to contribute to the advancements in communication technologies in the aviation industry.

Adapting to these technological developments in the aviation industry can significantly enhance the travel experience through more robust and reliable communication systems, opening up new possibilities for the sector.

Keywords: Antenna, GEO, Ka-Band, Microstrip Phased Array Antenna, STK.



ÖNSÖZ

Bu tez, havacılık uygulamaları için Ka-Bant faz dizinli anten tasarımları ve GEO uydular ile haberleşmesi kapsamında performans analizlerini içermektedir. Bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında bana destek olan herkese teşekkür etmek isterim. Özellikle, Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR'a, tezimdaki rehberliği ve değerli yönlendirmeleri için çok teşekkür ederim. Ayrıca her an desteklerini yanımda hissettiğim biricik eşim ve oğluma sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Batuhan KOYUNCU
KONYA-2024



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Mikroşerit Yama Anten Tasarım Parametreleri.....	9
3.2. Mikroşerit Dizi Anten Tasarım Parametreleri	12
3.3. HFSS Simülasyon Programı	15
3.4. Hat Bütçesi Tasarım Parametreleri	23
3.5. STK Simülasyon Programı	32
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	45
4.1. Anten Tasarım Sonuçları	45
4.1.1. Gönderme Hattı Anteni Tasarımı	45
4.1.2. Alma Hattı Anteni Tasarımı	65
4.2. STK Simülasyon Sonuçları.....	85
4.2.1. Alma Hattı Hat Bütçesi Hesaplamaları.....	85
4.2.2. Gönderme Hattı Hat Bütçesi Hesaplamaları.....	95
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	100
5.1. Sonuçlar	100
5.1.1. Anten Tasarım Sonuçları	100
5.1.2. STK Simülasyon Sonuçları.....	104
5.2. Öneriler	109
6. KAYNAKLAR	112
EKLER	117
ÖZGEÇMİŞ	122

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ϵ_r	: Dielektrik Sabiti
ϵ_0	: Serbest Uzayın Dielektrik Sabiti
ϵ_{reff}	: Efektif Dielektrik Sabiti
\pm	: Artı Eksi
W	: Watt
f_c	: Merkez Frekans
f_{center}	: Tasarım Sonucunda Ulaşılan Merkez Frekans
f_{high}	: Üst Rezonans Frekansı
f_{low}	: Alt Rezonans Frekansı
μ_0	: Manyetik Geçirgenlik
c_0	: Işık Hızı
m/s	: Metre / Saniye
W/m^2	: Watt / Metrekare
h	: Dielektrik Malzeme Kalınlığı
L_{eff}	: Efektif Uzunluk
L	: Mikroşerit Anten Uzunluğu
ΔL	: Saçak Alan Uzunluğu
d	: Yama Antenler Arası Mesafe
E_1	: 1. Yama Antenin Elektrik Alanı
E_2	: 2. Yama Antenin Elektrik Alanı
E_t	: Yama Antenlerin Elektrik Alanlarının Toplamı
β	: Yama Antenler Arası Faz Farkı
r	: Uzak Alan Mesafesi
θ	: Faz Açısı
W_g	: Mikroşerit Anten X Ekseni Uzunluğu
W_l	: Mikroşerit Anten Y Ekseni Uzunluğu
S_{11}	: Geri Dönüş Kaybı
p_t	: İletim Hattı Gücü
p_r	: Alıcı Hat Gücü

g_t	: İletim Hattı Anten Kazancı
g_r	: Alıcı Anten Kazancı
λ	: Dalga Boyu
L_t	: Gönderme Hattı Kaybı
L_{FS}	: Serbest Uzay Kaybı
T_{sys}	: Toplam Gürültü Sıcaklığı
B_N	: Bant Genişliği
k	: Boltzmann Sabiti
C/N	: Taşıyıcı Gürültü Oranı
C/N_0	: Taşıyıcı Gürültü Yoğunluğu
C	: Taşıyıcı Gücü
N_0	: Birim Başına Düşen Termal Gürültü Yoğunluğu
E_b/N_0	: Enerji Bit Gürültü Yoğunluğu Oranı
$L_{pointing}$: Hizalama Kayıpları
L_{imp}	: Uygulama Kayıpları
L_{Total}	: Toplam Kayıp
$^{\circ}C$: Santigrat Derece
$^{\circ}F$: Fahrenheit
G_{LNA}	: LNA Kazancı

Kısaltmalar

2D	: 2 Boyut
3D	: 3 Boyut
5G	: 5. Nesil Haberleşme
AGI	: Analytical Graphics, Inc
BCN	: Barcelona
BER	: Bit Error Rate
BW	: Bant Genişliği
%BW	: Yüzde Bant Genişliği
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
dB	: Desibel
dB/K	: Desibel / Kelvin
dBi	: İzotropiğe Göre Desibel

dBW	: Desibel Watt
DF	: Dizi Faktörü
DR	: Veri Hızı
EIRP	: Etkili İzotropik Yayın Gücü
EM	: Elektromanyetik
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk
FEC	: Forward Error Correction
FSPL	: Serbest Uzay Kaybı
G	: Anten Kazancı
GHz	: Giga Hertz
G/T	: Gain / Temperature
GEO	: Jeosenkron Uydu
GPS	: Küresel Konumlandırma Servisi
HFSS	: High Frequency Structural Simulator
IC	: Entegre Devre
IOT	: Internet of Things
ITU	: International Telecommunication Union
Ka	: K-Üzerinde
K	: Kelvin
km	: Kilometre
KON	: Konya
Ku	: K-Altında
LAT	: Enlem
LON	: Boylam
LPDA	: Logaritmik Periyodik Antenler
MATLAB	: Mathematical Laboratory
Mbps	: Megabit per Second
MHz	: Mega Hertz
mm	: Milimetre
MRI	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
M	: Modülasyon Katsayısı
Msp	: Megasembol per Second
NASA	: National Aeronautics and Space Administration

PFD	: Güç Akı Yoğunluğu
QPSK	: Quadrate Phase Shift Keying
RF	: Radyo Frekans
RFID	: Radio Frequency Identification
RO	: Roll-Off
RS	: Reed – Solomon
Rx	: Alma Hattı
SAT	: Uydu
SAT-LON	: Uydu Konumu
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı
SR	: Sembol Oranı
STK	: Systems Tool Kit
T	: Gürültü Sıcaklığı
Tx	: Gönderme Hattı
VSWR	: Duran Dalga Oranı
WiFi	: Wireless Fidelity

1. GİRİŞ

Antenlerin tarihi, insanlığın iletişim ihtiyaçlarına cevap verme çabasıyla başlar. 19. yüzyılın başlarında, telgraf sistemleri yaygınlaşırken, sinyallerin kablosuz olarak iletilmesi gereksinimi ortaya çıkmıştır. James Clerk Maxwell'in elektrik ve manyetik teorileri birleştirmesi ile elektromanyetik dalgalar teorik olarak ispatlanmıştır. Alman bilim insanı H. Rudolf Hertz'in elektromanyetik dalgaları deneysel olarak kanıtlanması sırasında ilk ilkel antenler kullanılmıştır. 20. yüzyıl başlarında Guglielmo Marconi'nin yaptığı haberleşme deneyleri sırasında ise ilk antenler aerial ismiyle kullanılmıştır. Bunlar daha çok basit teller ve çubuklar şeklindeydi ve genellikle iletim ve alım için aynı anten kullanılıyordu (Balanis, 2016).

İkinci Dünya Savaşı sırasında, radar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte anten tasarımları daha karmaşık hale gelmiş ve yönlendirilebilir anten sistemleri geliştirilmiştir. Savaş sonrasında, askeri uygulamalardan sivil alanlara anten teknolojisi hızla yayılmıştır. Televizyon yayıncılığı, mobil iletişim ve uydu haberleşmesi gibi alanlarda antenlerin önemi artmıştır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve RF (radyo frekans) mikroelektronik teknolojilerinin gelişimi, anten tasarımında büyük bir devrim yaratmış ve antenlerin boyutunu küçültmek, verimliliğini artırmak ve çoklu bantlarda çalışabilme yeteneklerini sağlamak için yeni olanaklar sunmuştur. Günümüzde, kablosuz iletişim teknolojilerinin hızla gelişmesiyle birlikte, 5G, IoT ve akıllı şehirler gibi alanlarda kullanılan antenlerin karmaşıklığı ve çeşitliliği giderek artmaktadır (Brown, 2019). Anten tasarımı ve teknolojisi, iletişim endüstrisindeki en önemli araştırma ve geliştirme alanlarından biri olarak devam etmektedir (Adams, 2017).

Antenler, modern iletişim teknolojilerinin temel bileşenlerinden biridir ve elektriksel enerjiyi elektromanyetik dalgalar halinde iletmek veya almak için kullanılırlar. Antenlerin temel yapıları ve çeşitleri, geniş bir yelpazede bulunmaktadır.

Antenlerin temel yapısı, genellikle radyo frekansı (RF) elemanı ve besleme hattı olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. RF elemanı, antenin radyasyonunu sağlayan veya alınan sinyali işleyen yapıdır. Bu elemanlar, çeşitli geometrik şekillerde olabilirler ve farklı çalışma prensiplerine sahiptirler. Besleme hattı, RF elemanına enerji sağlayan veya antenden gelen sinyali alarak başka bir cihaza ileten bir iletişim hattıdır. Besleme hattı

genellikle koaksiyel kablo veya mikroşerit hattı şeklinde olabilir (Thompson & Nelson, 2016).

Anten çeşitleri arasında dipol antenler en basit olanlardır. Dipol antenler, bir iletkenin iki ucundan oluşur ve genellikle yatay veya dikey olarak yerleştirilirler. Geniş bir frekans aralığında kullanılabilmesi nedeniyle radyo, televizyon gibi birçok alanda tercih edilirler.

Yagi-Uda antenleri, bir dizi aktif ve pasif elemandan oluşur ve yönlendirilmiş radyo ve televizyon yayınlarında yaygın olarak kullanılırlar. Özellikle, televizyon alıcılarında ve radyo vericilerinde tercih edildiği dönemler olmuştur. Günümüz gelişen teknolojisinde kullanım alanı azalmıştır.

Parabolik reflektör antenler, odak noktasında bir besleme elemanı olan bir reflektör ile karakterizedir. Çeşitli reflektör tipleri arasında parabolik, kare ve köşegen reflektörler bulunur. Bu antenler, yüksek kazançlı ve yönlendirilmiş sinyaller için idealdir. Parabolik reflektör antenler, yüksek kazançlı yönlendirilmiş sinyaller için idealdir ve uydu haberleşmesi, televizyon yayıncılığı, uzaktan algılama ve radar sistemleri gibi alanlarda kullanılırlar (Pozar, 2012).

Helix Antenler: Spiral bir yapıya sahip olan helix antenler, genellikle yüksek kazançlı ve dar bantlı antenlerdir. Uydu iletişimi, RFID sistemleri ve hava radarları gibi uygulamalarda kullanılırlar.

Logaritmik Periyodik Antenler (LPDA): Geniş bantlı ve yönlü bir radyasyon desenine sahip olan LPDA antenler, genellikle televizyon alıcıları ve radyo iletişimi gibi uygulamalarda kullanılır.

Dielektrik Antenler: Dielektrik malzemelerden yapılan bu antenler, genellikle mikrodalga ve milimetre dalga bantlarında çalışır. Yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük kayıpları nedeniyle radar sistemleri ve tıbbi görüntüleme gibi uygulamalarda tercih edilirler.

Lens Antenler: Lens antenler, elektromanyetik dalgaları odaklamak ve yönlendirmek için dielektrik bir lens kullanır. Genellikle radar sistemleri ve mikrodalga haberleşme uygulamalarında kullanılırlar.

Her bir anten çeşidi, belirli bir kullanım alanına ve belirli bir performans gereksinimine yönelik olarak tasarlanmıştır, bu da iletişim teknolojilerindeki çeşitliliği ve ilerlemeyi yansıtmaktadır.

Mikroşerit yama antenler, kompakt boyutları, düşük maliyetleri ve yüksek verimlilikleri nedeniyle birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır. Bunlar arasında kablosuz iletişim sistemleri (WiFi, Bluetooth, GPS (Küresel Konumlandırma Servisi), cep telefonları, uydu iletişimi, radar sistemleri, tıbbi görüntüleme cihazları, havaalanı güvenlik tarama sistemleri ve endüstriyel otomasyon gibi alanlar bulunmaktadır (Zhang & Chen, 2015). Mikroşerit yama antenlerin bu çeşitli uygulama alanları, iletişim teknolojilerinin gelişmesinde ve günlük hayatımızda daha da yaygın hale gelmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Young, 2015) (Ahmed & Hussein, 2017).

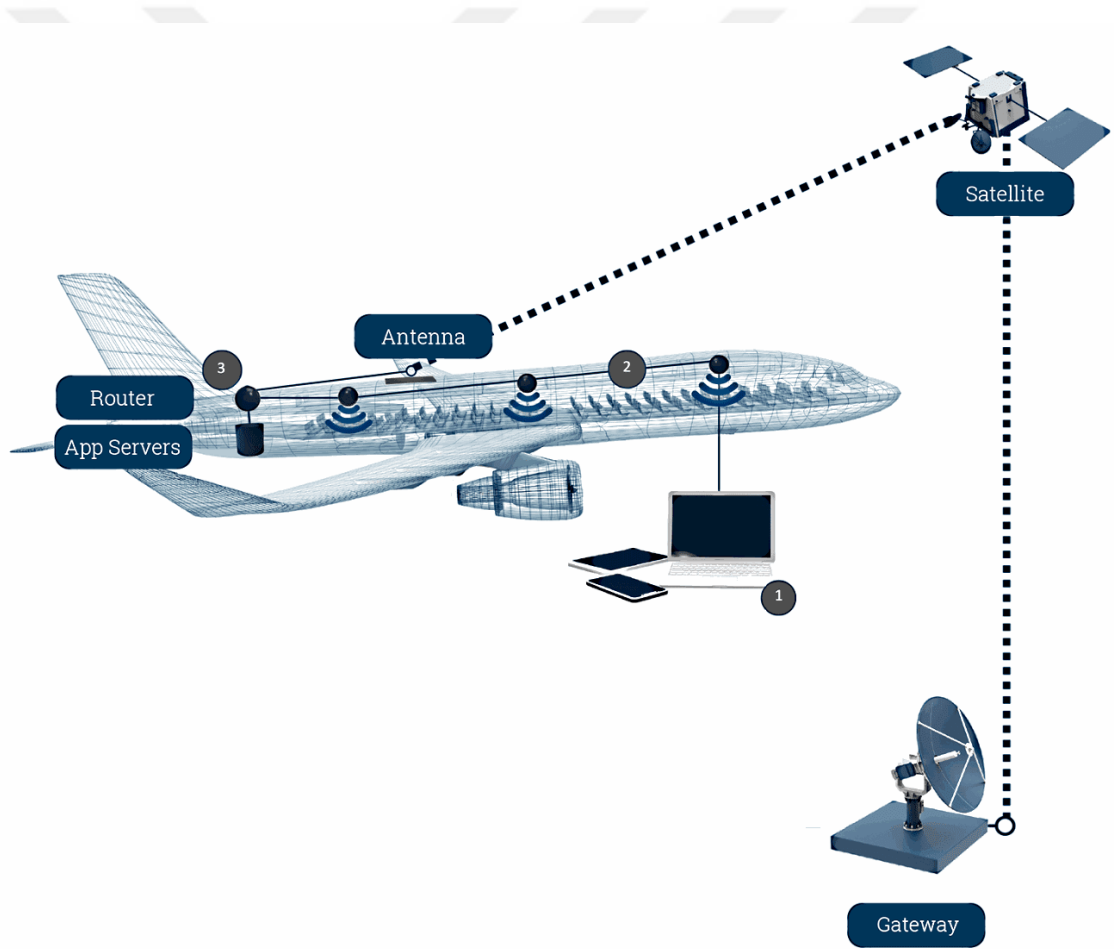
Mikroşerit yama antenlerin önemi, taşınabilir cihazlarda ve yüksek frekanslı uygulamalarda kullanım kolaylığı ve etkinliğinden gelmektedir (Yang & Li, 2020). Küçük boyutları, antenlerin cihazlara kolayca entegre edilmesini sağlar ve düşük profilleri, cihazların tasarımında esneklik sunar (Peterson & Green, 2019). Ayrıca mikroşerit yama antenler, çeşitli frekans aralıklarında çalışabilirler ve bu da geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmalarını sağlar. Bu antenlerin yüksek verimlilikleri, sinyal kalitesinin artırılmasına ve iletişim sistemlerinin performansının iyileştirilmesine katkı sağlar (Davis, 2018) (Evans, 2018).

Mikroşerit yama antenlerin gelişimi, 20. yüzyılın ikinci yarısında mikrodalga teknolojisinin ve entegre devre tasarımının gelişmesiyle başlamıştır (Martin & Lee, 2019). İlk olarak 1970'lerde geliştirilen mikroşerit yama antenler, düşük maliyetleri ve basit yapısı nedeniyle hızla popülerlik kazanmıştır. Bu antenlerin literatüre girişi, ilk başta araştırmacıların ve mühendislerin dikkatini çekmiş ve ardından birçok akademik çalışmada ve teknik dergide yayınlanmıştır. Gelişen teknoloji ve artan talep, mikroşerit yama antenlerin sürekli olarak yenilenmesine ve geliştirilmesine yol açmıştır (Kumar & Mehta, 2015) (Johnson, 2015).

Günümüzde anten teknolojinin hızla gelişmesi, iletişim ve bilgi teknolojilerinde pek çok alanda çığır açıcı yeniliklere sebebiyet vermiştir (Smith & Doe, 2018). Özellikle havacılık sektöründe yaşanan gelişmeler, yolcu uçaklarının seyahat deneyimini zenginleştirmekte ve iletişim altyapısını daha da güçlendirmektedir (Richards, 2017) (Morgan & White,

2018). Bu bağlamda, kablosuz iletişim teknolojileri, yolculara uçak içinde kolaylıkla internet erişimi sağlamak ve uçuş sırasında iletişim kurmalarını mümkün kılmak adına önemli bir rol oynamaktadır (Thompson, 2016) (Dündar & Koyuncu, 2023).

Bu tez, özellikle Ka bant frekansında tasarlanan alıcı ve verici mikroşerit dizi antenlerin kullanımıyla yolcu uçaklarında internet erişiminin sağlanabilmesi konusunu ele almaktadır. Ka bant mikroşerit dizi antenler, yüksek frekanslı iletişim bantlarındaki geniş bant genişliği ve yüksek veri iletim hızlarıyla öne çıkan modern bir teknolojidir (Parker & Miller, 2017) (Turner, 2017). Bu antenlerin, yolcu uçakları üzerinde kullanılmasıyla birlikte, uçak içi iletişim sistemleri daha güçlü ve verimli hale gelmektedir (Dündar & Koyuncu, 2023).



Şekil 1: Uçak - Uydu Haberleşmesi Yapısı

Ayrıca bu tezde uydu yer istasyonları ile uçaklar arasındaki iletişimi sağlamak üzere GEO uydularının kullanımını da incelenmektedir. GEO uyduları, geniş coğrafi bölgelere hizmet sağlama kapasitesi ve yüksek bağlantı sürekliliği ile bilinen uydular arası

iletişimde önemli bir rol oynamaktadır (Harris & Williams, 2016) (Ateş & Ürgün, 2017). Bu tez çalışmasında, yolcu uçakları ile yer istasyonları arasındaki iletişimde GEO uydularının avantajlarını değerlendirmekte ve bu teknolojinin havacılık sektöründeki potansiyel etkileri araştırılmaktadır.

Bu bağlamda, tezin temel amacı, Ka bant mikroşerit dizi antenlerin yolcu uçaklarında internet erişimine olan etkisini incelemek ve GEO uydularının iletişim altyapısındaki rolünü anlamaktır. Yapılan analizler ile, havacılık endüstrisinde daha güçlü, güvenilir ve geniş kapsamlı iletişim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak, sektördeki paydaşlara değerli bir perspektif sunmak hedeflenmektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kablosuz haberleşme günlük hayatta olmazsa olmazlarımız arasına girmiştir. Bu ihtiyaç hayatın her anında olduğu gibi yolculuklar esnasında da gerekliliğini göstermektedir. Kara ve deniz yolculuklarının yanı sıra özellikle hava yolculuklarında insanlar mobil cihazlarını kullanabilmeyi istemektedir (Dündar & Koyuncu, 2023). Bu sebeple günümüzde uçakların üzerine montajı yapılan ve uydu ile haberleşmesini sağlayan farklı çeşitlerde antenler mevcuttur (Balanis, 2016) (Chen & Gao, 2019) (Ford, 2019).

Sreejith ve arkadaşları havayolu taşıtlarında kullanılmak üzere Ku bant aralığında çalışacak anten tasarımı çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Sistemi daha efektif kullanabilmek adına çift polarizasyona sahip dairesel yapıda bir mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Anten tasarımını katlanabilir bir yapıda oluşturarak uçak aerodinamiğine olan olumsuz etkiyi de minimize etmek amaçlanmıştır. 8x8 olarak tasarlanan antenin yama katmanı olarak RO4003C ($\epsilon_r = 3.55$) seçilmiştir. Simülasyon sonuçlarında antenin 750 MHz bant genişliğine sahip olduğu ve portlar arası izolasyonunun 25 dB değerinden daha iyi olduğu görülmektedir (Sreejith, 2022).

San Diego Üniversitesi'nden, Gultepe ve arkadaşları 2021 yılında, Ka bant (22.55-23.55 GHz ve 25.5-27.5 GHz) frekans aralığını kullanarak 8 x 8 boyutlarında mikroşerit faz dizinli anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre dairesel polarizasyonda 22 dBi kazanç elde edildiği görülen çalışmanın uydu haberleşme sistemlerinde kullanılabilirliği analiz edilmiştir (Gultepe, 2021).

Yine San Diego Üniversitesi'nden Sanghamitro ve arkadaşları 2023 yılında Ka bant frekans aralığını tercih edip çift bant haberleşme yapılabilen bir mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu anten 22.55-23.55 GHz ve 25.5-27.5 GHz frekans aralığında ışınım yapabilmektedir. Diğer çalışmalara benzer şekilde Sanghamitro'de 8x8 tipte anten tasarımı yönünde tercih yapmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde antenin 23.05 GHz'de 21 dBi, 26.5 GHz'de 22.3 dBi kazançta sahip olduğu görülmüştür (Sanghamitro, 2023).

Farklı bir çalışmada ise Martinez ve arkadaşları Ku bant frekansında 8x8 mikroşerit dizi anten sistemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan ayırt edici özelliği; anten yapısının kıvrılabilir/bükülebilir tipte olmasıdır. Bu tipte bir yapısal malzeme

seçmelerinin en önemli sebebi antenin uçak üzerine montajı yapıldığında aerodinamik açıdan olumsuz etkisinin olmamasının istenmesidir. Tasarlanan antenin üretimi de gerçekleştirilmiş olup bükülebilir yapısal ile testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca simülasyon programı ile uçak modeli üzerine anten yerleşimi de yapılarak ışınma paterni analiz edilmiştir (Martinez-Vazquez, 2021).

University of Delaware'den Zhang ve arkadaşlarının yayınladığı makalede Ka bant frekansında 4x4 faz dizinli anten tasarımlarını inceleyebiliriz. Bu çalışmada 35 GHz frekansında 6 dBi kazançta sahip bir sistem tasarlandığı görülmektedir. Anten sisteminin mikroşerit besleme ile yapıldığı ve aperture mikroşerit anten mantığı ile tasarımın gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu sayede anten ışınmasının daha iyi sonuçlar verdiği S_{11} değerinin -35 dB seviyelerinde olduğu görülmektedir (Zhang, 2016).

Kai Wei Low ve arkadaşları 2021 yılında, Ka bant frekansında hem gönderme hem de alma hatları için tasarladıkları iki farklı anten yapıları görülmektedir. Gönderme anteni 1024 adet anten parçasından oluşmakta olup, çalışma frekansının 27-31 GHz olduğu analizlerde tespit edilmiştir. Bu antenin EIRP (Etkili İzotropik Yayın Gücü) değeri ise 49,5 dBW olarak analiz edilmiştir. Benzer şekilde alma anteni de 1024 adet anten parçasından oluşmaktadır. 17,7 – 20,2 GHz bant genişliğine sahip alma anten sisteminin G/T (Gain / Temperature) değeri 8,1 dB/K olarak simülasyon programında ölçülmüştür. Bu çalışmalar ile gönderme ve alma anten sistemlerinin gerçeğe uyarlanabileceği ilgili EIRP ve G/T değerleri ile ispatlanmıştır (Low, 2021a, 2021b).

Reddy ve arkadaşlarının tasarladığı 16x16 ebatlarındaki Ka bant faz dizinli anteni inceleyecek olursak; aperture tipi yapı seçilmiş olup mikroşerit besleme yöntemi kullanılmıştır. Anten 24 – 26 dBi olarak analiz edilmiş olup Ka bant frekans aralığında gerçeğe uyarlanabilecek başarılı bir anten tasarımının yapıldığı görülmüştür (Reddy, 2022).

Faz dizinli anten veya hareketli anten sistemlerinde araştırılması gereken bir farklı konu ise uçak, otomobil, gemi vb. hareket halinde haberleşme sağlanmak istenen araçların üzerine yerleştirilen anten sistemlerinin uyduyu takip edebilme yetenekleridir. Bu konuda hareketli anten sistemlerinde anten platformu motorlu olup uydu takip sinyali referans alınarak motor kontrolü ile araçlar hareket halindeyken uydu takibi gerçekleştirilebilmelidir. Bu tip anten sistemlerinde anten ofset açısı ile sinyal seviyesi ve

anten paterni değişimleri incelenmektedir (Tsuji, 2014.). Faz dizimli anten sistemlerinde uydu takibi ise faz yönlendirmesinin yani theta açısındaki değişimin sinyal seviyesi üzerindeki etkisinin incelenmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu konuda da incelemeler mevcut olup, ± 60 derecelik açısal değişimde anten kazancında 4 dB'lik farklar görüldüğü Xue ve arkadaşları tarafından analiz edilmiştir (Xue, 2022).

Antenler ile uydu takibi konusunda Ragnu ve arkadaşlarının yayınladıkları makalede, STK (Systems Tool Kit) analiz programı kullanılarak analizler yapılmıştır. Dünya üzerinde belirli bir noktadan GPS uydularının geçişleri analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda Hindistan bölgesinde yerleştirilen bir yer istasyonunun 2 günlük bir zaman aralığı içerisinde maksimum 11 minimum ise 4 GPS uydusunu aynı anda takip edebildiği simüle edilmiştir. Bağlı olunan GPS uydu sayısının yanı sıra uyduların haberleşme konisi içerisindeki süresi ile haberleşme konisi dışındaki süreleri de grafik analizler ile gösterilmiştir (Raghu & Manjunatha N, 2023).

STK programı kullanılarak yapılan başka bir çalışmada ise Anupam ve arkadaşları jeosenkron bir uydunun Ka bant frekansındaki link bütçesi analizlerini gerçekleştirmiştir. İlgili anten, taşıyıcı, modülasyon vb. parametreleri STK programına girilmiştir. Uydu ve yer istasyonu anten ve alt sistem ekipmanlarının tanımlamaları 22 dBi kazançlı, 28 GHz'de aşağı link olarak sisteme girilerek program içerisindeki kurulum tamamlanmıştır. Analizler sonucunda 3 boyutlu kazanç grafikleri ile link bütçesi çizelgeleri çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda belirlenen parametreler ile ilgili anten ve yer istasyonu haberleşmesinin sağlanabileceği link bütçesi analizleri sonucunda görülmüştür (Sharma, 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında; materyal ve yöntem bölümü içerisinde ilk olarak Ka-Bant gönderme hattı (26-31 GHz) anteni tasarımı ile Ka-Bant alma hattı (18- 21 GHz) anteni tasarımları kapsamında tek yama anten tasarım detayları ve sonrasında mikroşerit dizi anten tasarım detayları ile teorik bilgileri verilmiştir. Teorik anten tasarım detaylarının ardından anten tasarımlarının gerçekleştirildiği ve simülasyonlarının yapıldığı HFSS (High Frequency Structural Simulator) programı tanıtımı yapılmış ve anten tasarımlarının bu program aracılığı ile nasıl gerçekleştirildiğinin detayları verilmiştir.

Materyal ve yöntem bölümünün ikinci kısmında ise tasarım faaliyetleri gerçekleştirilen alma ve gönderme hattı antenlerin yolcu uçağı ile GEO uydu haberleşmesi kapsamında kullanılabilirliğinin belirlenebilmesi için hat bütçesi (link budget) hesaplamalarının teorik detaylarının incelenmesi ve sonrasında hat bütçesi hesaplarının ve uçak-uydu arası simülasyonların gerçekleştirildiği STK programının tanıtımı ve bu program aracılığı ile hat bütçesi simülasyonlarının nasıl gerçekleştirildiğinin detayları verilmiştir.

3.1. Mikroşerit Yama Anten Tasarım Parametreleri

Mikroşerit yama anten tasarımı yapılırken ilk olarak yama antenin genişliği (W) değeri hesaplanır. W değerini hesaplayabilmek için anten için kullanacağımız malzemenin dielektrik sabiti (ϵ_r) ve antenin çalışma merkez frekansı (f_r) değeri kullanılmaktadır (Robinson & Clark, 2016). Anten tasarımında havacılık ve uydu haberleşme sektörlerinde sıklıkla kullanılan 2.2 dielektrik sabiti değerine ve 1.575 mm kalınlığa sahip Rogers RT/Droid 5880 dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Anten tasarımlarında dielektrik sabiti çok yüksek bir malzeme seçilirse ışımaya düşük olacak, bant genişliği daralacak ve anten verimi düşecektir. Öte yandan dielektrik sabiti çok düşük ($1'e$ yakın) olan bir malzeme seçilirse anten boyutu büyüyecektir. Dolayısıyla 2.2 dielektrik sabiti seçimi ile optimum seviyede bir malzeme seçimi yapılmıştır.

Ayrıca bu parametrelere ek olarak serbest uzayın dielektrik sabiti (ϵ_0), manyetik geçirgenliği, (μ_0) W hesabı için gerekli diğer parametrelerdendir. Burada ışık hızı $c_0 = 3 \times 10^8 m/s$ olarak alınmıştır.

$$W = \frac{1}{(2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0})} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

W uzunluğunun hesaplanmasının ardından $\frac{W}{h} \geq 1$ koşulu sağlandığı teyit edilip efektif dielektrik sabiti ϵ_{reff} değeri 4.2 formülü kullanılarak hesaplanır (Liu & Yang, 2017).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Sonrasında 4.3 formülü kullanılarak efektif uzunluk değeri L_{eff} hesaplanır.

$$L_{eff} = \frac{c_0}{2f_c \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3.3)$$

W, ϵ_{reff} ve L_{eff} değerlerinin hesaplanmasının ardından mikroşerit anten uzunluğu olan L değerinin hesabı 4.4 ve 4.5 formülleri kullanılarak yapılmıştır.

$$\Delta L = 0,412 \times \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right) h}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (3.4)$$

$$L = \frac{c_0}{2f_c \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (3.5)$$

Anten tasarımı neticesinde mikroşerit antenin bant genişliğinin (BW) yüzde olarak (% BW) hesaplanması için ilk olarak antenin alt ve üst rezonans frekansları belirlenir. Bu frekanslar, antenin çalışma bant genişliğini oluşturur. Alt ve üst rezonans frekansları S_{11} geri dönüş kaybı grafiğinde genellikle -10 dB altında kalan aralığın başlangıç ve bitiş frekansları olarak alınır.

Alt ve üst rezonans frekanslarının bulunmasının ardından tasarım sonucunda elde edilen merkez frekansı 3.6 formülü ile belirlenir.

$$f_{center} = \frac{f_{low} + f_{high}}{2} \quad (3.6)$$

Antenin mutlak bant genişliği (BW) 3.7 formülü ile hesaplanır.

$$BW = f_{high} - f_{low} \quad (3.7)$$

Buradan da yüzde bant genişliği (% BW) 3.8 formülü ile belirlenir.

$$\%BW = \left(\frac{BW}{f_{center}} \right) \times 100 \quad (3.8)$$

Ka – Bant 'ta çalışan tipik bir mikroşerit anten için bant genişliği genellikle şu aralıklarda olur:

- Dar Bant Genişliği: %2 - %5
- Geniş Bant Genişliği: %5 - %10

Yapılan işlemler sonucunda Ka-Bant alma ve gönderme hatları için yapılan tek mikroşerit yama anten tasarım hesapları için kullanılan ve hesaplamalar sonucunda elde edilen değerleri içeren bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Anten Tasarım Parametreleri

Parametre	Ka-Bant Gönderme Hattı Anteni	Ka-Bant Alma Hattı Anteni
Dielektrik Malzeme	Rogers RT/Duroid 5880	Rogers RT/Duroid 5880
W	2,97 mm	5,9 mm
L	1,6 mm	3,9 mm
ϵ_r	2,2	2,2
h	1,575 mm	1,575 mm
f_c	29.27 GHz	19 GHz
Substrate X	15 mm	18 mm
Substrate Y	10,3 mm	19,6 mm
Bant Genişliği (BW)	1,29 GHz	1,61 GHz
Yüzde Bant Genişliği (%BW)	%4.4	%8.47
Maksimum Kazanç	8,06 dBi	10,80 dBi

3.2. Mikroşerit Dizi Anten Tasarım Parametreleri

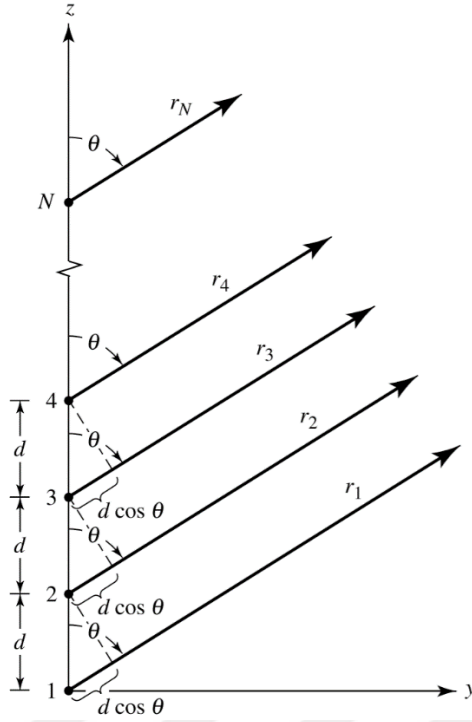
Mikroşerit yama antenlerin tek başına kullanıldıkları pek çok uygulama olmasına karşın, birden fazla mikroşerit antenin birleştirilerek birlikte tasarlanması ve farklı uygulamalarda kullanımı mümkündür. Tek bir mikroşerit antenin yetersiz kaldığı performans kriterleri dizi mikroşerit anten yapısı ile elde edilebilir (Williams, 2018).

Mikroşerit dizi antenler yüksek kazanç elde edilmesi ve yönlülük bakımından tek bir dizi antene kıyasla daha yüksek performansa sahiptir. Anten hüzmeye açısı ise tek mikroşerit antene kıyasla daha dardır. Mikroşerit dizi antenlerde kazanç ve yönlülük dizi anten sayısı ile doğrudan ilişkilidir (Lee & Kim, 2018). Anten sayısı arttıkça ışımaya yoğunluğu da artacağından kazanç ve yönlülük de artar. Uydu haberleşmesi gibi uzak mesafe haberleşmeleri için dizi anten kullanımı oldukça avantajlı olmaktadır (Gonzalez, 2018).

Dizi antenler birden fazla yama antenin birleşiminden oluştuğundan dolayı dizi anten tasarımlarında özdeş yama anten kullanımı tasarımı daha basit ve pratik hale getirecektir. Dizi antenlerin ışımaya örüntüsünü etkileyen durumlar şunlardır (Hall & Thompson, 2020);

- Her bir yama antenin fazı
- Her bir yama antenin genliği
- Her bir yama anten arası mesafe
- Dizi anten tasarımının geometrik tasarımı
- Her bir yama antenin ışımaya örüntüsü

Dizi anten tasarım konfigürasyonlarından bir tanesi dizi anten elemanlarının bir hat boyunca sıralı yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu yöntem oldukça basit ve pratik bir tasarım oluşturulması sağlamaktadır. Bu yöntemde dizi anten elemanlarının akımları aynı iken fazları farklı olmaktadır (Baker & Harris, 2016). Dizi antenin toplam alanı, tasarımda kullanılan her bir yama antenin oluşturduğu alanların vektörel toplamlarından oluşmaktadır.



Şekil 2: Doğrusal Dizi Anten Faz Diyagramı

Şekil 2’de N elemanlı özdeş yama antenlerin z eksenini boyunca belirli bir aralıkta (d) yerleştirilerek dizi yapısı oluşturulmuştur. Örneğin 2 elemanlı bu dizi anten yapısı için ışınım yapan toplam elektrik alan 3.9 formülü ile hesaplanabilir (Balanis, 2016).

$$E_t = E_1 + E_2 \quad (3.9)$$

Buradan her bir antenin uzak alan elektrik alanları toplamı 3.10 formülü ile elde edilebilir.

$$E_t = a_{\theta} j \frac{I_0 l k}{4\pi} n_0 \left[\frac{e^{-j[kr_1 - (\frac{\beta}{2})]}}{r_1} \cos\theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 - (\frac{\beta}{2})]}}{r_2} \cos\theta_2 \right] \quad (3.10)$$

Burada β yama antenler arası faz farkını ifade etmekte olup her iki anten için de aynıdır. Antenler arası mesafe d, uzak alan mesafe r’ye göre ihmal edilecek seviyededir. Bu yüzden genlik değişiklikleri için 3.11 ifadesi baz alınır.

$$r \cong r_1 \cong r_2 \quad (3.11)$$

$$\theta \cong \theta_1 \cong \theta_2 \quad (3.12)$$

Fakat faz değişiklikleri için 3.13, 3.14 ve 3.15 ifadeleri kullanılarak toplam elektrik alan değeri 3.13 formülü ile hesaplanır.

$$r \cong r - \frac{d}{2} \cos \theta \quad (3.13)$$

$$r \cong r + \frac{d}{2} \cos \theta \quad (3.14)$$

$$E_t = a_\theta j \frac{I_0 l k}{4\pi} n_0 e^{-jkr} |\cos \theta| \left[e^{\frac{j(kd \cos \theta + \beta)}{2}} + e^{-\frac{j(kd \cos \theta + \beta)}{2}} \right] \quad (3.15)$$

$$E_t = a_\theta j \frac{I_0 l k}{4\pi} n_0 e^{-jkr} |\cos \theta| 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (3.16)$$

Dizi anten için toplam dizi faktörü değeri 3.17 formülü ile elde edilir. Alandaki toplam normalize dizi faktörü ise 3.18 formülü ile bulunur.

$$DF = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (3.17)$$

$$DF_n = \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (3.18)$$

Buradan toplam elektrik alan, tek bir yama antenin referans noktasında oluşturduğu elektrik alan şiddeti ile dizi faktörünün çarpımı ile bulunabilir.

$$E_T = E_{tek anten} \times DF \quad (3.19)$$

Yukarıda belirtilen tüm ifadelerden de görüleceği üzere dizi faktörü dolayısıyla anten ışına örüntüsü genlik farkı, faz farkı ve antenler arası mesafeden etkilenmektedir.

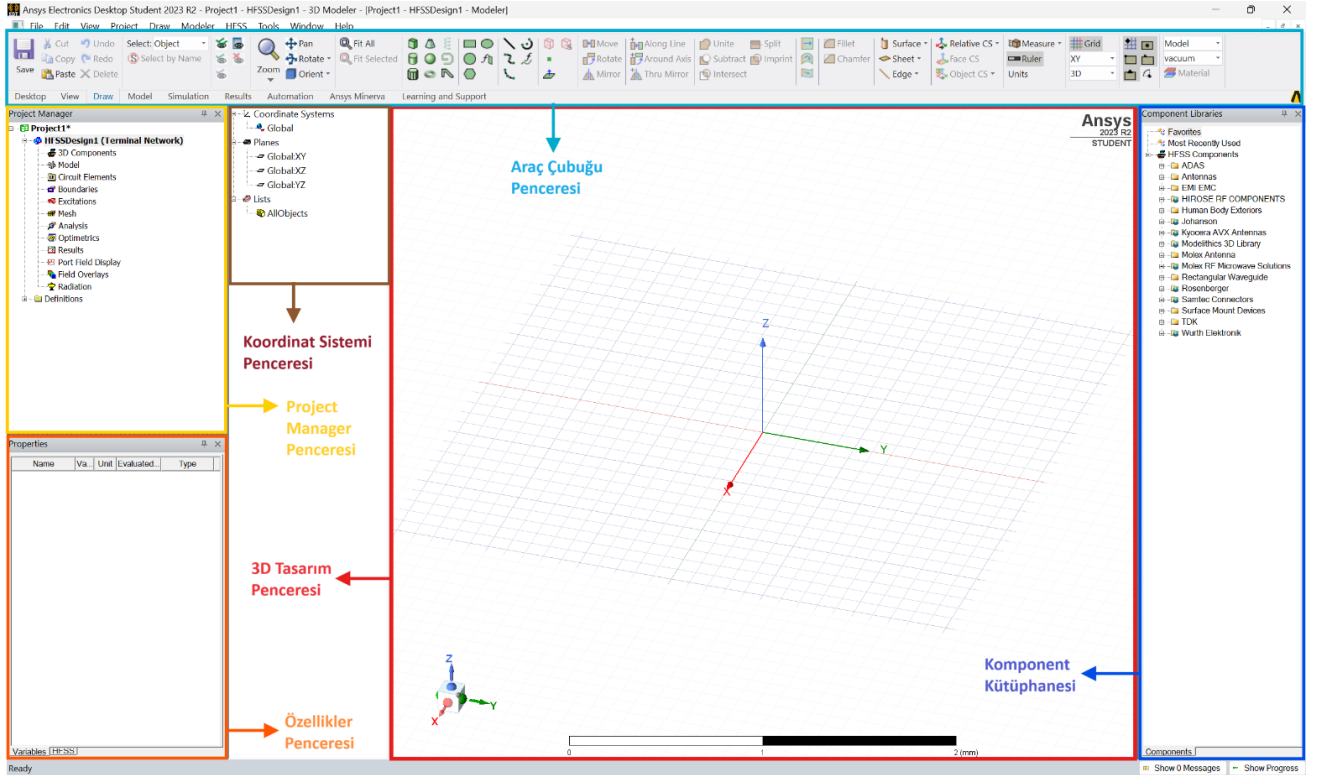
3.3. HFSS Simülasyon Programı

HFSS, Ansys tarafından geliştirilen ve yüksek frekanslı elektronik ürünlerin tasarımı ve simülasyonu için kullanılan bir 3D elektromanyetik (EM) simülasyon yazılımıdır. Antenler, anten dizileri, RF veya mikrodalga bileşenleri, yüksek hızlı ara bağlantılar, filtreler, konektörler, IC paketleri ve baskılı devre kartları gibi geniş bir ürün yelpazesini analiz etmek için kullanılır (Wang & Li, 2020).

HFSS Kullanım Alanları:

- Anten Tasarımı: Mobil cihazlar, uydu iletişimi ve radar sistemleri gibi çeşitli uygulamalar için antenler tasarlamak ve optimize etmek için kullanılır.
- RF ve Mikrodalga Bileşen Tasarımı: Filtreler, amplifikatörler, osilatörler ve karıştırıcılar gibi RF ve mikrodalga bileşenlerini tasarlamak ve optimize etmek için kullanılır.
- Yüksek Hızlı Ara Bağlantı Tasarımı: Bilgisayar yongaları ve diğer elektronik cihazlar arasındaki yüksek hızlı bağlantıları tasarlamak ve optimize etmek için kullanılır.
- Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) Analizi: Ürünlerin elektromanyetik emisyon ve parazitlere karşı uyumluluğunu analiz etmek için kullanılır.
- Biyomedikal Cihaz Tasarımı: MRI tarayıcıları ve implantlar gibi biyomedikal cihazların elektromanyetik alanlarını analiz etmek için kullanılır.

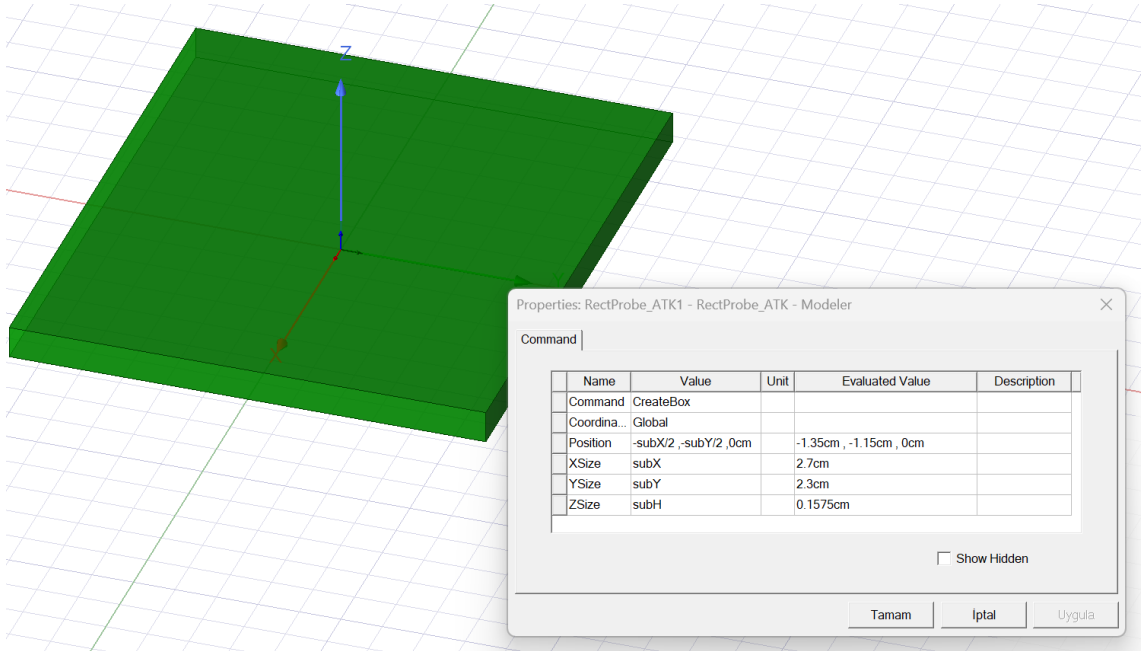
Bu bölümde 10 GHz frekansında haberleşebilecek örnek bir probe beslemeli mikroşerit yama antenin tasarımının HFSS programı ile nasıl gerçekleştirildiği ve simüle edildiği incelenmiştir.



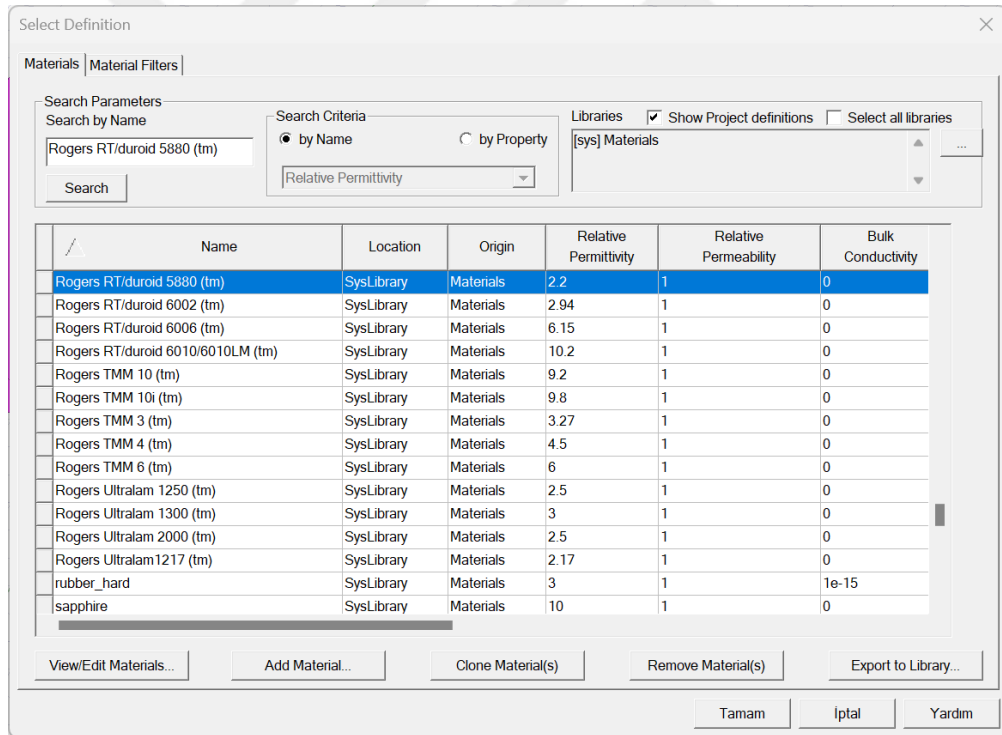
Şekil 3: HFSS Genel Arayüzü

HFSS programı genel kullanıcı arayüzü Şekil 3’de görülmektedir. Kullanıcı arayüzünde genel olarak tasarım faaliyetlerinin gerçekleştirileceği 3D tasarım penceresi, tasarım faaliyetlerinde kullanılacak araçları içeren araç çubukları penceresi, proje genel faaliyetlerinin takip edileceği project manager penceresi ile özellikle penceresi ve komponent kütüphanesinin yer aldığı pencereler yer almaktadır.

İlk olarak “Draw>Box” seçilerek anten dielektrik malzemesi çizimi yapılır. Burada önceden hesaplanan anten değerlerine göre W_g (x eksen), W_l (y eksen), h (z eksen) ölçüleri girilir (Şekil 4). Sonrasında çizdiğimiz materyale sağ tıklayarak “Assign Material” seçilerek açılan menüden tasarımda kullanılacak olan dielektrik malzeme seçilir. Bu tasarım için Rogers RT/Duroid 5880 kullanılmıştır. Şekil 5’te materyal seçim ekranı gösterilmiştir.



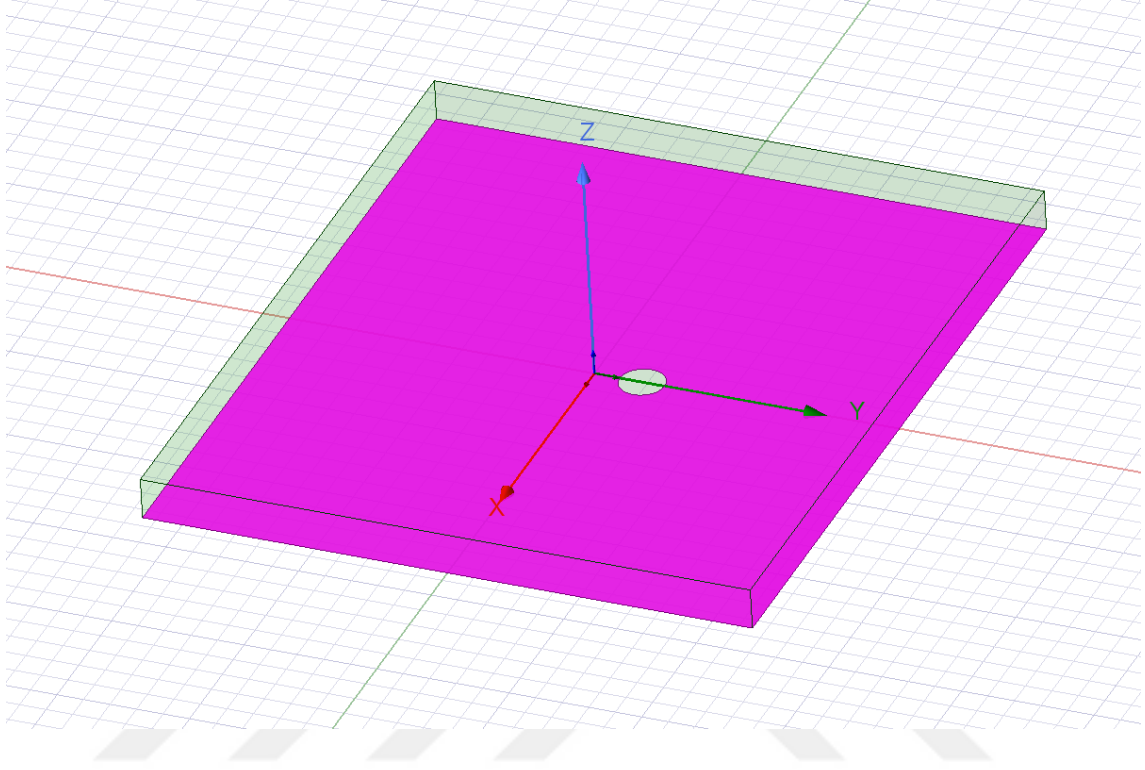
Şekil 4: Dielektrik Malzeme Çizimi



Şekil 5: Materyal Seçimi

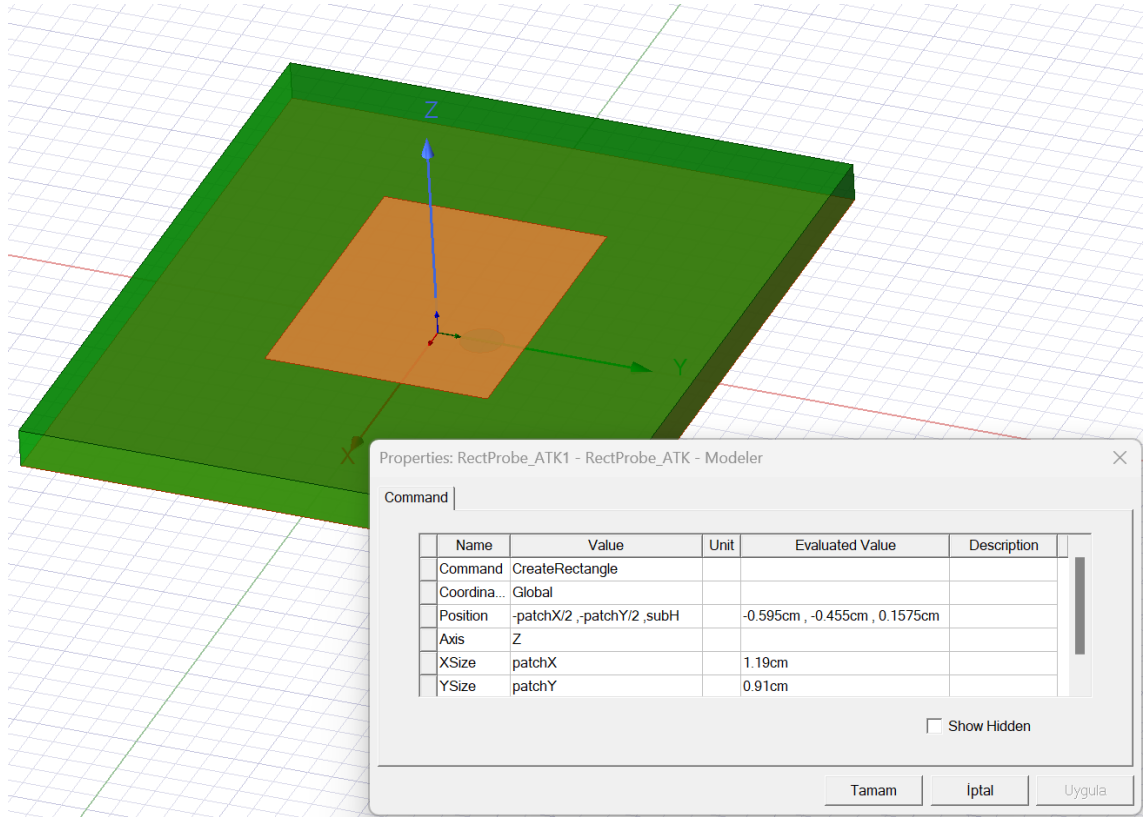
Dielektrik malzeme çizimi sonrasında toprak katmanı (ground plane) çizimi yapılır. Yine önceden hesaplanan değerlere göre “Draw > Rectangle “ seçilerek dielektrik malzemenin alt kısmına gelecek şekilde çizim yapılır. Hizalama işlemleri properties bölümünden

ayarlanır. Şekil 6'daki gibi dielektrik malzemenin altında olacak şekilde çizimi yapılır. "Assign Boundary > Finite Conductivity" menüsünden açılan pencerede malzeme "Copper (Bakır)" olarak seçilir.



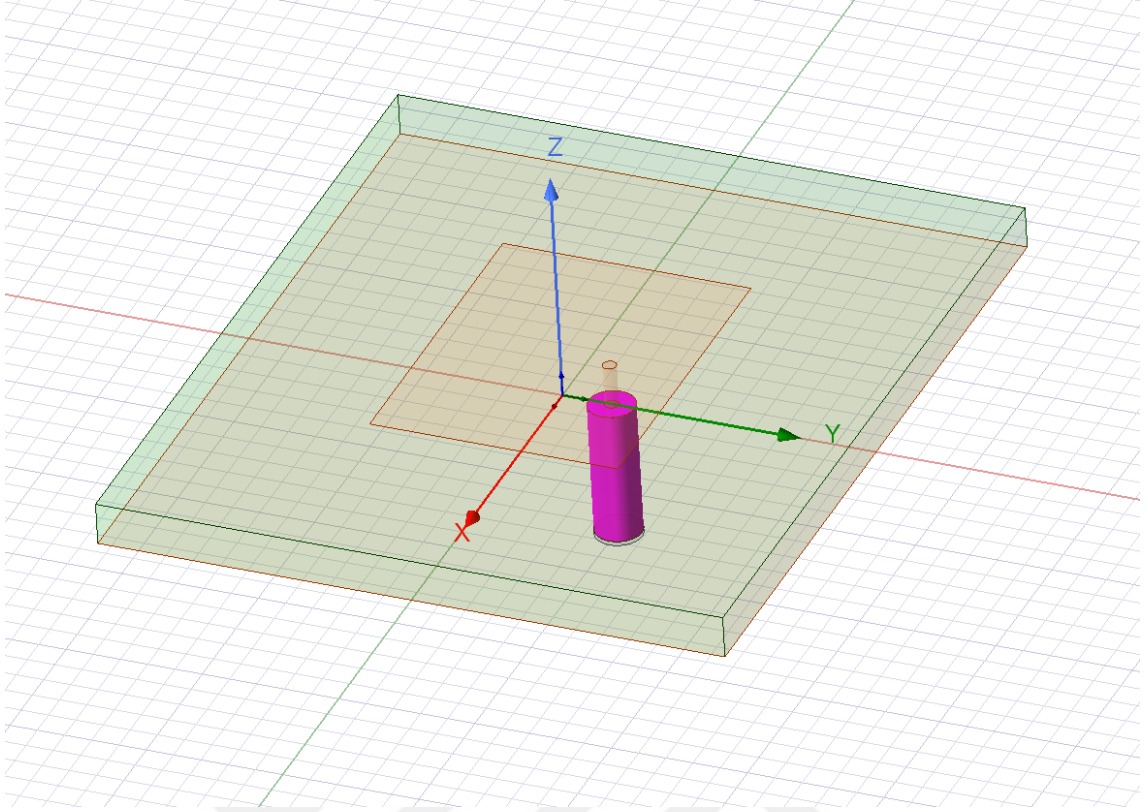
Şekil 6: Toprak Katı Çizimi

Bir sonraki aşamada ise dielektrik malzeme üzerine patch (yama) anten eklenecektir. Bu işlem için önceki adımlarda olduğu gibi yama anten ölçülerinde çizim yapılır ve dielektrik malzeme üzerinde olarak şekilde yerleştirilir. Sonrasında ise materyal seçimi bakır olarak işaretlenir. Şekil 7'de yama anten çizimi ve ölçüleri gösterilmiştir. Yama anten ve toprak katı seçilerek "Assign Boundaries > Perfect E" seçilerek ışıma yapacak katmanlar olarak belirlenir.



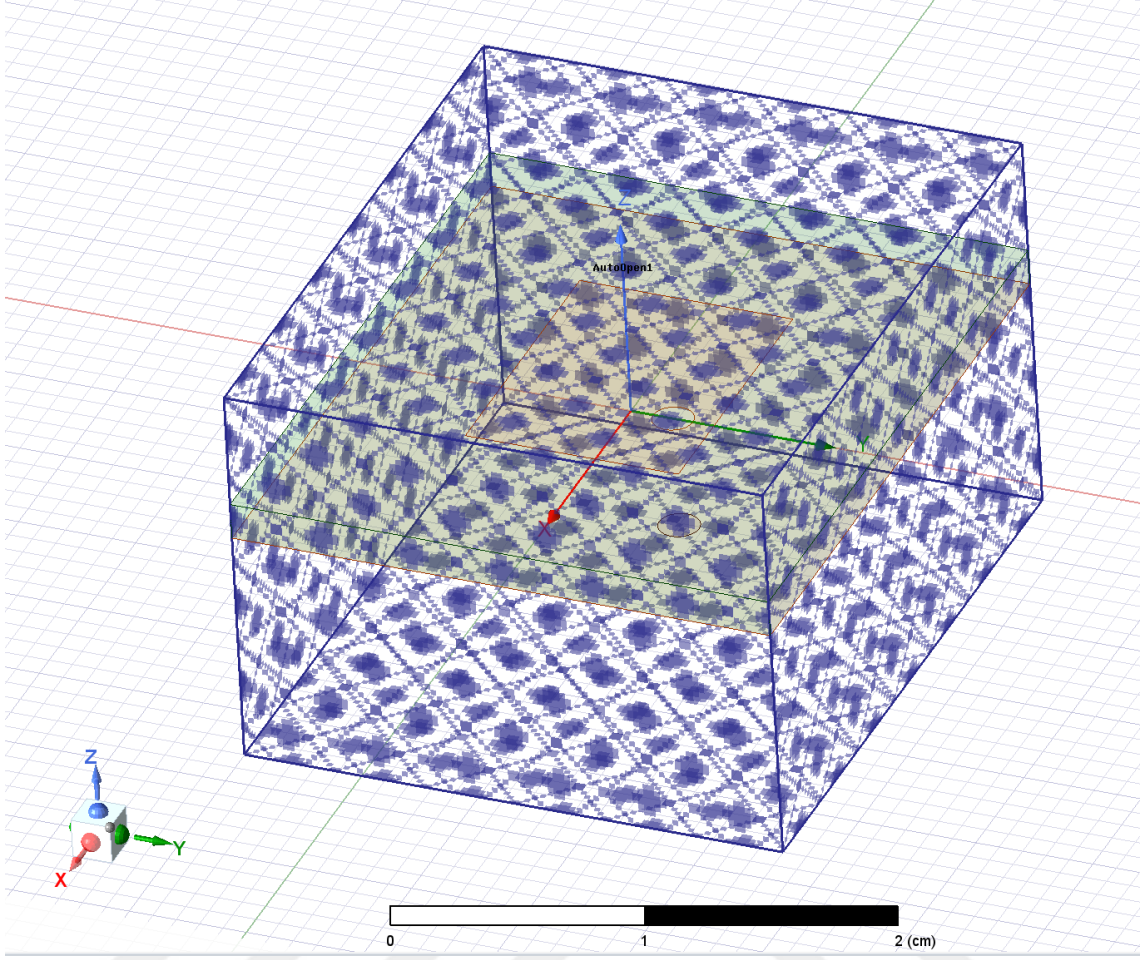
Şekil 7: Yama Anten Çizimi

Yama antenin de eklenmesinin ardından mikroşerit yama anteni besleyecek koaksiyel pin eklenmelidir. Bunun için koaksiyel probe'un toprak katı ile temas edeceği koaksiyel pin nokta toprak katından çıkarılır. Bu işlem için "Draw > Circle" seçilerek probe'un temas edeceği kısım çapında bir daire çizilir ve "Subtract" komutu ile toprak katından çıkarılır. "Draw > Cylinder" seçilerek probe boyutunda silindir çizilir. Probe içerisine aynı komutlar ile koaksiyel pin çizimi de gerçekleştirilir. İlgili silindir yapı seçilerek "HFSS > Excitations > Assign > Wave Port" seçilir. Koaksiyel probe çizimi Şekil 8'de gösterilmiştir.



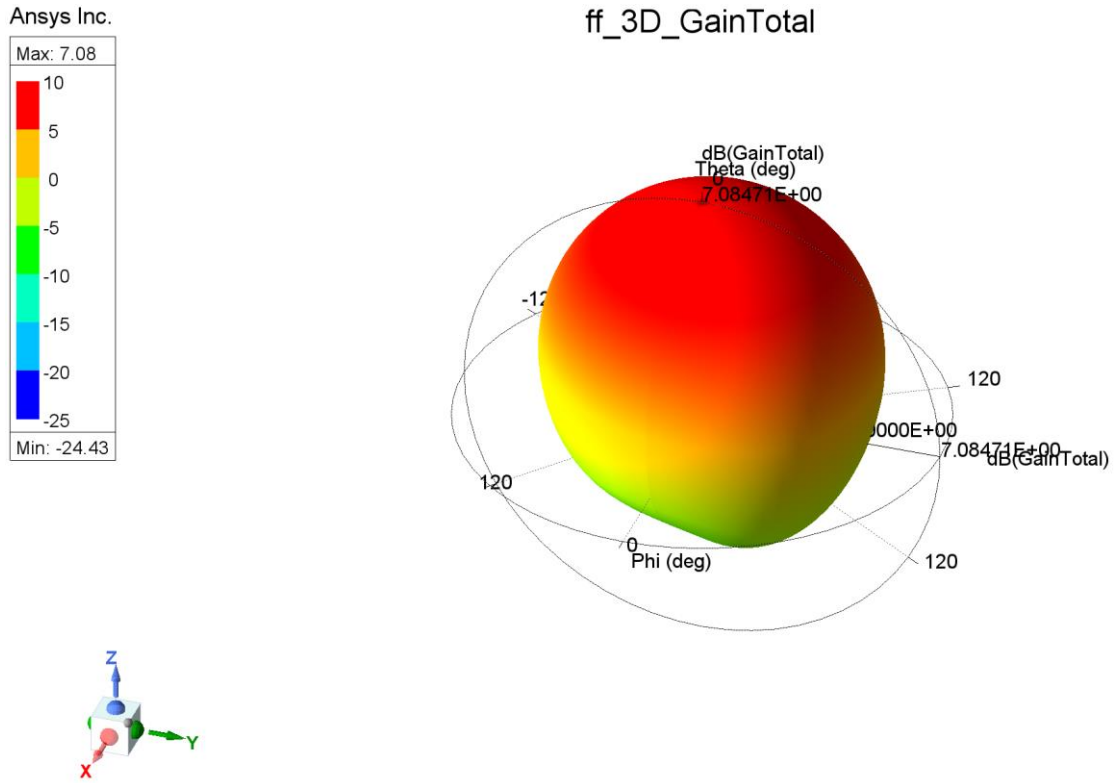
Şekil 8: Koaksiyel Probe Çizimi

Son olarak anteni test edeceğimiz ortamı oluşturmak gerekir. Bu işlem için antenin içinde kalacağı 3 boyutlu bir dikdörtgen prizma çizilir. Çizilen dikdörtgen prizma “Assign Boundary > Radiation” olarak ışımanın yapılacağı alan olan belirlenir. Malzeme seçim ekranından ise “air (hava)” seçilerek ortam belirlenmiş olur.

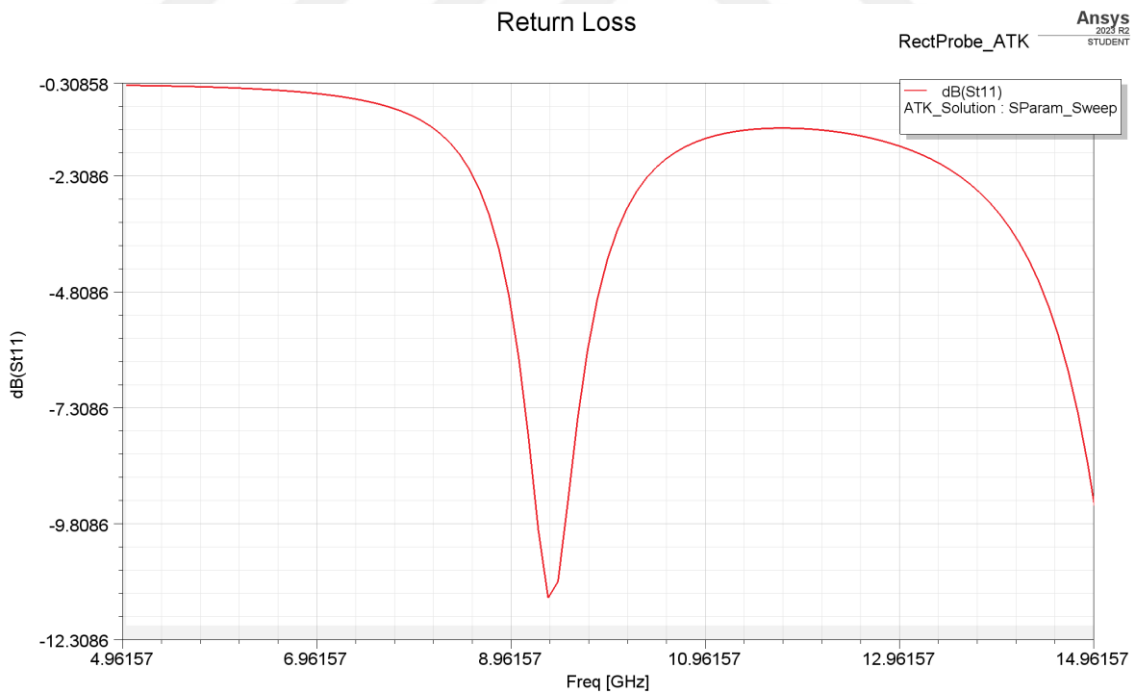


Şekil 9: Radyasyon Kutusu

Tasarım işlemlerinin tamamlanmasının ardından simülasyon parametreleri ve ayarlamaları gerçekleştirilir. Project Manager menüsünden “Analysis > Add Solution Setup > Solution Frequency” kısmına antenin çalışma frekansı girilir. “Analysis > Add Frequency Sweep > Fast” seçilerek sonuçlar çıkartılırken 1-10 GHz aralığında 0.1 GHz aralıklar ile yazdırma işlemi yapılacağı burada belirlenir. Tercihe göre bu değerler tasarımcı tarafından değiştirilebilmektedir. Ayarlar tamamlandıktan sonra “Validate” seçilerek simülasyona hazır olup olmadığı kontrol edilir. Herhangi bir hata ile karşılaşılmadı ise “Analyze All” seçilerek simülasyon başlatılır. İstenilen sonuçları “Results” bölümü altında “Create” seçilerek oluşturulabilir. Örnek olarak oluşturulan geri dönüş kaybı (return loss – S_{11}) ve kazanç (gain) grafikleri Şekil 10 ve Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 10: Mikroşerit Anten Kazanç Grafiği



Şekil 11: Mikroşerit Anten S(1,1) Grafiği

3.4. Hat Bütçesi Tasarım Parametreleri

RF link bütçesi, uydu haberleşmesi gibi uzak mesafe iletişim sistemlerinde iletim ve alım işlemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gereken tüm parametrelerin analiz edilerek bir bütçe oluşturulmasıdır. Bu bütçe, sistemin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için gerekli olan güç, sinyal seviyesi, bant genişliği ve diğer iletişim parametrelerini içerir (Kraus, Marhefka & Khan, 2002). RF (Radyo Frekansı) link bütçesi, uydu haberleşmesi gibi uzak mesafe iletişim sistemlerinde oldukça önemlidir çünkü iletişim sistemlerinin doğru bir şekilde çalışması için gereken minimum sinyal gücünü ve bant genişliğini belirler (Patel & Rao, 2017). RF link bütçesi hesaplamalarına ihtiyaç duyulmasının temel nedenleri şunlardır:

Sinyal Kalitesi ve Güvenilirliği: Uydu haberleşmesi gibi uzak mesafe iletişim sistemlerinde iletilen sinyalin yeterli kalitede ve güvenilirlikte olması önemlidir. RF link bütçesi, iletişim sistemlerinin sinyal kalitesini sağlamak için gerekli olan minimum güç seviyesini belirler.

Bant Genişliği Yönetimi: RF link bütçesi, iletişim kanallarının etkin bir şekilde yönetilmesini sağlar. Belirli bir bant genişliği içinde iletişim kanallarının verimli bir şekilde kullanılabilmesi için bant genişliği gereksinimlerini belirler.

Maliyet ve Verimlilik: RF link bütçesi hesaplamaları, iletişim sistemlerinin maliyet etkinliğini artırır. Gereksiz güç ve bant genişliği kullanımını önleyerek, sistemlerin daha verimli çalışmasını sağlar.

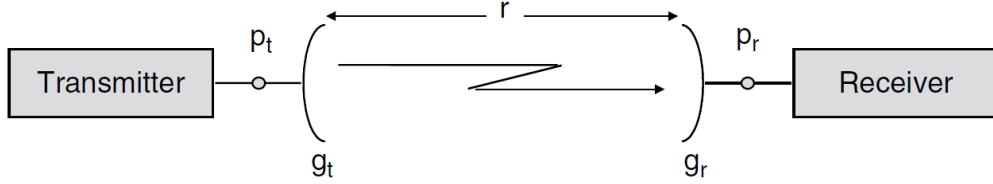
RF haberleşme genel yapısı Şekil 12’de gösterilmiştir. RF link bütçesi hesaplamaları için alıcı ve verici taraflarda aşağıdaki değerlere ihtiyaç duyulur:

Verici Tarafta:

- İletilecek sinyalin frekansı ve gücü
- Anten kazancı ve yönelimi
- Modülasyon türü ve verici ekipmanın özellikleri
- Bozucu faktörler ve atmosfer koşulları

Alıcı Tarafta:

- Alıcının hassasiyeti
- Alıcının gürültü figürü
- Alıcının bant genişliği gereksinimi
- Alıcı antenin kazancı ve yönelimi
- Alıcı sisteminin diğer özellikleri



Şekil 12: RF Haberleşme Genel Yapısı

RF haberleşmesi kapsamında Şekil 12’de belirtilen parametreler şu şekildedir; p_t = iletim hattı gücü (watt), p_r = alıcı hat gücü (watt), g_t = iletim hattı anten kazancı (dBi), g_r = alıcı anten kazancı (dBi), r = alıcı ve verici antenler arası mesafe (km). Bu bölümde gönderme hattı anteni bu tez çalışması kapsamında tasarlanan 8x8 faz dizinli Ka bant gönderme anteni, örnek bir GEO uydu üzerinde ise Ka bant alıcı anteni kullanılarak örnek teorik link bütçesi hesabı yapılacaktır.

Tasarlanan antenin çalışacağı merkez frekans $f_c = 27,45 \text{ GHz}$ olacaktır. İlk olarak çalışılacak frekanstaki dalga boyu 3.20 formülü ile bulunur. Burada λ dalga boyu, c_0 ışık hızını ifade etmektedir.

$$\lambda = \frac{c_0}{f_c} \quad (3.20)$$

Buradan dalga boyu 0,0109 m olarak bulunur. Sonrasında hat bütçesinin önemli parametrelerinden biri olan EIRP değeri hesaplanır. EIRP, bir antenin belirli bir yönde verdiği radyasyon gücünü ölçer (Stutzman & Thiele, 2012). EIRP değeri 3.21 formülü ile hesaplanmaktadır.

$$EIRP = P_t + G_t - L_t \text{ (dB)} \quad (3.21)$$

Burada L_t gönderme hattı kaybını ifade etmektedir. Gönderme hattı çıkış gücü 27,2 dBW, anten kazancı 24,04 dBi ve $L_t=0,2$ dB alındığında EIRP değeri 51,04 dBW olarak bulunur. Bir başka parametre ise Güç Akı Yoğunluğu (Power flux density, PFD)'dur. Güç Akı Yoğunluğu, bir alan içindeki elektromanyetik enerji yoğunluğunu ölçen bir terimdir. Genellikle elektromanyetik dalgaların belirli bir noktadaki yoğunluğunu ifade etmek için kullanılır ve watt/metrekaire (W/m^2) ile gösterilir. Gönderme hattı anteninden uydu antenine ulaşan PFD değeri 3.22 formülü ile hesaplanır.

PFD değerinin hesaplanması için uydu ile uçak arası mesafenin belirlenmesi gerekmektedir. Yolcu uçağı Konya lokasyonundan Barselona lokasyonuna doğru yolculuk yapacağından dolayı her iki konumda da uydu ile uçak arası mesafe farklı değerlerde olacaktır. Bu farklılık hat bütçesi tasarım parametrelerini etkileyecektir. Hesaplamalarda kullanılacak bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2: Konya ve Barselona Kentleri İçin Parametreler

Parametreler	Değerler
Enlem (Konya)	37,87°K
Boylam (Konya)	32,48°D
Enlem (Barselona)	41,38°K
Boylam (Barselona)	2,17°D
Uydu Yörüngesi	41° D
Dünya'nın yarıçapı (R)	6371 km
GEO uydusunun yüksekliği (H)	35786 km

İlk olarak Konya lokasyonu için uydu ile uçak arasındaki mesafe (slant range) bulunacaktır. Merkezi açı değeri (θ) 3.22 formülü ile elde edilir. Burada lat_1 için Konya,

lat_2 için ise uydu enlem değerleri alınır. Uydu ekvatorunda olduğundan $lat_2 = 0^\circ$ olarak alınır. $\Delta long$ ise uydu boylamı ile Konya boylamı arasındaki farkı ifade etmektedir.

$$\begin{aligned}\cos(\theta) &= \sin(lat_1) \sin(lat_2) + \cos(lat_1) \cos(lat_2) \cos(\Delta long) \\ &= \sin(37.87) \sin(0) + \cos(37.87) \cos(0) \cos(8.52)\end{aligned}\quad (3.22)$$

Sonrasında uydu ile olan mesafeyi bulmak için 3.23 formülü kullanılır.

$$r = \sqrt{R^2 + (R + H)^2 + 2R(R + H) \cos(\theta)}\quad (3.23)$$

Çizelge 2'deki değerler kullanıldığında Konya lokasyonu için slant range değeri 37396 km olarak bulunur. Barselona için hesaplama yapacak olursak yine Çizelge 2, 3.22 ve 3.23 formülleri kullanıldığında 38779 km olarak bulunur. Elde edilen mesafe değerleri kullanılarak 3.24 formülü ile Konya için $(PFD)_r = -111,4 \text{ w/m}^2$ ve Barselona için $(PFD)_r = -111,72 \text{ w/m}^2$ olarak hesaplanır.

$$(PFD)_r = EIRP - 20 \log(r) - 10.99\quad (3.24)$$

Uçak ile uydu arasındaki RF sinyalinin iletiminde mesafeden kaynaklı sinyal kaybı oluşmaktadır. Serbest Uzay Kaybı (Free space path loss (FSPL)), elektromanyetik dalgaların serbest uzayda (boş alanda) seyahat ederken karşılaştığı sinyal zayıflamasını ifade eder (Patel & Singh, 2015). FSPL, elektromanyetik dalgaların bir kaynaktan bir alıcıya doğru yayıldığı durumlarda karşılaşılan doğal sinyal zayıflamasını ölçmek için kullanılır. Sistemdeki FSPL değeri 3.25 formülü ile hesaplandığında Konya için $L_{FS}(dB) = 210,01 \text{ dB}$, Barselona için ise $L_{FS}(dB) = 212,98 \text{ dB}$, olarak hesaplanır.

$$L_{FS}(dB) = 20 \log(f) + 20 \log(r) + 32.44\quad (3.25)$$

Her iki lokasyon için elde edilen serbest uzay kayıpları değerleri incelendiğinde Konya lokasyonu uyduya daha yakın konumda olduğundan kayıp daha az, Barselona lokasyonu uyduya daha uzak olduğundan dolayı ise yaklaşık 3 dB daha fazla kayıp oluşmaktadır. Her koşulda haberleşmenin kesintisiz bir şekilde devam etmesi hedeflendiğinden dolayı mesafe olarak Barselona için hesaplanan değerler işlemlerde kullanılacaktır.

Link bütçesi hesabı yapılırken sistemdeki tüm kayıplar hesaba katılmalıdır. FSPL'e ek olarak ITU-R P.618 standardı baz alınarak yağmur, bulut, sis gibi atmosferik kayıplar için 1,71 dB, uygulama kayıpları için 0,25 dB ve anten hizalama kayıpları için 0,25 dB kayıplar da FSPL'e eklenerek 215,19 dB elde edilir (ITU, 2019).

$$L_{Total} = FSPL + L_{atm} + L_{pointing} + L_{imp} = 215,19 \text{ dB} \quad (3.26)$$

Bütçe hesabında kullanılan bir diğer parametre olan sistem gürültü sıcaklığı (system noise temperature), RF haberleşme sisteminin toplam gürültüsünü temsil eder ve genellikle bir sıcaklık birimi olan Kelvin (K) cinsinden ifade edilir. Sistem gürültü sıcaklığı, iletim hattı, sky noise vb. sistemdeki tüm gürültü oluşturacak değerlerin toplamıdır ve sistemin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Daha düşük bir sistem gürültü sıcaklığı, daha iyi bir sinyal-gürültü oranı (SNR) sağlar ve dolayısıyla iletişim veya algılama performansını artırır. GEO uydu üzerinde $d=2\text{m}$ çapında ve $G_r=52,01$ dBi kazanca sahip bir Ka bant alıcı anten kullanıldığı varsayılmıştır. Uydu üzerindeki anten ve alıcı sistem ekipmanları dahil toplam gürültü sıcaklığı değeri $T_{sys} = 253,6 \text{ K}$ olarak hesaplanmıştır.

Alıcı anten tarafında sistem performansını ölçmek için G/T değeri hesaplanır. Bu terim, bir alıcı antenin (G) kazancını ve sistemin toplam gürültü sıcaklığını (T) ifade eder. Genellikle alıcı antenin kazancı, alıcı sistemin alabileceği sinyal gücünü artırmaya yardımcı olurken, sistem gürültü sıcaklığı, sistemin toplam gürültüsünü temsil eder. Uydu tarafındaki G/T değeri 3.27 formülü ile hesaplanmıştır.

$$\frac{G}{T} = G_r - 10 \log_{10}(T_{sys}) = 52,01 - 10 \log_{10}(253,6) = 27,96 \text{ dB} \quad (3.27)$$

Bu aşamaya kadar RF link kurulumu kapsamında gerekli hesaplamalar yapıldı. Bu aşamadan sonra ise kurulan RF bağlantısının performans parametreleri incelenecektir. Bu ifade RF link üzerinden iletilecek verinin kalitesini, yeterli seviyede ve az hata oranı ile iletilip iletilemeyeceğine karar verdiğimiz kısımdır. Elde edilen verilere göre sistem için tasarlanmış faz dizinli anten sisteminin uçak – uydu arası haberleşme sistemlerinde kullanılıp kullanılmayacağına karar verilecektir.

Performans parametrelerini hesaplamadan önce RF bağlantı ile iletilecek taşıyıcının özellikleri, veri hızı ve kapasitesi belirlenecektir. Bu kapsamda örnek olarak 50 Mbps veri hızı için QPSK modülasyonunda Reed-Solomon (239,255) kodlama ve 1/3 FEC değerine

sahip, %5 Roll-Off kapasiteli bir taşıyıcı için örnek bir hesaplama yapılacaktır. Sayısal haberleşme sistemlerinde önemli bir parametre olan sembol oranı hesaplanmalıdır. Sembol oranı bir sinyalde her saniyedeki sembol sayısını ifade eder. Bu semboller, veri taşıyan taşıyıcı RF sinyali üzerinde kodlanmış bilgiyi temsil eder. Sembol oranı, bir dijital iletişim sistemini karakterize etmek için önemlidir çünkü bir sistemdeki sembol oranı, o sistemin iletebileceği maksimum veri hızını belirler. Sembol oranı SR (Msps), net veri hızı DR (Mbps), hata düzeltme kodlaması FEC ve modülasyon katsayısı (QPSK için M=2) olmak üzere 3.28 formülü ile sembol oranı hesaplandığında 75 Msps değeri elde edilir.

$$SR (Msps) = \frac{DR}{M * FEC} \quad (3.28)$$

Taşıyıcı bant genişliği için ise %5 roll-off (RO) değeri işleme dahil edilir ve bant genişliği (BW) 3.29 formülü ile hesaplandığında 78,75 MHz olarak belirlenir.

$$BW (MHz) = SR * (1 + RO) \quad (3.29)$$

Link bütçesi hesaplamaları yapılırken tüm işlemler dB biriminde hesaplandığı için elde edilen bant genişliği değerini de dB cinsine çevirmek gerekir. Bu işlem için 3.30 formülü kullanıldığında $B_N=78,96$ dBHz elde edilir.

$$B_N = 10 * \log_{10}(BW) \quad (3.30)$$

Performans parametreleri hesaplamalarında ilk olarak Taşıyıcı Gürültü Oranı (Carrier to Noise Ratio, C/N) değeri hesaplanır (Balanis, 2016). C/N bir sinyalin alındığı ortamdaki taşıyıcı sinyalin gücünün, aynı ortamdaki gürültü gücüne oranını ifade eder. Basitçe söylemek gerekirse, C/N sinyalin, arka plandaki gürültüye göre ne kadar güçlü olduğunu gösterir. Yüksek bir C/N daha net bir sinyal ve daha iyi bir alım kalitesini, düşük bir C/N ise sinyalin hata veya karışıklıklara daha duyarlı olabileceğini işaret eder.

$$\left(\frac{C}{N}\right) = EIRP + \left(\frac{G}{T}\right) - (L_{fspl} + L_{other losses}) - 228,6 - B_N \quad (3.31)$$

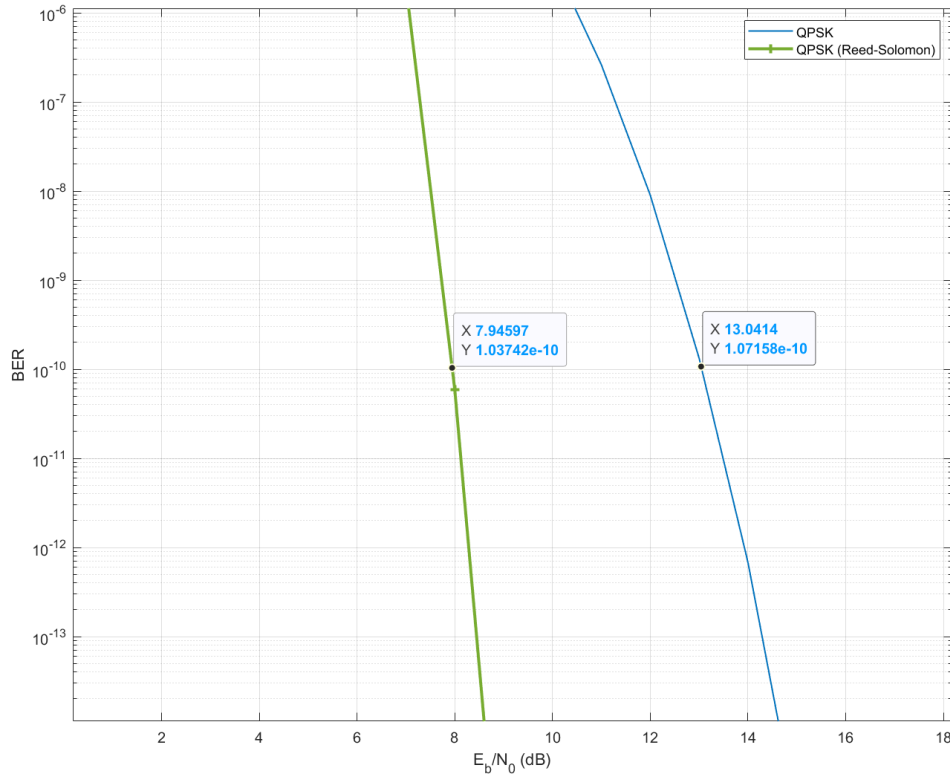
Burada EIRP dBW, bant genişliği B_N dBHz ve Boltzmann sabiti $k=-228,6$ dBW/K/Hz olarak 3.31 formülüne eklenir. İlgili değerler formülde yerine koyulduğunda C/N = 13,45 dB bulunur.

C/N değerine benzer şekilde bir diğer performans parametresi olan C/N₀ (Carrier to Noise Density), taşıyıcı sinyal gücünün (C) alınan sinyal gücüne (N₀) oranıdır. Burada, N₀, birim frekans başına düşen termal gürültü spektral yoğunluğunu ifade eder. C/N₀ değeri 3.32 formülü ile hesaplanabilmektedir. Buradan C/N₀ değeri 92,41 dB bulunur.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = \left(\frac{C}{N}\right) + B_N \text{ (dB)} \quad (3.32)$$

Bütçe hesaplarında hesaplanması gereken bir diğer parametre ise enerji bit başına gürültü oranı (Eb/N₀), elektriksel sinyal gücünün her bit başına düşen gürültü spektral yoğunluğuna oranını ifade eden bir ölçümdür. Eb/N₀, özellikle dijital modülasyon tekniklerinin tasarımı, değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasında kullanılır. Ayrıca FEC (Hata Düzeltme Kodlaması) sistemlerinin performansını değerlendirmek için önemlidir.

Sistem performansının sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için sistemin ihtiyaç duyacağı minimum Eb/N₀ değerinin ne olacağını belirlemek önem arz etmektedir. Bu bağlamda teorik Eb/N₀ değeri ile sistemde elde edilen Eb/N₀ değerlerinin karşılaştırılması ile sağlıklı bir değerlendirme yapılabilir. Sistemde 10⁻¹⁰ BER (Bit Error Rate) değerini sağlayacak bir yapı kurmak istediğimizi düşünürsek. Kullanılan QPSK modülasyonu için kodlamasız ve Reed-Solomon kodlamalı olacak şekilde iki farklı teorik Eb/N₀ değeri Şekil 13'de gösterilmiştir. Ayrıca teorik Eb/N₀ hesaplamaları için MATLAB kodları EK-1'de verilmiştir.



Şekil 13: Teorik E_b/N_0 Değerleri

E_b/N_0 grafikleri incelendiğinde QPSK modülasyonunda herhangi bir kodlama kullanılmadığı takdirde sistemin en az 13,04 dB E_b/N_0 değerine sahip olması gerektiği görülmektedir. Sistem performans ve verimliliğini artırmak amacıyla yapılan Reed-Solomon kodlama ile aynı BER değerinde 7,94 dB E_b/N_0 değerine sahip olmak yeterli olacaktır. Buradan yola çıkarak sistem marjini hesabı için kullanacağımız gereken $E_b/N_0 = 7,94$ dB olarak alınacaktır.

Bütçe hesabında son olarak tasarlanan anten sisteminin elde ettiği E_b/N_0 değeri hesaplanacak ve sonrasında teorik değer ile kıyası yapılacaktır. 3.33 formülü aracılığı ile yapılan hesap sonucunda sistemin elde ettiği E_b/N_0 değeri 21,19 dB olarak bulunur.

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \frac{BW}{DR} * \left(\frac{C}{N}\right) \quad (3.33)$$

Son olarak teorik E_b/N_0 ile alınan E_b/N_0 değerleri için marjin hesaplanır.

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{marjin} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{alınan} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{teorik} = 21,19 - 7,94 = 13,25 \text{ dB} \quad (3.34)$$

3.34 ifadesi ile elde edilen 13,25 dB marjin değeri sistem performansı için kabul edilebilecek minimum değerden 13,25 dB daha iyi olduğu anlamına gelmekte ve sistem tasarımının kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.

Uçak'tan GEO uyduya doğru iletilen RF taşıyıcı kapsamında yapılan link bütçesi hesaplamalarının özet bilgileri Çizelge 3'de gösterilmiştir. Gönderme ve alma antenleri kapsamında yapılacak tüm link bütçesi hesapları STK programında gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının sonraki bölümlerinde STK programı üzerinden yapılan link bütçesi hesapları incelenecektir.

Çizelge 3: Gönderme Hattı Link Bütçesi Özet Çizelgesi

Parametre	Sembol	Değer
Frekans	f_c	27,45 GHz
Dalga Boyu	λ	0,0109 m
Uydu Mesafesi	r	38779 km
İletim Gücü	P_t	27,20 dBW
Gönderme Hattı Kaybı	L_t	0,2 dB
Gönderme Anteni Kazancı	G_t	24,04 dBi
Efektif İzotropik Alman Güç	EIRP	51,04 dBW
Serbest Uzay Kaybı	L_{FS}	212,98 dB
Atmosferik Kayıplar	L_{atm}	1,71 dB
Hizalama Kayıpları	$L_{pointing}$	0,25 dB
Uygulama Kayıpları	L_{imp}	0,25 dB
Toplam İletim Kaybı	L_{Total}	215,19 dB
Güç Akı Yoğunluğu	$(PFD)_r$	-111,72 W/m ²
Alma Anteni Çapı	d	2 m
Alma Anteni Kazancı	G_r	52,01 dBi
Sistem Gürültü Sıcaklığı	T_{sys}	253,6 K

Gain / Temperature	G/T	27,96 dB
Net Data Rate	DR	50 Mbps
Modülasyon Katsayısı	QPSK	2
Forward Error Correction	FEC	1/3
Roll – Off	RO	0,05 %
Sembol Oranı	SR	75 Msps
Bant Genişliği	BW	78,75 MHz
Teorik Eb/N0	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{teorik}$	13,04 dB
Gerekli Eb/N0 (Teorik + RS)	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{gerekli}$	7,94 dB
Alınan Eb/N0	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{alınan}$	21,19 dB
Marjin	$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{marjin}$	13,25 dB

3.5. STK Simülasyon Programı

STK (Systems Tool Kit), mühendislik, savunma, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılan kapsamlı bir yazılım paketidir. AGI (Analytical Graphics, Inc.) tarafından geliştirilen STK, sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve analizinde güçlü araçlar sunar. Bu yazılım, kullanıcılarına üç boyutlu görselleştirme, zaman bazlı analiz ve çeşitli fiziksel sistemlerin performans değerlendirmesi gibi imkanlar sunarak karmaşık görevlerin ve operasyonların planlanmasını ve yönetilmesini kolaylaştırır (AGI, 2022).

STK, ilk olarak 1989 yılında piyasaya sürülmüştür. AGI'nin vizyonu, kullanıcıların karmaşık sistemleri modellemelerine, analiz etmelerine ve optimize etmelerine yardımcı olacak bir yazılım geliştirmektir. Yazılımın gelişimi, özellikle uzay ve savunma sektörlerindeki gereksinimlere yanıt olarak hız kazanmış ve zamanla daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap eden, modüler ve esnek bir platform haline gelmiştir. Bugün STK, dünya genelinde hükümetler, savunma kuruluşları, uzay ajansları, üniversiteler ve özel şirketler tarafından kullanılmaktadır. STK programının temel özellikleri ve işlevleri şu şekilde sıralanabilir:

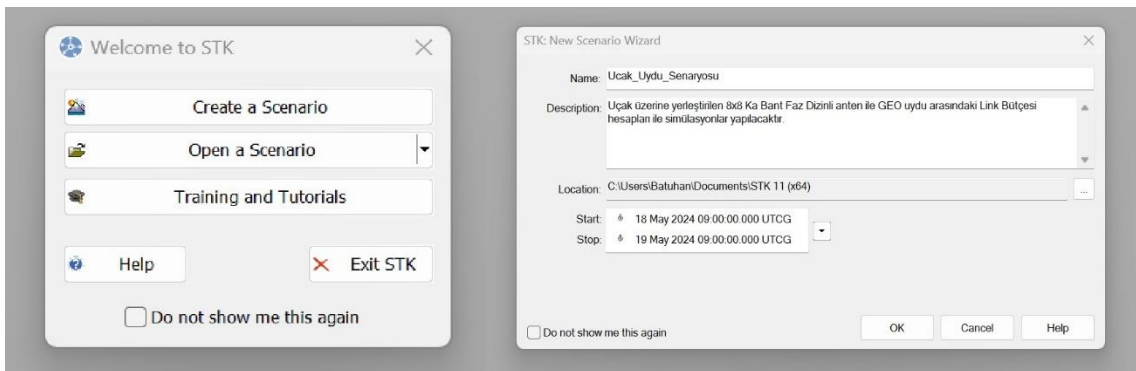
- **Üç Boyutlu Görselleştirme:** STK, kullanıcıların uydular, uçak, gemi ve diğer araçların üç boyutlu görselleştirilmesini sağlar. Bu özellik, kullanıcıların karmaşık görevleri ve operasyonları daha iyi anlamalarına ve planlamalarına yardımcı olur. Görselleştirme araçları, gerçek zamanlı olarak veri sunar ve kullanıcıların senaryoları farklı perspektiflerden incelemelerine olanak tanır.
- **Zaman Bazlı Analiz:** STK, kullanıcıların belirli bir zaman diliminde sistem performansını analiz etmelerini sağlar. Bu, özellikle görev planlaması ve senaryo analizi için kritiktir. Zaman bazlı analiz, farklı zaman dilimlerinde performansın nasıl değiştiğini görselleştirir ve kullanıcıların en iyi çözümleri geliştirmelerine yardımcı olur.
- **Modüler Yapı:** STK, farklı modüller ile genişletilebilir. Her modül, belirli bir işlevselliği sağlar; örneğin, Uydu Modülü, yörünge hesaplamaları ve uydu görev planlaması için kullanılır. Diğer modüller arasında Hava Aracı Modülü, Deniz Aracı Modülü ve İletişim Modülü bulunur. Bu modüler yapı, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre yazılımı özelleştirmelerini sağlar.
- **Entegre Fizik Motorları:** STK, çeşitli fizik motorları ile entegre edilmiştir. Bu motorlar, atmosferik etkiler, yerçekimi, manyetik alanlar ve daha fazlasını dikkate alarak hassas simülasyonlar gerçekleştirir. Fizik motorları, gerçek dünya koşullarının modellenmesini sağlar ve sistemlerin performansını doğru bir şekilde tahmin eder.
- **Veri Entegrasyonu ve Analitik Yetenekler:** STK, çeşitli veri kaynakları ile entegre olabilir ve kullanıcıların büyük veri kümelerini analiz etmelerine olanak tanır. Bu, sistem performansını optimize etmek ve karar verme süreçlerini desteklemek için kritik öneme sahiptir.

STK programının kullanım alanları ise şu şekilde sıralanabilir:

- **Savunma ve Güvenlik:** STK, askeri operasyonların planlanması ve simülasyonu için kullanılır. Özellikle uydu gözetimi, füze savunma sistemleri ve keşif görevlerinde önemli bir rol oynar. STK, düşman tehditlerini analiz etmek, karşı tedbirler geliştirmek ve operasyonel senaryoları simüle etmek için kullanılır.

- **Havacılık ve Uzay:** Havayolu şirketleri ve uzay ajansları, uçuş dinamiklerini analiz etmek, yörünge hesaplamaları yapmak ve uzay görevlerini planlamak için STK'dan yararlanır. NASA gibi kuruluşlar, uzay araçlarının yörünge belirleme ve izleme, görev planlaması ve operasyonel analizler için STK'yı kullanır.
- **Telekomünikasyon:** Uydu iletişim sistemlerinin tasarımı ve performans analizi için STK kullanılır. Telekomünikasyon şirketleri, uydu konfigürasyonlarını optimize etmek, sinyal kapsamını analiz etmek ve sistem performansını değerlendirmek için bu yazılımdan faydalanır.
- **Akademik Araştırma:** Üniversiteler ve araştırma kurumları, mühendislik ve bilimsel araştırmalarında STK'yı kullanarak karmaşık sistemlerin simülasyonlarını gerçekleştirirler. Akademik projelerde, STK, öğrencilere ve araştırmacılara gerçek dünya koşullarını simüle etme ve analiz etme fırsatı sunar.

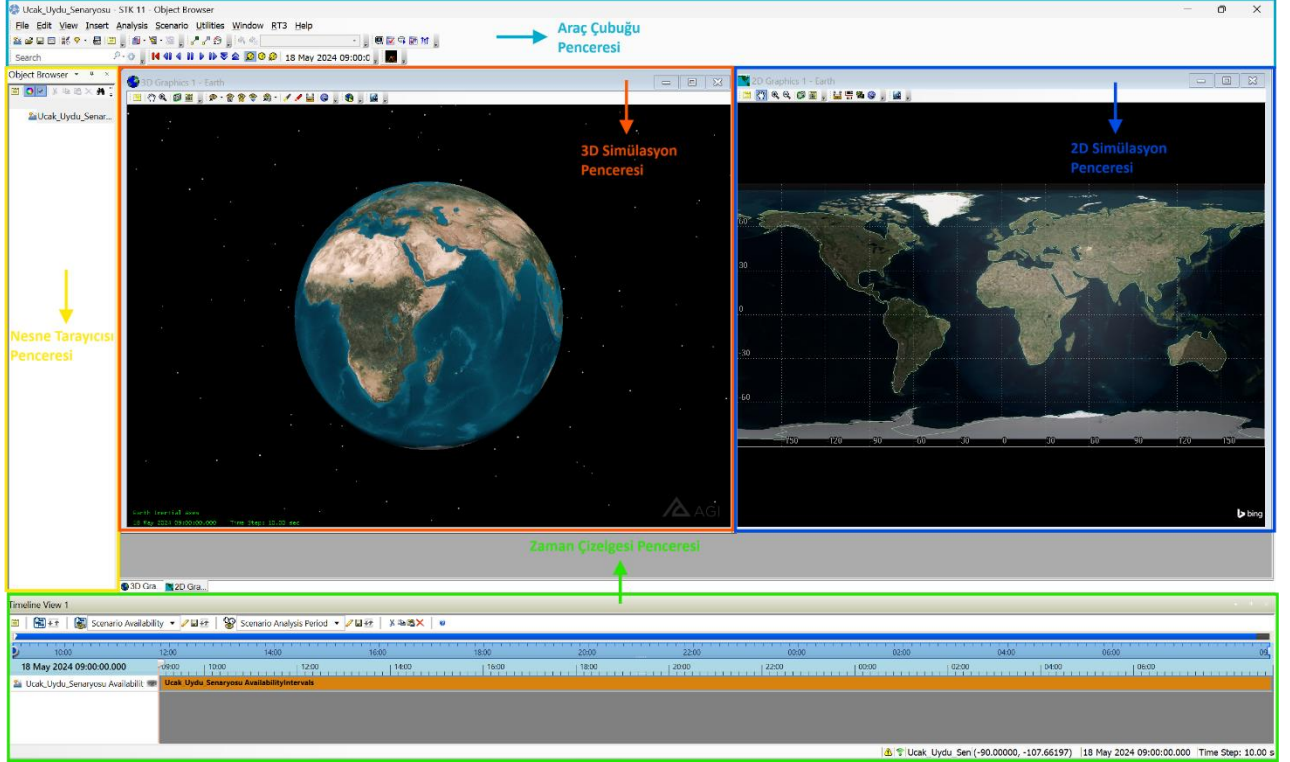
Bu bölümde uçak üzerine yerleştirilmiş 8x8 Ka Bant Faz Dizinli gönderme hattı anteni ile GEO uydu Ka bant alıcı anteni arasındaki link bütçesi hesaplarını ve simülasyonlar yapılacaktır. STK programı çalıştırıldıktan sonra açılan ekrandan "Create a Scenario" seçeneği seçilerek işleme başlanır. Ardından açılan "New Scenario Wizard" ekranında senaryo adı, açıklama, senaryonun başlangıç ve bitiş zamanları gibi kısımlar belirlenir.



Şekil 14: STK Yeni Senaryo Oluşturma

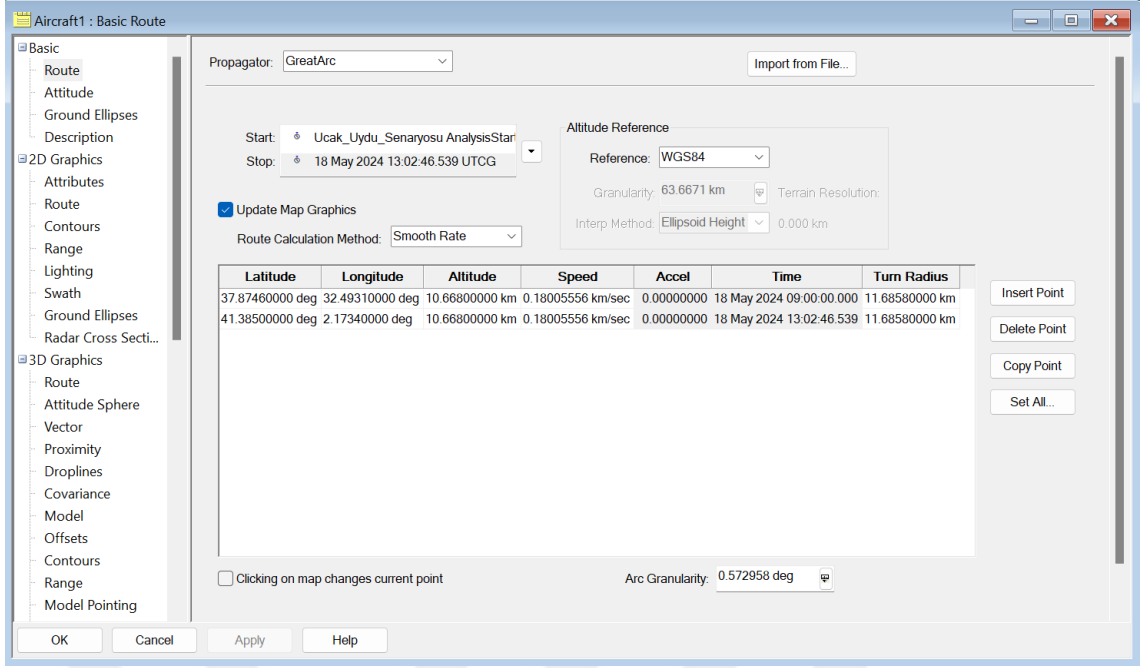
STK programı genel kullanıcı arayüzü Şekil 15'de görülmektedir. Kullanıcı arayüzünde genel olarak simülasyon ve tasarım faaliyetlerinin gerçekleştirileceği 3D simülasyon penceresi, 2D simülasyon penceresi tasarım faaliyetlerinde kullanılacak araçları içeren

araç çubukları penceresi, proje genel faaliyetlerinin takip edileceği nesne tarayıcısı penceresi ile proje zaman detaylarının yer aldığı ve yönetilebildiği zaman çizelgesi penceresi yer almaktadır.



Şekil 15: STK Kullanıcı Arayüzü

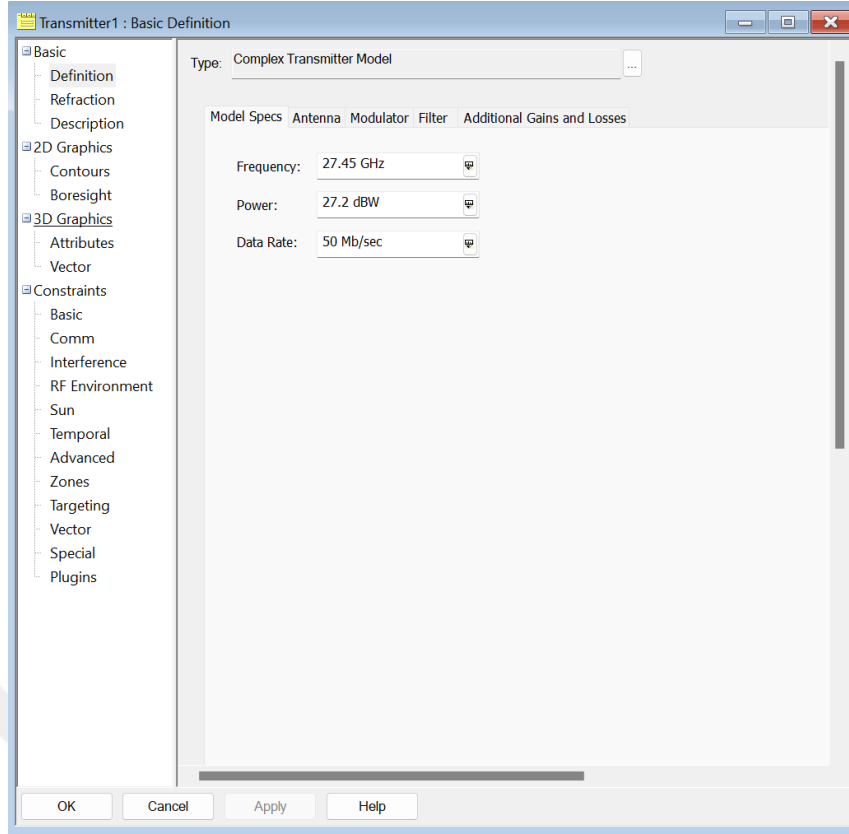
İlk olarak simülasyon çalışmalarında kullanacağımız uçak modelini eklemek için “Insert STK Object” menüsünden “Aircraft > Insert Default” seçilir. Object Browser menüsüne eklenen “Aircraft1” objesinin özellikler menüsüne girerek konfigürasyonlar tanımlanır. Burada uçak için tanımlamamız gereken ilk konfigürasyon uçağın hareket rotasıdır. Bunun için “Basic > Route” bölümüne gidilir. “Insert Point” seçilerek uçağın kalkış noktası konum bilgileri “LAT” “LON” cinsinden girilir. Tez çalışmasında kullandığımız rota olan Konya (KON) – Barselona (BCN) rotası için bilgiler girilmiştir. Konya lokasyonu için LAT: 37.8746 LON: 32.4931, Barselona için LAT:41.3850 LON: 2.1734 olarak girilmiştir. Uçak rotasının belirlendiği pencere Şekil 16’da görülmektedir.



Şekil 16: Uçak Rotasının Belirlenmesi

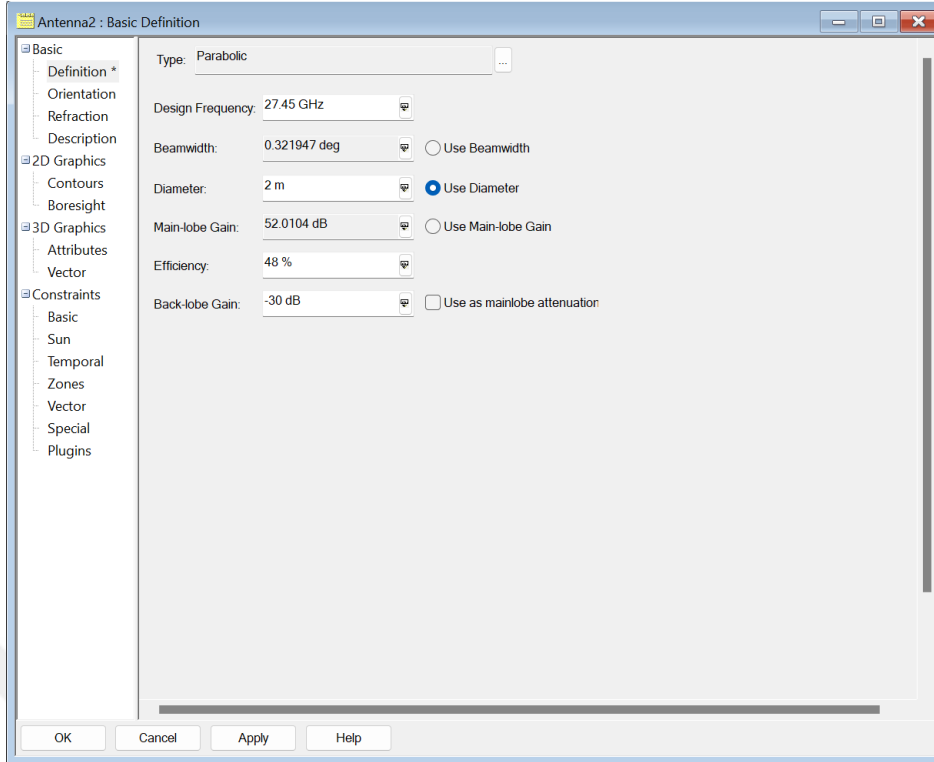
Bir sonraki aşamada uçak üzerine yerleştireceğimiz faz dizimli antenin parametrelerini girmek için “Insert Object > Antenna > Define Properties” seçilir. Açılan ekrandan anten tipi “Phased Array”, Çalışma frekansı: 27.45 GHz ve anten sayısı olarak 64 (8x8) girilmiştir.

Antenden sonra uçak üzerinde bulunacak olan gönderici (Transmitter) bilgilerini girmek için de benzer şekilde “Insert Object > Transmitter > Define Properties” seçilir. “Type > Complex Transmitter Model” seçilerek transmitter parametreleri girilmeye başlanır. Burada Frekans 27.45 GHz, güç: 27.2 dBW, Data rate: 50 Mbps olarak seçilir. Önceden tanımlamasını yaptığımız antenimiz ile transmitter biriminin birlikte çalışacağını belirtmek için “Antenna > Reference Type > Link” seçimi yapılır. Sonrasında modülasyon parametrelerinin tanımlamaları için “Modulator > name > QPSK” seçilir. Taşıyıcı boyutu girmek için ise “Signal Bandwith > Bandwith” seçilir ve 78.75 MHz olarak girdi yapılır. Son olarak sistemde modülasyonda yapılan kanal kodlama kazançları için girdi yapılır. Bu işlem için “Additional Gain and Losses” menüsünden kanal kodlama kazanç değerleri de eklenmiştir. Transmitter parametrelerinin girildiği pencere Şekil 17’de gösterilmiştir.



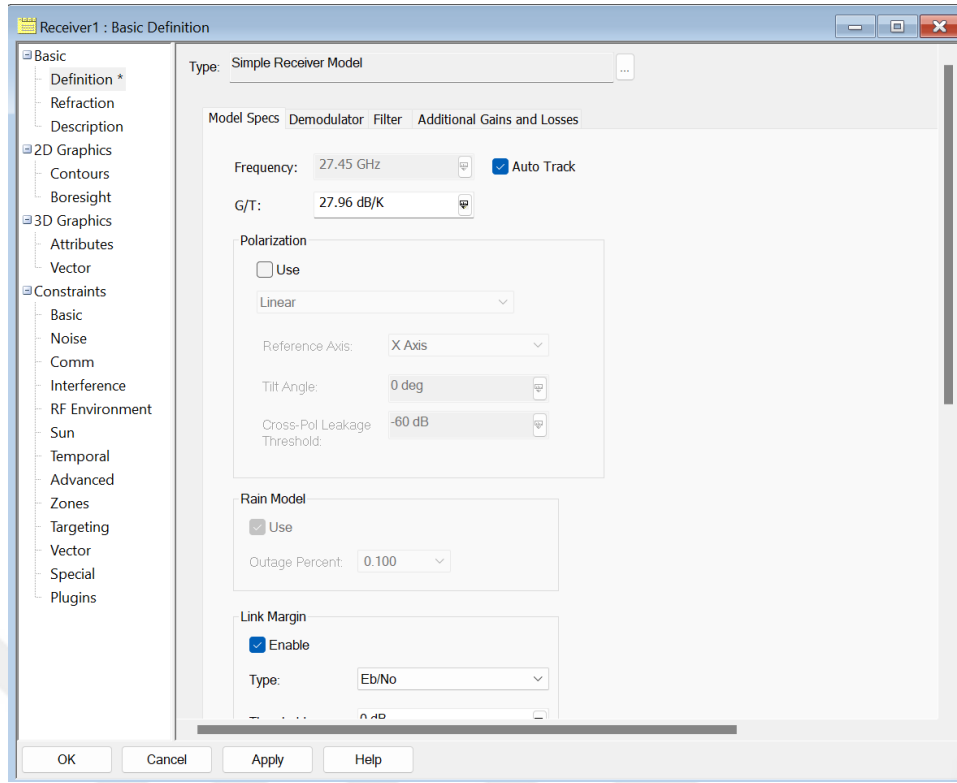
Şekil 17: Transmitter Parametrelerinin Girilmesi

Uçak üzerinde tanımlanacak birimler bu aşama için yeterlidir. Şimdi ise GEO uydunun tanımlamaları yapılacaktır (Sanchez & Lopez, 2019). Bu işlem için “Insert Object > Satellite > Orbit Wizard” seçilir. Açılan menüden “Type > Geosynchronous” seçilir. Uydunun bulunduğu enlem değeri ve eğim değerleri “Definition > Subsatellite Point / Inclination” bölümünden girilebilmektedir. Enlem için 41 derece, eğim için 4 derece olarak değerler girilmiştir. Uydunun tanımlanmasının ardından uydu üzerinde bulunan alıcı anten eklenecektir. Bu işlem için “Insert Object > Antenna > Define Properties” seçilir. Uydu üzerindeki anten tipi olarak “Parabolic” ve anten çapı olarak 2m seçilir. Uydu alıcı anteni için tanımlamalar Şekil 18’de gösterilmiştir.



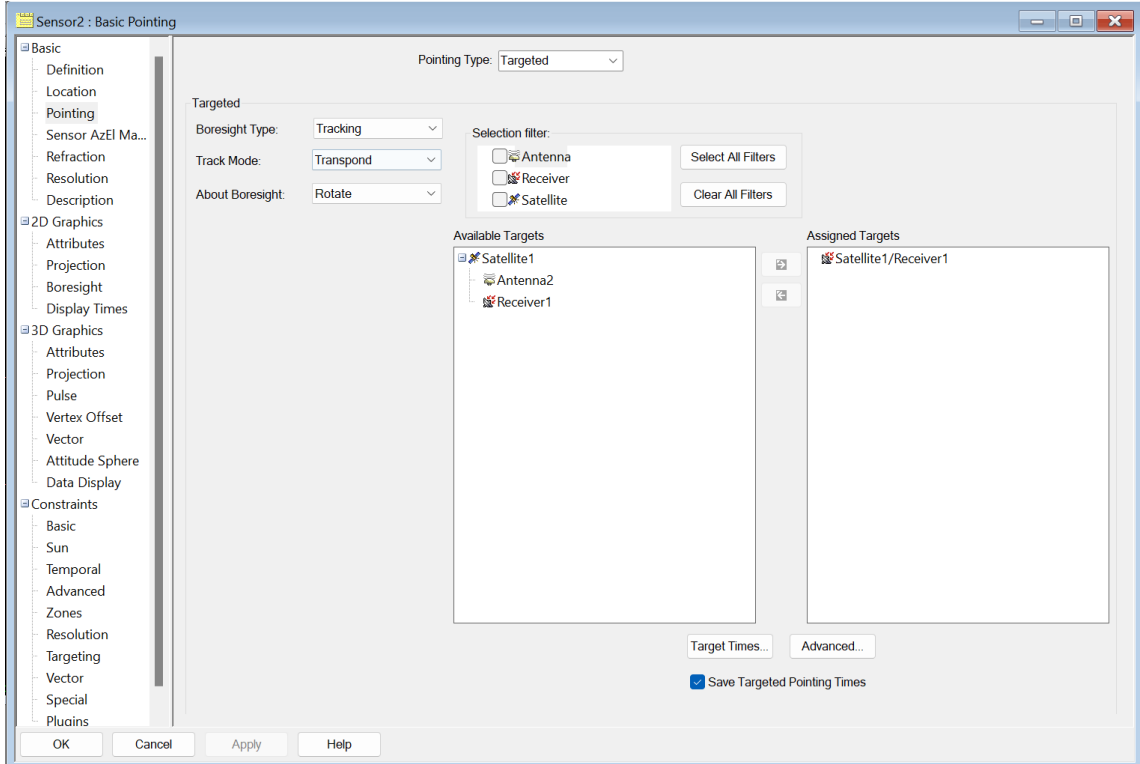
Şekil 18: Uydu Alıcı Anten Parametreleri

Anten tanımlandıktan sonra uydu üzerindeki alıcı birimlerin parametrelerini girmek için benzer şekilde “Insert Object > Receiver” seçilerek “Type > Simple Model”, frekans 27.45 GHz, G/T değeri 27,96 dB/K, “Link Margin: Enable” seçilir. “Demodulator” menüsünden ise “Auto-Select Demodulator” seçilerek alış hattı sinyalinin modülasyonu otomatik olarak seçilmiş olur. Alıcı birim parametrelerinin girildiği pencere Şekil 19’da gösterilmiştir.



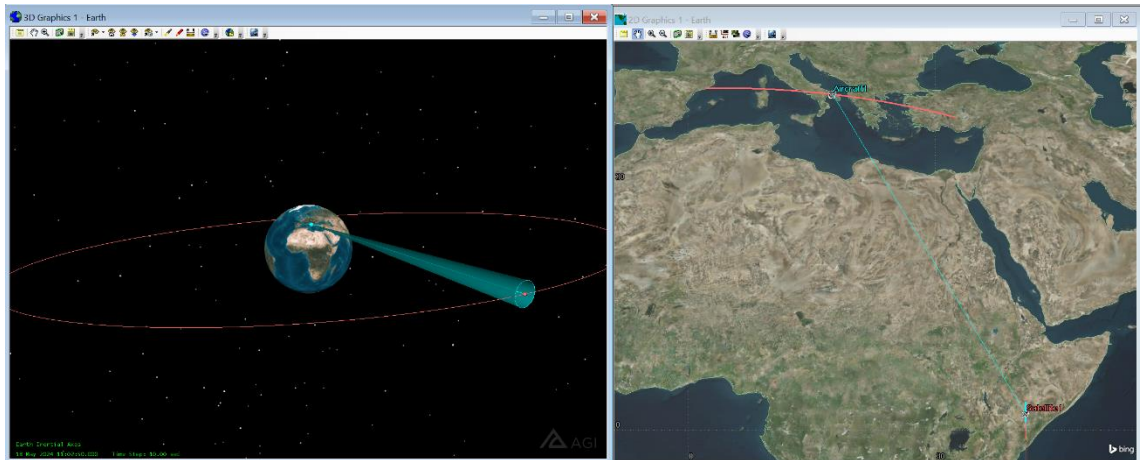
Şekil 19: Alıcı Birimlerin Parametrelerinin Girilmesi

Uçak üzerine yerleştirilen antenin uçağın rotası boyunca takip edebilmesi için ise “Insert Object > Sensor > Define Properties” seçilir. Eklenen sensörün özellikler menüsünden “Pointing Type > Targeted ve Boresight Type: Tracking” olarak seçilir. İlgili sayfadan hedef olarak uydu üzerine yerleştirilien receiver ekipmanı seçilir. İlgili parametre ayarlarının yapıldığı ekran Şekil 20’de görülmektedir.

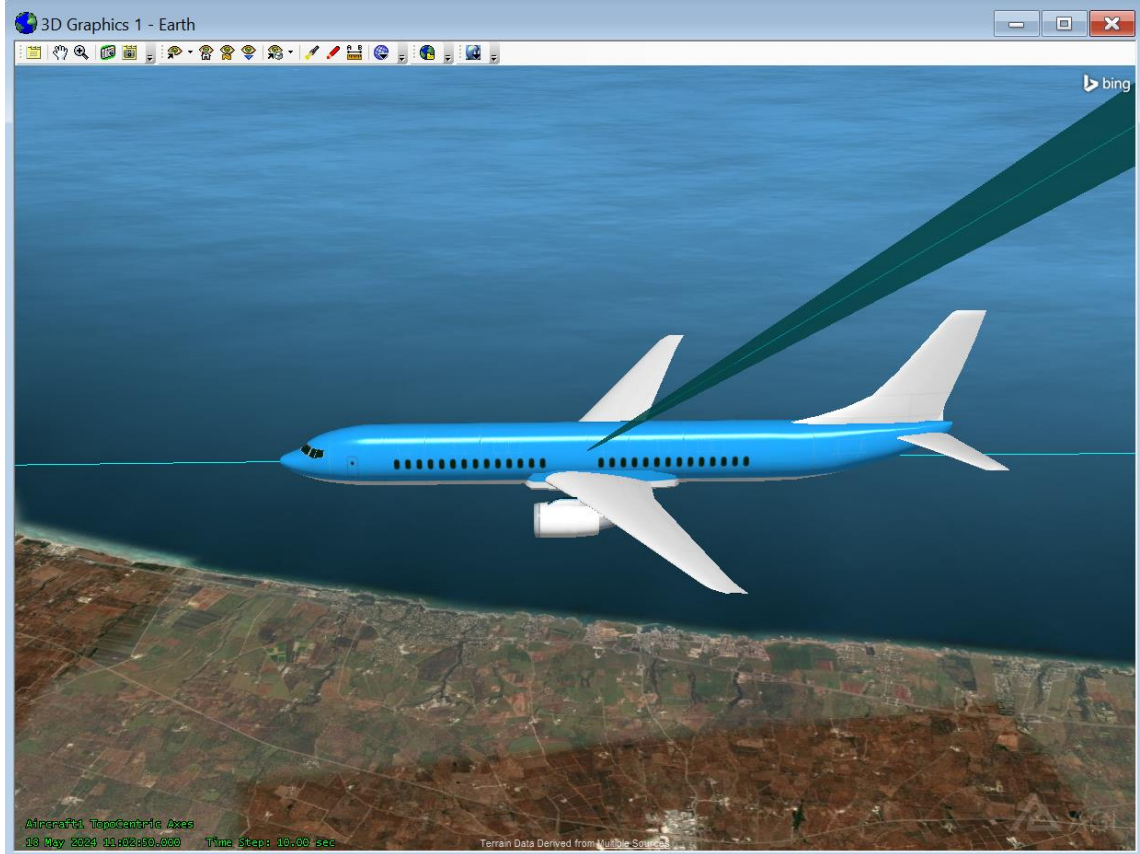


Şekil 20: Anten Takip Parametreleri

STK ile Link Bütçesi hesaplama örneği kapsamında bu aşama için yeterli parametre ve ekipman eklenmiş bulunmaktadır. Şimdi ise link bütçesi hesaplarının simülasyonu gerçekleştirilecektir. Tüm ayarlamaların yapılmasının ardından araç çubuğu penceresi üzerinde bulunan “Start” butonu basılarak simülasyon başlatılır. 2D ve 3D simülasyon görselleri Şekil 21’de görülmektedir.

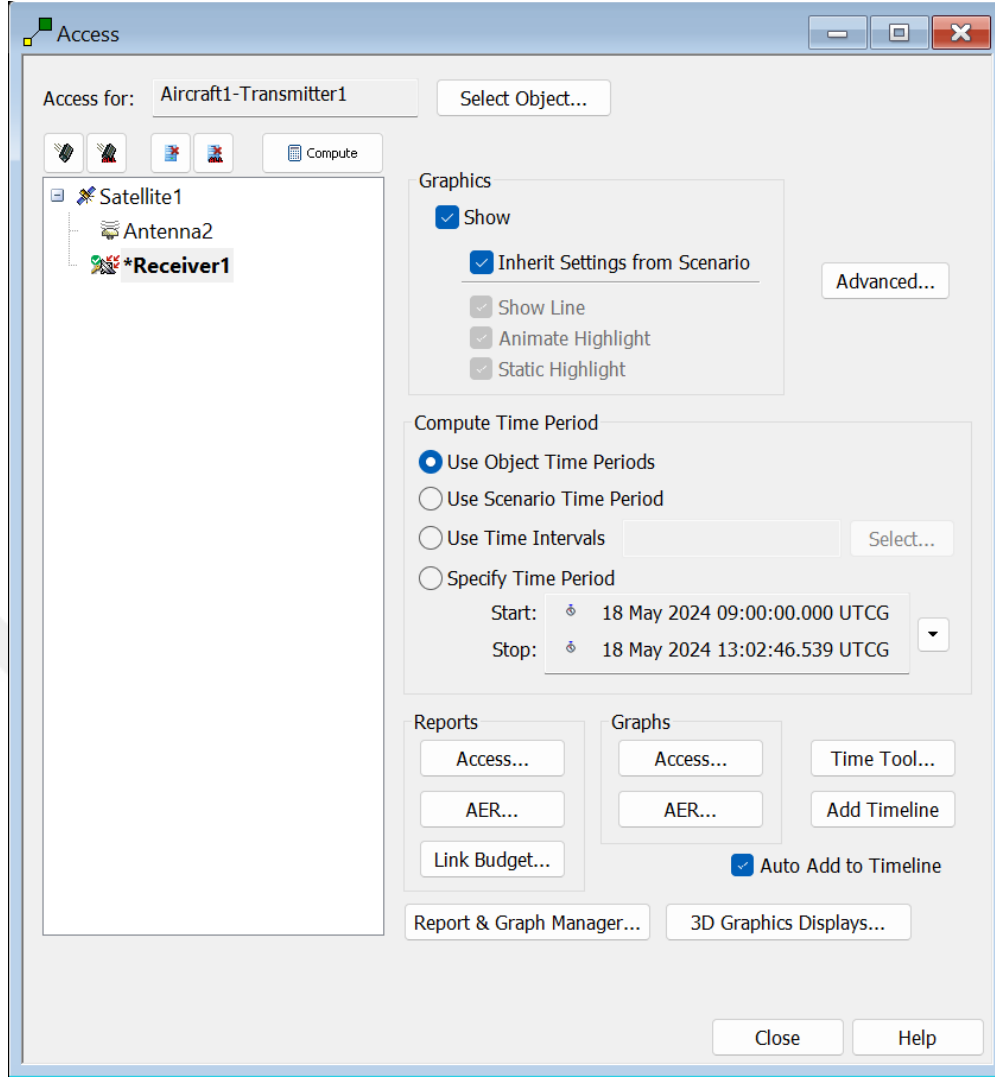


Şekil 21: 2D ve 3D Simülasyon Ekranı



Şekil 22: Faz Dizinli Anten Uydu Takip Görseli

Bu aşamadan sonra artık kurulan uydu haberleşme sisteminin performans değerlendirmelerini yapma aşamasına geçilebilir. Performans değerlendirmeleri kapsamında yapılacak link bütçesi hesapları için ilk olarak uçak ile GEO uydu arası bağlantının tanımlanması gerekmektedir. Bağlantıyı tanımlamak için Uçak üzerinde tanımlanan Transmitter seçili iken araç çubuğu bölümündeki “Access” aracı seçilir. Açılan pencereden hedef nokta olan uydu üzerindeki Receiver ekipmanı seçilir. Ardından “Reports > Link Budget” seçimi yapılır. Yapılan bağlantı kurma parametreleri ekranı Şekil 23’de görülmektedir.



Şekil 23: Bağlantı Parametreleri

Link bütçesi raporu çalıştırıldığında oluşan rapor görselleri Şekil 24 ve Şekil 25'te görülmektedir. Şekiller incelendiğinde akı yoğunluğu, C/N_0 , C/N , alınan E_b/N_0 değerlerinin 3.4 Hat Bütçesi Tasarım Parametreleri bölümünde hesaplanan değerlere çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da ilgili teorik hesaplamaların doğru olduğunu göstermektedir.

Time (UTCG)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m ²)
18 May 2024 09:00:00.000	51.040	27.449996	-161.632	-111.405815
18 May 2024 09:01:00.000	51.040	27.449996	-161.633	-111.406434
18 May 2024 09:02:00.000	51.040	27.449996	-161.634	-111.407057
18 May 2024 09:03:00.000	51.040	27.449996	-161.634	-111.407682
18 May 2024 09:04:00.000	51.040	27.449996	-161.635	-111.408311
18 May 2024 09:05:00.000	51.040	27.449996	-161.635	-111.408943
18 May 2024 09:06:00.000	51.040	27.449996	-161.636	-111.409579
18 May 2024 09:07:00.000	51.040	27.449996	-161.637	-111.410218
18 May 2024 09:08:00.000	51.040	27.449996	-161.637	-111.410860
18 May 2024 09:09:00.000	51.040	27.449996	-161.638	-111.411505
18 May 2024 09:10:00.000	51.040	27.449996	-161.639	-111.412154
18 May 2024 09:11:00.000	51.040	27.449996	-161.639	-111.412806
18 May 2024 09:12:00.000	51.040	27.449996	-161.640	-111.413462
18 May 2024 09:13:00.000	51.040	27.449996	-161.641	-111.414121
18 May 2024 09:14:00.000	51.040	27.449996	-161.641	-111.414783
18 May 2024 09:15:00.000	51.040	27.449996	-161.642	-111.415449
18 May 2024 09:16:00.000	51.040	27.449996	-161.643	-111.416118
18 May 2024 09:17:00.000	51.040	27.449996	-161.643	-111.416790
18 May 2024 09:18:00.000	51.040	27.449996	-161.644	-111.417466
18 May 2024 09:19:00.000	51.040	27.449996	-161.645	-111.418145
18 May 2024 09:20:00.000	51.040	27.449995	-161.645	-111.418828
18 May 2024 09:21:00.000	51.040	27.449995	-161.646	-111.419513
18 May 2024 09:22:00.000	51.040	27.449995	-161.647	-111.420203
18 May 2024 09:23:00.000	51.040	27.449995	-161.647	-111.420895
18 May 2024 09:24:00.000	51.040	27.449995	-161.648	-111.421592
18 May 2024 09:25:00.000	51.040	27.449995	-161.649	-111.422291
18 May 2024 09:26:00.000	51.040	27.449995	-161.650	-111.422994
18 May 2024 09:27:00.000	51.040	27.449995	-161.650	-111.423700

Şekil 24: Link Bütçesi - Kodlamasız (a)

g/T (dB/K)	C/No (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	Eb/No (dB)	BER
27.960000	94.926792	78750.000	15.9643	17.9371	3.483767e-29
27.960000	94.926173	78750.000	15.9637	17.9365	3.515027e-29
27.960000	94.925551	78750.000	15.9630	17.9359	3.546731e-29
27.960000	94.924925	78750.000	15.9624	17.9352	3.578888e-29
27.960000	94.924296	78750.000	15.9618	17.9346	3.611504e-29
27.960000	94.923664	78750.000	15.9612	17.9340	3.644587e-29
27.960000	94.923028	78750.000	15.9605	17.9333	3.678144e-29
27.960000	94.922390	78750.000	15.9599	17.9327	3.712184e-29
27.960000	94.921747	78750.000	15.9592	17.9320	3.746714e-29
27.960000	94.921102	78750.000	15.9586	17.9314	3.781741e-29
27.960000	94.920453	78750.000	15.9579	17.9308	3.817274e-29
27.960000	94.919801	78750.000	15.9573	17.9301	3.853321e-29
27.960000	94.919145	78750.000	15.9566	17.9294	3.889891e-29
27.960000	94.918486	78750.000	15.9560	17.9288	3.926992e-29
27.960000	94.917824	78750.000	15.9553	17.9281	3.964633e-29
27.960000	94.917158	78750.000	15.9547	17.9275	4.002823e-29
27.960000	94.916489	78750.000	15.9540	17.9268	4.041571e-29
27.960000	94.915817	78750.000	15.9533	17.9261	4.080885e-29
27.960000	94.915141	78750.000	15.9526	17.9254	4.120776e-29
27.960000	94.914462	78750.000	15.9520	17.9248	4.161253e-29
27.960000	94.913780	78750.000	15.9513	17.9241	4.202326e-29
27.960000	94.913094	78750.000	15.9506	17.9234	4.244005e-29
27.960000	94.912405	78750.000	15.9499	17.9227	4.286300e-29
27.960000	94.911712	78750.000	15.9492	17.9220	4.329220e-29
27.960000	94.911016	78750.000	15.9485	17.9213	4.372777e-29
27.960000	94.910316	78750.000	15.9478	17.9206	4.416982e-29
27.960000	94.909613	78750.000	15.9471	17.9199	4.461846e-29
27.960000	94.908907	78750.000	15.9464	17.9192	4.507379e-29
27.960000	94.908197	78750.000	15.9457	17.9185	4.553592e-29
27.960000	94.907484	78750.000	15.9450	17.9178	4.600498e-29
27.960000	94.906768	78750.000	15.9443	17.9171	4.648108e-29

Şekil 25: Link Bütçesi - Kodlamasız (b)

Hesaplamalar ile farklılık gösteren tek değer Eb/N0 değeridir. Eb/N0 değeri teorik hesaplamalarda 21,19 dB olarak değerlendirilmesine rağmen STK simülasyonunda RS kodlama kazancı eklenmemiş hali gösterildiğinden bu değer elde edilmiştir. Buradaki

farklılık link bütçesi teorik hesaplamalarda kanal kodlamalarının kullanılarak daha verimli bir yapı kullanılmasıdır. STK üzerinde kanal kodlamaları seçilemeyip doğrudan QPSK modülasyonu seçilebildiğinden farklılık oluşmuştur. Bu hali ile de yeterli haberleşme performansını sağlayabilmektedir. Kanal kodlama kazançlarının STK simülasyonuna entegrasyonu için “Transmitter > Additional Gain and Losses” bölümüne QPSK ile QPSK -RS arasındaki kazanç değeri elle girilmiştir. Şekil 13’te daha önce belirtilen Teorik Eb/N0 değerleri arasında 5,1 dB RS kazanç farkı olduğu belirtilmişti. Bu değer STK’da ilgili kısma girilerek Link Bütçesi raporu yeniden oluşturulduğunda Şekil 26’daki sonuçlar elde edilmiştir.

C/No (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	Eb/No (dB)	BER
97.926792	78750.000	18.9643	20.9371	1.000000e-30
97.926173	78750.000	18.9637	20.9365	1.000000e-30
97.925551	78750.000	18.9630	20.9359	1.000000e-30
97.924925	78750.000	18.9624	20.9352	1.000000e-30
97.924296	78750.000	18.9618	20.9346	1.000000e-30
97.923664	78750.000	18.9612	20.9340	1.000000e-30
97.923028	78750.000	18.9605	20.9333	1.000000e-30
97.922390	78750.000	18.9599	20.9327	1.000000e-30
97.921747	78750.000	18.9592	20.9320	1.000000e-30
97.921102	78750.000	18.9586	20.9314	1.000000e-30
97.920453	78750.000	18.9579	20.9308	1.000000e-30
97.919801	78750.000	18.9573	20.9301	1.000000e-30
97.919145	78750.000	18.9566	20.9294	1.000000e-30
97.918486	78750.000	18.9560	20.9288	1.000000e-30
97.917824	78750.000	18.9553	20.9281	1.000000e-30
97.917158	78750.000	18.9547	20.9275	1.000000e-30
97.916489	78750.000	18.9540	20.9268	1.000000e-30
97.915817	78750.000	18.9533	20.9261	1.000000e-30
97.915141	78750.000	18.9526	20.9254	1.000000e-30
97.914462	78750.000	18.9520	20.9248	1.000000e-30
97.913780	78750.000	18.9513	20.9241	1.000000e-30
97.913094	78750.000	18.9506	20.9234	1.000000e-30
97.912405	78750.000	18.9499	20.9227	1.000000e-30
97.911712	78750.000	18.9492	20.9220	1.000000e-30
97.911016	78750.000	18.9485	20.9213	1.000000e-30
97.910316	78750.000	18.9478	20.9206	1.000000e-30
97.909613	78750.000	18.9471	20.9199	1.000000e-30
97.908907	78750.000	18.9464	20.9192	1.000000e-30
97.908197	78750.000	18.9457	20.9185	1.000000e-30
97.907484	78750.000	18.9450	20.9178	1.000000e-30
97.906768	78750.000	18.9443	20.9171	1.000000e-30

Şekil 26: Link Bütçesi - Kodlamalı

Buradan da görüleceği üzere kanal kodlama kazancı eklendiğinde Eb/N0 değeri 20,92 dB seviyelerine gelmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında yolcu uçakları içerisinde internet kullanımının sağlanması amacıyla gönderme ve alma hattı için ayrı ayrı faz dizinli anten yapıları tasarlanmıştır. Gönderme ve alma hatları için Ka-Bant frekans aralığında dizi antenler tasarlanmıştır. Anten tasarımlarının performans değerlendirmeleri kapsamında hem gönderme hem de alma hattı antenleri için STK simülasyon ortamında haberleşme senaryosu ve link bütçesi analizleri yapılmıştır.

4.1. Anten Tasarım Sonuçları

Anten tasarımlarına ait sonuçlar bu başlık altında incelenmiştir. Bu kapsamda gönderme hattı için 26 – 31 GHz arasında, alma hattı için ise 18 – 21 GHz arasında haberleşme kabiliyetine sahip olacak anten tasarımları gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Gönderme Hattı Anteni Tasarımı

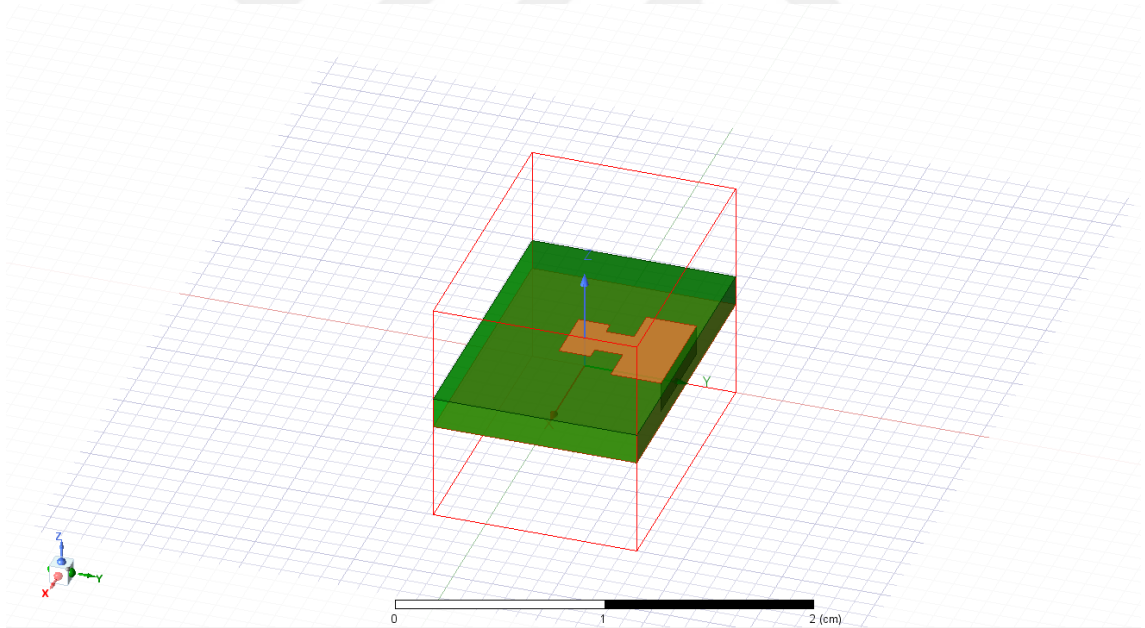
Ka-Bant gönderme hattı frekans aralığında (26 - 31 GHz) haberleşme kabiliyetine sahip antenler için tasarım faaliyetlerinin sonuçları bu başlık altında incelenmiştir. İdeal anten tasarımına ulaşabilmek adına ilk olarak tek yama anten tasarlanmış olup, sonrasında bu anten ile 1x2, 2x2, 4x4 ve 8x8 dizi anten yapıları oluşturulmuş ve bu geliştirme süreci kapsamında tespit edilen avantajlar ve dezavantajlar belirlenmiştir.

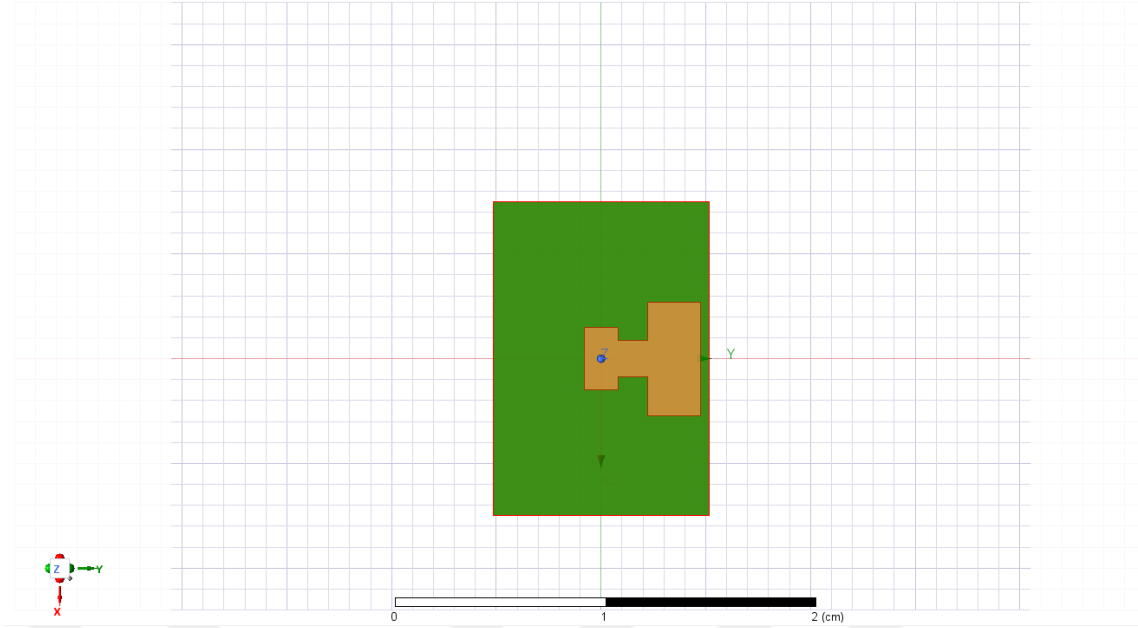
4.1.1.1. Gönderme Hattı Tek Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Ka-Bant gönderme hattında kullanılmak üzere ilk olarak tek yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında dielektrik malzeme olarak 2.2 dielektrik sabitine sahip ve kalınlığı 1.575 mm olan Rogers RT Duroid 5880 kullanılmıştır. Rogers RT Duroid 5880 dielektrik malzemesinin özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan yama anten görselleri Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29'da görülmektedir.

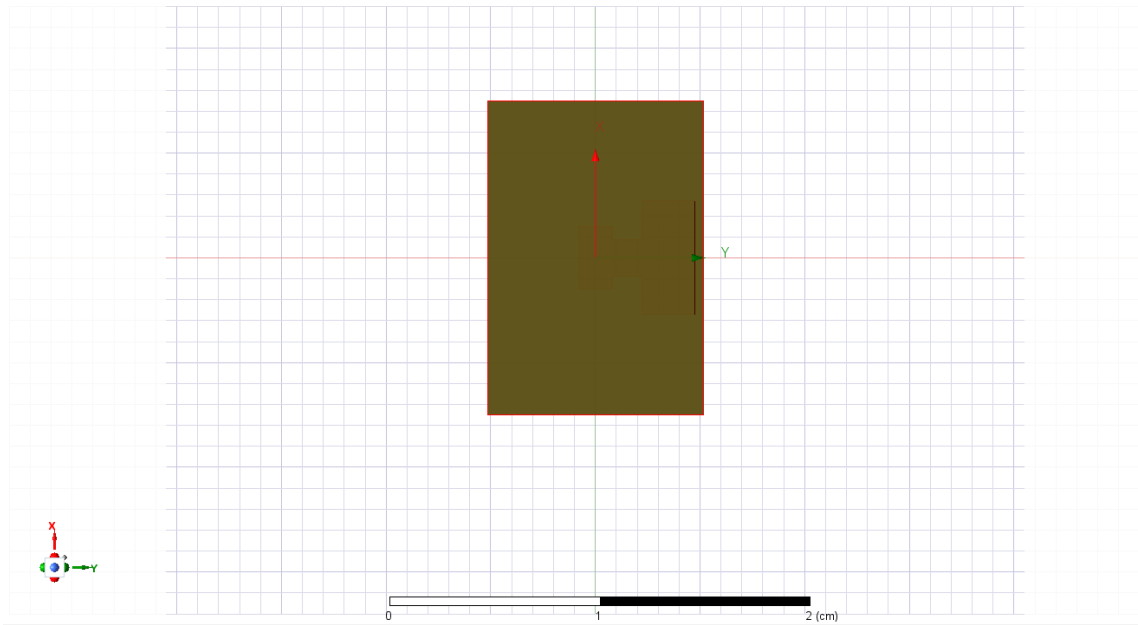
Çizelge 4: Rogers RT Duroid 5880 Özellikleri

Özellik	Değer
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	2,2
Kayıt Faktörü (Dissipation Factor)	0.0009 (GHz başına)
İletkenlik (Conductivity)	0.0009 S/m
Kalınlık (Thickness)	1.575 mm (0.062 inç)
Sıcaklık Katsayısı (Thermal Coefficient)	50 ppm/°C
Maksimum İşlem Sıcaklığı	180°C (370°F)
Tutkal Sıcaklığı (Glass Transition Temperature)	280°C (536°F)
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-55 / +125 °C

**Şekil 27:** Tek Yama Anten Görünümü

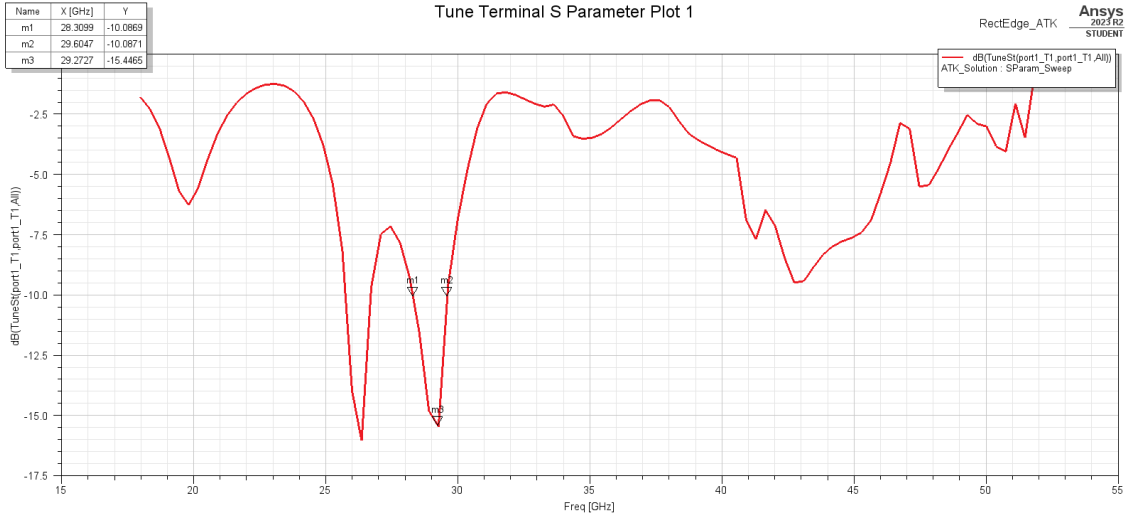


Şekil 28: Tek Yama Anten Görünümü (üst)



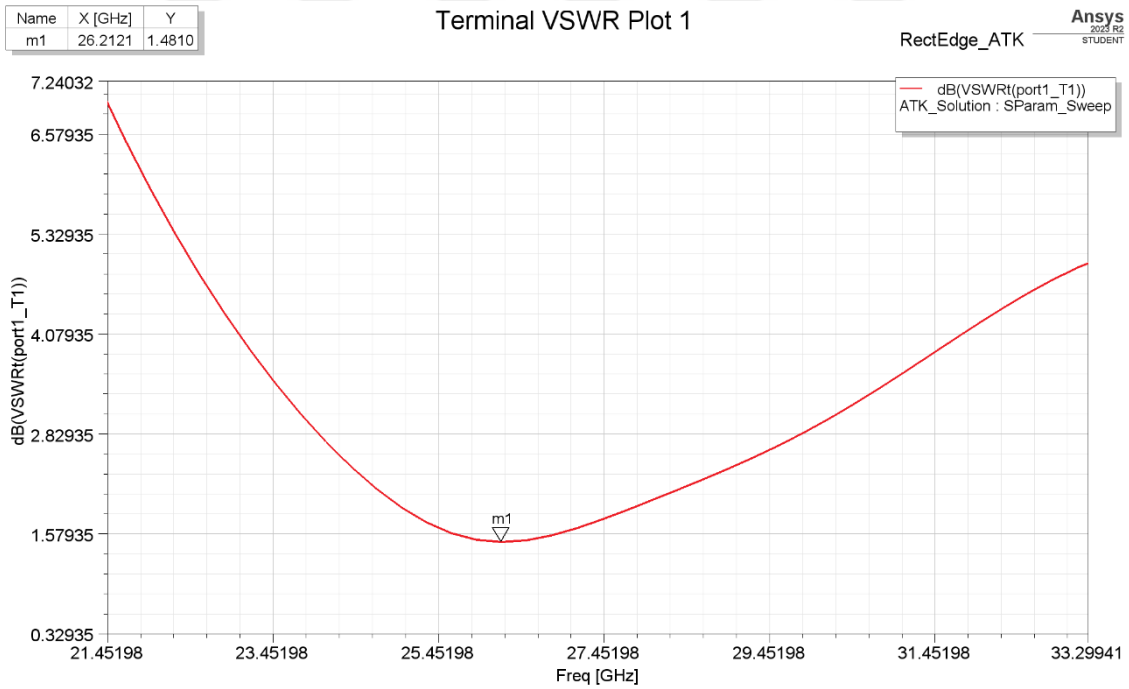
Şekil 29: Tek Yama Anten Görünümü (alt)

Tek yama antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (return loss, S_{11}) değeri Şekil 30'da görülmektedir.



Şekil 30: Tek Yama Anten S(1,1) Grafiği

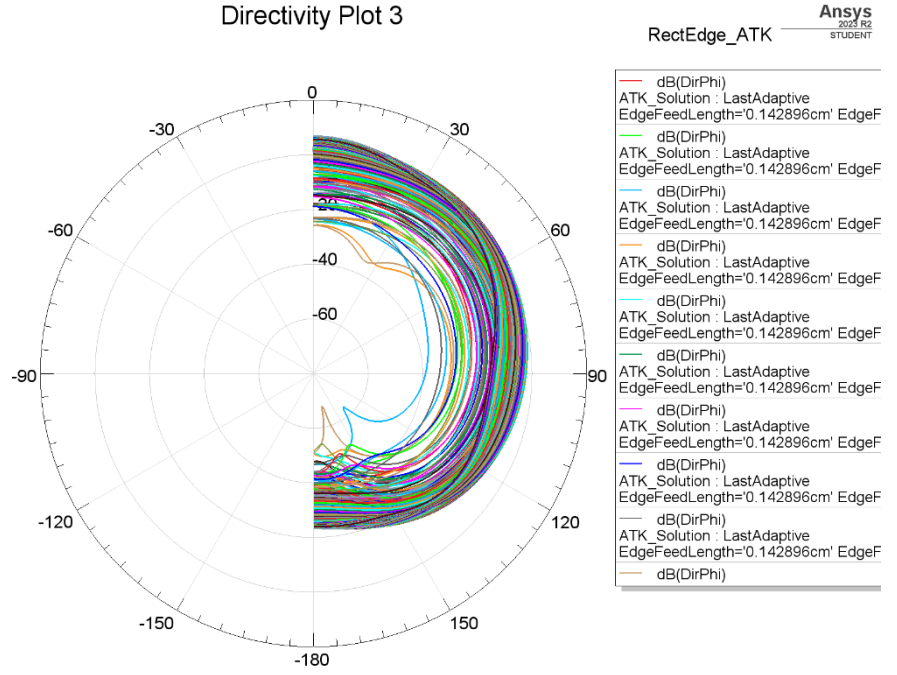
Grafik incelendiğinde tek yama antenin 28,30 – 29,60 GHz frekans aralığında 1,3 GHz (%4,44) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 29,27 GHz merkez frekansından -15,44 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 31: Tek Yama Anten VSWR Grafiği

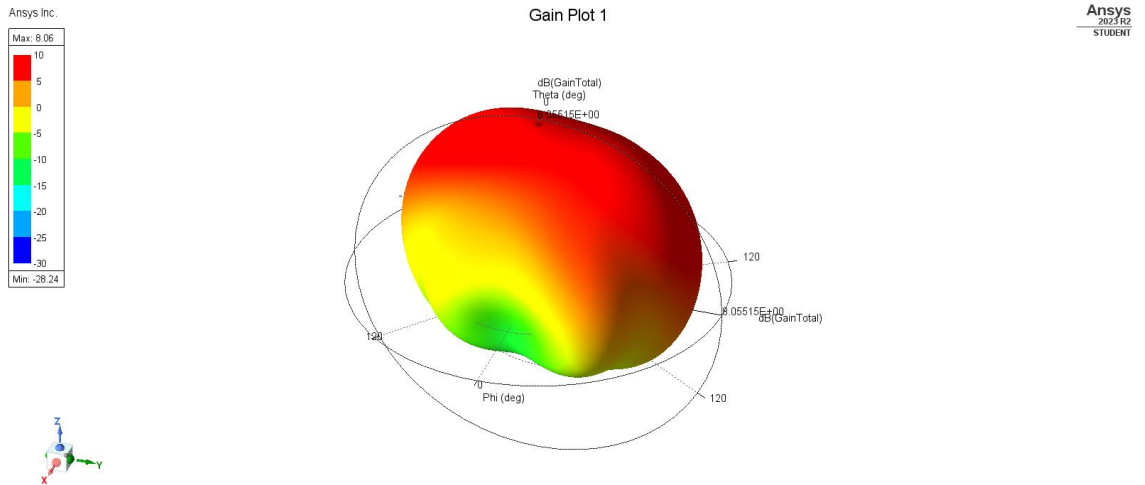
Bir diğer önemli parametre ise duran dalga oranı (VSWR)'dır. Tek yama anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 26,21 GHz için 1,48 olarak elde edilmiştir. VSWR

grafığı Şekil 31’de görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği (Directivity) ise Şekil 32’de görülmektedir.



Şekil 32: Tek Yama Anten Directivity Grafığı

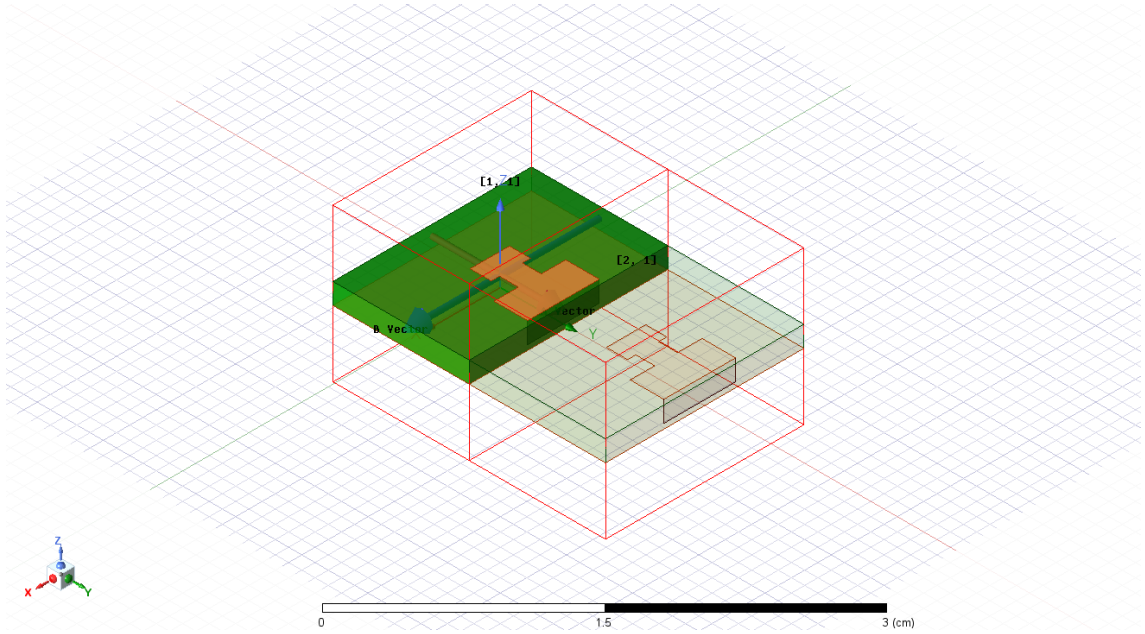
Tasarlanan anten için 3 boyutlu kazanç grafığı Şekil 33’te görülmektedir. Bu analizden antenin 8,06 dBi kazanca sahip olduğu anlaşılmaktadır.



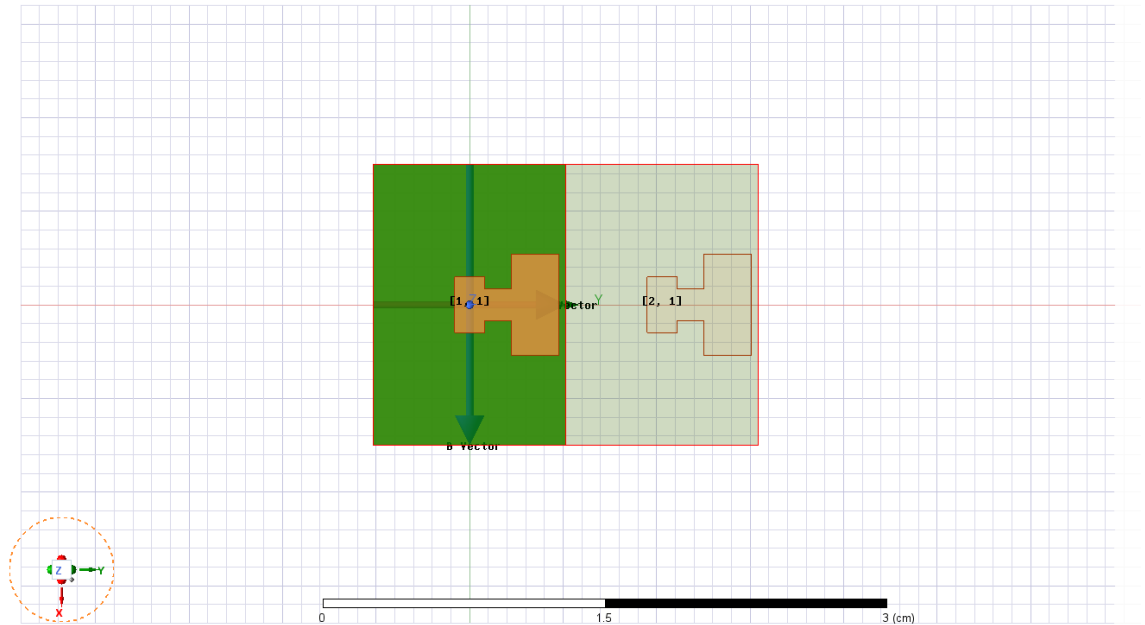
Şekil 33: Tek Yama Anten Kazanç Grafığı

4.1.1.2.Gönderme Hattı 1x2 Dizi Anten Tasarımı

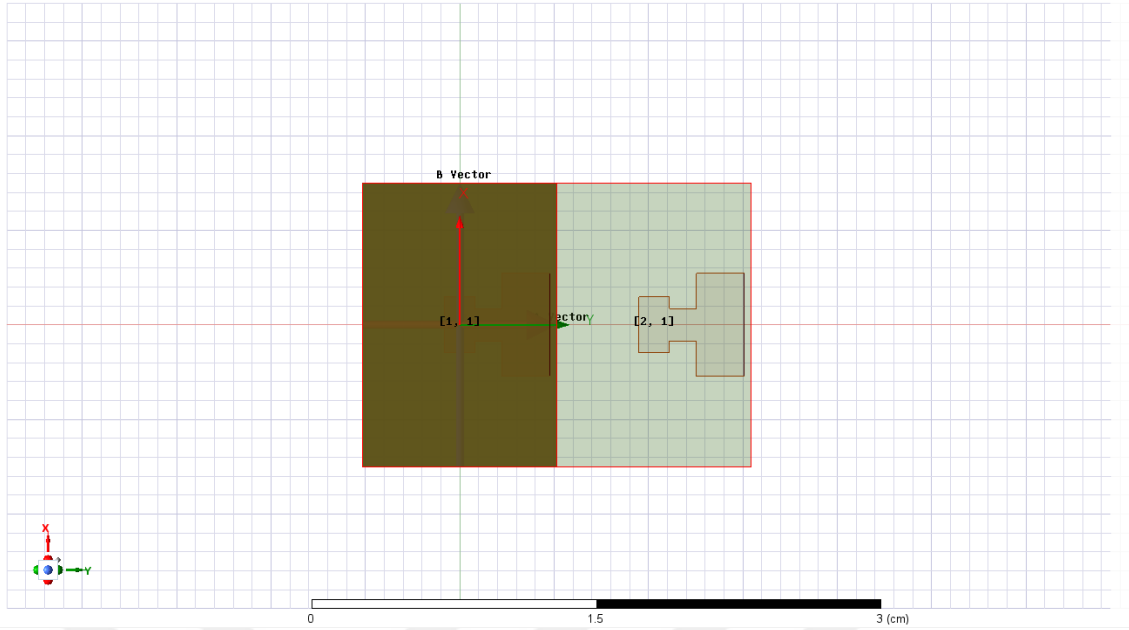
Ka-Bant gönderme hattında kullanılmak üzere bir sonraki adım olarak 1x2 mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında aynı dielektrik malzeme kullanılmıştır. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan yama anten görselleri Şekil 34, Şekil 35 ve Şekil 36'da görülmektedir.



Şekil 34: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü

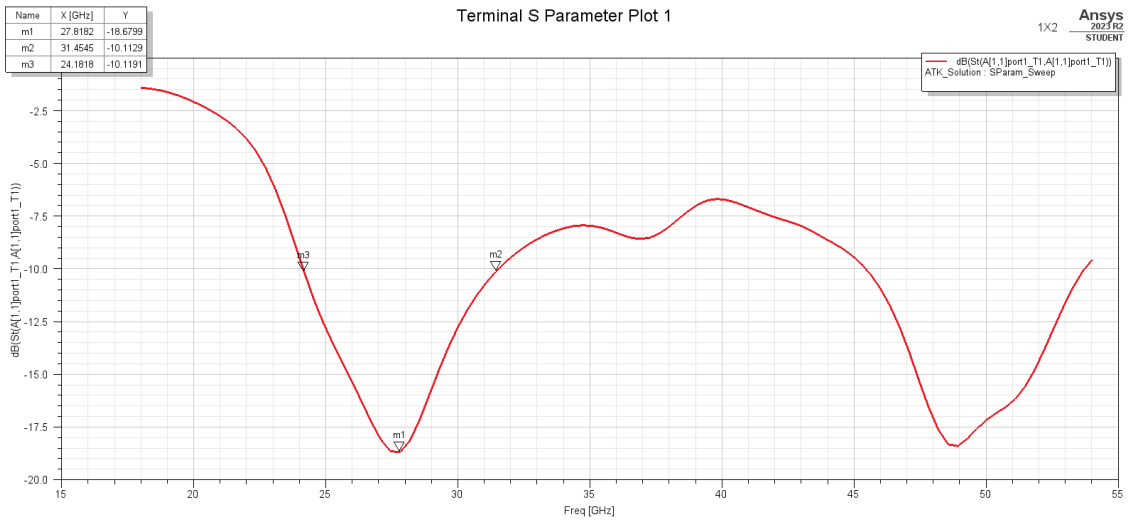


Şekil 35: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (üst)



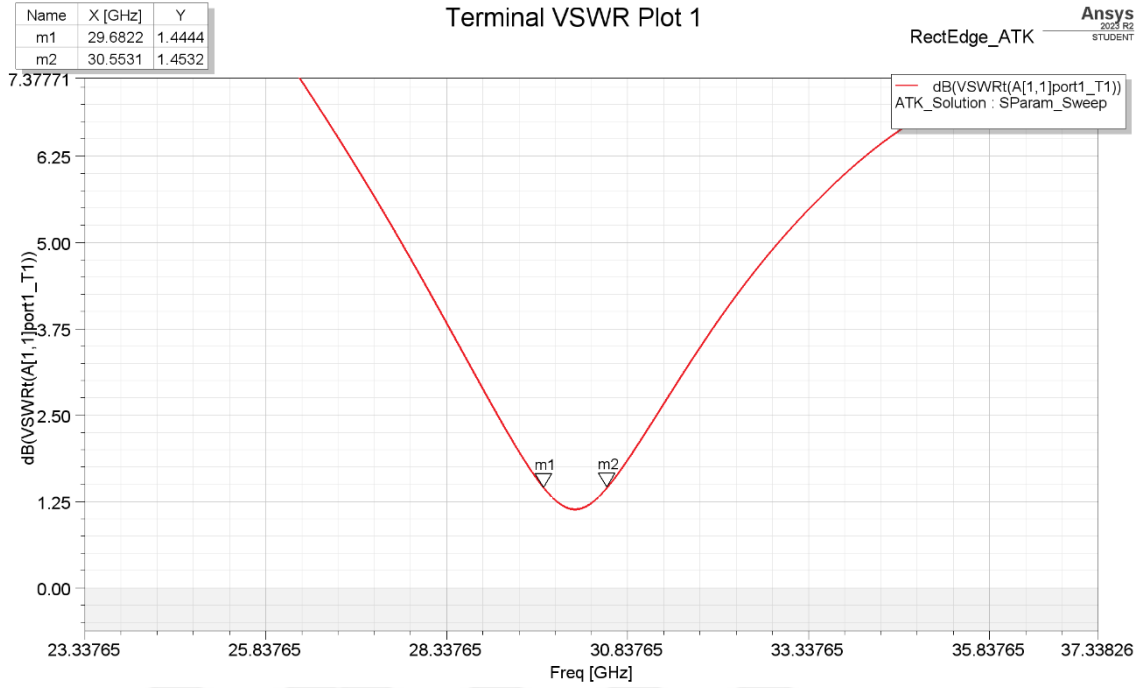
Şekil 36: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (alt)

1x2 mikroşerit dizi antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (S_{11}) değeri Şekil 37'de görülmektedir.



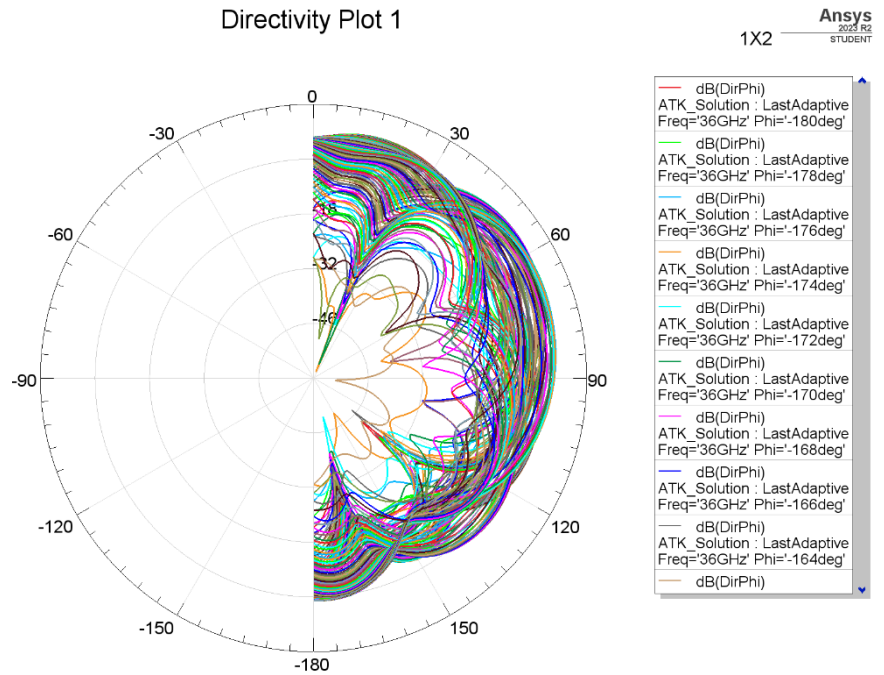
Şekil 37: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten S(1,1) Grafiği

Grafik incelendiğinde 1x2 mikroşerit dizi antenin 24,18 – 31,45 GHz frekans aralığında 7,27 GHz (%26,14) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 27,81 GHz merkez frekansından -18,67 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.



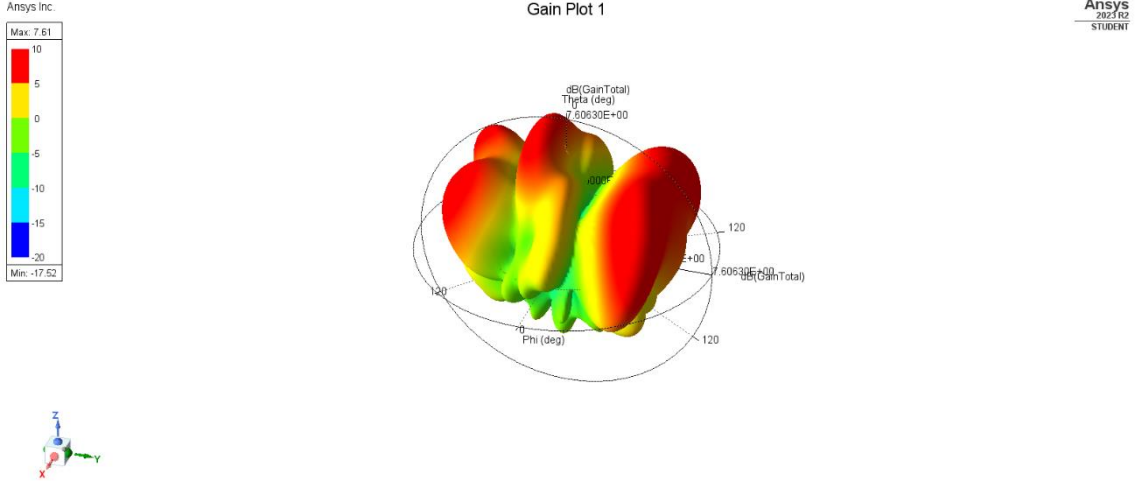
Şekil 38: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten VSWR Grafiği

1x2 mikroşerit dizi anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 29,68 GHz için 1,44 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 38’de görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği (Directivity) ise Şekil 39’da görülmektedir.



Şekil 39: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Directivity Grafiği

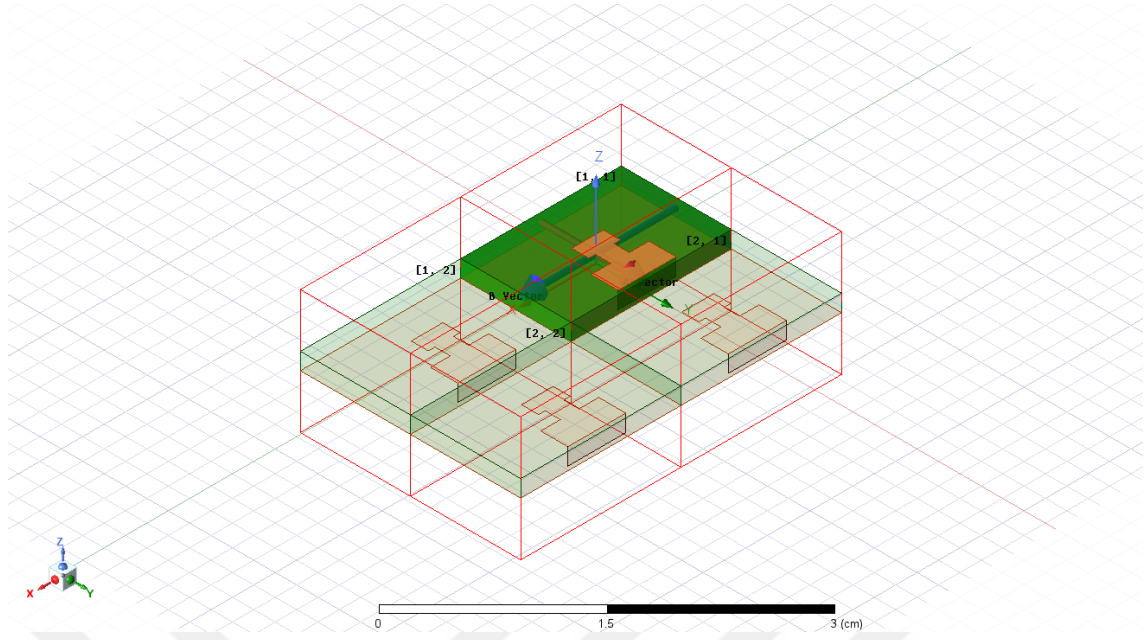
Tasarlanan anten için 3 boyutlu kazanç grafiği Şekil 40'ta görülmektedir. Bu analizden antenin 7,61 dBi kazanca sahip olduğu anlaşılmaktadır.



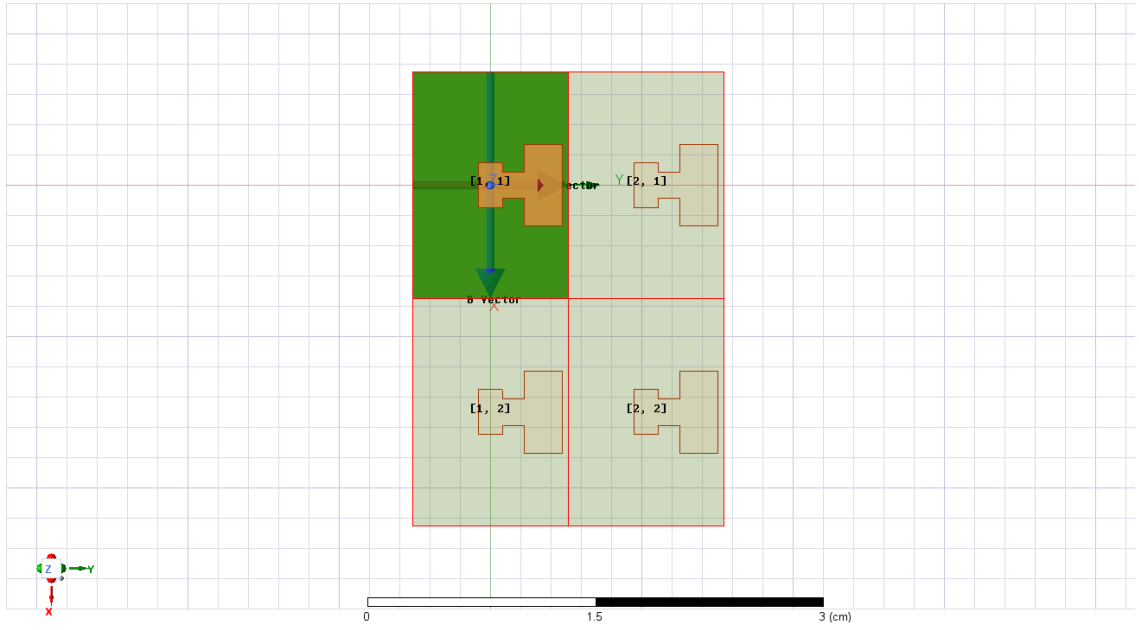
Şekil 40: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Kazanç Grafiği

4.1.1.3. Gönderme Hattı 2x2 Dizi Anten Tasarımı

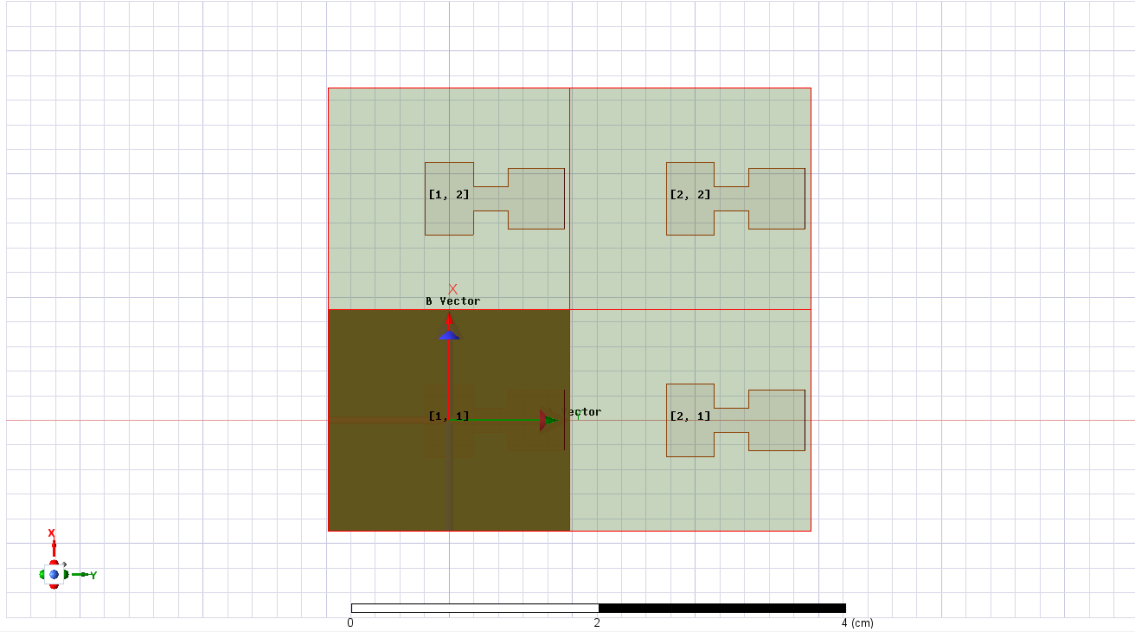
Ka-Bant gönderme hattında kullanılmak üzere bir sonraki adım olarak 2x2 mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında aynı dielektrik malzeme kullanılmıştır. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan yama anten görselleri Şekil 41, Şekil 42 ve Şekil 43'te görülmektedir.



Şekil 41: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü

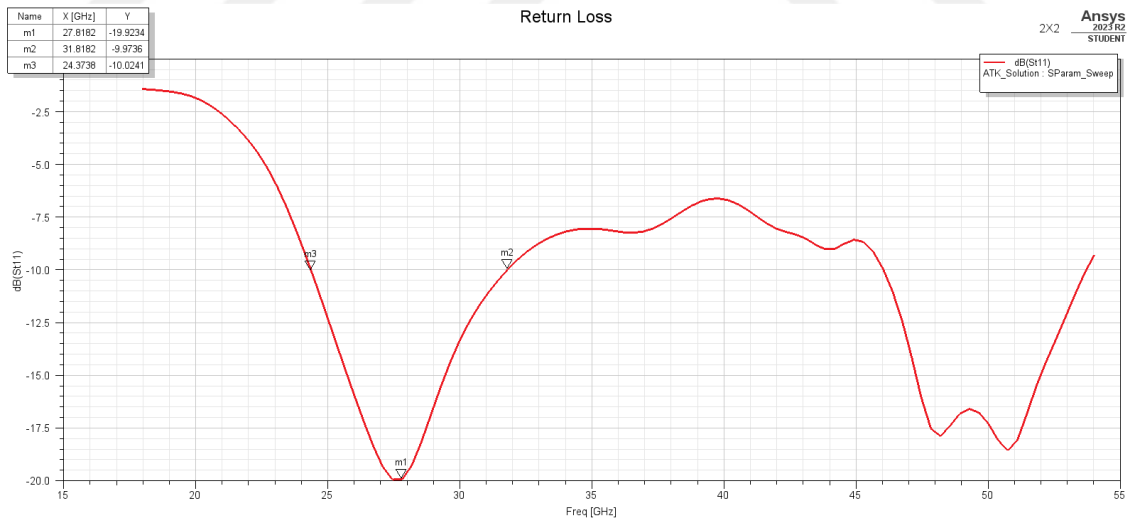


Şekil 42: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (üst)



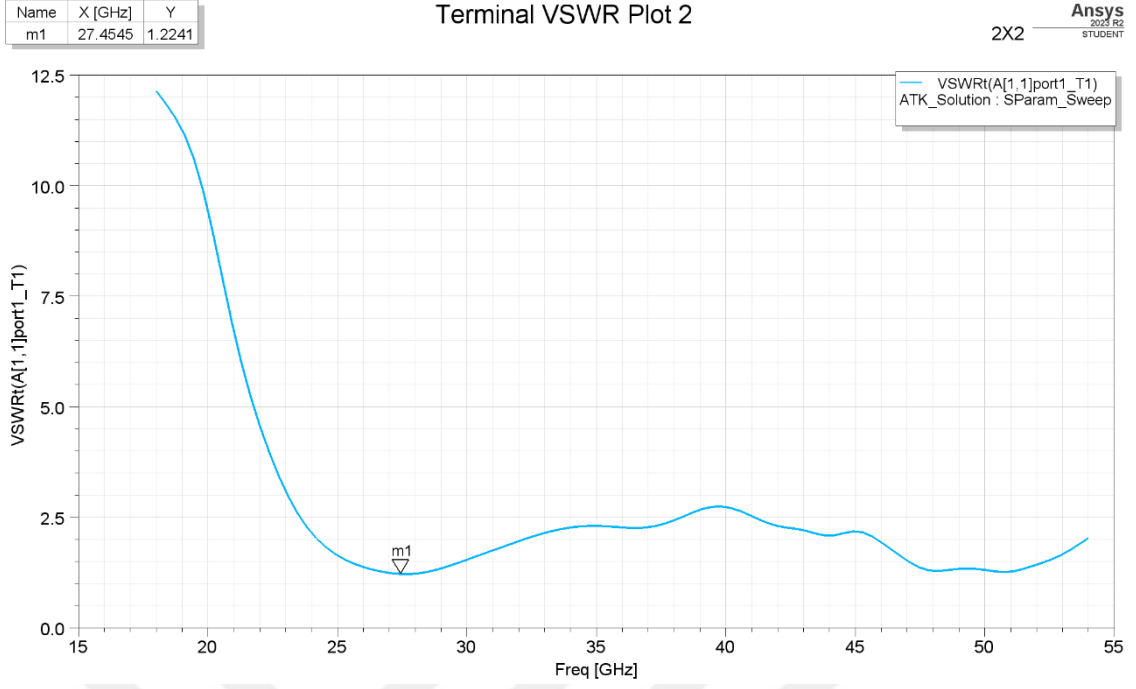
Şekil 43: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (alt)

2x2 mikroşerit dizi antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (S_{11}) değeri Şekil 44'te görülmektedir.



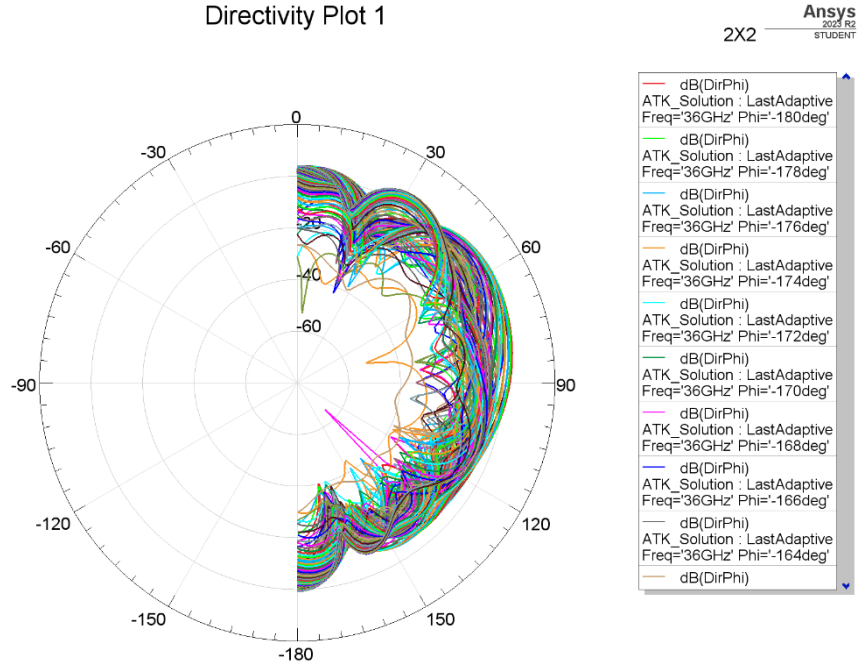
Şekil 44: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten $S(1,1)$ Grafiği

Grafik incelendiğinde 2x2 mikroşerit dizi antenin 24,37 – 31,81 GHz frekans aralığında 7,44 GHz (%26,75) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 27,81 GHz merkez frekansından -19,92 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.



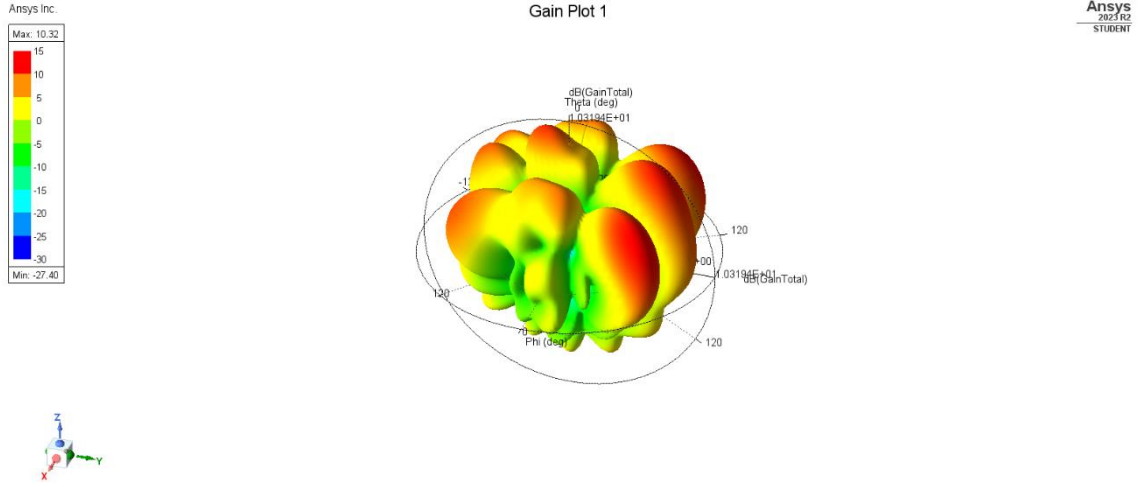
Şekil 45: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten VSWR Grafiği

2x2 mikroşerit dizi anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 27,45 GHz için 1,22 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 45'te görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği (Directivity) ise Şekil 46'da görülmektedir.



Şekil 46: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Directivity Grafiği

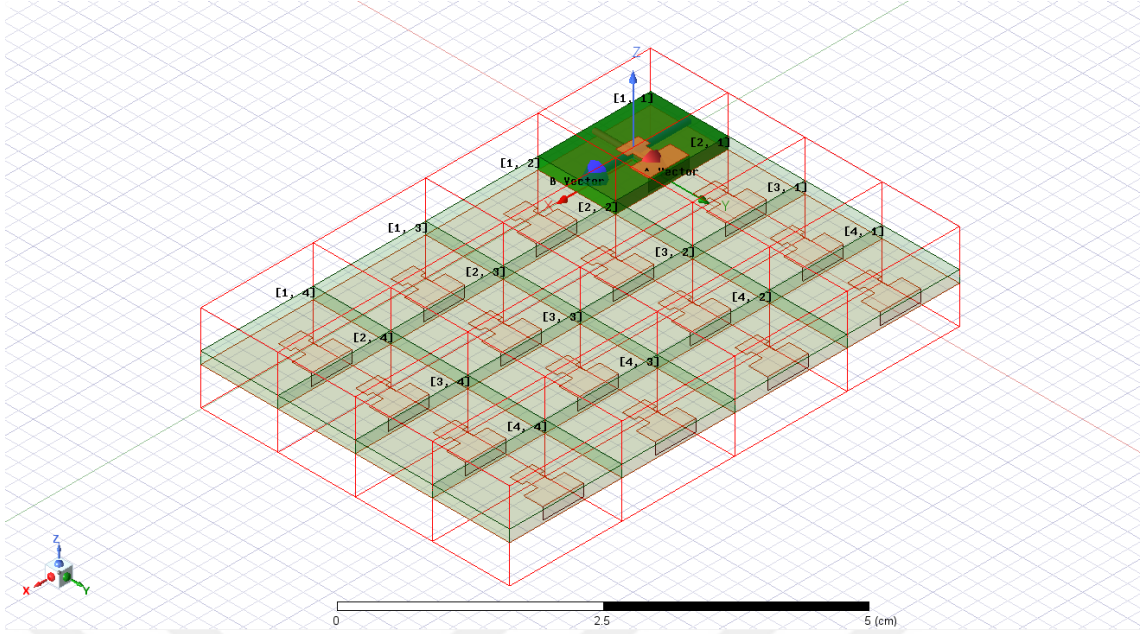
Tasarlanan anten için 3 boyutlu kazanç grafiği Şekil 47’de görülmektedir. Bu analizden antenin 10,32 dBi kazanca sahip olduğu anlaşılmaktadır.



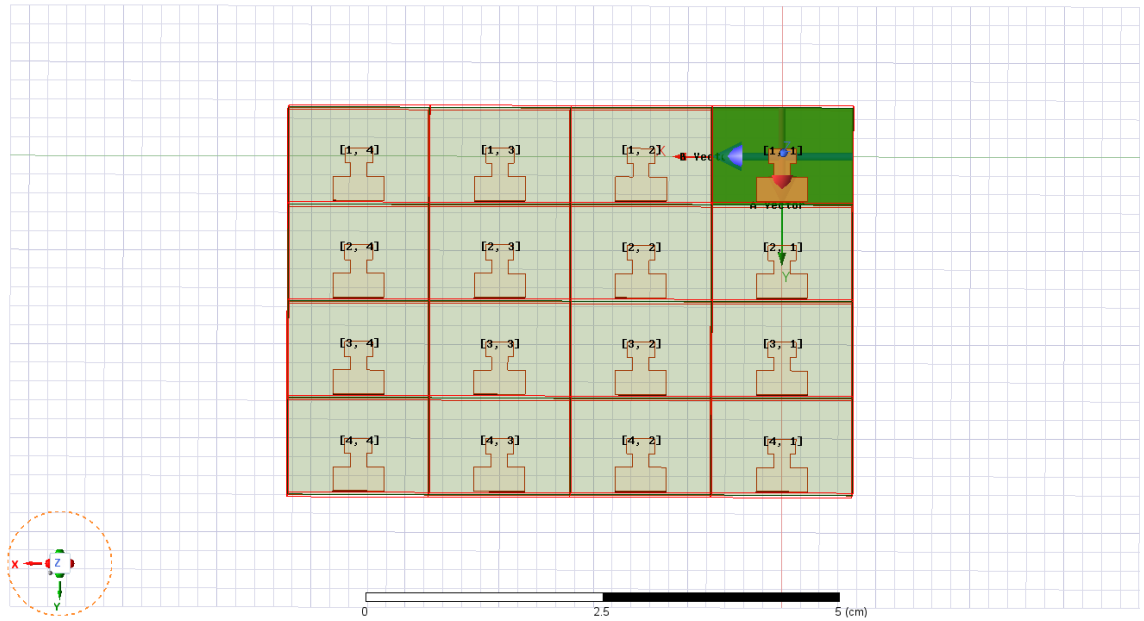
Şekil 47: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Kazanç Grafiği

4.1.1.4. Gönderme Hattı 4x4 Dizi Anten Tasarımı

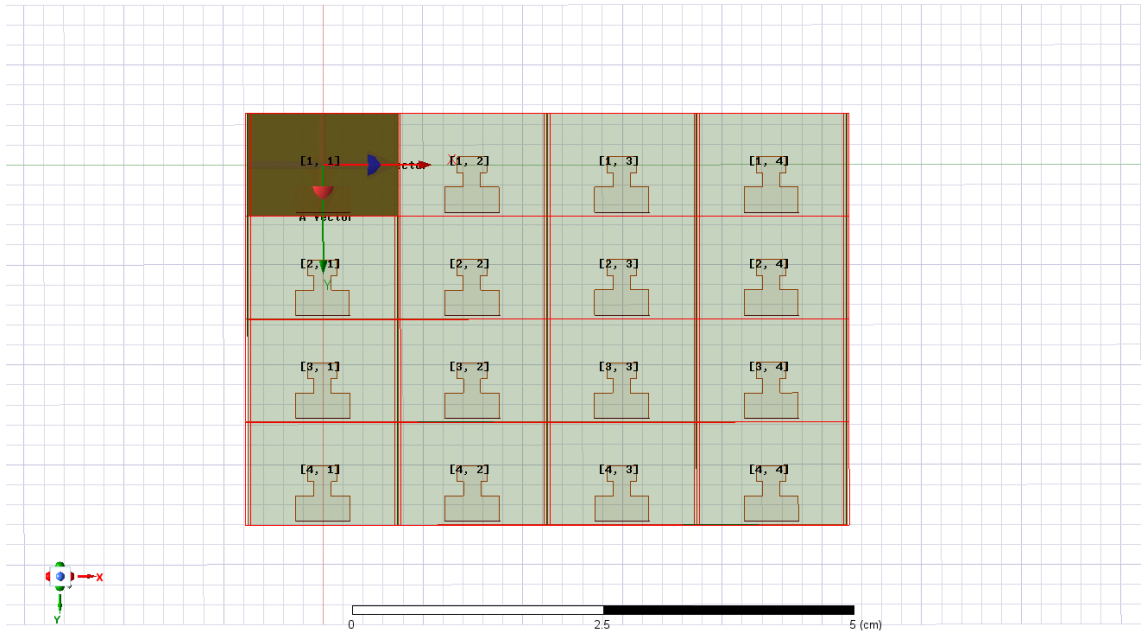
Ka-Bant gönderme hattında kullanılmak üzere bir sonraki adım olarak 4x4 mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında aynı dielektrik malzeme kullanılmıştır. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan yama anten görselleri Şekil 48, Şekil 49 ve Şekil 50’de görülmektedir.



Şekil 48: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü

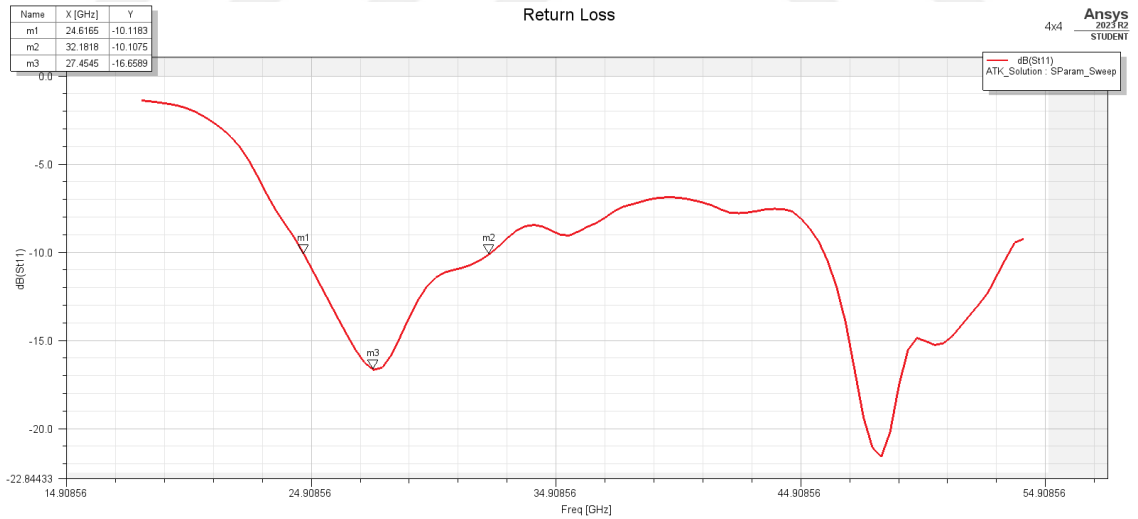


Şekil 49: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (üst)



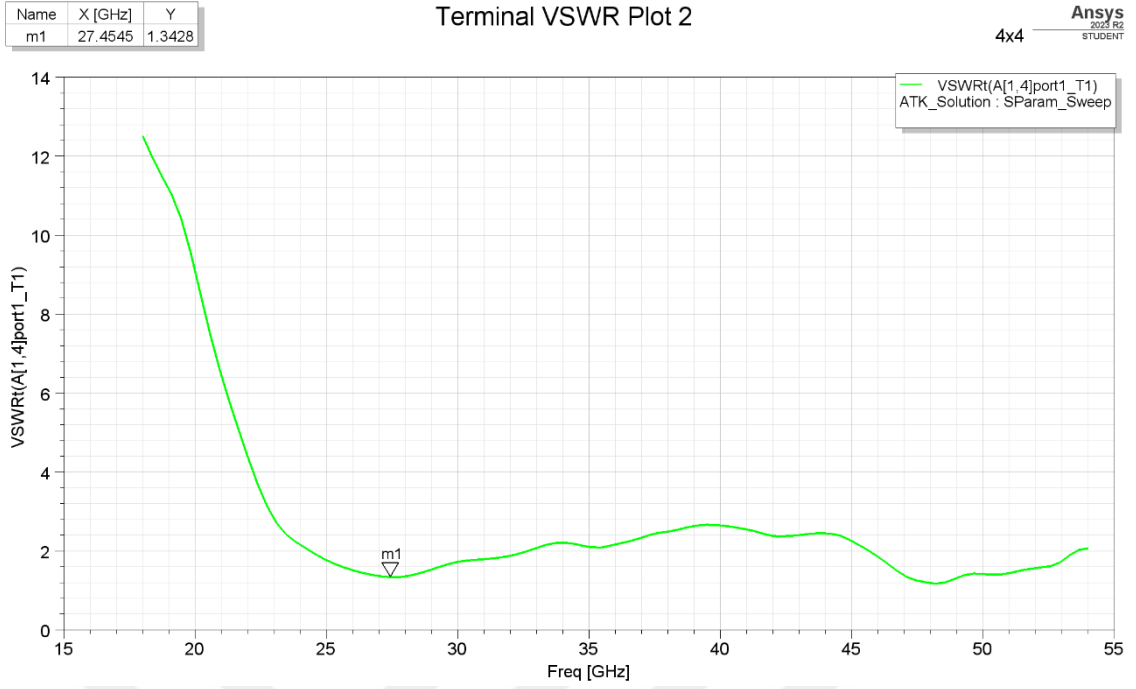
Şekil 50: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (alt)

4x4 mikroşerit dizi antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (S_{11}) değeri Şekil 51'de görülmektedir.



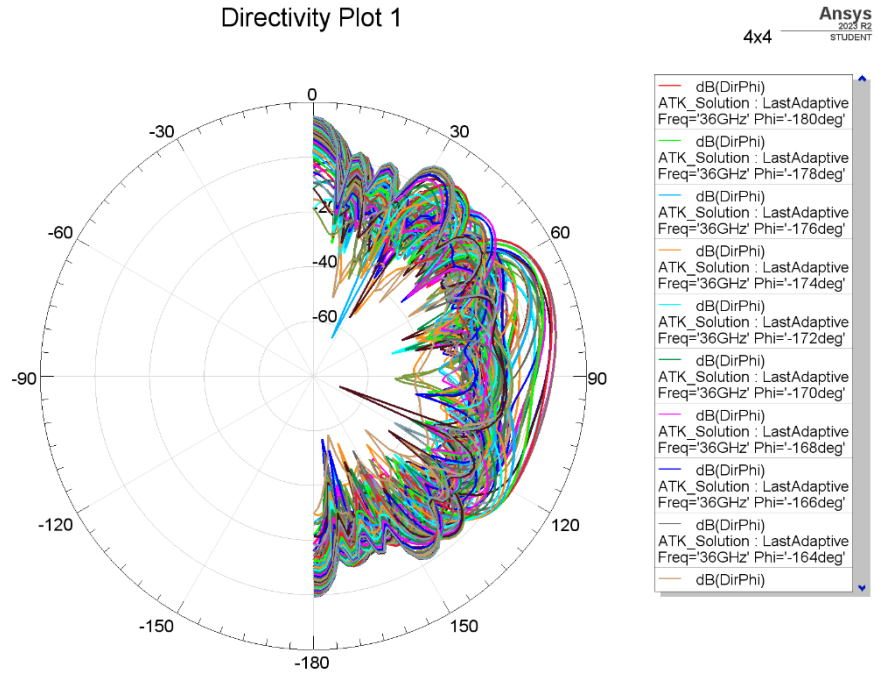
Şekil 51: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten S(1,1) Grafiği

Grafik incelendiğinde 4x4 mikroşerit dizi antenin 24,61 – 32,18 GHz frekans aralığında 7,57 GHz (%27,57) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 27,45 GHz merkez frekansından -16,65 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.



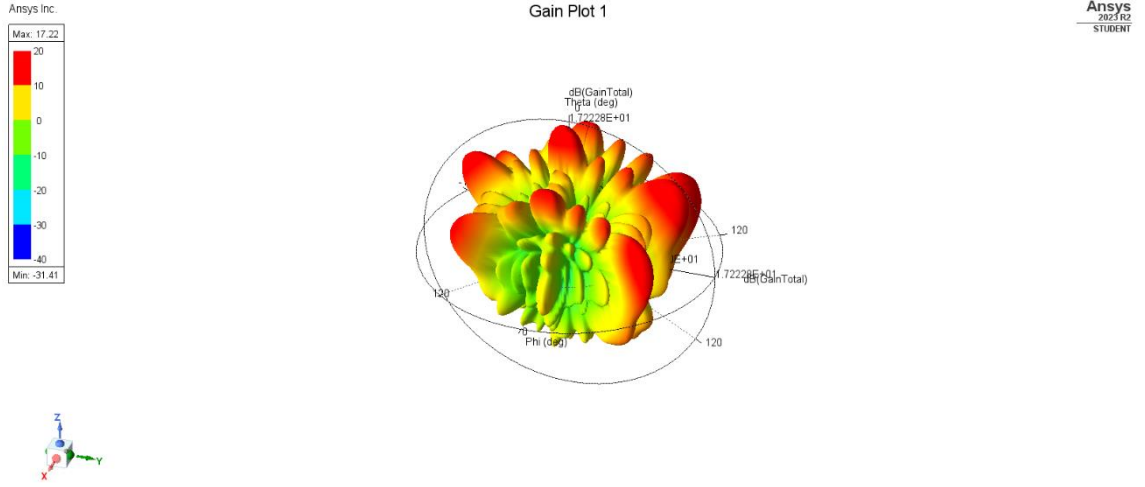
Şekil 52: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten VSWR Grafiği

4x4 mikroşerit dizi anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 27,45 GHz için 1,34 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 52’de görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği ise Şekil 53’te görülmektedir.



Şekil 53: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Directivity Grafiği

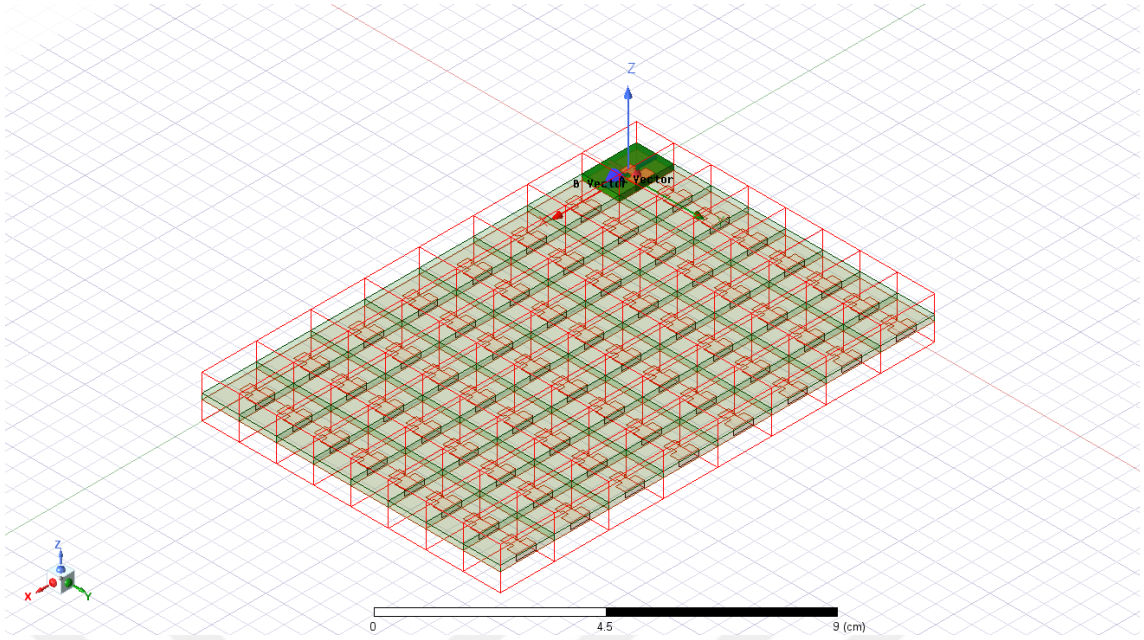
Tasarlanan anten için 3 boyutlu kazanç grafiği Şekil 54'te görülmektedir. Bu analizden antenin 17,22 dBi kazanca sahip olduğu anlaşılmaktadır.



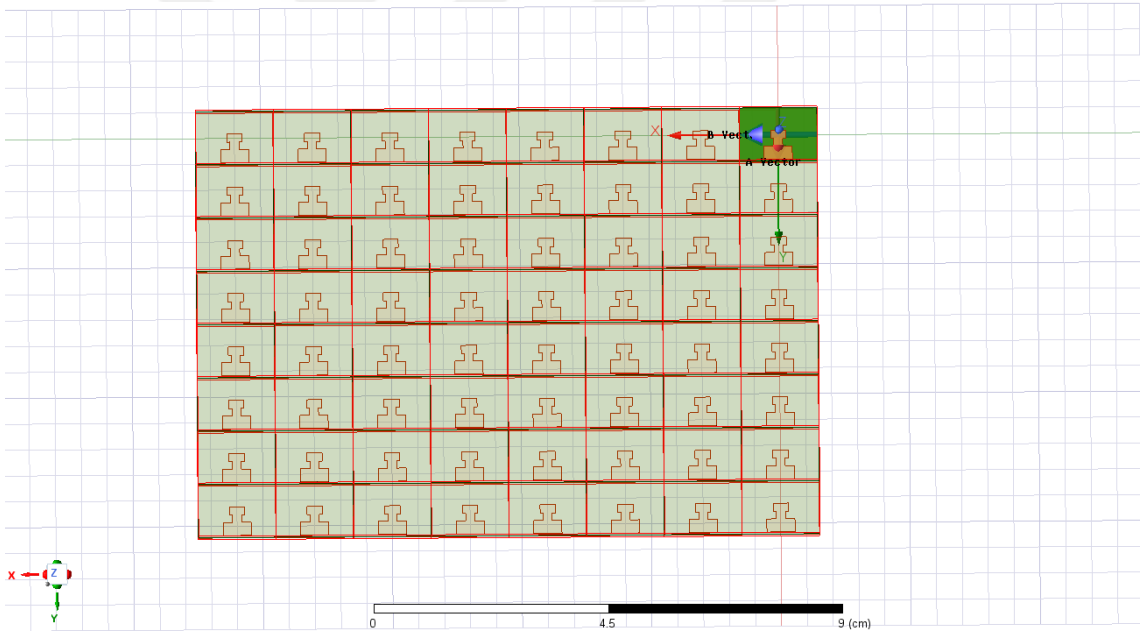
Şekil 54: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Kazanç Grafiği

4.1.1.5. Gönderme Hattı 8x8 Dizi Anten Tasarımı

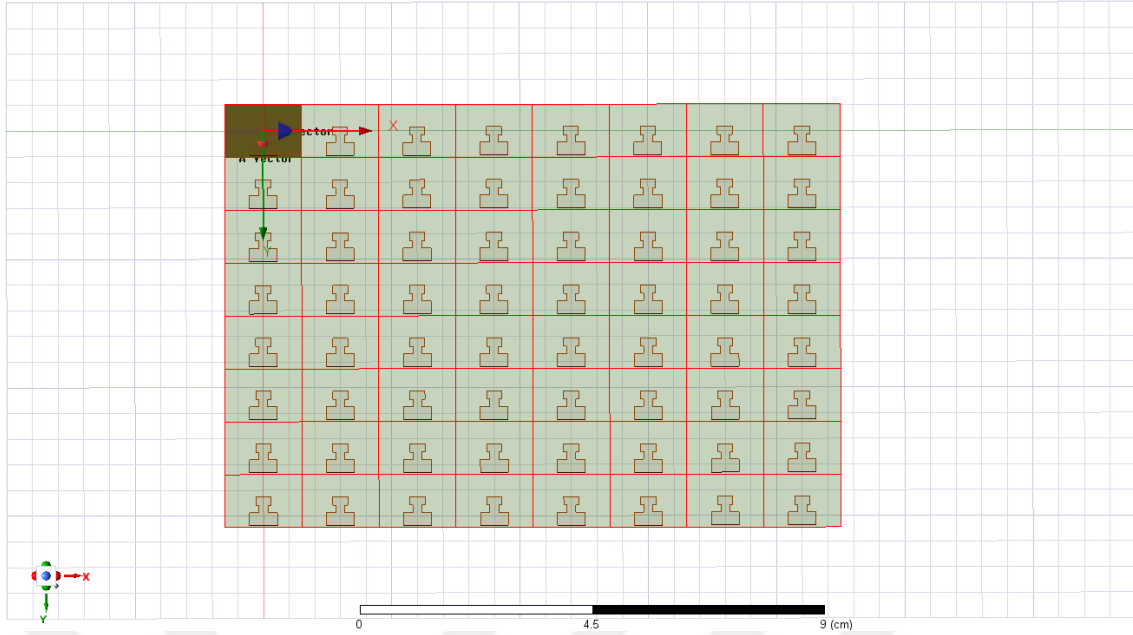
Ka-Bant gönderme hattında kullanılmak üzere son adım olarak 8x8 mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında aynı dielektrik malzeme kullanılmıştır. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan yama anten görselleri Şekil 55, Şekil 56 ve Şekil 57'de görülmektedir.



Şekil 55: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü

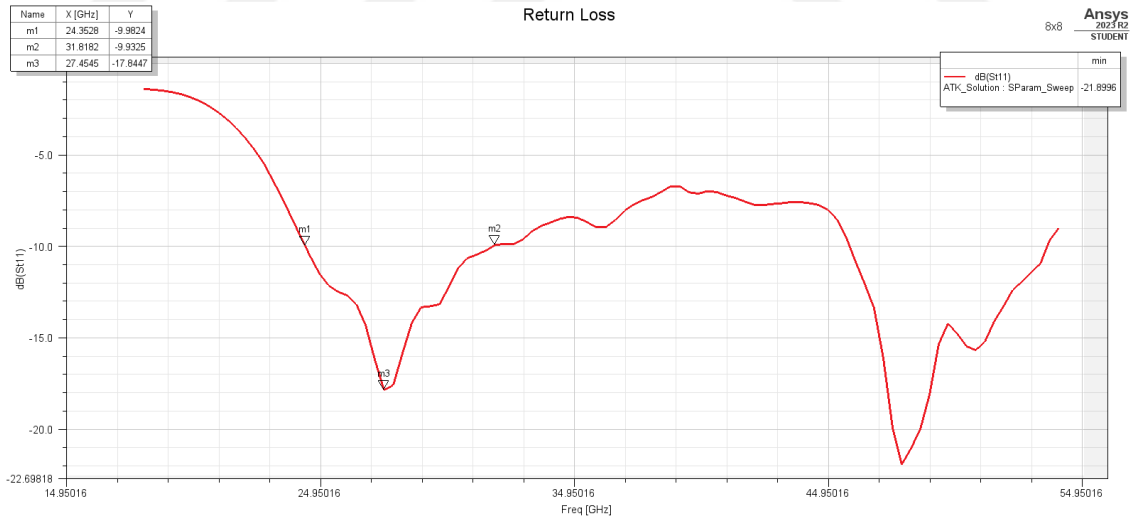


Şekil 56: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (üst)



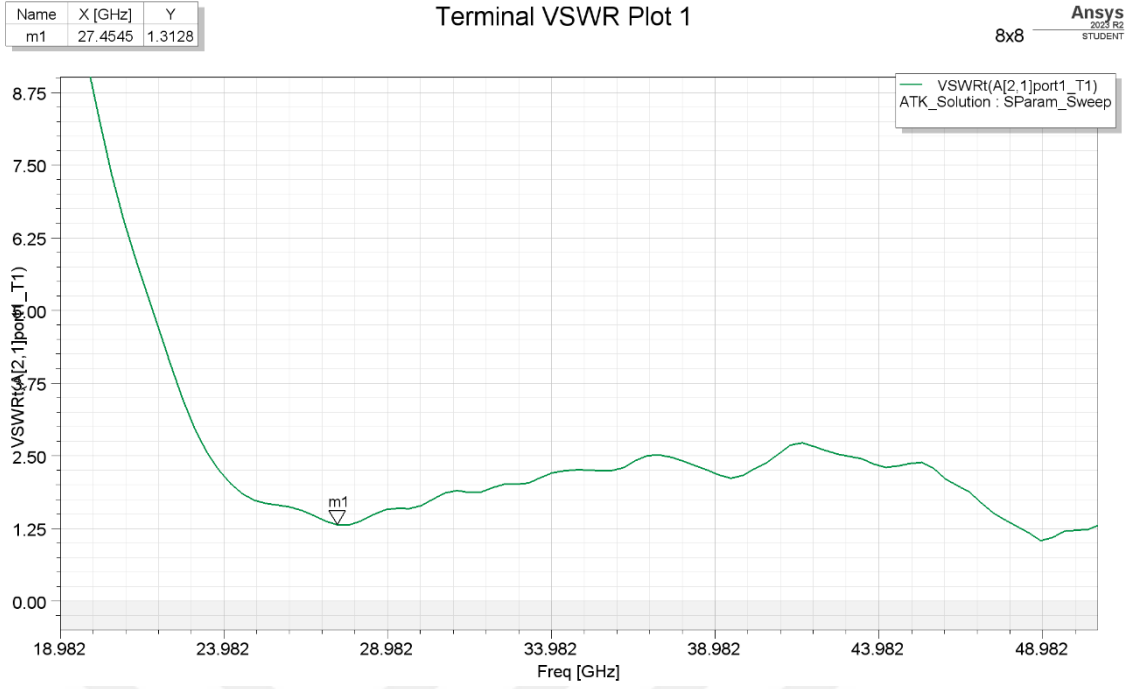
Şekil 57: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (alt)

8x8 mikroşerit dizi antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (S_{11}) değeri Şekil 58’de görülmektedir.



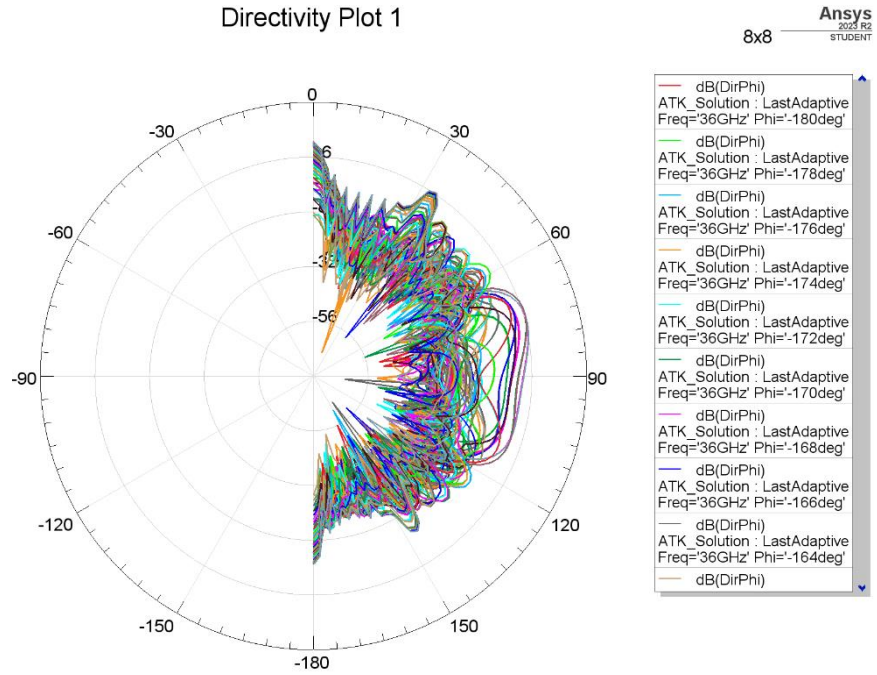
Şekil 58: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten S(1,1) Grafiği

Grafik incelendiğinde 8x8 mikroşerit dizi antenin 24,35 – 31,81 GHz frekans aralığında 7,46 GHz (%27,17) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 27,45 GHz merkez frekansından -17,84 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.



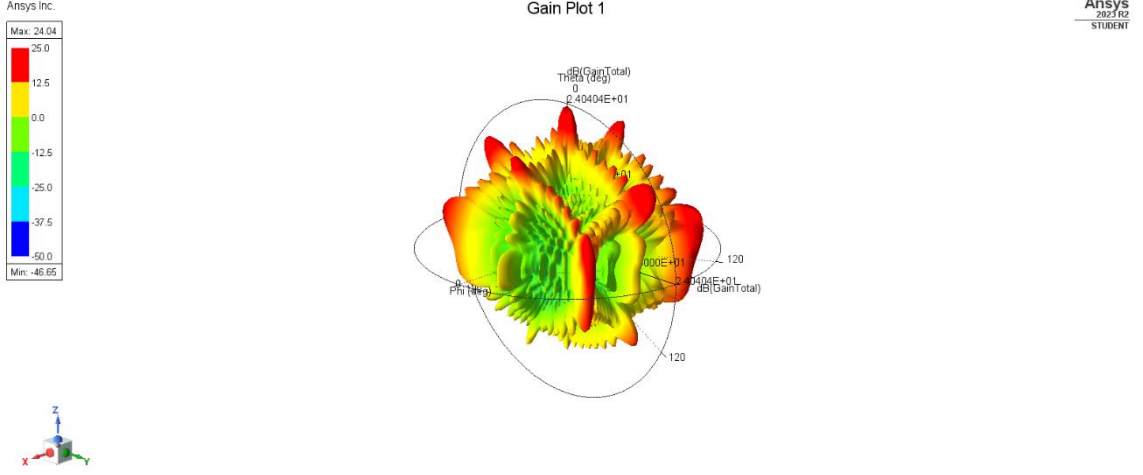
Şekil 59: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten VSWR Grafiği

8x8 mikroşerit dizi anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 27,45 GHz için 1,31 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 59'da görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği ise Şekil 60'da görülmektedir.



Şekil 60: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Directivity Grafiği

Tasarlanan anten için 3 boyutlu kazanç grafiği Şekil 61’de görülmektedir. Bu analizden antenin 24,04 dBi kazanca sahip olduğu anlaşılmaktadır.



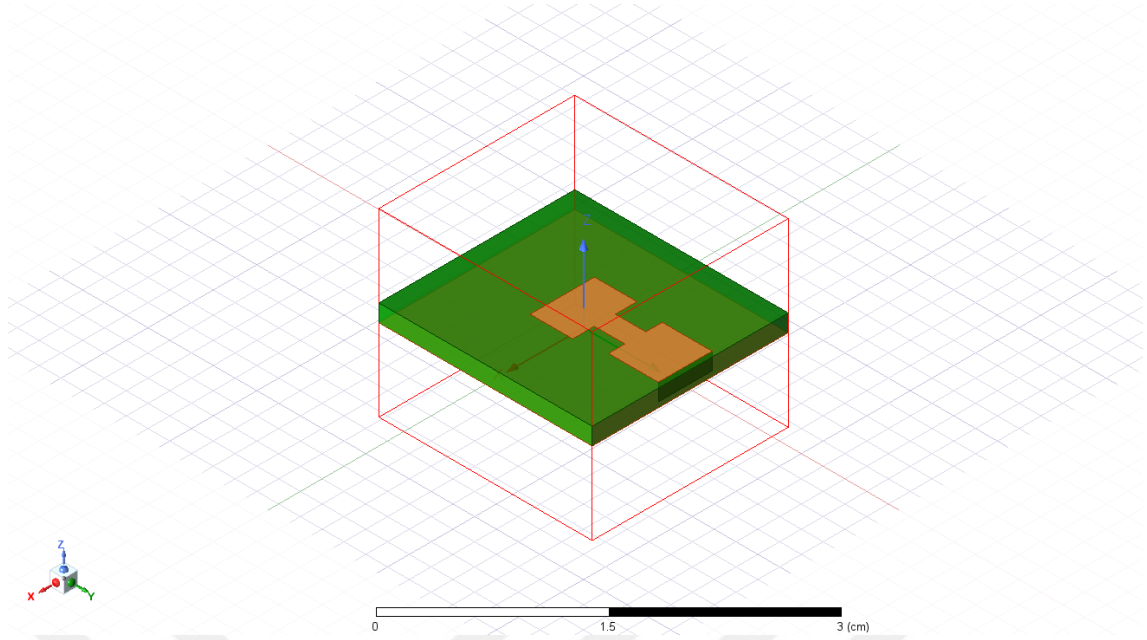
Şekil 61: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Kazanç Grafiği

4.1.2. Alma Hattı Anteni Tasarımı

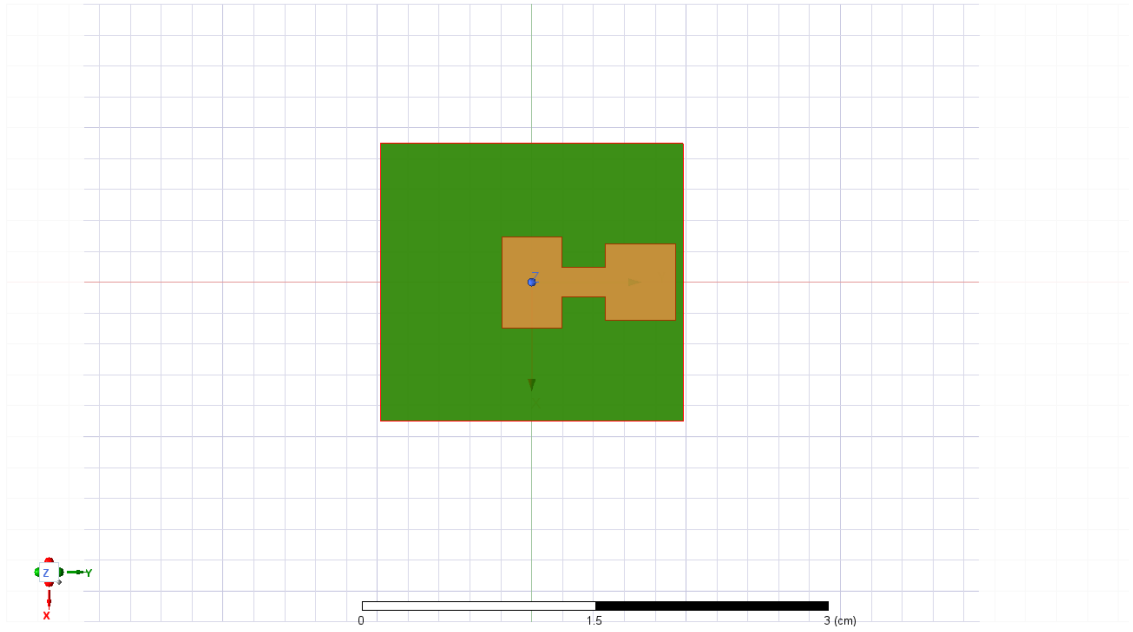
Ka-Bant alma hattı frekans aralığında (18 - 21 GHz) haberleşme kabiliyetine sahip antenler için tasarım faaliyetlerinin sonuçları bu başlık altında incelenmiştir. İdeal anten tasarımına ulaşabilmek adına ilk olarak tek yama anten tasarlanmış olup, sonrasında bu anten ile 1x2, 2x2, 4x4 ve 8x8 dizi anten yapıları oluşturulmuş ve bu geliştirme süreci kapsamında tespit edilen avantajlar ve dezavantajlar belirlenmiştir.

4.1.2.1. Alma Hattı Tek Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

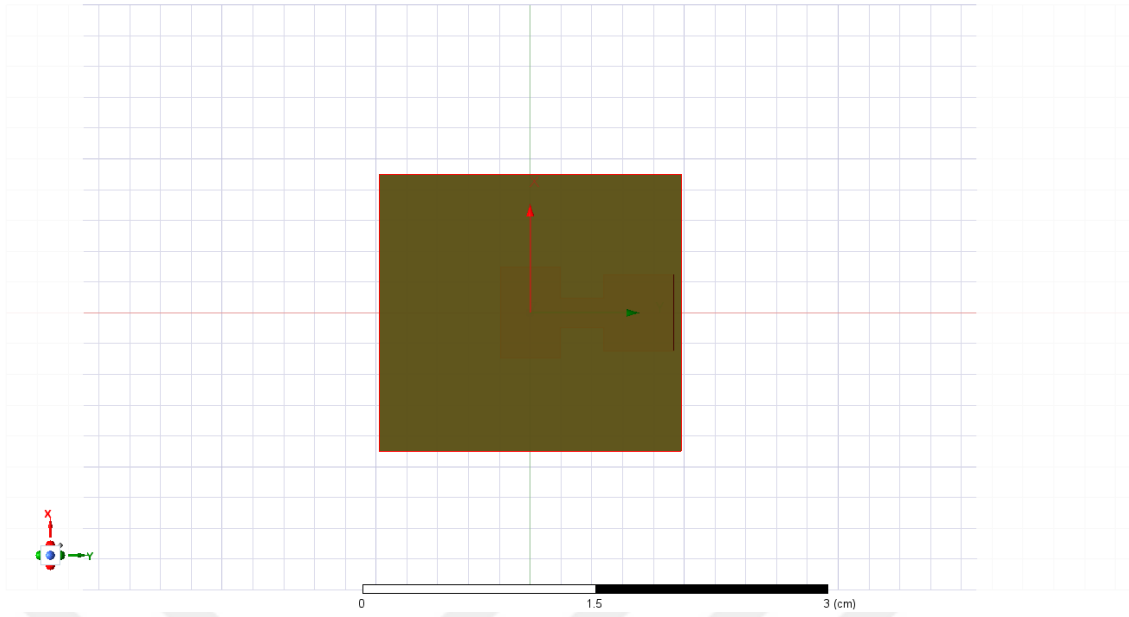
Ka-Bant alma hattında kullanılmak üzere ilk olarak tek yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında dielektrik malzeme olarak gönderme hattı tasarımları için de kullanılan 2.2 dielektrik sabitine sahip ve kalınlığı 1.575 mm olan Rogers RT Duroid 5880 kullanılmıştır. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan yama anten görselleri Şekil 62, Şekil 63 ve Şekil 64’de görülmektedir.



Şekil 62: Tek Yama Anten Görünümü

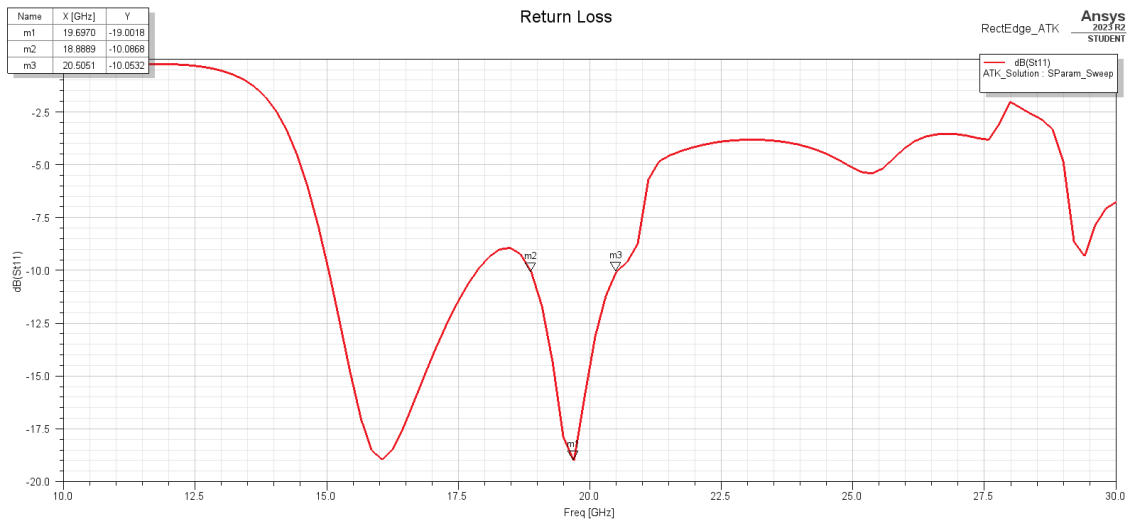


Şekil 63: Tek Yama Anten Görünümü (üst)



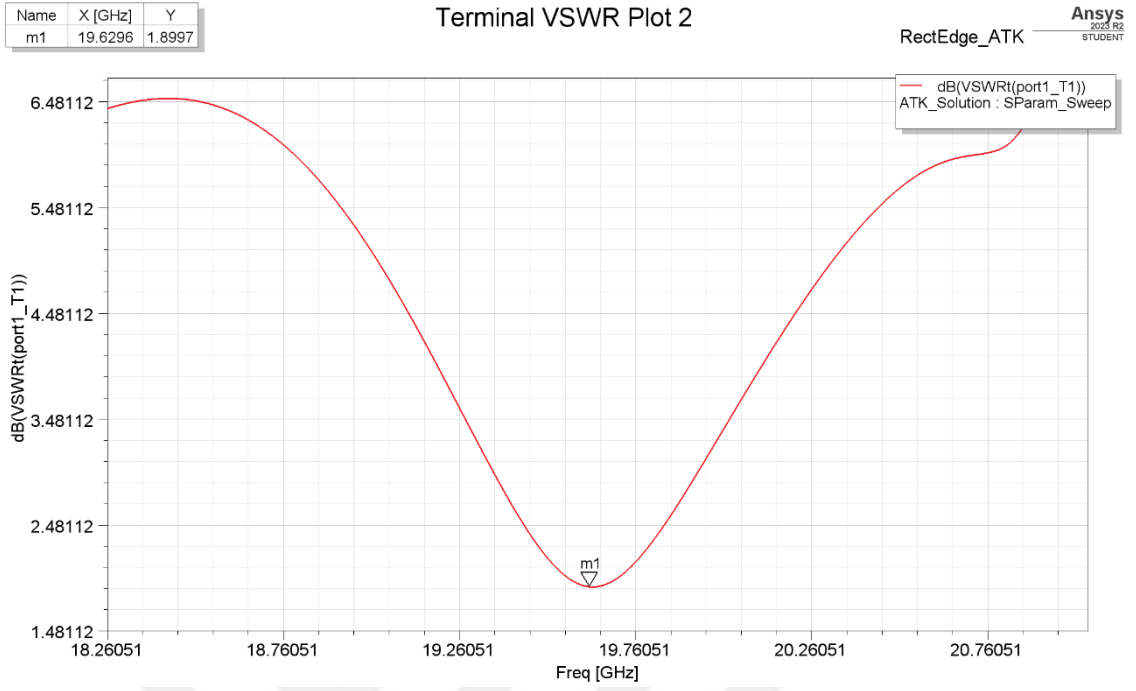
Şekil 64: Tek Yama Anten Görünümü (alt)

Tek yama antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (return loss, S_{11}) değeri Şekil 65'te görülmektedir.



Şekil 65: Tek Yama Anten $S(1,1)$ Grafiği

Grafik incelendiğinde tek yama antenin 18,88 – 20,50 GHz frekans aralığında 1,62 GHz (%8,22) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 19,69 GHz merkez frekansından -19 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.

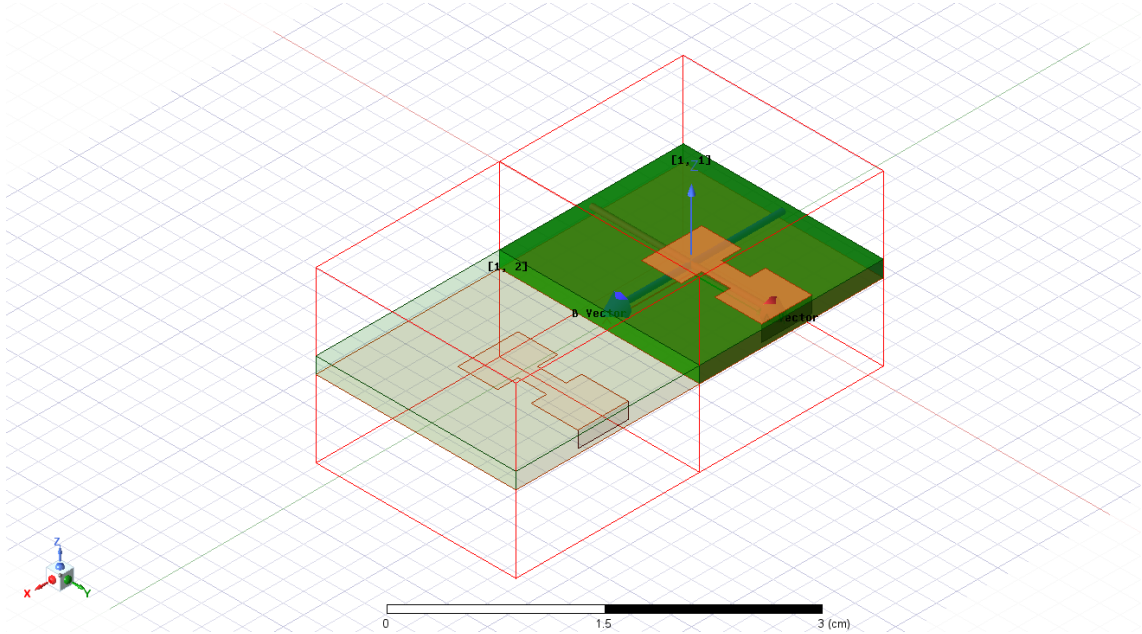


Şekil 66: Tek Yama Anten VSWR Grafiği

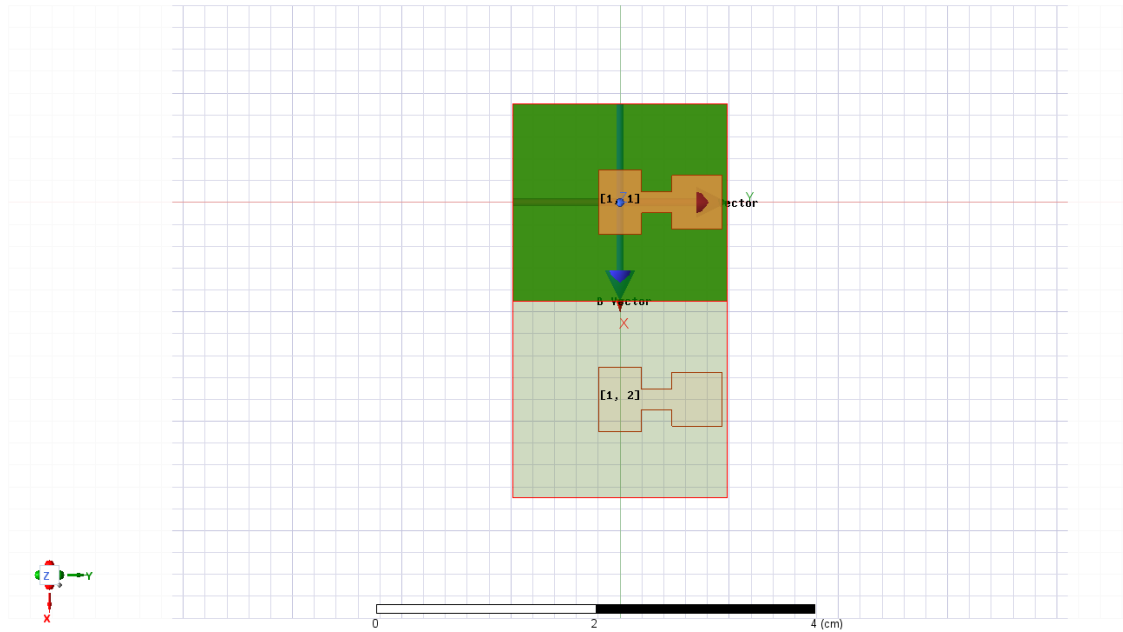
Bir diğer önemli parametre ise duran dalga oranı (VSWR)'dır. Tek yama anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 19,62 GHz için 1,89 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 66'da görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği (Directivity) ise Şekil 67'de görülmektedir.

4.1.2.2. Alma Hattı 1x2 Dizi Anten Tasarımı

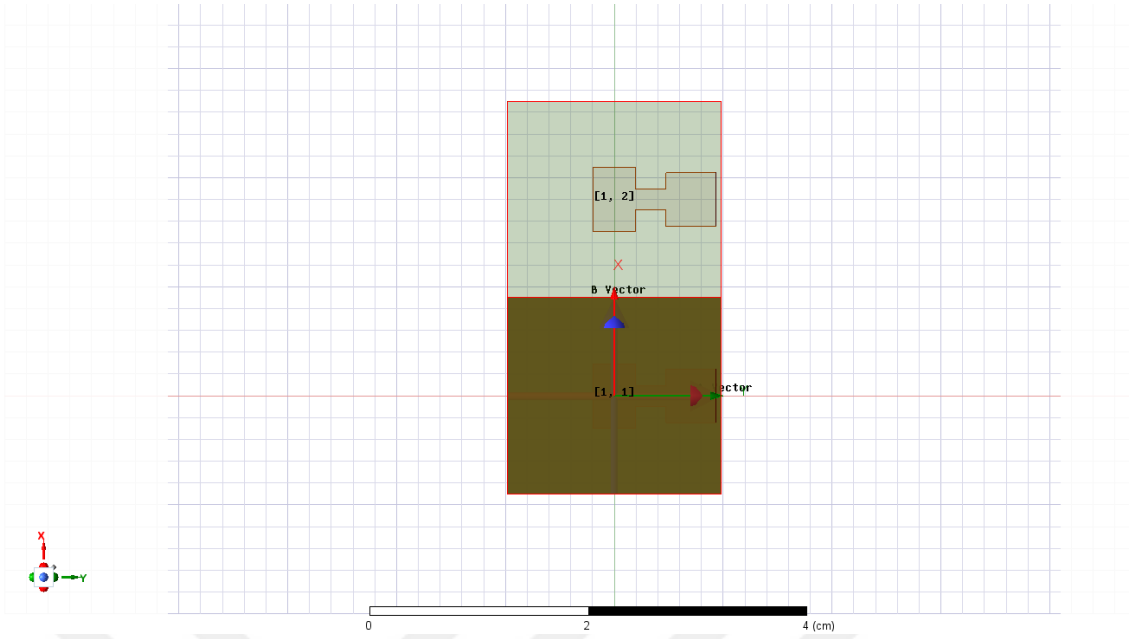
Ka-Bant alma hattında hattında kullanılmak üzere bir sonraki adım olarak 1x2 mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında aynı dielektrik malzeme kullanılmıştır. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan dizi anten görselleri Şekil 69, Şekil 70 ve Şekil 71’de görülmektedir.



Şekil 69: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü

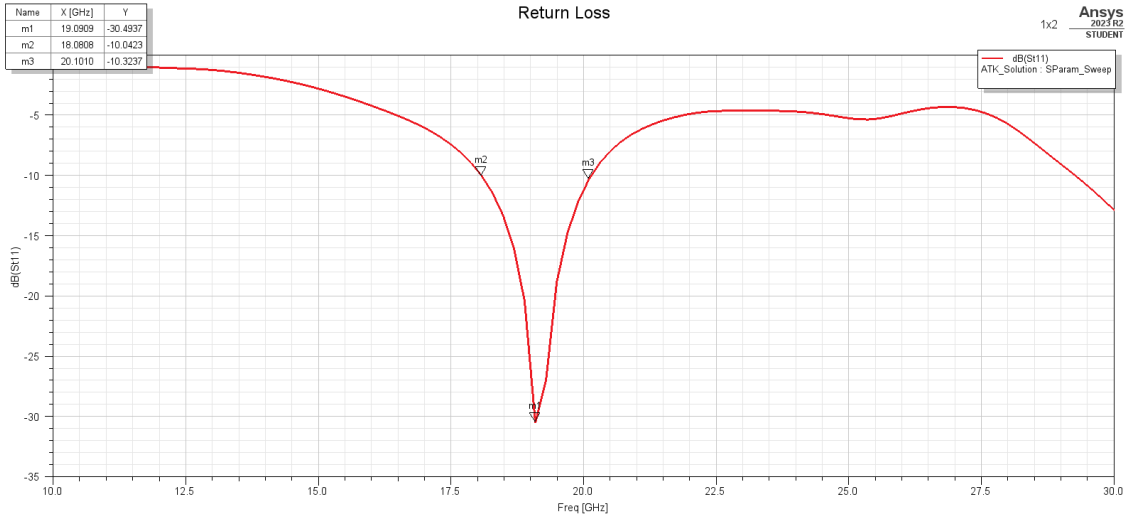


Şekil 70: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (üst)



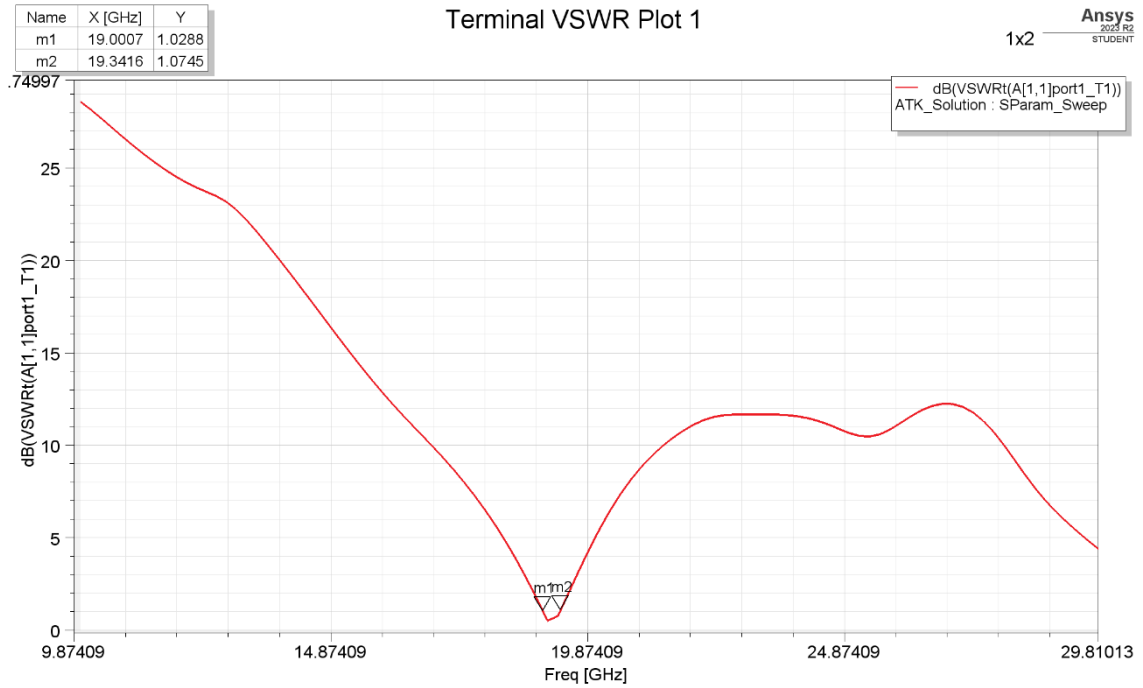
Şekil 71: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (alt)

1x2 mikroşerit dizi antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (return loss, S_{11}) değeri Şekil 72’de görülmektedir.



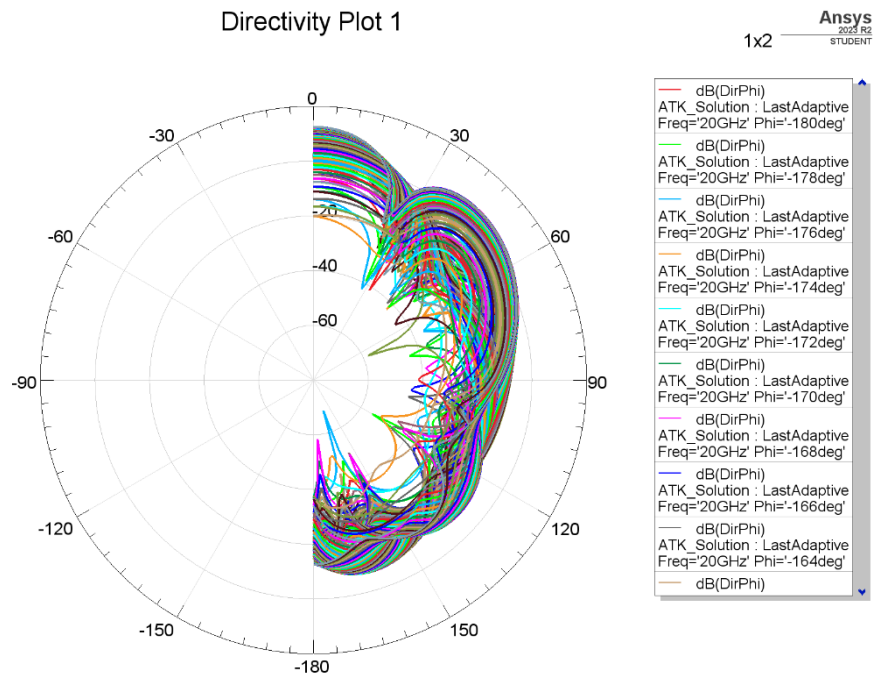
Şekil 72: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten $S(1,1)$ Grafiği

Grafik incelendiğinde 1x2 mikroşerit dizi antenin 18,08 – 20,10 GHz frekans aralığında 2,02 GHz (%10,58) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 19,09 GHz merkez frekansından -30,49 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.

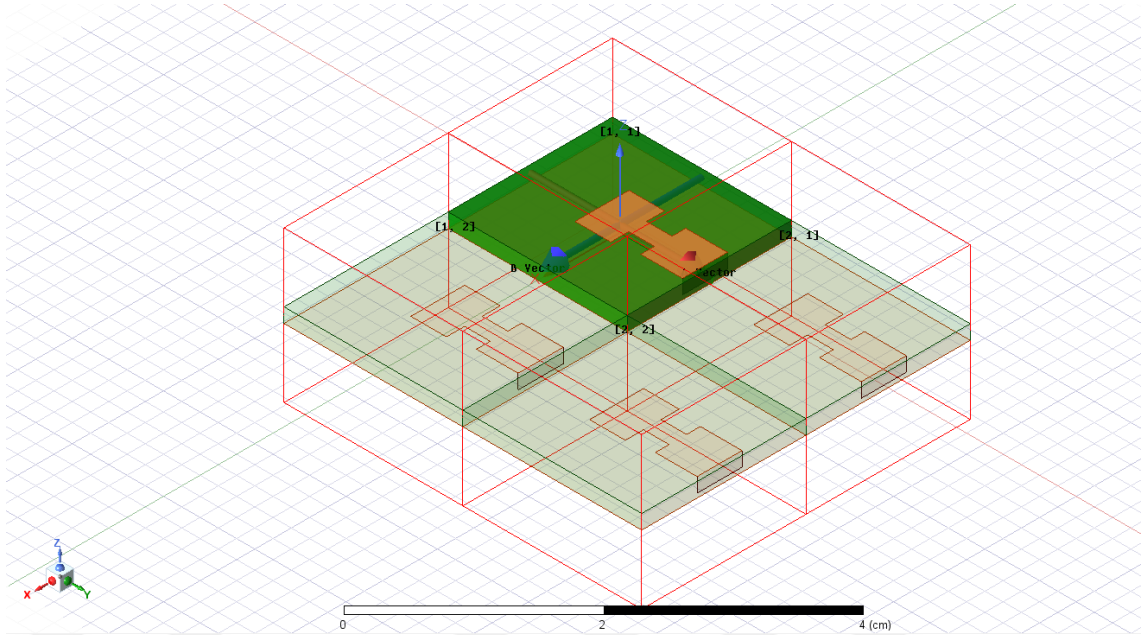


Şekil 73: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten VSWR Grafiği

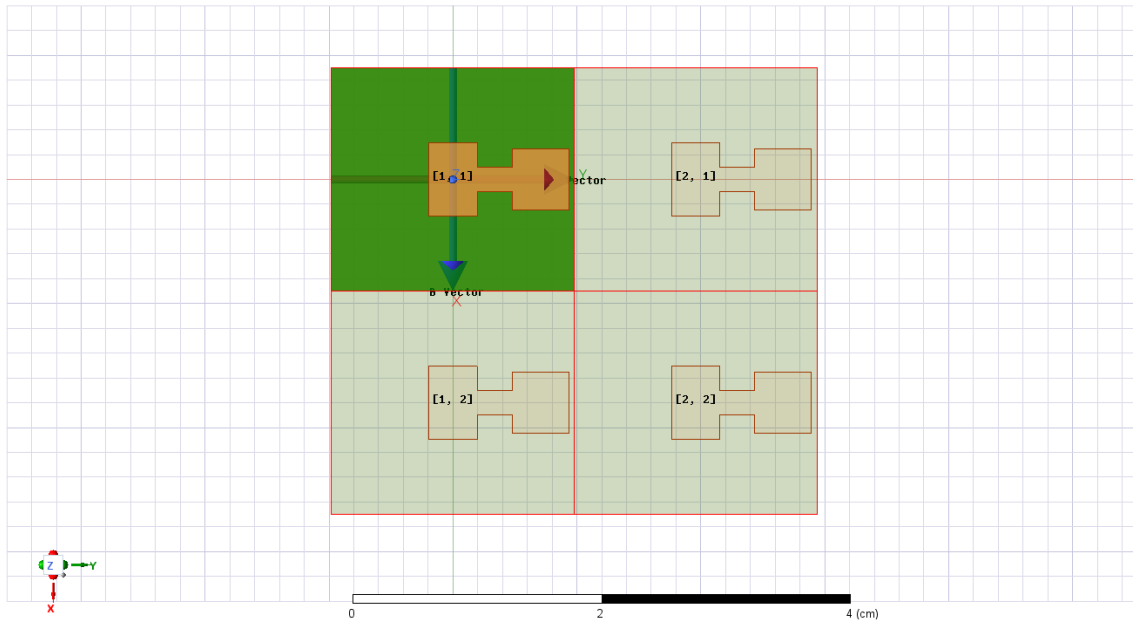
1x2 mikroşerit dizi anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 19,34 GHz için 1,07 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 73'de görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği (Directivity) ise Şekil 74'de görülmektedir.



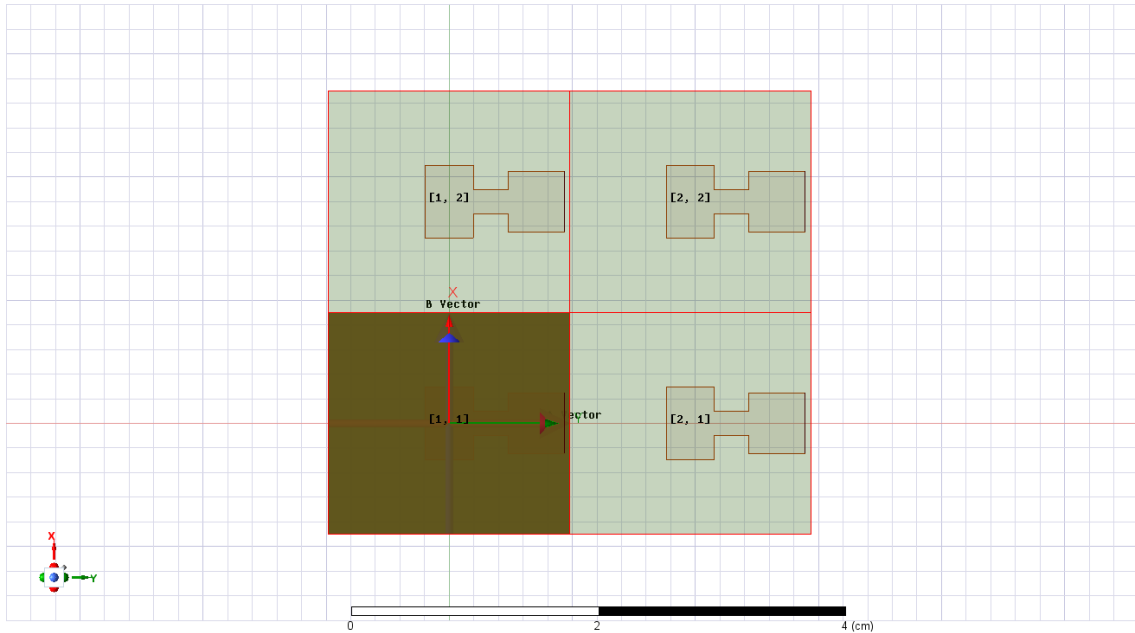
Şekil 74: 1x2 Mikroşerit Dizi Anten Directivity Grafiği



Şekil 76: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü

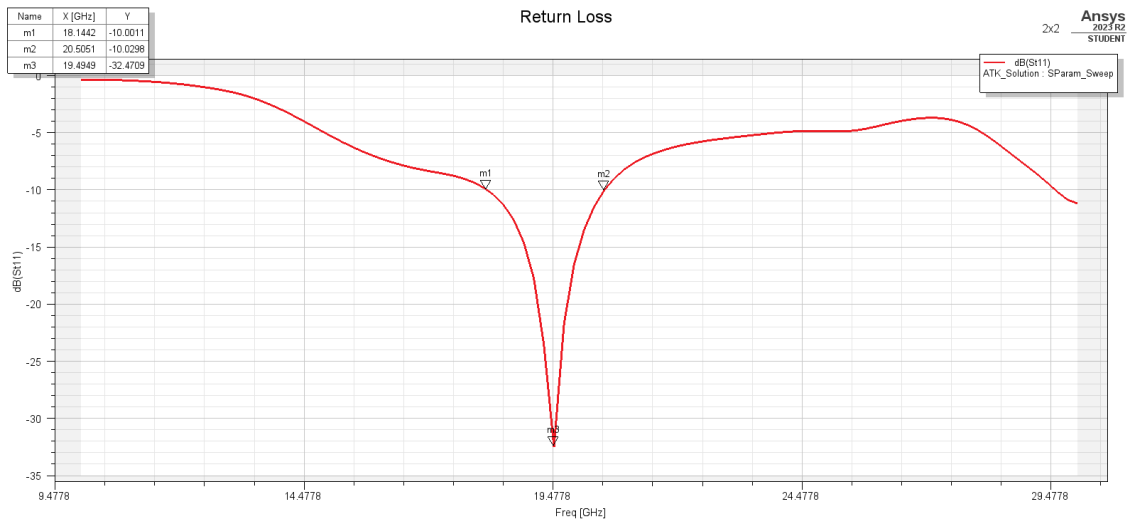


Şekil 77: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (üst)



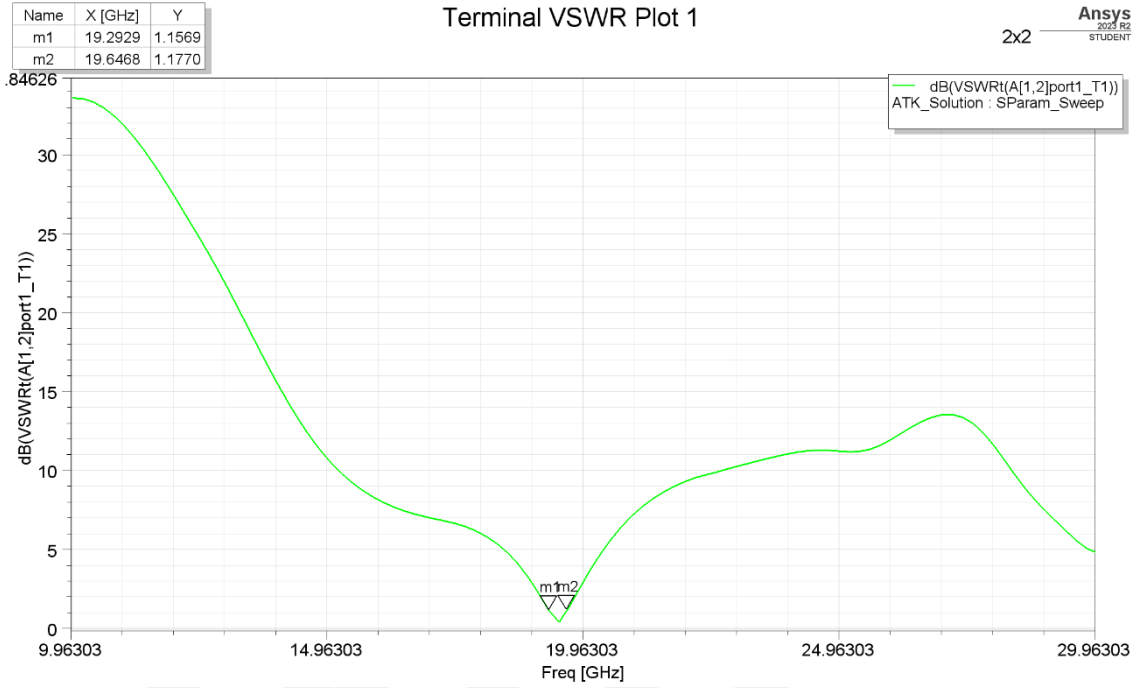
Şekil 78: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (alt)

2x2 mikroşerit dizi antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (return loss, S_{11}) değeri Şekil 79’da görülmektedir.



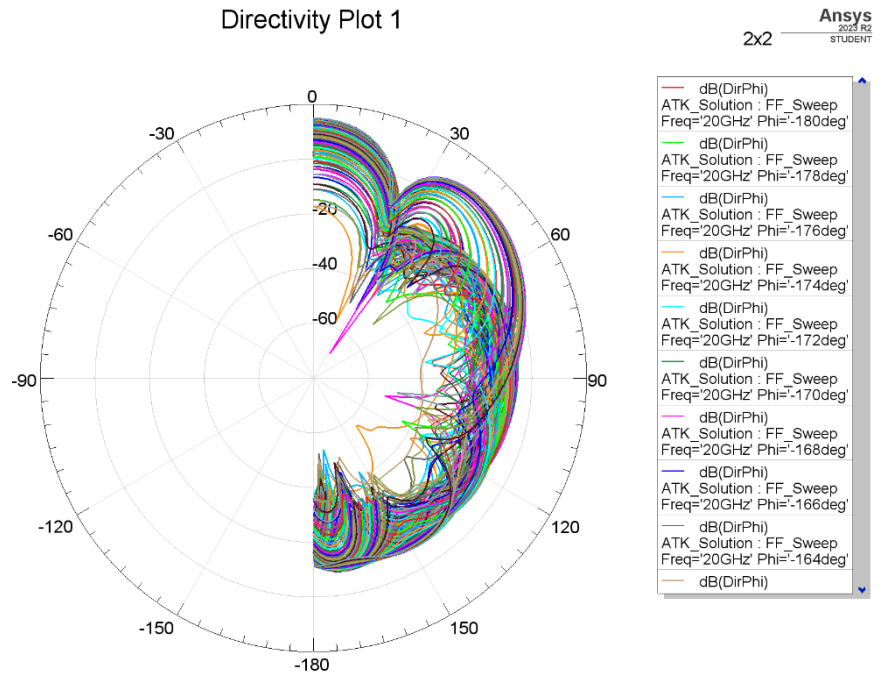
Şekil 79: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten $S(1,1)$ Grafiği

Grafik incelendiğinde 2x2 mikroşerit dizi antenin 18,14 – 20,50 GHz frekans aralığında 2,36 GHz (%12,10) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 19,49 GHz merkez frekansından -32,47 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.



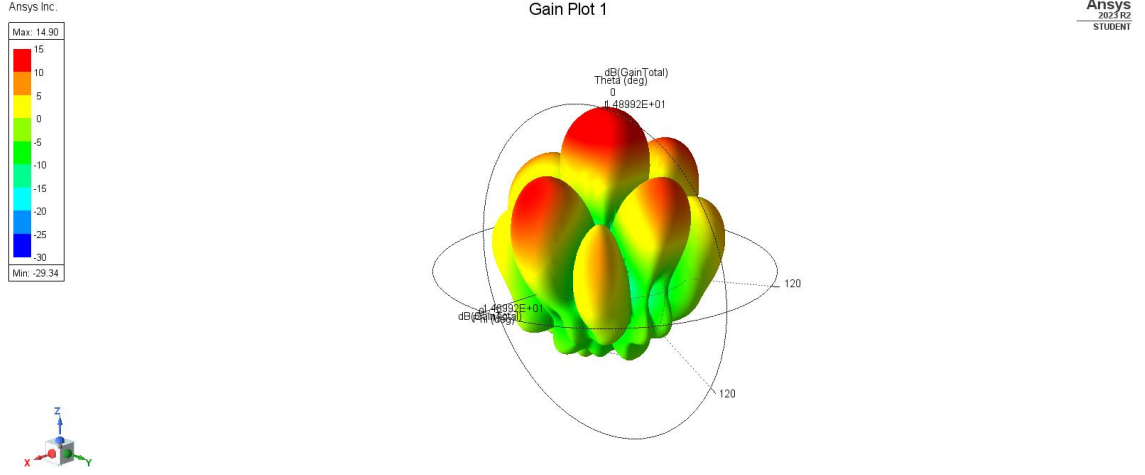
Şekil 80: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten VSWR Grafiği

2x2 mikroşerit dizi anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 19,29 GHz için 1,15 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 80'de görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği (Directivity) ise Şekil 81'de görülmektedir.



Şekil 81: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Directivity Grafiği

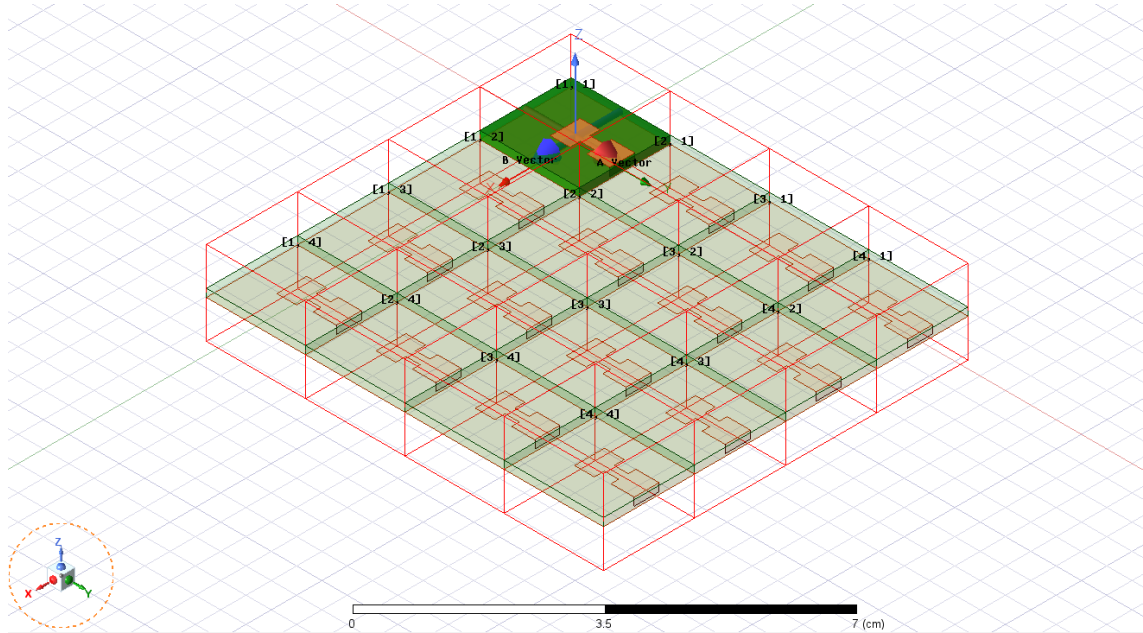
Tasarlanan anten için 3 boyutlu kazanç grafiği Şekil 82'de görülmektedir. Bu analizden antenin 14,90 dBi kazançla sahip olduğu anlaşılmaktadır.



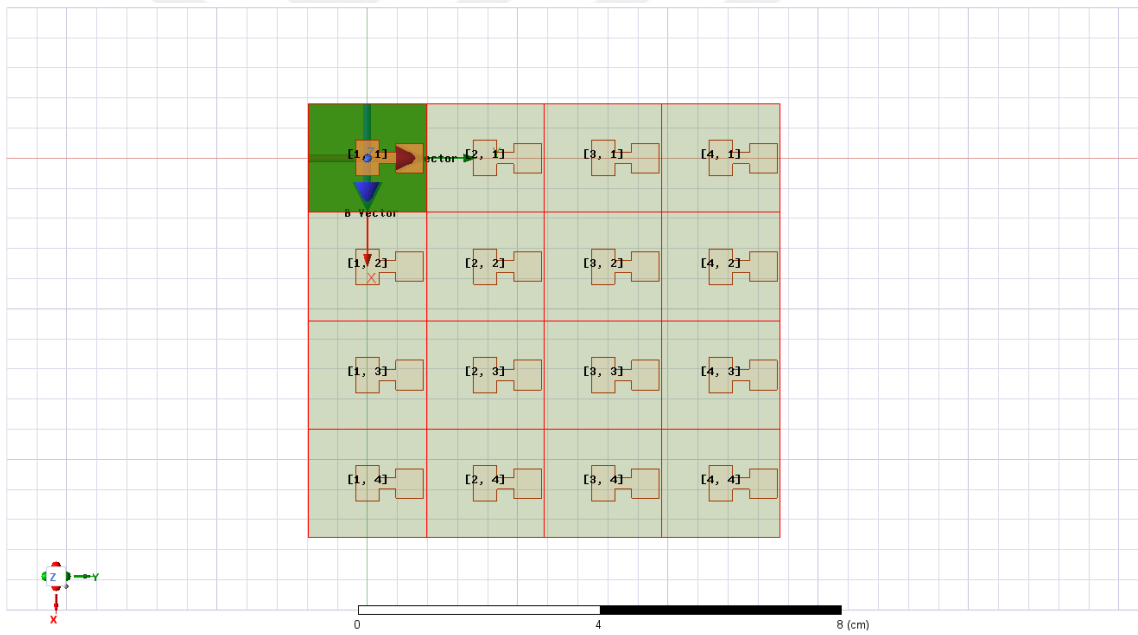
Şekil 82: 2x2 Mikroşerit Dizi Anten Kazanç Grafiği

4.1.2.4. Alma Hattı 4x4 Dizi Anten Tasarımı

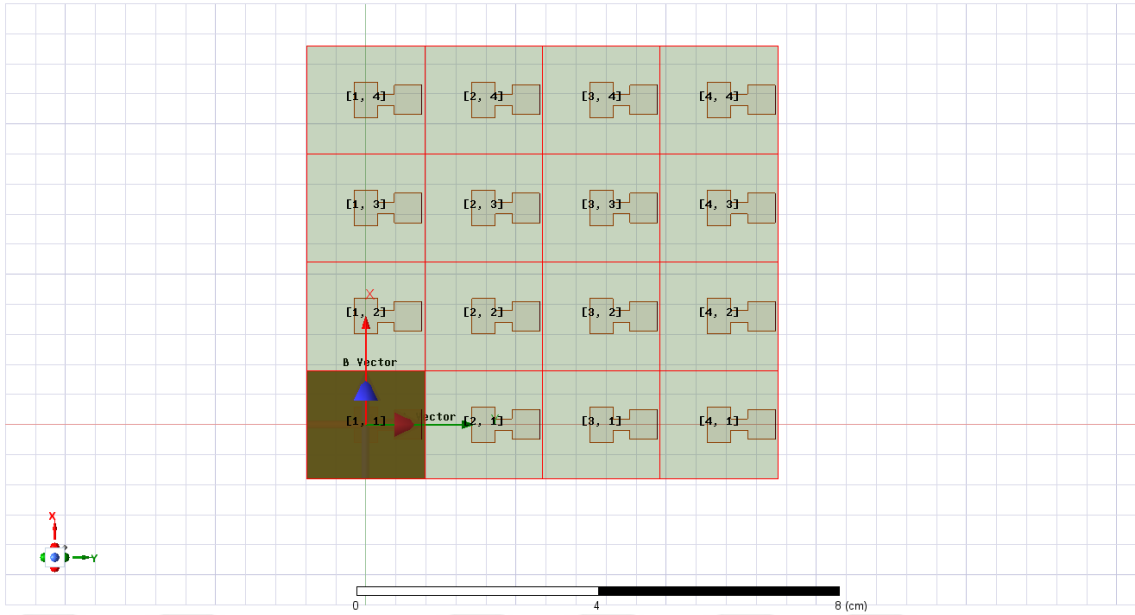
Ka-Bant alma hattında kullanılmak üzere bir sonraki adım olarak 4x4 mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında aynı dielektrik malzeme kullanılmıştır. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan dizi anten görselleri Şekil 83, Şekil 84 ve Şekil 85'de görülmektedir.



Şekil 83: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü

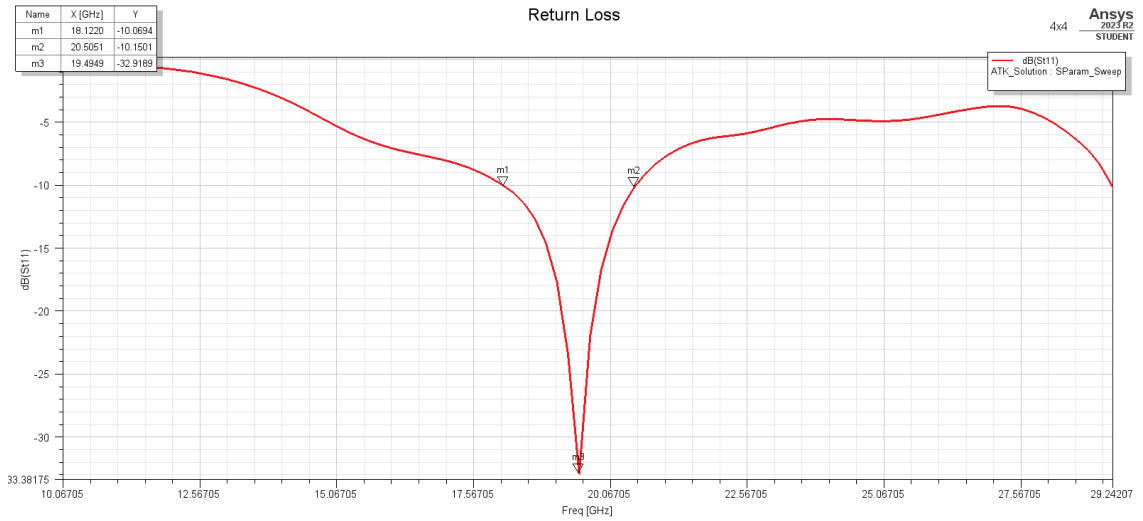


Şekil 84: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (üst)



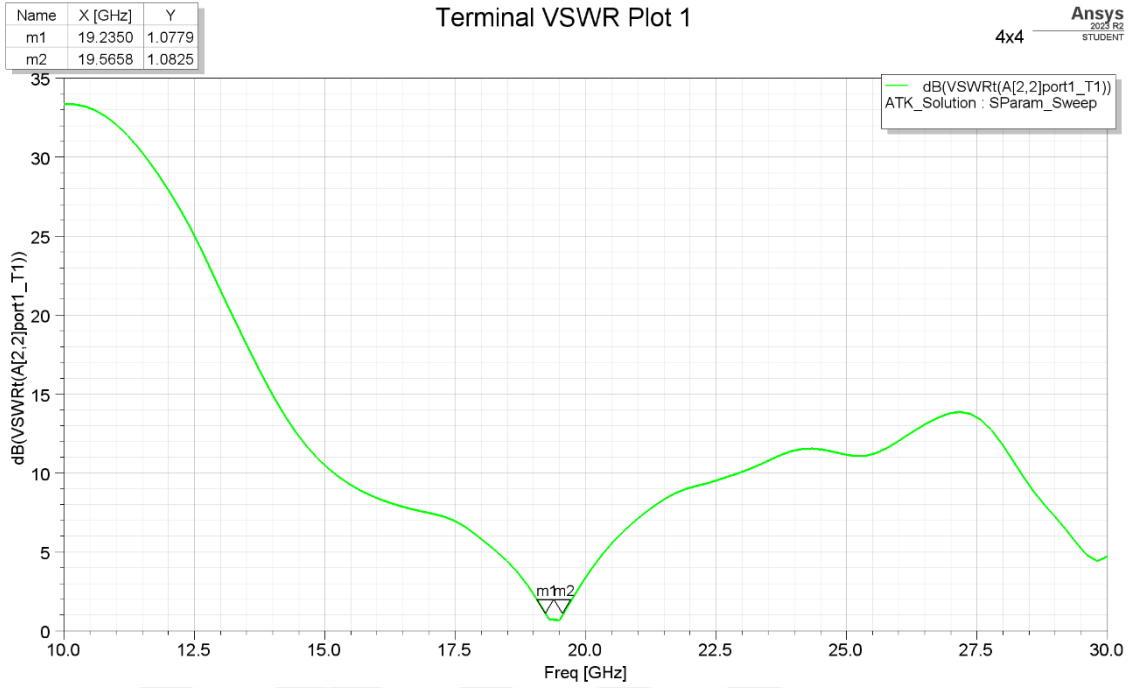
Şekil 85: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (alt)

4x4 mikroşerit dizi antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (return loss, S_{11}) değeri Şekil 86’da görülmektedir.



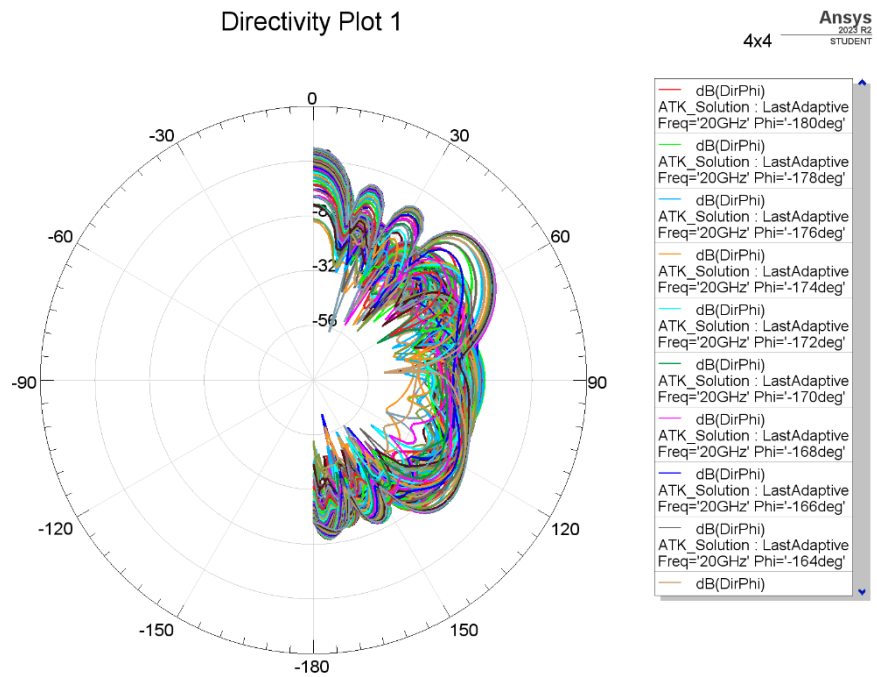
Şekil 86: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten S(1,1) Grafiği

Grafik incelendiğinde 4x4 mikroşerit dizi antenin 18,12 – 20,50 GHz frekans aralığında 2,38 GHz (%12,21) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 19,49 GHz merkez frekansından -32,91 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.



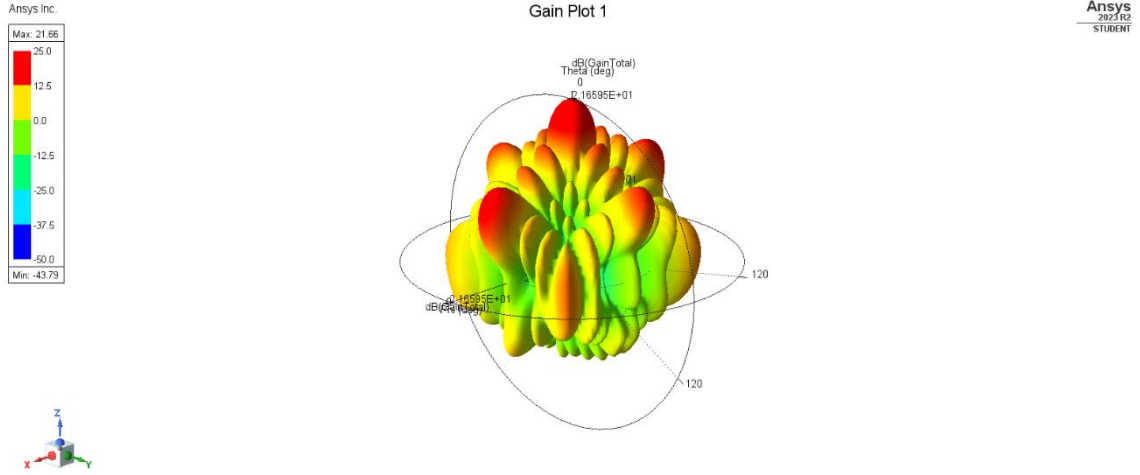
Şekil 87: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten VSWR Grafiği

4x4 mikroşerit dizi anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 19,56 GHz için 1,08 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 87'de görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği (Directivity) ise Şekil 88'de görülmektedir.



Şekil 88: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Directivity Grafiği

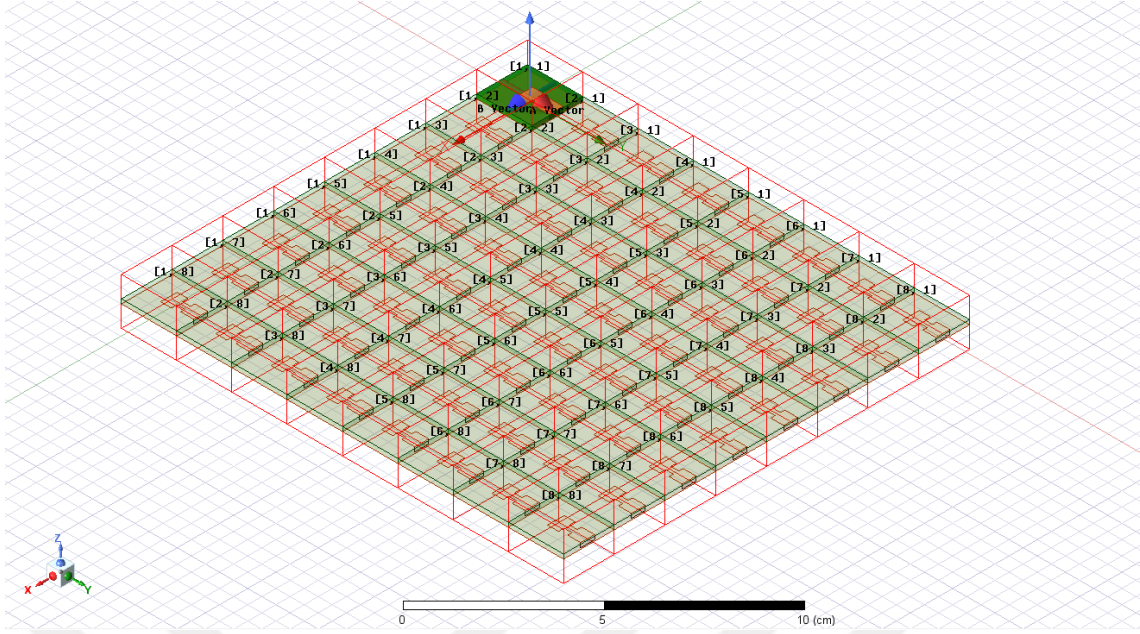
Tasarlanan anten için 3 boyutlu kazanç grafiği Şekil 89'de görülmektedir. Bu analizden antenin 21,66 dBi kazanca sahip olduğu anlaşılmaktadır.



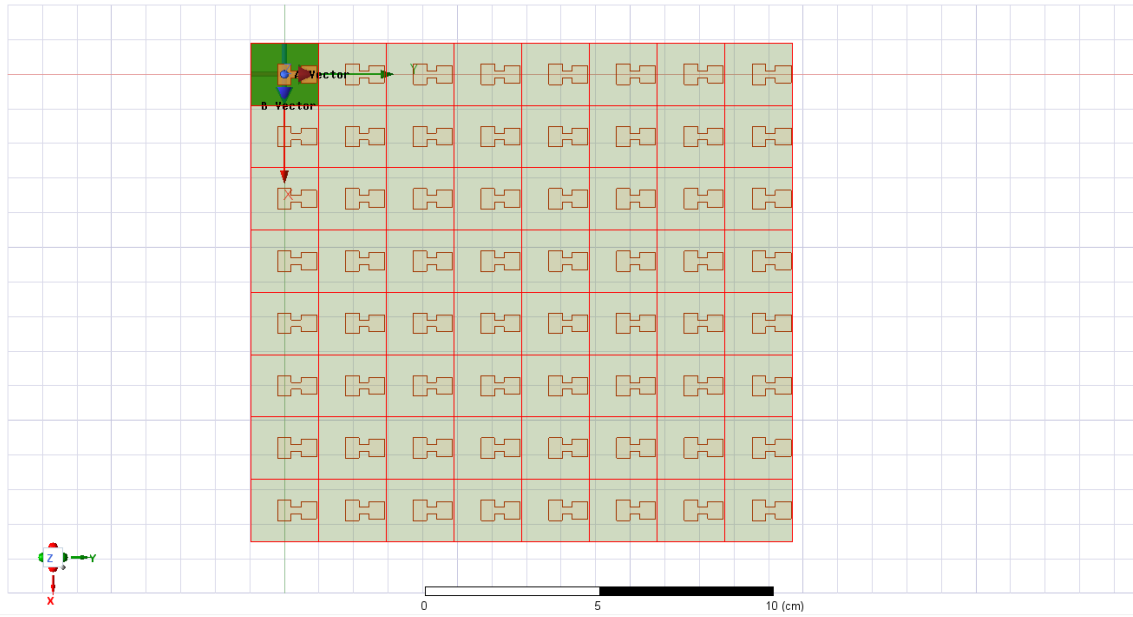
Şekil 89: 4x4 Mikroşerit Dizi Anten Kazanç Grafiği

4.1.2.5. Alma Hattı 8x8 Dizi Anten Tasarımı

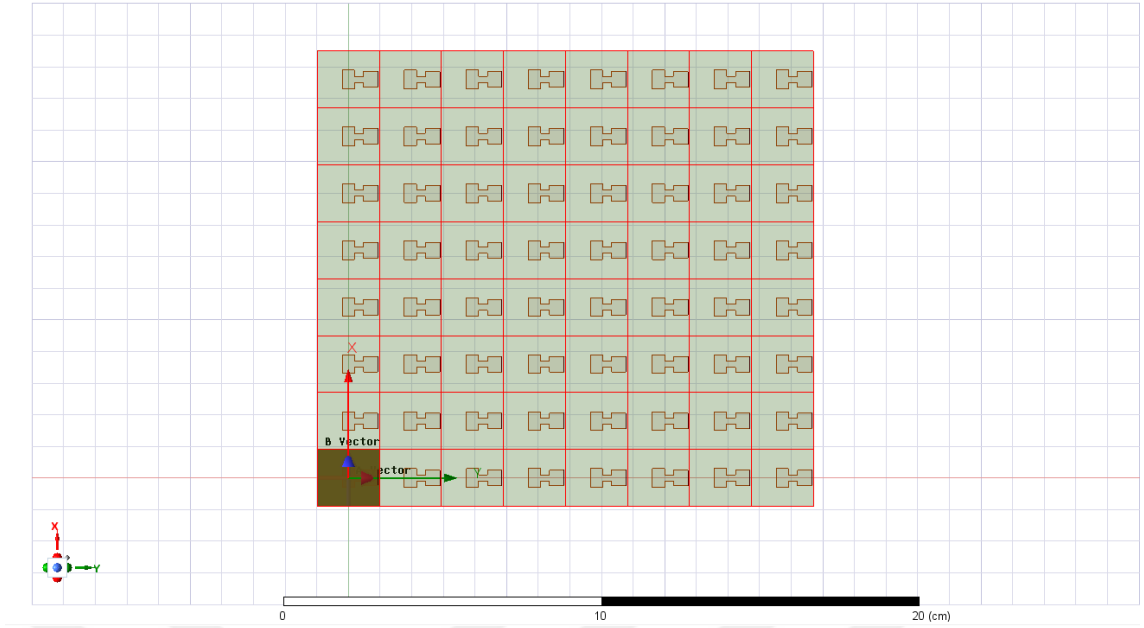
Ka-Bant alma hattında kullanılmak üzere son adım olarak 8x8 mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında aynı dielektrik malzeme kullanılmıştır. Mikroşerit besleme yöntemi ile tasarlanan dizi anten görselleri Şekil 90, Şekil 91 ve Şekil 92'de görülmektedir.



Şekil 90: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü

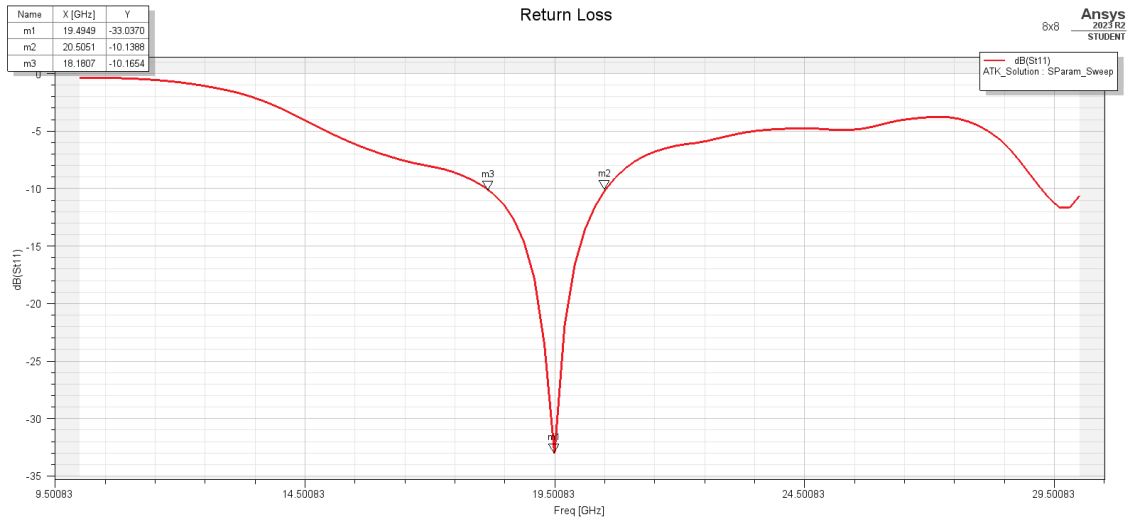


Şekil 91: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (üst)



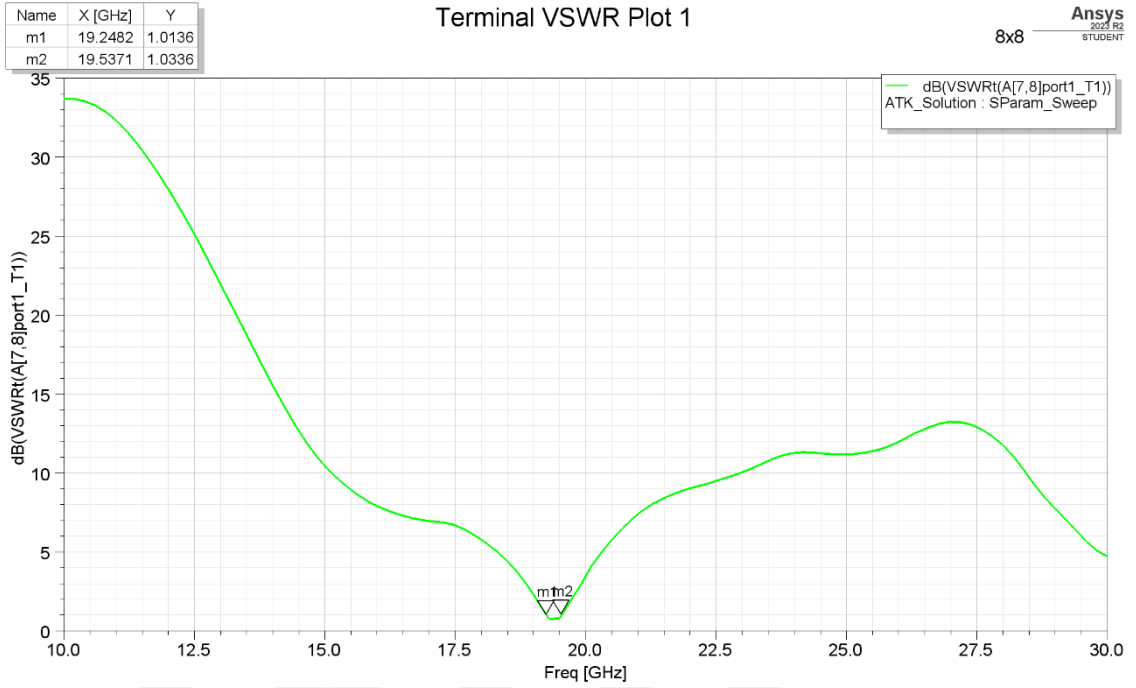
Şekil 92: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Görünümü (alt)

8x8 mikroşerit dizi antenin çalışacağı frekans aralığını analiz etmek ve bu frekans aralığındaki iletim performansını görüntülemek için geri dönüş kaybı (return loss, S_{11}) değeri Şekil 93'te görülmektedir.



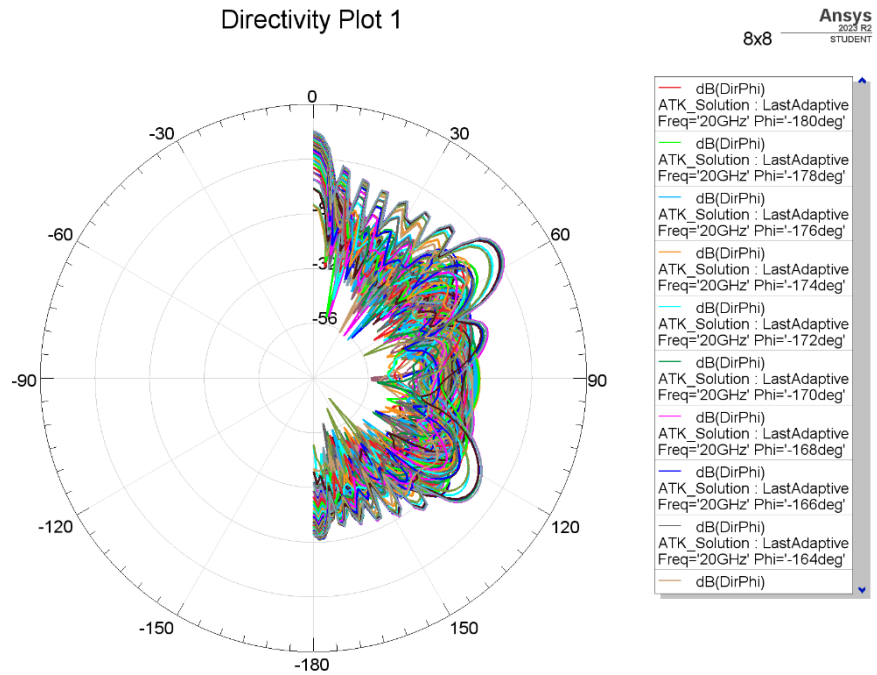
Şekil 93: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten $S(1,1)$ Grafiği

Grafik incelendiğinde 8x8 mikroşerit dizi antenin 18,18 – 20,50 GHz frekans aralığında 2,32 GHz (%11,90) bant genişliğinde iletim yapabildiği ve 19,49 GHz merkez frekansından -33,03 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmüştür.



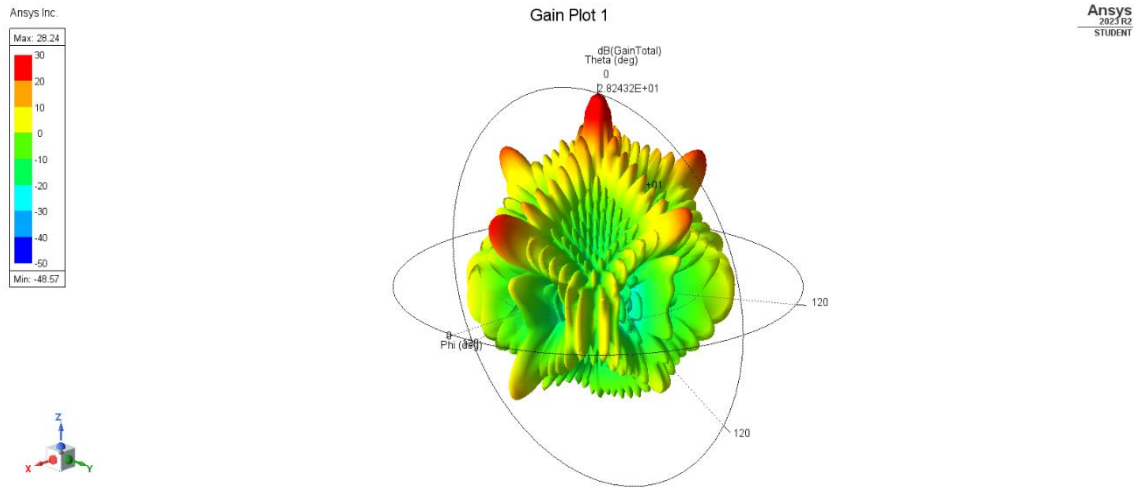
Şekil 94: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten VSWR Grafiği

8x8 mikroşerit dizi anten tasarımı sonucunda elde edilen VSWR değeri 19,53 GHz için 1,03 olarak elde edilmiştir. VSWR grafiği Şekil 94’de görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği (Directivity) ise Şekil 95’te görülmektedir.



Şekil 95: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Directivity Grafiği

Tasarlanan anten için 3 boyutlu kazanç grafiği Şekil 96'da görülmektedir. Bu analizden antenin 28,24 dBi kazanca sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 96: 8x8 Mikroşerit Dizi Anten Kazanç Grafiği

4.2. STK Simülasyon Sonuçları

Yolcu uçağı ve GEO uydu arasındaki haberleşmenin sağlanabilmesi için alma ve gönderme hatlarında kullanılmak üzere 8x8 Ka-Bant mikroşerit dizi anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenlerin uçak ve uydu ile haberleşme simülasyonlarının ve link bütçesi analizleri STK programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar bu bölümde incelenmiştir.

4.2.1. Alma Hattı Hat Bütçesi Hesaplamaları

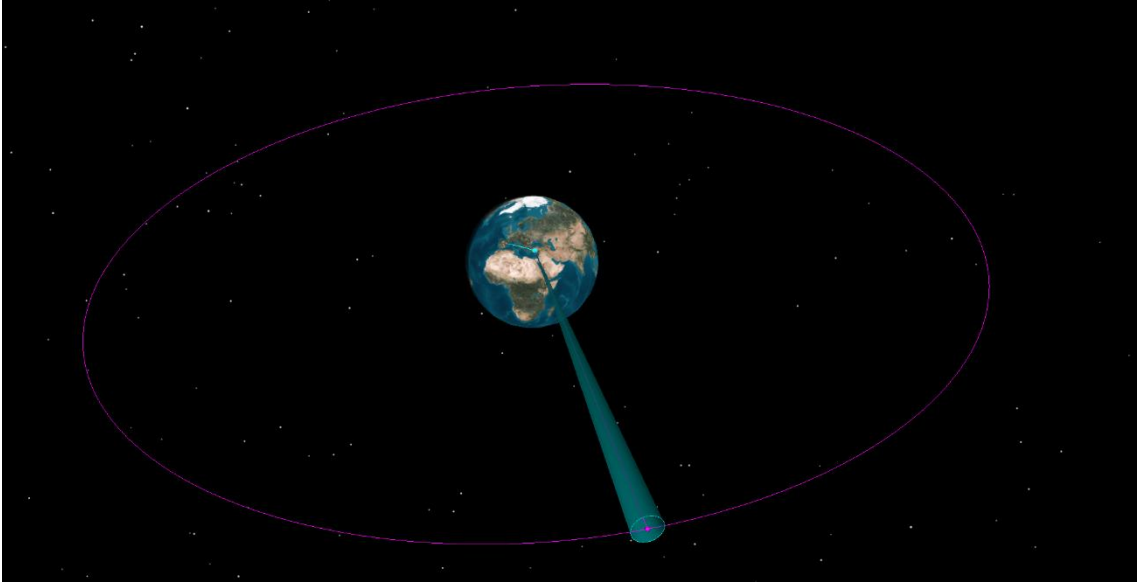
GEO uydu tarafından gönderilen RF sinyallerinin uçak üzerindeki 8x8 Ka-Bant mikroşerit dizi anten aracılığı ile alınması kapsamındaki performans değerlendirmeleri bu başlık altında incelenmiştir. Alma hattı için tasarlanan dizi anten 18-21 GHz arasında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.

STK programında ilk olarak 41 derece doğu yörüngesinde aktif çalışan potansiyel bir GEO uydu tanımlanmıştır. GEO uydu üzerinde Ka-Bant alma hattı frekans bandında (18 – 21 GHz) çalışan 23 dBi kazanca sahip bir anten kullanılmıştır. Alma hattı link bütçesine

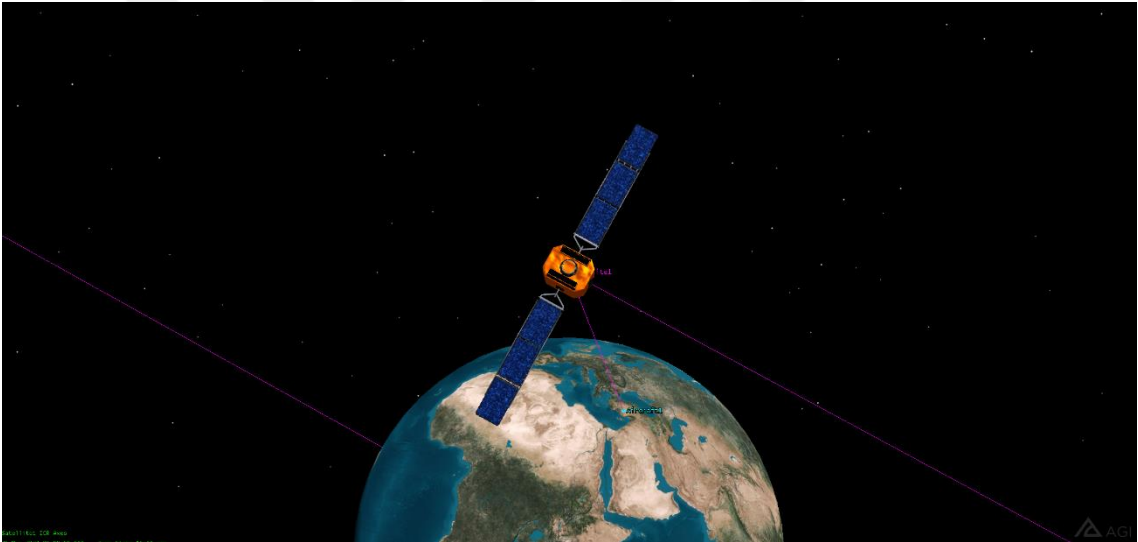
ait parametreler Çizelge 5’te verilmiştir. Uydu yörüngesi ve genel uydu görselleri Şekil 97 ve Şekil 98’de görülmektedir.

Çizelge 5: Alma Hattı Link Bütçesi Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Uydu Tipi	SAT	Jeosenkron (GEO)
Uydu Konumu	SAT-LON	41° Doğu
Uydu Mesafesi	r	38779 km
Uydu Tx Frekansı	f_c	19.49 GHz
Uydu EIRP Değeri	EIRP	46,77 dBW
Serbest Uzay Kaybı	L_{FS}	210,01 dB
Atmosferik Kayıplar	L_{atm}	1,06 dB
Hizalama Kaybı	$L_{pointing}$	0,25 dB
Uygulama Kaybı	L_{imp}	0,25 dB
Toplam Kayıp	L_{Total}	211,56 dB
Uçak Rx Anten Kazancı	G_r	28,24 dBi
Sistem Gürültü Sıcaklığı	T_{sys}	213,4 K
Uçak G/T Değeri	G/T	28,44 dB/K
Net Veri Hızı	DR	100 Mbps
Modülasyon Tipi	QPSK	QPSK
Forward Error Correction	FEC	8/9
Roll – Off	RO	%5
Taşıyıcı Bant Genişliği	BW	59,0625 MHz



Şekil 97: GEO Uydu Yörüngesi



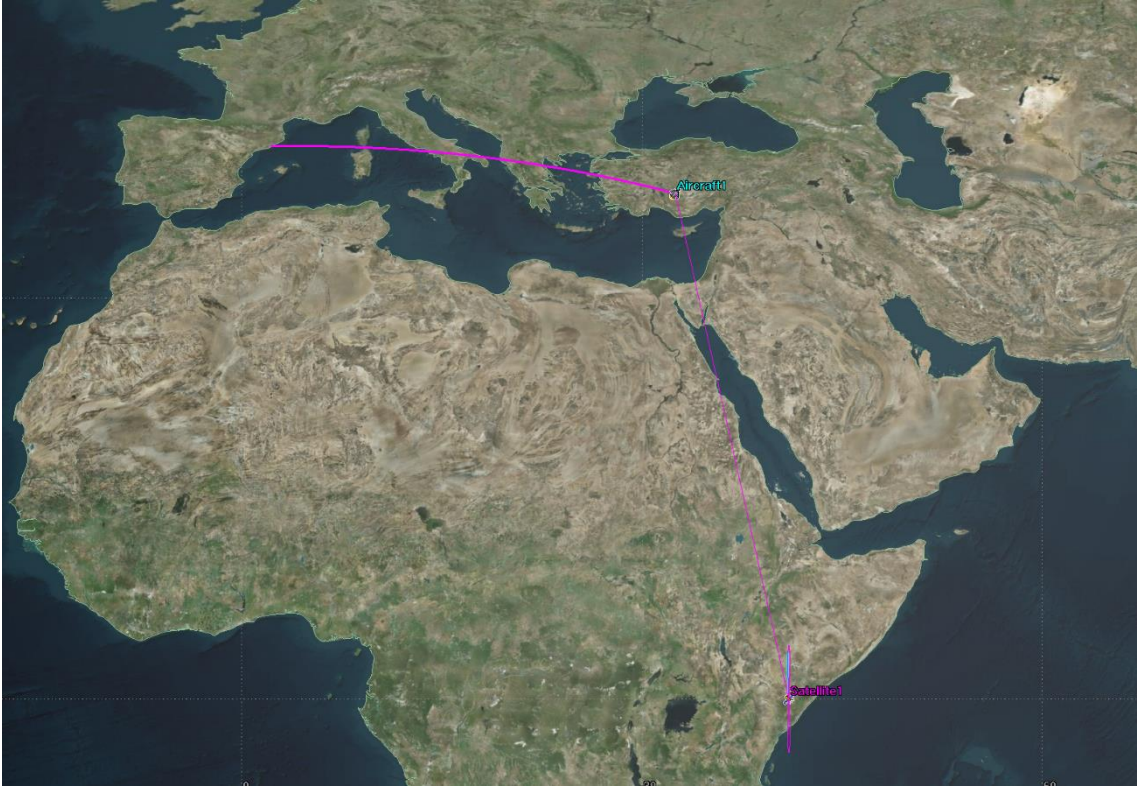
Şekil 98: GEO Uydu Genel Görünümü

Haberleşme sistemi kapsamında bir diğer önemli araç olarak potansiyel bir yolcu uçağı tanımlanmıştır. Uçak üzerine alma hattı kapsamında tasarlanan Ka-Bant 8x8 mikroşerit dizi anten yerleştirilmiştir. Alma hattı kapsamında yolcu uçağı genel görünümü Şekil 99’da verilmiştir.



Şekil 99: Yolcu Uçağı Genel Görünümü

Yolcu uçağı rotası olarak kalkış noktası Konya (KON) ve varış noktası Barselona (BCN) belirlenmiştir. Uçak rotası görünümü Şekil 100’de gösterilmiştir.



Şekil 100: Uçak Rotası Genel Görünümü

Uçak ve uydu eklendikten sonra uydu üzerinde verici (transmitter) ekipmanı tanımlanmıştır. Verici ekipmanı için 23,97 dBW çıkış gücüne sahip multibeam (çoklu hüzmeye) bir yapı kullanılmıştır. Çoklu hüzmeye kullanılması sebebi yolcu uçağının konumunun sürekli değişken olmasıdır. Birden fazla hüzmeye kullanılarak uçak kalkış noktası olan Konya (KON)'dan varış noktası olan Barselona (BCN)'ya kadar haberleşmenin kesintisiz bir şekilde sağlanması amaçlanmıştır. Uydu üzerinden Hüzmeye-1 240 derece azimut, 84 derece elevasyon açısı ile Hüzmeye-2 ise 295 derece azimut, 85 derece elevasyon açısı ile yönlendirildiğinde Konya – Barselona arası konumlarda yeterli kapsama alanına sahip olduğu görülmüştür. Kapsama alanları görüntüsü Şekil 101'de görülebilir.



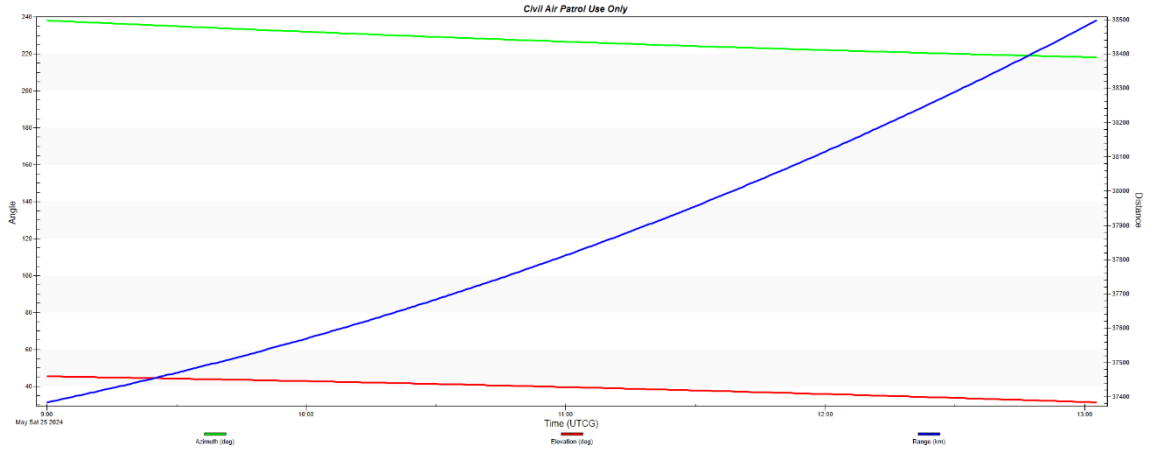
Şekil 101: Uydu Kapsama Alanları

Yolcu uçağının Konya'dan Barselona lokasyonuna seyahati yaklaşık 4 saat sürmektedir. Yolculuk süresi boyunca uydu ile haberleşme sağlanan zamanlar, tasarlanan 8x8 dizi antenin yolculuk süresi boyunca uyduyu takip etme süresi, azimut ve elevasyon açıları ile uydu mesafesi bilgileri Şekil 102'de gösterilmiştir.

Time (UTCG)	Azimuth (deg)	Elevation (deg)	Range (km)
25 May 2024 09:00:00.000	238.165	45.404	37384.001522
25 May 2024 09:05:00.000	237.627	45.212	37397.465836
25 May 2024 09:10:00.000	237.095	45.015	37411.292623
25 May 2024 09:15:00.000	236.567	44.814	37425.484706
25 May 2024 09:20:00.000	236.044	44.609	37440.044860
25 May 2024 09:25:00.000	235.525	44.399	37454.975849
25 May 2024 09:30:00.000	235.012	44.184	37470.280419
25 May 2024 09:35:00.000	234.503	43.966	37485.961298
25 May 2024 09:40:00.000	234.000	43.743	37502.021234
25 May 2024 09:45:00.000	233.502	43.515	37518.462824
25 May 2024 09:50:00.000	233.008	43.283	37535.288745
25 May 2024 09:55:00.000	232.520	43.047	37552.501604
25 May 2024 10:00:00.000	232.038	42.807	37570.103968
25 May 2024 10:05:00.000	231.560	42.562	37588.098359
25 May 2024 10:10:00.000	231.088	42.313	37606.487249
25 May 2024 10:15:00.000	230.621	42.060	37625.273098
25 May 2024 10:20:00.000	230.160	41.803	37644.458204
25 May 2024 10:25:00.000	229.704	41.541	37664.044898
25 May 2024 10:30:00.000	229.253	41.275	37684.035421
25 May 2024 10:35:00.000	228.808	41.005	37704.431942
25 May 2024 10:40:00.000	228.369	40.731	37725.236558
25 May 2024 10:45:00.000	227.935	40.453	37746.451292
25 May 2024 10:50:00.000	227.506	40.171	37768.078083
25 May 2024 10:55:00.000	227.083	39.884	37790.118824
25 May 2024 11:00:00.000	226.666	39.594	37812.575220
25 May 2024 11:05:00.000	226.255	39.300	37835.448976
25 May 2024 11:10:00.000	225.849	39.002	37858.741674
25 May 2024 11:15:00.000	225.449	38.699	37882.454797
25 May 2024 11:20:00.000	225.054	38.393	37906.589726
25 May 2024 11:25:00.000	224.665	38.084	37931.147735
25 May 2024 11:30:00.000	224.282	37.770	37956.130014
25 May 2024 11:35:00.000	223.905	37.452	37981.537572
25 May 2024 11:40:00.000	223.533	37.131	38007.371366
25 May 2024 11:45:00.000	223.167	36.806	38033.632216
25 May 2024 11:50:00.000	222.807	36.478	38060.320817
25 May 2024 11:55:00.000	222.452	36.146	38087.437743
25 May 2024 12:00:00.000	222.103	35.810	38114.983438
25 May 2024 12:05:00.000	221.760	35.471	38142.958217
25 May 2024 12:10:00.000	221.422	35.128	38171.362275
25 May 2024 12:15:00.000	221.091	34.782	38200.195631
25 May 2024 12:20:00.000	220.765	34.433	38229.458208
25 May 2024 12:25:00.000	220.444	34.080	38259.149774
25 May 2024 12:30:00.000	220.129	33.724	38289.269955
25 May 2024 12:35:00.000	219.820	33.364	38319.818235
25 May 2024 12:40:00.000	219.517	33.001	38350.793951
25 May 2024 12:45:00.000	219.219	32.636	38382.196291
25 May 2024 12:50:00.000	218.926	32.267	38414.024292
25 May 2024 12:55:00.000	218.640	31.895	38446.276845
25 May 2024 13:00:00.000	218.358	31.520	38478.952687
25 May 2024 13:02:46.411	218.205	31.310	38497.260097

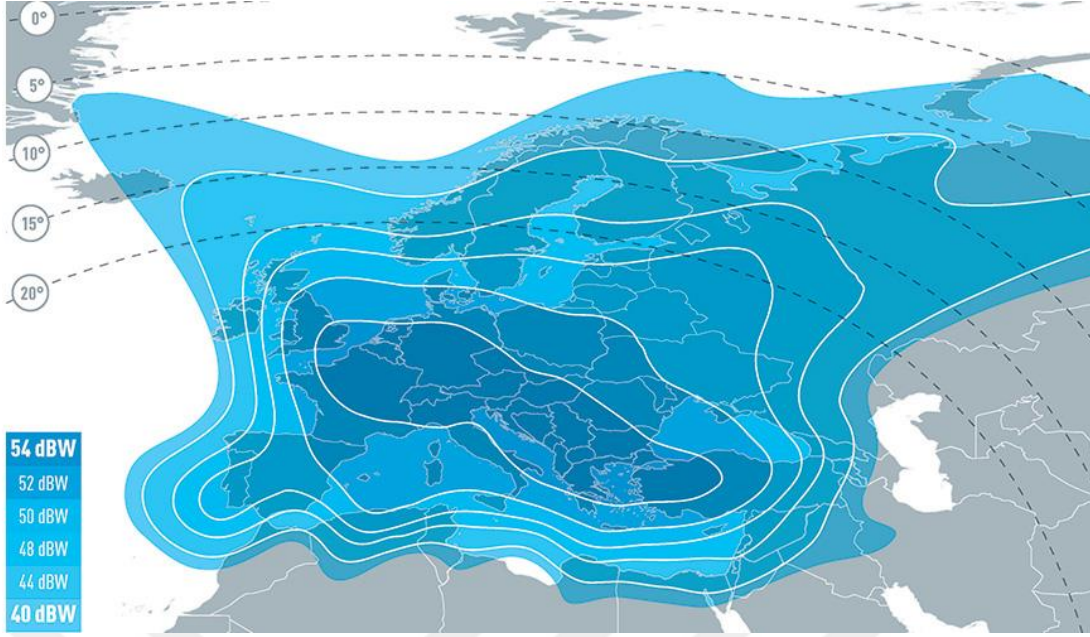
Şekil 102: Uydu Takip Azimut Elevasyon Açılımları Verileri

Yolculuğun tamamındaki azimut, elevasyon ve uydu mesafesi değişim grafiği ise Şekil 103'de gösterilmiştir.



Şekil 103: Yolculuk Süresi Boyunca Azimut, Elevasyon Açı Değişimleri

Yolcu uçağının Konya – Barselona hattından farklı bir rotaya gitmesi halinde uydu haberleşmesi için analizler tekrarlanacak ve gerekmesi halinde alternatif çözüm önerileri oluşturulacaktır. Örneğin yolcu uçağı Konya – Lizbon seferini gerçekleseydi Şekil 101'den de görüleceği üzere uyduda tanımlanmış kapsama alanından uzaklaşma başlayacağı için sinyal seviyesinde azalma görülecektir. 41° Doğu yörüngesinde tanımlanan uydunun haberleşme performansının yeterli olmadığı lokasyonlarda farklı servis sağlayıcıları ile iş birliği yapılarak başka uydular üzerinden haberleşmenin yolculuk süresi boyunca devam etmesi ve sürekliliği sağlanabilir. Örnek olarak Lizbon lokasyonunda 7° Doğu yörüngesinde Ka Bant frekansında hizmet verebilen Eutelsat 7B uydusu kullanılabilir. Şekil 104'ten de görüleceği üzere Eutelsat 7B uydusunun Lizbon bölgesindeki kapsama alanının olduğu görülmektedir. Bu senaryoda yolcu uçağı Portekiz bölgesine yaklaştığında 41° ve 7°deki uydu sinyalleri karşılaştırılacak ve sinyal seviyesi yetersiz kaldığında Eutelsat 7B uydusuna anahtarlama yapılarak haberleşme sürdürülecektir.



Şekil 104: Eutelsat 7B Kapsama Alanı

Sonuç olarak STK ile yapılan analizler sonucunda potansiyel bir GEO uydusu ile potansiyel bir yolcu uçağı haberleşmesi amacıyla Ka-Bant alma hattı (18-21 GHz) kapsamında elde edilen link bütçesi analizi Şekil 105 ve Şekil 106’te gösterilmiştir. Bu Çizelgelerde link bütçesi performans değerlendirmelerinde önemli rol oynayan EIRP, Güç Akı Yoğunluğu, G/T, C/N0, Bant Genişliği, C/N, Eb/N0 ve BER değerleri elde edilmiştir.

Time (UTCG)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m ²)	g/T (dB/K)
25 May 2024 09:00:00.000	46.770	19.489997	-162.928	-115.675814	28.440000
25 May 2024 09:05:00.000	46.770	19.489997	-162.931	-115.678942	28.440000
25 May 2024 09:10:00.000	46.770	19.489997	-162.934	-115.682153	28.440000
25 May 2024 09:15:00.000	46.770	19.489997	-162.937	-115.685447	28.440000
25 May 2024 09:20:00.000	46.770	19.489997	-162.941	-115.688826	28.440000
25 May 2024 09:25:00.000	46.770	19.489997	-162.944	-115.692289	28.440000
25 May 2024 09:30:00.000	46.770	19.489997	-162.948	-115.695838	28.440000
25 May 2024 09:35:00.000	46.770	19.489997	-162.951	-115.699472	28.440000
25 May 2024 09:40:00.000	46.770	19.489996	-162.955	-115.703192	28.440000
25 May 2024 09:45:00.000	46.770	19.489996	-162.959	-115.706999	28.440000
25 May 2024 09:50:00.000	46.770	19.489996	-162.963	-115.710894	28.440000
25 May 2024 09:55:00.000	46.770	19.489996	-162.967	-115.714876	28.440000
25 May 2024 10:00:00.000	46.770	19.489996	-162.971	-115.718947	28.440000
25 May 2024 10:05:00.000	46.770	19.489996	-162.975	-115.723106	28.440000
25 May 2024 10:10:00.000	46.770	19.489996	-162.979	-115.727354	28.440000
25 May 2024 10:15:00.000	46.770	19.489996	-162.984	-115.731692	28.440000
25 May 2024 10:20:00.000	46.770	19.489996	-162.988	-115.736120	28.440000
25 May 2024 10:25:00.000	46.770	19.489996	-162.993	-115.740638	28.440000
25 May 2024 10:30:00.000	46.770	19.489996	-162.997	-115.745247	28.440000
25 May 2024 10:35:00.000	46.770	19.489996	-163.002	-115.749947	28.440000
25 May 2024 10:40:00.000	46.770	19.489995	-163.007	-115.754738	28.440000
25 May 2024 10:45:00.000	46.770	19.489995	-163.012	-115.759621	28.440000
25 May 2024 10:50:00.000	46.770	19.489995	-163.017	-115.764596	28.440000
25 May 2024 10:55:00.000	46.770	19.489995	-163.022	-115.769664	28.440000
25 May 2024 11:00:00.000	46.770	19.489995	-163.027	-115.774824	28.440000
25 May 2024 11:05:00.000	46.770	19.489995	-163.032	-115.780076	28.440000
25 May 2024 11:10:00.000	46.770	19.489995	-163.037	-115.785422	28.440000
25 May 2024 11:15:00.000	46.770	19.489995	-163.043	-115.790861	28.440000
25 May 2024 11:20:00.000	46.770	19.489995	-163.048	-115.796393	28.440000
25 May 2024 11:25:00.000	46.770	19.489995	-163.054	-115.802018	28.440000
25 May 2024 11:30:00.000	46.770	19.489995	-163.060	-115.807737	28.440000
25 May 2024 11:35:00.000	46.770	19.489994	-163.065	-115.813549	28.440000
25 May 2024 11:40:00.000	46.770	19.489994	-163.071	-115.819455	28.440000
25 May 2024 11:45:00.000	46.770	19.489994	-163.077	-115.825455	28.440000
25 May 2024 11:50:00.000	46.770	19.489994	-163.083	-115.831548	28.440000
25 May 2024 11:55:00.000	46.770	19.489994	-163.090	-115.837734	28.440000
25 May 2024 12:00:00.000	46.770	19.489994	-163.096	-115.844013	28.440000
25 May 2024 12:05:00.000	46.770	19.489994	-163.102	-115.850386	28.440000
25 May 2024 12:10:00.000	46.770	19.489994	-163.109	-115.856852	28.440000
25 May 2024 12:15:00.000	46.770	19.489994	-163.115	-115.863410	28.440000
25 May 2024 12:20:00.000	46.770	19.489994	-163.122	-115.870062	28.440000
25 May 2024 12:25:00.000	46.770	19.489994	-163.129	-115.876805	28.440000
25 May 2024 12:30:00.000	46.770	19.489993	-163.136	-115.883640	28.440000
25 May 2024 12:35:00.000	46.770	19.489993	-163.142	-115.890567	28.440000
25 May 2024 12:40:00.000	46.770	19.489993	-163.150	-115.897586	28.440000
25 May 2024 12:45:00.000	46.770	19.489993	-163.157	-115.904695	28.440000
25 May 2024 12:50:00.000	46.770	19.489993	-163.164	-115.911895	28.440000
25 May 2024 12:55:00.000	46.770	19.489993	-163.171	-115.919184	28.440000
25 May 2024 13:00:00.000	46.770	19.489993	-163.178	-115.926563	28.440000
25 May 2024 13:02:46.411	46.770	19.489993	-163.183	-115.930695	28.440000

Şekil 105: Alma Hattı Link Bütçesi Analiz Çizelgesi- 1

C/No (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	Eb/No (dB)	BER
94.111403	59062.500	16.3983	13.6975	3.817332e-12
94.108275	59062.500	16.3952	13.6943	3.883610e-12
94.105065	59062.500	16.3919	13.6911	3.952794e-12
94.101770	59062.500	16.3887	13.6878	4.025007e-12
94.098392	59062.500	16.3853	13.6845	4.100378e-12
94.094928	59062.500	16.3818	13.6810	4.179042e-12
94.091380	59062.500	16.3783	13.6775	4.261141e-12
94.087746	59062.500	16.3746	13.6738	4.346826e-12
94.084025	59062.500	16.3709	13.6701	4.436255e-12
94.080218	59062.500	16.3671	13.6663	4.529594e-12
94.076324	59062.500	16.3632	13.6624	4.627020e-12
94.072341	59062.500	16.3592	13.6584	4.728716e-12
94.068271	59062.500	16.3552	13.6543	4.834879e-12
94.064112	59062.500	16.3510	13.6502	4.945712e-12
94.059863	59062.500	16.3467	13.6459	5.061433e-12
94.055526	59062.500	16.3424	13.6416	5.182269e-12
94.051098	59062.500	16.3380	13.6372	5.308461e-12
94.046580	59062.500	16.3335	13.6327	5.440260e-12
94.041971	59062.500	16.3289	13.6280	5.577935e-12
94.037271	59062.500	16.3242	13.6233	5.721767e-12
94.032479	59062.500	16.3194	13.6186	5.872051e-12
94.027596	59062.500	16.3145	13.6137	6.029100e-12
94.022621	59062.500	16.3095	13.6087	6.193245e-12
94.017554	59062.500	16.3044	13.6036	6.364832e-12
94.012394	59062.500	16.2993	13.5985	6.544228e-12
94.007141	59062.500	16.2940	13.5932	6.731819e-12
94.001795	59062.500	16.2887	13.5879	6.928013e-12
93.996357	59062.500	16.2832	13.5824	7.133239e-12
93.990825	59062.500	16.2777	13.5769	7.347953e-12
93.985199	59062.500	16.2721	13.5713	7.572631e-12
93.979480	59062.500	16.2664	13.5656	7.807779e-12
93.973668	59062.500	16.2605	13.5597	8.053929e-12
93.967762	59062.500	16.2546	13.5538	8.311643e-12
93.961763	59062.500	16.2486	13.5478	8.581513e-12
93.955670	59062.500	16.2426	13.5417	8.864167e-12
93.949484	59062.500	16.2364	13.5356	9.160263e-12
93.943204	59062.500	16.2301	13.5293	9.470499e-12
93.936831	59062.500	16.2237	13.5229	9.795609e-12
93.930366	59062.500	16.2172	13.5164	1.013637e-11
93.923807	59062.500	16.2107	13.5099	1.049360e-11
93.917156	59062.500	16.2040	13.5032	1.086816e-11
93.910413	59062.500	16.1973	13.4965	1.126097e-11
93.903577	59062.500	16.1905	13.4897	1.167299e-11
93.896650	59062.500	16.1835	13.4827	1.210523e-11
93.889632	59062.500	16.1765	13.4757	1.255876e-11
93.882522	59062.500	16.1694	13.4686	1.303472e-11
93.875323	59062.500	16.1622	13.4614	1.353430e-11
93.868033	59062.500	16.1549	13.4541	1.405876e-11
93.860654	59062.500	16.1475	13.4467	1.460942e-11
93.856522	59062.500	16.1434	13.4426	1.492669e-11

Şekil 106: Alma Hattı Link Bütçesi Analiz Çizelgesi- 2

4.2.2. Gönderme Hattı Hat Bütçesi Hesaplamaları

Bu bölümde alma hattı için yapılan hat bütçesi analizlerine benzer olarak gönderme hattı için de benzer analizler yapılmıştır. Yolcu uçağı üzerine yerleştirilen 8x8 Ka-Bant mikroşerit dizi antenden gönderilen RF sinyallerinin GEO uydu tarafından alınması kapsamındaki performans değerlendirmeleri bu başlık altında incelenmiştir. Gönderme hattı için tasarlanan dizi anten 26-31 GHz arasında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Önceki bölümlerde STK programında 41 derece doğu yörüngesinde aktif çalışan potansiyel bir GEO uydu tanımlandığı aktarılmıştı. Benzer şekilde GEO uydu üzerinde Ka-Bant gönderme hattı frekans bandında (26 – 31 GHz) çalışan 52,01 dBi kazanca sahip bir anten kullanılmıştır. Gönderme hattı link bütçesine ait parametreler Çizelge 6’te verilmiştir. Uydu yörüngesi ve genel uydu görselleri Şekil 97 ve Şekil 98’de görülmektedir.

Çizelge 6: Gönderme Hattı Link Bütçesi Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Uydu Tipi	SAT	Jeosenkron (GEO)
Uydu Konumu	SAT-LON	41° Doğu
Uydu Mesafesi	r	38779 km
Uçak Tx Frekansı	f_c	27,45 GHz
Uçak Tx Çıkış Gücü	P_t	27,20 dBW
Uçak Tx Anten Kazancı	G_t	24,04 dBi
Uçak Tx Hattı Kayıpları	L_t	0,2 dB
Uçak EIRP Değeri	EIRP	51,04 dBW
Serbest Uzay Kaybı	L_{FS}	212,98 dB
Atmosferik Kayıplar	L_{atm}	1,71 dB
Hizalama Kaybı	$L_{pointing}$	0,25 dB
Uygulama Kaybı	L_{imp}	0,25 dB
Toplam Kayıp	L_{Total}	215,19 dB

Uydu Rx Anten Kazancı	G_r	52,01 dBi
Sistem Gürültü Sıcaklığı	T_{sys}	253,6 K
Uydu G/T Değeri	G/T	27,96 dB/K
Net Veri Hızı	DR	50 Mbps
Modülasyon Tipi	QPSK	QPSK
Forward Error Correction	FEC	1/3
Roll – Off	RO	%5
Taşıyıcı Bant Genişliği	BW	78,75 MHz

Tanımlanan uydunun yanı sıra sistemdeki diğer önemli araç olan potansiyel bir yolcu uçağının STK programı üzerinde tanımlandığı da aktarılmıştır. Uçak üzerine gönderme hattı kapsamında tasarlanan Ka-Bant 8x8 mikroşerit dizi anten yerleştirilmiştir. Gönderme hattı kapsamında yolcu uçağı genel görünümü Şekil 99’da verilmiştir. Ek olarak yolcu uçağı rotasının kalkış noktası Konya (KON) ve varış noktası Barselona (BCN) olarak belirlendiği bilgisi de önceki bölümlerde aktarılmıştır. Uçak rotası görünümü Şekil 100’de gösterilmiştir.

Yolcu uçağı ve uydu araçları eklendikten sonra uçak üzerinde verici ekipmanı tanımlanmıştır. Verici ekipmanı için 27.2 dBW çıkış gücüne sahip bir yapı kullanılmıştır. Uçağın kalkış noktası olan Konya (KON)’dan varış noktası olan Barselona (BCN)’ya kadar haberleşmenin kesintisiz bir şekilde sağlanması amaçlanmıştır. Uydu üzerinden çoklu hüzmeye yöntemi ile yayın yapıldığı bilgisi de önceki bölümlerde verilmiş olup Konya – Barselona arası rotada yeterli kapsama alanına sahip olduğu görülmüştür. Kapsama alanları görüntüsü Şekil 101’de görülebilir.

Konya’dan Barselona lokasyonuna seyahat yaklaşık 4 saat sürmektedir. Yolculuk süresi boyunca uydu ile haberleşme sağlanan zamanlar, tasarlanan 8x8 dizi antenin yolculuk süresi boyunca uyduyu takip etme süresi, azimut ve elevasyon açıları ile uydu mesafesi bilgileri Şekil 102’de gösterilmiştir.

Gönderme hattı hat bütçesi analizleri kapsamında STK programı ile yapılan analizler sonucunda potansiyel bir GEO uydusu ile potansiyel bir yolcu uçağı haberleşmesi

amacıyla Ka-Bant gönderme hattı (26-31 GHz) kapsamında elde edilen link bütçesi analizi

Time (UTC)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m ²)	g/T (dB/K)
18 May 2024 09:00:00.000	54.040	27.449996	-158.632	-108.405815	27.960000
18 May 2024 09:05:00.000	54.040	27.449996	-158.635	-108.408943	27.960000
18 May 2024 09:10:00.000	54.040	27.449996	-158.639	-108.412154	27.960000
18 May 2024 09:15:00.000	54.040	27.449996	-158.642	-108.415449	27.960000
18 May 2024 09:20:00.000	54.040	27.449995	-158.645	-108.418828	27.960000
18 May 2024 09:25:00.000	54.040	27.449995	-158.649	-108.422291	27.960000
18 May 2024 09:30:00.000	54.040	27.449995	-158.652	-108.425840	27.960000
18 May 2024 09:35:00.000	54.040	27.449995	-158.656	-108.429474	27.960000
18 May 2024 09:40:00.000	54.040	27.449995	-158.660	-108.433195	27.960000
18 May 2024 09:45:00.000	54.040	27.449995	-158.664	-108.437002	27.960000
18 May 2024 09:50:00.000	54.040	27.449995	-158.667	-108.440897	27.960000
18 May 2024 09:55:00.000	54.040	27.449995	-158.671	-108.444879	27.960000
18 May 2024 10:00:00.000	54.040	27.449995	-158.675	-108.448950	27.960000
18 May 2024 10:05:00.000	54.040	27.449994	-158.680	-108.453109	27.960000
18 May 2024 10:10:00.000	54.040	27.449994	-158.684	-108.457358	27.960000
18 May 2024 10:15:00.000	54.040	27.449994	-158.688	-108.461696	27.960000
18 May 2024 10:20:00.000	54.040	27.449994	-158.693	-108.466124	27.960000
18 May 2024 10:25:00.000	54.040	27.449994	-158.697	-108.470642	27.960000
18 May 2024 10:30:00.000	54.040	27.449994	-158.702	-108.475251	27.960000
18 May 2024 10:35:00.000	54.040	27.449994	-158.706	-108.479951	27.960000
18 May 2024 10:40:00.000	54.040	27.449994	-158.711	-108.484743	27.960000
18 May 2024 10:45:00.000	54.040	27.449993	-158.716	-108.489626	27.960000
18 May 2024 10:50:00.000	54.040	27.449993	-158.721	-108.494602	27.960000
18 May 2024 10:55:00.000	54.040	27.449993	-158.726	-108.499669	27.960000
18 May 2024 11:00:00.000	54.040	27.449993	-158.731	-108.504829	27.960000
18 May 2024 11:05:00.000	54.040	27.449993	-158.737	-108.510082	27.960000
18 May 2024 11:10:00.000	54.040	27.449993	-158.742	-108.515428	27.960000
18 May 2024 11:15:00.000	54.040	27.449993	-158.747	-108.520867	27.960000
18 May 2024 11:20:00.000	54.040	27.449993	-158.753	-108.526399	27.960000
18 May 2024 11:25:00.000	54.040	27.449992	-158.759	-108.532025	27.960000
18 May 2024 11:30:00.000	54.040	27.449992	-158.764	-108.537744	27.960000
18 May 2024 11:35:00.000	54.040	27.449992	-158.770	-108.543556	27.960000
18 May 2024 11:40:00.000	54.040	27.449992	-158.776	-108.549463	27.960000
18 May 2024 11:45:00.000	54.040	27.449992	-158.782	-108.555462	27.960000
18 May 2024 11:50:00.000	54.040	27.449992	-158.788	-108.561555	27.960000
18 May 2024 11:55:00.000	54.040	27.449992	-158.794	-108.567742	27.960000
18 May 2024 12:00:00.000	54.040	27.449992	-158.801	-108.574021	27.960000
18 May 2024 12:05:00.000	54.040	27.449991	-158.807	-108.580394	27.960000
18 May 2024 12:10:00.000	54.040	27.449991	-158.813	-108.586860	27.960000
18 May 2024 12:15:00.000	54.040	27.449991	-158.820	-108.593419	27.960000
18 May 2024 12:20:00.000	54.040	27.449991	-158.827	-108.600070	27.960000
18 May 2024 12:25:00.000	54.040	27.449991	-158.833	-108.606814	27.960000
18 May 2024 12:30:00.000	54.040	27.449991	-158.840	-108.613649	27.960000
18 May 2024 12:35:00.000	54.040	27.449991	-158.847	-108.620577	27.960000
18 May 2024 12:40:00.000	54.040	27.449990	-158.854	-108.627595	27.960000
18 May 2024 12:45:00.000	54.040	27.449990	-158.861	-108.634705	27.960000
18 May 2024 12:50:00.000	54.040	27.449990	-158.868	-108.641905	27.960000
18 May 2024 12:55:00.000	54.040	27.449990	-158.876	-108.649194	27.960000
18 May 2024 13:00:00.000	54.040	27.449990	-158.883	-108.656574	27.960000
18 May 2024 13:02:46.539	54.040	27.449990	-158.887	-108.660708	27.960000

Çizelge 7 ve Çizelge 8’de gösterilmiştir. Bu Çizelgelerde link bütçesi performans değerlendirmelerinde önemli rol oynayan EIRP, Güç Akı Yoğunluğu, G/T, C/N0, Bant Genişliği, C/N, Eb/N0 ve BER değerleri elde edilmiştir.

Time (UTCG)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m ²)	g/T (dB/K)
18 May 2024 09:00:00.000	54.040	27.449996	-158.632	-108.405815	27.960000
18 May 2024 09:05:00.000	54.040	27.449996	-158.635	-108.408943	27.960000
18 May 2024 09:10:00.000	54.040	27.449996	-158.639	-108.412154	27.960000
18 May 2024 09:15:00.000	54.040	27.449996	-158.642	-108.415449	27.960000
18 May 2024 09:20:00.000	54.040	27.449995	-158.645	-108.418828	27.960000
18 May 2024 09:25:00.000	54.040	27.449995	-158.649	-108.422291	27.960000
18 May 2024 09:30:00.000	54.040	27.449995	-158.652	-108.425840	27.960000
18 May 2024 09:35:00.000	54.040	27.449995	-158.656	-108.429474	27.960000
18 May 2024 09:40:00.000	54.040	27.449995	-158.660	-108.433195	27.960000
18 May 2024 09:45:00.000	54.040	27.449995	-158.664	-108.437002	27.960000
18 May 2024 09:50:00.000	54.040	27.449995	-158.667	-108.440897	27.960000
18 May 2024 09:55:00.000	54.040	27.449995	-158.671	-108.444879	27.960000
18 May 2024 10:00:00.000	54.040	27.449995	-158.675	-108.448950	27.960000
18 May 2024 10:05:00.000	54.040	27.449994	-158.680	-108.453109	27.960000
18 May 2024 10:10:00.000	54.040	27.449994	-158.684	-108.457358	27.960000
18 May 2024 10:15:00.000	54.040	27.449994	-158.688	-108.461696	27.960000
18 May 2024 10:20:00.000	54.040	27.449994	-158.693	-108.466124	27.960000
18 May 2024 10:25:00.000	54.040	27.449994	-158.697	-108.470642	27.960000
18 May 2024 10:30:00.000	54.040	27.449994	-158.702	-108.475251	27.960000
18 May 2024 10:35:00.000	54.040	27.449994	-158.706	-108.479951	27.960000
18 May 2024 10:40:00.000	54.040	27.449994	-158.711	-108.484743	27.960000
18 May 2024 10:45:00.000	54.040	27.449993	-158.716	-108.489626	27.960000
18 May 2024 10:50:00.000	54.040	27.449993	-158.721	-108.494602	27.960000
18 May 2024 10:55:00.000	54.040	27.449993	-158.726	-108.499669	27.960000
18 May 2024 11:00:00.000	54.040	27.449993	-158.731	-108.504829	27.960000
18 May 2024 11:05:00.000	54.040	27.449993	-158.737	-108.510082	27.960000
18 May 2024 11:10:00.000	54.040	27.449993	-158.742	-108.515428	27.960000
18 May 2024 11:15:00.000	54.040	27.449993	-158.747	-108.520867	27.960000
18 May 2024 11:20:00.000	54.040	27.449993	-158.753	-108.526399	27.960000
18 May 2024 11:25:00.000	54.040	27.449992	-158.759	-108.532025	27.960000
18 May 2024 11:30:00.000	54.040	27.449992	-158.764	-108.537744	27.960000
18 May 2024 11:35:00.000	54.040	27.449992	-158.770	-108.543556	27.960000
18 May 2024 11:40:00.000	54.040	27.449992	-158.776	-108.549463	27.960000
18 May 2024 11:45:00.000	54.040	27.449992	-158.782	-108.555462	27.960000
18 May 2024 11:50:00.000	54.040	27.449992	-158.788	-108.561555	27.960000
18 May 2024 11:55:00.000	54.040	27.449992	-158.794	-108.567742	27.960000
18 May 2024 12:00:00.000	54.040	27.449992	-158.801	-108.574021	27.960000
18 May 2024 12:05:00.000	54.040	27.449991	-158.807	-108.580394	27.960000
18 May 2024 12:10:00.000	54.040	27.449991	-158.813	-108.586860	27.960000
18 May 2024 12:15:00.000	54.040	27.449991	-158.820	-108.593419	27.960000
18 May 2024 12:20:00.000	54.040	27.449991	-158.827	-108.600070	27.960000
18 May 2024 12:25:00.000	54.040	27.449991	-158.833	-108.606814	27.960000
18 May 2024 12:30:00.000	54.040	27.449991	-158.840	-108.613649	27.960000
18 May 2024 12:35:00.000	54.040	27.449991	-158.847	-108.620577	27.960000
18 May 2024 12:40:00.000	54.040	27.449990	-158.854	-108.627595	27.960000
18 May 2024 12:45:00.000	54.040	27.449990	-158.861	-108.634705	27.960000
18 May 2024 12:50:00.000	54.040	27.449990	-158.868	-108.641905	27.960000
18 May 2024 12:55:00.000	54.040	27.449990	-158.876	-108.649194	27.960000
18 May 2024 13:00:00.000	54.040	27.449990	-158.883	-108.656574	27.960000
18 May 2024 13:02:46.539	54.040	27.449990	-158.887	-108.660708	27.960000

Çizelge 7: Gönderme Hattı Link Bütçesi Analiz Çizelgesi - 1

C/No (dB*Hz)	Bandwidth (kHz)	C/N (dB)	Eb/No (dB)	BER
97.926792	78750.000	18.9643	20.9371	1.000000e-30
97.923664	78750.000	18.9612	20.9340	1.000000e-30
97.920453	78750.000	18.9579	20.9308	1.000000e-30
97.917158	78750.000	18.9547	20.9275	1.000000e-30
97.913780	78750.000	18.9513	20.9241	1.000000e-30
97.910316	78750.000	18.9478	20.9206	1.000000e-30
97.906768	78750.000	18.9443	20.9171	1.000000e-30
97.903133	78750.000	18.9406	20.9134	1.000000e-30
97.899413	78750.000	18.9369	20.9097	1.000000e-30
97.895605	78750.000	18.9331	20.9059	1.000000e-30
97.891711	78750.000	18.9292	20.9020	1.000000e-30
97.887728	78750.000	18.9252	20.8980	1.000000e-30
97.883657	78750.000	18.9212	20.8940	1.000000e-30
97.879498	78750.000	18.9170	20.8898	1.000000e-30
97.875250	78750.000	18.9127	20.8855	1.000000e-30
97.870912	78750.000	18.9084	20.8812	1.000000e-30
97.866484	78750.000	18.9040	20.8768	1.000000e-30
97.861965	78750.000	18.8995	20.8723	1.000000e-30
97.857356	78750.000	18.8949	20.8677	1.000000e-30
97.852656	78750.000	18.8902	20.8630	1.000000e-30
97.847864	78750.000	18.8854	20.8582	1.000000e-30
97.842981	78750.000	18.8805	20.8533	1.000000e-30
97.838006	78750.000	18.8755	20.8483	1.000000e-30
97.832938	78750.000	18.8704	20.8432	1.000000e-30
97.827778	78750.000	18.8653	20.8381	1.000000e-30
97.822525	78750.000	18.8600	20.8328	1.000000e-30
97.817179	78750.000	18.8547	20.8275	1.000000e-30
97.811740	78750.000	18.8492	20.8220	1.000000e-30
97.806208	78750.000	18.8437	20.8165	1.000000e-30
97.800582	78750.000	18.8381	20.8109	1.000000e-30
97.794863	78750.000	18.8324	20.8052	1.000000e-30
97.789051	78750.000	18.8265	20.7994	1.000000e-30
97.783145	78750.000	18.8206	20.7934	1.000000e-30
97.777145	78750.000	18.8146	20.7874	1.000000e-30
97.771052	78750.000	18.8085	20.7814	1.000000e-30
97.764866	78750.000	18.8024	20.7752	1.000000e-30
97.758586	78750.000	18.7961	20.7689	1.000000e-30
97.752213	78750.000	18.7897	20.7625	1.000000e-30
97.745247	78750.000	18.7832	20.7560	1.000000e-30
97.739188	78750.000	18.7767	20.7495	1.000000e-30
97.732537	78750.000	18.7700	20.7428	1.000000e-30
97.725794	78750.000	18.7633	20.7361	1.000000e-30
97.718958	78750.000	18.7565	20.7293	1.000000e-30
97.712031	78750.000	18.7495	20.7223	1.000000e-30
97.705012	78750.000	18.7425	20.7153	1.000000e-30
97.697903	78750.000	18.7354	20.7082	1.000000e-30
97.690703	78750.000	18.7282	20.7010	1.000000e-30
97.683413	78750.000	18.7209	20.6937	1.000000e-30
97.676034	78750.000	18.7135	20.6863	1.000000e-30
97.671899	78750.000	18.7094	20.6822	1.000000e-30

Çizelge 8: Gönderme Hattı Link Bütçesi Analiz Çizelgesi - 2

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması, Ka-Bant alma ve gönderme frekans aralıklarında çalışabilecek faz dizinli mikroşerit antenlerin tasarım ve performans analizlerini içermektedir. Çalışmanın ana amacı, yolcu uçaklarında internet erişimini sağlamak için gerekli anten teknolojilerini geliştirmektir. Bu kapsamda hem gönderme hem de alma hatları için en uygun anten yapılandırmaları belirlenmiştir. Anten tasarım ve simülasyonları HFSS programı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup tasarlanan antenlerin uydu ve yolcu uçağı senaryoları ile link bütçesi hesaplarının yapılarak çıktıları STK programında analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak aşağıda açıklanmaktadır.

5.1.1. Anten Tasarım Sonuçları

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen anten tasarımlarında faz dizinli mikroşerit dizi anten yapısı tercih edilmiştir. Hem haberleşme kapsamında hem de havacılık sektörü açısından değerlendirildiğinde mikroşerit antenler, ince ve hafif yapılarıyla uçak gibi taşıtlarda yer ve ağırlık tasarrufu sağlar. Bu, aerodinamik ve yakıt verimliliği açısından büyük bir avantajdır. Mikroşerit antenlerin üretimindeki kolaylık ve düşük maliyetli üretilebilmesi, kolayca entegre edilebilir olması gibi sebeplerden dolayı tercih edilmiştir.

Öte yandan mikroşerit dizi antenlerin dielektrik kayıplara duyarlı oluşu ve dar bant genişliğine sahip olmaları gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Anten tasarımlarında dielektrik sabiti çok yüksek bir malzeme seçilirse ışıma düşük olacak, bant genişliği daralacak ve anten verimi düşecektir. Öte yandan dielektrik sabiti çok düşük (1'e yakın) olan bir malzeme seçilirse anten boyutu büyüyecektir. Dolayısıyla 2.2 dielektrik sabitine sahip Rogers RT Duroid 5880 malzeme seçimi ile optimum seviyede bir seçim yapılmıştır. Bu malzeme düşük dielektrik kayıpları ile bilinir, bu da sinyalin daha az zayıflamasını sağlar ve anten verimliliğini artırır. RT Duriod 5880, yüksek frekanslarda stabil performans gösterir. Bu, yüksek frekanslı uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Malzemenin termal kararlılığı, farklı sıcaklık koşullarında anten performansının sabit kalmasını sağlar. Rogers RT Duroid 5880 ürününün dezavantajı olarak maliyetli oluşu

değerlendirilebilir. Ancak antenin kritik bir görevde kullanılacağı ve uçak üzerinde konumlandırılacağı düşünüldüğünde bu durum göz ardı edilebilir.

Alma ve gönderme hatları için tasarlanan antenlerin haberleşme frekans aralıkları Ka-Bant (Tx: 26-31 GHz, Rx: 18-21 GHz) olacak şekilde tercih edilmiştir. Bu frekans bandının tercih edilmesinin sebepleri olarak yüksek kazanç, büyük bant genişliğinin sağlanması ilk sırada söylenebilir. Bu da yüksek veri iletim hızları ve daha fazla kullanıcı kapasitesi anlamına gelir. Ayrıca Ka-Bant ticari uydu haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu nedenle mevcut altyapılarla uyumludur ve bu frekansta çalışan ekipmanların bulunabilirliği yüksektir. Yüksek frekanslarda çalışmak, düşük frekanslardaki parazit ve gürültüden daha az etkilenme avantajını sağlar. Ayrıca Ka-Bant, küçük anten boyutlarıyla yüksek kazanç elde edilmesini mümkün kılar. Bu, özellikle uçak gibi yer sınırlaması olan ortamlarda büyük avantaj sağlar. Ka-Bant frekansının dezavantajı olarak ise atmosferik koşullara (yağmur, nem vb.) daha duyarlı olduğu ve bu durumun sinyal zayıflamasına sebebiyet verebileceği söylenebilir. Tasarlanan GEO uydu ve yolcu uçağı arasındaki haberleşme senaryosu için atmosferik kayıpların analizi yapılmış olup link bütçesi hesaplarına bu kayıplar dahil edilmiştir. Atmosferik kayıpların hesaplama detayları EK-2’de verilmiştir.

Anten tasarımında tek bir mikroşerit anten yapısı yerine dizi anten yapısı kullanılmıştır. Dizi anten yapısı kullanılarak anten kazanç değerinin artırılması sağlanmıştır. Ek olarak faz dizinli bir yapı kullanılarak sağlanan yönlülük sayesinde sinyalin uyduya yönlendirilebilmesi ve yolculuk esnasında uydu takibi sağlanabilmektedir. Dizi antenlerin hüzmeleri tek mikroşerit anten tasarımına kıyasla daha geniştir. Yüksek kazanç ve yönlülük özellikleri ile hüzmeye genişliği de değerlendirildiğinde sistem haberleşme için daha az enerji harcayacağından enerji verimliliği artacak ve sistem performansı ve güvenilirliğinin artması sağlanacaktır.

Anten tasarımlarında gönderme hattı anteni tasarımı kapsamında Ka-Bant frekans aralığında (26-31 GHz) yüksek performanslı haberleşme antenlerinin tasarımı hedeflemiştir. Tek yama anten tasarımından başlayarak, sırasıyla 1x2, 2x2, 4x4 ve 8x8 dizi anten yapılarında antenler tasarlanmıştır. Her bir aşamada, antenin kazancı, geri dönüş kaybı ve bant genişliği gibi kritik performans metrikleri optimize edilmiştir. Gönderme anteni tasarım sonuçları Çizelge 9’de belirtilmiştir.

Çizelge 9: Gönderme Hattı Antenleri Tasarım Sonuçları

Anten Yapısı	Çalışma Frekans Aralığı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Yüzde Bant Genişliği (%BW)	S_{11} Değeri (dB)	VSWR	Kazanç (dBi)
Tek	28.30 – 29.60	1.3	4,44	-15.44	1.48	8.06
1x2	24.18 – 31.45	7.27	26,14	-18.67	1.44	7.61
2x2	24.37 – 31.81	7.44	26,75	-19.92	1.22	10.32
4x4	24.61 – 32.18	7.57	27,57	-16.65	1.34	17.22
8x8	24.35 – 31.81	7.46	27,17	-17.84	1.31	24.04

Tek yama anten tasarımında, başlangıçta 8,06 dBi kazanç ve 1,3 GHz (%4,44) bant genişliği gözlenmiştir. 1x2 dizi yapısı oluşturulduğunda ise kazanç bir miktar gerilemesine rağmen bant genişliği 7,27 GHz (%26,14) seviyelerine çıkmıştır. 2x2 yapısı oluşturulduğunda bant genişliği bir miktar daha artarak 7,44 GHz (%26,75) seviyesine yükselmiştir. Anten kazancı ise 10,32 dBi seviyesine çıkmıştır. Haberleşme sisteminde kullanılacak seviyede anten tasarımı hedeflendiğinden dolayı dizi yapısı büyütülmeye devam edilmiş ve 4x4 yapısı oluşturulmuştur. 4x4 yapıda bant genişliği bir önceki antene kıyasla 130 MHz daha artarak 7,57 GHz (%27,57) seviyesine gelmiştir. Anten kazancı ise bir önceki yapıya kıyasla oldukça yüksek seviyede artarak 17,22 dBi değerine yükselmiştir. Son olarak 8x8 dizi anten tasarımında, antenin kazancı önemli ölçüde artırılmış 24,04 dBi seviyesine çıkmıştır. Bant genişliği 7,46 GHz'e (%27,17) çıkması ile daha da iyileştirilmiştir. VSWR değerleri karşılaştırıldığında ise 8x8 yapıya doğru gidildikçe stabil olan bir yapıya doğru gidildiği ve 1,31 değerinde elde edildiği görülmektedir. Bu oran duran dalga oranını ifade ettiğinden anten verimliliğinin sağlanabilmesi adına düşük olması tercih edilmektedir. Sonuç olarak 8x8 dizi anten yapısında 24,35 – 31,81 GHz bant genişliğinde haberleşme yapabilecek yüksek kazançlı anten tasarımı tamamlanmıştır.

Anten tasarımlarında alma hattı anteni için yapılan tasarımlar kapsamında Ka-Bant frekans aralığında (18-21 GHz) yüksek performanslı haberleşme antenlerinin tasarımı hedeflemiştir. Gönderme hattında olduğu gibi tek yama anten tasarımından başlayarak, sırasıyla 1x2, 2x2, 4x4 ve 8x8 dizi anten yapılarında antenler tasarlanmıştır. Her bir aşamada, antenin kazancı, geri dönüş kaybı ve bant genişliği gibi kritik performans metrikleri optimize edilmiştir. Alma anteni tasarım sonuçları Çizelge 10'da belirtilmiştir.

Çizelge 10: Alma Hattı Antenleri Tasarım Sonuçları

Anten Yapısı	Çalışma Frekans Aralığı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Yüzde Bant Genişliği (% BW)	S_{11} Değeri (dB)	VSWR	Kazanç (dBi)
Tek	18.88 – 20.50	1.62	8,22	-19.00	1.89	10.80
1x2	18.08 – 20.10	2.02	10,58	-30.49	1.07	12.55
2x2	18.14 – 20.50	2.36	12,10	-32.47	1.15	14.90
4x4	18.12 – 20.50	2.38	12,21	-32.91	1.08	21.66
8x8	18.18 – 20.50	2.32	11,90	-33.03	1.03	28.24

Tek yama anten tasarımında, başlangıçta 10,80 dBi kazanç ve 1,62 GHz (%8,22) bant genişliği gözlenmiştir. 1x2 dizi yapısı oluşturulduğunda ise kazanç artarak 12,55 dBi ve bant genişliği 2,02 GHz (%10,58) seviyelerine çıkmıştır. 2x2 yapısı oluşturulduğunda bant genişliği bir miktar daha artarak 2,36 GHz (%12,10) seviyesine yükselmiştir. Anten kazancı ise 14,90 dBi seviyesine çıkmıştır. Dizi yapısı büyütülmeye devam edilmiş ve 4x4 yapısı oluşturulmuştur. 4x4 yapıda bant genişliği bir önceki antene kıyasla 20 MHz daha artarak 2,38 GHz (%12,21) seviyesine gelmiştir. Anten kazancı ise bir önceki yapıya kıyasla yükselerek 21,66 dBi değerine yükselmiştir. Son olarak 8x8 dizi anten tasarımında, antenin kazancı önemli ölçüde artırılmış 28,24 dBi seviyesine çıkmıştır. Bant genişliği 2,32 GHz'e (%11,90) gerilemiş ancak hedef haberleşme frekans aralığı olan 18-21 GHz aralığının neredeyse tamamını kapsayacak şekilde sonuçlanmıştır. VSWR değerleri karşılaştırıldığında ise 8x8 yapıya doğru gidildikçe azalan bir yapıya doğru gidildiği ve 1,03 değerinin elde edildiği görülmektedir. Bu oran duran dalga oranını ifade ettiğinden anten verimliliğinin sağlanabilmesi adına düşük olması tercih edilmektedir. Sonuç olarak 8x8 dizi anten yapısında 18,18-20,50 GHz bant genişliğinde haberleşme yapabilecek yüksek kazançlı anten tasarımı tamamlanmıştır.

Yapılan simülasyonlar sonucunda hem Tx hem de Rx hatlarında en yüksek performansı sağlayan 8x8 mikroserit anten yapısı, diğer konfigürasyonlarla karşılaştırıldığında en düşük VSWR değerlerine ve en yüksek kazançlara sahip olduğu için tercih edilmiştir. 8x8 antenin gönderme hattında kazancı 24.04 dBi, alma hattında ise 28.24 dBi olarak ölçülmüştür. Her iki durumda da antenler geniş bant genişliği ve düşük S_{11} değerleri ile üstün performans sergilemiştir.

5.1.2. STK Simülasyon Sonuçları

Yapılan tez çalışması kapsamında tasarlanan alma ve gönderme hatları antenlerinin simülasyon analizleri STK (System Tool Kit) programı kullanılarak yapılmıştır. Program üzerinde 41° Doğu yörüngesine yerleştirilmiş potansiyel bir GEO uydusu tanımlanmıştır. Uydu üzerine Ka-Bant haberleşme sistemleri ve antenleri konumlandırılmış olup link bütçesi analizleri kapsamında kullanılmıştır. Bu bağlamda uydu üzerine iki farklı Ka-Bant gönderme anteni yerleştirilmiş ve uçağın uçuş rotasını kapsayacak şekilde iki farklı hüzmeye (beam) oluşturulmuştur. Uydu üzerinden Hüzme-1 240° azimut, 84° elevasyon açısı ile Hüzme-2 ise 295° azimut, 85° elevasyon açısı ile yönlendirildiğinde Konya – Barselona arası konumlarda yeterli kapsama alanına sahip olduğu görülmüştür. Oluşturulan çoklu hüzmeye görselleri Şekil 101’de belirtilmiştir. İlgili görsel incelendiğinde Konya ve Barselona arası tüm lokasyonlarda kapsama alanı sağlandığı görülmektedir.

Benzer şekilde Konya (KON)’dan Barselona (BCN) lokasyonuna doğru seyir halinde olan potansiyel bir yolcu uçağı tanımlaması yapılmış olup tasarlanan 8x8 alma ve gönderme hatları antenleri ile haberleşme ekipmanları uçak üzerine konumlandırılmıştır. Alma ve gönderme hatları için uçak ve uydu tanımlamalarının yapılmasının ardından simülasyon gerçekleştirilmiş ve link bütçesi analizleri yapılmıştır. Oluşturulan senaryoda yolcu uçağı seyahat rotası boyunca GEO uyduyu takip etmiştir. Uydu takibi kapsamında sinyalin 5dk’lık aralıklarla yolculuk süresi boyunca azimut, elevasyon açıları ile uydunun uçağına göre mesafesinin değişimi Şekil 102’de verilmiştir. Buradan saat 09:00’da Konya’dan kalkan uçağın aldığı ilk sinyal yönünün azimutta 238,165°, elevasyonda 45,404° olduğu ve antenin uydu ile mesafesinin 37384 km olduğu görülmektedir. Yolculuğun devam eden saatlerinde saat 11:00’de azimut açısının 226,666 °, elevasyon açısının 39,594° ve uydu mesafesinin 37812 km olduğu görülmektedir. Yolculuğun sonuna bakıldığında ise saat 13:02’de azimut açısının 218,205°, elevasyon açısının 31,310° ve uydu mesafesinin 38497 km olduğu görülmektedir. Buradan da anlaşıldığı gibi uçağın konumunun batıya doğru değişmesi azimut ve elevasyon açılarında azalmaya sebebiyet vermiş olup uydu mesafesinin artışı Şekil 102’de görülmektedir.

Gönderme hattı kapsamında veri iletiminin sağlanması için kullanılacak RF taşıyıcı parametreleri belirlenmiştir. Bu bağlamda 50 Mbps veri hızı sağlamak için QPSK modülasyonunda Reed-Solomon (239,255) kanal kodlama, 1/3 FEC ve %5 Roll-Off

değeri kullanılarak 78,75 MHz bant genişliğinde bir taşıyıcıya ihtiyaç olduğu bu tez kapsamında belirlenmiştir. Taşıyıcı parametreleri Çizelge 6’te verilmiştir. QPSK modülasyonunda her sembolde iki bit taşındığından spektral verimliliği artırmaktadır. Bu da veri iletim hızını artırırken bant genişliğini verimli kullanmayı sağlar. QPSK, yüksek veri hızlarına ulaşırken kararlı bir performans sunar. Gürültü ve parazitlere karşı daha dirençlidir. Elbette ki QPSK modülasyonundan daha verimli modülasyon tipleri mevcuttur (8PSK, 16APSK vb.). Ancak modülasyon tipi artırıldıkça güç ihtiyacı da artacak olup maliyetler çok yükselecektir. Dolayısıyla QPSK modülasyonu enerji tüketimi açısından verimlidir, bu da mobil ve uzay uygulamaları için önemlidir. Ayrıca QPSK modülatör ve demodülatörlerin tasarımı ve uygulaması nispeten basittir, bu da sistem maliyetlerini düşürür.

QPSK modülasyonunda bir sinyalin uydu haberleşmesi kapsamında performans değerlendirmelerinin standartlara uygun olarak sağlanabilmesi için belirli bir BER değerine ulaşması beklenmektedir. BER değeri ise sistemin elde ettiği E_b/N_0 değerine göre değişmektedir. Bu bağlamda havacılık ve uzay haberleşme standartları ITU (International Telecommunication Union) uydu haberleşme sistemlerinde 10^{-10} BER değerine sahip olunması gerektiğini ifade etmektedir. Yüksek güvenilirlik ve veri bütünlüğü gereken haberleşme sistemlerinde standart olarak bu değer kabul edilir. 10^{-10} BER değeri sağlandığı takdirde hatasız veri iletimi için yeterli koşullar oluşmuş olacaktır. Tasarlanan anten sistemlerinin uluslararası kabul görmüş sistemlere uygun olması için ITU referansları baz alınmalıdır.

QPSK modülasyonunda 10^{-10} BER değerine ulaşabilmek için tasarlanan sistemin sahip olması gereken en düşük E_b/N_0 değeri belirlenmiştir. Bu değer MATLAB’da Bit Error Rate Analysis Tool üzerinden hesaplanmış olup 13,04 olarak belirlenmiştir. Anten sisteminin daha verimli olarak ve daha az maliyetli şekilde sağlanabilmesi ve link bütçesi hesaplarının da rahatlıkla sağlanabilmesi için QPSK modülasyonuna ek olarak Reed-Solomon (239,255) kanal kodlama gerçekleştirilmiştir. Reed Solomon kodlaması, hata düzeltme kabiliyeti sağlamakla birlikte veri iletiminde oluşabilecek hataları düzeltir ve BER (Bit Error Rate) oranını düşürür. Hata düzeltme kodlaması, sistemin güvenilirliğini artırır ve veri bütünlüğünü korur. Bu, sinyalin zayıfladığı veya parazitlerin arttığı durumlarda bile veri kaybını önler. Hata düzeltme kodlamasının dezavantajı olarak ekstra bant genişliğine ihtiyaç duyulduğu belirtilebilir. Ancak, bu artan bant genişliği

gereksinimi, sağlanan hata düzeltme ve güvenilirlik avantajları ile dengelenir. Reed-Solomon (RS) hata düzeltme kodlaması için MATLAB BER Analysis Tool üzerinden yapılan analizler sonucunda QPSK modülasyonu ve RS birlikte kullanıldığında 10^{-10} BER değerinin elde edilebilmesi için 7,94 dB Eb/N0 değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Buradan da kodlamasız değere göre 5 dB'lik bir kazanç olduğu görülmüştür. İlgili değerler Şekil 13'te gösterilmiştir.

Benzer şekilde alma hattı haberleşmesi kapsamında veri iletiminin sağlanması için kullanılacak RF taşıyıcı parametreleri de belirlenmiştir. Bu bağlamda 100 Mbps veri hızı sağlamak için QPSK modülasyonunda Reed-Solomon (239,255) kanal kodlama, 8/9 FEC ve %5 Roll-Off değeri kullanılarak 59,0625 MHz bant genişliğinde bir taşıyıcıya ihtiyaç olduğu bu tez kapsamında belirlenmişti. Gönderme anteninde olduğu gibi alma anteninde de QPSK modülasyonu ve RS birlikte kullanıldığında 10^{-10} BER değerinin elde edilebilmesi için 7,94 dB Eb/N0 değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Taşıyıcı parametreleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Alma ve gönderme hatları kapsamında link bütçesine girdi oluşturacak tüm parametreler belirlendikten sonra link bütçesi analizleri işlemleri gerçekleştirilmiştir. Link bütçesi analizlerinde EIRP (Effective Isotropic Radiated Power), G/T (Gain-to-Noise Temperature Ratio), C/N0 (Carrier-to-Noise Density), bant genişliği, C/N (Carrier-to-Noise Ratio), Eb/N0 (Energy per Bit to Noise Power Density Ratio) ve BER (Bit Error Rate) değerleri hesaplanmış ve performans değerlendirmeleri yapılmıştır.

Alma hattı link bütçesi analizlerinde uydu tarafında 46,77 dBW EIRP, yolcu uçağı üzerindeki anten sisteminin G/T değeri 28,44 dB/K olarak hesaplanırken 100 Mbps veri hızı için 59,0625 MHz taşıyıcıya ihtiyaç duyulacağı belirlenmiştir. Yolcu uçağı ve uydu arasında haberleşmenin başladığı andan bitimine kadar 5 dakikalık aralıklarla alınmış link bütçesi analiz sonuçları Şekil 105 ve Şekil 106'de gösterilmiştir. Haberleşmenin ilk, orta ve son alınan parametreleri Çizelge 11'da gösterilmiştir.

Çizelge 11: Alma Hattı Link Bütçesi Karşılaştırma Çizelgesi

Saat	C/N0 (dB/Hz)	C/N (dB)	Eb/N0 (dB)	BER
09:00	94,11	16,39	13,69	3,81E-12
11:00	94,01	16,29	13,59	6,54E-12
13:00	93,86	16,14	13,44	1,46E-11

Çizelgeden da görüldüğü üzere C/N0, C/N ve Eb/N0 değerlerinde haberleşmenin sağlandığı ilk andan son ana kadar yaklaşık 0,25 dB her birinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalmaların sebepleri olarak uydu mesafesinin artması sebebiyle sinyal seviyesindeki azalmalar ve uydu kapsama alanının yolculuk süresi boyunca kazanç değerlerinin değişken olması söylenebilir. Bu azalmalara rağmen alınan Eb/N0 değerleri teorik gerekli Eb/N0 değeri olan 7,94 dB'den oldukça yukarıda olduğundan haberleşmenin sağlanacağını yorumlayabiliyoruz. Benzer şekilde BER değeri de ilk anda $3,81 \times 10^{-12}$ iken son anda $1,46 \times 10^{-11}$ seviyesine düşmüştür. Buna rağmen yolculuğun başından sonuna kadar 10^{-11} BER değerinin altına inmemiştir. Bu da haberleşme performansını yeterli seviyede sağladığını göstermektedir.

Gönderme hattı link bütçesi analizlerinde uçak tarafında 51,04 dBW EIRP, uydu üzerindeki anten sisteminin G/T değeri 27,96 dB/K olarak belirlenirken 50 Mbps veri hızı için 78,75 MHz taşıyıcıya ihtiyaç duyulacağı belirlenmiştir. Yolcu uçağı ve uydu arasında haberleşmenin başladığı andan bitimine kadar 5 dakikalık aralıklarla alınmış link bütçesi analiz sonuçları

Time (UTCG)	EIRP (dBW)	Rcvd. Frequency (GHz)	Rcvd. Iso. Power (dBW)	Flux Density (dBW/m ²)	g/T (dB/K)
18 May 2024 09:00:00.000	54.040	27.449996	-158.632	-108.405815	27.960000
18 May 2024 09:05:00.000	54.040	27.449996	-158.635	-108.408943	27.960000
18 May 2024 09:10:00.000	54.040	27.449996	-158.639	-108.412154	27.960000
18 May 2024 09:15:00.000	54.040	27.449996	-158.642	-108.415449	27.960000
18 May 2024 09:20:00.000	54.040	27.449995	-158.645	-108.418828	27.960000
18 May 2024 09:25:00.000	54.040	27.449995	-158.649	-108.422291	27.960000
18 May 2024 09:30:00.000	54.040	27.449995	-158.652	-108.425840	27.960000
18 May 2024 09:35:00.000	54.040	27.449995	-158.656	-108.429474	27.960000
18 May 2024 09:40:00.000	54.040	27.449995	-158.660	-108.433195	27.960000
18 May 2024 09:45:00.000	54.040	27.449995	-158.664	-108.437002	27.960000
18 May 2024 09:50:00.000	54.040	27.449995	-158.667	-108.440897	27.960000
18 May 2024 09:55:00.000	54.040	27.449995	-158.671	-108.444879	27.960000
18 May 2024 10:00:00.000	54.040	27.449995	-158.675	-108.448950	27.960000
18 May 2024 10:05:00.000	54.040	27.449994	-158.680	-108.453109	27.960000
18 May 2024 10:10:00.000	54.040	27.449994	-158.684	-108.457358	27.960000
18 May 2024 10:15:00.000	54.040	27.449994	-158.688	-108.461696	27.960000
18 May 2024 10:20:00.000	54.040	27.449994	-158.693	-108.466124	27.960000
18 May 2024 10:25:00.000	54.040	27.449994	-158.697	-108.470642	27.960000
18 May 2024 10:30:00.000	54.040	27.449994	-158.702	-108.475251	27.960000
18 May 2024 10:35:00.000	54.040	27.449994	-158.706	-108.479951	27.960000
18 May 2024 10:40:00.000	54.040	27.449994	-158.711	-108.484743	27.960000
18 May 2024 10:45:00.000	54.040	27.449993	-158.716	-108.489626	27.960000
18 May 2024 10:50:00.000	54.040	27.449993	-158.721	-108.494602	27.960000
18 May 2024 10:55:00.000	54.040	27.449993	-158.726	-108.499669	27.960000
18 May 2024 11:00:00.000	54.040	27.449993	-158.731	-108.504829	27.960000
18 May 2024 11:05:00.000	54.040	27.449993	-158.737	-108.510082	27.960000
18 May 2024 11:10:00.000	54.040	27.449993	-158.742	-108.515428	27.960000
18 May 2024 11:15:00.000	54.040	27.449993	-158.747	-108.520867	27.960000
18 May 2024 11:20:00.000	54.040	27.449993	-158.753	-108.526399	27.960000
18 May 2024 11:25:00.000	54.040	27.449992	-158.759	-108.532025	27.960000
18 May 2024 11:30:00.000	54.040	27.449992	-158.764	-108.537744	27.960000
18 May 2024 11:35:00.000	54.040	27.449992	-158.770	-108.543556	27.960000
18 May 2024 11:40:00.000	54.040	27.449992	-158.776	-108.549463	27.960000
18 May 2024 11:45:00.000	54.040	27.449992	-158.782	-108.555462	27.960000
18 May 2024 11:50:00.000	54.040	27.449992	-158.788	-108.561555	27.960000
18 May 2024 11:55:00.000	54.040	27.449992	-158.794	-108.567742	27.960000
18 May 2024 12:00:00.000	54.040	27.449992	-158.801	-108.574021	27.960000
18 May 2024 12:05:00.000	54.040	27.449991	-158.807	-108.580394	27.960000
18 May 2024 12:10:00.000	54.040	27.449991	-158.813	-108.586860	27.960000
18 May 2024 12:15:00.000	54.040	27.449991	-158.820	-108.593419	27.960000
18 May 2024 12:20:00.000	54.040	27.449991	-158.827	-108.600070	27.960000
18 May 2024 12:25:00.000	54.040	27.449991	-158.833	-108.606814	27.960000
18 May 2024 12:30:00.000	54.040	27.449991	-158.840	-108.613649	27.960000
18 May 2024 12:35:00.000	54.040	27.449991	-158.847	-108.620577	27.960000
18 May 2024 12:40:00.000	54.040	27.449990	-158.854	-108.627595	27.960000
18 May 2024 12:45:00.000	54.040	27.449990	-158.861	-108.634705	27.960000
18 May 2024 12:50:00.000	54.040	27.449990	-158.868	-108.641905	27.960000
18 May 2024 12:55:00.000	54.040	27.449990	-158.876	-108.649194	27.960000
18 May 2024 13:00:00.000	54.040	27.449990	-158.883	-108.656574	27.960000
18 May 2024 13:02:46.539	54.040	27.449990	-158.887	-108.660708	27.960000

Çizelge 7 ve Çizelge 8’da gösterilmiştir. Haberleşmenin ilk, orta ve son anında alınan parametreleri Çizelge 12’de gösterilmiştir.

Çizelge 12:Gönderme Hattı Link Bütçesi Karşılaştırma Çizelgesi

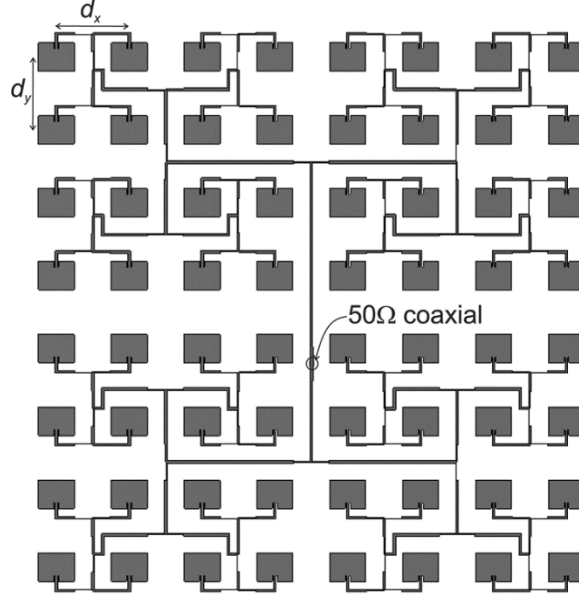
Saat	C/N0 (dB/Hz)	C/N (dB)	Eb/N0 (dB)	BER
09:00	97,92	18,96	20,93	1E-30
11:00	97,82	18,86	20,83	1E-30
13:00	97,67	18,71	20,68	1E-30

Çizelgeden da görüldüğü üzere C/N0, C/N ve Eb/N0 değerlerinde haberleşmenin sağlandığı ilk andan son ana kadar yaklaşık 0,25 dB her birinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalmaların sebepleri olarak uydu mesafesinin artması sebebiyle sinyal seviyesindeki azalmalar ve uydu kapsama alanının yolculuk süresi boyunca kazanç değerlerinin değişken olması söylenebilir. Bu azalmalara rağmen alınan Eb/N0 değerleri teorik gerekli Eb/N0 değeri olan 7,94 dB’den oldukça yukarıda olduğundan haberleşmenin sağlanacağını yorumlayabiliyoruz. Benzer şekilde BER değeri de ilk andan son ana kadar 1×10^{-30} değerinin altına inmemiştir. Bu da haberleşme performansını fazlasıyla yeterli seviyede sağladığını göstermektedir.

Yapılan simülasyonlar, tasarlanan antenlerin teorik performanslarının gerçek kullanım senaryolarında nasıl sonuçlar verdiğini göstermiştir. Simülasyonlar, GEO uydu ile yolcu uçağı arasındaki haberleşmenin sürekliliğı ve kapsama alanı açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Konya (KON) ile Barselona (BCN) arasındaki uçuş rotasında kesintisiz haberleşme sağlanmıştır. Bu, antenlerin gerçek zamanlı uçuş şartlarında etkin bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için bazı öneriler geliştirilmiştir. Anten tasarımında iyileştirmeler yapılabilir. Mikroşerit anten tasarımında kullanılan Rogers RT Duroid 5880 malzemesi, düşük dielektrik kaybı ve yüksek frekans stabilitesi ile ön plana çıkmaktadır. Bu malzeme, yüksek performanslı RF ve mikrodalga uygulamaları için idealdir. Ancak, maliyet açısından diğer dielektrik malzemelere göre daha pahalı olabilir. Alternatif olarak, yüksek iletkenliğe sahip ve daha düşük maliyetli malzemeler araştırılabilir. Tasarımın optimizasyonu, besleme hattı tasarımı ve anten geometrisi üzerinde yapılan ince ayarlar ile performans daha da artırılabilir. Besleme hattı tasarımı ve anten geometrisi optimize edilerek anten performansı artırılabilir. Örnek olarak Şekil 107'da belirtildiğı gibi mikroşerit besleme yöntemi ile 8x8 dizi anten tasarımı için besleme hattı yapısı kurulabilir. Mikroşerit besleme yöntemi üretim, uygulama kolaylıkları ve düşük bütçeli olması gibi sebeplerden dolayı tercih edilebilir (Borgarino, 2010).



Şekil 107: 8x8 Dizi Anten Tasarımı İçin Örnek Besleme Hattı Tasarımı

Havacılık uygulamalarında, uçaklarda internet erişimi sağlamak için mikroşerit antenlerin kullanılması, daha güçlü ve kesintisiz iletişim sağlayacaktır. Bu sektör için antenlerin düşük profilli ve hafif olması önemlidir. Uydu haberleşmesinde ise geniş coğrafi alanlara etkili hizmet sağlamak için yüksek kazançlı mikroşerit antenlerin kullanılması önerilmektedir. Bu tür antenler, uydu haberleşmesinde daha verimli veri iletimi sağlayabilmektedir.

Farklı anten dizisi konfigürasyonları ile daha detaylı analizler yapılabilir. Bu, belirli uygulamalar için en uygun konfigürasyonun belirlenmesine yardımcı olabilir. Ayrıca diğer yüksek frekans bantlarında da benzer analizler yapılarak farklı iletişim ihtiyaçlarına yönelik çözümler sunulabilir. Modern simülasyon ve optimizasyon tekniklerinin kullanılması, anten tasarım sürecinde yeni fırsatlar sunabilir. Özellikle yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin entegrasyonu ile daha kapsamlı analizler yapılabilir.

Mikroşerit antenlerin 5G ve IoT uygulamalarında kullanımı, bu teknolojilerde yüksek veri iletim kapasitesi ve düşük gecikme süreleri sunması nedeniyle önemlidir. Mikroşerit antenlerin faz dizinli yapısı, yönlendirilebilirlik ve yüksek kazanç sağlaması açısından avantajlıdır. Işın yönlendirme yetenekleri ile çeşitli uygulamalarda esneklik sunar. Ancak, daha karmaşık bir tasarım ve kontrol mekanizması gerektirmesi ve maliyetlerin artması dezavantajları arasında yer alır.

QPSK modülasyon tipi, yüksek veri iletim hızları ve spektrum verimliliği sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir. Reed-Solomon kodlama ise hata düzeltme yetenekleri sunarak iletişim güvenilirliğini artırır. Bu kombinasyon, veri iletimindeki hataların azaltılmasını sağlar. Seçilen FEC değeri, iletişim sisteminin hata düzeltme kapasitesini artırarak BER'i (Bit Error Rate) iyileştirir. %5 roll-off değeri, spektrum verimliliği ve sinyal kalitesi arasında bir denge sağlar. Farklı roll-off değerleri, spektrum genişliği ve sinyal kalitesi üzerinde farklı etkiler yaratabilir.

STK simülasyonlarında uçak gibi hareketli platformlar için daha gerçekçi simülasyon senaryoları oluşturulabilir. Bu senaryolar, farklı uçuş rotaları ve hava koşulları gibi değişkenleri içerebilir. Ayrıca antenlerin farklı uçuş dinamiklerinde performansını değerlendiren simülasyonlar yapılabilir.

Uydu üzerinden internet haberleşmesi kapsamında birden fazla uçakta aynı anda kullanılan anten sistemlerinin performansını değerlendiren simülasyonlar gerçekleştirilebilir. Bu, sistemin geniş ölçekli uygulanabilirliğini test etmek açısından önemli olacaktır.

Tasarlanan antenlerin prototip üretimi yapılarak, gerçek ortamda performans testleri gerçekleştirilebilir. Bu testler, laboratuvar ortamında yapılan simülasyonların gerçek dünyadaki geçerliliğini ortaya koyacaktır. Ayrıca antenlerin uçak üzerindeki aerodinamik etkileri de incelenebilir.

Uçuş sırasında gerçek zamanlı performans testleri yapılarak, antenlerin dinamik koşullardaki performansı değerlendirilebilir. Bu testler hem antenlerin dayanıklılığını hem de sürekli haberleşme kapasitesini ortaya koyacaktır.

Bu öneriler hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için yol gösterici nitelikte olup, hava taşımacılığında daha etkin ve güvenilir haberleşme sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu tezde elde edilen sonuçların daha da ileriye taşınmasına olanak sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Adams, R. (2017). Innovations in satellite communications. *Telecommunication Journal*, 64(2), 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.telecomj.2017.02.008>
- AGI. (2023). Systems Tool Kit Overview. Retrieved from AGI's official website. https://www.agi.com/getmedia/005b9298-b74a-4932-85f7-1362ec263d9c/STK_family.pdf
- AGI (2024). STK Level 1 and Level 2 Training Manual. Retrieved from AGI's official website. <https://help.agi.com/stk/LinkedDocuments/Printed%20Manual%20-%20Comprehensive.pdf>
- Ahmed, H., & Hussein, M. (2017). Design of high-gain microstrip antennas. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017, Article ID 456123. <https://doi.org/10.1155/2017/456123>
- Ateş, Y., & Ürgün, S. (2017). Application of Wireless In-Flight Entertainment System and Its Analysis According To Embedded Systems. *Journal of Aviation*, 1(2), 99-106. <https://doi.org/10.30518/jav.340416>
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
- Baker, D., & Harris, S. (2016). Ka-band phased array design for UAVs. *IEEE Access*, 4, 1245-1256. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.254844>
- Brown, A. (2019). Design and analysis of microstrip patch antennas for Ka-band applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(3), 1234-1245. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2895000>
- Borgarino, M. & Polemi, Alessia & Mazzanti, Andrea. (2010). Low-Cost Integrated Microwave Radiometer Front-End for Industrial Applications. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*. 57. 3011 - 3018. [10.1109/TMTT.2009.2034209](https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2034209).
- Chen, W., & Gao, S. (2019). Ka-band satellite communication for aviation. *Satellite Communications Journal*, 45(3), 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.satcom.2019.03.005>
- Davis, M. (2018). Satellite communication systems in aviation. *Journal of Aerospace Engineering*, 12(1), 45-56. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000930](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000930)
- Dündar, Ö. & Koyuncu, B. (2023). Kabin İçi 4G (LTE) ve WiFi Kablosuz Haberleşme Sistemlerinde Kullanılmak Üzere Mikroşerit Anten Tasarımı. *Aerospace Research Letters (ASREL) Dergisi*, 2(1), 19-26.
- EUTELSAT (2024) Satellite Eutelsat 7B A Key Orbital Location For Regional Markets https://www.eutelsat.com/files/PDF/brochures/EUTELSAT_SATELLITE_E7B.pdf

- Evans, J. (2018). Microstrip antenna performance enhancement techniques. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10(4), 123-134. <https://doi.org/10.1017/S1759078718000156>
- Ford, M. (2019). Satellite systems in modern aviation. *Journal of Aerospace Information Systems*, 16(7), 290-300. <https://doi.org/10.2514/1.I010715>
- Gonzalez, L. (2018). Antenna technologies for modern aviation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 33(6), 50-67. <https://doi.org/10.1109/MAES.2018.160053>
- Gultepe, G., Kanar, T., Zehir, S., & Rebeiz, G. M. (2021). A 1024-Element Ku-Band SATCOM Phased-Array Transmitter with 45-dBW Single-Polarization EIRP. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69(9), 4157-4168. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3075678>
- Hall, P., & Thompson, K. (2020). Design and development of phased array antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 62(3), 45-56. <https://doi.org/10.1109/MAP.2020.2967712>
- Harris, J., & Williams, P. (2016). In-flight connectivity: Challenges and solutions. *Aviation Technology Review*, 29(4), 250-263. <https://doi.org/10.1016/j.avtr.2016.04.003>
- ITU. (2019). ITU-R P.618-13: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. International Telecommunication Union.
- Johnson, R. C. (2015). Fundamentals of microstrip antennas. *Microwave Journal*, 58(4), 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.mwj.2015.03.002>
- Kumar, A., & Mehta, B. (2015). Advances in phased array radar technology. *Radar and Communication Systems*, 72(1), 34-45. <https://doi.org/10.1109/RCS.2015.7231223>
- Kraus, J. D., Marhefka, R. J., & Khan, A. S. (2002). *Antennas For All Applications*. McGraw-Hill Education
- Lee, Y., & Kim, J. (2018). Phased array antennas for aerospace applications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54(3), 1245-1253. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.280049>
- Liu, Q., & Yang, S. (2017). Advances in Ka-band phased array antennas. *Progress in Electromagnetics Research*, 78(2), 123-140. <https://doi.org/10.2528/PIER17080103>
- Low, K. K. W., Rebeiz, G. M., Zehir, S., & Kanar, T. (2021a). A Reconfigurable Dual-Polarized 1024-Element Ka-Band SATCOM Transmit Phased-Array with Large Scan Volume and +48 dBW EIRP. *IEEE MTT-S International Microwave*

- Symposium Digest, 2021-June, 638–640.
<https://doi.org/10.1109/IMS19712.2021.9574982>
- Low, K. K. W., Rebeiz, G. M., Zahir, S., & Kanar, T. (2021b). A Reconfigurable Dual-Polarized 1024-Element Ka-Band SATCOM Transmit Phased-Array with Large Scan Volume and +48 dBW EIRP. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2021-June, 638–640.
<https://doi.org/10.1109/IMS19712.2021.9574982>
- Martin, H., & Lee, C. (2019). Design considerations for Ka-band phased arrays. *Microwave and Optical Technology Letters*, 61(2), 390-398.
<https://doi.org/10.1002/mop.31524>
- Martinez-Vazquez, M., Verpoorte, J., Leis, J., Willemsen, M., Hulzinga, A., & Reznicek, Z. (2021, March 22). Structurally integrated phased array antennas for aeronautical SatCom applications. 15th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2021. <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411403>
- Morgan, T., & White, D. (2018). Next-generation aviation communication systems. *Aerospace Science and Technology*, 85, 112-120.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.01.014>
- Parker, J., & Miller, D. (2017). Innovations in aerospace communications. *Aerospace Technology Review*, 32(5), 210-223. <https://doi.org/10.1016/j.atr.2017.05.004>
- Patel, K., & Rao, R. (2017). Microstrip antenna design for satellite communication. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, Article ID 543210. <https://doi.org/10.1155/2017/543210>
- Patel, N., & Singh, P. (2015). Review of Ka-band antenna design techniques. *Microwave Journal*, 58(7), 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.mwj.2015.05.001>
- Peterson, K., & Green, J. (2019). Ka-band antennas for in-flight connectivity. *IEEE Communications Magazine*, 57(5), 40-47.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.160020>
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Raghu, A. N., & Manjunatha N, J. K. (2023). Tracking of Satellites by Using Phased Array.
- Reddy, M. H., Min, C., Howland, N., & Potts, N. R. (2022). A high gain 16 × 16 Ka-band circularly polarized planar array antenna. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36(9), 1298–1310. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.2022002>
- Richards, L. (2017). In-flight connectivity systems. *Aviation Electronics*, 43(6), 56-67.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.003>

- Robinson, E., & Clark, S. (2016). Microstrip patch antennas: A comprehensive review. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 15(2), 123-135. <https://doi.org/10.1590/2179-10742016v15i2936>
- Sanchez, M., & Lopez, J. (2019). Next-generation communication satellites. *Journal of Spacecraft Technology*, 12(3), 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.spacecraft.2019.03.002>
- Sanghamitro, "Flat-Panel Wideband Dual-Circularly Polarized 8×8 Phased Array Antenna for SATCOM Applications," 2023 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM), Boulder, CO, USA, 2023, pp. 64-65, doi: 10.23919/USNC-URSINRSM57470.2023.10043155.
- Sharma, A., Agrawal, S., Bhatnagar, C., & Chauhan, D. S. (2020). Modelling and Analysis of Received Signal Strength - Based Emitter Geolocation from Single Geostationary Satellite with Multiple Antennas using STK Toolkit. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 17(3), 188–195. <https://doi.org/10.1080/1448837X.2020.1816627>
- Smith, J., & Doe, R. (2018). Communication systems in modern aviation. *Aerospace Journal*, 45(2), 210-223. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.05.002>
- Sreejith, C. A., Vishwakarma, N. K., Tamang, M., & Beenamole, K. S. (2022). Dual Polarized Phased Array Antenna Element for SATCOM on the Move Application. 2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference, MAPCON 2022, 1966–1969. <https://doi.org/10.1109/MAPCON56011.2022.10047196>
- Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). *Antenna Theory and Design*. John Wiley & Sons.
- Thompson, B., & Nelson, L. (2016). Antenna technologies for UAV communication. *IEEE Transactions on Aerospace and*
- Thompson, M. (2016). Satellite communication for in-flight connectivity. *Journal of Satellite Communications*, 33(1), 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.jsatcom.2016.01.004>
- Turner, P. (2017). Antenna design for mobile platforms. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 1453-1456. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2660845>
- Tsuji, H., Orikasa, T., Miura, A., Toyoshima, M., & Miura, R. (n.d.). On-board Ka-band Satellite Tracking Antenna for Unmanned Aircraft System. <http://www.itu.int/md/R12-WP5B-C-0475/en>,
- Wang, X., & Li, H. (2020). High-frequency structural simulator for antenna design. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 12(4), 156-165. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2020.124010>

- Williams, R. (2018). Performance analysis of phased arrays in aviation. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32(14), 1837-1848. <https://doi.org/10.1080/09205071.2018.1523129>
- Xue, X., Shi, H., Jiang, T., Han, Y., & Zhi, G. (2022). Design of a Low-Profile Polarization Tracking Active Phased Array Antenna for Satcom on the Move. *IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2022*, 1765–1769. <https://doi.org/10.1109/ITOEC53115.2022.9734657>
- Yang, Z., & Li, F. (2020). Microstrip antennas for wireless communication. *Wireless Personal Communications*, 115(2), 389-398. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07075-5>
- Young, S. (2015). High-performance microstrip antennas for satellite applications. *Progress in Electromagnetics Research*, 54(4), 345-354. <https://doi.org/10.2528/PIER17081403>
- Zhang, Y., & Chen, L. (2015). Performance analysis of phased array antennas in aviation. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, Article ID 312583. <https://doi.org/10.1155/2015/312583>
- Zhang, Y., Bai, J., Shi, S., & Prather, D. W. (2016). Ka-band phased patch array antenna integrated with a PET-controlled phase shifter. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 26(3), 199–208. <https://doi.org/10.1002/mmce.20953>

EKLER

EK-1 QPSK (Kodlamasız) ve QPSK (Reed-Solomon (239,255)) kodlamalı Modülasyon Tipleri için Teorik Eb/N₀ Hesaplamaları MATLAB Kodları

```
% Parameters
M = 4; % Modulation order for QPSK
k = log2(M); % Bits per symbol
n = 1e5; % Number of bits to process
EbNo = 0:2:14; % Eb/No range
berNoCoding = zeros(size(EbNo)); % BER results without coding
berWithRS = zeros(size(EbNo)); % BER results with RS coding

% Reed-Solomon parameters
nRS = 255; % Codeword length
kRS = 239; % Message length
rsEnc = comm.RSEncoder(nRS, kRS, 'BitInput', true);
rsDec = comm.RSDecoder(nRS, kRS, 'BitInput', true);

% Simulation loop for uncoded QPSK
for i = 1:length(EbNo)
    numBits = 0;
    numErrs = 0;
    while numBits < n
        % Generate random bits
        dataIn = randi([0 1], n, 1);

        % Modulate using QPSK
        txSig = qammod(dataIn, M, 'InputType', 'bit', 'UnitAveragePower', true);

        % Pass through AWGN channel
        rxSig = awgn(txSig, EbNo(i) + 10*log10(k), 'measured');

        % Demodulate
        dataOut = qamdemod(rxSig, M, 'OutputType', 'bit', 'UnitAveragePower', true);
```

```

    % Calculate BER
    [numErrsThisIteration, ~] = biterr(dataIn, dataOut);
    numErrs = numErrs + numErrsThisIteration;
    numBits = numBits + n;
end
berNoCoding(i) = numErrs / numBits;
end

% Simulation loop for QPSK with Reed-Solomon coding
for i = 1:length(EbNo)
    numBits = 0;
    numErrs = 0;
    while numBits < n
        % Generate random bits
        dataIn = randi([0 1], kRS*8, 1);

        % RS encode
        encodedData = rsEnc(dataIn);

        % Modulate using QPSK
        txSig = qammod(encodedData, M, 'InputType', 'bit', 'UnitAveragePower', true);

        % Pass through AWGN channel
        rxSig = awgn(txSig, EbNo(i) + 10*log10(k), 'measured');

        % Demodulate
        dataOut = qamdemod(rxSig, M, 'OutputType', 'bit', 'UnitAveragePower', true);

        % RS decode
        decodedData = rsDec(dataOut);

        % Calculate BER
        [numErrsThisIteration, ~] = biterr(dataIn, decodedData(1:length(dataIn)));
    end
end

```

```

    numErrs = numErrs + numErrsThisIteration;
    numBits = numBits + length(dataIn);
end
berWithRS(i) = numErrs / numBits;
end

% Plot results
semilogy(EbNo, berNoCoding, 'o-', 'DisplayName', 'Uncoded QPSK');
hold on;
semilogy(EbNo, berWithRS, 's-', 'DisplayName', 'QPSK with RS(239,255)');
grid on;
xlabel('Eb/No (dB)');
ylabel('Bit Error Rate');
title('BER vs. Eb/No for QPSK with and without Reed-Solomon Coding');
legend;
hold off;

% Interpolate to find the Eb/No value for BER = 10^-10
targetBER = 1e-10;

% Ensure the EbNo and BER values are unique and sorted for interpolation
[uniqueBerNoCoding, uniqueIdxNoCoding] = unique(berNoCoding);
uniqueEbNoNoCoding = EbNo(uniqueIdxNoCoding);

[uniqueBerWithRS, uniqueIdxWithRS] = unique(berWithRS);
uniqueEbNoWithRS = EbNo(uniqueIdxWithRS);

EbNoForTargetBER_NoCoding = interp1(uniqueBerNoCoding, uniqueEbNoNoCoding,
targetBER, 'linear', 'extrap');
EbNoForTargetBER_WithRS = interp1(uniqueBerWithRS, uniqueEbNoWithRS,
targetBER, 'linear', 'extrap');

fprintf('Eb/No required for BER of 10^-10 (Uncoded QPSK): %.2f dB\n',
EbNoForTargetBER_NoCoding);

```

```
fprintf('Eb/No required for BER of 10^-10 (QPSK with RS(239,255)): %.2f dB\n',  
EbNoForTargetBER_WithRS);
```



EK-2 Atmosferik Kayıp Hesaplamaları için MATLAB Kodları

```

maps = exist('maps.mat','file');
p836 = exist('p836.mat','file');
p837 = exist('p837.mat','file');
p840 = exist('p840.mat','file');
matFiles = [maps p836 p837 p840];
if ~all(matFiles)
    if ~exist('ITURDigitalMaps.tar.gz','file')
        url = 'https://www.mathworks.com/supportfiles/spc/P618/ITURDigitalMaps.tar.gz';
        websave('ITURDigitalMaps.tar.gz',url);
        untar('ITURDigitalMaps.tar.gz');
    else
        untar('ITURDigitalMaps.tar.gz');
    end
    addpath(cd);
end
cfg = p618Config;
cfg.Frequency = 19.49e9; % Signal frequency in Hz
cfg.ElevationAngle = 45;
cfg.Latitude = 39.92; % North direction
cfg.Longitude = 32.86; % East direction
cfg.TotalAnnualExceedance = 0.001; % Time percentage of excess for the total
% Attenuation per annum

cfg.AntennaEfficiency = 0.65;
disp(cfg);

[pl,xpd,tsky] = p618PropagationLosses(cfg, ...
    'StationHeight',7.5, ...
    'WaterVaporDensity',2.8, ...
    'TotalColumnarContent',1.4, ...
    'RainRate',42.0)

```

YAYINLAR

Microstrip Patch Antenna System Design for In-Cabin Wireless Communications and Internet Services
Microstrip Patch Antenna System Design for In-Cabin Wireless Communications and Internet Services
ISRES Publishing · 29 Ara 2021

Kabin İçi 4G (LTE) Ve Wifi Kablosuz Haberleşme Sistemlerinde Kullanılmak Üzere Mikroşerit Anten Tasarımı
Kabin İçi 4g (lte) Ve Wifi Kablosuz Haberleşme Sistemlerinde Kullanılmak Üzere Mikroşerit Anten Tasarımı
Aerospace Research Letters (ASREL) · 30 Haz 2023

