

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KA BANT ÖN UÇ TASARIMI**

**Harun MECİDOĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Haberleşme Programı

Danışman  
Doç. Dr. Hamid TORPİ

Ocak, 2020

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KA BANT ÖN UÇ TASARIMI**

Harun MECİDOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 09.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hamid TORPİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Hamid TORPİ, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Mesut Kartal, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Danışmanım Doç. Dr. Hamid TORPİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Ka Bant Ön Uç Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Harun MECİDOĞLU

İmza

## TEŞEKKÜR

---

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, günümüzde uydu haberleşmesi ve uydu TV yayınları için kullanılan K/Ka (18-27 GHz/26.5-40 GHz) bantlarında RF ön uç (RF front-end) tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır. RF ön uç TÜRKSAT 4B uydusu ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem; sinyali toplamak için ofset çanak (offset dish), çanağın odağında besleme için huni anten (horn), yatay ve dikey polarizasyon için dik mod ayrıştırıcı (OMT) ve vericiden gönderilen dik polarizasyondaki kuvvetli sinyalin yatay polarizasyonda çalışan alıcı kısmını etkilememesi için iletim bandını reddeden filtre (transmit reject filter) elemanları kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımda mikrodalga frekanslarında çalışıldığı ve yüksek güç gönderme gereksinimi için dalga kılavuzu yapısı kullanılmıştır.

Bitirme çalışmamda yardımlarını esirgemeyen, zorlandığım kısımlarda yeni yollar gösteren, dar vakitlerinde dahi sorunlarıma çözüm bulmaya çalışan değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Hamid TORPİ'ye emeklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca simülasyon, tasarım ve gerçekleştirilmede desteklerini esirgemeyen, dar vakitlerinde dahi olsa sorularıma çözüm bulmaya çalışan Prof. Dr. Filiz GÜNEŞ, Dr. Peyman Mahouti, Tahir DURMUŞOĞLU ve Mehmet Akif TULUM'a emeklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimin bu konu üzerinde çalışacak araştırmacılara faydalı olması dileğiyle.

Harun MECİDOĞLU

# İÇİNDEKİLER

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b>	<b>xv</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Giriş</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.1.1 Antenler.....	1
1.1.2 Dalga Kılavuzu.....	1
1.1.3 Filtre.....	2
1.1.4 Dik Mod Ayrıştırıcı (OMT).....	2
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	4
<b>2 Antenler</b>	<b>5</b>
2.1 İzotropik Antenler.....	6
2.2 Çok Yönlü Antenler (Omnidirectional Antennas).....	6
2.3 Monopol Antenler (Monopole Antennas).....	6
2.4 Yönlü Antenler (Directional Antennas).....	6
2.4.1 Ofset Antenler.....	7
<b>3 Dalga Kılavuzları</b>	<b>9</b>
3.1 Dalga Kılavuzu Avantajları.....	10
3.2 Dalga Kılavuzu Dezavantajları.....	10
3.3 Dalga Kılavuzu Çeşitleri.....	11
3.3.1 Dairesel Dalga Kılavuzu.....	11
3.3.2 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu.....	13

3.4	Dalga Kılavuzu Modları.....	16
3.4.1	TE Modu.....	17
3.4.2	TM Modu .....	18
3.4.3	TEM Modu.....	18
3.5	Elektromanyetik Dalgalarda Polarizasyon Türleri .....	18
3.5.1	Lineer (Doğrusal) Polarizasyon .....	19
3.5.2	Dairesel Polarizasyon.....	19
<b>4</b>	<b>Filtreler</b>	<b>21</b>
4.1	Haberleşme Sistemlerinde Kullanım Amacı .....	22
4.2	Filtre Karakteristikleri .....	22
4.2.1	Alçak Geçiren Filtre Karakteristikleri .....	22
4.2.2	Yüksek Geçiren Filtre Karakteristikleri.....	23
4.2.3	Bant Geçiren Filtre Karakteristikleri.....	23
<b>5</b>	<b>Devre Parametreleri</b>	<b>25</b>
5.1	Saçılma Parametreleri (S-Parametreleri).....	25
<b>6</b>	<b>Ka Bant</b>	<b>27</b>
6.1	Ka Bant Avantajları.....	27
6.2	Ka Bant Dezavantajları.....	28
<b>7</b>	<b>Ön Uç Anten Tasarımı</b>	<b>29</b>
7.1	OMT (Dik Mod Ayırıştırıcı) Tasarımı.....	30
7.1.1	OMT Tasarımında İzlenen Yol.....	31
7.1.2	OMT Simülasyon Sonuçları .....	35
7.2	Huni (Horn) Tasarımı.....	39
7.2.1	Huni (Horn) Tasarımında İzlenen Yol .....	39
7.2.2	Huni (Horn) Simülasyon Sonuçları .....	40
7.3	Filtre Tasarımı.....	42
7.3.1	Filtre Tasarımında İzlenen Yol .....	42
7.3.2	Filtre Simülasyon Sonuçları .....	44
7.4	Dirsek (Bend) Tasarımı .....	46
7.4.1	Dirsek (Bend) Tasarımında İzlenen Yol.....	46
7.4.2	Dirsek (Bend) Simülasyon Sonuçları.....	46
7.5	Çanak (Dish) Tasarımı.....	47
7.5.1	Çanak (Dish) Tasarımında İzlenen Yol .....	48

7.6 Ön Uç Tasarımı.....	51
7.6.1 Ön Uç Tasarımında İzlenen Yol .....	51
7.6.2 Ön Uç Simülasyon Sonuçları .....	53
7.6.3 Ön Uç Gerçekleme ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	65
<b>8 Sonuç ve Öneriler</b>	<b>74</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>76</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>78</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

G	Antenna gain (Anten kazancı)
f	Taşıyıcı frekans
c	Işık hızı
$\lambda$	Taşıyıcı dalga boyu
$\eta$	Açıklık verimi (Aperture efficiency)
$\delta$	Deri kalınlığı
f <sub>c</sub>	Kesim frekansı
$\beta$	Propagasyon sabiti
c	Işık hızı
F	Odak noktası
D	Antenna Diameter (Anten Çapı)
$\alpha$	Zayıflama sabiti
$\theta$	Elektriksel uzunluk
f <sub>L</sub>	Alt kesim frekansı
f <sub>H</sub>	Üst kesim frekansı
$\epsilon_r$	Bağıl dielektrik katsayısı
LA	Insertion loss (Geçiş kaybı)
LR	Return loss (Dönüş kaybı)
S <sub>11</sub>	Uygun çıkış sonlandırma ile giriş yansımaya katsayısı
S <sub>12</sub>	Uygun giriş sonlandırma ile ters iletim katsayısı
S <sub>21</sub>	Uygun çıkış sonlandırma ile ileri iletim katsayısı
S <sub>22</sub>	Uygun giriş sonlandırma ile çıkış yansımaya katsayısı
V	Volt
Z <sub>0</sub>	Çıkış direnci
[S]	Saçınım matrisi
a <sub>1</sub>	Port 1'e giren dalga
a <sub>2</sub>	Port 1'den yansıyan dalga



b1	Port 2'e giren dalga
b2	Port 2'den yansıyan dalga
Tx	İletim portu
Rx	Alıcı portu
$\Omega$	Direnç (Ohm)
t	Çanağın büküm oranı



## KISALTIMA LİSTESİ

---

AM	Amplitude Modulation (Genlik Modülasyonu)
C	Capacitor (Kapasitör)
CST	Computer Simulation Technology (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi)
E	Electric Field (Elektrik Alan)
FM	Frequency Modulation (Frekans Modülasyonu)
GSM	Global System for Mobile Communications (Mobil İletişim İçin Küresel Sistem)
H	Magnetic Field (Manyetik Alan)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telegraph Union
L	Inductor (Bobin)
LHCP	Left Hand Circular Polarization (Sol El Dairesel Polarizasyon)
MATLAB	Matrix Laboratory (Matriks Laboratuvarı)
MBA	Multi Beam Antennas (Çok Demetli Antenler)
OMT	Orthomode Transducer (Dik Mod Ayrıştırıcı)
R	Resistor (Direnc)
RF	Radio Frequency (Radyo Frekansı)
RHCP	Right Hand Circular Polarization (Sağ El Dairesel Polarizasyon)
SLI	Side Lob Level (Yan Kulak Seviyesi)
TE	Transverse Electric (Enine Elektrik)
TM	Transverse Magnetic (Enine Manyetik)
VSAT	Very Small Aperture Terminal

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1 Antenin ışıma modeli yapısı.....	4
Şekil 2. 1 Uydu haberleşmesi için kullanılan çanak anten görünüm .....	5
Şekil 2. 2 Parabolik reflektör .....	7
Şekil 2. 3 Ofset anten yapısı .....	8
Şekil 3. 1 Dairesel dalga kılavuzu .....	12
Şekil 3. 2 Dikdörtgen dalga kılavuzu .....	14
Şekil 3. 3 Dalga kılavuzunda elektrik alan yönleri .....	17
Şekil 3. 4 Lineer polarizasyon türleri.....	19
Şekil 3. 5 Dairesel polarizasyon .....	20
Şekil 4. 1 Haberleşme sinyal çeşitleri.....	22
Şekil 4. 2 Alçak geçiren filtre karakteristikleri a) ideal filtre b) pratik filtre .....	23
Şekil 4. 3 Yüksek geçiren filtre karakteristikleri a) ideal filtre b) pratik filtre .....	23
Şekil 4. 4 Bant geçiren filtre karakteristikleri a) ideal filtre b) pratik filtre.....	24
Şekil 5. 1 Giren ve yansıyan dalgaların gösterimi .....	25
Şekil 6. 1 Elektromanyetik spektrum cetveli .....	27
Şekil 7. 1 Ön uç anten yapısı .....	29
Şekil 7. 2 OMT 3D tasarım dış yapısı .....	32
Şekil 7. 3 OMT 3D tasarım iç yapısı.....	32
Şekil 7. 4 Dikdörtgensel dalga kılavuzu kesiti .....	33
Şekil 7. 5 Dairesel dalga kılavuzu kesiti .....	33
Şekil 7. 6 Kuplaj yapıları.....	34
Şekil 7. 7 OMT alıcı kısım (Rx) kuplajı .....	35
Şekil 7. 8 $S_{11}$ birinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması.....	35
Şekil 7. 9 $S_{31}$ 'in 29.75 GHz'de 3D gösterimi .....	36
Şekil 7. 10 $S_{21}$ çapraz izolasyon grafiği .....	36
Şekil 7. 11 $S_{22}$ ikinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması.....	37
Şekil 7. 12 $S_{32}$ 'nin 19.95 GHz'de 3D gösterimi.....	37
Şekil 7. 13 $S_{12}$ çapraz izolasyon grafiği .....	38

<b>Şekil 7. 14</b>	$S_{31}$ birinci kapıdan gönderilen sinyalin üçüncü kapıya iletimi.....	38
<b>Şekil 7. 15</b>	$S_{32}$ ikinci kapıdan gönderilen sinyalin üçüncü kapıya iletimi.....	39
<b>Şekil 7. 16</b>	Huni anten 3D yapısı arka kısım.....	40
<b>Şekil 7. 17</b>	Huni anten 3D yapısı ön kısım.....	40
<b>Şekil 7. 18</b>	Huni $S_{11}$ geri yansıma grafiği.....	41
<b>Şekil 7. 19</b>	Huni 29.75 GHz'deki uzak alan grafiği.....	41
<b>Şekil 7. 20</b>	Huni 29.75 GHz'deki 3D uzak alan gösterimi .....	41
<b>Şekil 7. 21</b>	Huni 19.95 GHz'deki uzak alan grafiği.....	42
<b>Şekil 7. 22</b>	Huni 19.95 GHz'deki 3D uzak alan gösterimi .....	42
<b>Şekil 7. 23</b>	Kuplaj yapıları.....	43
<b>Şekil 7. 24</b>	K bant filtrenin 3D yapısı.....	44
<b>Şekil 7. 25</b>	K bant filtrenin 3D iç yapısı .....	44
<b>Şekil 7. 26</b>	$S_{11}$ K bant filtrenin yansıma grafiği.....	44
<b>Şekil 7. 27</b>	Filtrede 19.95 GHz'deki sinyalin iletimi.....	45
<b>Şekil 7. 28</b>	$S_{12}$ K bant filtrenin iletim grafiği .....	45
<b>Şekil 7. 29</b>	Filtrede 29.75 GHz'deki sinyalin iletimi.....	45
<b>Şekil 7. 30</b>	K bant dirsek 3D yapısı.....	46
<b>Şekil 7. 31</b>	K bant dirsek 3D iç yapısı .....	46
<b>Şekil 7. 32</b>	$S_{11}$ K bant dirseğin yansıma grafiği.....	47
<b>Şekil 7. 33</b>	$S_{12}$ K bant dirseğin iletim grafiği .....	47
<b>Şekil 7. 34</b>	Dirsekte 19.95 GHz'deki sinyalin iletimi .....	47
<b>Şekil 7. 35</b>	Parabol yapısı.....	50
<b>Şekil 7. 36</b>	Parabolden elde edilen çanak kesiti gösterimi .....	50
<b>Şekil 7. 37</b>	CST programında tasarlanan reflektör .....	51
<b>Şekil 7. 38</b>	Elemanların CST programında birleştirilmesi .....	52
<b>Şekil 7. 39</b>	Ön uç besleme önden görünümü.....	52
<b>Şekil 7. 40</b>	Ön uç besleme arkadan görünümü.....	52
<b>Şekil 7. 41</b>	Ön uç anten önden görünümü .....	53
<b>Şekil 7. 42</b>	Ön uç anten yandan görünümü .....	53
<b>Şekil 7. 43</b>	$S_{11}$ birinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması.....	53
<b>Şekil 7. 44</b>	$S_{21}$ çapraz izolasyon grafiği .....	54
<b>Şekil 7. 45</b>	$S_{22}$ ikinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması.....	54
<b>Şekil 7. 46</b>	$S_{12}$ çapraz izolasyon grafiği .....	55
<b>Şekil 7. 47</b>	19.95 GHz'deki uzak alan grafiği .....	55
<b>Şekil 7. 48</b>	19.95 GHz'deki uzak alan 3D simülasyon sonucu.....	56

<b>Şekil 7. 49</b>	19.95 GHz'deki maske uyum grafiği.....	56
<b>Şekil 7. 50</b>	19.95 GHz'deki co-pol ve cross-pol grafiği .....	56
<b>Şekil 7. 51</b>	19.95 GHz'deki cross-pol 3D grafiği.....	57
<b>Şekil 7. 52</b>	19.95 GHz'deki ışım grafiği.....	57
<b>Şekil 7. 53</b>	26 GHz'deki uzak alan grafiği.....	58
<b>Şekil 7. 54</b>	29.5 GHz'deki uzak alan grafiği .....	58
<b>Şekil 7. 55</b>	29.625 GHz'deki uzak alan grafiği.....	58
<b>Şekil 7. 56</b>	29.75 GHz'deki uzak alan grafiği .....	59
<b>Şekil 7. 57</b>	29.75 GHz'deki uzak alan 3D simülasyon sonucu.....	59
<b>Şekil 7. 58</b>	29.75 GHz'deki maske uyum grafiği.....	59
<b>Şekil 7. 59</b>	29.75 GHz'deki co-pol ve cross-pol grafiği .....	60
<b>Şekil 7. 60</b>	29.75 GHz'deki cross-pol 3D grafiği.....	60
<b>Şekil 7. 61</b>	29.75 GHz'deki ışım grafiği.....	61
<b>Şekil 7. 62</b>	29.875 GHz'deki uzak alan grafiği.....	61
<b>Şekil 7. 63</b>	29.95 GHz'deki uzak alan grafiği .....	62
<b>Şekil 7. 64</b>	30 GHz'deki uzak alan grafiği.....	62
<b>Şekil 7. 65</b>	32 GHz'deki uzak alan grafiği.....	63
<b>Şekil 7. 66</b>	t=0.4 iken oluşan uzak alan grafiği .....	63
<b>Şekil 7. 67</b>	t=0.7 iken oluşan uzak alan grafiği .....	64
<b>Şekil 7. 68</b>	t=1 iken oluşan uzak alan grafiği.....	64
<b>Şekil 7. 69</b>	t=1.2 iken oluşan uzak alan grafiği .....	64
<b>Şekil 7. 70</b>	t=1.5 iken oluşan uzak alan grafiği .....	64
<b>Şekil 7. 71</b>	t=2 iken oluşan uzak alan grafiği.....	65
<b>Şekil 7. 72</b>	Üretimde kullanılan 3D yazıcı.....	66
<b>Şekil 7. 73</b>	3D yazıcıda üretilmiş huni anten.....	66
<b>Şekil 7. 74</b>	3D yazıcıda üretilen huni anten ve OMT.....	67
<b>Şekil 7. 75</b>	İletken spreyle boyanmış parçalar .....	67
<b>Şekil 7. 76</b>	3D yazıcı ve alüminyum ile üretilen parçaların testi.....	68
<b>Şekil 7. 77</b>	3D yazıcı ve alüminyum ile üretilmiş dirsek ve filtre .....	68
<b>Şekil 7. 78</b>	3D yazıcı ile üretilen dirsek ve filtrenin iletim grafiği.....	69
<b>Şekil 7. 79</b>	Alüminyum malzeme ve simülasyonda elde edilen dirsek ve filtre iletim grafiği karşılaştırması.....	69
<b>Şekil 7. 80</b>	Alüminyum ile üretilmiş dirsek ve filtrenin yansıma grafiği.....	70
<b>Şekil 7. 81</b>	Kuplaj kısmı değiştirilmiş OMT .....	71
<b>Şekil 7. 82</b>	OMT elemanı iletim portunun yansıma grafikleri .....	71

<b>Şekil 7. 83</b> Ön uç alım portu yansıma grafikleri karşılaştırması .....	72
<b>Şekil 7. 84</b> Ön uç iletim portu yansıma grafikleri karşılaştırması .....	72



## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
<b>Çizelge 3. 1</b> $pn, m$ parametrik değerleri.....	11
<b>Çizelge 3. 2</b> Dairesel kılavuz TE ve TM mod parametre hesapları.....	12
<b>Çizelge 3. 3</b> Dikdörtgen kılavuz TE ve TM mod parametre hesapları .....	15
<b>Çizelge 7. 1</b> Tasarım parametreleri.....	30
<b>Çizelge 7. 2</b> Bükümün kazanç ve yan kulak seviyesine etkisi.....	65
<b>Çizelge 8. 1</b> Sonuçların karşılaştırılması.....	74
<b>Çizelge 8. 2</b> Simülasyon ve üretilen ürünlerin kıyaslaması.....	75

## KA BANT ÖN UÇ TASARIMI

Harun MECİDOĞLU

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hamid TORPİ

Bu tez çalışmasında, günümüzde uydu haberleşmesi ve uydu TV yayınları için kullanılan K/Ka (18-27 GHz/26.5-40 GHz) bantlarında RF ön uç (RF front-end) tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır [1]. Bu çalışmada dikey polarizasyonda sinyali iletme, yatay polarizasyonda sinyali alma gerçekleştirilmiştir. Tasarım TÜRSAT 4B uydusu ile uyumlu olacak şekilde ayarlanmıştır [2]. Sistem; sinyali toplamak için yüksek kazanç ve düşük yan kulak seviyesi (SLL-side lobe level) sağlayan ofset çanak (offset dish), çanağın odağında besleme için RHCP (Right Hand Circular Polarization) ve LHCP (Left Hand Circular Polarization) polarizasyonlarına uyumlu dairesel huni anten (horn), yatay ve dikey polarizasyon için dik mod ayrıştırıcı (OMT) ve vericiden gönderilen dik polarizasyondaki kuvvetli sinyalin yatay polarizasyonda çalışan alıcı kısmını etkilememesi için iletim bandını reddeden filtre (transmit reject filter) elemanları kullanılarak tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarımda ve gerçeklemede mikrodalga frekanslarında çalışıldığı ve yüksek güç gönderme gereksinimi için dalga kılavuzu yapısı kullanılmıştır.

Tasarımda öncelikle OMT (Orthomode Transducer) elemanı, empedans uyumu göz önüne alınarak, iletim (transmit) bandı Ka (29.5 GHz–30 GHz) ve alıcı (receive) bandı K (19.7 GHz–20.2 GHz) aralıklarında çalışacak şekilde ayarlanmıştır [3].



Sonrasında bu çalışma aralıklarına uygun olacak şekilde horn tasarımı yapılmıştır. Alıcı kısmında vericideki kuvvetli sinyalden kaynaklanabilecek etkileşimleri engellemek için iletim bandını reddeden filtre (transmit reject filter) tasarımı yapılmıştır. Son olarak ofset çanağın (offset dish) konumu ve açısı hesaplanmış ve besleme elemanları çanağın odağına yerleştirilmiştir.

Simülasyon, optimizasyon ve hesaplamalar için AWR Microwave Office, CST (Computer Simulation Technology) ve MATLAB (Matrix Laboratory) programları kullanılmıştır.

Gerçeklemede iki farklı malzeme kullanılmıştır. İlk olarak 3D yazıcı ile plastik olarak üretim yapıp içi iletken spreyle (RS 247-4251 Silver coated copper screening compound) ile boyanmış ve test sonuçları elde edilmiştir [4]. İkinci olarak alüminyum malzeme ile üretim gerçekleştirilip test sonuçları elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İletim bandını reddeden filtre, dalga kılavuzu, Ka bant, horn anten, OMT (dik mod ayrıştırıcı)

# KA BAND RF FRONT-END DESIGN

Harun MECİDOĞLU

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Hamid TORPİ

In this thesis, the RF front-end is designed and built up at K/Ka (18-27 GHz/26.5-40 GHz) bands used for satellite communication and satellite TV [1]. In this study, vertical polarized signal transmission and horizontal polarized signal reception were performed. The design and realization are set to be compatible with TURKSAT 4B [2]. RF front end is consist of an offset dish providing high gain and low side lobe level (SLL) for collecting the signal, a circular horn antenna which is compatible with RHCP (Right Hand Circular Polarization) and LHCP (Left Hand Circular Polarization) polarizations at the focal point of the dish, to separate dual polarization an orthomode transducer (OMT) and a transmit reject filter to prevent the receiver from the strong signal generated at the transmitter side (cross-pol). ). In the design and realization, waveguide structures are used to work in microwave frequencies and for high power delivery requirements.

In the design, firstly the OMT element is set to operate taking impedance matching into account at transmission band Ka (29.5 GHz-30 GHz) and receiver band K (19.7 GHz-20.2 GHz) [3]. Afterwards, the horn was designed to fit these working intervals. The transmit reject filter is designed to prevent interference of the strong signal on

the transmitter side to the receiver side. Finally, the offset dish's position and angle are calculated, and the feeding elements are placed in the center of the dish.

AWR Microwave Office, Computer Simulation Technology (CST) and MATLAB (Matrix Laboratory) programs are used for simulation, optimization and calculations.

Two different materials were used in the implementation. Firstly, plastic production was made with 3D printer and painted with conductive spray (RS 247-4251 Silver coated copper screening compound) and test results were obtained [4]. Secondly, production with aluminum material was performed and the test results were obtained and the results were compared.

**Keywords:** Transmit reject filter, waveguide, Ka band, horn, OMT (orthomode transducer)

### 1.1 Literatür Özeti

#### 1.1.1 Antenler

Antenler, serbest uzayda yayılan elektromanyetik dalgaları toplayarak dalga kılavuzu vb. iletim hatlarına uyumlu geçişini geri yansımayı minimize edecek şekilde sağlayan (alıcı anten) veya tersten aynı amaçla iletim hatlarından gelen elektrik sinyallerinin yine mümkün olduğu kadar geri yansımadan ortama dalga olarak yayılmasını sağlayan (verici anten) cihazlardır. Antenler verileri yaydıkları dalgalar ile çok uzaklara ulaştırabilirler. Dalga boyu antenlerde boyutlanma ve şekillenmeyi sağlar ve antenle dalga boyuna göre adlandırılırlar. GSM, wireless, radyo ve TV yayınları, kablosuz anons sistemleri, telsizler, radarlar, bluetooth cihazları gibi uzun ya da kısa mesafe erişimli tüm sistemler birer anten sistemine sahiptir [4].

Antenlerin sinyal alma ve sinyal gönderme özellikleri aynıdır. Buna antenlerin karşılıklılık (reciprocity) özelliği denir. Aynı anten uydular arası iletişimde sinyal alma ve sinyal göndermede kullanılabilir. Antenler verici devrelerde, sistem içerisinde üretilen akımın elektromanyetik dalgalara dönüşerek havaya aktarılmasını sağlamaktadır. Alıcı tarafta ise havadan gelen elektromanyetik dalgaları elektriksel işaretlere (akım, gerilim) dönüştürür.

#### 1.1.2 Dalga Kılavuzu

Elektromanyetik enerjiyi en iyi taşıya bilecek yapılardan birisi de dalga kılavuzlarıdır [5]. Koaksiyel kablolar düşük frekanslarda kullanılabilir. 3 GHz-300 GHz frekansları arasında elektromanyetik dalgaların iletiminde dalga kılavuzu

kullanılır. Kesim frekanslarının üstündeki dalgaları taşıyabildiği için yüksek geçiren filtre karakteristiği gösterirler. Dalga kılavuzunda herhangi bir modun (çözümün) iletilebilmesi için ilgili modun çalışma frekansının, eşik kesim frekansı ( $f_c$ 'den) büyük olması gerekir [6]. Kılavuzunda ilerleyen sinyalin modları iki grupta incelenebilir. Bunlar yatay manyetik (TM) ve yatay elektrik (TE) modlarıdır. TE modunda kılavuz eksen (yayıma doğrultusu) doğrultusunda manyetik alanın bileşeni var, elektrik alanın bileşeni yoktur ( $E_z=0$  ve  $H_z \neq 0$ ). TM modunda ise kılavuz eksen doğrultusunda elektrik alan bileşeni var, manyetik alan bileşeni yoktur ( $H_z=0$  ve  $E_z \neq 0$ ).

Kılavuzun analizinde; kılavuz kesitinin düzgün, duvarların mükemmel iletken ve z yönünde (dalga ilerleme yönü) dikdörtgen dalga kılavuzunun sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilmiştir.  $TM_{m,n}$  ve  $TE_{m,n}$  modunun z yönündeki alan bileşenlerini elde etmek için kılavuz duvarlarında elektrik alanın teğetsel bileşeni sıfıra eşitlenerek dalga denklemlerinin çözülmesi gerekir [7].

### 1.1.3 Filtre

Filtreler elektrik devrelerinde çok kullanışlı yapılar olan analog devrelerdir. Elektriksel işaretlerin frekans spektrumlarına model vermek amacıyla kullanılan devreler filtrelerdir. Filtreler pasif R, L, C elemanlarıyla gerçekleştirilebildiği gibi aktif elemanlarla (opamp, transistör vs.) birlikte sadece L veya C elemanları kullanılarak veya bunların her üçünü birden kullanılarak da gerçekleştirilebilirler.

Elektronik ve haberleşme sistemlerinde çok geniş bir uygulama alanına sahiptirler. İstenilen frekansın iletilmesi diğer frekansların iletilmemesi amacıyla kullanılırlar. Bant geçiren, alçak geçiren, bant söndüren, yüksek geçiren şeklinde isimlendirilen filtreler mevcuttur. Önemli filtre parametreleri olarak kalite faktörü, kesim frekansı, geçirme bandı kazancı karşımıza çıkar [8].

### 1.1.4 Dik Mod Ayırıştırıcı (OMT)

Kullanıcı sayısı artması ile frekansa olan ihtiyaç artmış, buda frekansın tekrar kullanımı (frequency reuse) fikrini ortaya çıkarmıştır. Polarizasyon farklılığı kullanılarak aynı frekansta iki sinyal polarizasyonları farklı olacak şekilde iletebilir. Frekans bandının en verimli şekilde kullanımıyla iletilen veya gelen

birbirine dik olan (orthogonal) sinyaller, özel yapılarla ayrıştırılırlar. Mikrodalga haberleşmede frekansı ve polarizasyonu ayıran yapılara dik mod ayrıştırıcı (OMT-orthomode transducer) denir. Pasif bileşen olan dik mod ayrıştırıcılar polarizasyona bağlı olarak sinyalleri eş zamanlı olarak iletilebilir ve alabilirler. Yalıtımı iyi olan ve geri dönüş kaybı (return loss) düşük olan bu cihazla tek antende sinyalin iletmesine ve alınmasına imkân sağlar [9].

## 1.2 Tezin Amacı

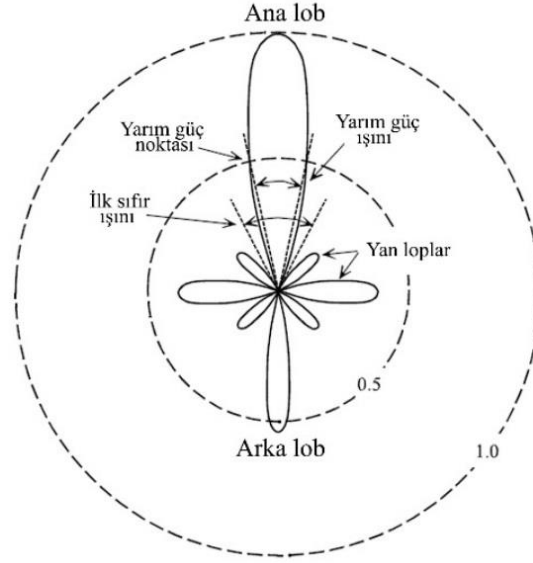
Durağan bir uydu ile mobil terminal arasındaki iletişim sistemindeki bant genişliği ve güç kısıtlamaları çok ağırdır. Durağan bir uydu üzerinde ofset parabolik reflektör antenleri baskın anten tipidir. Bunun sebebi reflektörün durağan bir uydudan Dünya'ya bağlantısında kritik olan yüksek kazanç ve düşük yan kulak (SLL) seviyesidir (Şekil 1.1).

Geniş bant hizmetleri, hızlı internet, video konferans, video telephony, uzaktan eğitim ve tele tıp gibi hizmetlere ilgi giderek artmaktadır. Intelsat, Eutelsat, çok sayıda kamu kurumu ve özel operatörler uydu üzerinden çoklu ortam sağlamak için direkt projeler uyguluyorlar [10] [11].

Son zamanlarda belirgin iletişim ağı trendleri, sistem entegrasyonu ve abonelere daha yüksek kaliteli servisler sağlayabilmektir. Türksat Net, Türksat 4B haberleşme uydusu Ka bandında çalışır ve uydudan internet erişimine imkân sağlar. Türkiye, Ortadoğu, Avrupa, Orta ve Güneybatı Asya'yı kapsayan bölgelere hizmet sunan Türksat Net ile kullanıcılar, karasal altyapının ulaşamadığı her yerde kurulumu kolay, hızlı, kesintisiz ve ekonomik internete kavuşabilecekler [12].

Türksat Net, merkez (VSAT Gateway) ile uç birimlerin (VSAT terminalleri) Ka bant aracılığıyla internet erişimi sağlarken, farklı kapsama alanlarında aynı frekansların tekrar kullanılmasıyla (frequency reuse) yüksek veri hızlarına ulaşılabilecektir [13].

Geostasyoner uydular uzayda dizilimi  $2^\circ$  açılar ile yapılmıştır.  $2^\circ$  daha düşük açılar ile yerleştirilecek uydular polarizasyon farklılığını göz önünde bulundurarak yerleşimi yapılmalıdır. Teorik olarak uzayda iki uydu arası mesafe  $0.1^\circ$  yani 70 km'dir.



**Şekil 1. 1** Antenin ışınma modeli yapısı

Tez çalışmasında bu gelişmeleri göz önünde bulundurarak Ka bandında piyasada bulunan antenlere kıyasla, cross-pol (çapraz polarizasyon) girişimi düşük (-25 dB'nin altında) olacak şekilde ve kazancı yüksek (40 dB'nin üstünde) olacak şekilde, yan lob seviyesi düşük, anten kazancı yüksek ve açılal genişliği 2° den az olacak şekilde, 3D yazıcı kullanarak test amaçlı ekonomik fiyatlarda üretim gerçekleştirmek, seri üretim öncesi tamamen metalik olarak üretilmesi durumunda elde edilebilecek sonuçlara neredeyse birebir uyumlu ve sadece yüksek güç uygulanamayan ön uç anten tasarımı yapılmaya çalışılmıştır.

### 1.3 Hipotez

Tez çalışması kapsamında Ka bandında yerli (milli) üretim, piyasada bulunan antenlere göre cross-pol (çapraz polarizasyon) girişimi düşük (-25 dB'nin altında) olacak şekilde, kazancı yüksek (40 dB'nin üstünde) olacak şekilde, 3D yazıcı seri üretim öncesi prototip RF ön uç tasarımında kolaylık sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla OMT tasarımı yaparken dalga kılavuzları arası geçişler (kuplajlar) empedans uyumu göz önünde bulundurularak daha yumuşak hale getirilecek, cross-pol izolasyonunun ve iletimin daha iyi sonuç vermesi sağlanacaktır. Tasarlanan elemanlar 3D yazıcı ile üretilip maliyet azaltılacaktır.

## 2 Antenler

---

Antenler, serbest uzayda yayılan elektromanyetik dalgaları toplayarak dalga kılavuzu vb. iletim hatlarına uyumlu geçişini geri yansımayı minimize edecek şekilde sağlayan (alıcı anten) veya tersten aynı amaçla iletim hatlarından gelen elektrik sinyallerinin yine mümkün olduğu kadar geri yansımadan ortama dalga olarak yayılmasını sağlayan (verici anten) cihazlardır. Antenler verileri yaydıkları dalgalar ile çok uzaklara ulaştırabilirler. Antenlerin sinyal alma ve sinyal gönderme özellikleri aynıdır. Buna antenlerin karşılıklılık (reciprocity) özelliği denir. Aynı anten uydular arası haberleşmede sinyal alma ve sinyal göndermede kullanılabilir.

Genellikle anten alıcı ve verici elemanlardan oluşur. Antenden gönderilen sinyalde cihazdaki elektronlar sınırlandırılarak elektrik alan ve manyetik alan oluştururlar. Oluşan dalgalar uzaya ya da ortama elektromanyetik dalga olarak yayılırlar. Antene gelen elektromanyetik dalga ise anten üzerinde bulunan elektronların hareketine sebep olarak bir titreşim meydana getirir. Bu sebeple antenin içinde elektronlar hareket eder ve anten içinde akım meydana gelir [14].



**Şekil 2. 1** Uydu haberleşmesi için kullanılan çanak anten görünüm



## 2.1 İzotropik Antenler

Uzayda veya ortamda eşit güçte, her yöne elektromanyetik dalga yayan kaynaktır ve anten kazançlarının anlaşılmasında referans olarak kullanılır [14].

## 2.2 Çok Yönlü Antenler (Omnidirectional Antennas)

Her yönden dalga almak ya da yaymak veya zayıf ya da güçlü her türlü sinyali alabilen yönlü anten türleridir. Konumu bilinmeyen, keyfi sinyaller için kullanılır [14].

## 2.3 Monopol Antenler (Monopole Antennas)

İletken plaka ile elektriksel plaka birbirine temas ettirilmeden, toprak levhası adı verilen bir iletken plaka üzerine, genellikle dik olarak yerleştirilen çeyrek dalga boyunda ( $\lambda/4$ ) düz metal çubuktan oluşur. Çeyrek-dalga anteni (quarter wave antenna) ya da morkoni anteni (Marconi antenna; 1895'de Guglielmo Marconi tarafından üretilmiştir) olarak da bilinmektedir.

Maksimum dalga yayma ya da almayı, anten çubuğu uzunluğunun  $\lambda/4$ 'e eşit olması durumunda ve  $\lambda/4$ 'ün tamsayı katlarında rezonans hale gelerek yaparlar. Rezonansta antenin empedansı (öz direnci) sadece dirençten oluşur ( $36,8\Omega$ ) ve sanal sayılar içermez. Monopol antenin empedansı, anten çubuğunun boyu  $\lambda/4$ 'ün altına düşürüldüğünde kapasitif,  $\lambda/4$ 'ün üstüne çıkarıldığında da endüktif olur [14].

## 2.4 Yönlü Antenler (Directional Antennas)

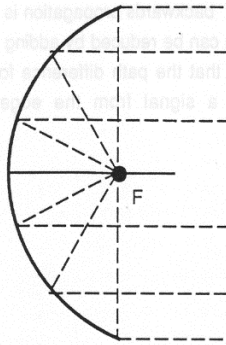
Hüzme (demet) antenler (beam antennas) olarak da isimlendirilirler. Bu antenler çok güçlü ışınım yapabilir ve sinyalleri çok iyi alabilirler. Yönlendirildiği yerde kazanç en fazladır, yönelim olmayan yerde kazanç çok düşüktür. Bu sayede istenmeyen sinyaller engellenmiş olunur.

Yönlü antenler arasında en bilineni parabolik yansıtıcı antenler (parabolic reflector antennas) olup uzay araştırmalarında, karasal yayınlarda ve birçok alanda kullanılır. Parabol, bir düzlemde alınan sabit bir 'd' doğrusu ile sabit bir 'F'

noktasından eşit uzaklıktaki noktaların birleşimidir. Bu sabit noktaya odak (focus), doğruya (directrix) denir (Şekil 2.2).

Paraboloid, parabolün ekseninde dönmesi sonucu oluşan yüzeydir. Paraboloidin x eksenine dik kesiti daire şeklindedir. Buna anten açıklığı (antenna clarity) denir.

Parabolik reflektörlü anteni besleme yöntemleri; eksenden ya da önden besleme (axial or front feed), eksen dışı ya da ofset besleme (off axis or offset feed), cassegrain besleme (cassegrain feed), gregorian besleme (gregorian feed) dir [14].



Şekil 2. 2 Parabolik reflektör

Parabolik reflektör (çanak) tasarımı maksimum kazanç, minimum yan kulak seviyesi ve küçük besleme olanağı sağlar.

$$G_a(dB_i) = 10\log_{10} \eta \left[ \frac{4\pi A_a}{\lambda^2} \right] \quad (2.1)$$

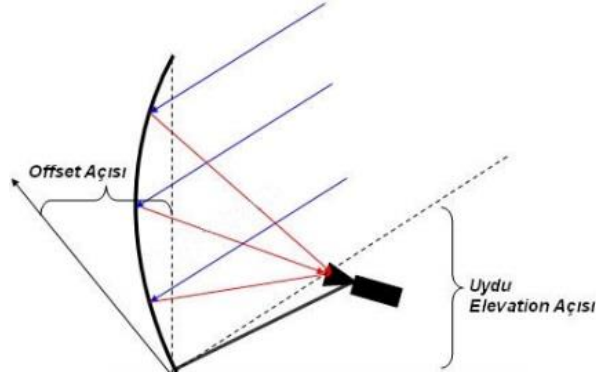
$$\beta = 70\lambda/D \quad (2.2)$$

(2.1) eşitliğinde anten verimliliği ( $\eta$ ), frekansa ait dalga boyu ( $\lambda$ ) ve anten açıklık alanı ( $A_a$ ) ile ifade edilmiştir. (2.1) eşitliği yardımı ile reflektör en iyi kazancı ( $G_a$ ) sağlayacak şekilde hesaplamalar yapılır. (2.2) eşitliğinde frekansa ait dalga boyu ( $\lambda$ ) ve anten çapı ( $D$ ) ile ifade edilmiştir. (2.2) eşitliği ise yarım güç ışını (-3 dB HPBW) anten açıklığı ( $\beta$ ) en verimli olacak şekilde hesaplanmak için kullanılır [15].

#### 2.4.1 Ofset Antenler

Anten besleme tasarımında diğer beslemelere göre çanağın önünde sinyale engel olmaması, kar ve su tutmaması sebebiyle küçük çaplı (120 cm'ye kadar) antenlerde

ofset besleme kullanılır [16]. Tez çalışmasında anten yapısı olarak ofset parabolik anten kullanılmıştır (Şekil 2.3). Bu sayede çanağın boyutu küçülmüş, güçlü ışın yapabilme ve düşük yan kulak seviyesi (SLL) elde etme imkânı sağlanmış oldu.



**Şekil 2. 3** Ofset anten yapısı

# 3

## Dalga Kılavuzları

---

Elektromanyetik enerjiyi en iyi taşıyaabilecek yapılardan birisi de dalga kılavuzlarıdır [5]. Koaksiyel kablolar düşük frekanslarda kullanılabilir. 3 GHz-300 GHz frekansları arasında elektromanyetik dalgaların iletiminde dalga kılavuzu kullanılır. Kesim frekanslarının üstündeki dalgaları taşıyabildiği için yüksek geçiren filtre karakteristiği gösterirler. Dalga kılavuzunda herhangi bir modun (çözümün) iletilebilmesi için ilgili modun çalışma frekansının, eşik kesim frekansı ( $f_c$ 'den) büyük olması gerekir [6]. Kılavuzunda ilerleyen sinyalin modları iki grupta incelenebilir. Bunlar yatay manyetik (TM) ve yatay elektrik (TE) modlarıdır. TE modunda kılavuz eksenine (yayılma doğrultusu) doğrultusunda manyetik alanın bileşeni var, elektrik alanın bileşeni yoktur ( $E_z=0$  ve  $H_z \neq 0$ ). TM modunda ise kılavuz eksenine doğrultusunda elektrik alan bileşeni var, manyetik alan bileşeni yoktur ( $H_z=0$  ve  $E_z \neq 0$ ).

Kılavuzun analizinde; kılavuz kesitinin düzgün, duvarların mükemmel iletken ve z yönünde (dalga ilerleme yönü) dikdörtgen dalga kılavuzunun sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilmiştir.  $TM_{m,n}$  ve  $TE_{m,n}$  modunun z yönündeki alan bileşenlerini elde etmek için kılavuz duvarlarında elektrik alanın teğetsel bileşeni sıfıra eşitlenerek dalga denklemlerinin çözülmesi gerekir [7]. TE ve TM modları için dalga kılavuzu mod kesim frekansı aşağıda verilen formülle hesaplanır.

$$f_{c,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (3.1)$$

(3.1)'de m ve n değerleri modaların indisleridir. 'c' ışık hızıdır. 'a' dikdörtgen dalga kılavuzunun uzun kenarı, 'b' ise kısa kenar olarak düşünülebilir [17].

### 3.1 Dalga Kılavuzu Avantajları

Dalga kılavuzlarının geniş yüzey alanı, bakır kayıpları ( $I^2R$ )'yi çok azaltır. Deri olayı dediğimiz bir etkiyle iletkenin ortasından dışına doğru bir akım oluşur. Taşınan akım iletken yüzeyine itilir. Deri etkisi iletkenin etkin direncini artırır. Bunun sebebi frekanstır. Taşınan bilginin frekansı arttıkça taşıma kabiliyeti azalır ve kayıplar artar. Bu etki ile yüksek frekanslı dalgalarda (mikrodalgalarda) yeni elemana ihtiyaç duyulur. Bu noktada dalga kılavuzları işe yarayan yapılardır.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} \quad (3.2)$$

(3.2)'de metalin elektrik iletkenliği ( $\sigma$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) ve dalga frekansı ( $\omega$ ) ile gösterilmektedir. Yüksek frekanslarda çalışıldığından dolayı  $\omega$  büyük olacaktır. (3.2)'den hesaplanabileceği gibi  $\omega$  büyüdükçe deri kalınlığı ( $\delta$ ) küçülecektir. Bu yüzden iletkenin ortasını boş yapmak yüksek frekanslarda daha uygundur. Dalga kılavuzları içerisinde ilerleyen dalganın dışarı yayılmasını engeller. Bu yüzden kayıpsız bir iletim hattı olarak düşünülebilir.

Dalga kılavuzlarında yalıtım malzemesi havadır. Hava sayesinde klasik yalıtım malzemelerinden daha az kayıp sağlanmış olur. Dalga kılavuzları durağan dalgaların oluşturduğu izolatör bozulmasından etkilenirler. Dalga kılavuzlarının içerisindeki duran dalgalar, enerji transferinin verimini azaltan arklara sebep olur. Radyasyon kayıpları, elektromanyetik alanın tamamının dalga kılavuzu içerisinde kalmasından dolayı düşüktür [18].

### 3.2 Dalga Kılavuzu Dezavantajları

Dalga kılavuzları sert borulardan yapıldığı için kurulumu zordur. Uygun çalışma için birleşme yerlerinde özel bağlantılara ihtiyaç vardır. Deri etkisi kayıplarını azaltmak için yüzeylerinde gümüş veya altın kaplama kullanılır. Bu sebeplerden ötürü maliyet artar ve kullanım pratikliği azalır.

### 3.3 Dalga Kılavuzu Çeşitleri

Dalga kılavuzu için en uygun kesitin belirlenmesi yönlendireceği dalganın özelliklerine bağlıdır. Boyu eninin iki katı olan dalga kılavuzları en yaygın kullanılan dalga kılavuzu yapısıdır. Sonra dairesel kesitliler gelir. Elips biçiminde olan türleri de vardır. Dalga kılavuzları şekillerine göre adlandırılır. En yaygın kullanılan dalga kılavuzları aşağıdaki gibidir.

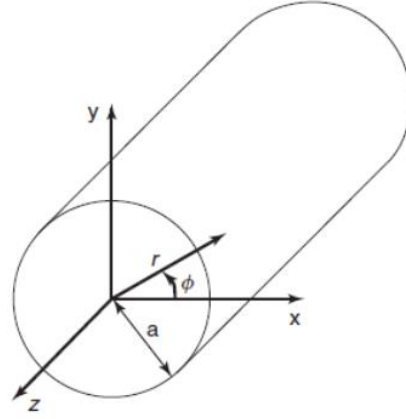
- Dairesel dalga kılavuzları
- Dikdörtgen dalga kılavuzları

#### 3.3.1 Dairesel Dalga Kılavuzu

Yarıçapı  $a$  olan dairesel kesitli dalga kılavuzu yapısı Şekil 3.1'de görülmektedir. Silindirik koordinatlarda analiz dairesel kılavuz yapısı için daha elverişlidir. Bir dairesel dalga kılavuzu için  $TE_{m,n}$  ve  $TM_{m,n}$  modlarının özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.  $p_{n,m}$  parametresi, Bessel fonksiyonu  $[J_n(x) = 0]$  n'inci dereceden, m'inci köküdür ve  $p'_{n,m}$  Bessel fonksiyonu  $[J'_n(x) = 0]$  n'inci dereceden türevinin, m'inci köküdür (Çizelge 3.1).

Çizelge 3. 1  $p_{n,m}$  parametrik değerleri

$m$	$n$	$p_{n,m}$	$p'_{n,m}$
0	1	2,405	3,832
0	2	5,520	7,016
0	3	8,654	10,173
1	1	3,832	1,841
1	2	7,016	5,331
2	1	5,136	3,054
2	2	8,417	6,706
3	1	6,380	4,201



**Şekil 3. 1** Dairesel dalga kılavuzu

**Çizelge 3. 2** Dairesel kılavuz TE ve TM mod parametre hesapları

	TE	TM
<b>H<sub>z</sub></b>	$J_n\left(\frac{p'_{nm}r}{a}\right) \cdot e^{-j\beta_{nm}z} \begin{cases} \cos(n\phi) \\ \sin(n\phi) \end{cases}$	0
<b>E<sub>z</sub></b>	0	$J_n\left(\frac{p_{nm}r}{a}\right) \cdot e^{-j\beta_{nm}z} \begin{cases} \cos(n\phi) \\ \sin(n\phi) \end{cases}$
<b>H<sub>r</sub></b>	$-\frac{j\beta_{nm}p'_{nm}}{ak_{c,nm}^2} \cdot J_n\left(\frac{p'_{nm}r}{a}\right) \cdot e^{-j\beta_{nm}z} \begin{cases} \cos(n\phi) \\ \sin(n\phi) \end{cases}$	$-\frac{E_\phi}{Z_{e,nm}}$
<b>H<sub>phi</sub></b>	$-\frac{jn\beta_{nm}}{rk_{c,nm}^2} \cdot J_n\left(\frac{p'_{nm}r}{a}\right) \cdot e^{-j\beta_{nm}z} \begin{cases} -\sin(n\phi) \\ \cos(n\phi) \end{cases}$	$\frac{E_r}{Z_{e,nm}}$
<b>E<sub>r</sub></b>	$Z_{h,nm} \cdot H_\phi$	$-\frac{j\beta_{nm}p_{nm}}{ak_{c,nm}^2} \cdot J_n\left(\frac{p_{nm}r}{a}\right) \cdot e^{-j\beta_{nm}z} \begin{cases} \cos(n\phi) \\ \sin(n\phi) \end{cases}$
<b>E<sub>phi</sub></b>	$-Z_{h,nm} \cdot H_r$	$-\frac{jn\beta_{nm}}{rk_{c,nm}^2} \cdot J_n\left(\frac{p_{nm}r}{a}\right) \cdot e^{-j\beta_{nm}z} \begin{cases} -\sin(n\phi) \\ \cos(n\phi) \end{cases}$

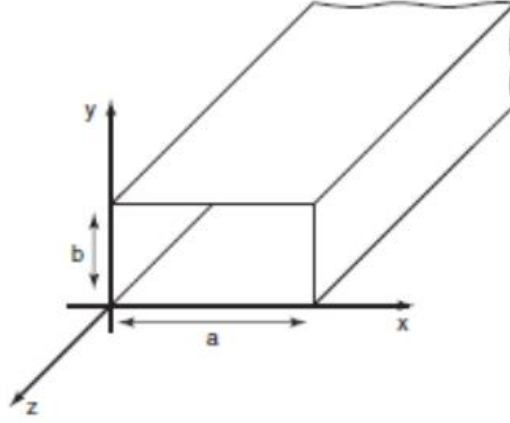
**Çizelge 3.2** Dairesel kılavuz TE ve TM mod parametre hesapları (devamı)

$\beta_{nm}$	$\left[ k_0^2 - \left( \frac{p'_{nm}}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	$\left[ k_0^2 - \left( \frac{p_{nm}}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
$Z_{h,nm}$	$\frac{k_0}{\beta_{nm}} \cdot Z_0$	
$Z_{e,nm}$		$\frac{\beta_{nm}}{k_0} \cdot Z_0$
$k_{c,nm}$	$\frac{p'_{nm}}{a}$	$\frac{p_{nm}}{a}$
$\lambda_{c,nm}$	$\frac{2\pi a}{p'_{nm}}$	$\frac{2\pi a}{p_{nm}}$
$\alpha$	$\frac{R_m}{aZ_0} \cdot \left( 1 - \frac{k_{c,nm}^2}{k_0^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{k_{c,nm}^2}{k_0^2} + \frac{n^2}{(p'_{nm})^2 - n^2} \right]$	$\frac{R_m}{aZ_0} \cdot \left( 1 - \frac{k_{c,nm}^2}{k_0^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$

### 3.3.2 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu

Dalga kılavuzu oluşturmak için en kolay yapı dikdörtgen dalga kılavuzlarıdır. Güç kapasitesi iyidir ve düşük kayıp sağlarlar. Dalga kılavuzları genellikle kurulumu, taşınması ve diğer malzemeler ile birleştirilmesi zor olan yapılardır. Dikdörtgen dalga kılavuzu yapısı Şekil 3.2' de gösterilmektedir.





**Şekil 3. 2** Dikdörtgen dalga kılavuzu

Dalga kılavuzu yapısı sınır koşulları ile birlikte Maxwell denklemlerinin çözümü sonucu üretilir. Tek bir iletken yapılabilmesi sonucunda, sadece yatay manyetik (TM) ve yatay elektrik dalga (TE) iletilebilir.  $TE_{m,n}$  modunda; elektrik alan z yönünde sıfırdır ( $E_z = 0$ ),  $TM_{m,n}$  modunda manyetik alan z yönünde sıfırdır ( $H_z = 0$ ). Çizelge 3.2’de dikdörtgen dalga kılavuzu çözümlenmesi için gerekli olan denklemler verilmiştir. Teorik olarak birçok mod dikdörtgen dalga kılavuzunda var olabilir. Verilen bir mod için ‘ $k_{c,n,m}$ ’ o modun kesim dalga sayısı olmak üzere (3.3) denkleminde işlemin en düşük frekansı hesaplanır.

$$\frac{\omega}{c} = k_{c,n,m} \text{ veya } f_{c,n,m} = \frac{c}{2\pi} k_{c,n,m} \quad (3.3)$$

dir.

Dikdörtgen dalga kılavuzu için,  $TE_{10}$  modu temel ya da dominant mod olarak tanımlanır ve en küçük kesim frekansına sahiptir. Bunun anlamı diğer modlar olmadığında bile  $TE_{10}$  modunun zayıflama olmadan dalga kılavuzunda ( $TE_{10}$  modunun kesim frekansının üzerinde ise) iletilebileceğidir. Bu yüzden  $TE_{10}$  modu genellikle dikdörtgen dalga kılavuzuna dayalı mono mod mikrodalga sistem tasarımında kullanılır.

Dalga kılavuzu süper bir iletken olarak kabul edilir ve hesaplamalar buna göre yapılır. Bu sebepten Çizelge 3.2’de, alanlar  $e^{-j\beta z}$  ile çarpılır. Aslında z-yönünde ilerleyen dalgada kayıp meydana gelir.  $e^{-j\beta z}$  daha genel bir terim olan  $e^{-(\alpha+j\beta_{m,n})z}$  ile sonra değiştirilebilir, burada  $\alpha$  zayıflama sabiti olarak adlandırılır.

**Çizelge 3. 3** Dikdörtgen kılavuz TE ve TM mod parametre hesapları

	TE	TM
$H_z$	$\cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{m\pi x}{b}\right)e^{-j\beta_{nm}z}$	0
$E_z$	0	$\sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{m\pi x}{b}\right)e^{-j\beta_{nm}z}$
$E_x$	$Z_{h,n,m}H_y$	$\frac{-j\beta_{nm}}{ak_{c,n,m}^2}\cos\frac{nm\pi x}{a}\sin\frac{m\pi y}{b}e^{-j\beta_{nm}z}$
$H_x$	$\frac{j\beta_{nm}}{ak_{c,n,m}^2}\sin\frac{nm\pi x}{a}\cos\frac{m\pi y}{b}e^{-j\beta_{nm}z}$	$-\frac{E_y}{Z_{e,n,m}}$
$E_y$	$-Z_{h,n,m}H_x$	$\frac{-j\beta_{nm}}{ak_{c,n,m}^2}\sin\frac{nm\pi x}{a}\cos\frac{m\pi y}{b}e^{-j\beta_{nm}z}$
$H_y$	$\frac{j\beta_{nm}}{ak_{c,n,m}^2}\cos\frac{nm\pi x}{a}\sin\frac{m\pi y}{b}e^{-j\beta_{nm}z}$	$\frac{E_x}{Z_{e,n,m}}$
$Z_{h,n,m}$	$\frac{k_0}{\beta_{n,m}}Z_c$	
$Z_{e,n,m}$		$\frac{\beta_{n,m}}{k_0}Z_c$
$k_{c,n,m}$	$\sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2}$	
$\beta_{n,m}$		$\sqrt{k_0^2 - k_{c,n,m}^2}$
$f_{c,n,m}$		$\frac{c}{2\pi}k_{c,n,m}$
$\lambda_{c,n,m}$		$\frac{c}{k_{c,n,m}}$

Zayıflama sabiti bir  $TE_{m,n}$  için  $\alpha_{TE}$  ;

$$\alpha_{TE} = \frac{2R_m}{bZ_0\sqrt{1 - k_{c,m,n}^2/k_0^2}} \left[ \left(1 + \frac{b}{a}\right) \frac{k_c^2}{k_0^2} + \frac{b}{a} \left( \frac{\epsilon_{0m}}{2} - \frac{k_{c,n,m}^2}{k_0^2} \right) \frac{n^2 ab + m^2 a^2}{n^2 b^2 + m^2 a^2} \right] \quad (3.4)$$

olarak verilir. (3.4) denkleminde ' $Z_0$ ' karakteristik empedans, ' $k_c$ ' kesim dalga sayısı, ' $k_0$ ' yayılma sabiti, ' $\epsilon_{0m}$ ' dielektrik sabiti ve  $R_m = \sqrt{\omega\mu_0/2\sigma}$  yüzey empedansının direnç kısmıdır ve  $m=0$  için  $\epsilon_{0m} = 1$  iken  $m \geq 1$  için ise  $\epsilon_{0m} = 2$ 'dir.

$TM_{m,n}$  modu için  $\alpha_{TM}$  zayıflama sabiti;

$$\alpha_{TM} = \frac{2R_m}{bZ_0\sqrt{1 - k_{c,m,n}^2/k_0^2}} \left[ \frac{n^2 b + m^2 a^2}{n^2 b^2 a + m^2 a^2} \right] \quad (3.5)$$

olarak verilir.

Mikrodalga filtre tasarımı yapılacağı zaman, denkleme zayıflama sabiti genelde dahil edilmez. Çünkü bu çözümde karmaşıklığa neden olur [18].

### 3.4 Dalga Kılavuzu Modları

Dalga kılavuzu alan dağılım şekillerinden yapının TE ve TM modları diye adlandırılan iki tipte olduğu görülür.

Dalga kılavuzları tek mod ile çalıştırılmak istenir. En küçük boyutlu kılavuz kullanılarak istenmeyen modlar ortadan kaldırılmış olur.

Her tip mod, kendine özgü elektrik ve manyetik alan denkleminde sahiptir. Her mod ve boyut için, dalga yayılımının mümkün olduğu bir en alt frekans vardır. Bu frekansa kesim frekansı denir.

Dalga kılavuzları yüksek geçiren filtre gibi davranarak kılavuz boyutlarının belirlediği kesim frekansından düşük frekanslı dalgaları iletmezler. Bu sebeple dalga kılavuzları yüksek frekansta çalışan yapılarda işlevseldir.

Bir dalga kılavuzunda birden fazla mod kullanımı modların dalga boyları farklılık gösterdiği için yapılamaz. Dalga kılavuz içindeki herhangi bir çıkıntı ya da köşe diğer

modların da ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu sebeple en düşük modu iletecek kılavuz yapısı ve boyutlarının seçilmesi uygundur.

Dalga kılavuzunda iletimde zayıflama iki sebeple olur; kılavuz içindeki dielektriğin iletkenliğinin sıfır '0' olmaması ve kılavuz çeperlerinde omik kayıplar. Dalga kılavuzlarında dielektrik genel olarak havadır. 10 GHz' in altında dielektrik zayıflaması ihmal edilebilir [18].

### 3.4.1 TE Modu

Elektromanyetik dalga, dalga kılavuzunda ilerlerken, TE modunda elektrik alan, kılavuz eksenine dik doğrultudadır ve bu eksen boyunca başka elektrik alan bileşeni yoktur. Manyetik alanın hem eksen doğrultusunda hem de eksene dik bileşenleri vardır.

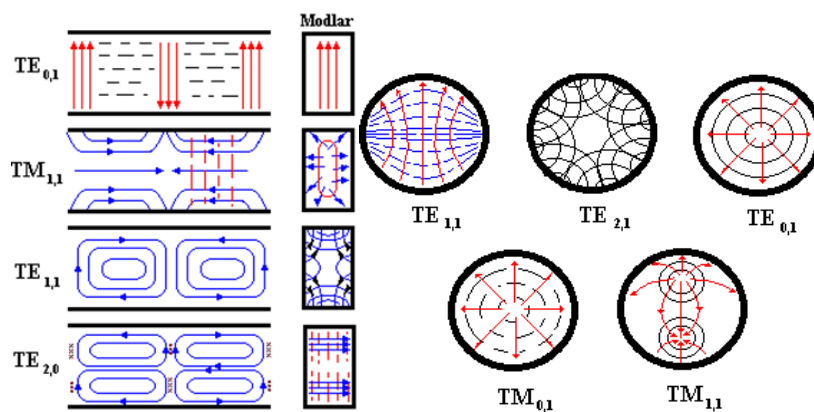
Z yönünde ilerleyen bir elektromanyetik dalga için TE modunda;

$$E_z=0 \quad (3.6)$$

$$H_z \neq 0 \quad (3.7)$$

olur.

Şekil 3.3'de dikdörtgen ve dairesel dalga kılavuzu yapılarının modlarına ait elektrik ve manyetik alan yayılım şekilleri gösterilmiştir.



**Şekil 3. 3** Dalga kılavuzunda elektrik alan yönleri

### 3.4.2 TM Modu

TM modunda manyetik alanın kılavuz eksenini doğrultusunda bileşeni yoktur. Elektrik alanının hem eksen doğrultusunda hem de eksene dik bileşenleri vardır.

z yönünde ilerleyen bir elektromanyetik dalga için TM modunda;

$$H_z=0 \quad (3.8)$$

$$E_z \neq 0 \quad (3.9)$$

olur.

### 3.4.3 TEM Modu

TEM modunda elektrik ve manyetik alanların kılavuz eksenini boyunca yani propagasyon yönünde bileşenleri yoktur. TEM dalgaları Dalga kılavuzlarında kılavuzlanamazlar. Sadece TM veya sadece TE ya da her ikisi birden bulunabilir.

Dalga kılavuzları tek mod ile çalıştırılmak istenir. Bu sayede en küçük boyutlu kılavuz kullanılarak istenmeyen modlar ortadan kaldırılmış olur.

z yönünde ilerleyen bir elektromanyetik dalga için TEM modunda;

$$H_z=0 \quad (3.10)$$

$$E_z=0 \quad (3.11)$$

olur.

## 3.5 Elektromanyetik Dalgalarda Polarizasyon Türleri

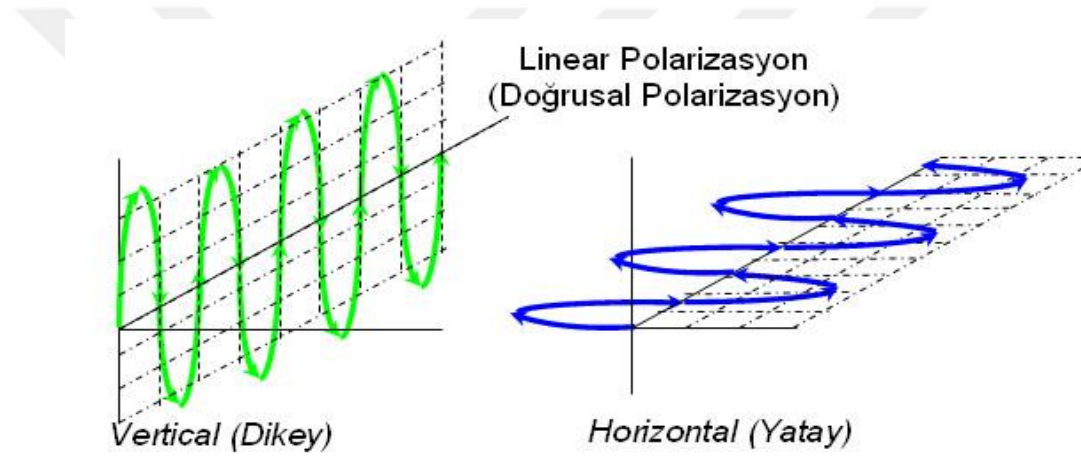
Polarizasyon, düzlem dalga yayılımında elektrik alanının bir noktadaki zamanla değişen davranışdır. Başka ifadeyle elektrik alan vektörünün zamanla çizdiği şekle denir. Polarizasyon biçimlerinin başlıcaları eliptik ve lineer polarizasyonlardır. Lineer polarizasyonun yatay ve dikey olmak üzere iki çeşidi vardır. Elektrik alan vektörü yeryüzüne dikse düşey polarizasyon, paralel olursa yatay polarizasyon denir. Televizyon ve frekans modülasyonlu (FM) dalga yayınları çoğunlukla yatay polarizasyonludur. Genlik modülasyonlu (AM) radyo yayınları, kara-deniz uzak

mesafe haberleşmeleri genelde düşey polarizasyonludur. Dairesel polarizasyon eliptik polarizasyonun özel halidir [18].

### 3.5.1 Linear (Doğrusal) Polarizasyon

Elektrik alan vektörü ilerlediği doğrultuda sabit olduğu duruma lineer polarizasyon denir. Linear polarizasyonun iki türü vardır;

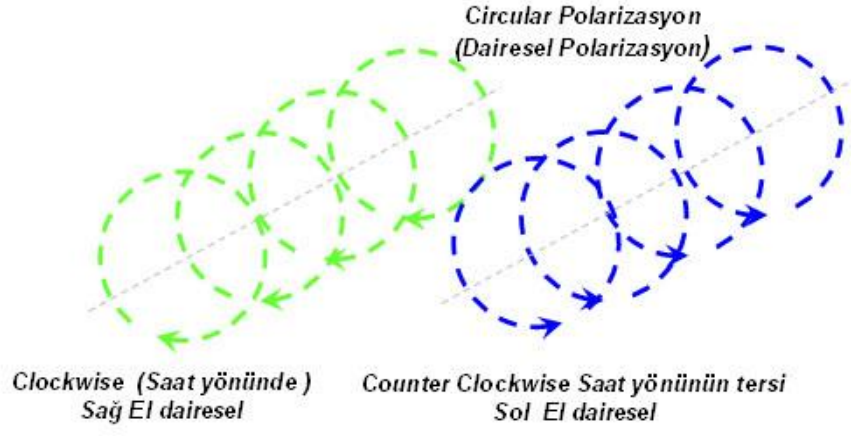
- Yatay Polarizasyon: Elektrik alanın yeryüzüne yatay olduğu lineer polarizasyon türüdür.
- Düşey Polarizasyon: Elektrik alanın yeryüzüne dik olduğu lineer polarizasyon türüdür.



Şekil 3. 4 Lineer polarizasyon türleri

### 3.5.2 Dairesel Polarizasyon

Bir elektromanyetik dalganın belirli bir noktadaki elektrik alanı zamanla değişebilir. Birisi x doğrultusunda, ötekisi y doğrultusunda kutuplu ve ikincinin birinciyi zaman fazında  $90^\circ$  geriden izlediği doğrusal kutuplu iki dalganın üst üste bindiği düşünülürse ve bu iki dalganın genlikleri birbirinden farklı ise eliptik polarizasyon, eğer genlikleri eşit ise dairesel polarizasyon denir [18].



**Şekil 3. 5** Dairesel polarizasyon



# 4

## Filtreler

---

Filtreler elektrik devrelerinde çok kullanışlı yapılar olan analog devrelerdir. Elektriksel işaretlerin frekans spektrumlarına model vermek amacıyla kullanılan devreler filtrelerdir. Filtreler pasif R, L, C elemanlarıyla gerçekleştirilebildiği gibi aktif elemanlarla (opamp, transistör vs.) birlikte sadece L veya C elemanları kullanılarak veya bunların her üçünü birden kullanılarak da gerçekleştirilebilirler.

Elektronik ve haberleşme sistemlerinde çok geniş bir uygulama alanına sahiptirler. İstenilen frekansın iletilmesi diğer frekansların iletilmemesi amacıyla kullanılırlar. Bant geçiren, alçak geçiren, bant söndüren, yüksek geçiren şeklinde isimlendirilen filtreler mevcuttur. Önemli filtre parametreleri olarak kalite faktörü, kesim frekansı, geçirme bandı kazancı karşımıza çıkar [8].

Kapasite, bobin ve direnç pasif filtre elemanlarıdır. RC filtrelerinde transfer fonksiyonunun kökleri reel olur. Bu tip filtrelerde değer katsayısının küçük olduğu görülür. LC filtreleri kullanıldığında kalite faktörü büyük olur. Frekans küçüldükçe indüktans elemanının büyümesi hem devrenin kapladığı alanı hem de maliyeti artırır. Bundan dolayı pasif filtreler düşük frekanslarda çok tercih edilmezler. Bunun yerine aktif filtreler tercih edilirler.

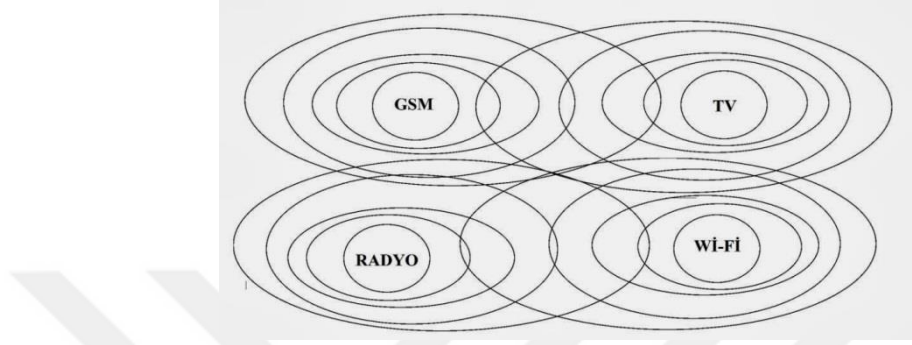
Aktif filtrelerin küçük ve hafif olması önemli bir avantajdır. Ayrıca yüksek güvenilirlikli, seri üretim yapılabildiğinden ucuz ve küçük boyutları nedeniyle parazitleri düşüktür. Ancak kutup frekansları sınırlıdır. Kalite faktörü ile kutup frekansı ters orantılıdır. Aktif filtreler aktif elemanlar sebebiyle besleme devresine ihtiyaç duyarlar [8].



## 4.1 Haberleşme Sistemlerinde Kullanım Amacı

Filtre devreleri, haberleşme sistemlerinde istenilen frekans değerleri aralığında zayıflama ve gecikmeyi sağlarlar.

Filtreler, istenilen frekans değerlerindeki sinyalin geçmesi bu frekans değerleri dışındaki değerlerin ise zayıflatılarak iletilmemesi için tasarlanmıştır.



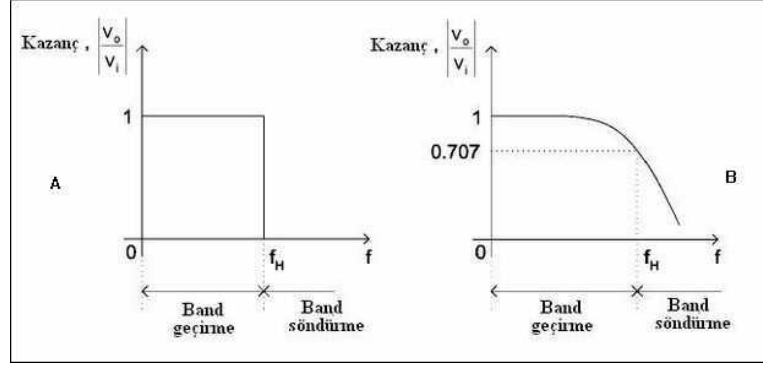
Şekil 4. 1 Haberleşme sinyal çeşitleri

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi havada bulunan elektronik sinyaller çok çeşitlidir. Bu sinyallerde karışıklığa sebep olur. Elektronik bir cihaz bu sinyallerin hepsini algılamakta fakat bir tanesi ile çalışmaktadır. Filtre devreleri sayesinde bu karmaşa engellenmekte ve cihazın çalışması sağlanmaktadır [8].

## 4.2 Filtre Karakteristikleri

### 4.2.1 Alçak Geçiren Filtre Karakteristikleri

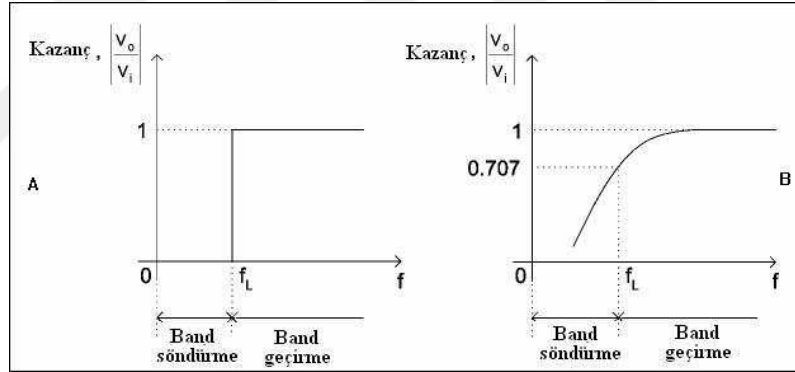
Alçak geçiren filtrede 0 Hz ile kesim frekansı ( $f_H$ ) arasında sabit bir kazanç vardır. Kesim frekansında kazanç 3 dB azalır. 0 Hz ile kesim frekansı ( $f_H$ ) arasındaki frekanslar bant geçirme frekansı,  $f_H$ 'dan büyük frekanslar ise bant söndürme frekansdır [8].



Şekil 4. 2 Alçak geçiren filtre karakteristikleri a) ideal filtre b) pratik filtre

#### 4.2.2 Yüksek Geçiren Filtre Karakteristikleri

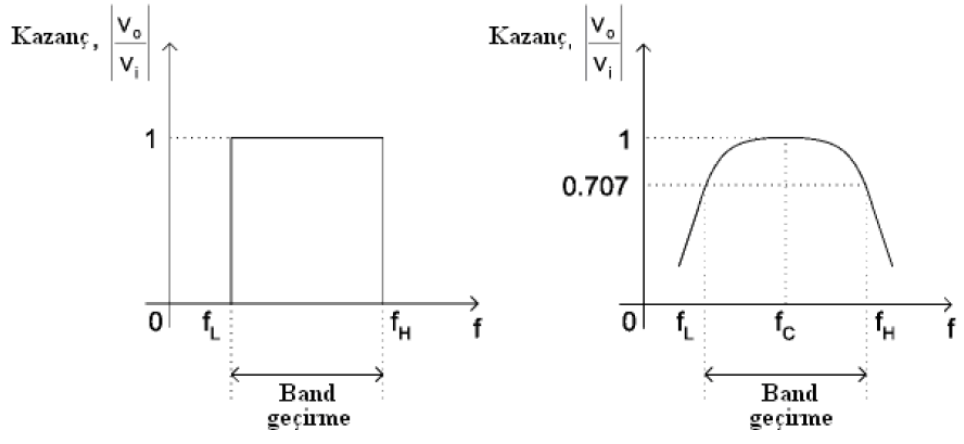
Yüksek geçiren filtrede kesim frekansından ( $f_L$ ) daha büyük frekanslarda sabit bir kazanç vardır. Kesim frekansında kazanç 3 dB azalır. 0 Hz ile kesim frekansı ( $f_L$ ) arasındaki frekanslar band söndürme frekansı,  $f_L$ 'den büyük frekanslar ise band geçirme frekansdır [8].



Şekil 4. 3 Yüksek geçiren filtre karakteristikleri a) ideal filtre b) pratik filtre

#### 4.2.3 Bant Geçiren Filtre Karakteristikleri

Bant geçiren filtre belirli frekans aralığında iletimi sağlar. Aralığın dışında kalan sinyalleri söndürür. Bant geçirme aralığı ( $f_H - f_L$ ) arasında kalan bölgeyi ifade eder. Filtrenin bant genişliği ( $f_H - f_L$ ) olarak ifade edilir [8].



**Şekil 4. 4** Bant geçiren filtre karakteristikleri a) ideal filtre b) pratik filtre



### 5.1 Saçılma Parametreleri (S-Parametreleri)

S-parametreleri kara kutu olarak gösterilen devreyi ifade etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile kara kutunun davranışı içindeki bileşenler hakkında hiç bilgi sahibi olmadan bilgi elde edilebilir. Bu kara kutuda herhangi bir mikrodalga devre elemanı yer alıyor olabilir.

S-parametrelerin ölçümü, tek bir frekansta sinyal ya da dalgayı kara kutuya gönderip, her bir kapıdan çıkan sinyalleri ya da dalgaları kaydederek yapılır. Burada kaydedilen bilgi güç, gerilim veya akım olabilir. Bu 2 kapılı devre modeli için, birinci kapiya gelen sinyalin bir kısmı geri yansır bir kısmı da 2. kapiya iletilir.

Yüksek frekanstaki yapıların ölçümleri basit açık veya kapalı devre ölçümleriyle yapılamamasından dolayı S-parametreleri (saçılma parametreleri) kullanılmaktadır [19].



Şekil 5. 1 Giren ve yansıyan dalgaların gösterimi

Şekil 5.1'de devrede gelen ve yansıyan sinyaller gösterilmektedir. Port 1'e gelen sinyal  $a_1$ , yansıyan sinyal ise  $b_1$  ile gösterilmekte, port 2'ye gelen sinyal  $a_2$ , yansıyan sinyal ise  $b_2$  ile gösterilmektedir. Port 1 ve port 2'de ölçülen  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  ve  $S_{22}$  parametreleri, iki kapılı devrenin saçınım parametreleridir ve gösterim şekli:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

[S] ifadesi bu ağın saçınım matrisidir [20].

S-parametreleri yansıma veya iletim katsayılarını simgelerler. Port 1 ve port 2'nin özel durumlarında ölçülen S-parametreleri aşağıdaki ifadelerle tanımlanmaktadır:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2 \equiv 0} \quad (\text{Uygun çıkış sonlandırma ile giriş yansıma katsayısı}) \quad (5.2)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2 \equiv 0} \quad (\text{Uygun çıkış sonlandırma ile ileri iletim katsayısı}) \quad (5.3)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1 \equiv 0} \quad (\text{Uygun giriş sonlandırma ile çıkış yansıma katsayısı}) \quad (5.4)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1 \equiv 0} \quad (\text{Uygun giriş sonlandırma ile ters iletim katsayısı}) \quad (5.5)$$

“Mikrodalga devrelerde ve özelliklede filtre karakteristikleri için iki önemli parametre tanımlanmaktadır. Bunlardan bir tanesi  $L_A$  geçiş kaybı (insertion loss) ve diğeri ise  $L_R$  dönüş kaybıdır (return loss)” [20].

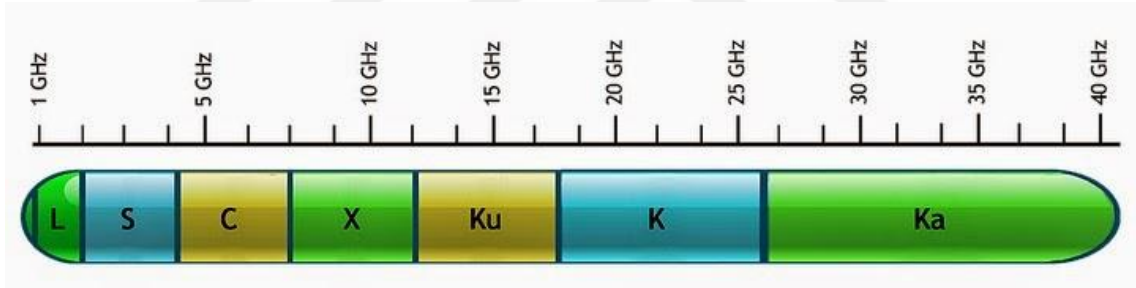
$$L_A = -20 \log |S_{mn}| \text{ dB ve } m, n = 1, 2 \quad (m \neq n) \quad (5.6)$$

$$L_R = -20 \log |S_{nn}| \text{ dB ve } n = 1, 2 \quad (5.7)$$

# 6

## Ka Bant

Ka bandı, 26.5-40 GHz radyo frekanslarını yani bir santimetreden biraz az olan 7.5 milimetre dalga boylarını kapsar. Ka bandı, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bandındaki K bandının bir parçasıdır (Şekil 6.1). Ka bant, Yahsat ve Eutelsat uydu operatörleri tarafından sağlanan ve temelinde uydu üzerinden internet erişimini amaçlayan bir sistemdir. Sistem normal bir uydu gibi belirli bölgeyi kaplamak yerine küçük hüzmelerden oluşan bir yapı kullanmaktadır. Yüksek frekansta çalıştığı için kullanılan malzemeler ebat olarak daha küçüktür.



Şekil 6. 1 Elektromanyetik spektrum cetveli

### 6.1 Ka Bant Avantajları

Ka bandının birçok avantajı vardır. Bunların başlıcaları şöyledir;

- Kolay taşınabilir ve hafif sistemler oluşturması
- Her türlü enerji sistemiyle çalışması
- Her koşulda kullanılabilir olması
- Canlı Yayın Sistemlerindeki maliyetleri 1/10 oranına indirmesi
- Çok düşük maliyetli antenler ve terminaller olması
- IP tabanlı sistemlere kolay adapte olması

- Yüksek Adaptasyon yeteneği sayesinde farklı ihtiyaçlara tek başına cevap verebilmesi

gibi avantajlar Ka bandının kullanılmasını yaygınlaştırmıştır [12].

## **6.2 Ka Bant Dezavantajları**

Ka bant, dalga boyu küçük olması nedeni ile hava koşullarından diğer bantlara göre daha kolay etkilenir.

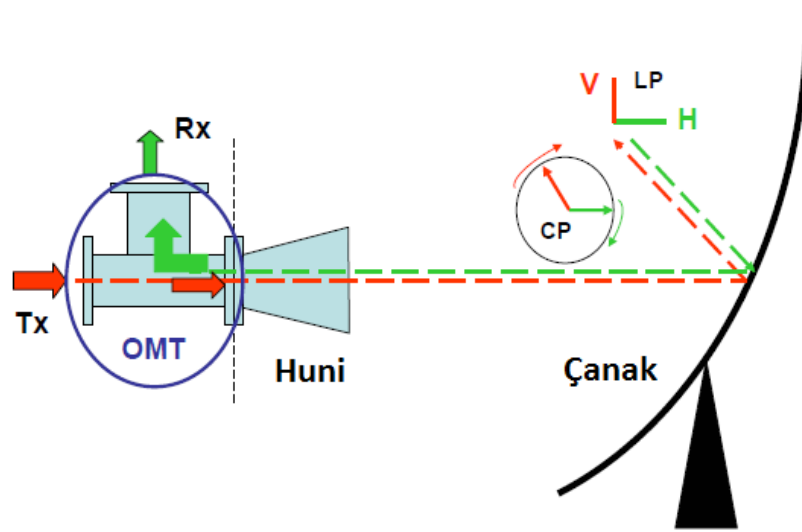


Tasarım farklı elemanların birleşmesinden oluşmaktadır. Elemanların tasarımı CST programında yapılmıştır. Bu elemanlar;

- OMT (Dik Mod Ayırıştırıcı)
- Horn (Huni)
- Filter (Filtre)
- Bend (Dirsek)

Dish (Çanak)

olmak üzere 5 farklı elemandır.



Şekil 7. 1 Ön uç anten yapısı

Tasarımda malzeme olarak bakır (Cu) kullanılmıştır. Oluşturulacak elemanların uyacağı parametreler aşağıda Çizelge 7.1’de gösterilmiştir. İstenilen bu değerler göz önünde bulundurularak tasarım yapılmıştır.



**Çizelge 7. 1** Tasarım parametreleri

		<b>Rx</b>	<b>Tx</b>
	<b>Frekans</b>	19.7-20.2 GHz	29.5-30 GHz
<b>Anten Besleme Kısmı</b>	<b>Dalga Kılavuzu Modeli</b>	WR-42	WR-28
	<b>Araya Girme Kaybı (S<sub>32</sub>) (S<sub>31</sub>)</b>	> -0.2 dB	> -0.2 dB
	<b>Geri Dönüş Kaybı (S<sub>11</sub>)</b>	< -20 dB	< -30 dB
	<b>İzolasyon (S<sub>12</sub>)</b>	< -80 dB	< -80 dB
	<b>VSWR</b>	1.3:1	
<b>Anten</b>	<b>Kazanç</b>	> 40 dB	> 40 dB
	<b>Açısal Genişlik (-3 dB)</b>	1.1°	0.7°
	<b>Cross-Pol İzolasyonu</b>	< -20 dB	< -20 dB
	<b>Yan Kulak Seviyesi (SLL)</b>	< -20 dB	< -20 dB

### 7.1 OMT (Dik Mod Ayrıştırıcı) Tasarımı

Elektrik alan vektörü E'nin yönüne göre elektromanyetik dalganın polarizasyonu değişir. Z doğrultusu iletim doğrultusu olursa, X, Y düzlemi dalganın ilerleme doğrultusuna dik olduğundan bu düzlemlerde polarizasyon lineerdir.

$$\vec{E} = |E|. e^{j(\omega t - kz)} \quad (7.1)$$

Elektrik alan (E) dik bileşenlerine ayrılabilir. Bu durumda iki tür polarizasyon ortaya çıkar. Elektrik alanın Y düzleminde bileşeni yoksa yatay polarizasyon, eğer elektrik alanın X düzleminde bileşeni yoksa dikey polarizasyon olur. Sinyaller yatay ve dikey polarizasyonun ortogonalite özelliğinden yararlanılarak birbirinden bağımsız olarak iletilebilir.

$$|E|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 \quad (7.2)$$

Dairesel polarizasyonda E vektörü Z yönünde sarmal bir yol çizer. Bu sarmal yapı saat yönünde ise RHCP (Right Hand Circular Polarization), tersi istikamette ise LHCP (Left Hand Circular Polarization) diye adlandırılırlar. Dairesel polarize bir dalga eşit genlikli, aralarında  $90^\circ$  faz farkı olan iki lineer orthogonal alan toplamıyla matematiksel olarak ifade edilir.

$$|E_x| = |E_y| \quad (7.3)$$

OMT elemanı pratikte üç kapılı, elektriksel olarak dört kapılı bir cihazdır. Ortak kapının içerisinde birbirine dik iki farklı sinyalin aynı zamanda iletilebilmesi dört kapılı gibi öngörülmesini sağlar. Ortak kapı daireysel veya karesel kesit alanına sahiptir. Dikdörtgen kesitin bulunduğu yerlerde  $TE_{10}$  ve  $TE_{01}$  modlarında çalışma sağlanırken, daireysel kesit alanında iki lineer polarizasyondaki bileşenler bulunabilir. Dört kapılı ideal bir OMT'nin S-parametre matrisi şu şekildedir:

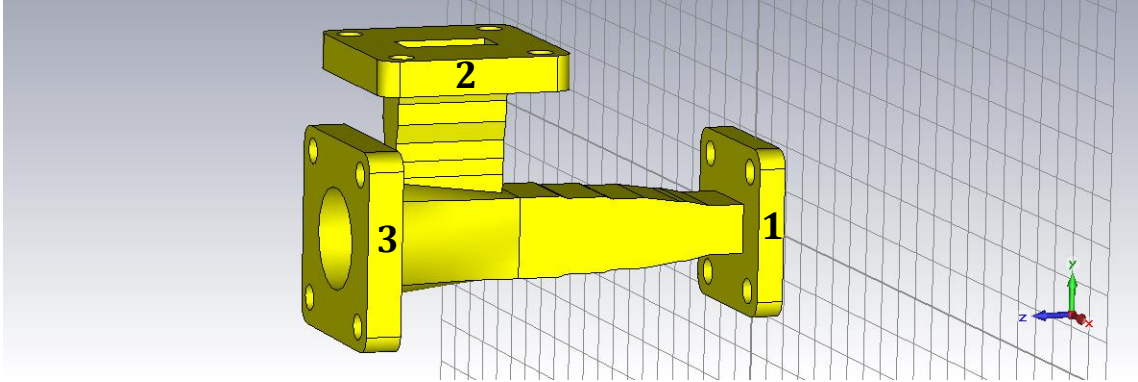
$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e^{j\theta_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{j\theta_2} \\ e^{j\theta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\theta_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Bu matriste 1 ve 3 kapıları  $e^{j\theta_1}$ , 2 ve 4 kapıları  $e^{j\theta_2}$  ile gösterilmektedir. Bu matristen de anlaşıldığı üzere OMT çift yönlü (reciprocal) bir cihazdır. S matrisinden OMT'nin dört kapılı gibi öngörülmesi mantığı daha iyi anlaşılabilir. Teorik olarak, OMT elemanında kayıpsız iletim sağlanabilir [21].

### 7.1.1 OMT Tasarımında İzlenen Yol

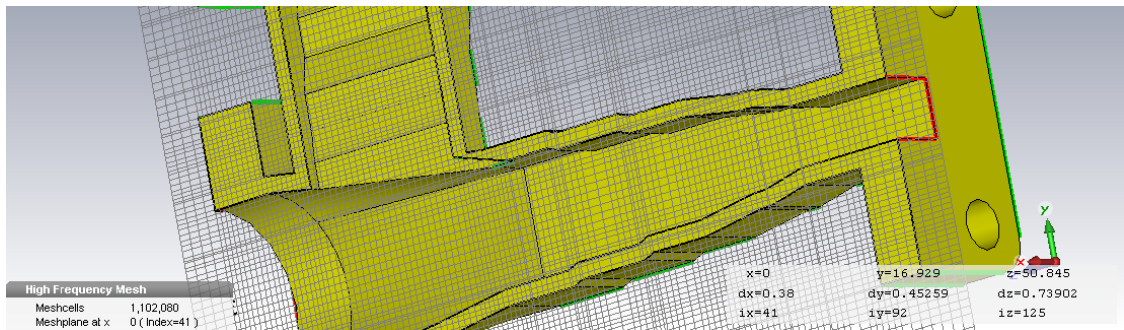
OMT tasarımında dikkat edilmesi gereken iki nokta bulunmaktadır. İlk olarak daireysel polarizasyonda çalışan ve WC-44 standartlarında bulunan ortak kapının, alım WR-42 ve iletim WR-28 kapılarında dikdörtgen dalga kılavuzuna dönüşmesi, ikinci olarak alıcı tarafındaki kapı Şekil 7.2'de 2 numaralı kapı için uygun geçiş bağlantısının sağlanabilmesidir. Şekil 7.2'de 3 numaralı kapı (ortak kapı) daireysel polarizasyonda iletim yapabilir. 1 numaralı kapı iletim kapısıdır ve dikey polarizasyonda 29.5-30 GHz arasında çalışmaktadır. 2 numaralı kapı ise alım

kapısıdır ve yatay polarizasyonda 19.7- 20.2 GHz arasında çalışmaktadır. Şekil 7.2'de görüleceği üzere kapı 1 ve kapı 2 birbirine dik konumdadır. Bu orthogonal yapı polarizasyon farklılığından kaynaklanmaktadır.

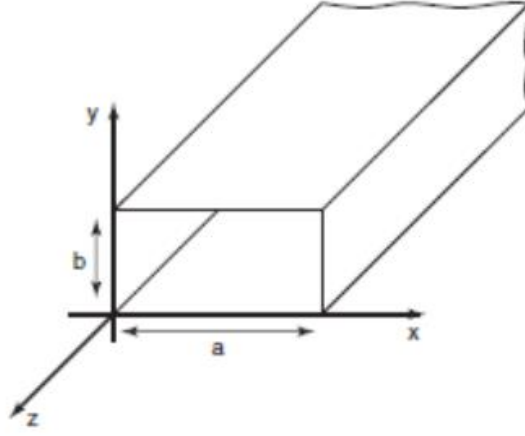


**Şekil 7. 2** OMT 3D tasarım dış yapısı

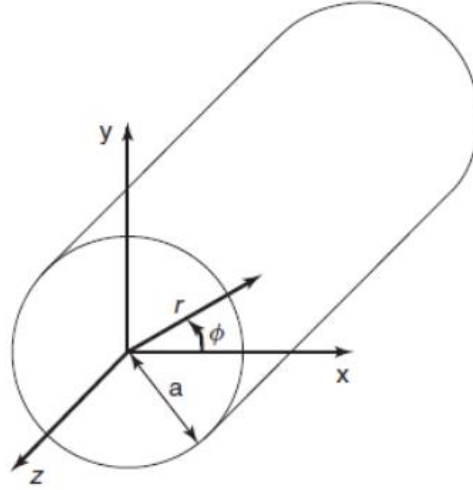
OMT tasarımında önce iletim kapısı oluşturulmuştur. İletim kapısı WR-28 standartlarına göre belirlenmiştir. WR-28 ( $a=7.12$  mm,  $b=3.56$  mm) Ka bandında çalışma için uygun yapı standardıdır. Dikdörtgen dalga kılavuzlarında, 'a' genişlik, 'b' ise yüksekliği ifade eder (Şekil 7.4). Baskın moda sadece a'nın etkisi vardır. Düşük frekanstaki dalga kılavuzu daha büyük boyutlarda olacağı için bu yapının boyutları K bant dalga kılavuzu standardı olan WR-42'nin ( $a=10.67$  mm,  $b=4.32$  mm) uzun kenarına göre belirlenmiştir. Şekil 7.3'de bu dönüşüm görülebilir. Ortak kapı, 5.78 mm (WC-44) yarıçapında bir dairedir (Şekil 7.5).



**Şekil 7. 3** OMT 3D tasarım iç yapısı

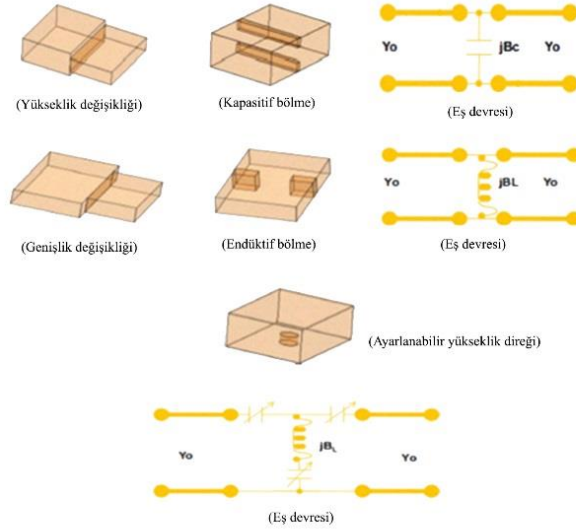


**Şekil 7. 4** Dikdörtgensel dalga kılavuzu kesiti



**Şekil 7. 5** Dairesel dalga kılavuzu kesiti

Sonraki aşamada  $TE_{10}$  modunda çalışan kılavuzun 3.56 mm olan birinci kapı yüksekliği (b) kademeli olarak 10.56 mm'ye yükseltilmiştir. Her kademe, Şekil 7.6'da gösterildiği gibi ve empedans hesabı (7.5) ile uzunluk (rezonatör boyu) hesabı (7.6) kullanılarak, uygun kuplaj ayarlanıp dalga kılavuzunun istenilen frekansta çalışması sağlanmıştır. Tasarımda geçişler adım şeklinde keskin değil yumuşak geçiş halinde ayarlanmıştır. Bu sayede iletimde iyileşmeler gözlemlenmiştir.



**Şekil 7. 6** Kuplaj yapıları

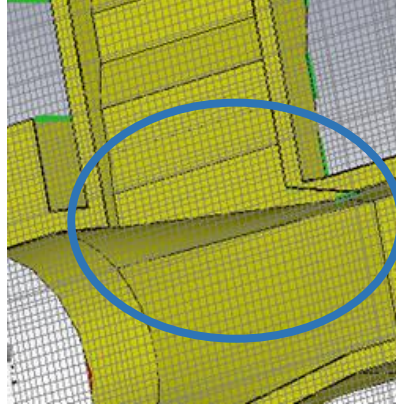
$$Z = \frac{377\pi b}{2a} \cdot \frac{\lambda_g}{\lambda_0} \quad (7.5)$$

Giriş empedansı (7.5) formülü ile hesaplandı. Burda  $\lambda_g$  dalga kılavuzunun dalga boyu,  $\lambda_0$  ise boşluktaki dalga boyudur.

$$L_{res_i} |_{i..N} = \frac{\lambda_g}{2} \left( 1 + \frac{\phi_{i-1,i} + \phi_{i,i+1}}{2\pi} \right) \quad (7.6)$$

(7.6)'da ' $\phi_{i-1,i}$ ' yansıma katsayısının fazını gösterir. Bu formül ile rezonatörlerin boyu hesaplandı.

İletim birinci kapıdan istenilen değerlerde olacak şekilde ayarlanıp, bu yapının ortasında ve bu yapının boyuna düzlemine paralel olan  $TE_{01}$  modunda çalışan ikinci kapı yerleştirilmiştir. Bu kapının yapısal boyutu  $TE_{01}$  modunu iletirken  $TE_{10}$  modunu iletmeyecek şekilde tasarlanmıştır. K bandında çalışan ikinci kapının konumu değiştirilerek uygun konuma getirilmiş ve tasarımda kullanılan farklı kuplajlar ile hem iletim hem de alım en iyi olacak şekilde ayarlamalar yapılmıştır (Şekil 7.7). Bu parametreler doğrultusunda OMT oluşturulmuş ve simülasyonu yapılmıştır.



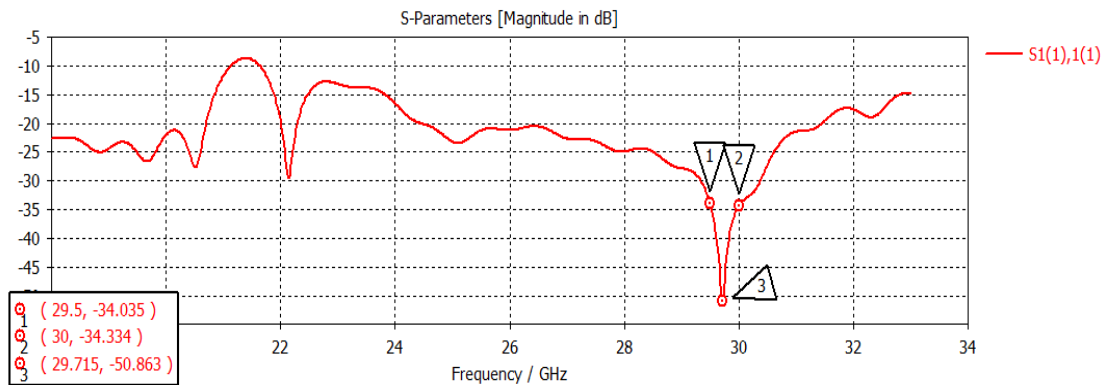
Şekil 7. 7 OMT alıcı kısım (Rx) kupağı

### 7.1.2 OMT Simülasyon Sonuçları

OMT simülasyonu için CST programından yararlanılmıştır. Grafik okumada yardımcı olacak değerler;

- $S_{11}$  Birinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması
- $S_{31}$  Birinci kapıdan gönderilen sinyalin üçüncü kapıya iletimi
- $S_{21}$  Birinci kapıdan gönderilen sinyalin ikinci kapıya iletimi
- $S_{12}$  İkinci kapıdan gönderilen sinyalin birinci kapıya iletimi
- $S_{32}$  İkinci kapıdan gönderilen sinyalin üçüncü kapıya iletimi
- $S_{22}$  İkinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması

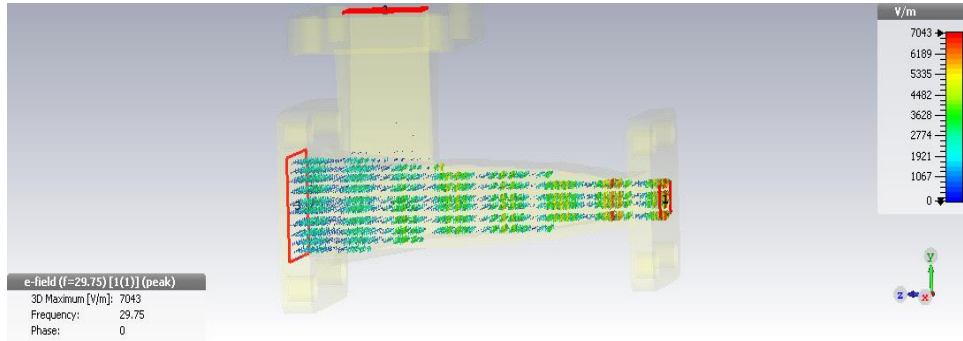
dır.



Şekil 7. 8  $S_{11}$  birinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması

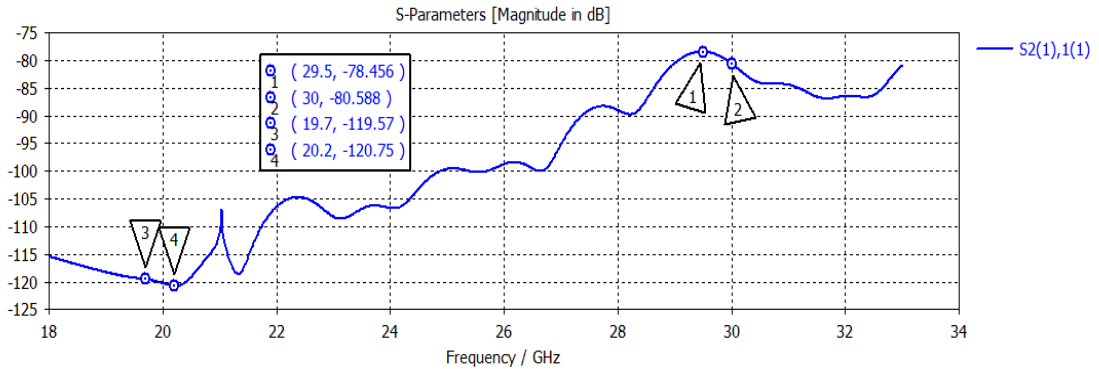
Şekil 7.8'deki grafik birinci kapıdan gönderilen sinyalin yansımasını göstermektedir. Bu değer -30 dB'nin altında olması istenmektedir. Ka bandı

istenilen frekans (29.5-30 GHz) aralığında sinyalin yansımalarının -34 dB'nin altında olduğu görülmektedir. Sinyal 29.715 GHz'de -50.863 dB ye kadar inmektedir. Bu grafikte de görüleceği gibi geri yansıma kayıpları istenilen değerlere göre iyidir.



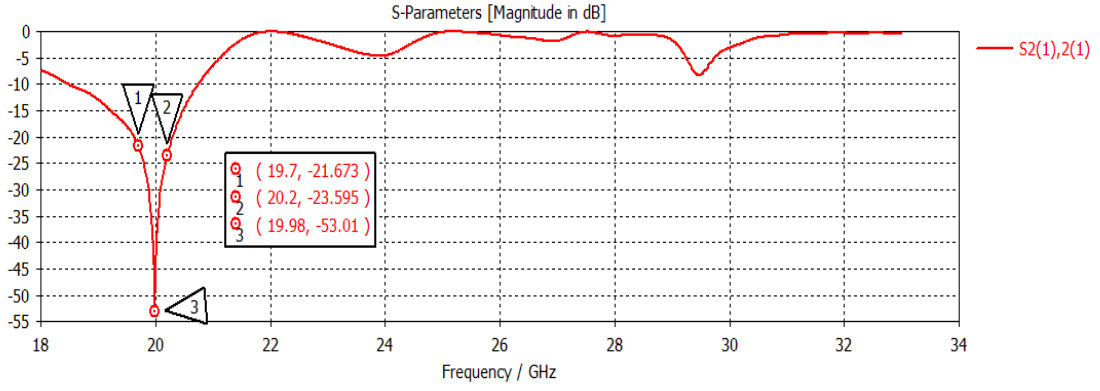
**Şekil 7. 9**  $S_{31}$ 'in 29.75 GHz'de 3D gösterimi

Şekil 7.9'da sinyalin birinci kapıdan ikinci kapıya 3D olarak iletilip iletilmediği gözükmemektedir. Şekil 7.9'da görüleceği üzere sinyal direkt üçüncü kapıya gitmekte ikinci kapıya iletilmemektedir.



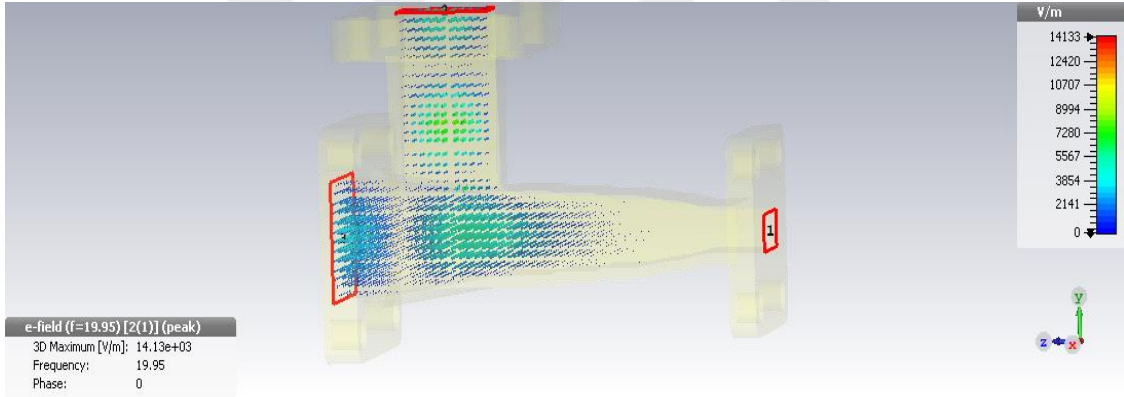
**Şekil 7. 10**  $S_{21}$  çapraz izolasyon grafiği

Şekil 7.10'da birinci kapıdan gönderilen sinyalin ikinci kapıya iletilip iletilmediğini göstermektedir. Bu değerlerin -80 dB'nin altında olması istenmektedir. Şekil 7.10'da görüleceği üzere 29.5-30 GHz arası sinyal -80 dB civarındadır.



**Şekil 7. 11**  $S_{22}$  ikinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması

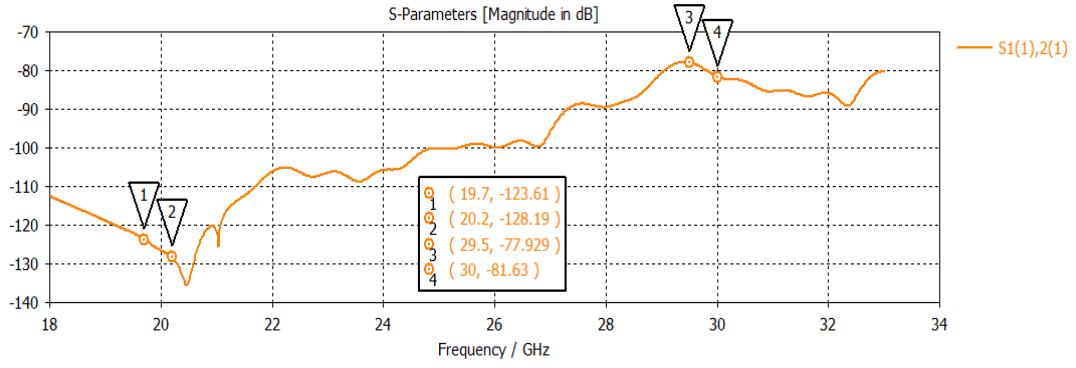
Şekil 7.11'deki grafik ikinci kapıdan gönderilen sinyalin yansımasını göstermektedir. Bu değer -20 dB'nin altında olması istenmektedir. K bandı istenilen frekans (19.70-20.2 GHz) aralığında sinyalin yansımasının -21.6 dB'nin altında olduğu görülmektedir. Sinyal 19.98 GHz'de -53 dB ye kadar inmektedir. Bu grafikte de görüleceği gibi geri yansıma kayıpları istenilen değerlere göre iyidir.



**Şekil 7. 12**  $S_{32}$ 'nin 19.95 GHz'de 3D gösterimi

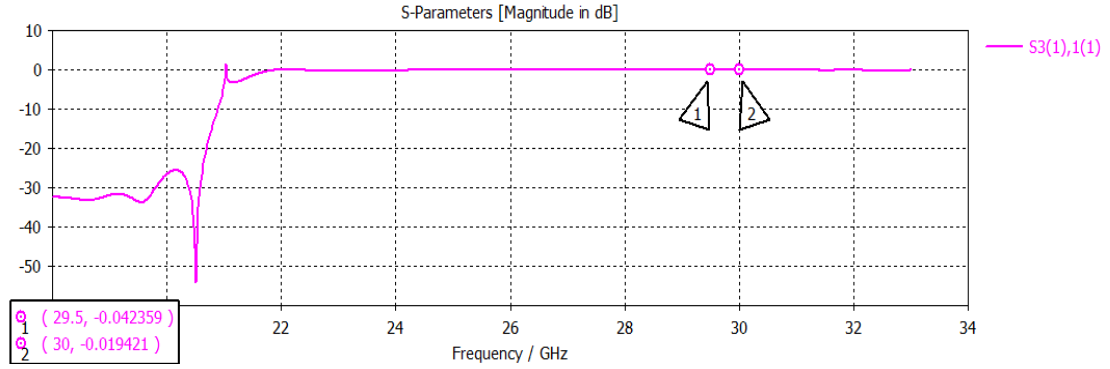
Şekil 7.12'de sinyalin ikinci kapıdan birinci kapıya 3D olarak iletilip iletilmediği gözükmemektedir. Şekil 7.12'de görüleceği üzere sinyal direk üçüncü kapıya gitmekte birinci kapıya iletilmemektedir.





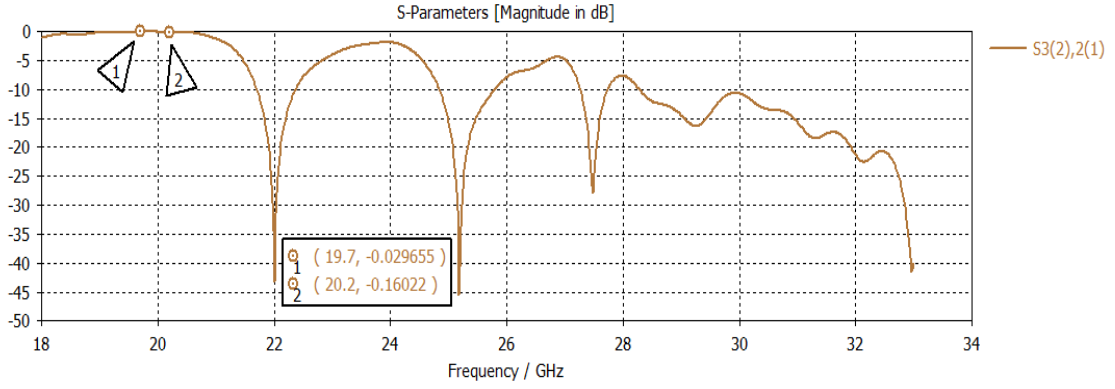
**Şekil 7. 13**  $S_{12}$  çapraz izolasyon grafiği

Şekil 7.13'de ikinci kapıdan gönderilen sinyalin birinci kapıya iletilip iletilmediğini göstermektedir. Bu değer -80 dB'nin altında olması istenmektedir. Şekil 7.13'de görüleceği üzere 19.7-20.2 GHz arası sinyal -125 dB civarındadır. Bu iyi bir izolasyon sağlandığını gösterir.



**Şekil 7. 14**  $S_{31}$  birinci kapıdan gönderilen sinyalin üçüncü kapıya iletimi

Şekil 7.14'de birinci kapıdan gönderilen sinyalin üçüncü kapıya iletilip iletilmediğini göstermektedir. Bu değer -0.2 dB'nin üstünde olması istenmektedir. Şekil 7.14'de görüleceği üzere 29.5-30 GHz arası sinyal -0.042 dB'nin üzerindedir. Bu çok iyi bir iletim olduğunu göstermektedir.



**Şekil 7. 15**  $S_{32}$  ikinci kapıdan gönderilen sinyalin üçüncü kapıya iletimi

Şekil 7.15’de ikinci kapıdan gönderilen sinyalin üçüncü kapıya iletilip iletilmediğini göstermektedir. Bu değerin -0.2 dB’nin üstünde olması istenmektedir. Şekil 7.15’de görüleceği üzere 19.7-20.2 GHz arası sinyal -0.16 dB’nin üzerindedir. Bu çok iyi bir iletim olduğunu göstermektedir.

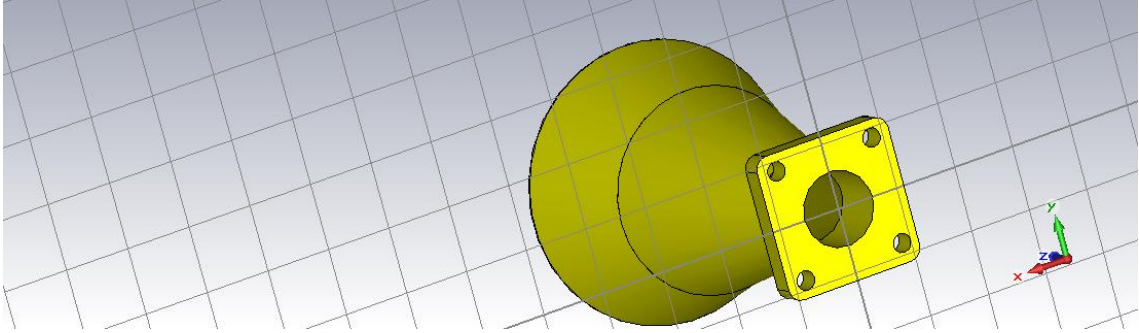
## 7.2 Huni (Horn) Tasarımı

Huni antenler uzun zamandır farklı uygulamalarda kullanılan anten türlerindedir [22]. E düzlemde sektörel huni, H düzlemde sektörel huni, piramit huni ve konik huni gibi geometriler ile farklı tasarımları mevcuttur [23]. Huni antenler askeri uygulamalar ile uydu alanlarında, genellikle reflektör ve lens anten sistemini beslemek üzere kullanılmaktadırlar. Huni antenin, yüksek kazanç, düşük yan kulak seviyesi (Side Lobe Level-SLL) ve dar bir hüzmeye sahip olması istenir. Huni antenin polarizasyonu da besleme amaçlı uygulamalarda kritik olabilir [24].

### 7.2.1 Huni (Horn) Tasarımında İzlenen Yol

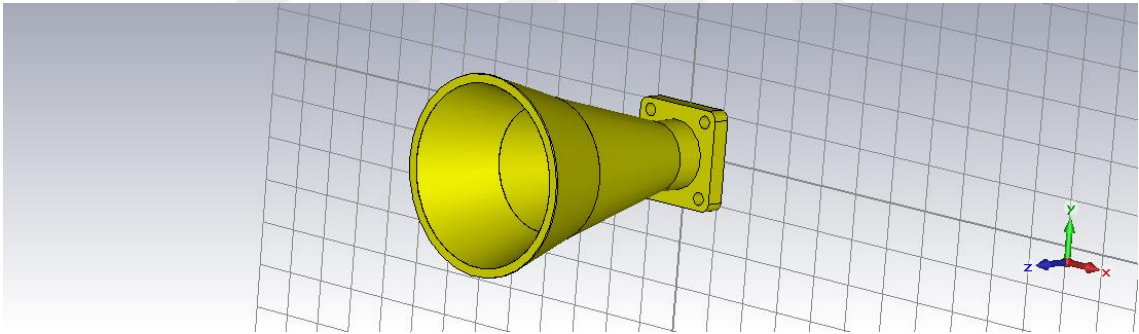
Huni anten tasarımı için farklı yapılar mevcuttur. Bu çalışmada üretilen anten Pickett Potter konik huni yapısına sahiptir [24]. Pickett Potter antende çift mod kullanılabilir. Bunlardan birisi dominant mod olan  $TE_{11}$ , diğeri ise yüksek dereceli olan  $TM_{11}$  modudur. Antenin dairesel dalga kılavuzunun yarıçapı  $TE_{11}$ ’i iletecek kadar büyük,  $TM_{11}$ ’i sönmeyecek kadar da küçük olmalıdır [25]. Bundan dolayı WC-44 standardına uygun kılavuz boyutları kullanılmıştır. OMT’den gelen sinyalin gireceği yerin yarıçapı 5.78 mm olarak tasarıma başlanmıştır (Şekil 7.16). Çalışma

frekansı ve çalışma bandına bağı olarak konik anten boyutu değişir. Bundan dolayı öncelikle çalışma bant aralığına göre anten boyutları hesaplanmıştır.



**şekil 7. 16** Huni anten 3D yapısı arka kısım

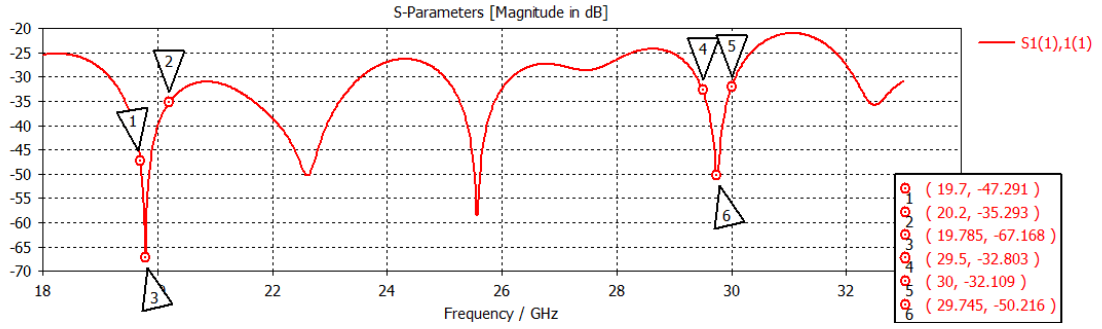
Tasarım S-parametrelerini sağlayacak şekilde, kazancın yüksek ve yan kulak seviyesinin düşük olacağı şekilde ayarlandı. Huni'nin çanağa sinyali göndereceği kısım (n kısım) yarıçapı 20 mm olarak hesaplandı şekil (7.17). Huni'nin boyu ise 64.12 mm olarak hesaplandı.



**şekil 7. 17** Huni anten 3D yapısı n kısım

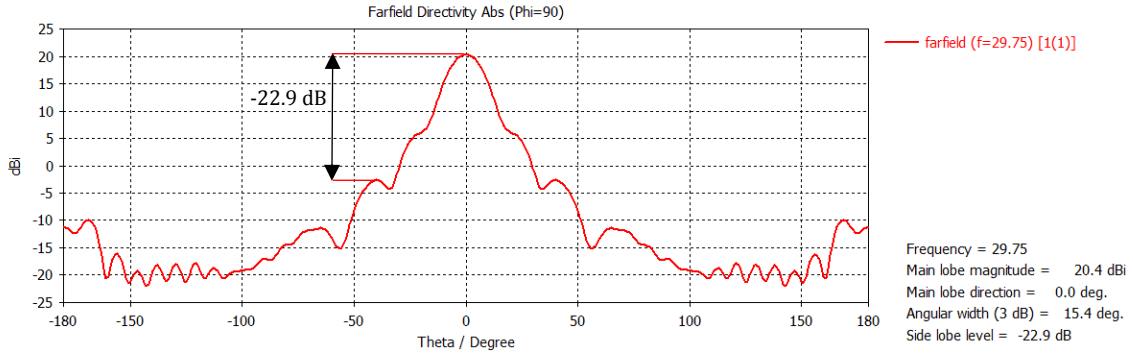
### 7.2.2 Huni (Horn) Simülasyon Sonuçları

Huni tasarımının öncelikle çalışma frekanslarındaki S-parametrelerini sağlaması lazım. şekil 7.18'de görüldüğü gibi K bandı (19.7-20.2 GHz) ve Ka bandı (29.5-30 GHz) frekansları aralığında  $S_{11}$  -32 dB'nin altındadır. Bu bize bu frekans aralıklarında sinyalin yansımasının az olduğu ve iyi bir şekilde iletildiğini gösterir.

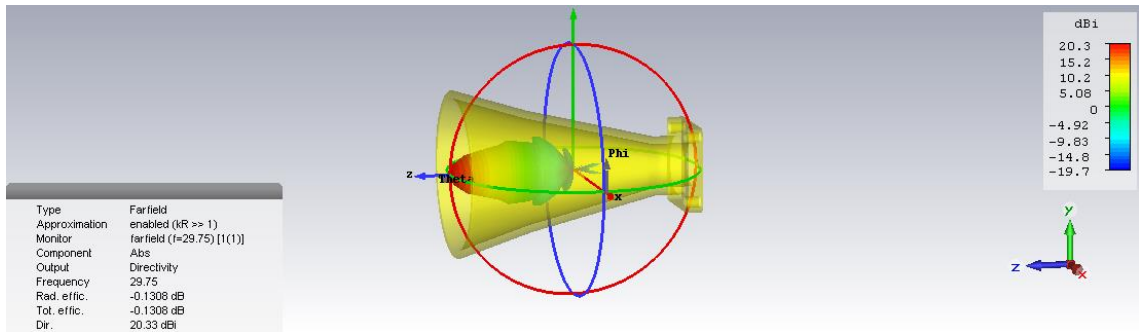


**Şekil 7. 18** Huni  $S_{11}$  geri yansımaya grafiği

Huni tasarımının diğer önemli parametreleri yan kulak seviyesi ve kazançtır. İletim bandında Şekil 7.19'da görüleceği gibi 29.75 GHz'de kazanç 20.4 dB ve yan kulak seviyesi -22.9 dB dir. Bu sonuçlar istenilen değerlere uygundur.



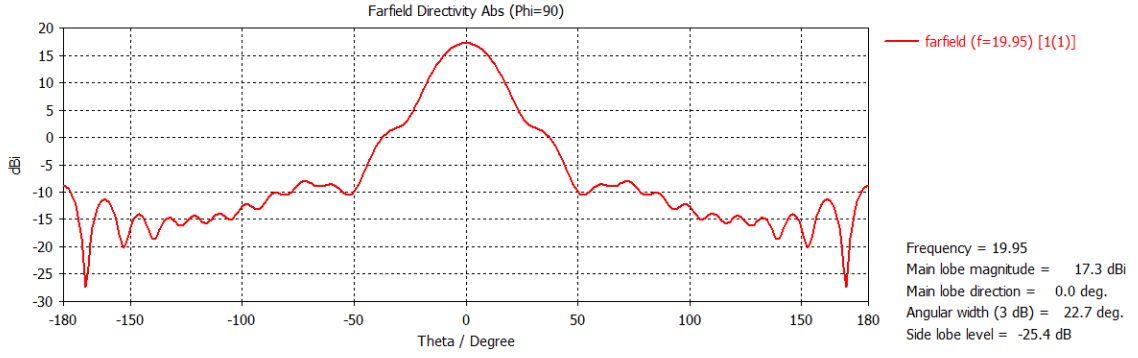
**Şekil 7. 19** Huni 29.75 GHz'deki uzak alan grafiği



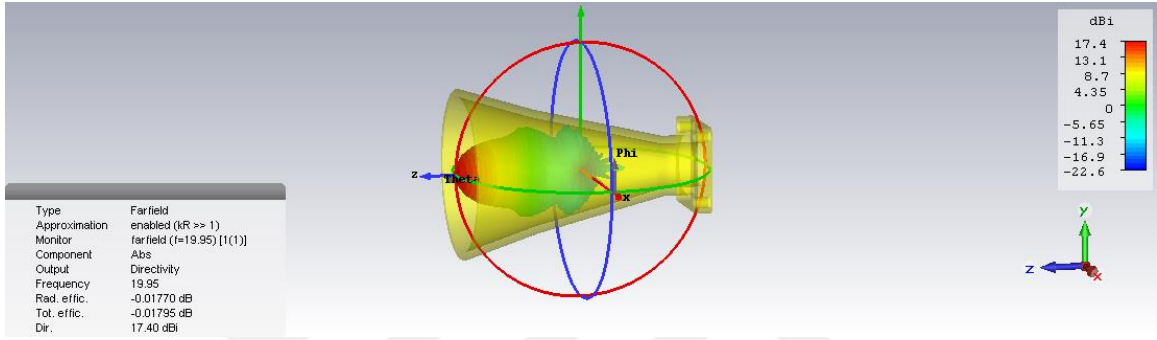
**Şekil 7. 20** Huni 29.75 GHz'deki 3D uzak alan gösterimi

Şekil 7. 20'de CST programı ile elde edilen huninin 3 boyutlu simülasyon sonucu gösterilmiştir.

Şekil 7.21'de görüleceği üzere alım bandında 19.95 GHz'de kazanç 17.3 dB ve yan kulak seviyesi -25.4 dB'dir. Bu sonuçlar istenilen değerlere uygundur.



**Şekil 7. 21** Huni 19.95 GHz'deki uzak alan grafiği



**Şekil 7. 22** Huni 19.95 GHz'deki 3D uzak alan gösterimi

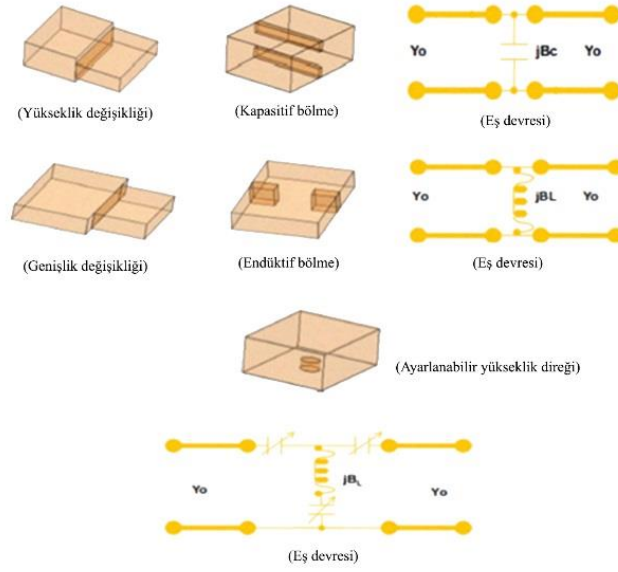
Şekil 7. 22'de CST programı ile elde edilen huninin 3 boyutlu simülasyon sonucu gösterilmiştir.

## 7.3 Filtre Tasarımı

Alıcı kısmında bulunan kısım yüksek güç iletiminden etkilenmemesi ve vericiden gönderilen dik polarizasyondaki kuvvetli sinyalin normalde yatay polarizasyonda çalışan alıcı kısmını etkilememesi için iletim bandını reddeden filtre (transmit reject filter) kullanılmıştır. Bu sayede yapıda oluşabilecek bozulmalar engellenmiş olur.

### 7.3.1 Filtre Tasarımında İzlenen Yol

K bandında iletim yapıp Ka bandını geçirmeyecek şekilde iletim bandını reddeden filtre tasarlandı. Tasarımda boyutlar ve yapı aşağıda belirtilen özelliklere göre hesaplandı.



Şekil 7.23 Kuplaj yapıları

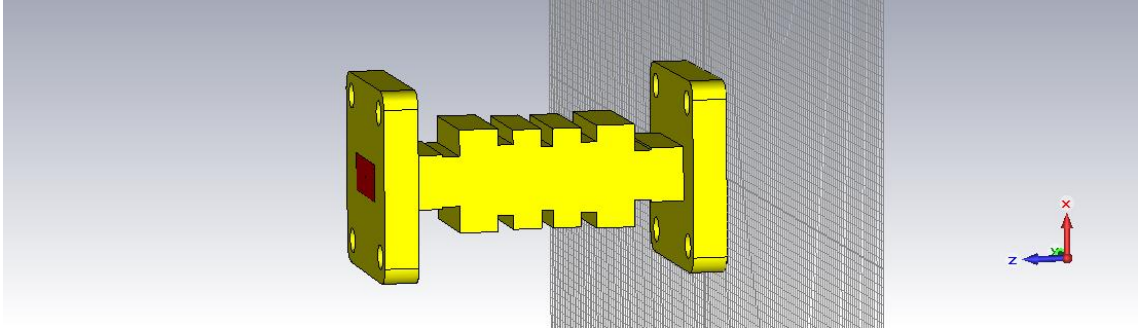
$$Z = \frac{377\pi b}{2a} \cdot \frac{\lambda_g}{\lambda_0} \quad (7.7)$$

Giriş empedansı (7.7) formülü ile hesaplandı.

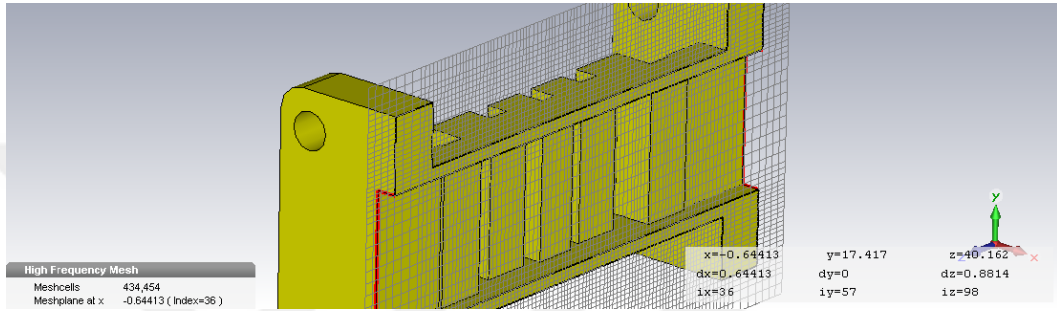
$$L_{res_i} |_{i..N} = \frac{\lambda_g}{2} \left( 1 + \frac{\phi_{i-1,i} + \phi_{i,i+1}}{2\pi} \right) \quad (7.8)$$

(7.8) formülü ile rezonatörlerin boyu hesaplandı.

Filtre K bandında çalışacağı için kılavuzun girişi WR-42 standardı boyutlarına uygun olarak tasarıma başlandı. Tasarımda kolaylık sağlaması amacı ile öncelikle AWR Microwave programı kullanıldı. AWR programında elde edilen rezonatör boyutları CST programında kullanıldı. İlk adım uzunluğu 6,82 mm yüksekliği 4,32 mm, ikinci adım uzunluğu 4mm yüksekliği 3,8 mm, üçüncü adım uzunluğu 2,5 mm yüksekliği 10 mm, dördüncü adım uzunluğu 3,8 mm yüksekliği 6,2 mm ve beşinci adım uzunluğu 1,35 mm yüksekliği 9,6 mm olacak şekilde tasarım 3 boyutlu şekilde oluşturuldu (Şekil 7.24-25).



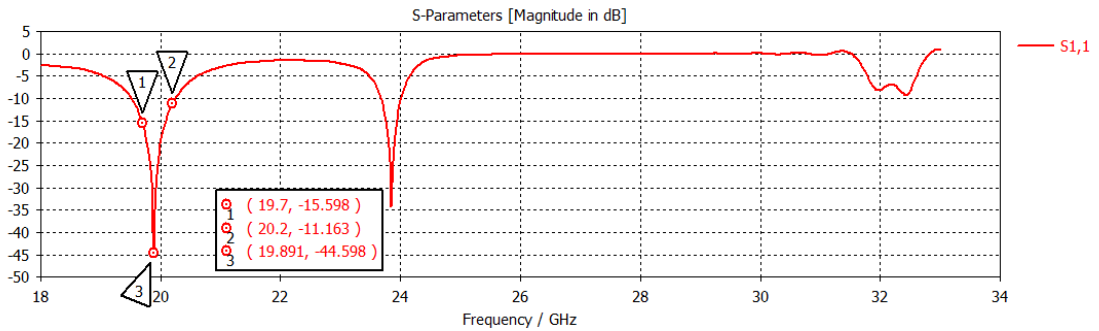
Şekil 7. 24 K bant filtrenin 3D yapısı



Şekil 7. 25 K bant filtrenin 3D iç yapısı

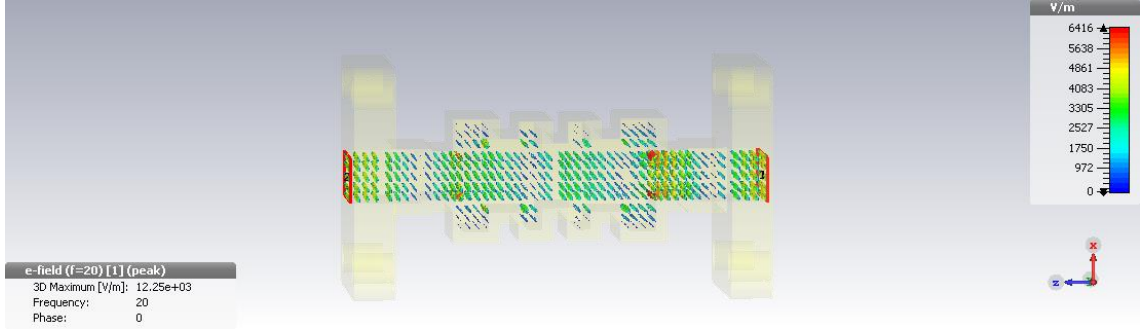
### 7.3.2 Filtre Simülasyon Sonuçları

Tasarlanan filtrenin K bandında iletim yapması, Ka bandında ise iletim yapamaması gerektir. Şekil 7.26'da görüleceği üzere 19.7-20.2 GHz arasında yansımaya -11 dB'nin altındadır. Bu sonuçlara bakarak filtrenin K bandında iletim yaptığı görülür (Şekil 7.27).



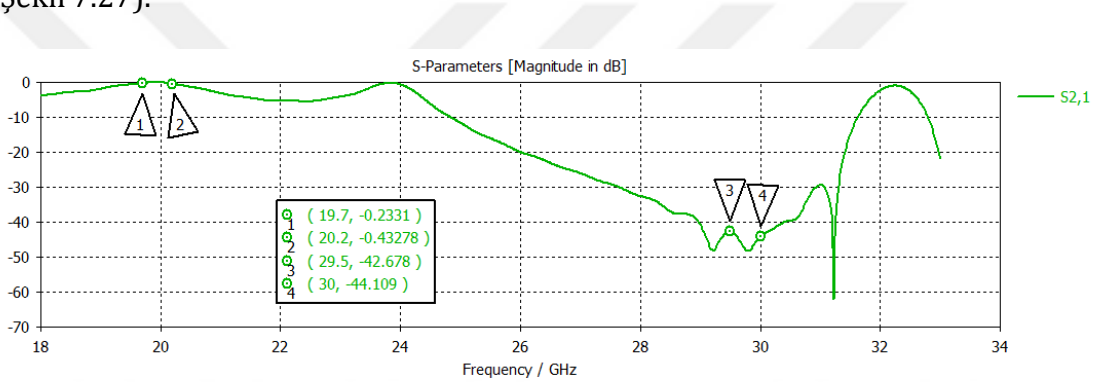
Şekil 7. 26  $S_{11}$  K bant filtrenin yansımaya grafiği





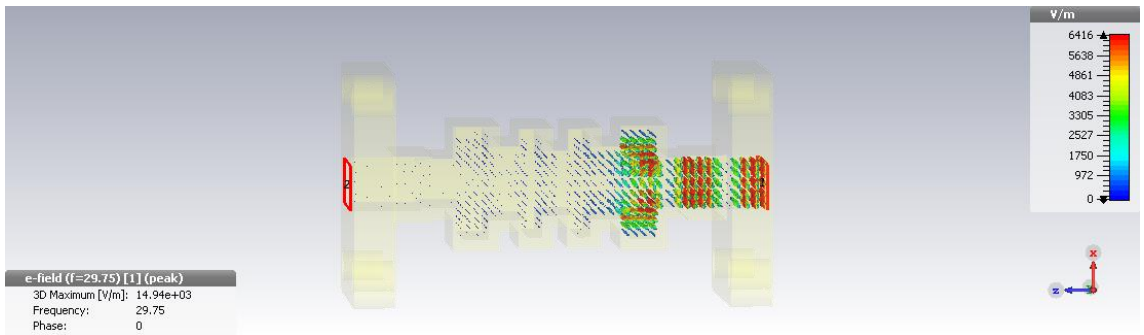
**Şekil 7. 27** Filtrede 19.95 GHz'deki sinyalin iletimi

Şekil 7.28'da görüleceği üzere 19.7-20.2 GHz arasında iletimin  $-0.43$  dB'nin üzerinde olduğu görülür. Bu sonuçlara bakarak filtrenin K bandında iletim yaptığı görülür (Şekil 7.27).



**Şekil 7. 28**  $S_{12}$  K bant filtrenin iletim grafiği

Bununla birlikte Şekil 7.26'da görüleceği üzere Ka bandında 29.5-30 GHz arasında yansıma  $0$  dB'dir ve Şekil 7.28'de görüleceği üzere 29.5-30 GHz arasında iletim  $-42.67$  dB'nin altındadır. Bu bize Ka bandında filtrenin iletim yapmadığını ve istenilen şekilde çalıştığını gösterir (Şekil 7.29).



**Şekil 7. 29** Filtrede 29.75 GHz'deki sinyalin iletimi

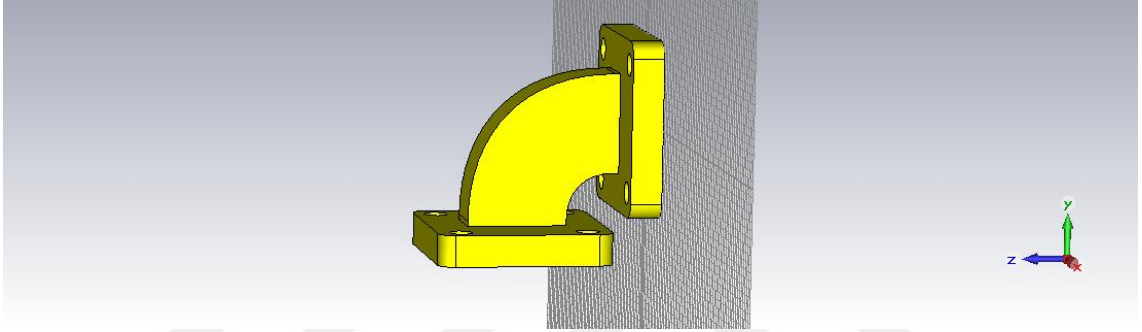


## 7.4 Dirsek (Bend) Tasarımı

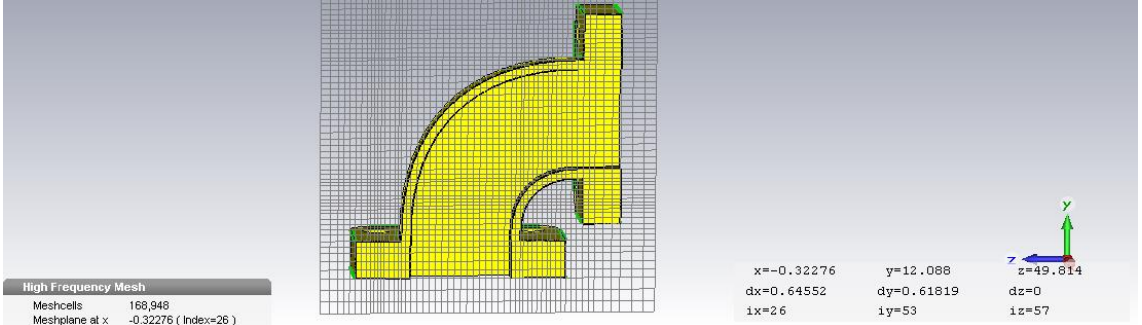
Ofset anten yapısında besleme kısmının çanağa engel olmaması için dirsek kullanılarak, alıcı (Rx) kısmının iletim (Tx) kısmına paralel olacak şekilde monte edilmesi sağlandı.

### 7.4.1 Dirsek (Bend) Tasarımında İzlenen Yol

Dirsek tasarımı alıcı kısmında olacağı için dalga kılavuzu WR-42 standardında K bandına uygun seçildi. Simülasyonda yapılan düzenlemeler ile tasarımın 19.7-20.2 GHz’de yansımalarının düşük, iletiminin iyi olması sağlandı.



Şekil 7. 30 K bant dirsek 3D yapısı

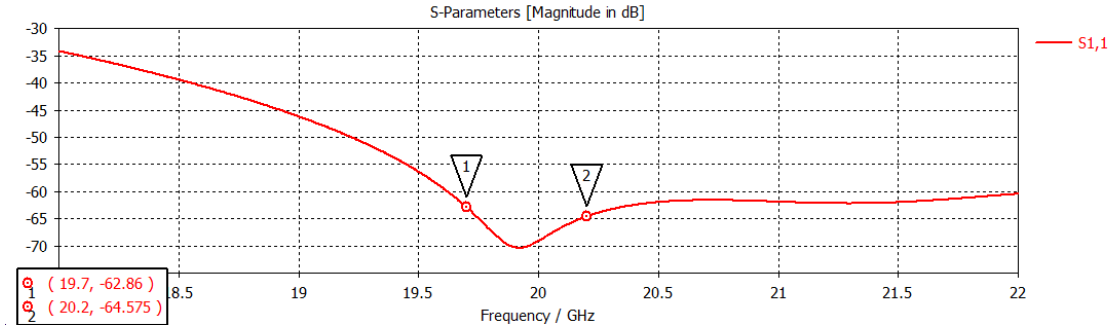


Şekil 7. 31 K bant dirsek 3D iç yapısı

Şekil 7.30 ve Şekil 7.31’de CST programında elde edilen dirsek kısmının 3 boyutlu gösterimine yer verilmiştir.

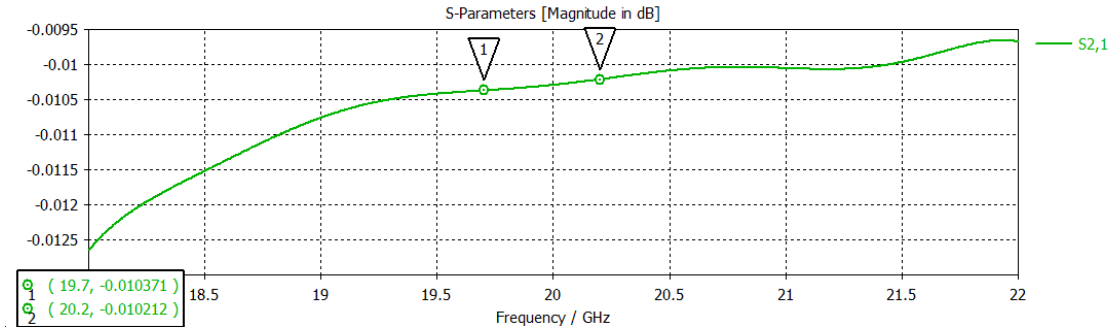
### 7.4.2 Dirsek (Bend) Simülasyon Sonuçları

Tasarım sonuçlarından görüleceği üzere  $S_{11}$  (yansıma değeri) -62 dB’nin altındadır. Bu sonuç sinyalin kılavuz içerisinde çok az geri yansıdığını gösterir (Şekil 7.32).

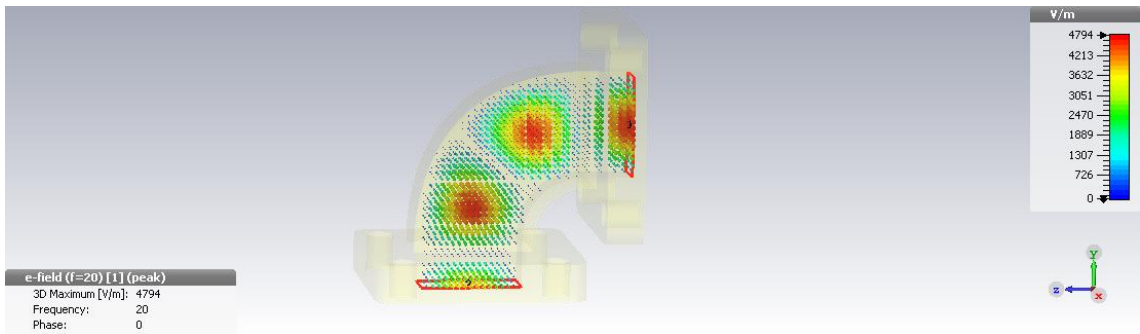


Şekil 7. 32  $S_{11}$  K bant dirseğın yansıma grafiğı

Şekil 7.33'de dirsek tasarımının  $S_{12}$  (iletim değeri) görülmektedir. Bu değeri -0.01 dB'nin üzerindedir. Bu sonuca bakarak sinyalin dirsekte K bandında geri yansımadan iletiildiğı söylenebilir (Şekil 7.34).



Şekil 7. 33  $S_{12}$  K bant dirseğın iletim grafiğı



Şekil 7. 34 Dirsekte 19.95 GHz'deki sinyalin iletimi

## 7.5 Çanak (Dish) Tasarımı

Anten besleme tasarımında diğeri beslemelere göre çanağın önünde sinyale engel olmaması, kar ve su tutmaması sebebiyle küçük çaplı (120 cm'ye kadar) antenlerde ofset besleme kullanılır. Tez çalışmasında anten yapısı olarak 70 cm çapında ofset

parabolik anten kullanılmıştır. Bu sayede çanağın boyutu küçülmüş, güçlü ışımaya yapabileme ve düşük yan kulak seviyesi elde etme imkânı sağlanmış oldu.

### 7.5.1 Çanak (Dish) Tasarımında İzlenen Yol

Tasarımda MATLAB programı yardımı ile parabol boyutu hesaplandı (Şekil 7.35). Hesaplanan parabol reflektör yapısı CST programında gerçekleştirildi. Tasarımda kullanılan MATLAB kodu aşağıdaki gibidir;

```
clc ;  
  
D=700 ;  
  
f=1.2*D ;  
  
Dsup=40 ;  
  
z1=Dsup^2/(4*f) ;  
  
fiL=2*acos(4*f/(sqrt(16*f^2+4*Dsup^2))) ;  
  
fiL=fiL*180/pi ;  
  
z2=(D+Dsup)^2/(4*f) ;  
  
Df=sqrt((z2-z1)^2+(D)^2) ;  
  
fiC=(180/pi)*atan(D/(z2-z1)) ;  
  
H=Dsup+D/2 ;  
  
zC=(H)^2/(4*f) ;  
  
fiF=(180/pi)*atan(H/(f-zC)) ;  
  
gL=sqrt((f-z1)^2+Dsup^2) ;  
  
gU=sqrt((f-z2)^2+(Dsup+D)^2) ;  
  
gC=sqrt((f-zC)^2+(Dsup+D/2)^2) ;  
  
fiU=(180/pi)*2*acos(4*f/(sqrt(16*f^2+4*(D+Dsup)^2))) ;  
  
fiE=(fiU-fiL)/2 ;  
  
fi0=fiL+fiE ;
```

```

fprintf('yansıtılan dalğanın oluşturduğu daire şeklindeki görüntüsünün çapı=%f
',D)
fprintf('antenin gerçek fiziksel çapı=%f ',Df)
fprintf('odak uzaklığı=%f\n\n',f)
fprintf('odak noktasının parabolik reflektörün alt ucuna uzaklığı=%f ',gL)
fprintf('odak noktasının parabolik reflektörün üst ucuna uzaklığı=%f\n',gU)
fprintf('odak noktasının parabolik reflektörün görüntü merkezine (zC)
uzaklığı=%f\n\n',gC)
fprintf('offset antenin alt ucunun z1 e karşı gelen x değeri=%f\n',Dsup)
fprintf('parabolik reflektörün alt ucunun z eksenine izdüşümü=%f\n',z1)
fprintf('parabolik reflektörün üst ucunun z eksenine izdüşümü=%f\n',z2)
fprintf('H yüksekliğine ait z değeri zC=%f\n',zC)
fprintf('H=x=D/2+D' noktası=%f\n\n',H)
fprintf('offset acısının tümleyeni=%f\n ',fiC)
fprintf('parabolik reflektörün alt ucunu odağa bağlayan doğrunun (gL) z eksenini ile
yaptığı acı=%f\n',fiL)
fprintf('z doğrultusunun x=D/2+D' noktasından odak noktasına çizilen doğruyla
yaptığı acı=%f\n',fiF)
fprintf('odak noktasının parabolik reflektörün üst ucuyla yaptığı açı=%f\n',fiU)
fprintf('offset anteni besleyen koninin tepe acısının yarısı =%f\n',fiE)
fprintf('offset anteni besleyen koninin tam ortasından geçen doğrultunun (max
ışım doğrultusu) z eksenini ile yaptığı açı=%f\n\n',fi0)
% parabol testi odaktan çıkan ışınların z eksenine dik herhangi bir eksenden
geçerken kat ettikleri mesafe eşit olmalı
disp('program çalışıyor ise aşağıdaki sayılar aynı olmalı')
gL+f-z1
gU+f-z2

```

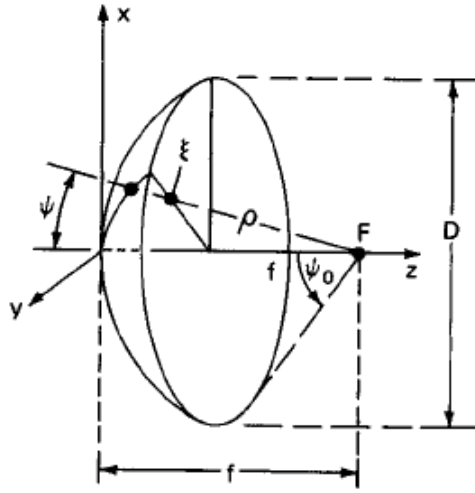
$gC+f-zC$

disp('sonuç olarak üst uç ve alt uç için yol kayıpları verilir')

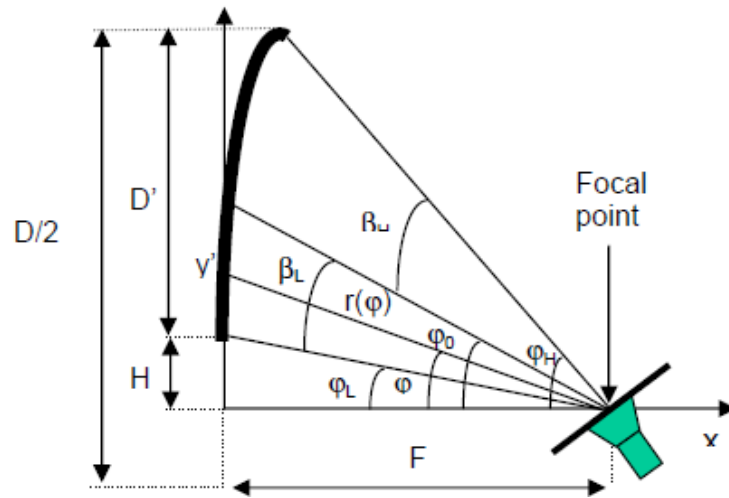
$ETU=20*\log(gC/gU)$

$ETL=20*\log(gC/gL)$

Şekil 7.37'de görülen çanak CST programında  $z=(x^2+y^2)/4f$  formülünden yararlanılarak ve MATLAB programında elde edilen odak uzaklığı (84 cm), besleme açısı  $25^\circ$  ve reflektör yüksekliği parametreleri de eklenerek parabolden reflektör kesiti çıkartılarak reflektör elde edilmiş oldu (Şekil 7.36).

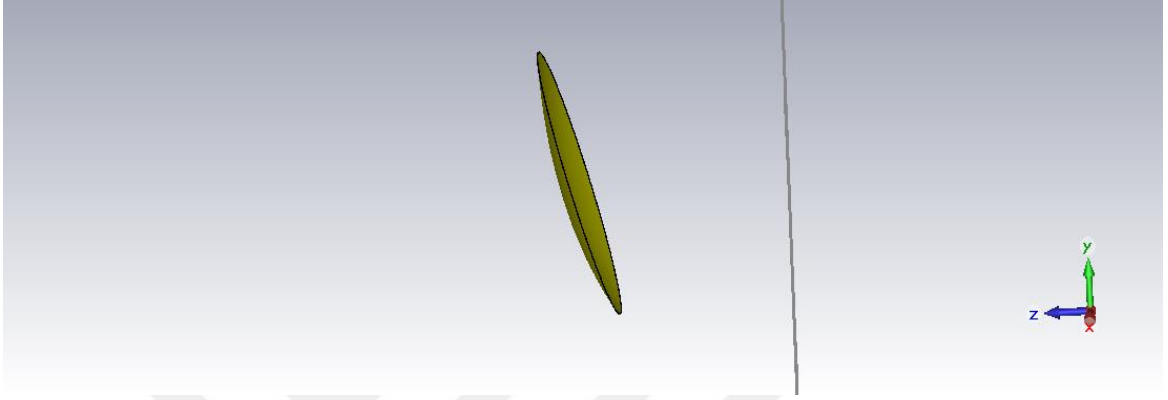


Şekil 7. 35 Parabol yapısı



Şekil 7. 36 Parabolden elde edilen çanak kesiti gösterimi

Şekil 7.36'da 'F' odak uzaklığı, 'H' çanağın yüksekliği, 'D' çanağın fiziksel çapı, 'D' çanaktan yansıyan ışınların oluşturduğu görüntü çapı, ' $\beta_L$ ' çanağın ortasından geçen doğrunun çanağın alt ucu ile yaptığı açı, ' $\beta_H$ ' çanağın ortasından geçen doğrunun çanağın üst ucu ile yaptığı açı ve ' $\varphi_0$ ' offset anteni besleyen koninin tam ortasından geçen doğrultunun (max ışıma doğrultusu) x eksenine ile yaptığı açı yani anteni yada beslemeyi yerleştirirken yapacağımız döndürme miktarının açısıdır.



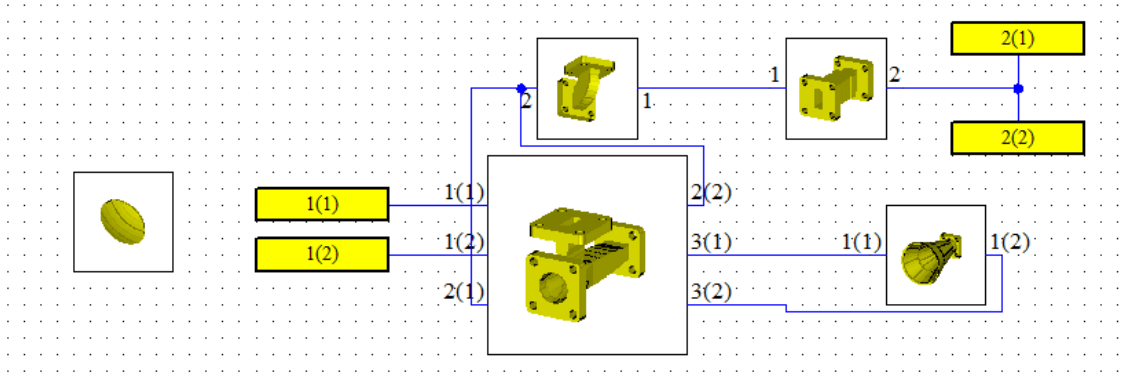
Şekil 7. 37 CST programında tasarlanan reflektör

## 7.6 Ön Uç Tasarımı

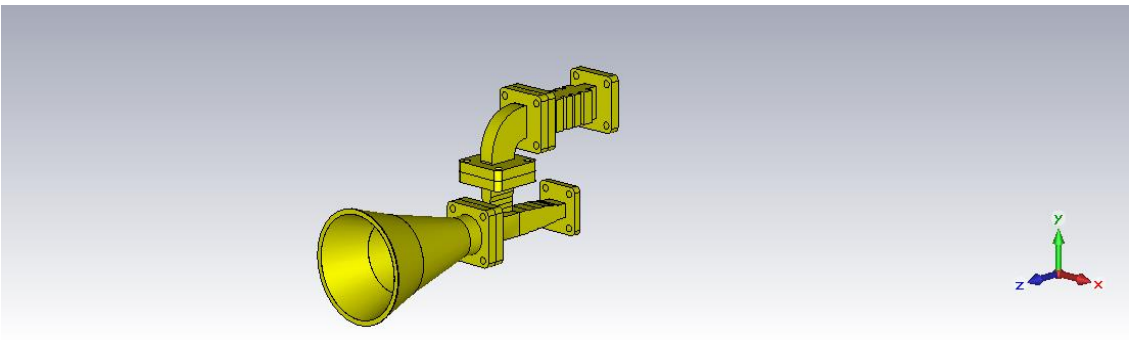
### 7.6.1 Ön Uç Tasarımında İzlenen Yol

CST programında tasarlanan OMT, huni, filtre, dirsek ve çanak elemanları uygun şekilde birleştirildi (Şekil 7.38). Birleştirme işlemi sonrası simülasyonu gerçekleştirildi. Simülasyon analizi için CST programının integral çözüm yöntemi kullanıldı [26]. Bunun sebebi yapı çok büyük olduğu için mesh (örgü) sayısı milyonları buluyor ve yeterli hafıza (RAM) ve işlemci kapasitesi zaman domaini (time domain) çözümünde sağlanamıyordu.

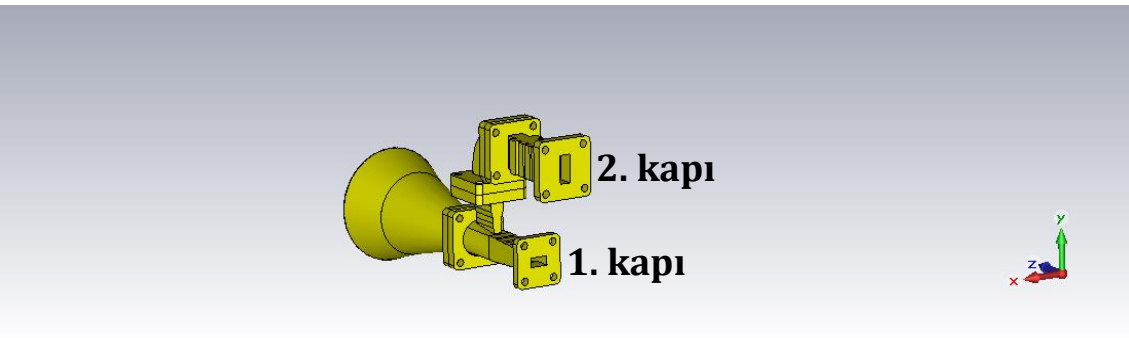
Çanak hariç tutularak yapılan simülasyon sonuçlarından elde edilen uzak alan verileri çanak ile yapılan simülasyona kaynak olarak aktarıldı. Aktarılan veriler ile birlikte ön uç integral çözümü yapıldı.



**Şekil 7. 38** Elemanların CST programında birleştirilmesi

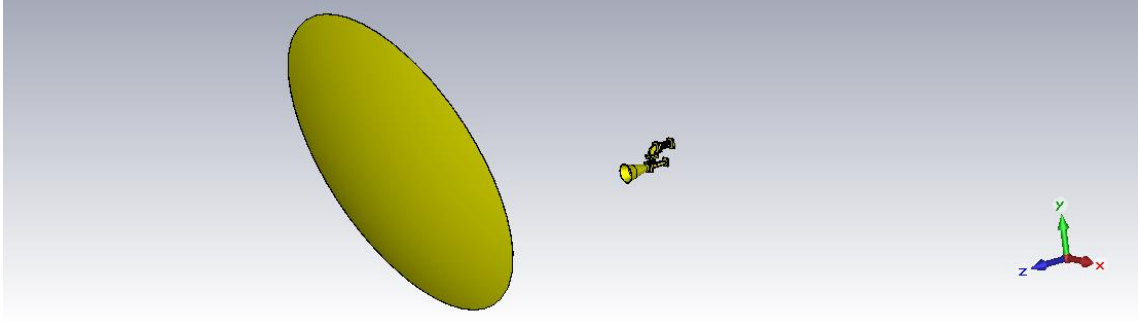


**Şekil 7. 39** Ön uç besleme önden görünümü

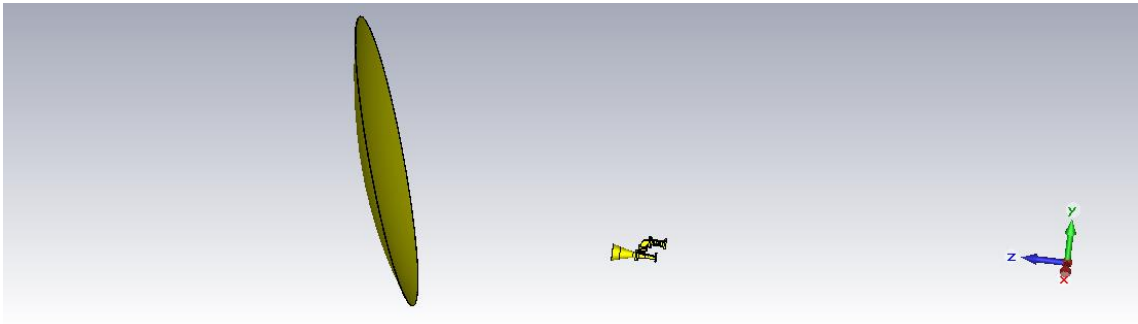


**Şekil 7. 40** Ön uç besleme arkadan görünümü

Şekil 7.39 ve şekil 7.40'da antenin besleme kısmının 3 boyutlu görselleri gösterilmiştir. Besleme kısmında horn, OMT, bend ve filtre elemanları yer almaktadır.



Şekil 7. 41 Ön uç anten önden görünümü

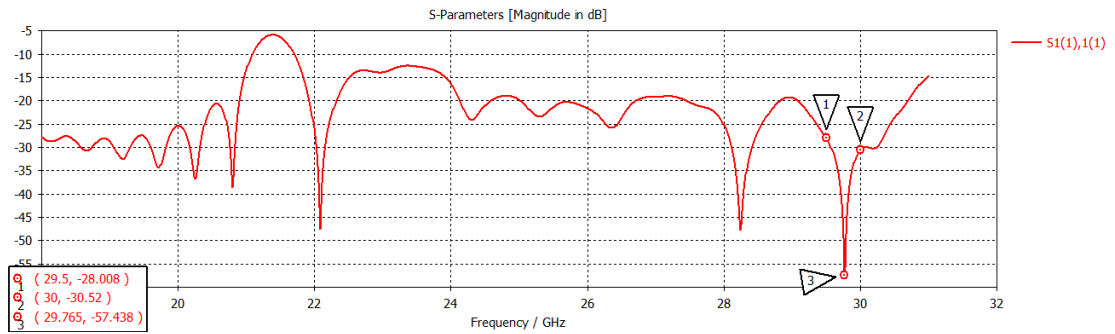


Şekil 7. 42 Ön uç anten yandan görünümü

Şekil 7.41 ve şekil 7.42’de antenin 3 boyutlu görselleri gösterilmiştir. Matlab kodları ile ölçüleri çıkarılan ve odağı hesaplanan çanağın odak noktasına ( $f=84$  cm) besleme kısmı yerleştirilmiştir.

## 7.6.2 Ön Uç Simülasyon Sonuçları

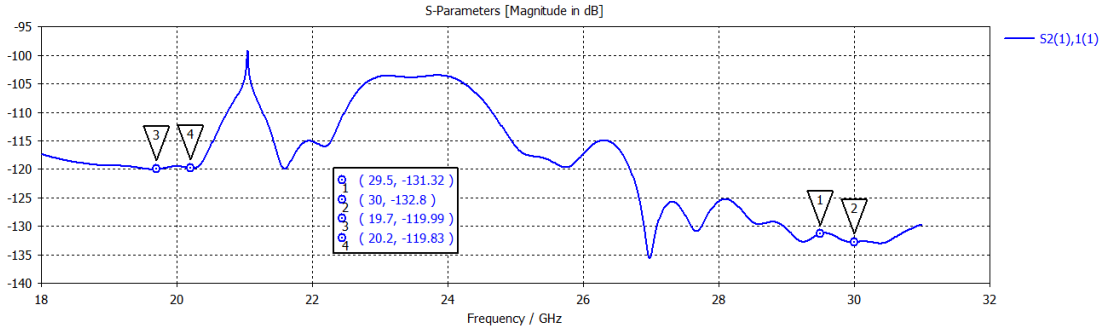
### 7.6.2.1 S-Parametreleri Simülasyon Sonuçları



Şekil 7. 43  $S_{11}$  birinci kapıdan gönderilen sinyalin yansımaları

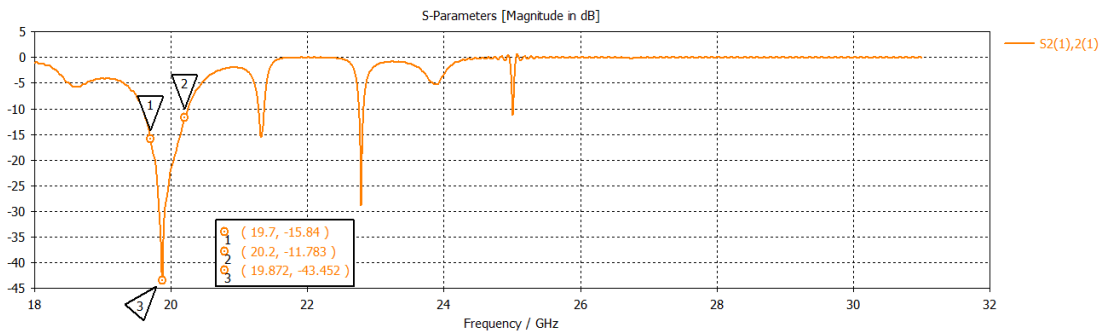


Şekil 7.43'deki grafik birinci kapıdan gönderilen sinyalin yansımısını göstermektedir. Bu değerin -30 dB'nin altında olması istenmektedir. Ka bandı istenilen frekans (29.5-30 GHz) aralığında sinyalin yansımalarının -29 dB'nin altında olduğu görülmektedir. Sinyal 29.765 GHz'de -57.438 dB ye kadar inmektedir.



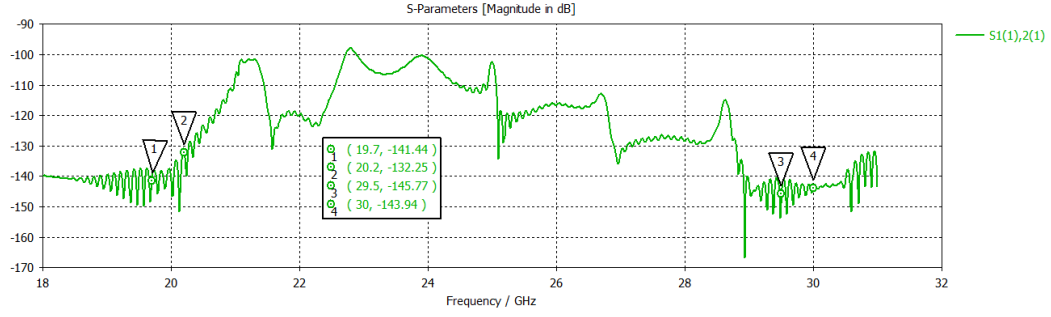
**Şekil 7. 44**  $S_{21}$  çapraz izolasyon grafiği

Şekil 7.44'de birinci kapıdan gönderilen sinyalin ikinci kapıya iletilip iletilmediğini göstermektedir. Bu değerin -80 dB'nin altında olması istenmektedir. Şekil 7.44'de görüleceği üzere 29.5-30 GHz arası sinyal -131 dB civarındadır. Şekil 7.10'da bu değer -80 dB civarında iken tasarıma iletim bandını reddeden filtre (transmit reject filter) eklenmesi ile -131 dB'ye düştüğü görülmüştür. Bu bize iletim bandını reddeden filtrenin (transmit reject filter) amacına uygun çalıştığını göstermektedir.



**Şekil 7. 45**  $S_{22}$  ikinci kapıdan gönderilen sinyalin yansıması

Şekil 7.45'deki grafik ikinci kapıdan gönderilen sinyalin yansımasını göstermektedir. Bu değerin -20 dB'nin altında olması istenmektedir. K bandı istenilen frekans (19.70-20.2 GHz) aralığında sinyalin yansımalarının -13.5 dB'nin altında olduğu görülmektedir. Sinyal 19.98 GHz'de -43 dB ye kadar inmektedir.

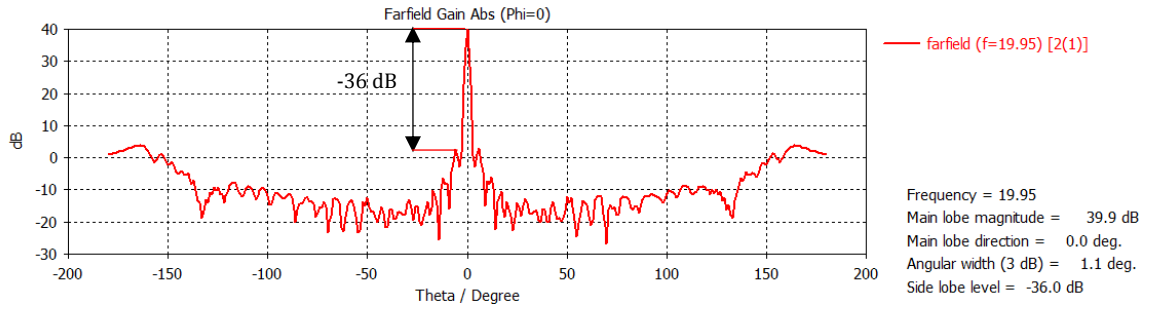


**Şekil 7. 46**  $S_{12}$  çapraz izolasyon grafiği

Şekil 7.46'da ikinci kapıdan gönderilen sinyalin birinci kapıya iletilip iletilmediğini göstermektedir. Bu değer -80 dB'nin altında olması istenmektedir. Şekil 7.46'da görüleceği üzere 19.7-20.2 GHz arası sinyal -135 dB civarındadır. Bu sonuç iyi bir izolasyon sağlandığını gösterir.

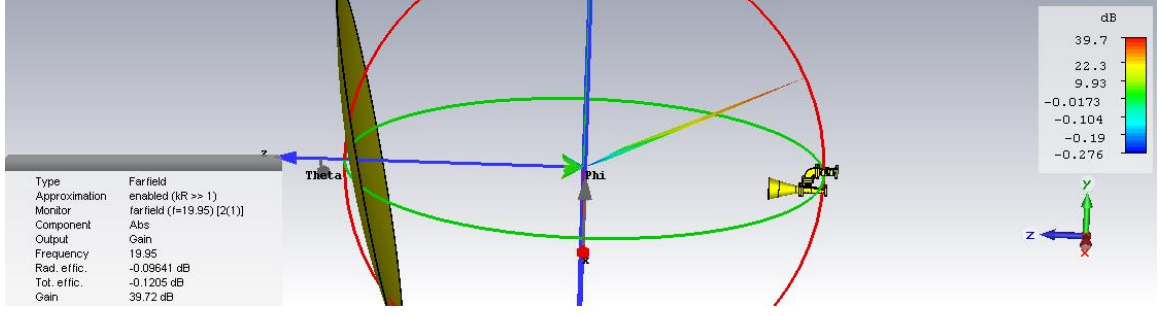
### 7.6.2.2 Uzak Alan (Far Field) Simülasyon Sonuçları

Öncelikle alıcı (Rx) bandı uzak alan sinyali simülasyon sonuçları incelenecektir.

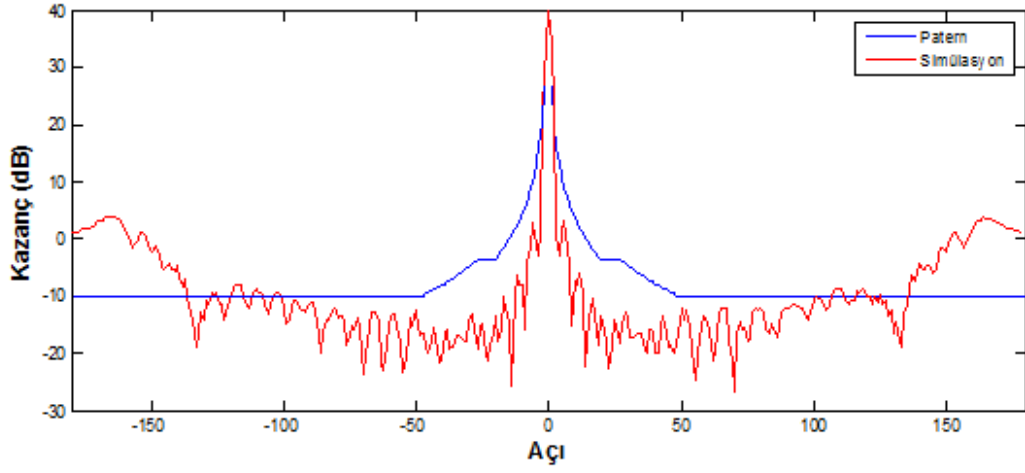


**Şekil 7. 47** 19.95 GHz'deki uzak alan grafiği

Şekil 7.47'de ikinci kapıdan (Rx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 19.95 GHz'de kazanç 39.9 dB, yan kulak seviyesi -36 dB ve açisal genişlik 1.1° olarak okunmaktadır. Frekans artınca kazanç artmıştır, yan kulak seviyesi azalmıştır. Çizelge 7.1'deki istenilen değerlere göre simülasyonda elde edilen değerlerin daha iyi olduğu görülmektedir.

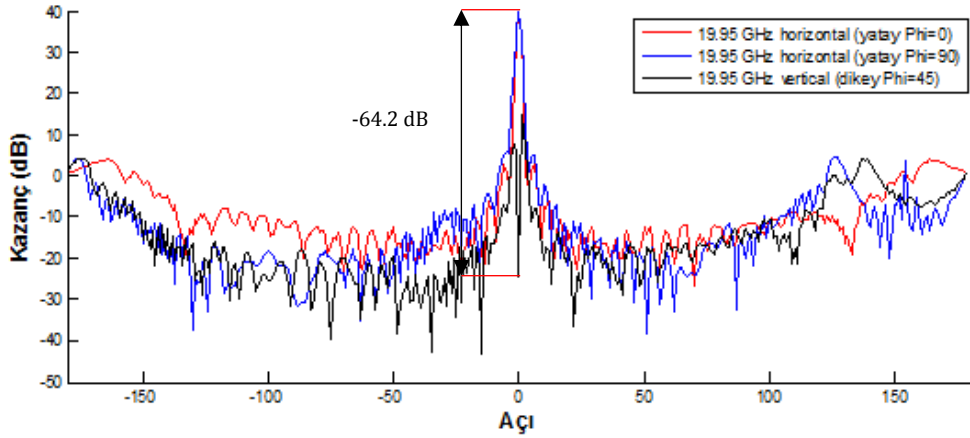


**Şekil 7. 48** 19.95 GHz'deki uzak alan 3D simülasyon sonucu



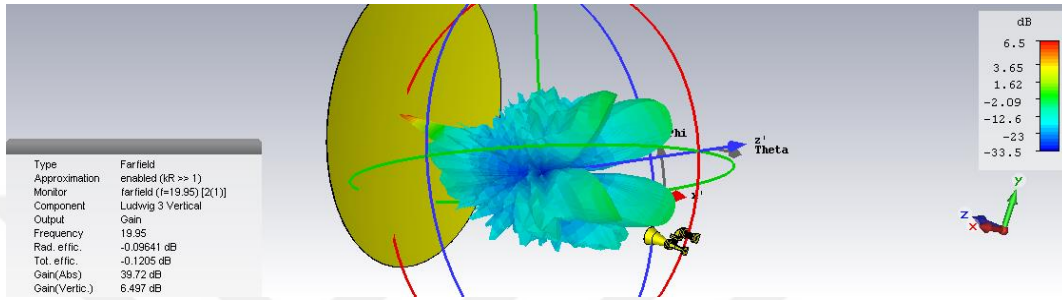
**Şekil 7. 49** 19.95 GHz'deki maske uyum grafiği

Şekil 7.49'da 19.95 GHz'deki simülasyon sonucunun maskeye uyduğu (maskenin altında kaldığı) görülmektedir. Bu sonuç antenin istenilen açılarda ışımaya yaptığını gösterir.



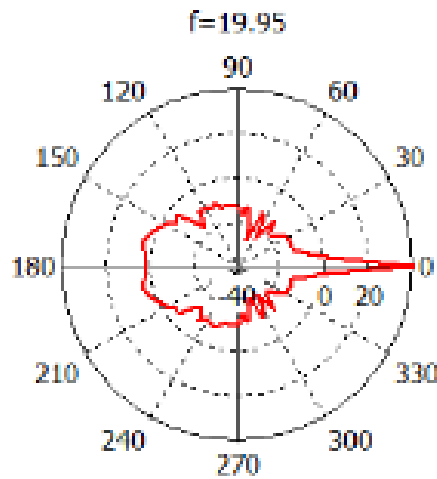
**Şekil 7. 50** 19.95 GHz'deki co-pol ve cross-pol grafiği

Şekil 7.50'de 19.95 GHz'deki co-pol (birlikte polarizasyon) ve cross-pol (çapraz polarizasyon) uzak alan grafiği gösterilmektedir. Co-pol sonucuna en uygun açı değeri  $0^\circ$  olduğu için  $\text{Phi}=0^\circ$  alınmış, cross-pol sonucuna en uygun açı değeri  $45^\circ$  olduğu için  $\text{Phi}=45^\circ$  alınarak cross-pol grafiği çizdirilmiştir [27]. Cst programı yardımı ile çizdirilen cross-pol grafiği ve co-pol grafiği üst üste çizdirilmiştir. Grafikten okunan değerlere göre -64.2 dB izolasyon sağlanmaktadır. Bu istenilen değerlere göre çok daha iyi bir izolasyondur.



Şekil 7. 51 19.95 GHz'deki cross-pol 3D grafiği

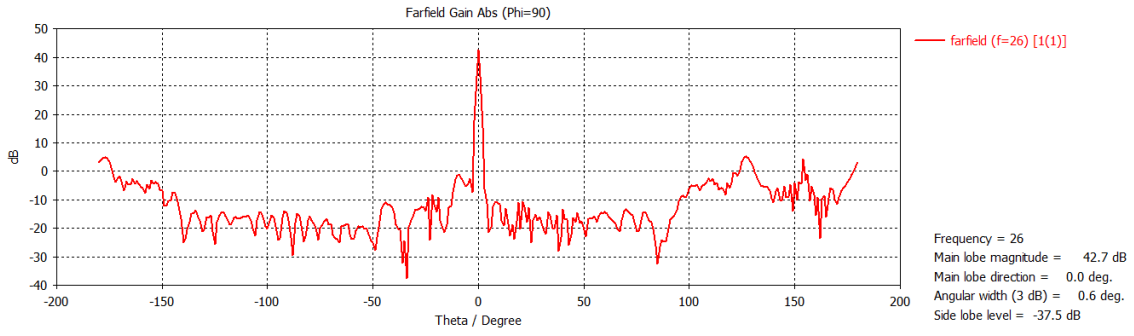
Şekil 7.51'de antenin 19.95 GHz'deki cross-pol grafiğinin 3 boyutlu gösterimi verilmiştir.



Şekil 7. 52 19.95 GHz'deki ışına grafiği

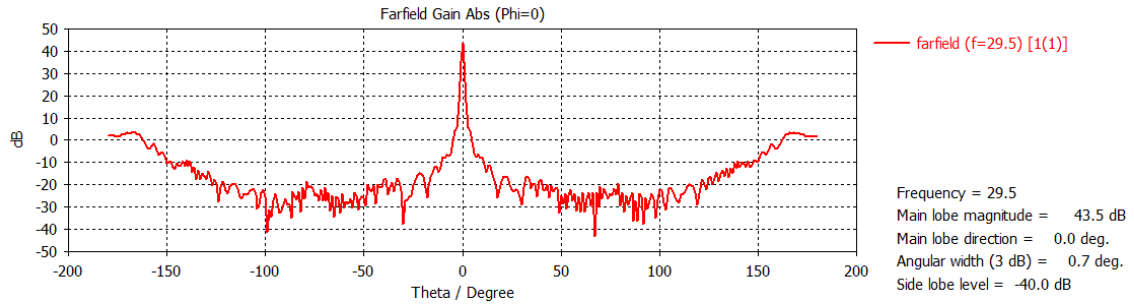
Şekil 7.52'de antenin 19.95 GHz'deki ışına 3 boyutlu grafiğinin 2 boyutlu olarak gösterimi verilmiştir.

İletim (Tx) bandı sinyal simülasyon sonuçları ise şöyledir:



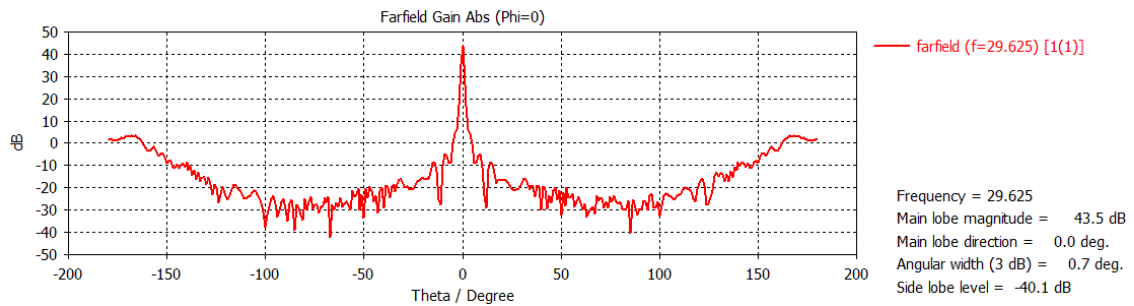
Şekil 7. 53 26 GHz'deki uzak alan grafiği

Şekil 7.53'de birinci kapıdan (Tx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 26 GHz'de kazanç 42.7 dB, yan kulak seviyesi -37.5 dB ve açılal genişlik 0.6° olarak okunmaktadır.



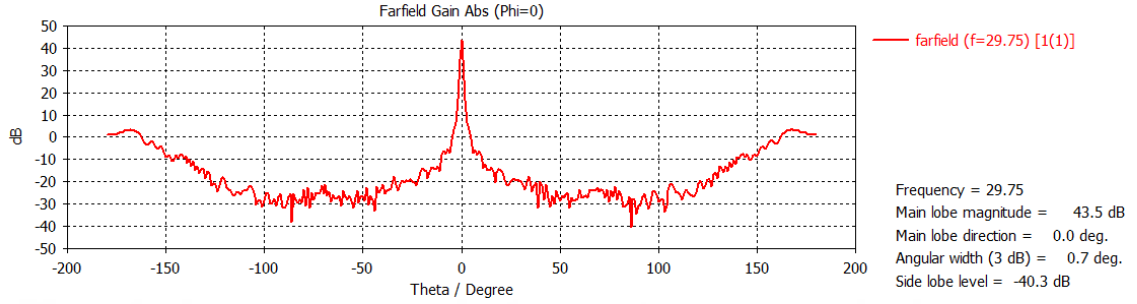
Şekil 7. 54 29.5 GHz'deki uzak alan grafiği

Şekil 7.54'de birinci kapıdan (Tx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 29.5 GHz'de kazanç 43.5 dB, yan kulak seviyesi -40 dB ve açılal genişlik 0.7° olarak okunmaktadır. Çizelge 7.1'deki istenilen değerlere göre simülasyonda elde edilen değerlerin daha iyi olduğu görülmektedir.



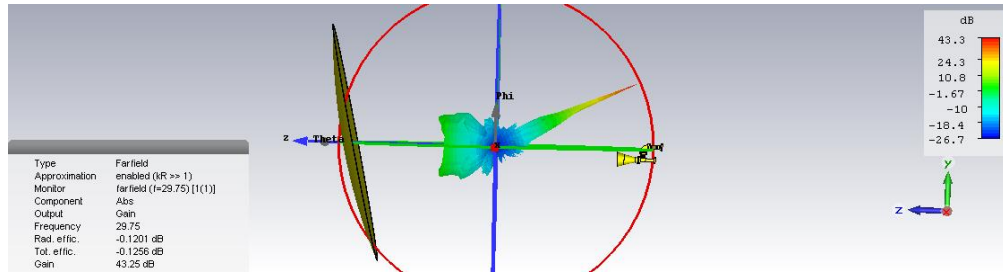
Şekil 7. 55 29.625 GHz'deki uzak alan grafiği

Şekil 7.55'de birinci kapıdan (Tx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 29.625 GHz'de kazanç 43.5 dB, yan kulak seviyesi -40.1 dB ve açısız genişlik 0.7° olarak okunmaktadır. Çizelge 7.1'deki istenilen değerlere göre simülasyonda elde edilen değerlerin daha iyi olduğu görülmektedir.

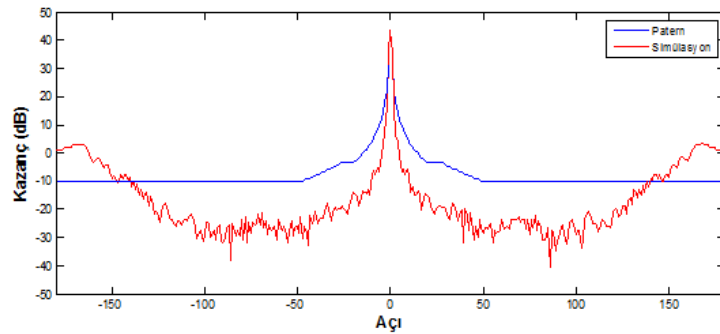


Şekil 7. 56 29.75 GHz'deki uzak alan grafiği

Şekil 7.56'de birinci kapıdan (Tx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 29.75 GHz'de kazanç 43.5 dB, yan kulak seviyesi -40.3 dB ve açısız genişlik 0.7° olarak okunmaktadır. Çizelge 7.1'deki istenilen değerlere göre simülasyonda elde edilen değerlerin daha iyi olduğu görülmektedir.

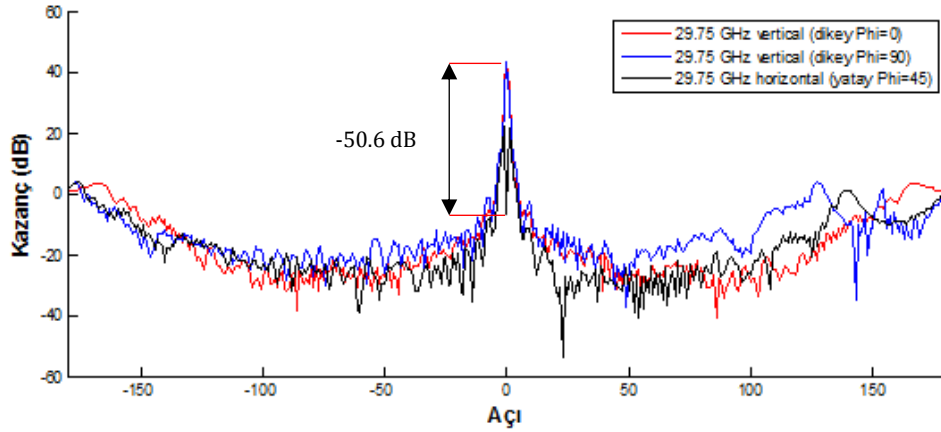


Şekil 7. 57 29.75 GHz'deki uzak alan 3D simülasyon sonucu



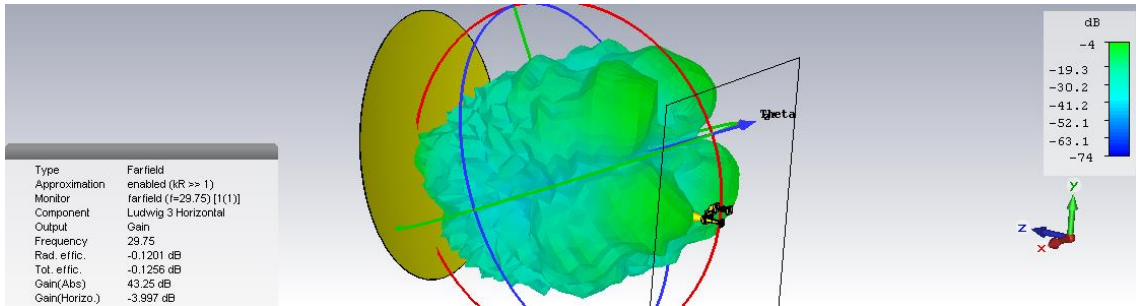
Şekil 7. 58 29.75 GHz'deki maske uyum grafiği

Şekil 7.58'de 29.75 GHz'deki simülasyon sonucunun ITU-R S.524-9 Annex-I standardının ( $2^\circ \leq \phi \leq 7^\circ$  ( $19 - 25 \log \phi$ ),  $0^\circ < \phi \leq 9.2^\circ -2 \text{ dB}$ ,  $9.2^\circ < \phi \leq 48^\circ$  ( $22 - 25 \log \phi$ ) dB ve  $48^\circ < \phi \leq 180^\circ -10 \text{ dB}$  değerlerini alacak şekilde hesaplanıp çizdirilen) maske paternine uyduğu (maskenin altında kaldığı) görülmektedir. Bu sonuç antenin istenilen açılarda ışıma yaptığını gösterir.



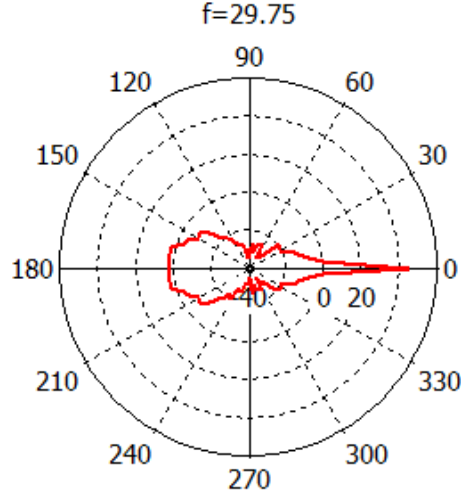
Şekil 7. 59 29.75 GHz'deki co-pol ve cross-pol grafiği

Şekil 7.59'da 29.75 GHz'deki co-pol (birlikte polarizasyon) ve cross-pol (çapraz polarizasyon) uzak alan grafiği gösterilmektedir. Co-pol sonucuna en uygun açı değeri  $0^\circ$  olduğu için  $\text{Phi}=0^\circ$  alınmış, cross-pol sonucuna en uygun açı değeri  $45^\circ$  olduğu için  $\text{Phi}=45^\circ$  alınarak cross-pol grafiği çizdirilmiştir [27]. Cst programı yardımı ile çizdirilen cross-pol grafiği ve co-pol grafiği üst üste çizdirilmiştir. Grafikten okunan değerlere göre -50.6 dB izolasyon sağlanmaktadır. Bu istenilen değerlere göre çok daha iyi bir izolasyondur.



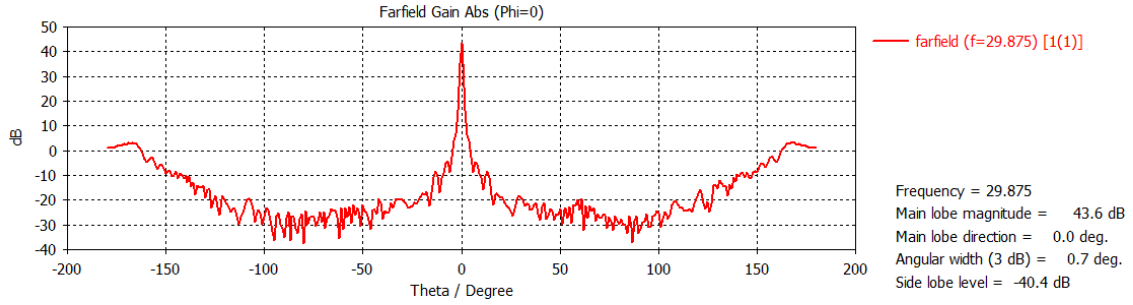
Şekil 7. 60 29.75 GHz'deki cross-pol 3D grafiği

Şekil 7.60'da antenin 29.75 GHz'deki cross-pol grafiğinin 3 boyutlu gösterimi verilmiştir.



**Şekil 7. 61** 29.75 GHz'deki ışıma grafiği

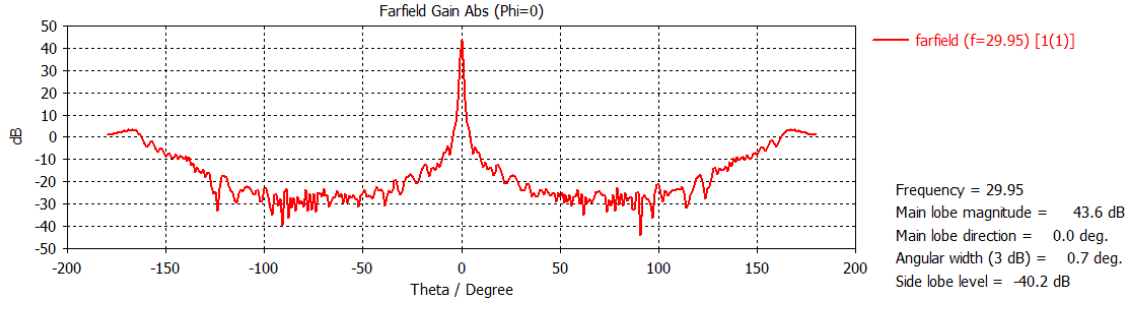
Şekil 7.61'de antenin 29.75 GHz'deki ışıma 3 boyutlu grafiğinin 2 boyutlu olarak gösterimi verilmiştir.



**Şekil 7. 62** 29.875 GHz'deki uzak alan grafiği

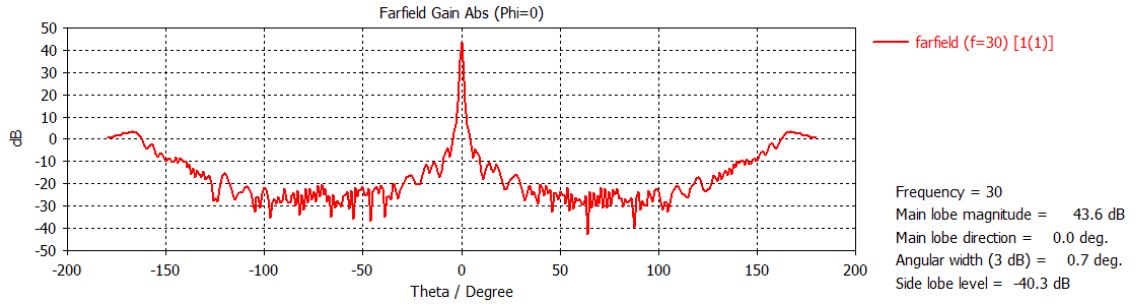
Şekil 7.62'de birinci kapıdan (Tx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 29.875 GHz'de kazanç 43.6 dB, yan kulak seviyesi -40.4 dB ve açılal genişlik 0.7° olarak okunmaktadır. Çizelge 7.1'deki istenilen değerlere göre simülasyonda elde edilen değerlerin daha iyi olduğu görülmektedir.





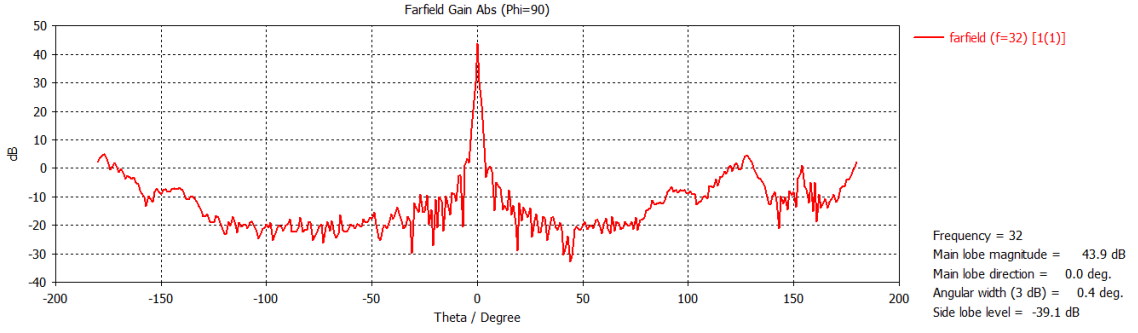
**Şekil 7. 63** 29.95 GHz'deki uzak alan grafiği

Şekil 7.63'de birinci kapıdan (Tx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 29.95 GHz'de kazanç 43.6 dB, yan kulak seviyesi -40.2 dB ve açısal genişlik  $0.7^\circ$  olarak okunmaktadır. Çizelge 7.1'deki istenilen değerlere göre simülasyonda elde edilen değerlerin daha iyi olduğu görülmektedir.



**Şekil 7. 64** 30 GHz'deki uzak alan grafiği

Şekil 7.64'de birinci kapıdan (Tx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 30 GHz'de kazanç 43.6 dB, yan kulak seviyesi -40.3 dB ve açısal genişlik  $0.7^\circ$  olarak okunmaktadır. Çizelge 7.1'deki istenilen değerlere göre simülasyonda elde edilen değerlerin daha iyi olduğu görülmektedir.



**Şekil 7. 65** 32 GHz'deki uzak alan grafiği

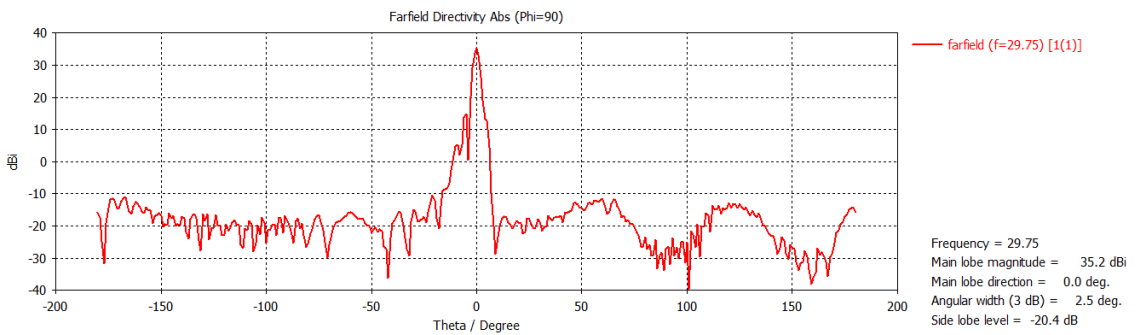
Şekil 7.65'de birinci kapıdan (Tx kapısı) gönderilen sinyalin çanak antende toplanarak oluşturduğu uzak alan grafiği gösterilmektedir. 32 GHz'de kazanç 43.9 dB, yan kulak seviyesi -39.1 dB ve açisal genişlik 0.4° olarak okunmaktadır.

Grafiklere bakarak şu sonuçlar çıkarılabilir:

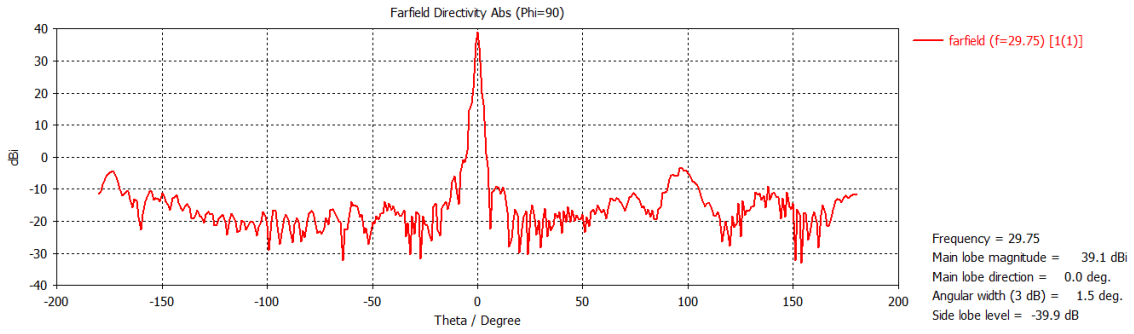
- Frekans arttıkça (bant aralığında) anten kazancı artmaktadır.
- Frekans arttıkça (bant aralığında) açisal genişlik değişmemektedir.
- Frekans arttıkça (bant aralığında) yan kulak seviyesi frekans aralığının ortasına kadar azalmakta, orta frekanstan sonra tekrar artmaya başlamaktadır.
- Frekans aralığı dışında yan kulak seviyesi artmakta ve kazanç azalmaktadır.

$$f/D=t \quad (7.9)$$

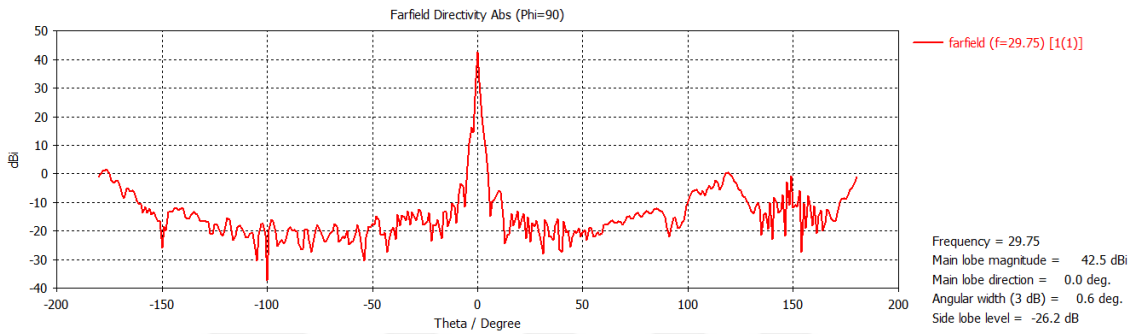
Odak uzaklığının reflektör çapı ile olan oranına bağlı olarak (7.9)'dan hesaplanan çanağın bükümünün değişmesiyle oluşacak yan kulak seviyesi (SLL) ve kazançtaki değişimler incelenmiştir.



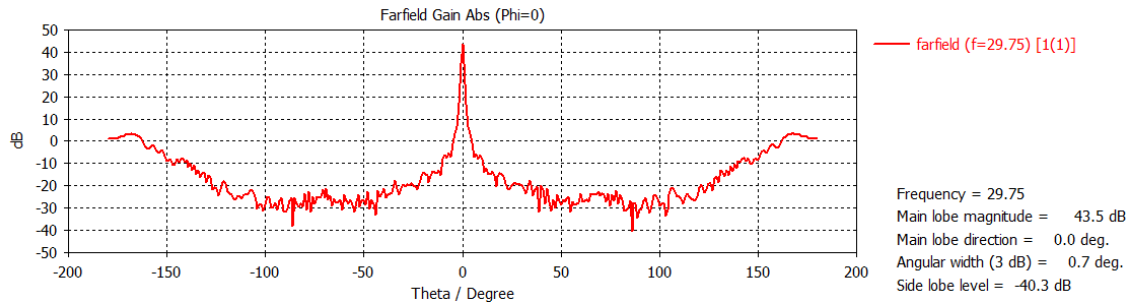
**Şekil 7. 66** t=0.4 iken oluşan uzak alan grafiği



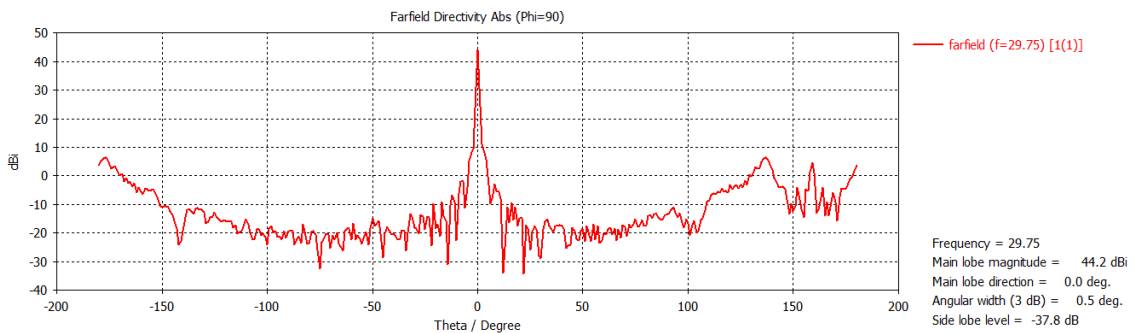
Şekil 7. 67 t=0.7 iken oluşan uzak alan grafiği



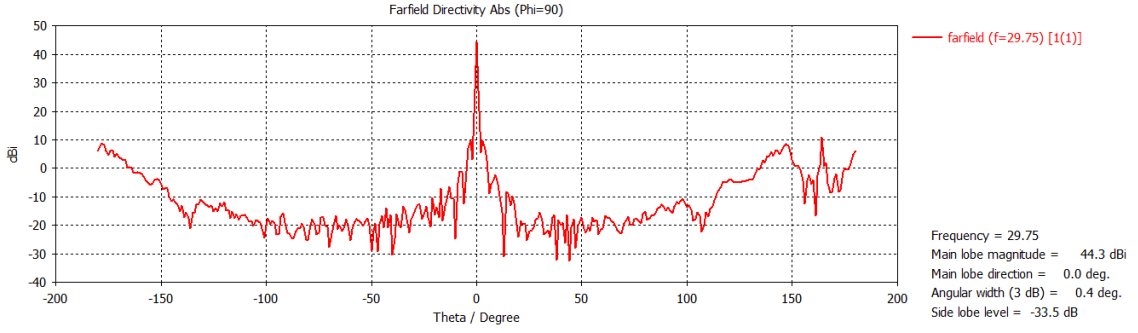
Şekil 7. 68 t=1 iken oluşan uzak alan grafiği



Şekil 7. 69 t=1.2 iken oluşan uzak alan grafiği



Şekil 7. 70 t=1.5 iken oluşan uzak alan grafiği



**Şekil 7. 71** t=2 iken oluşan uzak alan grafiği

**Çizelge 7. 2** Bükümün kazanç ve yan kulak seviyesine etkisi

Büküm (t)	0.4	0.7	1	1.2	1.5	2
Kazanç (G)	35.2 dB	39.1 dB	42.5 dB	43.5 dB	44.2 dB	44.3 dB
Yan kulak seviyesi (SLL)	-20.4 dB	-39.9 dB	-26.2 dB	-40.3 dB	-37.8 dB	-33.5 dB
Açısal Genişlik (-3 dB)	2.5°	1.5°	0.6°	0.7°	0.5°	0.4°

Çizelge 7.2'den görüleceği üzere büküm değeri 2 olana kadar kazanç artmakta sonrasında ise çanak dışı doğru açılmaya başladığı için sinyal dağılmakta (yan kulak seviyesi artmakta) ve kazanç azalmaya başlamaktadır. En iyi kazanç, açısal genişlik ve yan kulak seviyesi değerlerini veren büküm değerinin, çanağımızı tasarladığımız t=1.2 değeri olduğu yapılan simülasyon sonuçlarında da görülmektedir.

### 7.6.3 Ön Uç Gerçekleme ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

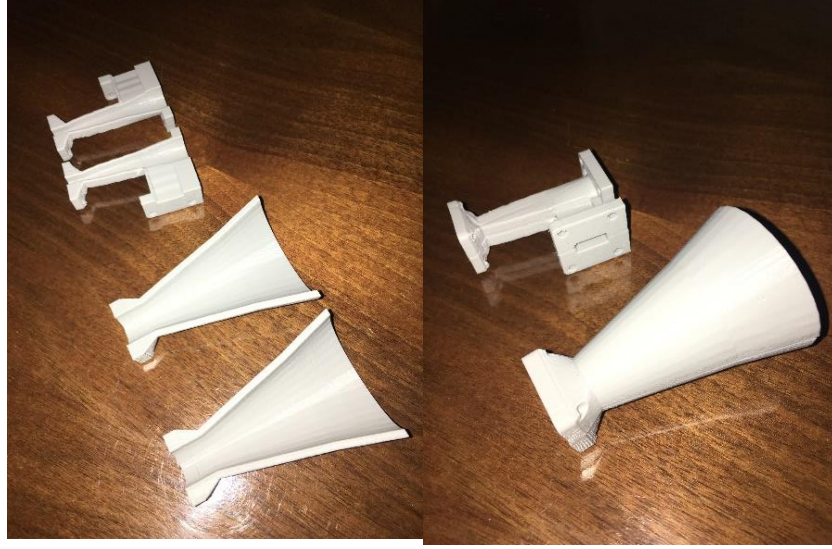
Simülasyon işlemleri tamamlandıktan sonra parçalar üretilebilecek kesitlere ayrılıp Şekil 7.72'de görülen 3D yazıcıda uygun formda ayarlanarak üretimleri yapılmıştır (Şekil 7.73-74).



**Şekil 7. 72** Üretimde kullanılan 3D yazıcı



**Şekil 7. 73** 3D yazıcıda üretilmiş huni anten



**Şekil 7. 74** 3D yazıcıda üretilen huni anten ve OMT

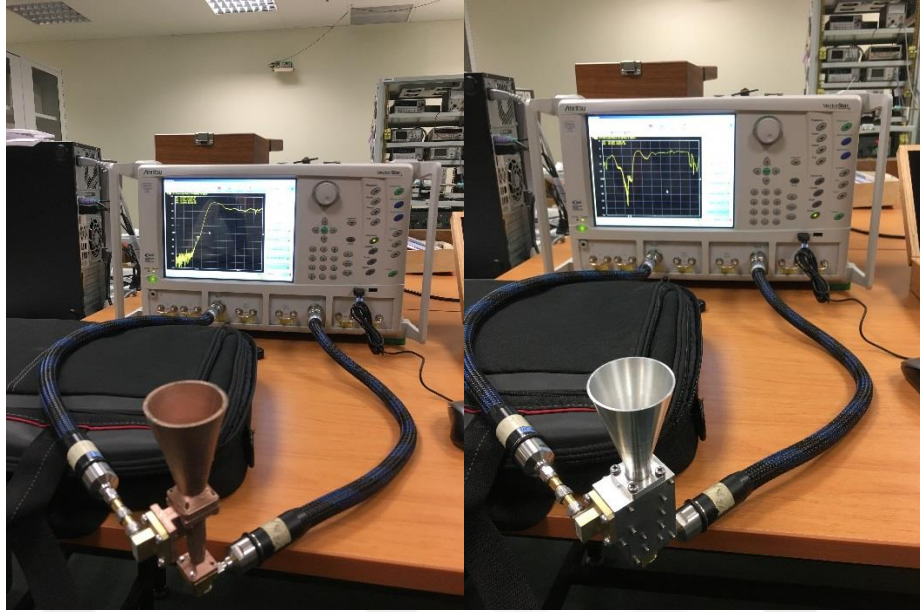
3D yazıcıda üretilen parçalar iletken malzeme olmadığı için Şekil 7.75’de görüldüğü gibi iletken spreyle içleri ve dışları boyanarak parçalar iletken hale getirildi [4].



**Şekil 7. 75** İletken spreyle boyanmış parçalar

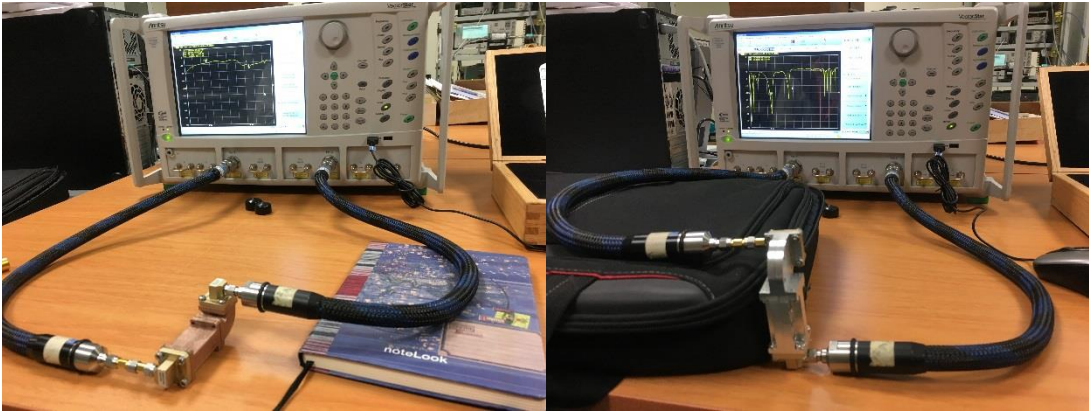
Üretim aşaması tamamlandıktan sonra testler için TÜBİTAK laboratuvarından destek alınarak laboratuvardaki cihazlar yardımıyla test ve ölçümler gerçekleştirildi (Şekil 7.76).



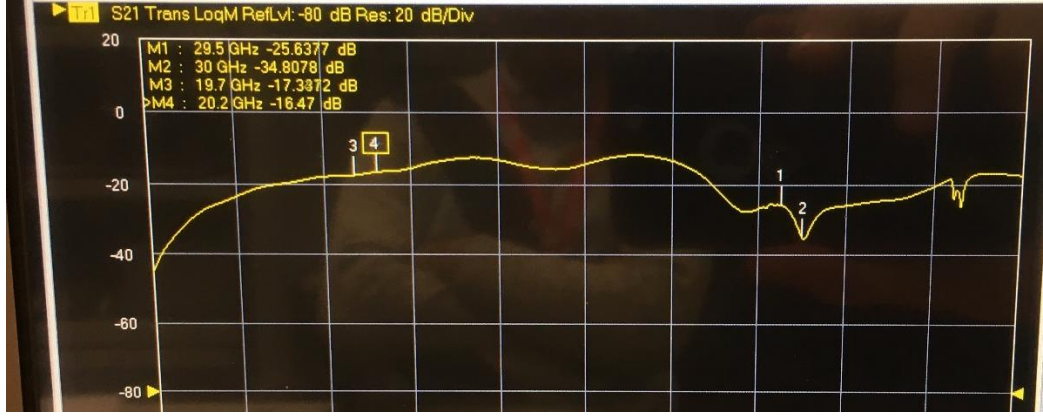


**Şekil 7. 76** 3D yazıcı ve alüminyum ile üretilen parçaların testi

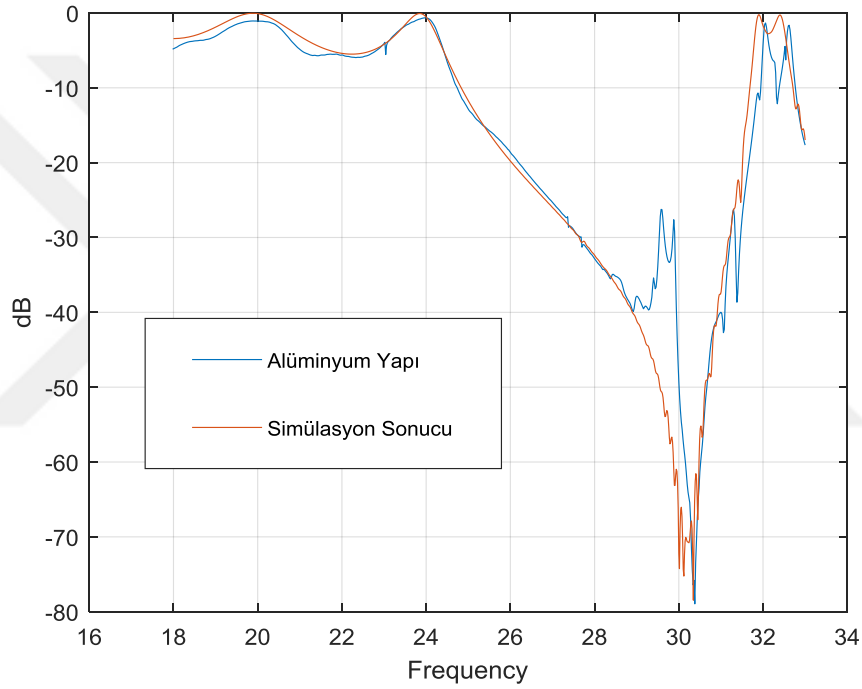
Üretimdeki farklılıkları daha iyi anlayabilmek için bend ve transmit reject filter kısmı ayrıca teste tabi tutuldu (Şekil 7.77). Bu şekilde simülasyon sonuçları ile 3D yazıcı ve alüminyum ile üretilen parçalar arasındaki sonuç farklılıkları daha net ortaya koyulmuş oldu.



**Şekil 7. 77** 3D yazıcı ve alüminyum ile üretilmiş dirsek ve filtre



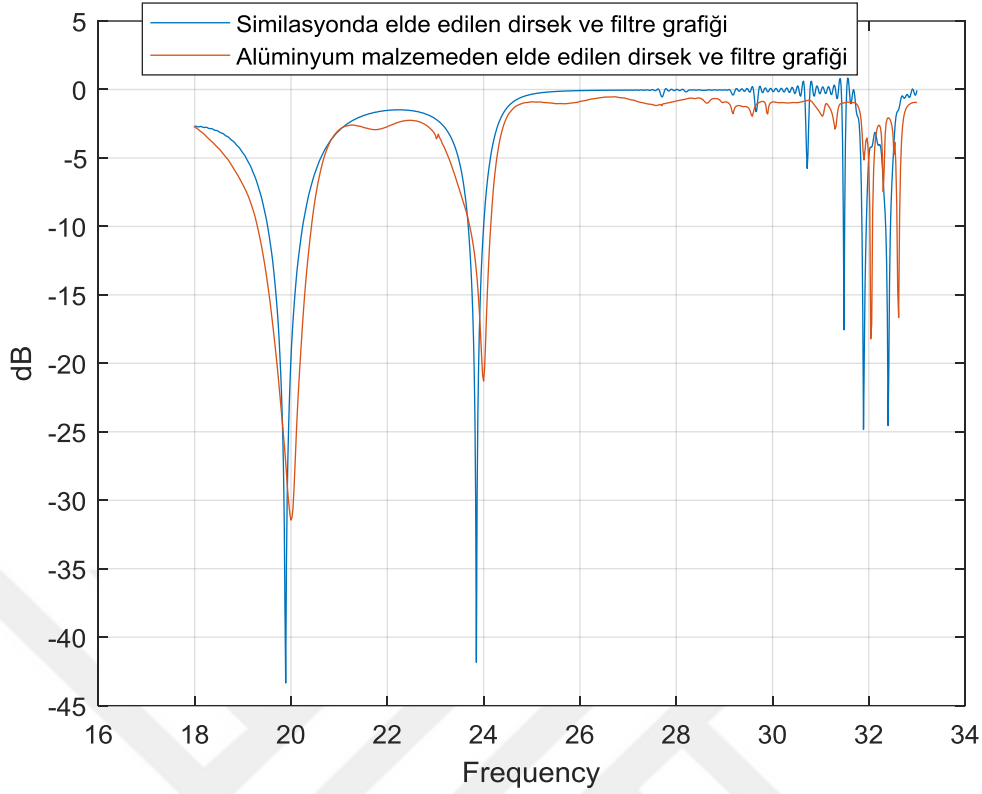
**Şekil 7. 78** 3D yazıcı ile üretilen dirsek ve filtrenin iletim grafiği



**Şekil 7. 79** Alüminyum malzeme ve simülasyonda elde edilen dirsek ve filtre iletim grafiği karşılaştırması

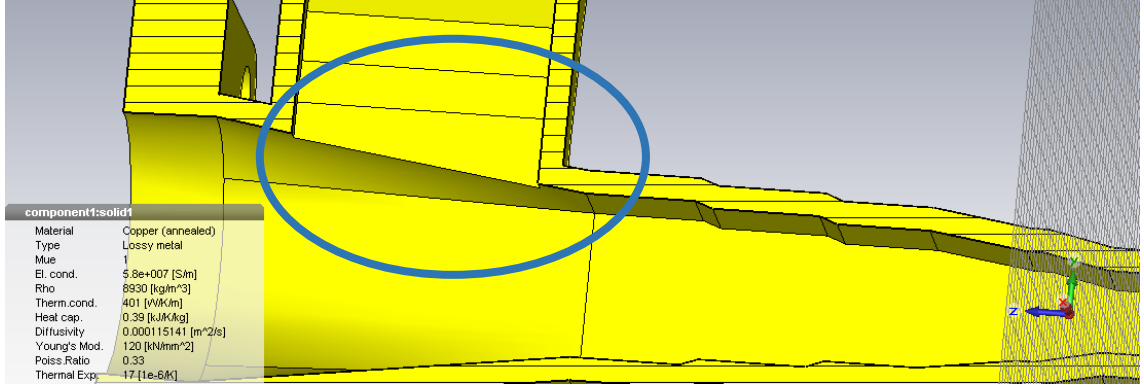
Şekil 7.78 ve Şekil 7.79'da görüleceği üzere 3D yazıcı ile üretilen parçaların ölçüm sonucu 19.7-20.2 GHz aralığında -17 dB civarında iken alüminyum malzeme ve simülasyonda elde edilen ölçüm sonucu 19.7-20.2 GHz aralığında -1.2 dB civarında olduğu görülmektedir. 3D yazıcı ile yapılan üretimde filtrenin girinti ve çıkıntılarının boyutlarının küçük ve fazla olmasından, iletken boya ile homojen bir şekilde kaplanması mümkün olamamış bu da sonuca yansımıştır (Şekil 7.78-Şekil 7.79).





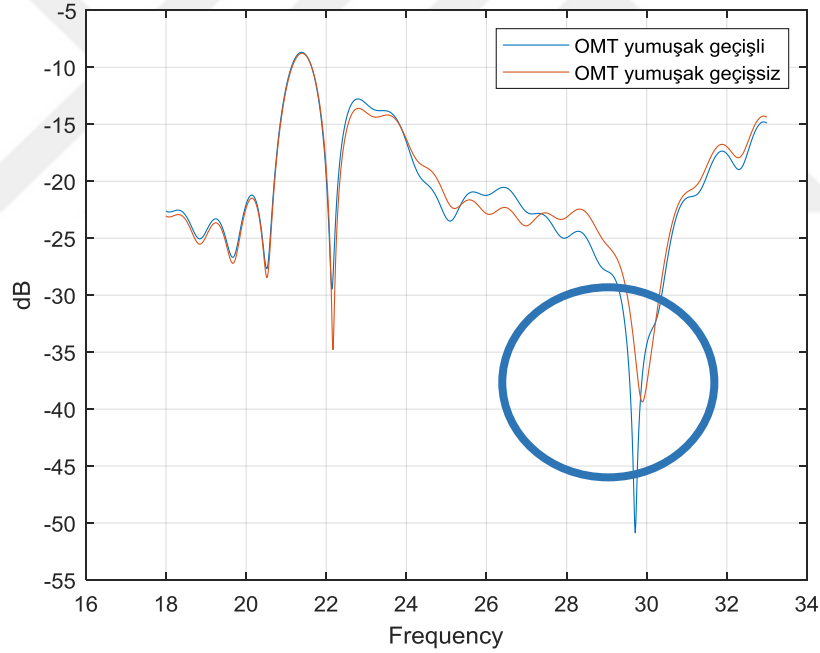
**Şekil 7. 80** Alüminyum ile üretilmiş dirsek ve filtrenin yansımaya grafiği

Şekil 7.80 görüleceği gibi 19.7-20.2 GHz arasında simülasyon ile elde edilen yansımaya grafik sonucu alüminyum malzeme ile gerçekleşip ölçülen sonuç ile çok yakınlık göstermektedir. Bu bize simülasyon çalışmasının düzgün olduğunu ancak 3D yazıcı ile yapılan üretim ve iletken boya ile yapılan boyama işleminde parçaların hassasiyetlerinin azaldığını göstermektedir. Bunun temel etkenlerinden biri de çok yüksek frekanslarda küçük boyutta malzemeler ile çalışılıyor olmasıdır. Şekil 7.81’de görüldüğü gibi eğer üretilen OMT elemanını kuplaj kısmı 0.1-0.2 mm arası değiştirilirse iletim ve alımda değişiklikler gözlemlenmektedir. Özellikle kuplaj kısmının üretimi 3D yazıcıda sıkıntı çıkarmıştır. Bu sebepten 3D yazıcı ile üretilen OMT’nin ölçüm sonuçları simülasyon sonucundan farklı olmuştur.



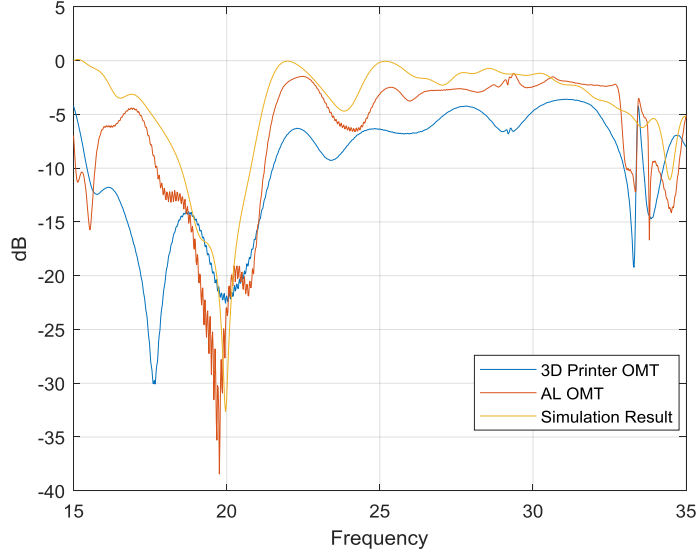
**Şekil 7. 81** Kuplaj kısmı değiştirilmiş OMT

İletim ve alımda kuplaj kısmı değiştirilmeden önce yansıma -50 dB'lere kadar inerken kuplaj kısmı 0.1-0.2 mm arası bir değişikliğe uğradığında hem frekansta kayma olduğu hem de bu sonuçların -38 dB'lerde kaldığı görülmektedir (Şekil 7.82).



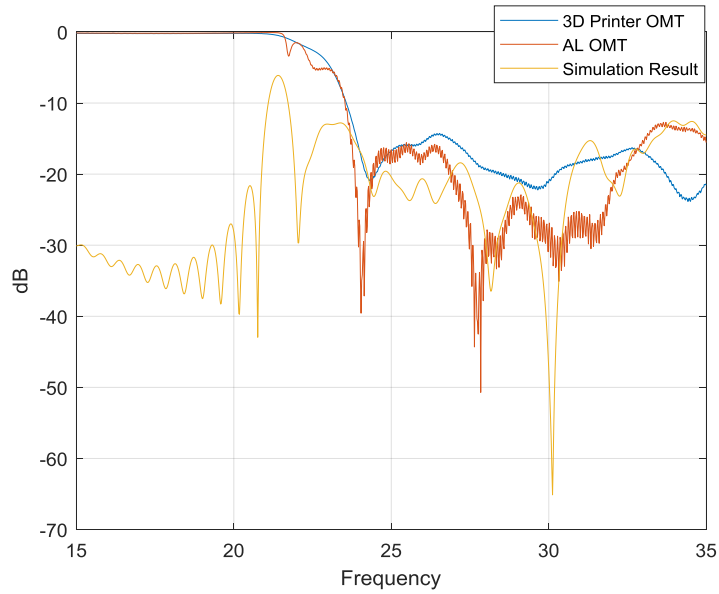
**Şekil 7. 82** OMT elemanı iletim portunun yansıma grafikleri

Şekil 7.83'de görüldüğü gibi alım portundan gönderilen sinyalin alüminyum ile üretilen ön uç elemanı ile simülasyonda tasarlanan ön uç elemanının grafik sonuçlarının birbirine yakınlık gösterdiği ancak 3D yazıcı ile üretilip iletken spreyle boyanan ön uç elemanının grafik sonucunun frekanslarında kayma olduğu ve sinyalde daha fazla bozulma olduğu görülmektedir.



**Şekil 7. 83** Ön uç alım portu yansıma grafikleri karşılaştırması

Şekil 7.84’de görüldüğü gibi iletim portundan gönderilen sinyalin alüminyum ile üretilen ön uç elemanı ile simülasyonda tasarlanan ön uç elemanının grafik sonuçlarının birbirine yakınlık gösterdiği, tam istenilen aralıkta alüminyum ile üretilen elemanın sinyalinde biraz bozulma olduğu görülmekte ancak 3D yazıcı ile üretilip iletken spreyle boyanan ön uç elemanının grafik sonucunda sinyalde biraz daha fazla bozulma olduğu görülmektedir.



**Şekil 7. 84** Ön uç iletim portu yansıma grafikleri karşılaştırması

Şekil 7.78 ve Şekil 7.79 da görüldüğü gibi yapı küçük ve karmaşık olduğunda iletken boya homojen olarak dağıtılamadığından elde edilen 3D yazıcı ile elde edilen malzemenin sinyal grafik sonucu ile alüminyumdan üretilen malzeme ve simülasyon sonucu birbirinden farklı çıkmıştır. Ancak üretilen ürünün karmaşıklığı azaldığında ve yapı daha homojen bir şekilde iletken boya ile boyanabilir hale geldiğinde elde edilen üç grafiğinde birbirine yakınlık gösterdiği görülmektedir (Şekil 7.84).



Çizelge 8. 1 Sonuçların karşılaştırılması

		İstenen Değerler		Simülasyon Sonuçları	
		Rx	Tx	Rx	Tx
	<b>Frekans</b>	19.7-20.2 GHz	29.5-30 GHz	19.7-20.2 GHz	29.5-30 GHz
Anten Besleme Kısımı	<b>İzolasyon</b>	< -80 dB	< -80 dB	-135 dB	-131 dB
	<b>Geri Dönüş Kaybı (S<sub>11</sub>)</b>	< -20 dB	< -30 dB	-43 dB	-57.4 dB
Anten	<b>Kazanç</b>	> 40 dB	> 40 dB	-39.9 dB	43.5 dB
	<b>Açısal Genişlik (-3 dB)</b>	< 2°	< 2°	1.1°	0.7°
	<b>Cross-Pol İzolasyonu</b>	< -20 dB	< -20 dB	-64.2 dB	-50.6 dB
	<b>Yan Kulak Seviyesi (SLL)</b>	< -20 dB	< -20 dB	-36 dB	-40.3 dB

Çizelge 8.1’de görüldüğü üzere yapılan çalışmalar sonucunda; çanağın bükümünde yapılan değişikliklerle, dalga kılavuzunda yapılan yumuşak geçişler ve optimizasyonlar sonucunda piyasa koşullarınca istenen değerlere uygun ve hatta daha iyi sonuçlar

verebilecek bir tasarım sonucu elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına bakılacak olursa istenilen frekans aralığında yüksek kazançta sinyal gönderilebilen ve uyduların birbirini etkilememesi açısından önemli olan açısız genişlik değeri istenilen değere göre çok iyi olan sonuçlar elde edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda horn antenin önüne materyal eklenerek yan kulak seviyesi daha da düşürülebilir ve açısız genişlik daha da daraltabilir. Bu da ilerleyen zamanlarda uydu sayısının artmasından doğacak sinyallerin karışması durumu konusuna bir çözüm olabilir.

**Çizelge 8. 2** Simülasyon ve üretilen ürünlerin kıyaslaması

	Simülasyon Sonuçları		3D Yazıcı Sonuçları		Alüminyum Sonuçları	
	Rx	Tx	Rx	Tx	Rx	Tx
<b>İzolasyon</b>	-135 dB	-131 dB	-90 dB	-90 dB	-90 dB	-90 dB
<b>Geri Dönüş Kaybı (S<sub>11</sub>)</b>	-43 dB	-57.4 dB	-23 dB	-23 dB	-36 dB	-35 dB

Ön uç gerçekleştirme ve simülasyon sonuçları karşılaştırılması bölümünden görüldüğü üzere gerçekleştirme aşamasında 3D yazıcı kullanmak üretimde kolaylık sağlarken yapıda hassasiyeti azaltmakta, bozukluğu artırmakta ve bu da sinyalde bozulmalara neden olmaktadır (Çizelge 8.2). Daha hassas üretim yapabilen 3D yazıcılar kullanılırsa ya da düşük frekanslarda çalışan cihazlar üretilirse hem üretimde hız kazanılmış hem de daha hafif malzemeler elde edilmiş olur. Buda gündelik hayatta test aşaması ve üretimde kolaylık, üretim zamanından kazanım, maliyette azalma, kurulumda kolaylık vs. gibi birçok kolaylık sağlar.

- [1] K. Singarajah, "Overview of Ka-band Satellite System Developments & Key Regulatory Issues," *ITU Conference On Prospects For Use Of The Ka-Band By Satellite Communication Systems*, Kazakhstan, 5 - 7 September 2012.
- [2] Türksat, Türksat 4B Ka bant, [Online]. Available: <https://www.turksat.com.tr/tr/haberler/turksat-4b-ile-internet-ucuzlayacak>.
- [3] J. Fikart, Evolution of Front Ends for Satellite Communications in Ka- band, [Online]. Available: <http://rsl.ece.ubc.ca/archive/JFikart2005.pdf>.
- [4] S. Irene, Ku band waveguide diplexer design for satellite communication. Implementation by additive manufacturing and experimental characterization, *Universidad Politecnica de Madrid Escuela Technic Superior Telecominication*, Madrid, 2015.
- [5] Wikipedia, Anten, [Online]. Available: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Anten\\_\(elektronik\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Anten_(elektronik)).
- [6] S. Şeker and O. Çerezci, *Mühendislik Elektromagnetığının Temelleri*, Saray Bilimsel Yayıncılık, İzmir, 1996.
- [7] J. Kraus and D. Fleisch, *Electromagnetics with Applications*, 5th ed., McGraw-Hill, Singapur, 1999.
- [8] F. A. Benson and T. M. Benson, *Fields, Waves and Transmission Lines*, 1st ed., Chapman & Hall. USA, 1991.
- [9] Yıldız, Filtre, [Online]. Available: [http://www.yildiz.edu.tr/~nicoskun/Elk\\_Hab\\_Lab\\_Foyu\\_yeni.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~nicoskun/Elk_Hab_Lab_Foyu_yeni.pdf).
- [10] A. M. Bøifot, "Classification of Ortho-mode transducers," *Eur. Trans. Telecomm.*, vol. 2, pp. 503-510, October 1991.
- [11] G. Caille, Y. Cailloce and J. Torstensson, "Space multibeam antenna with very high G/T, for ka-band multimedia via satellite missions," *2002 9th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, St. Hubert, QC, Canada, 2002, pp. 1-5.
- [12] S. Verma and E. Wiswell, "Next Generation Broadband Satellite Communication Systems", *21<sup>th</sup> AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit*, Canada, 12-15 May 2002.
- [13] Coremeda Tv, Türksat Ka band, [Online]. Available: <http://coremeda.tv/turksat-ka-band-otomatik-anten>.
- [14] Habertürk, Türksat-Net (Türksat 4B) Ka bant, [Online]. Available: <http://www.haberturk.com/yerel-haberler/haber/8692109-turksat-turksat-net-ile-internet-hizmeti-verecek>.

- [15] Elektrikport, Antenler, [Online]. Available: <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/antenler-ve-cesitleri/16763>.
- [16] Wikipedia, Parabolic Antenna, [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic\\_antenna](https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_antenna).
- [17] A. W. Rudge and N. A. Adatia, "Offset-parabolic-reflector antennas: A review," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 12, pp. 1592-1618, Dec. 1978.
- [18] A. Akbal, Y. Erol, H. H. Balık, "FDTD ile TLM Metotlarının Dikdörtgen Kesitli Dalga Kılavuzlarının Analizi Açısından Karşılaştırılması", 99-95, II. URSI-Türkiye'2004 Bilimsel Kongresi, Ankara, Eylül 2004.
- [19] H. Balık, Dalga Kılavuzları, [Online]. Available: <http://www.hasanbalik.com/odevler/anten/Dalga%20Kilavuzlari/sunu%2520dalga%2520k%25C4%25B1lavuzlar%25C4%25B1.ppt>.
- [20] R. Ludwig and P. Bretchko, RF Circuit Design, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 2000.
- [21] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc. Miami, 1997.
- [22] J. Uher, J. Bornemann and U. Rosenberg, *Waveguide Components for Antenna Feed Systems: "Theory And CAD"*, 2nd ed., Artech House, Boston, 1996.
- [23] W. L. Barrow and L. J. Chu, "Theory of the Electromagnetic Horn," in *Proceedings of the IRE*, vol. 27, no. 1, pp. 51-64, Jan. 1939.
- [24] C. B. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
- [25] M. A. Zaman, M. Gaffar, S. M. Choudhury and M. A. Matin, "Optimization and analysis of a Ka band Pickett Potter horn antenna with low cross polarization," *International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE 2010)*, Dhaka, 2010, pp. 542-545.
- [26] Y. Chen, A. Chen and D. Su, "The optimization design of the Pickett Potter horn antenna for ka band," *2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, 2008, pp. 626-629.
- [27] Cst, Reflector antenna system design, [Online]. Available: [https://www.cst.com/content/events/workshop\\_documents/2012/1111-pr-reflector-antenna-system-design.pdf](https://www.cst.com/content/events/workshop_documents/2012/1111-pr-reflector-antenna-system-design.pdf).
- [28] Telecom, Co & Cross Polarization, [Online]. Available: [http://perso.telecom-paristech.fr/~begaud/intra/CST\\_ANTENNA.pdf](http://perso.telecom-paristech.fr/~begaud/intra/CST_ANTENNA.pdf).



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Harun MECİDOĞLU  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 25/07/1990  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : harunmecidoglu@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2017
Lisans	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen	Eyüp Anadolu Lisesi	2009

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014	Profen	RF Mühendisi
2014	Türk Telekom	Network Mühendisi
2013	Yüksel Proje	Elektronik Mühendisi

### YAYINLARI

#### Makale

1. H. Mecidoglu and H. Torpi, "Ka Band RF Front-End Design", *Materials Science Forum*, vol. 915, pp. 231-236, 2018.

## **Bildiri**

1. H. Mecidoglu and H. Torpi, "Ka Band RF Front-End Design", *Japmed' 10*, Izmir, July 4-8, 2017, pp 44.

