

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**YÜKSEK KAZANÇLI ANTENLERİN TASARIM, ÜRETİM VE  
KARAKTERİZASYONU**

**BERK YORULMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri:**    **Doç. Dr. Seyit Ahmet SİS (Tez Danışmanı)**  
                         **Prof. Dr. Murat Erhan BALCI**  
                         **Prof. Dr. Hüseyin Arda ÜLKÜ**

**BALIKESİR, ARALIK- 2024**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Yüksek Kazançlı Antenlerin Tasarım, Üretim ve Karakterizasyonu**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Berk YORULMAZ**

## ÖZET

**YÜKSEK KAZANÇLI ANTENLERİN TASARIM, ÜRETİM VE  
KARAKTERİZASYONU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
BERK YORULMAZ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. SEYİT AHMET SİS )**

**BALIKESİR, ARALIK - 2024**

Bu tez çalışmasında C-bant'ta çalışan çeşitli türde yüksek kazançlı yönlü antenlerin tasarımı, ardından üretim ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen antenlerden ilki, 5-6 GHz aralığını kapsayacak şekilde VSWR değerleri optimize edilmiş, bir ucundan RF prob ile uyarılan, diğer ucu ise açıkta bırakılıp ısıtılan bir dalga kılavuzudur. Daha sonra bu dalga kılavuzu, bir çanak yapısının odağına oturtulan metal plakayı (splash plate) aydınlatarak, C-bant reflektör anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Son olarak da, sahada kullanımı çanak antenlere göre çok daha ergonomik olan, bir panel içine oturtulmuş 16 elemanlı (4x4) dizi anten tasarımı yapılmıştır.

Tezin ilk kısmında yönlü ve yüksek kazançlı antenlere odaklanacak şekilde anten temelleri verilmiştir. İlerleyen bölümlerde, her biri ayrı bölümler olacak şekilde sırasıyla dalga kılavuzu teorisi, bu tezinin anten tasarımındaki kullanımı ve tasarım süreci, akabinde çanak anten teorisi ve tasarım süreci ve son olarak da dizi anten teorisi ve 16 elemanlı dizi anten tasarım süreci detaylı şekilde verilmiştir. Yine her bölümde ilgili anten türünün üretim detayları ve ölçüm sonuçları detaylı şekilde verilmiştir. Tezin son bölümünde, tezle ilgili sonuçlar derlenmiş, gelecekte konu ile ilgili potansiyel olarak gerçekleştirilebilecek konular ile ilgili görüş ve öneriler sunulmuştur.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Yönlü anten, yüksek kazanç, anten karakterizasyonu

Bilim Kod / Kodları: 90516/90523

Sayfa Sayısı : 68

## **ABSTRACT**

### **DESIGN, PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF HIGH GAIN ANTENNAS**

**MSC THESIS**

**BERK YORULMAZ**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. SEYİT AHMET SİS )**

**BALIKESİR, DECEMBER - 2024**

In this thesis, the design, production and characterization of various types of high-gain directional antennas operating in the C-band were carried out. The first of the designed antennas was a waveguide with optimized VSWR values to cover the 5-6 GHz range, excited with an RF probe at one end, and left open and illuminated at the other end. Then, A C-band reflector antenna design was realized by this waveguide illuminating a metal plate (splash plate) placed at the focus of a dish structure. Finally, a 16-element (4x4) array antenna design was manufactured in panel form, which is much more ergonomic than dish antennas for field use.

In the first part of the thesis, antenna fundamentals were given, focusing on directional and high-gain antennas. In the following sections, waveguide theory and the use of this theory in antenna design is discussed. Subsequently, dish antenna theory, the design and manufacturing process in C-band are provided with measurement results. Finally, array antenna theory and the 16-element array antenna design process were given in detail. In the last section of the thesis, the results related to the thesis are compiled, and opinions and suggestions are presented regarding the potential future developments on the subject.

**KEYWORDS:** Directional antenna, high gain, antenna characterization

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tez Amacı ve Önemi .....	2
1.2 Tezin Kabulenişleri.....	2
1.3 Tezin İçeriği .....	2
1.4 Anten Parametreleri .....	3
1.4.1 Yansıma Katsayısı ve Geri Dönüş Kaybı .....	3
1.4.2 Duran Dalga Oranı (SWR).....	4
1.4.3 Işıma Paterni .....	5
1.4.4 Yönlülük .....	5
1.4.5 Kazanç .....	7
1.4.6 Polarizasyon .....	7
1.5 Yönlü Antenler.....	8
1.6 Dalga Kılavuzu .....	12
1.7 Çanak Antenler .....	16
1.8 Dizi Anten Yapıları.....	18
<b>2. DAİRESEL DALGA KLAVUZ YAPILI YÖNLÜ ANTENLER</b> .....	<b>21</b>
2.1 Dairesel Dalga Klavuzu Antenler .....	21
2.2 Dairesel Dalga Klavuzu Işıma Paterni.....	23
2.3 4800-6200 MHz Dairesel Dalga Kılavuzu Anten Tasarımı .....	24
2.4 Dairesel Dalga Klavuzu Beslemesi ve Matematiksel Boyutlandırması .....	25
2.5 Dairesel Dalga Klavuzu 4800-6200 MHz Anten Boyutlandırmaları Optimizasyonu .....	27
2.6 Dairesel Dalga Klavuzu Antenin Işıma Grafiği .....	30
2.6.1 Dairesel Dalga Kılavuzu Anten Açık Alan Ölçüm Sonuçları .....	30
2.7 Dairesel Dalga Kılavuzu Anten Empedans Ölçüm Sonuçları .....	32
<b>3. SIÇRAMA PLAKALI ÇANAK ANTEN</b> .....	<b>35</b>
3.1 İkincil Yansıtıcısı Sıçrama Yüzeyle anten Yapısı.....	35
3.2 İkincil Yansıtıcısı Sıçrama Yüzeyle anten Yapısı Çanak kısmı.....	36
3.2.1 Çanak Kısmı İçin 5400 MHz Kazanç ve Etkin Açıklık Hesabı .....	37
3.2.2 Çanak Kısmı f/D oranına bağlı Kazanç ve Parametre Değerleri.....	38
3.3 İkincil Yansıtıcısı Sıçrama Yüzeyle anten Sıçrama Yüzey Kısmı .....	39
3.3.1 Sıçrama Yüzey Kısmının çanak odak Noktasına Bağlı Konumlanması .....	41
3.3.2 Sıçrama Yüzey Kısmının 5400 MHz için Boyutlandırması .....	43
3.3.3 Sıçrama Yüzeyinin Çanak Anten Kazancına Etkisi .....	44
3.4 Çanak Anten Aktif (Besleme) Kısmı .....	45
3.5 Çanak Anten Boyutlandırma Sonuçları .....	46

3.5.1 Çanak Anten S Parametre Sonuçları .....	47
3.5.2 Çanak Duran Dalga Oranı(SWR) Sonuçları .....	47
3.5.3 Çanak Anten Işıma Grafiği .....	48
<b>4. PANEL ANTENLER .....</b>	<b>50</b>
4.1 Tek Eleman Panel Anten Yapısı.....	50
4.1.1 Tek Eleman Panel Anten Tasarımı.....	51
4.1.2 Tek Eleman 5450 MHz Panel Anten .....	52
4.2 Dizi Panel Anten Yapısı .....	53
4.2.1 Dizi Panel Anten İletim Hattı İçin Güç Bölücü Yapısı .....	55
4.3 5450 MHz Dizi Panel Anten Tasarımı .....	57
4.4 4x4 Dizi Panel Anten Parametre Sonuçları .....	60
4.4.1 4x4 Dizi Panel Anten Duran Dalga Oranı(SWR) Sonuçları .....	61
4.4.2 4x4 Dizi Panel Anten Işıma Grafiği .....	62
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>64</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>66</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>66</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Anten bağlantı noktasında antene iletilen ve yansıyan güç gösterimi .....	4
Şekil 1.2: Yönlü anten dikey ışımaya paterni .....	6
Şekil 1.3: Anten ışınması kartezyen gösterimi .....	6
Şekil 1.4: Polarizasyon çeşitleri .....	8
Şekil 1.5: Alttaş entegreli dalga kılavuz yapısı .....	9
Şekil 1.6: Örnek yönlü SIW anten genel yapı ve değişkenleri .....	9
Şekil 1.7: YAGİ-UDA anten genel tasarım yapısı .....	10
Şekil 1.8: Yagi-uda anten elemanlarının EM salınımları .....	11
Şekil 1.9: Baskı devre üzerine tasarlanmış anten .....	12
Şekil 1.10: Farklı dalga kılavuzu yapıları ve koaksiyel iletim hattı. ....	13
Şekil 1.11: Açıklık anten çeşitleri .....	13
Şekil 1.12: Farklı dalga modlarının kılavuzlar içerisindeki ilerlemesi .....	14
Şekil 1.13: Çanak anten kısımları .....	17
Şekil 1.14: Farklı yapılarda ikincil kısım yansıtıcılar .....	18
Şekil 1.15: Paralel besleme dizi anten .....	19
Şekil 1.16: Sondan besleme dizi anten .....	19
Şekil 1.17: Ortadan beslemeli dizi anten .....	20
Şekil 2.1: Dairesel dalga kılavuzlu horn anten yapısı .....	21
Şekil 2.2: Düz daireysel dalga kılavuzu anten .....	22
Şekil 2.3: Dalga modu kesim frekansı mod sıralaması .....	23
Şekil 2.4: E plane TE <sub>11</sub> modu polar grafiği .....	23
Şekil 2.5: 1450 MHz anten için çıkartılmış dikey kesitte ışımaya polar grafiği, TM <sub>01</sub> modunda .....	24
Şekil 2.6: Dairesel dalga kılavuzu boyut değişkenleri .....	25
Şekil 2.7: Tasarlanan daireysel dalga kılavuzu boyutları .....	27
Şekil 2.8: Farklı uzunluktaki ayrı iki dalga kılavuzun s parametre sonuçları. ....	29
Şekil 2.9: Antenin yatay düzlemde (azimuth plane) yaptığı ışımaya kartezyen grafiği. ....	30
Şekil 2.10: Antenin dikey düzlemde (elevation) yaptığı ışımaya kartezyen grafiği. ....	30
Şekil 2.11: Anten saha testi görselleri. ....	31
Şekil 2.12: Anten saha testi görselleri, alıcı anten .....	32
Şekil 2.13: Üretilmiş anten fotoğrafı. ....	32
Şekil 2.14: Üretilmiş olan anten  S <sub>11</sub>   parametre değerleri. ....	33
Şekil 2.15: Üretilmiş olan anten giriş empedans değerleri .....	34
Şekil 3.1: İkincil yansıtıcı örnek bir çanak anten yapısı .....	36
Şekil 3.2: Çanak anten kısımları mesafe değişkenleri .....	37
Şekil 3.3: Sıçratma yüzeyli daireysel dalga kılavuzlu çanak anten gösterimi .....	40
Şekil 3.4: Sıçratma yüzeyi gösterimi .....	41
Şekil 3.5: Sıçratma plakasının farklı konumlardaki değişimi .....	42
Şekil 3.6: f/D oranına bağlı odak noktası açısı değişimi. ....	43
Şekil 3.7: Sıçratma plakası ile dalga kılavuzunun tam boyutları .....	44
Şekil 3.8: Dairesel dalga kılavuzunun milimetre cinsinden boyutlandırılmaları .....	45
Şekil 3.9: Dalga kılavuzunun boyunun uzatılması sonucu S parametre değerleri. ....	46
Şekil 3.10: Sıçratma plakası ve plakanın çanak yapısına bağlı konumlanma değerleri .....	46
Şekil 3.11: Çanak anten geri dönüş kaybı .....	47
Şekil 3.12: Çanak anten duran dalga oranı (SWR) .....	48
Şekil 3.13: Yatayda alınan normalize edilmiş güç değerlerinin polar grafikte gösterimi ..	48

<b>Şekil 4.1:</b> Farklı amaçlar için farklılık gösteren tekli panel anten yapıları .....	50
<b>Şekil 4.2:</b> Örnek tek eleman yönlü panel anten.....	51
<b>Şekil 4.3:</b> Hesaplanmış değerler sonucu oluşturulmuş tek eleman panel anten s parametre sonuçları.....	53
<b>Şekil 4.4:</b> Optimizasyon ile boyutlandırmaları üzerinde değişiklik yapılmış tek eleman anten s parametre sonucu.....	53
<b>Şekil 4.5:</b> Örnek 4x4 dizi panel anten yapısı.....	54
<b>Şekil 4.6:</b> Çift çıkış güç bölücü iletim hattı yapısı .....	55
<b>Şekil 4.7:</b> Çeyrek dalga dönüştürücü iletim hattı gösterimi ( $z_0$ : Çeyrek dalga boyu iletim hattı).....	56
<b>Şekil 4.8:</b> Matematiksel ifadeler sonucu boyutları hesaplanıp çıkartılmış 5450 Mhz 4x4 dizi antenin karşıdan görünümü.....	58
<b>Şekil 4.9:</b> Matematiksel ifadeler ile tasarlanmış olan dizi anten geri dönüş kaybı .....	59
<b>Şekil 4.10:</b> Kayıplı FR 4 ile sonuçları alınmış 4x4 dizi anten geri dönüş kaybı .....	59
<b>Şekil 4.11:</b> 4x4 üretilmiş dizi anten geri dönüş kaybı.....	60
<b>Şekil 4.12:</b> Empedans uyumu sonrası 4x4 anten geri dönüş kaybı.....	61
<b>Şekil 4.13:</b> Üretilmiş olan dizi antenin duran dalga oranı (SWR) sonucu .....	62
<b>Şekil 4.14:</b> Tasarlanmış olan 4x4 dizi antenin dikeydeki 2d polar kazanç grafiği .....	63
<b>Şekil 4.15:</b> Üretilmiş olan dizi anten görseli.....	63



## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 1.1:</b> Dalga modu çeşitleri ve aldığı değerler.....	15
<b>Tablo 1.2:</b> Farklı TM dalga modu değerleri .....	15
<b>Tablo 1.3:</b> Farklı TE dalga modu değerleri .....	16
<b>Tablo 2.1:</b> Farklı modlardaki empedans ve dalga boyu.....	26
<b>Tablo 2.2:</b> Pin uzunluğuna bağlı geri dönüş kayıpları.....	28
<b>Tablo 2.3:</b> Dalga kılavuzu kapalı yüzeyi ile pin arasındaki mesafeye bağlı geri dönüş kayıpları.....	28
<b>Tablo 2.4:</b> Dairesel dalga kılavuzu boyutlandırma karşılaştırması .....	29
<b>Tablo 2.5:</b> Anten farklı açılarda güç seviyesi .....	32
<b>Tablo 3.1:</b> Farklı frekanslarda farklı F/D oranları kazanç sonuçları .....	39

## SEMBOL LİSTESİ

<b>GHz</b>	: GigaHertz
<b>MHz</b>	: MegaHertz
$\epsilon_r$	: Dielektrik Katsayısı
<b>dB<sub>i</sub></b>	: Desibel İzotropik
<b>Hz</b>	: Hertz
<b>mm</b>	: Milimetre
$\mu$	: Manyetik Geçirgenlik
<b>dB</b>	: Desibel
<b>U</b>	: Işıma Şiddeti [W/sr]
$\Gamma$	: Anten Giriş Uçlarındaki Yansıma Katsayısı
<b>D</b>	: Yönlülük
<b>İ</b>	: Normalize Işıma Şiddeti
<b>P(r, <math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	: Işıma Gücü
$f_c$	: Kesim Frekansı
<b>c</b>	: Işık Hızı
<b>Z</b>	: Empedans
$\lambda$	: Dalga Boyu
<b>R</b>	: Yarı Çap
<b>F</b>	: Frekans
<b>A<sub>e</sub></b>	: Etkin Alan
$\epsilon_{reff}$	: Etkin Dielektrik Sabiti
$\lambda_0$	: Merkez Frekansın Boşluktaki Dalga Boyu
$\rho \angle \phi$	: Yansıma katsayısı açısal gösterimi
<b>D<sub>max</sub></b>	: Maksimum yönlülük
$\Omega_p$	: Katı açısı
<b>G(<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	: Yönlülüğe bağlı anten kazancı
<b>e</b>	: Verimlilik
<b>D(<math>\theta</math>, <math>\phi</math>)</b>	: Yönlülüğe bağlı anten yönlülüğü
<b>EM</b>	: Elektromanyetik
$z_c$	: Mikroşerit hat empedansı
$v_0$	: Merkez frekansın boşluktaki hızı

## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans tezimde, tez konumun belirlenme aşamasından, araştırma ve yazım aşaması dâhil olmak üzere bütün sürece dahil olan danışmanım Doç. Dr. Seyit Ahmet SİS'e, aileme ve iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

**Balıkesir, 2024**

**Berk YORULMAZ**

# 1. GİRİŞ

Haberleşme alanında özellikle uzak mesafelere düşük seviyede güç ve veri aktarımı konusunda elektronik sistemlerin kulağı olarak görülen antenler ile üzerlerinde oluşturulan akım dağılımları ve/veya açıklıkları arasındaki elektrik alanlar sayesinde ortama elektromanyetik dalga yayması sonucu kablosuz haberleşmenin gerçekleştirilmesi sağlanır. Ortama verilen dalga, alıcı anteni üzerinde bir akım dağılımı ve çıkış uçlarında potansiyel fark oluşturarak aktarılmak istenen veri düşük güçlerde dahi olsa aktarılmış olur [1].

Antenler temelde yönlü (directional) ve çok yönlü (omni directional) olarak iki sınıfa ayrılmaktadır [2]. Çok yönlü antenlerin kullanımı daha yaygındır. Çok yönlü antenler her ne kadar daha yaygın olsa da yetersiz kaldığı durumlar olmaktadır. Özellikle haberleşme mesafesinin artırılması istenildiğinde antene gelen gücün yönlü anten ile odaklanması gereken durumlarda tercih sebebidir.

Bu tez süresince farklı uygulamalar için üç farklı türde yönlü antenin tasarım üretim ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tezde belirtilen yönlü antenler sivil, askeri ve havacılık alanında çokça kullanılan ve uzak mesafelerde haberleşme bağlantılarının sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için büyük öneme sahiptir.

Araştırmanın ana başlıklarında, özellikle dalga kılavuzu yapısı, çanak anten yapısı ve panel antene yer verilmiştir. Bunlardan dalga kılavuzu yapısında olan anten özellikle iletim hattı olarak kullanılmasıyla bilinir. İletim hattı olarak kullanılması dışında üzerlerine yapılabilecek açıklıklar ile veya kendi uçlarındaki açıklıklardan ışıyarak yüksek kazançlı bir anten özelliğiyle de öne çıkmaktadır ki dalga kılavuzlu antenleri tek başına kullanılabildiği gibi dizi anten olarak veya bir çanak antenin aktif kısmı olarak ta rol oynamaktadır. Bunun yanında çanak anten yapıları özellikle havacılık ve savunma alanında uçak takip sistemi, araç takip sistemi ve uzak mesafe haberleşme sistemlerinde kullanıldığı gibi sivil alanda bilinen televizyon uydu haberleşmesinde, kablosuz uzak mesafe internet aktarımında kullanılabilmektedir. Tezin son konusu olan panel anten ise tasarımları genellikle baskı devre kartı (PCB) üzerinde gerçekleştirilen ve çoğunlukla dizi şeklinde tasarlanmış antenlerdir. Panel antenler özellikle kazanç değerleri içerisindeki anten sayıları kolaylıkla değiştirilerek oynanabilen, üretimi daha basit ve diğerleri kadar yer kaplamayan yapılar oldukları için bir sistemin veya cihazın içerisine kolaylıkla gömülebilir. Kompakt yapıları

sayesinde, cihaz ve sistemlerin için yerleştirilmesi daha kolaydır; bu nedenler, yüksek kazançlı anten ihtiyaçlarında çanak antene bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek kazançlı antenlere her ne kadar yönlü antenler örnek verilmiş olsa da çok yönlü yüksek kazançlı antenler de karşımıza çıkabilmektedir. Özellikle çok yönlü antenlerde dizi yapısındaki tasarım modeli karşımıza çıkmaktadır [3].

### **1.1 Tez Amacı ve Önemi**

Farklı amaçlar için kullanılan yüksek kazanç anten yapılarını matematiksel tabana oturtmak. Bu doğrultuda tasarlanmış antenleri üretip çıkan sonuçları beklentiler ile kıyaslamak. Çıkan sonuçlarda oluşmuş olan kötü değerleri istenilen değerlere çekebilmek için yapılabilecek yaklaşımları uygulayıp anten optimizasyonunu gerçekleştirmek.

### **1.2 Tezin Kabullenişleri**

Tez içerisindeki hesaplamalar ortamın ve malzemelerin kusursuz olduğu düşünülerek hesaplanılmıştır. İletkenler muhteşem iletken gibi düşünülmüştür. Üretim sonuçlarındaki boyutlarda hassasiyet mikrometre boyutlardadır. Anten ölçüm sonuçları açık alanda ölçülerek eklenmiştir.

### **1.3 Tezin İçeriği**

Tez içerisinde ilk kısım olan giriş kısmında antene bağlı genel parametreler açıklanıp anten yönlülüğü üzerine konuşulmuştur. Devamında literatürdeki farklı anten yapıları yüzeysel olarak anlatılmıştır. İlk kısmın sonlarında ise tez devamında ele alınan anten yapıları hakkında genel bilgiler verilip kendilerine özgü farklılıklar anlatılmıştır.

Tezin ikinci kısmı olan dairesel dalga kılavuzu anten yapısının başında horn antenlerden bahsedilip dairesel dalga kılavuzun dalga modları ve hesaplamalarından bahsedilmiştir. Hesaplamaların devamında antenin bilgisayar ortamındaki ışımaya sonuçları ve üretilmiş dairesel dalga kılavuzunun dönüş kayıp grafikleri verilmiştir.

Tezin üçüncü kısmında çift yansıtıcı, sıçratma plakalı anten matematiksel ifadeleri ile hesaplama sonuçları yer almaktadır. Bu hesaplamalar doğrultusunda üretilmiş anten yapısının sonuçları eklenmiştir.

Tezin dördüncü kısmında tek elemanlı devre kartı üzerine anten tasarımı yapıp sonuçlarına bakılmıştır. Sonuçlar doğrultusunda 4x4 dizi elemana nasıl çevrilebileceğiyle ilgili kısımlar eklenip üretilen ve bilgisayardan alınan sonuçlar üzerine konuşulup optimizasyonu doğrultusunda yapılan farklılıklar belirtilmiştir.

#### 1.4 Anten Parametreleri

Antenlerin elektriksel karakterizasyonları ve performanslarının değerlendirmeleri için tanımlanan temel parametreler aşağıda verilmektedir;

##### 1.4.1 Yansımaya Katsayısı ve Geri Dönüş Kaybı

Yansımaya katsayısı ve geri dönüş kaybı sinyal kaynağından gönderilen sinyalin ne kadarlık kısmının yük, yani antene aktarıldığının göstergesidir. Yansımaya katsayısı yükten, yani yük aktarılamayan sinyalin kaynaktan iletilmek istenen sinyale oranıdır. Gösterimi gama ( $\Gamma$ ) işareti ile belirtilmektedir. Eşitlik ise şu şekilde verilmektedir [4];

$$\Gamma = \frac{V_{Yansiyana}}{V_{Giren}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \rho \angle \phi \quad (1.1)$$

Burada  $Z_L$  yük (anten),  $Z_0$  ise kaynak (verici) empedansıdır.  $\rho \angle \phi$  ifadesi yansımaya katsayısının genlik ve açıl bilgisi olarak yazılmış halidir. Örneğin, kaynak empedansını 50 $\Omega$  kabul edip yük olarak kullanılmış antenin empedansını 90 $\Omega$  aldığımız duruma bakmamız gerekirse yansımaya katsayısını şu şekilde bulabiliriz;

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{90 - 50}{90 + 50} = 0.286 \quad (1.2)$$

Bunun sonucunda kaynak sinyal genliğinin %28,6'sının geri yansıdığını söyleyebiliriz. Sinyalin güç geri dönüş oranı ise şu şekildedir;

$$\Gamma_{güç} = |\Gamma|^2 = 0.286^2 = 0.082 \quad (1.3)$$

Geri dönüş kaybı ise yansımaya katsayısının dB cinsinden ifadesidir. Gösterimi ise şu şekildedir;

$$\Gamma_{(dB)} = -20 \log|\Gamma| \quad (1.4)$$

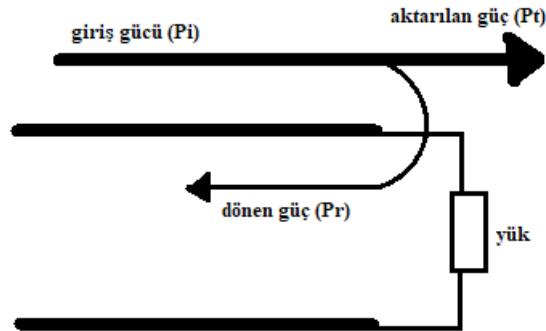
Burada  $|\Gamma|$ 'nin olabildiğince 0'a yakın olması istenir ki bu antenin bağlı olduğu sisteme (örn. verici ya da alıcı) uyumlu olduğunun göstergesidir. Yukarıda (1.2)'den görüldüğü üzere anten empedansı ( $Z_L$ ) kaynak empedansına ( $Z_0$ ) ne kadar yakın ise yansıma o kadar az ve anten o kadar sisteme o kadar uyumludur.

#### 1.4.2 Duran Dalga Oranı (SWR)

Duran dalga oranı (standing wave ratio), yansıma katsayısında olduğu gibi, antenin bağlı olduğu sistem empedansı ile ne kadar iyi eşleştiğinin bir göstergesidir. Gerilim duran dalga olarak (VSWR) bilinen bu parametre, yansıma katsayısının bir fonksiyonudur. Özellikle yansıma katsayısı verildiği durumlarda duran dalga oranına karşılık gelen değeri bu şekilde bulabiliriz [5];

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1.5)$$

Formülde de görüldüğü üzere yansıma katsayısı ile duran dalga oranında doğrudan bağlantı bulunmaktadır. Anten bağlantı noktasında antene aktarılan ve empedans uyumsuzluğu nedeni ile geri yansıyan gücün temsili gösterimi Şekil 1.1'de verilmektedir.



**Şekil 1.1:** Anten bağlantı noktasında antene iletilen ve yansıyan güç gösterimi.

Şekil 1.1'de gösterilen  $P_i$  kaynaktan gönderilen gücü,  $P_r$  ise yükten geri dönen gücü göstermektedir. Bunları yansıma katsayısı cinsinden bu şekilde yazabiliriz [5];

$$\Gamma = \sqrt{\frac{Pr}{Pi}} \quad (1.6)$$

### 1.4.3 Işıma Paterni

Antenlerin önemli parametrelerinden biri olan ışımada paterni, antenin küresel koordinatlardaki açılara bağlı normalize ışımada şiddetinin gösterildiği 2 ya da 3 boyutlu grafiksel gösterimdir.

Bir kablosuz linkte cihazların hangi mesafelerden haberleşebileceğinden kapsama alanının neye denk gelebileceğiyle ilgili önemli öngörüler için hayati öneme sahip bir parametredir. Normalize ışımada şiddeti aşağıdaki gibi hesaplanabilir [6];

$$i = \frac{P(r, \theta, \phi)}{P_m} \quad (1.7)$$

Burada  $P(r, \theta, \phi)$  poynting vektörü olup birim yüzeyden akan elektomanyetik gücü, yani güç yoğunluğunu vermektedir ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [7]:

$$P(r, \theta, \phi) = \frac{1}{2} \text{Re}[E_s \times H_s^*] \quad (1.8)$$

Yukarıda verilen ifadede (1.8),  $E_s$  ve  $H_s^*$  sırasıyla güç yoğunluğunun hesaplandığı konumdaki elektrik ve manyetik alanı temsil etmektedir.

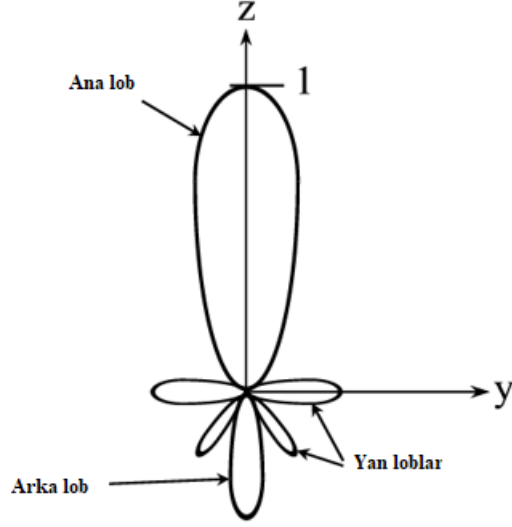
Burada anten ışımada izotropik bir özellik gösteriyor olsaydı her yöne eşit güç iletceği için normalize ışımada şiddeti şu şekilde olacaktır [7];

$$P_n(\theta, \phi) = 1 \quad (1.9)$$

### 1.4.4 Yönlülük

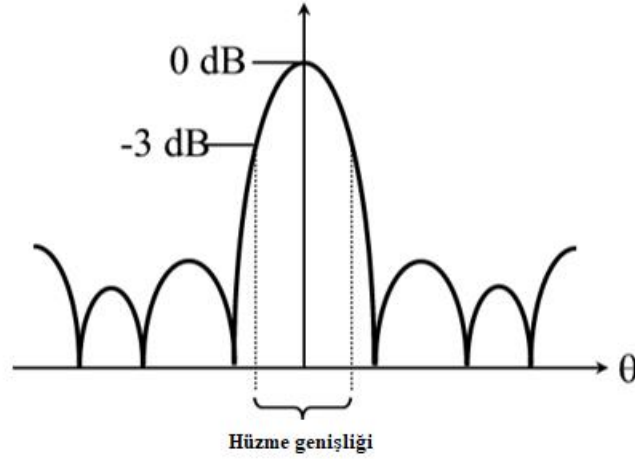
Anten parametrelerinden bir diğeri olan yönlülük antene aktarılan gücün bir yöne ne kadar odaklanabildiğinin bir göstergesidir. Bir ışımada yön lülüğünün hangi seviyelere denk geldiğinin göstergeleri ise yarı güç hüzmeye genişliğine denk gelen açılardır. Şekil 1.2’de örnek bir ışımada paterninin 2-boyutlu gösterimi verilmektedir.





**Şekil 1.2:** Yönlü anten dikey ışımada paterni [2].

Bir ışımada paterninin y-z eksenlerinden alınmış kesiti yukarıdaki gibi ele alacak olursak bunun yarım gücüne denk gelecek kısmını dikdörtgensel kartezyen sisteminde aşağıdaki şekilde gösterebiliriz;



**Şekil 1.3:** Anten ışımada kartezyen gösterimi [2].

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere ışımada maksimum noktasından -3dB yani yarım güce düşen kısımlarından işaretlenen kısımlara karşılık gelen noktalardan çizilecek olan çizgilerin arası yarım güç hüzme genişliğini göstermiş olacaktır. Bu noktalara gelecek olan üç boyutlu kısmın tüm paterni bir kürenin içerisine koyduğumuzu kabul edersek belirli bir katı açı

değerine denk geldiğini göreceğiz. Bir tam kürenin katı açısı  $4\pi$ 'ye denk geldiğini bildiğimize göre bir antenin maksimum yönlülüğünü şu şekilde yazabiliriz [7];

$$D_{max} = \frac{4\pi}{\Omega_p} \quad (1.10)$$

Burada D yönlülüğü ifade ederken,  $\Omega_p$  ise yarı güç hüzmeye genişliğinin denk geldiği katı açısını belirtmektedir.

#### 1.4.5 Kazanç

Anten ışıyıcısı, bağlantı noktaları ve antene dahil olan sinyal yolları üzerindeki elektriksel kayıplar (dielektrik ve iletken kayıpları) nedeniyle anten verimliliği ( $e$ ) düşecektir. Anten verimliliği antenden havaya ışıyan toplam gücün ( $P_{rad}$ ), empedans uyumsuzluğu hesaba katıldıktan sonra antene giren net güce ( $P_t$ ) oranıdır ( $e = P_{rad}/P_t$ ). Anten kazancı ise bu verimlilik değeri hesaba katılmış yönlülük parametresi gibi düşünülebilir ve aşağıda verildiği üzere hesaplanmaktadır [7];

$$G(\theta, \phi) = eD(\theta, \phi) \quad (1.11)$$

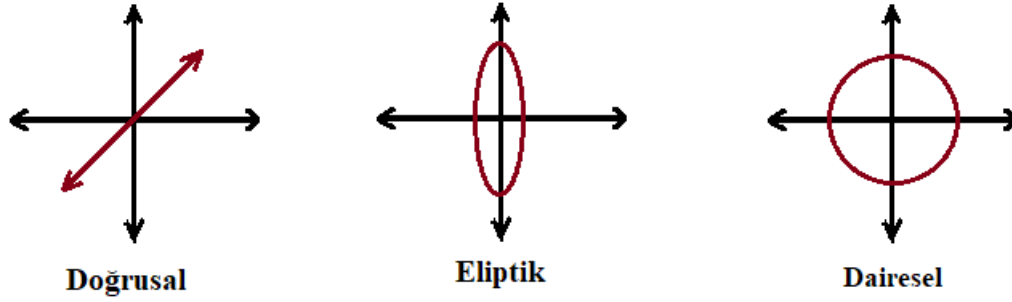
#### 1.4.6 Polarizasyon

Anten polarizasyonu anten tarafından üretilen elektromanyetik alanın yönü olarak tanımlanabilir. Polarizasyonu belirleyen anten üzerindeki gerilim farklarının oluşturduğu elektromanyetik dalganın hareketinin doğrusal, dairesel ve eliptik olmasıyla üç başlıkta incelenir.

**Doğrusal polarizasyon**, antenin açıklığındaki elektrik alanının ya da anten üzerinden akan akımın zamana bağlı hareketinin yatay veya dikey düzlemde olduğu durumdur. Bu durumda antenin ışıdığı elektromanyetik alan şiddeti de zamana bağlı aynı değişimi sergilemektedir. Dipol, monopul ve yüksek kazançlı doğrudan (collinear) dizi antenler çubuk yapıda olup çubuk doğrultusunda doğrusal polarize elektromanyetik dalga ışırlar.

**Dairesel polarizasyon**, isminden de anlaşılacağı üzere bir kartezyen sistemi baz alındığında z yönünde x ve y ekseninde merkezden eşit uzaklıklar çizecek şekilde ilerleyen polarizasyon çeşididir. Antenden ışıyan dalganın elektromanyetik alanının her noktada sabit bir büyüklüğe sahip olduğu ve dalganın yönüne dik bir düzlemde sabit bir hızda döndüğü bir polarizasyon durumudur.

**Eliptik polarizasyon** ise dairesel polarizasyondaki çembersel hareketin eliptik gerçekleşmesi durumudur. Her üç polarizasyonun ilerleyen elektromanyetik dalga üzerinde gösterimi Şekil 1.4’te verilmektedir.



**Şekil 1.4:** Polarizasyon çeşitleri.

### 1.5 Yönlü Antenler

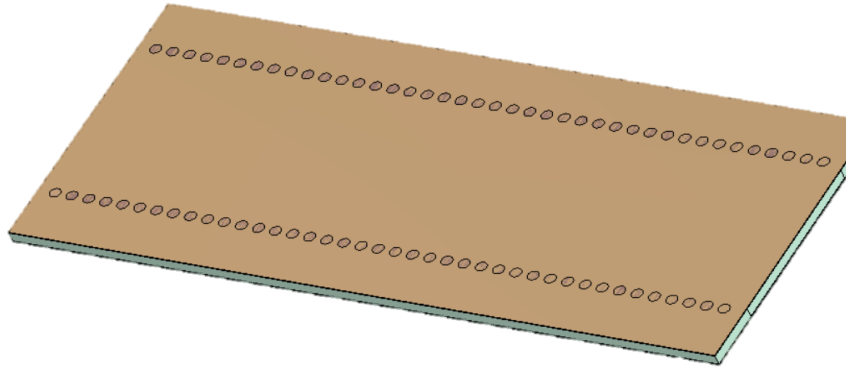
Yönlü antenler, antenlere iletilen gücü belirli bir yöne daha fazla odaklaması amacıyla tasarlanmış yapılardır. Alıcı olarak düşünüldüğünde de yine ortamdaki radyasyonu belirli yönlerden daha fazla alan yapıda olacaktır.

Antenin gücünü bir yöne yoğunlaştırarak göndermesi veya o yönden alması ile 1.1.3 ışınma paterni başlığı altındaki (1.11) eşitliğinden yönlülüğünün arttığı görülmektedir. Yönlülüğün artışı da anten kazancının artması anlamına gelmektedir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan ve ilerleyen bölümlerde detayları verilen dalga kılavuzu, çanak ve panel yapıları dışında çok farklı türde yönlü anten yapıları mevcuttur. Bunlardan bazıları aksiyel modda helis antenler, baskı devre kartlarının üzerlerine üretilen PCB antenler (örn. dikdörtgen ve dairesel yama antenler, substrat entegreli dalga kılavuzu antenler, yagi uda gibi iletken tellerin farklı uzunluk ve mesafelerde yan yana dizilerek oluşturulan antenler, log periyodik antenler, dikdörtgensel horn yapılı antenlerdir. Özellikle çanak yapılarının aktif besleme kısmında kullanılan antenler, sadece yönlü değil çok yönlü olarak tasarlanan yapılarla oluşturulmasına rağmen çanağın gücü odaklaması özelliğiyle yönlü olarak çalışmaktadır [2].

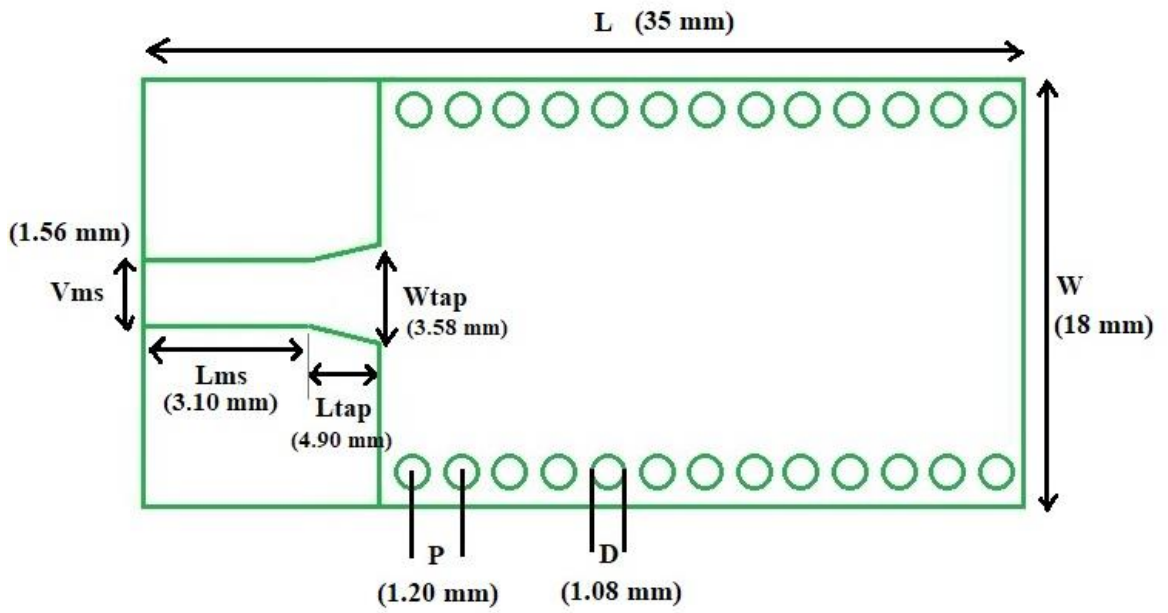
### Alttaş entegreli dalga kılavuzu anten yapıları;

İletken levhalar arasına alttaş entegre edilerek iletken çubukların iki taraflı olacak şekilde art arda sıralanmasıyla oluşturulan yapılardır. Baskı devre kartları, bu özelliği karşıladığından, beraber bulunduğu yerde az yer doldurmasından ve elektronik bileşenlere kolay montajından dolayı ortaya çıkartılmış bir yapıdır. Alttaş entegreli dalga kılavuzu daha çok iletim hattı olarak kullanıldığı bilinmesiyle beraber anten tasarımlarıyla da gün yüzüne çıkmaktadır. Bu anten yapısı geleneksel dikdörtgenel dalga kılavuzuna ve dalga moduna sahip özellikler ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 1.5: Alttaş entegreli dalga kılavuz yapısı.

Örnek SIW yönlü anten tasarımının aşağıdaki şekil ve boyutlandırılardan görebiliriz [8];

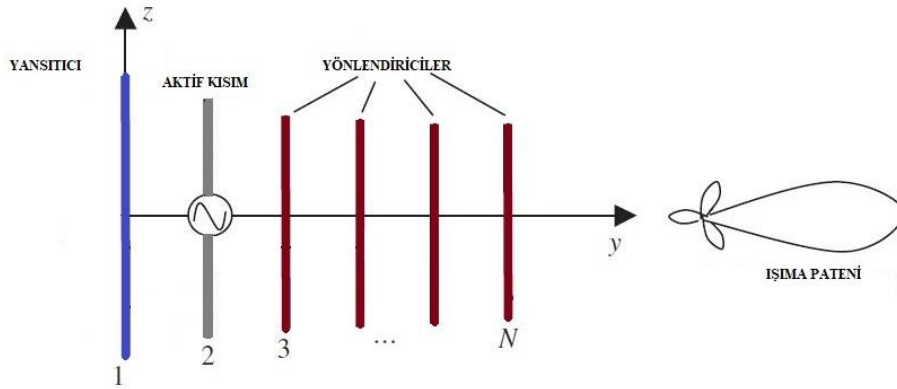


Şekil 1.6: Örnek yönlü SIW anten genel yapı ve değişkenleri.

Şekil 1.6'da görüleceği üzere genel Yönlü SIW anten değişken değerleri verilmiştir. Buradaki değişkenler Ku bant için tasarlanmış bir SIW antende boyutlandırmaları (milimetre) Şekil 1.6'daki parantezli kısımda yer alan değerlere denk gelecektir [8]. Tasarlanmış baskı devre kartı FR4 olup kart inceliği 1.5 mm elektriksel geçirgenliği ise 4.3 olarak alınmıştır.

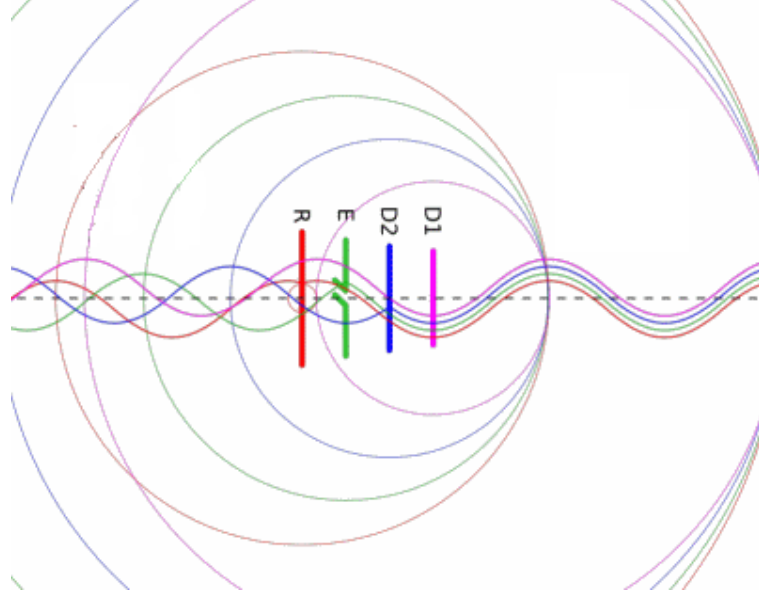
### Yagi-Uda anten yapıları;

Yagi Uda antenler Japonya'da Shintaro Uda ve Hidetsugu Yagi tarafından ortaya konulmuş yönlü anten yapısıdır. Birbirine paralel olarak yerleştirilen iletken çubuklar arayıcılığıyla oluşturulup sırasıyla yansıtıcı, ışığıcı ve yönlendiriciler ile oluşturulmaktadır [1][9]. Bu anten yapısında, yönlendirici adedi arttıkça kazancının artması ile istenilen değerler sağlanabilmektedir. Yagi uda antenler tek ışığıcı ve yönlendirici bulundurmaktadır [10]. Şekil 1.7'da Yagi-Uda antenin genel gösterimi verilmektedir.



**Şekil 1.7:** YAGİ-UDA anten genel tasarım yapısı.

Yansıtıcı üzerinden yansıyan dalga, ışığıcı tarafından oluşturulan dalgayla üst üste gelecek şekilde tasarlanmak üzere mesafeler hesaplanır. Yansıtıcı ve ışığıcıyla beraber yönlendirici hatlar üzerinde oluşturulan akıların salınımları da oluşan dalgayı destekleyici bir ışınım yaparak anten kazancını arttırmış olurlar (bkz. Şekil 1.8).

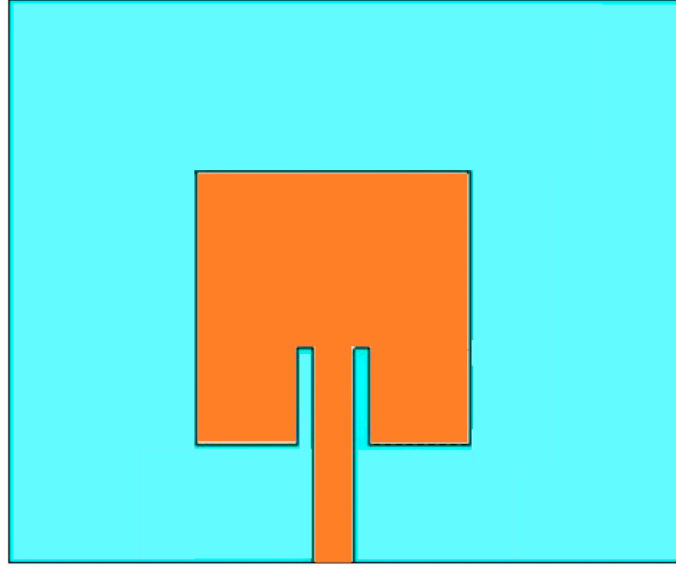


Şekil 1.8: Yagi-Uda anten elemanlarının EM salınımları [11].

### **Baskı devre kartları ile oluşturulan anten yapıları;**

Antenler genel olarak farklı yapılarda, farklı boyutlarda, farklı şekillerde olup kimi kompleks tasarımlar özellikle geniş bant yüksek kazanç değerlerinin sağlanma isteği durumlarında kullanılabilir. Üretimi ve tasarımı kolaylaştırdığı, cihazlara entegrasyonu da çok kolay olduğu için en çok tercih edilen anten türlerinden biri baskı devre kartları üzerinde üretilen antenler olmaktadır. Üretim anlamındaki kolaylıkla beraber yönlü anten yapılmak istenildiğinde gücü odaklama konusunda çift taraflı baskı kartlarının bir tarafı ışıyıcı kısmı olurken diğer taraf ışıyıcının o tarafındaki ışımaya tam tersine döndürmesini sağlayarak bir tarafa odağı arttırmaktadır.

Baskı devre kartları ile eğimli yapılardan, zikzaklı yapılara, delikli, üçgensel, yuvarlak vb. şekiller oluşturularak özellikle çoklu band, geniş bant yüksek kazanç değerleri elde edilebilmektedir.

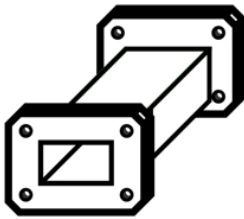


**Şekil 1.9:** Baskı devre üzerine tasarlanmış anten.

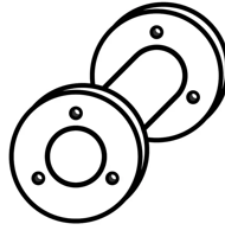
Şekil 1.9’de baskı devre kartları üzerine üretilebilen örnek bir yama anten gösterimi verilmektedir.

### 1.6 Dalga Kılavuzu

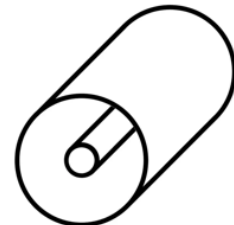
Dalga kılavuzu yapıları, ortama salınacak olan elektromanyetik dalganın ortama salınmadan içi boş bir metal borunun içerisinden geçirilip herhangi bir kaçak olmadan bir uçtan diğer uca kılavuzlanarak aktarılmasıdır [12]. Dalga kılavuzu yapıları yüksek frekanslı alıcı ve vericilerde sinyalin iletimi için kullanılan çok düşük kayıplı iletim hatlarıdır. Dalga kılavuzu yapıları uçlarındaki açıklıktan veya üzerlerine yapılan yarıklardan ışıtarak birer anten olarak da kullanılmaktadır. Şekil 1.10’da dalga dikdörtgen ve çembersel dalga kılavuzları ile birlikte koaksiyel iletim hattı karşılaştırılma maksatlı birlikte verilmektedir.



**DİKDÖRTGENSEL  
DALGA KILAVUZU**



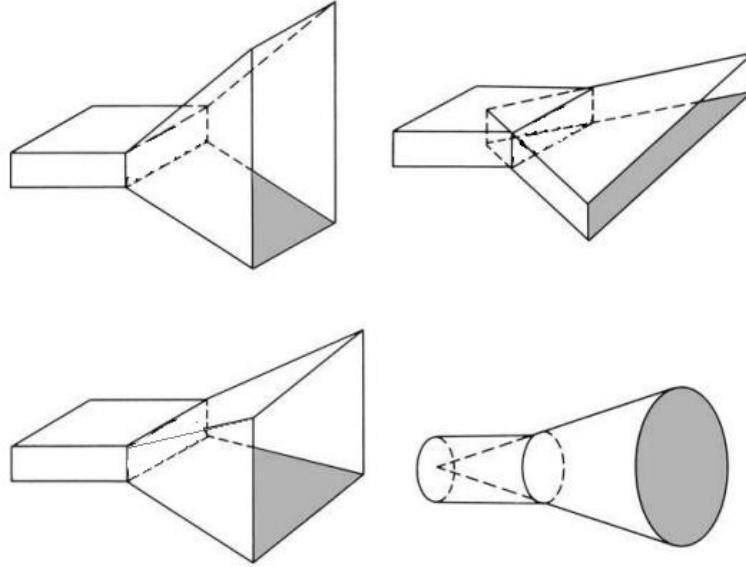
**DAİRESEL DALGA  
KILAVUZU**



**KOAKSİYEL  
(EŞ EKSEN)  
İLETİM HATTI**

**Şekil 1.10:** Farklı dalga kılavuzu yapıları ve koaksiyel iletim hattı.

Dalga kılavuzlarının en yaygın kullanıldığı yapılardan biri de huni antenlerdir. Şekil 1.11’de görüldüğü üzere dalga kılavuzları burada huni antenlere sinyalin iletildiği iletim hattı olarak kullanılmaktadır.



**Şekil 1.11:** Açıklık anten çeşitleri [2].

**Dalga kılavuzu dalga modu**, EM dalganın, dalga kılavuzunun içinden ilerlerken hattın kesitinin boyutlarına, çalışıldığı frekansa bağlı olarak kesit üzerinde farklı manyetik ve elektrik alan dağılımları sergilemesi olarak tanımlanabilir. Modlar kesit boyutlarına bağlı sınır koşullarıyla Maxwell denklemleri sonucunda EM dalga denkleminde indirgenerek analiz edilir. Analiz sonucunda birden fazla çözüm veya mod ortaya çıkar. Bu modlar frekansa, dalga kılavuzun boyutuna bağlı farklı değerlerde ortaya çıkmaktadır. Ele alınan mod belirli bir frekans değerinin altında kılavuzun içinde iletimin görülmemesi o modun kesme frekansını göstermektedir.

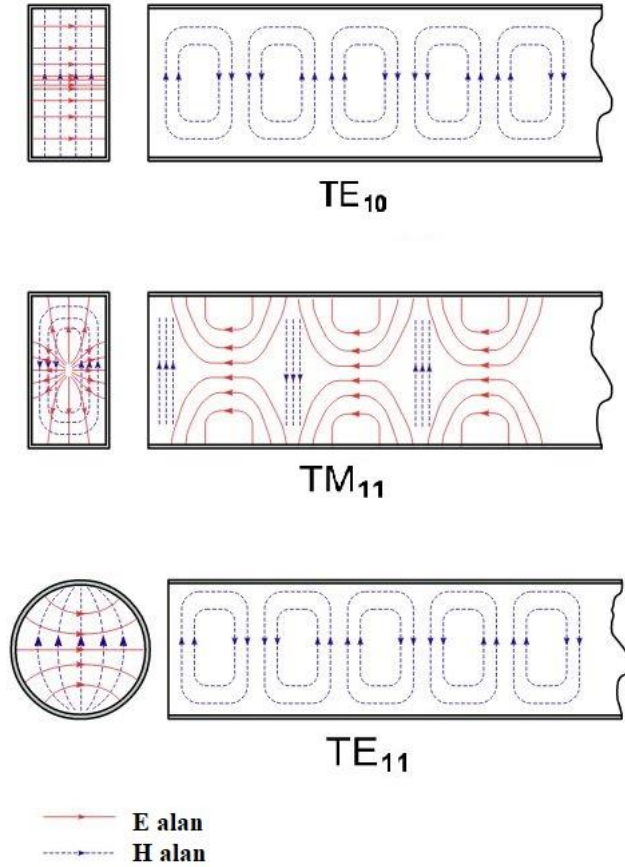
Temel olarak ele alınan dalga modları ise şu şekildedir;

- TE modları (enine elektrik alan)
- TM modları (enine manyetik alan)
- TEM modları (enine elektrik ve manyetik alan)



Burada modlar yayılma yönünde dalganın elektrik veya manyetik alana sahip olup olmamasını göstermektedir. Dalga modları dikdörtgen ise dikdörtgene, silindirik ise silindirik koordinatlara bağlı çözümlenir [6].

Kılavuzların baskın modu olarak bilinen modlar en düşük kesme frekansına sahip olanlardır. Buradan dikdörtgensel ve dairesel yapıların baskın modları  $TE_{10}$  ve  $TE_{11}$  olarak karşımıza çıkmaktadır [13].



**Şekil 1.12:** Farklı dalga modlarının kılavuzlar içerisindeki ilerlemesi [13].

Şekil 1.12’de görülebileceği üzere farklı modların kılavuz içerisinde farklı dalgalar oluşturduğu bilinmektedir.

Dikdörtgensel dalga kılavuzunu ele alacak olursak  $TE_{ab}$  modundaki yatay kenarın yarım dalga sayısına karşılık geldiğini gösterirken  $b$  ise dikeyde karşılık gelen yarım dalga sayısına karşılık gelmektedir.

Dikdörtgensel dalga kılavuzunda kesim frekansları şu şekilde bulunmaktadır [13];

$$f_{c_{mn}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.12)$$

Yukarıdaki eşitlikte ‘ $a$ ’ ve ‘ $b$ ’ değerleri dikdörtgen yapının kenar uzunlukları olup ‘ $m$ ’ ve ‘ $n$ ’ değerleri mod değerleri olan 0,1,2,... pozitif tam sayılardır [13].

**Tablo 1.1:** Dalga modu çeşitleri ve aldığı değerler.

Mod	$m$	$n$
TE	1	0
TE	2	0
TE	0	1
TE,TM	1	1
TE,TM	2	1

Dikdörtgensel dalga kılavuzunun yanı sıra çembersel dalga kılavuzları da yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Çemberseldeki dalga modları dikdörtgenselde olduğu gibi ele alınmaktadır. Çembersel dalga kılavuzu kesim frekansı ise şu şekilde bulunmaktadır [14];

$$f_c = \frac{p_{nm}c}{2\pi r} \quad (1.13)$$

Yukarıdaki eşitlikte ‘ $r$ ’ yarı çap olup ‘ $p_{nm}$ ’ ise TM modları için şu şekildedir [14];

**Tablo 1.2:** Farklı TM dalga modu değerleri.

$n/m$	$p_{n1}$	$p_{n2}$	$p_{n3}$
0	2.405	5.520	8.654
1	3.832	7.016	10.174
2	5.135	8.417	11.620

‘ $p_{nm}$ ’ TE modları için ise şu şekildedir;

**Tablo 1.3:** Farklı TE dalga modu değerleri.

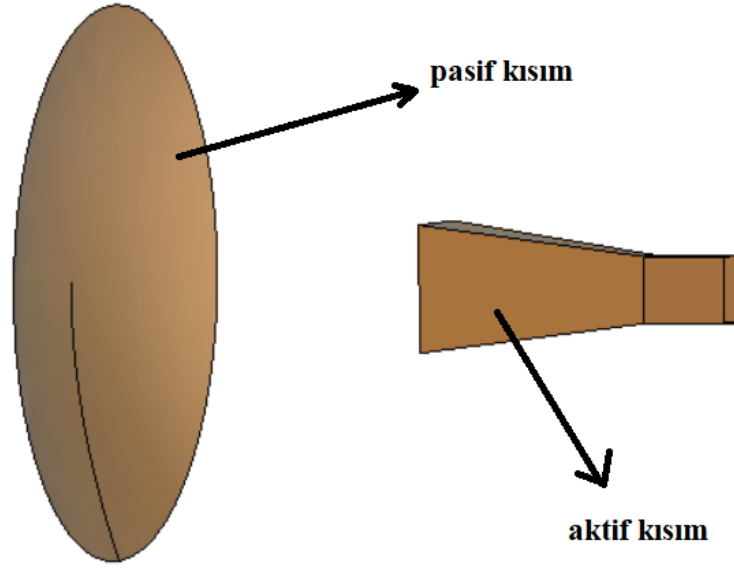
$n$	$p_{n1}$	$p_{n2}$	$p_{n3}$
0	3.832	7.016	10.174
1	1.841	5.331	8.536
2	3.054	6.706	9.970

### 1.7 Çanak Antenler

Yönlü anten tasarımlarından biri olan çanak yapısı çok yaygın kullanılan anten çeşididir. Çanak antenler elektromanyetik dalgaları parabolik yapılarından dolayı oluşan odak noktasına toplayan veya odak noktasından gelen dalgaları yönlendiren yapılardır. Bu antenler yüksek kazanç sağlaması ve buna bağlı dar hüzmeye genişliği oluşturmasından dolayı yönlü antenler içerisinde sıklıkla tercih edilirler. Çanak antenler temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar aktif ve pasif olarak adlandırılırlar.

**Pasif kısım:** Çanak antenin pasif kısmı parabolik yapıda olan yansıtıcı yüzeydir. Dış alandan gelen EM dalgaları odak noktasında topladığı gibi odak noktasından gelen dalgaları da dış alana odaklayarak gönderir. Üzerine düşecek olan dalgaları iyi yansıtabilmesi için pürüzsüz ve iletkenliği yüksek malzemeler tercih edilir. Kazanç değerinin artabilmesi için pasif kısmın çapının artırılması gerekmektedir. Bunun matematiksel ifadelerini üçüncü kısımda çanak anten başlığı altında inceleyeceğiz.

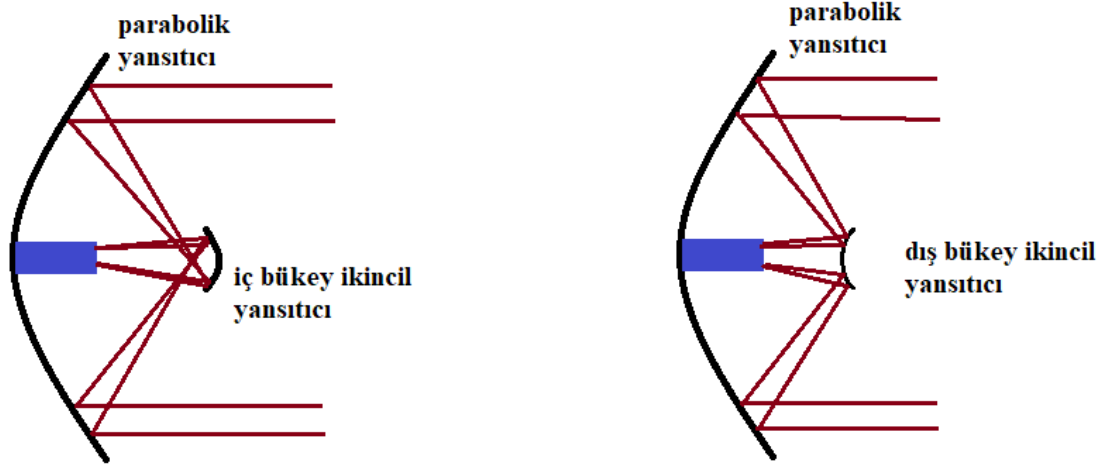
**Aktif kısım:** Besleme kısmı olarak ta bilinen bilgi sinyalinin işlenebilmesi veya gönderilebilmesi için devreye direk fiziksel olarak bağlı olan kısımdır. Bu kısım da ayrı bir anten yapısı olarak kullanılmasıyla beraber özellikle gücü daha fazla odaklanması gerektiğinde çanak antenin aktif kısmı olarak görev yaparlar. Burada çembersel veya dikdörtgensel veya baskı devre yönlü antenler dışında monopol yay, dipol çok yönlü antenler de kullanılabilir. Şekil 1.13'te bir çanak antenin aktif ve pasif kısımları görülebilmektedir.



**Şekil 1.13:** Çanak anten kısımları.

Çanak antenlerde çanak kısım genel olarak parabolik yapıdadırlar [2]. Bu antenler, çanak olarak adlandırılan pasif kısım ve sinyallerin devreye alınıp, devreden gelenleri dış dünyaya ileten aktif kısımlardan oluşmaktadır. Burada belirtilmiş olan iki kısım bir çanakta kesin bulunan yapılar olup bunun yanında ikincil kısım gibi ek yansıtıcılar da eklenebilmektedir. Çanak antenlerde parabolik yapı sabit tutulup aktif kısmı yer ve şekil olarak değiştirebilmektedir. Buna bağlı olarak çanak anten yapılarını odak noktasına direk aktif kısım konularak yapılan veya odak noktasına ikincil yansıtıcı kısım konularak oluşturulan tasarımlar diye iki kısma bölebiliriz. İkincil yansıtıcı çanak anteni ise iç bükey, dış bükey ve sıçrama plakalı olarak ayırabiliriz. Şekil 1.14’te farklı yapılarda ikincil kısım yansıtıcıların genel gösterimi verilmektedir.

Odak noktasında ikincil yansıtıcıya sahip antenlerin ise aktif kısımları parabolik çanak kısmının merkezinden gelip, aktif kısmın ışımaya yaptığı tarafın ikincil yansıtıcı kısma bakmasıyla oluşturulur. Bu yapıda olup özellikle sıçrama plakalı çeşidindeki çanak antenin, hava aracı haberleşmeleri ve uydu haberleşmeleri için hareketli yapılar üzerine eklenerek kullanıldığını görmekteyiz.



Şekil 1.14: Farklı yapılarında ikincil kısım yansıtıcılar [2].

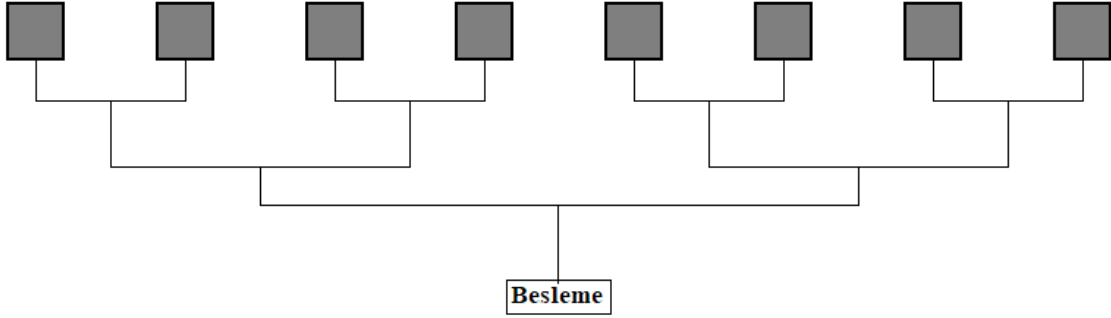
İkincil yansıtıcı kısım özellikle yan lobları azaltmak için kullanılıp EM dalgayı iki kez yönlendirip gücü farklı yönlerde kaybetmeden istenilen tarafa aktarabilmesini sağlamaktadır.

İkincil yansıtıcı kısım olmayan antenler karşımıza genelde televizyon uydu yayınlarını almak için kullanılan çanak antenler olarak çıkmaktadır. Burada odak noktasında bulunan bir anten ve ön-rf (front-end) devresini görebiliriz.

### 1.8 Dizi Anten Yapıları

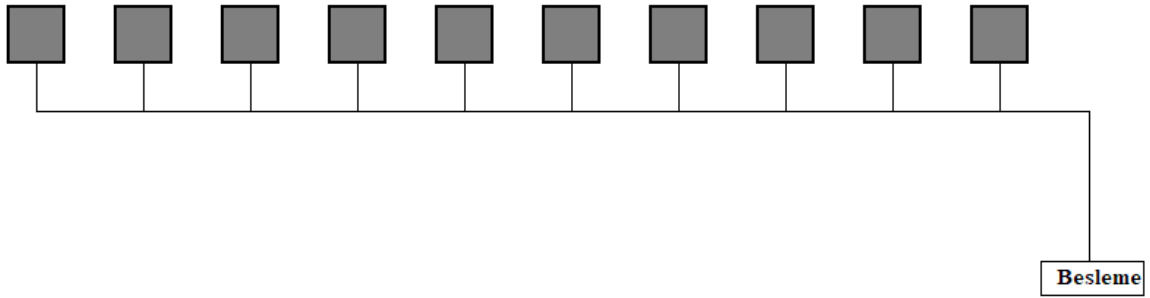
Kablosuz haberleşmede mesafeyi arttırabilmek için anten ışınmasını daha fazla odaklamamız buna bağlı kazancı arttırmamız gerekmektedir. Anten kazancını arttırmanın yollarından biri ve sıkça kullanılanı ise birden fazla anteni aynı anda kullanmak, dizi haline getirmektir. Dizi antenler her ne kadar radarlarda olduğu gibi faz kaydırma ile elektronik ana huzme taraması amacı için kullanılsa da çoğunlukla tasarımları tek bir açığa odaklı ve yalnızca yönlülük artırma amacıyla yapılmaktadır. Buradaki tüm antenlerin üzerine aynı fazlar düşürülüp, aralarındaki mesafeler de sistematik olarak tasarlanıp antenin yönlülüğü ve dolayısıyla kazancı artırılmıştır. Dizi antende, aynı çanak antende olduğu gibi, anten kesit alanı ( $A_e$ ) artacağı için genel olarak kazancın da artmasını bekleriz. Fakat burada antenlere giren sinyal fazları ve antenler arası mesafeler doğru hesaplanıp hassas üretilmesi gerektiği için tasarım ve üretim süreci daha zorlu ve karmaşıktır.

Dizi antenleri besleme çeşitlerine göre ayırmamız gerekirse karşımıza üç ayrı besleme türü yaygın olarak çıkmaktadır. Bunlar paralel besleme, sondan besleme ve ortadan beslemedir. Buradaki paralel besleme özellikle yönlü ve yüksek kazançlı anten tasarımında çoğunlukla kullanılmaktadır. Dizideki her bir antene gidecek bilgi sinyali tek besleme üzerinden güç bölücülerle bölünerek ayrı ayrı aynı fazı girecek şekilde tasarım gerçekleştirilir.



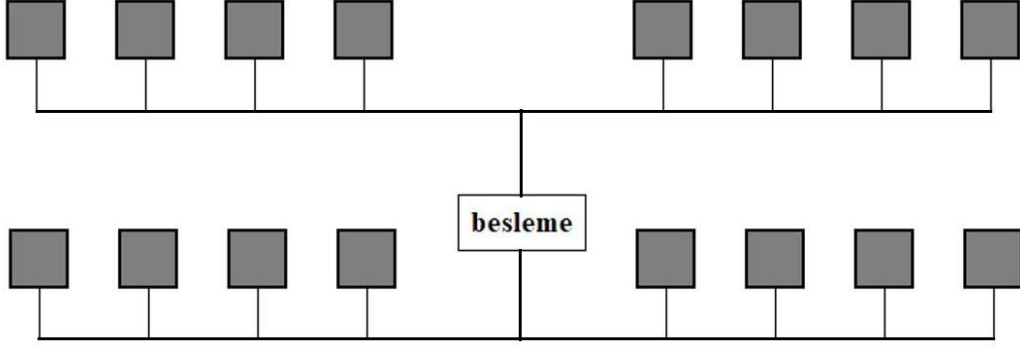
**Şekil 1.15:** Paralel besleme dizi anten.

Paralel besleme yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi yapılırken sondan besleme ise şu şekilde yapılmaktadır [2];



**Şekil 1.16:** Sondan besleme dizi anten.

Sondan beslemeli dizi antende Şekil 1. 16' da görüldüğü üzere beslemeden itibaren her bir ışıyıcı sırayla dizilerek oluşturulmaktadır.



**Şekil 1.17:** Ortadan beslemeli dizi anten.

Ortadan beslemeli antende Şekil 1.17’de görüldüğü üzere beslemeden itibaren yollar çıkıp her bir yola birden fazla sayıda ışıyıcı eklenerek oluşturulmuştur.

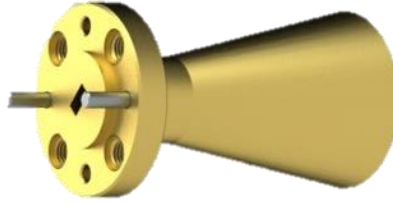
Paralel beslemede, besleme portundan çıkan gücün veya besleme portuna girecek olan gücün dağılımı eşit ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için iletim hatları güç bölücü mantığıyla oluşturulur ki karşımıza güç bölücü çeşitlerinden olan güç bölücüleri fazlasıyla çıkmaktadır.

## 2. DAİRESEL DALGA KILAVUZ YAPILI YÖNLÜ ANTENLER

Dairesel dalga kılavuzu yapıdaki antenler şekil ve tasarımsal olarak yönlü anten kategorisine girmektedir. İlk bölümde anlatıldığı gibi antene iletilen gücü belirli bir yöne yoğunlaştırmasıyla o yöndeki haberleşme mesafesini arttırmaktadır.

### 2.1 Dairesel Dalga Kılavuzu Antenler

Dairesel dalga kılavuzu yapısındaki antenler karşımıza genelde düz, aynı çapta devam eden veya anten açık yüzeyinin genişletilerek çapının artırılmasıyla üretilen dairesel dalga kılavuzlu horn antenler olarak çıkmaktadır. Dalga kılavuzu antenler, anten kayıplarının düşük olması, yüksek güç iletimi, yüksek frekansta çalışabilme özelliklerinin yanında geniş bant özelliği de göstermektedir. Dalga kılavuzu geometrisinin küçükten büyüğe genişleyen çapta üretilmesi ile Şekil 2.1’de gösterilen dairesel horn yapısı ortaya çıkmaktadır ve bu yapı daha da geniş bantlı bir cevap sergilemektedir. Horn antenler genel olarak 10-20 dBi arası kazanç değeri sağlayabilmektedir [15].

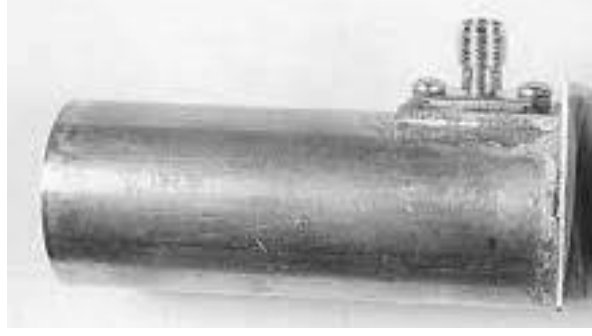


Şekil 2.1: Dairesel dalga kılavuzlu horn anten yapısı [15].

Yukarıdaki görsel bir anten üreticisi tarafından üretilmiş olup 77-68 GHz frekans aralığında çalışıp 20 dBi kazanç sağlamaktadır [16].

Bu kısımda asıl üzerinde durulacak düz dairesel dalga kılavuzlu antenlere baktığımızda kazanç değerinin yaklaşık 9 dBi’ya denk geldiğini görebilmekteyiz. Yarı hüzme genişliğine baktığımızda ise yaklaşık 70 derece olduğunu gerek simülasyon gerekse matematiksel ifadelerden çıkarabilmekteyiz.





**Şekil 2.2:** Düz dairesel dalga kılavuzu anten [17].

Dairesel dalga kılavuzunda modları 1.3.1 başlığı altında temel olarak gösterildi. Silindirik dalga kılavuzu antenlerde baskın mod olan TE<sub>11</sub> modu gözetilerek boyutlandırılmalar yapılmaktadır. Bu modun aralığı dışında çalışıldığı durumlarda geri dönüş kayıplarının çok yüksek olduğu gözlenmiştir ki hat olarak kullanıldıkları durumlarda bu özelliklerden yararlanılıp filtre olarak yapılan tasarımlar karşımıza çıkabilmektedirler.

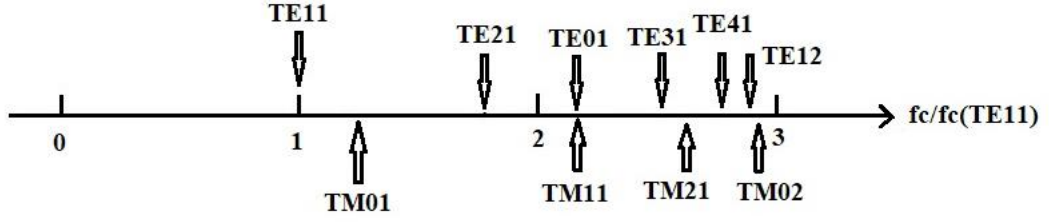
TE<sub>11</sub> modu kesim frekansı 1.3.1 dalga kılavuzu modlarında denklem 1.13 dairesel dalga kılavuzu hesabına göre şu şekilde bulunmaktadır [14];

$$f_c = \frac{1.841c}{2\pi r} \quad (2.1)$$

Burada  $f_c$  TE<sub>11</sub> modunun çalışabileceği en düşük frekans değeri olup devamında gelen TM<sub>01</sub> modunun kesim frekansı ise 1.3.1 dalga kılavuzu modlarında denklem 1.13 dairesel dalga kılavuzu hesabına göre şu şekilde bulunmaktadır [14];

$$f_c = \frac{2.405c}{2\pi r} \quad (2.2)$$

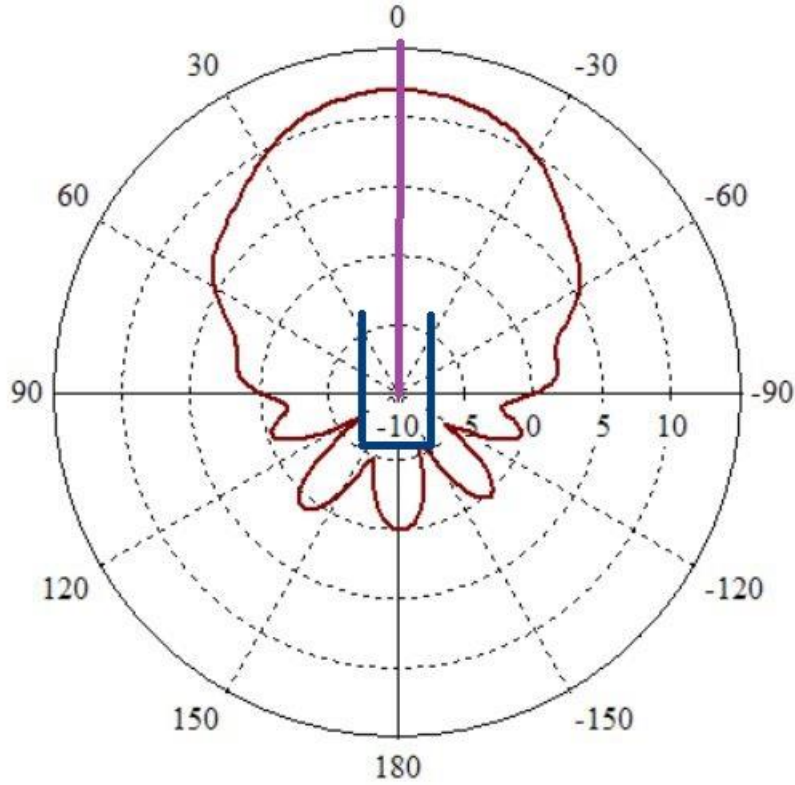
Çembersel dalga kılavuzları için diğer modların frekansa göre sıralamaları da Şekil 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.3: Dalga modu kesim frekansı mod sıralaması [13].

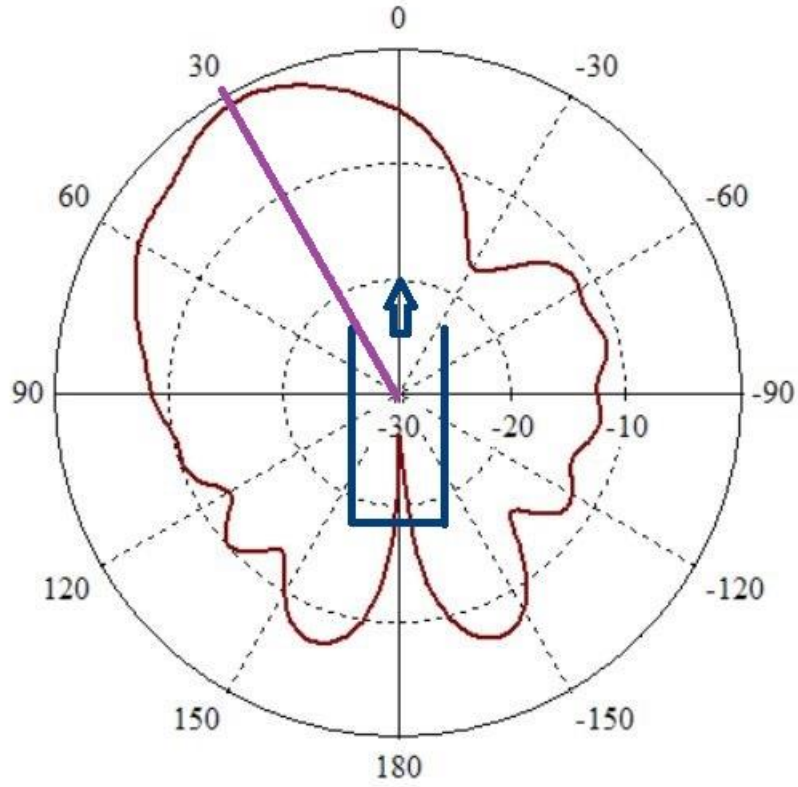
## 2.2 Dairesel Dalga Kılavuzu Işıma Paterni

Dairesel dalga kılavuzu antenler TE11 moduna uygun şekilde tasarlanmaktadır. TE11 modunun anten ışıma paternine dikey kesitte (E-plane) baktığımızda aşağıdaki şekilde görünmektedir;



Şekil 2.4: E plane TE11 modu polar grafiği.

TM01 modunda ışıma paterni ise aşağıda Şekil 2.5'te verilmektedir. Şekil 2.5'te ana lobun belli bir açıda sola döndüğü görülmektedir.



**Şekil 2.5:** 1450 MHz anten için çıkartılmış dikey kesitte ışınma polar grafiği, TM01 modunda.

### 2.3 4800-6200 MHz Dairesel Dalga Kılavuzu Anten Tasarımı

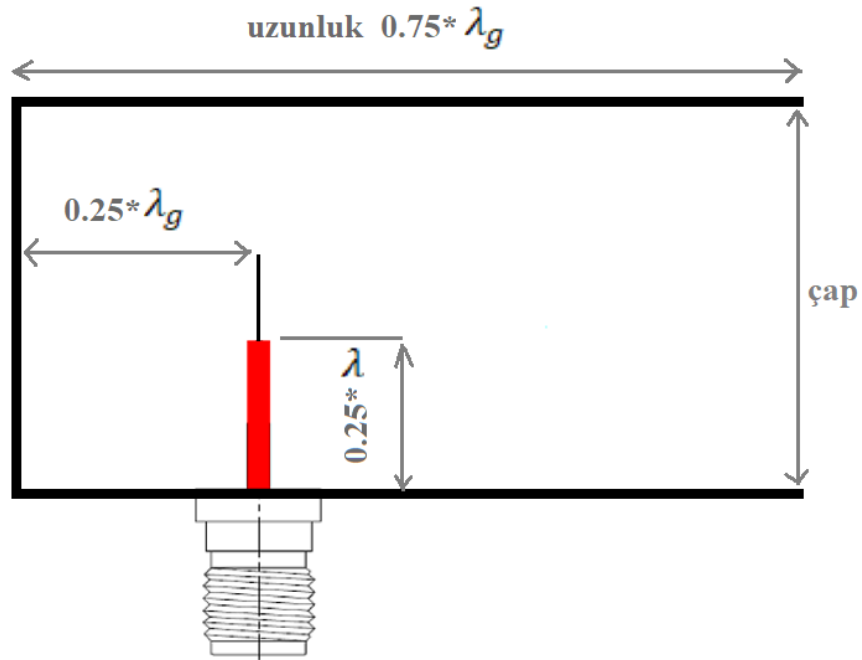
Bu kısımda 4800 MHz-6200 MHz aralığında çalışacak dalga kılavuzu antenin tasarım süreci verilmektedir. Kesim frekansı hesabında TE11 modu üzerinden hesap yapıp geri dönüş kaybının 4800 MHz seviyesinde iyi bir cevap verebilmesi için çalışılacak olan en düşük frekansın 4800 MHz den yaklaşık yüzde beşlik daha düşük frekansta hesaplanması yapılacaktır. Buna göre kesim frekansı 4600 MHz olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir.

TE11 modu kesim frekansı (2.1) kullanılarak dalga kılavuzunun yar çapı 19.1 mm hesaplanmıştır ( $r = 19.1 \text{ mm}$ ). Benzer şekilde (2.2) kullanılarak bu yarı çapta TM01 modu için kesim frekansı 6.011 GHz olarak hesaplanmıştır. (2.2) ve (2.1) birbirlerine oranlandığında, TM01 kesim frekansının TE11 kesim frekansına oranının her daim 1.3 olduğu görülecektir.

## 2.4 Dairesel Dalga Kılavuzu Beslemesi ve Matematiksel Boyutlandırması

Tasarlanıp üretilmiş olan dalga kılavuzu beslemesi doğrusal polarizasyonda elektromanyetik alan ışıması yapmaktadır. Kılavuzun içerisine konulacak olan pin düz tel parçası olup telin boyuna ve kılavuzun arka kapalı duvarın mesafesine bağlı olarak dairesel dalga kılavuzlu antenin geri dönüş kayıplarının ayarlanmasında önemli rol oynamaktadır.

Dairesel dalga kılavuzu anten beslemesinin tasarımını, öngörülen yaklaşık tasarım boyutlarından yola çıkarak, besleme pininin mesafe ve boyutları değiştirilip optimum değerler elde edildi. Bir dairesel dalga kılavuzu anten yapısının pin boyutları ve yerleşimi Şekil 2.6'de verilmektedir [18].



Şekil 2.6: Dairesel dalga kılavuzu boyut değişkenleri.

Yukarıdaki şekilde verilen ' $\lambda$ ' ve ' $\lambda_g$ ' değişkenleri sırasıyla 'havadaki dalga boyu' ve 'dalga kılavuzu dalga boyu' olarak isimlendirilmektedir.

Aşağıda (2.3)'de verilen eşitlik ve Şekil 2.6'de ki matematiksel ifadeler kullanıldığında  $\lambda$  boyutunun değeri 54.5 mm, (2.4)'te verilen eşitlikle ise  $\lambda_g$  99.4 mm olarak hesaplanmaktadır.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.3)$$

c: Işık hızı

f: çalışma frekansı

$\lambda$ : Boşlukta dalga boyu

Dalga kılavuzu dalga boyu olan  $\lambda_g$  değişken hesabını ise aşağıdaki eşitlik tablosundan yararlanarak bulabiliriz;

**Tablo 2.1:** Farklı modlardaki empedans ve dalga boyu [19].

MOD	DALGA EMPEDANSI (Z)	KILAVUZ DALGA BOYU ( $\lambda_g$ )
TEM	$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$\lambda = \frac{1}{f\sqrt{\mu\epsilon}}$
TM	$\eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}$	$\frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$
TE	$\frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$	$\frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$

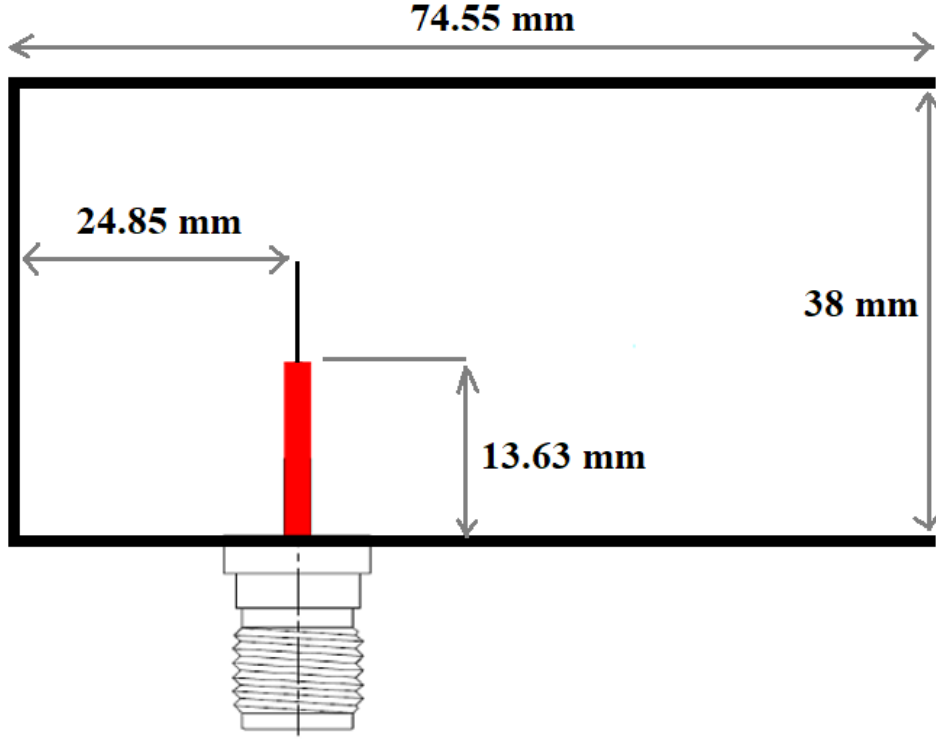
Yukarıdaki tablodan dalga modlarına bağlı olarak kılavuz dalga boylarını bulabiliriz. Çalıştığımız mod olan TE modu kılavuz dalga boyunu ise tablo 2.1'den şu şekilde bulmaktayız;

$$TE(\lambda_g) = \frac{\frac{c}{f}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4) kullanılarak  $\lambda_g$  değeri 99.4 mm olarak hesaplanmıştır.

Besleme kısmındaki pinin kalınlığı, pin girişinin en dış çapı ve arada kullanılan dielektrik malzemenin özelliklerine bağlı olarak 50  $\Omega$  denk gelecek şekilde hesaplanılmaktadır. Bu hesaplama için koaksiyel hat empedans hesabı üzerinden gidilebilir. Dairesel dalga kılavuzu'nun yukarıda verilen tasarım denklemleri kullanılarak tasarlanan yapı ve boyutları

Şekil 2.7’de verilmektedir. Dalga kılavuzunun iç çapı ise Tablo 1.3 ve denklem 1.13’ten yararlanarak 38 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 2.7: Tasarlanan dairesel dalga kılavuzu boyutları.

## 2.5 Dairesel Dalga Kılavuzu 4800-6200 MHz Anten Boyutlandırılmaları Optimizasyonu

Dairesel dalga kılavuz yapılı antenin boyutları bölüm 2.4’te matematiksel olarak bulunmuştur. Bu boyutlarda üretim gerçekleştirilmiş ve network analizör üzerinden pin uzunluğu ve dalga kılavuzu kapalı yüzeyi ile pin arasındaki mesafe hassas olarak ayarlanarak S11 ölçümleri üzerinden optimize edilmiştir. Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’de S11 değerlerini sırasıyla pin uzunluğuna ve pin mesafesine bağlı değişimi verilmektedir.

**Tablo 2.2:** Pin uzunluğuna bağlı geri dönüş kayıpları.

Pin boyutları/ geri dönüş kayıpları	5.2 GHZ	5.5 GHZ	5.8 GHZ
5 mm	-7	-5	-7
8 mm	-8	-6	-10
11 mm	-8.8	-7.4	-11
13 mm	-11	-11	-14
16 mm	-13	-12	-12
19 mm	-15	-11.5	-8
22 mm	-11	-8	-6.5
25 mm	-8	-5.5	-4

**Tablo 2.3:** Dalga kılavuzu kapalı yüzeyi ile pin arasındaki mesafeye bağlı geri dönüş kayıpları.

Mesafe / Frekans	5.2 GHz	5.5 GHz	5.8 GHz
10 mm	-6.5	-8	-10.7
13 mm	-8.6	-8.5	-8.5
16 mm	-10.2	-10	-11.4
19 mm	-12	-10.8	-11
22 mm	-15	-14.7	-14
24 mm	-23	-21	-20
28 mm	-25	-26	-14
31 mm	-17	-16	-12
35 mm	-13	-7	-4
38 mm	-10	-3.3	-2

Bu anten üretiminde pin çapı, 1 mm'dir. Bu optimizasyon sonucu nihai hale gelen boyutlar ise aşağıdaki gibidir;

$$0.25 * \lambda \text{ (pin boyutu)} = 14 \text{ mm}$$

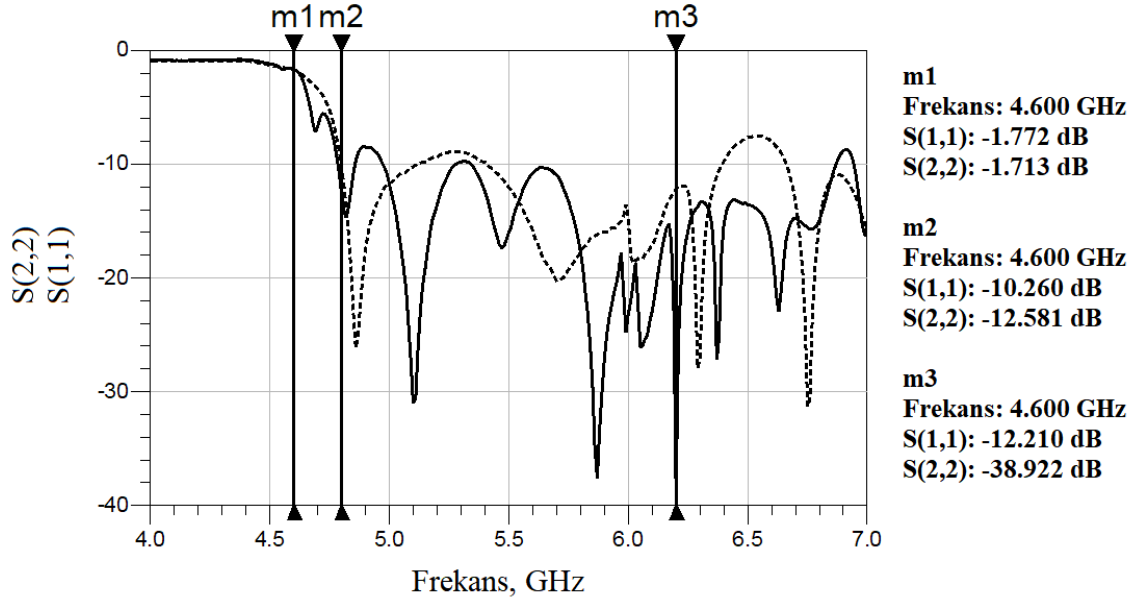
$$0.25 * \lambda_g \text{ (pin ile kapalı kılavuz duvarı arasındaki mesafe)} = 24 \text{ mm}$$

$$0.75 * \lambda_g \text{ (dalga kılavuzu boyutu)} = 75 \text{ mm}$$

$$D \text{ (dalga kılavuzu çapı)} = 38 \text{ mm}$$

Bu dalga kılavuzu anten üretiminde kılavuz boyu  $0.75 * \lambda_g$  ve  $1.5 * \lambda_g$  olarak iki ayrı boyda incelenmiştir. Boyutunun uzatılması frekans bant genişliğini fazla etkilemediği fakat geri dönüş kayıplarında kötüleşme olduğu gözlemlenmiştir. Kötüleşme makul seviyelerde olup -

10 dB sınırının altında kabul edilebilir düzeydedir. Şekil 2.8’de çeşitli kılavuz boyutlarında elde edilen ölçüm sonuçları aynı grafik üzerinde karşılaştırmalı şekilde verilmektedir.



**Şekil 2.8:** Farklı uzunluktaki ayrı iki dalga kılavuzunun s parametre sonuçları.

Şekil 2.8 da dalga kılavuzunun boyunu  $0.75 \lambda_g$  (75 mm) ve  $1.5 \lambda_g$  (150mm) olarak değiştirme durumlarında s parametre değişimlerinin band genişliği olarak benzer sonuçlar ortaya koyduğunu görebilmekteyiz.

Sonuç olarak, hesaplamalardan elde edilen boyutlar ile ölçüm üzerinde optimize edilerek ayarlanan yapının boyutları arasında küçük farklar oluşmuştur. İki durumda elde edilen boyutlar Tablo 2.4’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

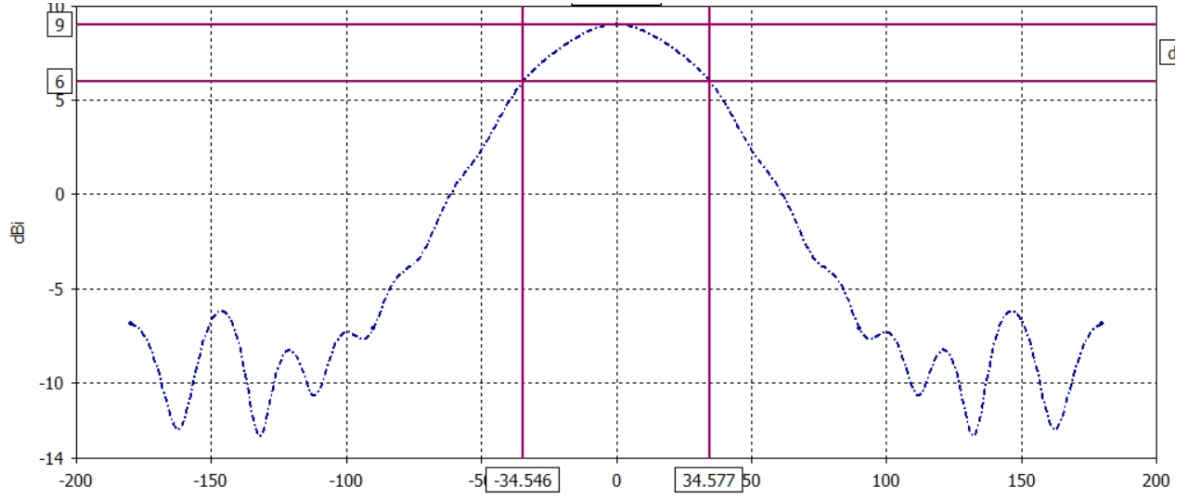
**Tablo 2.4:** Dairesel dalga kılavuzu boyutlandırma karşılaştırması.

	Matematiksel Hesaplama	Optimizasyon
$0.25 * \lambda$	13.63 mm	14 mm
$0.25 * \lambda_g$	24.85 mm	24 mm
$0.75 * \lambda_g$	74.55 mm	75 mm
<b>D</b>	38 mm	38

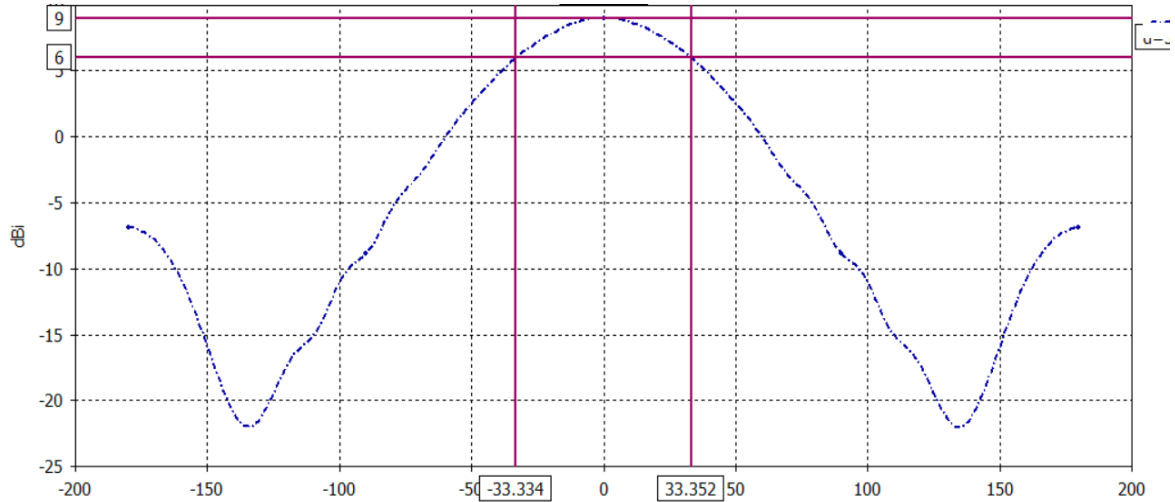


## 2.6 Dairesel Dalga Kılavuzu Antenin Işıma Karakteristiği

Tasarımı bir önceki bölümde tamamlanan dalga kılavuzu antenin ışımaya karakteristiği elektromanyetik simülasyon programı üzerinden analiz edilmiştir. Şekil 2.9'da antenin yatay düzlemde (azimuth plane) yatay düzlemde sergilediği ışımaya paterni verilmektedir. Ana hüzme doğrultusunda antenin 9 dBi yönlülük sergilediği, yarı güç hüzme genişliğinin ise yaklaşık  $70^\circ$  olduğu görülmektedir.



Şekil 2.9: Antenin yatay düzlemde (azimuth plane) yaptığı ışımaya kartezyen grafiği.



Şekil 2.10: Antenin dikey düzlemde (elevation) yaptığı ışımaya kartezyen grafiği.

### 2.6.1 Dairesel Dalga Kılavuzu Anten Açık Alan Ölçüm Sonuçları

Antenin yönlülük performansını değerlendirmek amacıyla açık alanda RF link kurulmuştur. Bu linkte verici tarafa bir sinyal üretici ve buna bağlı standart bir dipol anten konulmuştur.

Alıcı tarafta ise üretilen dalga kılavuzu anten bir spektrum analizöre bağlanarak güç ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm esnasında dalga kılavuzu antenin yataydaki açısı beşer derecelik adımlarla değiştirilmiştir. Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de ölçüm düzeneğinin görüntüleri, Tablo 2.5’te ise spektrum analizör üzerinden ölçülen güç değerleri yatay açığa bağlı olarak verilmektedir. Buradaki güç seviyelerinde maksimum değeri anten açıklığının verici antene tam baktığı açı olan sıfır (0) açısında aldığı görülmüştür. Açı sağa ve sola doğru arttıkça güç seviyesinin kademeli olarak düştüğü görülmektedir.



**Şekil 2.11:** Anten saha testi görselleri.



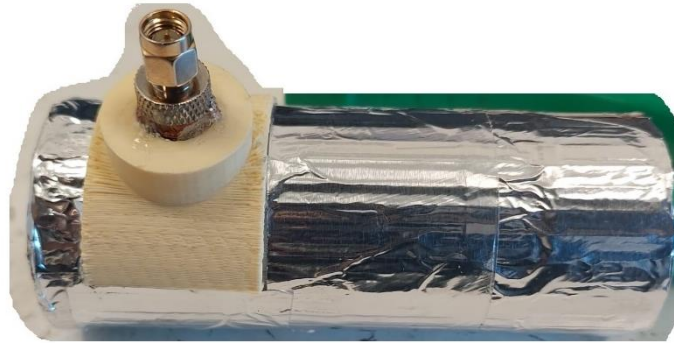
**Şekil 2.12:** Anten saha testi görselleri, alıcı anten.

**Tablo 2.5:** Anten farklı açılarda güç seviyesi.

YATAYDAKİ AÇI (DERECE)	ÖLÇÜLEN GÜÇ
0 <sup>0</sup>	-63
5 <sup>0</sup>	-63.5
10 <sup>0</sup>	-64
15 <sup>0</sup>	-64.3
20 <sup>0</sup>	-64.4
25 <sup>0</sup>	-64.3
30 <sup>0</sup>	-64.6
35 <sup>0</sup>	-65
40 <sup>0</sup>	-65.4
45 <sup>0</sup>	-66.4
50 <sup>0</sup>	-68.7
55 <sup>0</sup>	70.7
60 <sup>0</sup>	-75.9
65 <sup>0</sup>	-87
70 <sup>0</sup>	-86
75 <sup>0</sup>	-89
80 <sup>0</sup>	-91
85 <sup>0</sup>	-84
90 <sup>0</sup>	-85

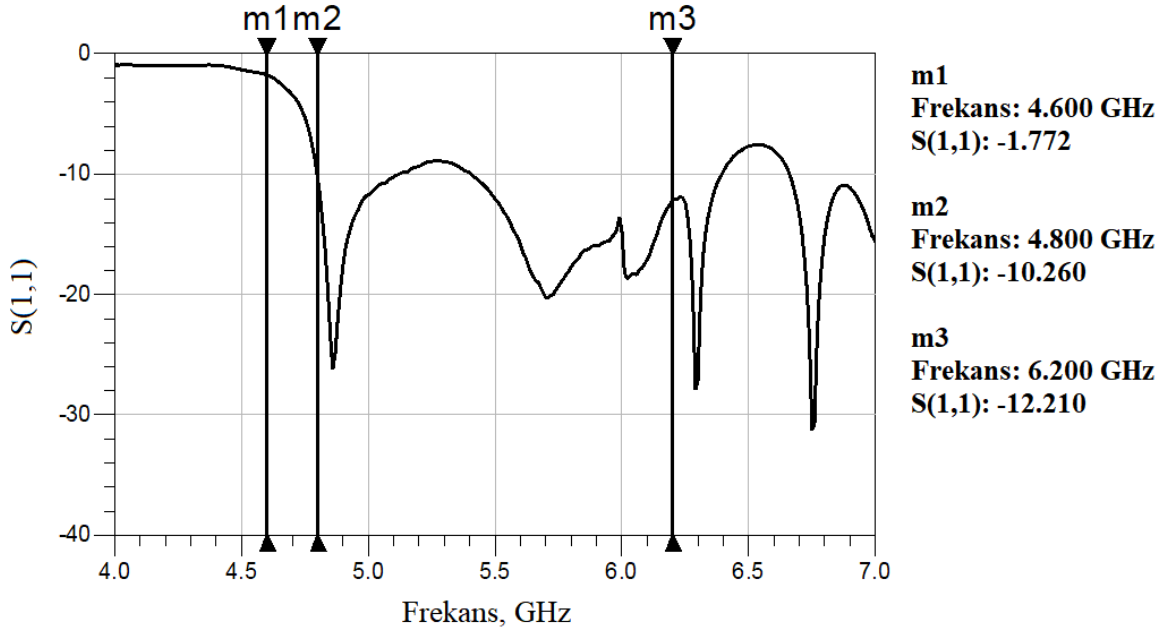
## 2.7 Dairesel Dalga Kılavuzu Anten Empedans Ölçüm Sonuçları

Tasarlanan dalga kılavuzu antenin prototipi Şekil 2.13’de görüldüğü şekilde üretilmiştir. Uyarım pini bir panel tipi SMA konnektörün canlı ucu kılavuzun içine uzatılarak monte edilmiştir. Prototip antenin empedans ve ışıma performansı ölçümleri bu port üzerinden analizöre bağlantı yapılarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.13:** Üretilmiş anten fotoğrafı.

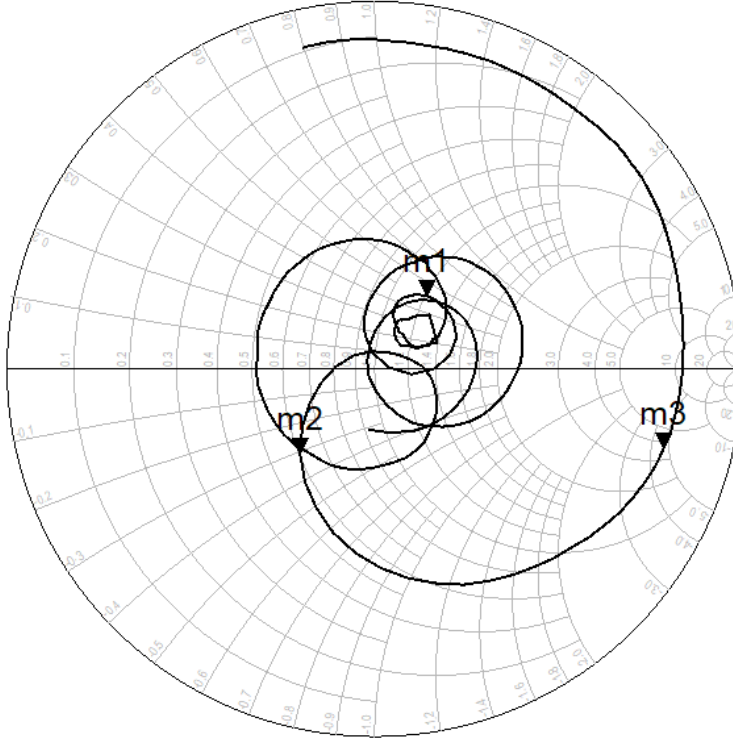
Prototip antenin empedans performansı el tipi (hand held) ROHDE&SCHWARZ FSH8 spektrum & network analizör ile  $|S_{11}|$  (geri dönüş kaybı) ölçümü 4 GHz–5.5 GHz aralığında yapılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.14: Üretilmiş olan anten  $|S_{11}|$  parametre değerleri.

Şekil 2.14'teki ölçüm sonuçlarından, kesim frekansı olarak aldığımız 4.6 GHz'ten düşük frekansların yüksek geçiren filtrede olduğu gibi geri dönüş kaybının arttığını görmekteyiz. Çalıştığımız frekanslar olan 4.8 GHz ve üzerinde ise baz aldığımız -10 seviyelerin altında sonuçlar verdiği görülebilmektedir. Ölçülen  $S_{11}$  datasının Smith abağında gösterimi de Şekil 2.15'de verilmektedir. Tasarlanan geniş bant aralığında data'nın Smith abağı'nın merkezi etrafında kümелendiği görülmektedir.

4.000-7.000 GHz Normalize Empedans Cevabı



**m3**  
**Frekans: 4.600 GHz**  
**Empedans: 3.617-j4.677**

**m2**  
**Frekans: 4.800 GHz**  
**Empedans: 0.604-j0.308**

**m1**  
**Frekans: 6.200 GHz**  
**Empedans: 1.212-j0.515**

**Şekil 2.15:** Üretilmiş olan anten giriş empedans değerleri.

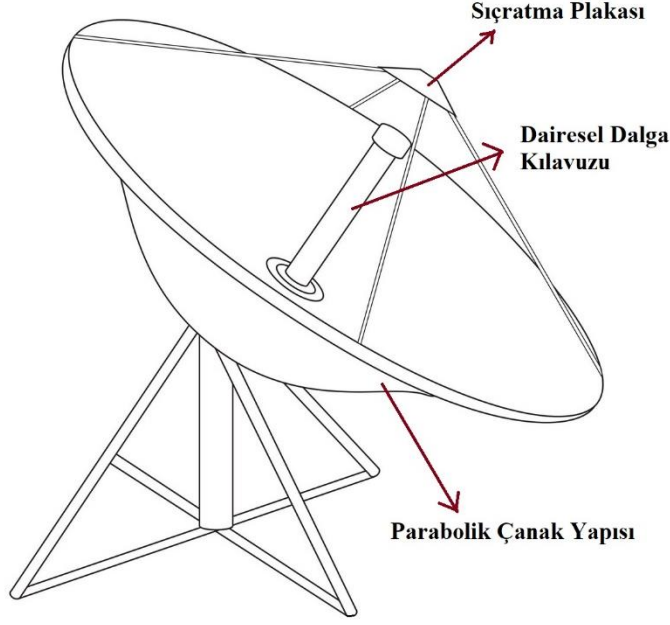
### **3. SİÇRAMA PLAKALI ÇANAK ANTEN**

Çanak antenler besleme kısmından gelen veya beslemeye girecek olan elektromanyetik dalgaları toplayıp odaklayan büyük anten açıklığına dolayısıyla yüksek kazançta sahip antenlerdir [2]. Çanak antenler 1.4 de anlatıldığı üzere temel olarak aktif ve pasif kısımlardan oluşmaktadır. Aktif kısım haberleşme modülüne direkt bağlı olan besleme kısmı iken pasif kısım ise fiziksel elektriksel bağlantısı olmayıp havadaki EM dalgalarını yakalayıp odaklamak için kullanılan parabolik yapıdaki çanak kısmıdır.

Kimi çanak antenlerde ana yansıtıcı olan parabolik çanak haricinde odak noktasında ikincil yansıtıcı bulunmaktadır. İkinci yansıtıcı iletim hattı ile kendi üzerine yansıtılan sinyali parabolik çanağa yansıtma görevi için kullanılır. Sıçratmalı plaka (splash plate) sıklıkla kullanılan bir ikincil yansıtıcı yapısı olup, bir dalga kılavuzu antenin ışığıyan açıklığının karşısına belli bir mesafeye konularak, dalga kılavuzundan üzerine ışığıyan elektromanyetik dalgayı çanağa yansıtılmaktadır. Tezin bu bölümünde ikinci bölümde tasarlanan dalga kılavuzu anten odak noktasına konan bir sıçratmalı plakayı aydınlatan çanak antenin tasarım, üretim süreçleri ve ölçüm sonuçları sunulacaktır.

#### **3.1 İkincil Yansıtıcısı Sıçrama Yüzeyle Anten Yapısı**

İkincil yansıtıcı kısma sahip antenlerde ise aktif kısım çanağın iç merkezine yerleştirilip EM dalgaları alacak kısmı odak noktasına bakacak şekilde yerleştirilir. Odak noktasına, pasif kısım olan çanaktan gelecek dalgaları, odaktan geri aktif kısma ikinci kez yansıtılarak iletilme görevi görecek olan ikincil yansıtıcı kısım eklenerek ikincil yansıtıcıya sahip çanak anten tasarımı gerçekleştirilir. İkincil yansıtıcı örnek bir çanak anten yapısı Şekil 3.1'de verilmektedir.



**Şekil 3.1:** İkincil yansıtıcı örnek bir çanak anten yapısı [20].

Yukarıdaki görselde çanak antenin iç merkezinden gelen silindirik dalga kılavuzunun açıklık kısmı ikincil yansıtıcı kısım olan odak noktasındaki plakaya bakmakta. Odak noktasındaki ikincil yansıtıcı kısma ise parabolik yapıdaki çanak anten elektromanyetik dalgaları iletmektedir.

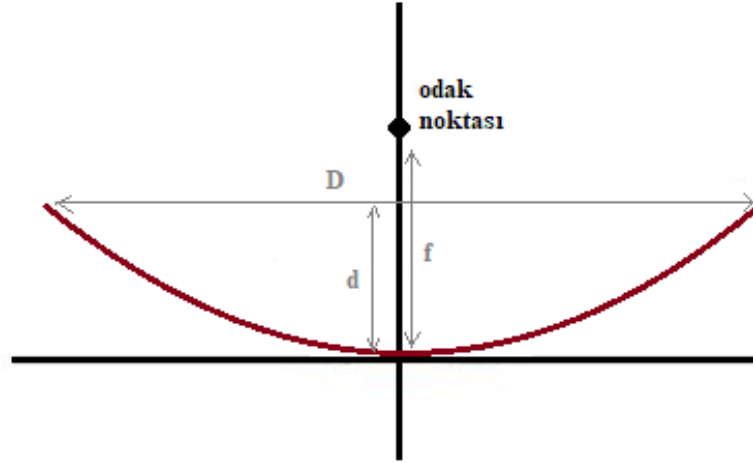
İkincil yansıtıcı kısımlar genelde iç bükey, dış bükey ve Cassegrain olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu farklı yapıların amacı aynı olmakla beraber çanağa bağlı konumlandığı yerler birbirleriyle farklılık gösterebilmektedir.

İkincil yansıtıcıya sahip çanak antenlerin avantajını kısaca özetlemek gerekirse normalde oluşacak olan yan lobları azaltıp ana loba katkı sağlamaktır. Dezavantajı olarak ta ikincil yansıtıcı kısım büyük yapılması durumunda parabolik yapıdaki çanak antenin anten açıklık alanını azaltması olarak verilebilir.

### **3.2 İkincil Yansıtıcısı Sıçrama Yüzeyle Anten Yapısı Çanak kısmı**

- Elektromanyetik dalgaları iyi yansıtabilmesi amacıyla iletkenliği yüksek, pürüzsüz ve mümkünse parlak malzemeler tercih edilir. Genellikle metal levhalar kullanılır.
- Levhaların dışında, ızgara biçiminde yapılan yansıtıcı yüzeyler de koşullara bağlı olarak tercih edilebilmektedir.

Bu kısım tek bir odak noktasına sahip olması istenildiği için çanak kısmına yandan bakıldığında hangi kesiti alıp bakarsak bakalım bizi parabolik bir şekil karşılayacak. Anten kazancı ve yönlülüğü çanak yapısının çapına bağlı olarak değişmektedir. Çanağın çapının yanında derinliği de odak noktasının değişiminde ve kazanç değerlerinde önemli ölçüde etkinlik göstermektedir.



**Şekil 3.2:** Çanak anten kısımları mesafe değişkenleri.

Şekil 3.2’de verilen görselde çanak yapısının geometrik parametreleri görülmektedir. Burada parabolik yapıda “f” mesafesi, odak noktasını belirtirken “d” çanak derinliğini göstermektedir. Derinlik odak noktasının yerini belirleyen önemli bir değişkendir. D değişkeni ise çanak yapısının çapını göstermekte ve anten kazancını belirleyen ana parametredir. Özellikle “f/D” oranı bu tasarımda önemli bir rol oynamaktadır.

### 3.2.1 Çanak Kısım için 5400 MHz Merkez Frekansında Kazanç ve Etkin Açıklık Hesabı

Çanak antenin kazancının (G) dB skalasında çanak geometrisine bağlı ifadesi (3.1)’de verildiği gibidir [21]:

$$G(dB) = 10x \log_{10} k \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (3.1)$$

Burada k, D ve  $\lambda$  sırasıyla anten verimliliğini, çanak çapını (bkz. Şekil 3.2) ve tasarımın yapıldığı frekanstaki dalga boyunu temsil etmektedir.



Etkin alan ile anten kazancı arasındaki ilişki aşağıda (3.2)'de verilmektedir.

$$Ae = \frac{c^2}{f^2} \times \frac{10^{\frac{G(dB)}{10}}}{4\pi} \quad (3.2)$$

Burada c ışık hızı, f frekansı temsil etmektedir.

(3.1) kullanılarak 5400 merkez frekansında ( $\lambda = 5,6 \text{ cm}$ ) 30 dBi kazançta sahip bir anten çanak çapı 56,4 cm olarak hesaplanmıştır. “f/D” oranını bir sonraki bölüm, 3.2.2 alt başlığı, altındaki nedene bağlı 0.3 kabul edersek buradan çanağın derinliğini aşağıdaki ifadeyi (3.3) kullanarak  $d = 0.01175$  olarak bulunur [22];

$$f = \frac{D^2}{16d} \quad (3.3)$$

Çanak anten çapı (3.2)'deki etkin açıklık formülü üzerinden de hesaplanabilir. Burada 30 dBi kazanç için etkin açıklık  $0.25 \text{ m}^2$  ( $Ae = 0.25 \text{ m}^2$ ) hesaplandıktan sonra bu açıklık çanağın açıklık alanı olarak kabul edildiğinde (3.4) kullanılarak yine 56,4 cm olarak hesaplanabilir.

$$\frac{D}{2} = \sqrt{\frac{0.25}{\pi}} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki her iki hesaplamada da anten kazancının 30 dBi olma durumları için çanak çapının aynı sonuçlar verdiğini görmekteyiz. Bu da çanak tasarımı için (3.1) ve (3.2) den elde edilen sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir.

### 3.2.2 Çanak Kısmı f/D Oranına Bağlı Kazanç ve Parametre Değerleri

Çanak antenin kazancını ve odak noktasını doğrudan etkileyen bu oran farklı değerlerde alınabilecek iken çoğunlukla 0.25 - 0.8 olarak hesaplara dahil edilmektedir [23]. Burada f odak noktasını gösterirken D ise çanak yapısının çapını göstermektedir. Bu oranın sonucuna bağlı olarak çanak derinliğini 3.2.1'de verdiğimiz çap, derinlik, odak noktasına bağlı eşitlikten bulabiliriz.

Farklı oranlara bağılı olarak anten kazanç değerlerine elektromanyetik simülasyonlar üzerinden bakıldığında ise karşımıza çıkan tablo (Tablo 3.1), aşağıdaki oranlara bağılı, farklı frekanslardaki kazanç değerleridir.

**Tablo 3.1:** Farklı frekanslarda farklı F/D oranları kazanç sonuçları.

<b>FREKANS/ (F/D) ORAN</b>	<b>0.26</b>	<b>0.30</b>	<b>0.38</b>	<b>0.46</b>
<b>4900 MHZ</b>	27.3	28.5	27	27
<b>5200 MHZ</b>	30	30.5	29.6	28.6
<b>5400 MHZ</b>	30.2	31.5	29	28
<b>5800 MHZ</b>	31.3	31.3	30.5	29.2
<b>6000 MHZ</b>	29.5	31.7	31.7	29

Tablo 3.1’de görüleceği üzere farklı frekanslarda maksimum kazanç seviyelerini alabileceğimiz optimum f/D oranı 0.3 olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir anten için en önemli parametreler, antene iletilen gücün geri yansımaları en aza indirilip en düşük kayıplarla ortama basılması ve küçük boyutlarda maksimum kazancı sağlamak olarak karşımıza çıktığı için yukarıda verilen değerler büyük önem arz etmektedir.

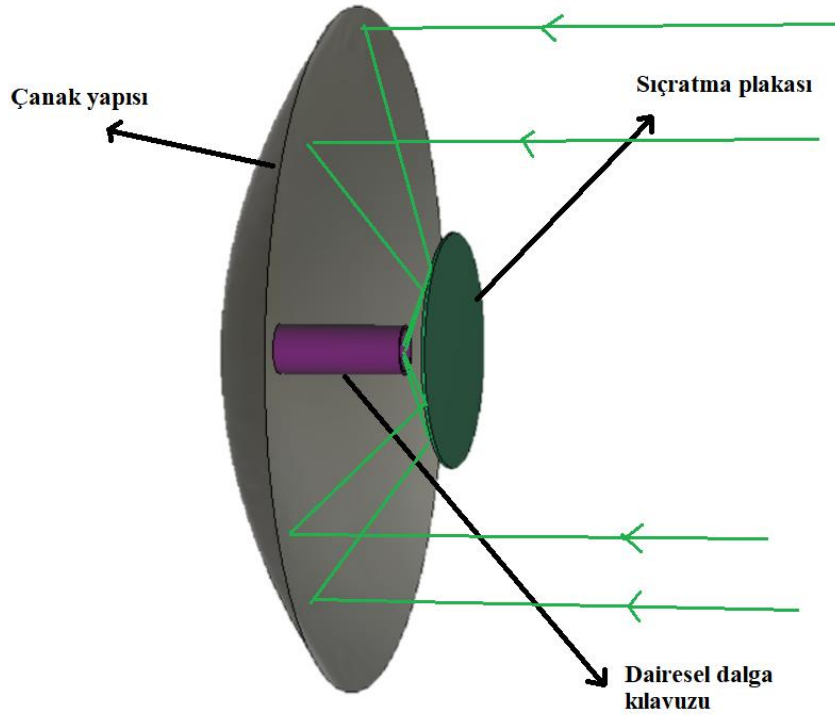
Çanak anten yapısında farklı f/D oranlarına bakıldığında odak noktasının kaydığı görülmektedir. Oran arttıkça odak noktası çanak yapısından uzaklaşırken, oran düştükçe odak noktası çanak yapısına yaklaşmaktadır. f/D oranı 0.3 alındığında ise odak noktası çanak anten yüzeyine çok yakın olduğu için sıçrama yüzeyinden gelecek sinyaller kaçacak yer bulamayacağı için anten gücü, yan loblara kaçırmadan daha sağlıklı ir şekilde alması olacaktır.

### **3.3 İkincil Yansıtıcısı Sıçratma Yüzeyli Anten Sıçratma Yüzey Kısmı**

İkincil yansıtıcı yüzey kısmı olarak tezde özellikle ele alınan yapı iç bükey veya dış bükey değil sıçratma plakasıdır. Sıçratma plakalı çanak antenler genellikle uydu haberleşmesi ve hava aracı takibi sistemlerinde kullanılan askeri anlamda da önemli yer tutan çanak anten çeşididir. Bu antenler genellikle besleme kısmı olarak silindirik dalga kılavuzuyla kullanılır.

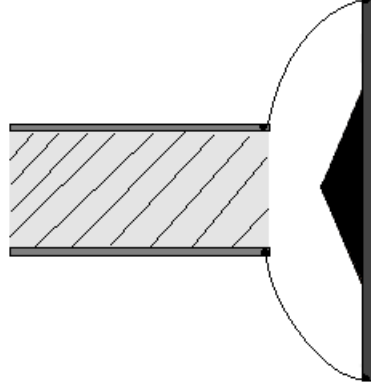
Sıçratma yüzeyi olarak adlandırılan bu kısım şekil olarak yuvarlak, düz bir plaka üzerine silindirik üçgensel piramit yerleştirilerek oluşturulur. Bu piramit yapıları karşımıza, yan duvarları düz veya çanak yapısında olduğu gibi parabolik olarak çıkabilmektedir.

Sıçratma plakalı çanak antene genel olarak baktığımızda verici olarak kullanıldığı durumda dalga kılavuzundan gelecek olan elektromanyetik dalgalar silindirik sıçrama plakasının yüzeyine çarparak buradan yansıyan dalgaları tasarlanmış olan çanak antenin tüm yüzeyine denk gelecek şekilde çanak yapısına iletir. Çanakdan da yansıyan dalgalar dış dünyaya odaklanmış bir şekilde verilir. Şekil 3.3'te sıçratmalı ikincil yansıtıcı ve birincil çanak yansıtıcının birlikte elektromanyetik dalgayı nasıl yönlendirdiği gösterilmektedir.



**Şekil 3.3:** Sıçratma yüzeyli dairesel dalga kılavuzlu çanak anten gösterimi.

Şekil 3.3'de görüldüğü üzere çanak antenin merkezinden silindirik dalga kılavuzu uzatılıp önüne sıçrama plakası konulmuştur. Sıçrama plakası daha detaylı görünümü Şekil 3.4'te verilmektedir.



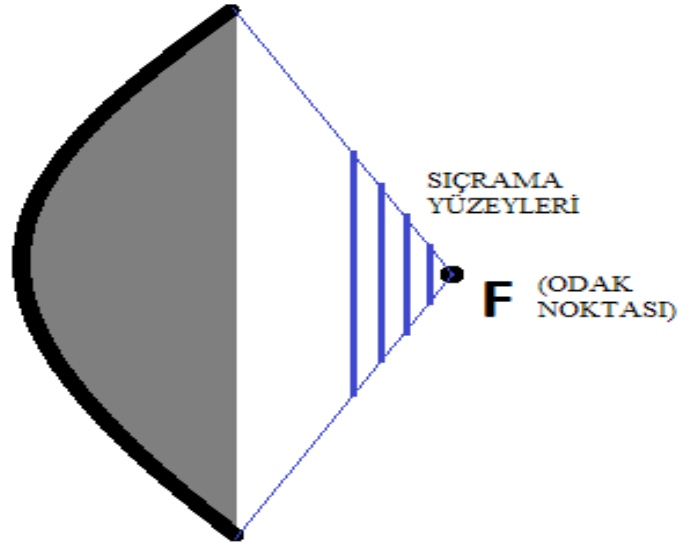
**Şekil 3.4:** Sıçrama yüzeyi gösterimi.

Şekil 3.4’de görülen üçgen yapı ve arkasında duvarı olan kısım ikinci yansıtıcı olan sıçrama plakasıdır. Buradaki plakayla silindirik dalga kılavuzu arasında kalan yer ise özellikle iki kısım arasında destek görevi görebilmesi için konulmuş dielektrik malzemedir. Çoğunlukla bu kısım hava boşluklu yapılarak köşelerden atılan ince çıtalarla iki parça birbirine sabitlenir.

Üçgen kısma özellikle değinmek gerekirse buranın üçgen değil düz bir duvar olması halinde kılavuzdan gelen sinyaller doğrudan tekrar kılavuza girip aktif kısmın kendi içerisindeki geri yansıma katsayısını arttırıp antenin yeterli güç basabilmesini engelleyecektir. İkinci olarak ta elektromanyetik dalga, kılavuzdan çanağa veya çanaktan kılavuza aktarılamayacaktır. Üçgen yapısının yüksekliği de özellikle yansıttığı kısmın en uzak noktasının çanağın en köşesi olacak şekilde hesaplanmasıyla bulunmaktadır [24].

### **3.3.1 Sıçratma Yüzey Kısmının Çanak Odak Noktasına Bağlı Konumlanması**

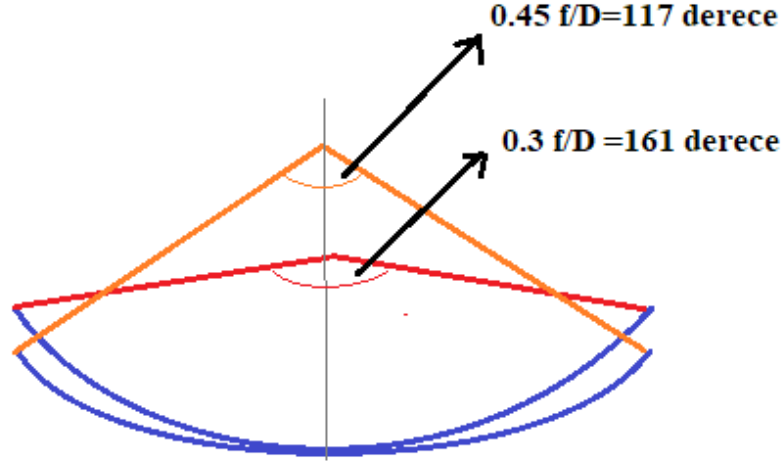
Çanak antende ikinci yansıtıcı kısmın çanaktan uzaklığı, yan lobların azaltılması, anten kazancı gibi farklı parametreleri etkilemektedir. Burada kullanılan sıçrama yüzeyi odak noktasına bağlı farklı mesafelere konumlandırılabilir. Sıçratma plakası konumlandırıldığı yerlere bağlı boyutlarında farklılıklar göstermektedir. Bunun en büyük nedeni ise odak noktasından çanak yapısının köşelerine çizilecek olan çizgilerin oluşturacağı üçgen yapısının tamamını kapsamasını istememizdir. Aksi durumlarda çanak antenin genel olarak kazancının düşmesine neden olacaktır. Şekil 3.5’de bu durum görsel olarak detaylı şekilde verilmektedir [24].



**Şekil 3.5:** Sıçratma plakasının farklı konumlardaki değişimi [2].

Şekil 3.5’den anlaşılacağı üzere farklı mesafelere yerleştirilmiş ikincil yansıtıcılar farklı boyutlarda karşımıza çıkmaktadır. Odak noktası çanakdan uzaklaştıkça, sıçratma yüzeyinin boyu küçülmektedir. Buradaki sıçratma yüzeyinin konumu aktif beslemenin geri dönüş kaybını iyi seviyelerde cevap verecek şekilde belirlenmektedir. Aktif kısma göre belirleme durumunda aktif kısım olan silindirik dalga kılavuzunun boyu da konumlandırma konusunda önemli rol oynayacaktır. Çoğunlukta dairesel dalga kılavuzunun boyu uzun tutulup ikinci yansıma kısmı olan sıçrama plakası, odak noktasına yaklaştırılıp boyutu küçültülebilir istenir. Bunun olmasının istenme nedeni ise 3.3.3 alt başlığı altında özellikle incelenmektedir.

Bahsi geçen bu boyutların optimizasyonu elektromanyetik analiz ya da ölçüm esnasındaki boyut ayarlamaları ile gerçekleştirilir. Sonraki optimizasyon prototip antenin yapıları modüler yapıldığında daha tercih edilebilir yoldur ki tasarımın nihai hale getirildiği en güvenilir yaklaşım olacaktır. Şekil 3.6’da görüldüğü üzere sıçratma yüzeyini boyutlandırma konusunda parabolik çanak yapısının  $f/D$  oranı da odak noktasının çanakdan olan uzaklık değerini değiştireceği için farklılık göstermektedir. Çanak yapısının değişken derinlik değerlerine bağlı odak noktasının farklı konumlarını görmekteyiz. Bunun sonucunda ikinci yansıtıcı kısmın boyutları da değişmiş olmaktadır.

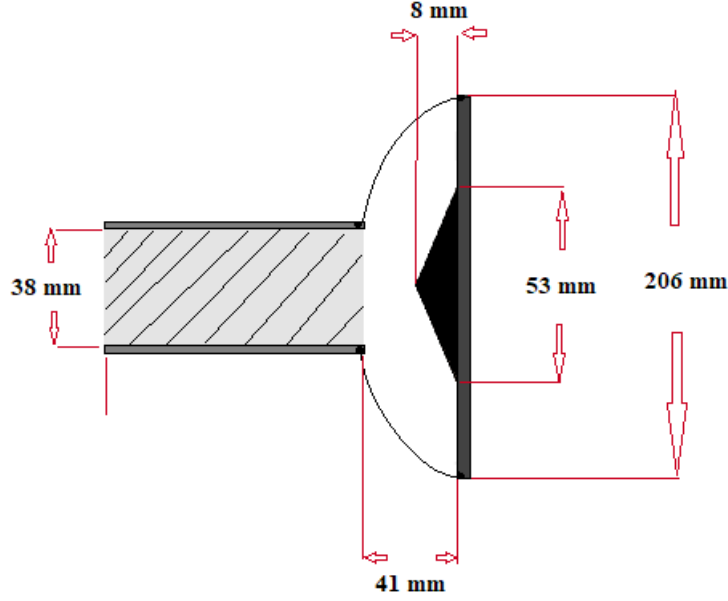


**Şekil 3.6:**  $f/D$  oranına bağlı odak noktası açısı değişimi.

### 3.3.2 Sıçrama Yüzey Kısmının 5400 MHz için Boyutlandırması

Çanak anten ikinci yansıtıcı kısım olan sıçrama plaka yapısının önemli değişkenleri olan dış çap boyutları, ortadaki üçgen prizma çap ve yüksekliği ve esleme kısmına olan uzaklığı anten performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle sıçrama yüzeyini 3.3.1’de anlatıldığı üzere gelen tüm elektromanyetik dalgaları karşılayabilecek şekilde konumlandırmak kazanç anlamında önemli bir yer tutmaktadır. Sıçrama yüzeyiyle aktif besleme kısmının mesafesi ise kazancın yanında daha çok geri dönüş kaybının değerleri değişimi açısından önem arz etmektedir. Aktif kısmın sıçrama yüzeyine yakın olması elektromanyetik dalgaların kaçmasını engelleme anlamında anten performansının yararına oluyorken geri dönüş kaybını arttırdığı çıkarımına üretilmiş anten yapısı üzerinden görülmektedir. Bunun nedeni ise aktif kısım olan silindirik dalga kılavuzunun açık olan kısmından çıkacak olan sinyallerin sıçrama plakasından geri yansıma ihtimalini arttırıyor olmasıdır. Geri yansıyan sinyaller aktif kısımdan geri alınarak anten yansımasını kötüleştirme yönünde etki ettiği çıkarımı da aynı şekilde üretilmiş yapı üzerinden görülebilmektedir.

Üretilen prototip üzerindeki değiştirilebilecek değişkenleri değiştirme yoluyla optimizasyonu yapılan sıçrama yüzeyinin nihai boyutları ise Şekil 3.7’de verilmektedir;



Şekil 3.7: Sıçratma plakası ile dalga kılavuzunun tam boyutları.

### 3.3.3 Sıçratma Yüzey Çanak Anten Kazancına Etkisi

Bölüm 3.2.3’de hesaplanılan çanak çapı istenilen kazanç değerine karşılık gelecek şekilde bulunmuştu ancak burada ikinci sıçratma plakası hesaba katılmamıştı. İkinci yansıtıcının hesaba katılmasının gerekliliğinin nedeni çanak yapısına gelecek veya çıkacak elektromanyetik dalgaları engellemesinden dolayıdır. Bu engellemeye olan etkisi ise ikinci yansıtıcı kısmın yüzey alanı büyüklüğüne bağlıdır. Optimize edilip üretimi yapılmış olan sıçrama yüzeyinin çapı 210 mm olarak kullanıldığı için buna bağlı 30 dBi kazançlı bir çanak anten için nihai anten çapını hesaplamamız gerekirse şu şekilde hesaplayabiliriz [25];

30 dBi kazanç için hesaplanılmış anten açıklığı:  $0.25 \text{ m}^2$

Sıçrama yüzeyi yarı çapı:  $210/2=105 \text{ mm} = 0.105 \text{ m}$

Sıçrama yüzeyi, yüzey alanı:  $\pi \times 0.105^2 = 0.035 \text{ m}^2$

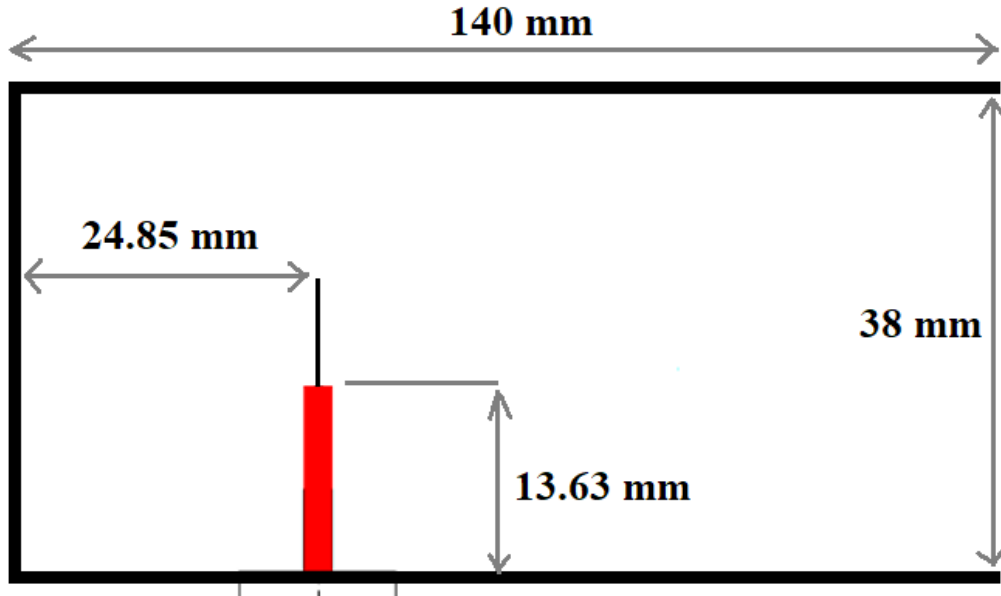
30 dBi için çanak yapısının alanı:  $0.25 \text{ m}^2 + 0.035 \text{ m}^2 = 0.285 \text{ m}^2$

30 dBi kazanç için çanak yapısının gerçekte olması gereken çapı:

$$Dr = 2 * \sqrt{\frac{0.285}{\pi}} = 0.605 \text{ m} = 60.5 \text{ cm}$$

### 3.4 Çanak Anten Aktif (Besleme) Kısmı

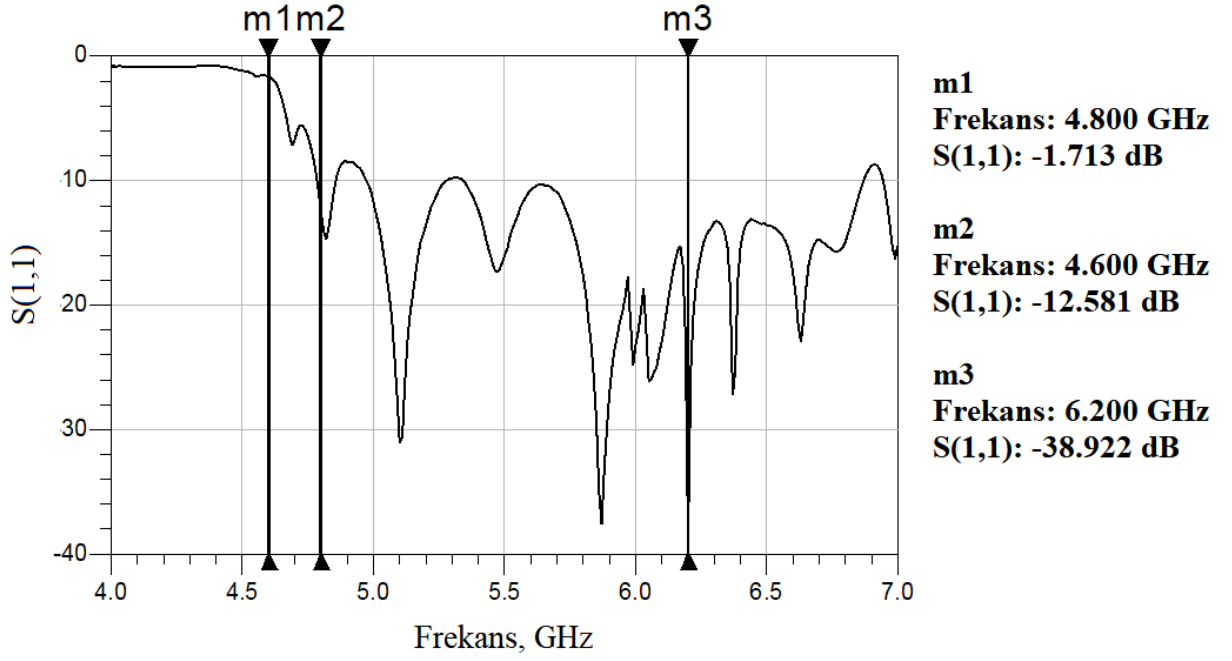
Çanak anten aktif kısmı önceki başlıklar altında belirtildiği üzere dairesel dalga kılavuzu olarak belirlenmiştir. Çanak anten 4800-6200 MHz frekansları aralığında tasarlandığı için aktif kısım olan dairesel dalga kılavuzu da bu frekanslara uygun olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan bu kısım tezin ikinci kısmı olan 2.4 ve 2.5 kısımları altında ayrı olarak incelenmiştir. Bu kısımlar altında tasarlanmış silindirik dalga kılavuzundan farklı olarak sadece çanak anten besleme kısmındaki yapının boyu sıçrama yüzeyine yakınlaştırabilmek için uzun tutulmuştur. Sonuç olarak aktif besleme kısmının boyutlandırılması şu şekilde oluşturulmuştur;



Şekil 3.8: Dairesel dalga kılavuzunun milimetre cinsinden boyutlandırmaları.

Yukarıda yapılan uzatma değişikliğiyle beraber ölçülmüş olan geri dönüş kaybı ölçüm sonucu Şekil 3.9'da verilmektedir;



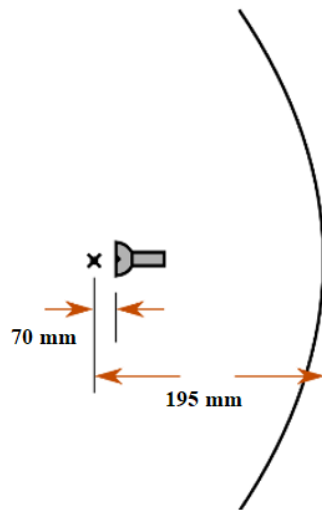


**Şekil 3.9:** Dalga kılavuzunun boyunun uzatılması sonucu S parametre değerleri.

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere dalga kılavuzunun boyunun uzatılması geri dönüş kaybında kötüleşmeye neden olmadığı anlaşılmaktadır.

### 3.5 Çanak Anten Boyutlandırma Sonuçları

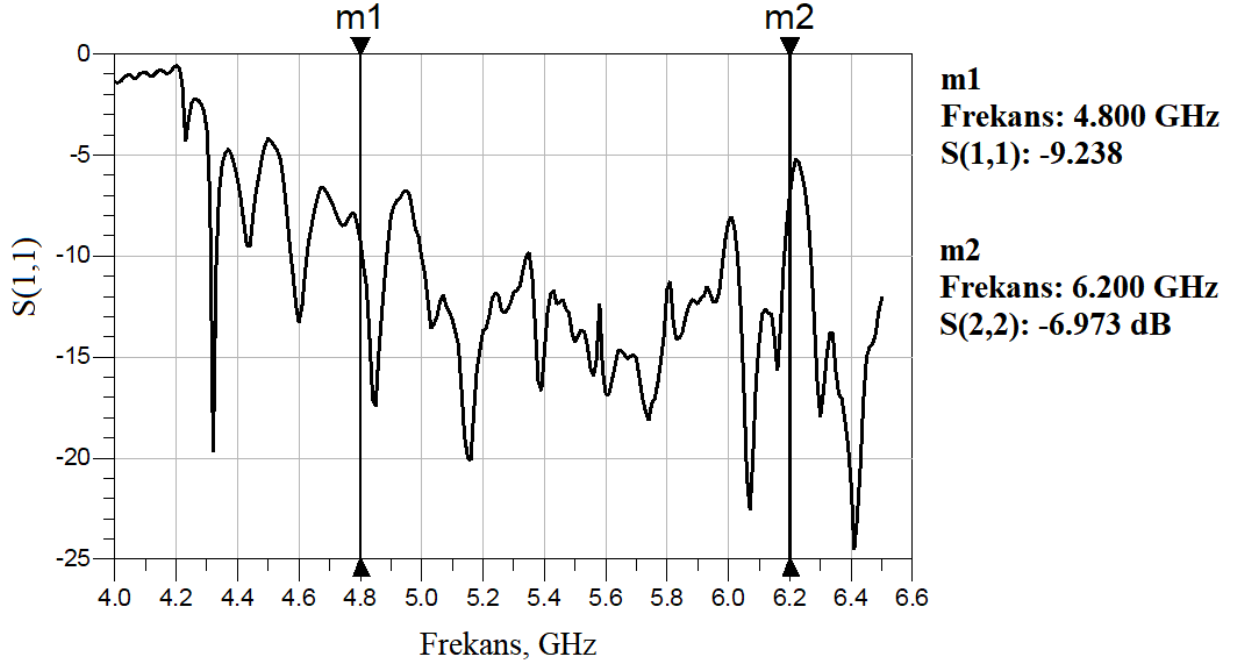
Çanak antenin sonuçlanmış olan tam boyutlarına bakıldığında aktif kısım olan dairesel dalga kılavuzu 3.4 çanak anten aktif besleme başlığı altında gösterildi. Aktif kısım dışında kalanlar ise aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir.



**Şekil 3.10:** Sıçratma plakası ve plakanın çanak yapısına bağlı konumlanma değerleri.

Yukarıdaki şekil ve tabloda çanak anten ve sıçrama plakasının boyutlarını görebilmekteyiz.

### 3.5.1 Çanak Anten S Parametre Sonuçları

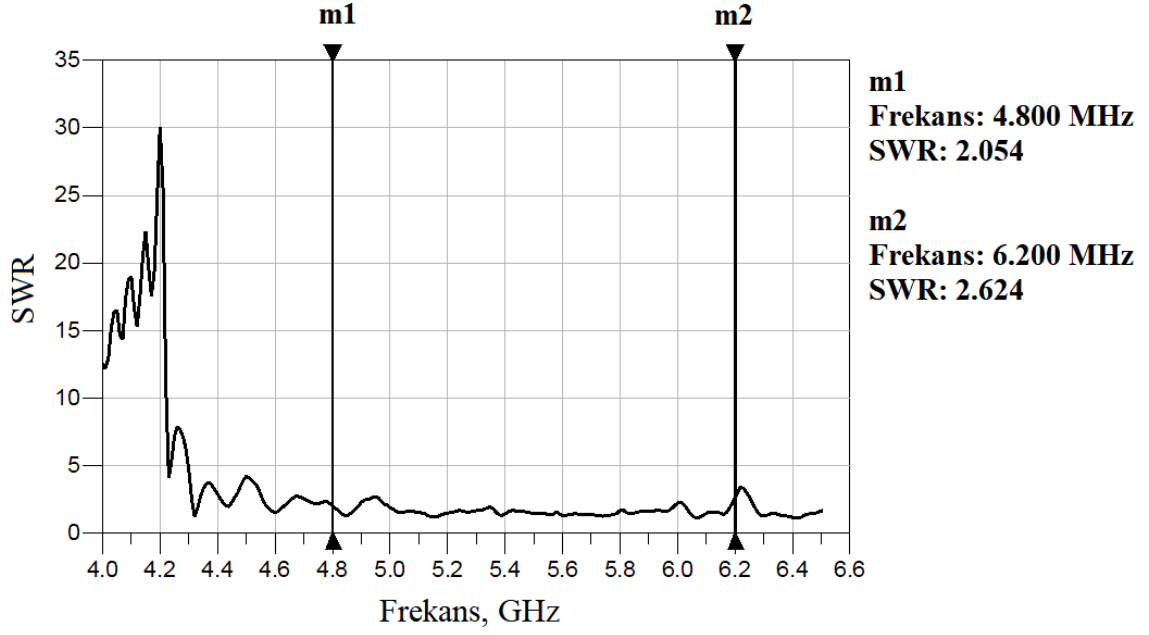


Şekil 3.11: Çanak anten geri dönüş kaybı.

Şekil 3.11’de s parametre sonuçlarından da görülebileceği üzere genel olarak bant genişliği olan 4.8 GHz – 6.2 GHz frekansları aralığında, genel olarak baz aldığımız -10 seviyelerin altında kaldığını görebilmekteyiz.

### 3.5.2 Çanak Anten Duran Dalga Oranı(SWR) Sonuçları

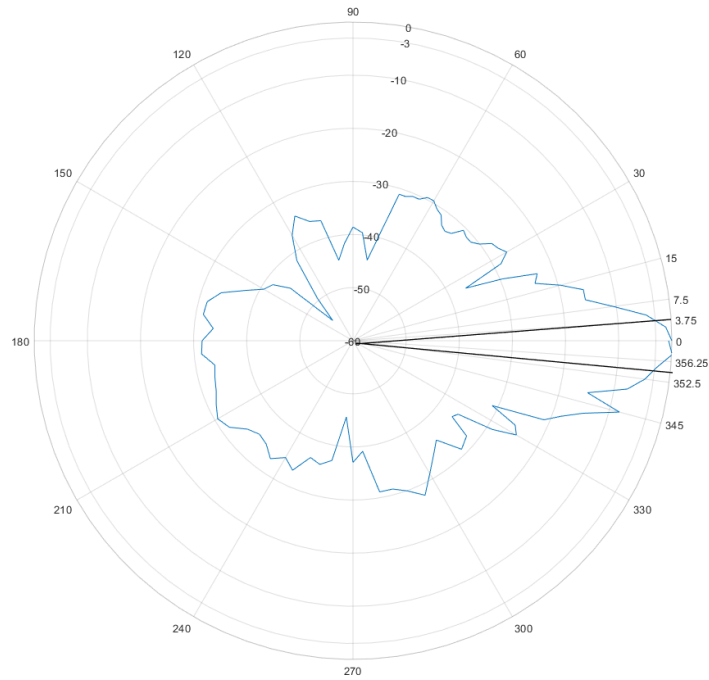
VSWR sonuçları tezin ilk bölümünde de anlatılan S parametrelerine direk bağlı olarak değişmektedir. Buradaki değer için S parametre sonuçlarında da anlatıldığı üzere 4.8 GHz – 6.2 GHz frekansları aralığında, genel olarak baz aldığımız 1.92 seviyelerin altında kaldığını şekil 3.12’de görebilmekteyiz.



Şekil 3.12: Çanak anten duran dalga oranı (SWR).

### 3.5.3 Çanak Anten Işıma Grafiği

Çanak anten ışınım paternini, tasarlanıp optimize edilmiş anten değerleri ile üretilmiş olan çanak anten ile gerçekte yapılmış olan açık alan ölçüm değerleri farklı açılarda kaydedilmiştir. Kaydedilen değerler beşer derecelik açılar ile ele alınmış olup bu değerler polar grafiğine aktarılmıştır. Ortaya çıkmış olan grafik ise şu şekildedir;



Şekil 3.13: Yatayda alınan normalize edilmiş güç değerlerinin polar grafikte gösterimi.

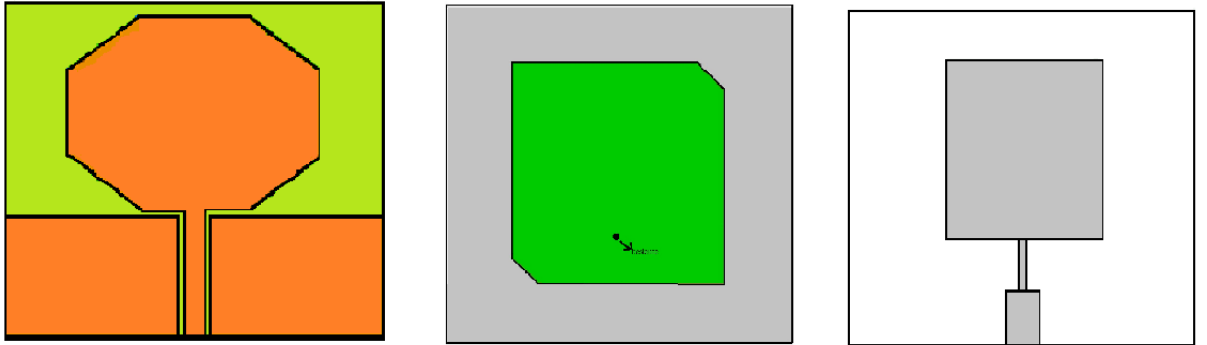
Şekil 3.13'te de görüldüğü üzere yatayda alınan değerler çanak antenin ışıma paterninin yönlü olduğunu göstermektedir. Bunun yanında kazanç değerini de bu grafik üzerinden bulmak mümkündür. Yarı güç hüzme genişliğine denk gelen açı değerlerine bakılacak olursa 3,75 derece ile 354,4 dereceleri arasına denk geldiği görülmektedir.

## 4. PANEL ANTENLER

Panel antenler genellikle yönlü anten tasarımlarıyla karşımıza çıkarken çoğunlukla kablosuz internet aktarımı, sektör antenlerde, insansız hava aracı haberleşmelerinde görülebilmektedir. Panel antenler tek elemanlı antenlerden oluşabildiği gibi çoklu elemanların eklenip birbirlerine bağlanarak dizi oluşturacak şekilde tasarımları özellikle göze çarpmaktadır. Bunun en büyük nedenleri ise üretim kolaylığı, maliyet ve farklı yapıların tasarım kolaylığına dayanmasıdır.

### 4.1 Tek Eleman Panel Anten Yapısı

Tek elemanlı yama anten olarak ta bilinen panel antenler, üzerlerinde sinyalin gidebildiği tek anten olarak bulunan farklı yapılarda üretilebilirken daha çok baskı devre kartları ile üretilmiş olan yönlü antenler karşımıza çıkmaktadır. Bu antenlerin şekilleri bant genişliğine veya aynı anda farklı frekanslarda çalışabilme özelliğine göre farklılık gösterebilirken genel geçer bilinen ve örnek olarak gösterilen şekiller kare ve dikdörtgen yapıda olanlardır. Tek elemanlı yönlü panel anten kazançları ise genellikle 6-9 dBi aralığında değişiklik gösterebilmektedir. Farklı yapılara örnek göstermemiz gerekirse aşağıdaki görselleri örnek olarak gösterebiliriz;

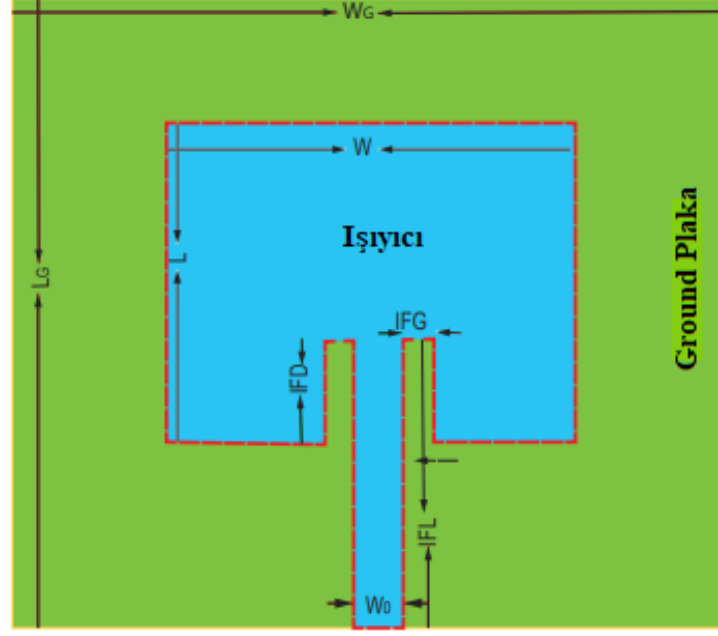


Şekil 4.1: Farklı amaçlar için farklılık gösteren tekli panel anten yapıları.

Şekil 4.1'deki görsellerde de görülebileceği üzere tek elemanlı panel anten yapılarında daha çok kareye benzer şekillerde antenler tasarlanmaktadır. Bunun yanında polarizasyona, bant genişliğine, empedans uyumlamasına bağlı şekiller farklı tasarımlarla karşımıza çıkabilmektedir. Farklı şekillerdeki tek elemanlı dizi panel anten tasarımları olarak ta karşımıza çıkmaktadır.

#### 4.1.1 Tek Eleman Panel Anten Tasarımı

Tezin bu bölümde üzerinde durulan tasarım aşağıdaki şekilde verilmektedir. Bu şekil üzerinden tasarımlar gerçekleştirildiği için özellikle ele alınmıştır. Genel olarak tek elemanın boyutlandırmalarını aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.



Şekil 4.2: Örnek tek eleman yönlü panel anten [26].

Şekil 4.2’de gösterilen anten boyutlandırmalarının matematiksel ifadeleri şu şekildedir [26];

$$W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.1)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4.2)$$

$$L_{eff} = \frac{v_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (4.3)$$

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

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

$$z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \ln \left( \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right) & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{reff}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]} & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$IFG = \frac{W_0}{2} \quad (4.7)$$

$$IFD = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{Z_{beslemehattı}}{Z_{anten}}} \quad (4.8)$$

Yukarıdaki matematiksel ifadelerde geçen değişkenler şu şekildedir:

h: Baskı devre kartı dielektrik malzeme kalınlığı

$\varepsilon_r$ : Baskı devre kartı dielektrik sabiti

$\varepsilon_{reff}$ : Etkin dielektrik sabiti

$L_{eff}$ : Antende sebep olan saçak alanlara bağlı etkin anten uzunluğu

$\Delta L$ : saçak alanlardan dolayı genişletilen uzunluk

$v_0$ : merkez frekansın boşluktaki hızı

$z_c$ : mikroşerit hat empedansı

#### 4.1.2 Tek Eleman 5450 MHz Panel Anten

Tek elemanlı FR4 baskı devre kartıyla 4.2.1 Tek Eleman Panel Anten Tasarımı başlığı altındaki denklemlerle anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu anten için kullanılan FR4 baskı devre kartının dielektrik sabiti ( $\varepsilon_r$ ) 4.4 olup dielektrik yüksekliği(h) ise 1.5 mm'dir. Bu değerlere bağlı olarak merkez frekansını 5450 MHz olarak alacak olursak hesaplanmış anten boyutları şekil 4.3'teki gibi olacaktır;

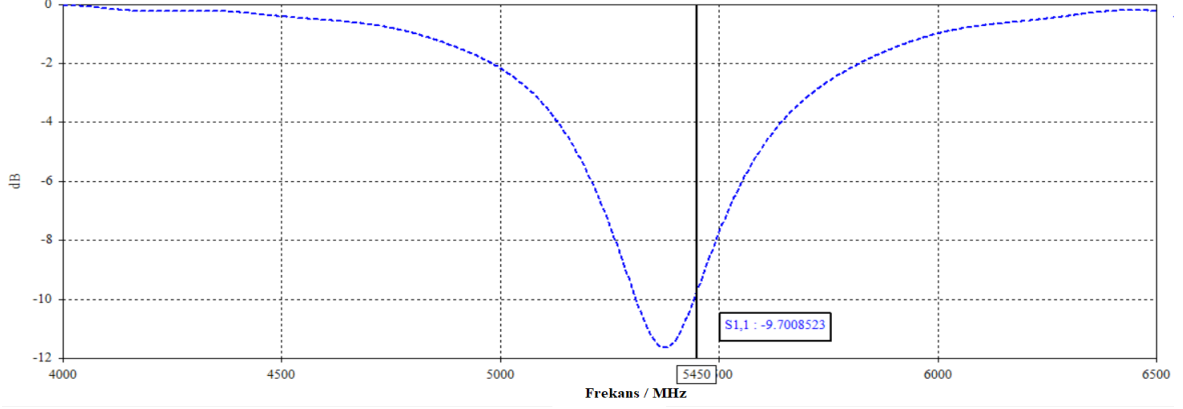
$$W = 16.74 \text{ mm}$$

$$L = 12.60 \text{ mm}$$

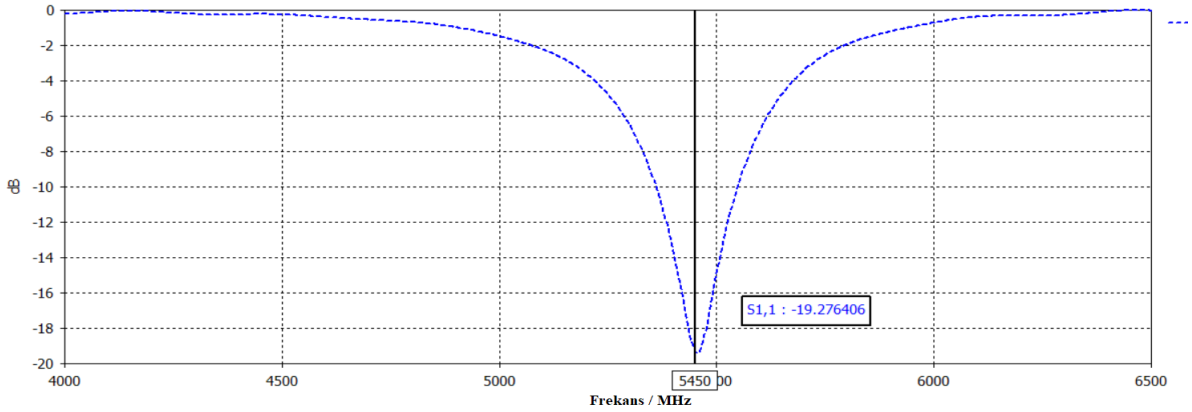
$$IFG = 1.4 \text{ mm}$$

$$W_0 = 2.8 \text{ mm}$$

$$IFD = 4 \text{ mm}$$



**Şekil 4.3:** Hesaplanmış değerler sonucu oluşturulmuş tek eleman panel anten s parametre sonuçları.



**Şekil 4.4:** Optimizasyon ile boyutlandırılmaları üzerinde değişiklik yapılmış tek eleman anten s parametre sonucu.

Matematiksel ifadelerin sonucunda çıkan değerler doğrultusunda oluşturulmuş tek eleman panel anten sonucu çıkan Şekil 4.3'teki s parametre sonuçlarını iyileştirmek amacıyla  $IFD$  ve  $L$  boyutları üzerinde değişikliğe gidilerek Şekil 4.4 elde edilmiştir. Buradaki kazanç değeri 6.5 dBi olarak bulunmuş olup  $IFD$ : 4.3 mm,  $L$ : 12.40 mm olarak değiştirilmiştir.

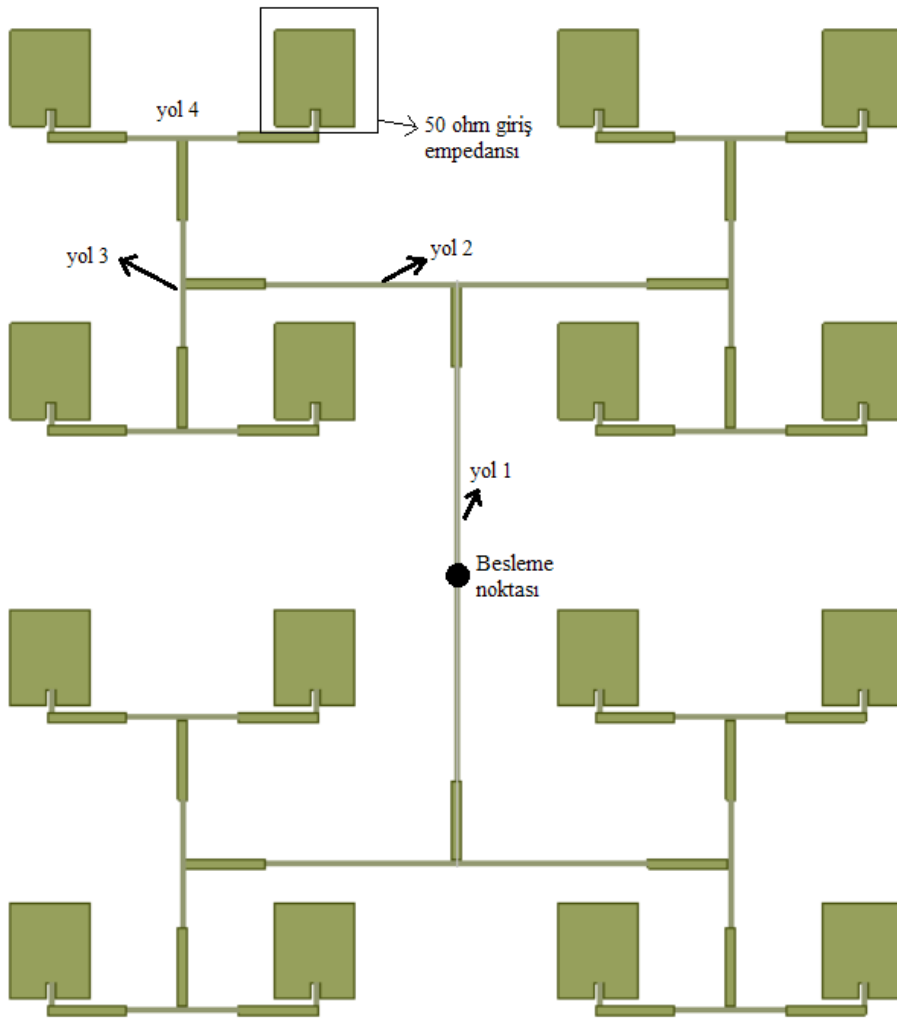
## 4.2 Dizi Panel Anten Yapısı

Dizi anten birden fazla antenin birlikte tek bir anten gibi çalışmasıdır. Tek besleme üzerinden beslenen antenler çoğunlukla gücü odaklamak, kazancı arttırmak için tasarlanırlar [2].



Gücün odaklanmasıyla beraber yan loblar azaltılmış olup haberleşme mesafesi belirli bir yönde iyileştirilmiş olur. Tezin bu bölümünde tek beslemeli dizi antenleri ele almış olsak ta faz taramalı dizi antenlerde genellikle her anten için ayrı besleme bulunmaktadır.

Tezin dördüncü kısmında asıl incelenecek olan tek beslemeli dizi anten yapısı, beslemeden itibaren dizi içerisindeki her antene giden yolların uzunlukları eşit tutularak tasarlanmıştır. Bu antenlerde yolların beslemeden itibaren uzunlukları ve yönleri oldukça önem arz etmektedir. Ele alacağımız bir dikey polarizasyon dizi antende her bir yolun tam zıttın da aynı kendisi gibi bir iletim yolunun olmasına özen gösterilmelidir. Bunun en büyük nedeni iletim hattı olarak kullanılacak olan iletim yollarının da bir anten gibi ışınma özelliği barındırmasıdır. Bunu 4x4 anten dizilimine sahip bir dizi antende örnek gösterecek olursak aşağıdaki görseli inceleyebiliriz.



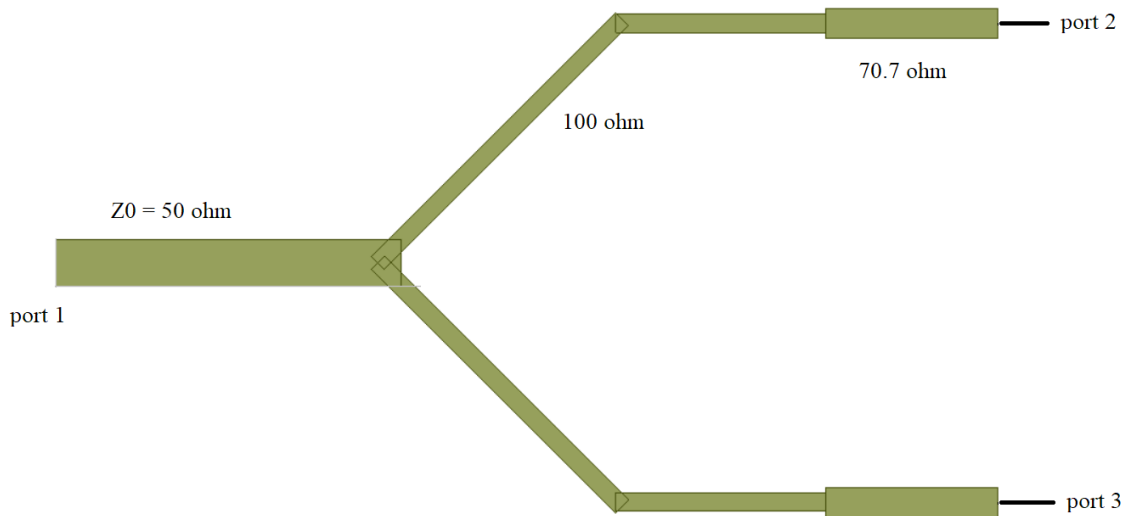
Şekil 4.5: Örnek 4x4 dizi panel anten yapısı.

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere besleme noktası anten merkezi olarak düşünüldüğünde aşağıya ve yukarıya eş boylarda yol uzanmaktadır. Yol 1 olarak adlandırılan bu yolun iki yarısının birbiriyle eşit olmasının nedenlerinden biri, dizideki her bir ışıyıcıya aynı fazda bilgi sinyalinin girmesini sağlamak böylelikle ana hüzmeyi antenin tam karşısında tutmaktır. Diğer bir neden ise yukarı yönde olan yolun yapacağı bozucu ışımı alt yolla dengelemektir. Yol 2 ve yol 3'te de aynı problemler oluşacağı için yol 1'deki düşünceyle tasarlanmıştır.

Dizi antendeki yolların kalınlıkları ve her bir yolun sonuna eklenen daha kalın yollar ise anten giriş empedansının 50 ohma eşlenmesi için hesaplanıp bulunmuş değerlerdir. Buradaki yollar güç bölücü hesabıyla bulunmaktadır. Dizi antendeki her bir ışıyıcı 50 ohm olarak tasarlanmış olup birbirleriyle paralel bağlanmaktadır. Bu paralellikten değişen empedans cevabını da yolların güç bölücü yapısıyla tasarlanıp çıkış noktası olan besleme noktasından 50 ohm görmemizi sağlamaktadır.

#### 4.2.1 Dizi Panel Anten İletim Hattı için Güç Bölücü Yapısı

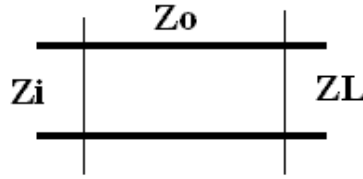
Güç bölücülerinde genel amaç giriş gücünü birden fazla çıkışa, istenilen oranlarda gücü aktarabilmek bununla beraber de giriş empedansını bozmamaktır. Dizi antendeki bölücüyü bir giriş iki çıkış olarak düşüneceğimiz için örnek bir güç bölücü yapısına bakmamız gerekirse Şekil 4.6 üzerinden gidebiliriz [27].



Şekil 4.6: Çift çıkış güç bölücü iletim hattı yapısı.

Şekil 4.6'da görüleceği üzere giriş portu olarak kabul edilecek olan port 1 karakteristik empedansa eşitir. Port 1'den itibaren gelen 50 ohm'luk yol devamında ikiye ayrılmaktadır. İkiye ayrılan her yolun girişinden 100 ohm görülmesi gerekmektedir. Bunun nedeni ise iki ayrı yolun beraber empedans cevabının 50 ohma denk gelmesidir. Ayrılmış olan yolların sonundaki port 2 ve port 3 ise dizi antendeki her bir ışıyıcı kısmı göstermektedir. Bu ışıyıcıların empedansı ise 50 ohma denk gelmektedir. Ayrılan yolların empedansını 100 ohm olarak aldığımız için yolların sonunda bulunan 50 ohm'luk ışıyıcıları 100 ohma eşlememiz gerekecek, bunun için ise çeyrek dalga empedans uyumlaması yapılacaktır. Bu uyumlamayı ise port 2 ve port 3 çıkışlarından hemen önceki yola bakarak yol kalınlık farkını görebilmekteyiz. Çeyrek dalga yolun empedansı ise şu şekilde bulunmaktadır [22];

$$Z_0 = \sqrt{Z_i * Z_L} \quad (4.9)$$



**Şekil 4.7:** Çeyrek dalga dönüştürücü iletim hattı gösterimi ( $z_0$ : Çeyrek dalga boyu iletim hattı).

Şekil 4.7'den yola çıkılarak (4.9)'deki eşitlikten  $Z_i = 100$  ohm,  $Z_L = 50$  ohm olacaktır. Çeyrek dalga empedansı  $Z_0$  ise aşağıdaki gibi hesaplanmış olacak;

$$z_0 = \sqrt{100 * 50} = 70.7 \text{ ohm}$$

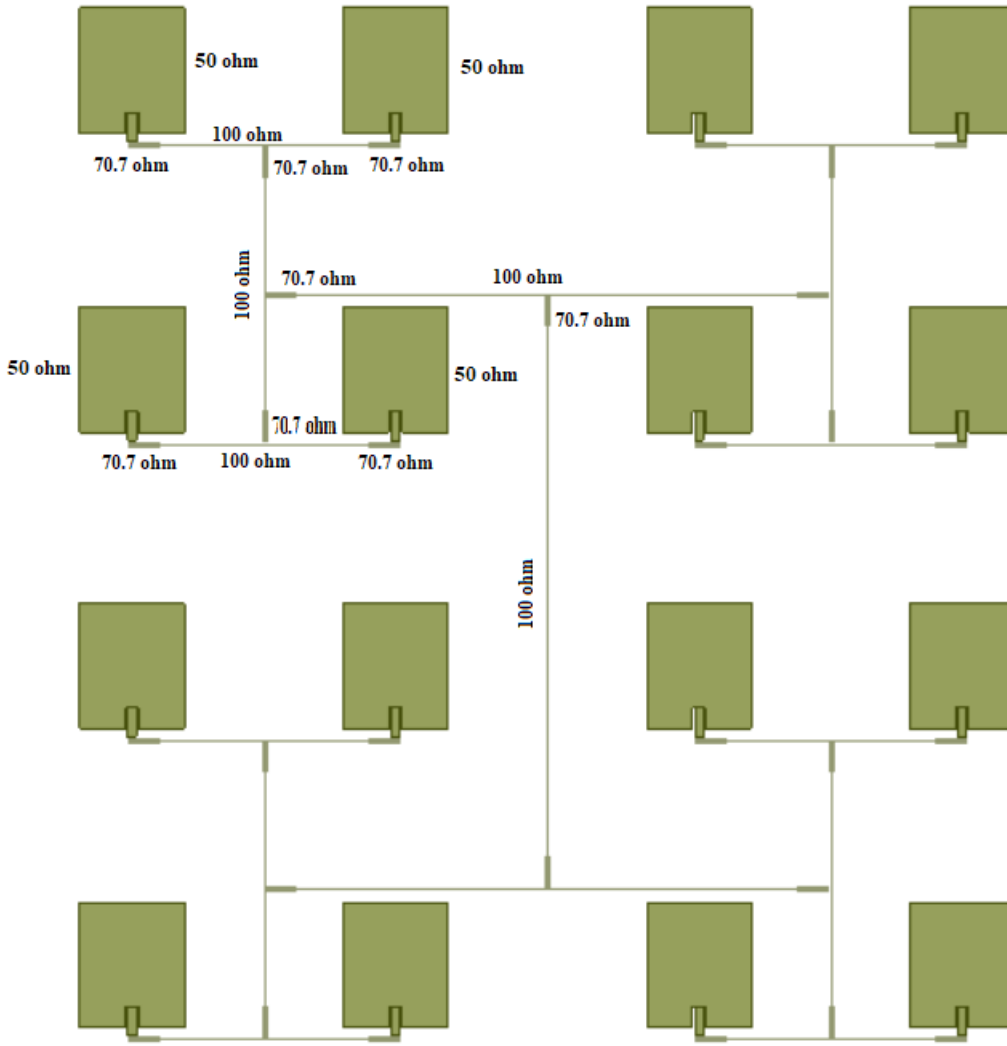
Dizi antende besleme hattından itibaren iki kısma ayrılan yollar 100 ohm olarak alınıp tekrar bölünmeden çeyrek dalga 70.7 ohm eklenecektir. Devamında tekrardan iki ayrı yola ayrılıp 100 ohm olarak devam edecektir. Bu tasarım düşüncesi dizi antenin kaç elemanlı olduğu gözetmeksizin tekli ışıyıcılara ulaşana kadar devam etmektedir.

### 4.3 5450 MHz 4x4 Dizi Panel Anten Tasarımı

Bu tezdeki dördüncü bölümün asıl konusu olan 5450 MHz dizi anten tasarımı 4x4 olarak ele alınmıştır. İçerisinde toplamda 16 adet ışıyıcı kısım bulunduran antenin her bir ışıyıcısı 5450 MHz için tasarlanmış olup 50 ohm giriş empedansına sahiptir. Bu ışıyıcılar 4.1.2 tek eleman 5450 MHz panel anten başlığı altında tasarlanmıştır.

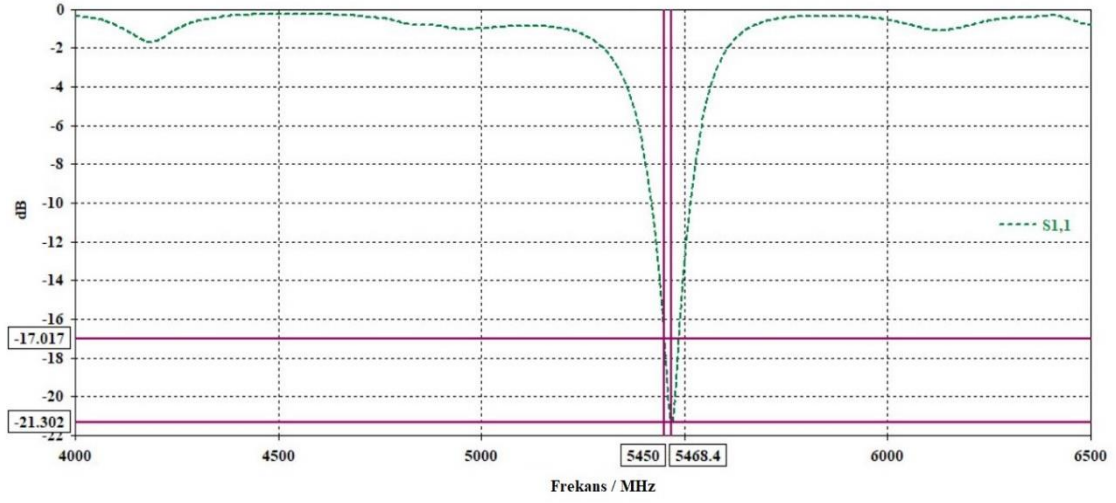
Dizi antendeki anten yolları 4.3.2.1 dizi panel anten iletim hattı için güç bölücü yapısı başlığı altında tasarlanmıştır. Bu başlık altındaki 100 ohm ve 70.7 ohm yolları kullanılacak olan fr4 baskı devre kartı üzerinde oluşturmak istediğimizde yol kalınlıkları 100 ohm için 0.67 mm olup 70.7 ohm için ise 1.51 mm olacaktır. Yol uzunluğu olarak 70.7 ohm çeyrek dalga ise 7.7 mm'dir. Kullanılacak olan fr4 baskı devre kartı dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) 4.4 olup dielektrik yüksekliği(h) ise 1.5 mm'dir.

Yukarıdaki paragraflara bağlı olarak tasarlanmış antenin genel görüntüsü ön yüzünden Şekil 4.8'teki gibi görülecektir. Şekil 4.8'de yolların kalınlığına bağlı değişiklik gösteren empedans değerleri gösterilmiştir.



**Şekil 4.8:** Matematiksel ifadeler sonucu boyutları hesaplanıp çıkartılmış 5450 Mhz 4x4 dizi antenin karşıdan görünümü.

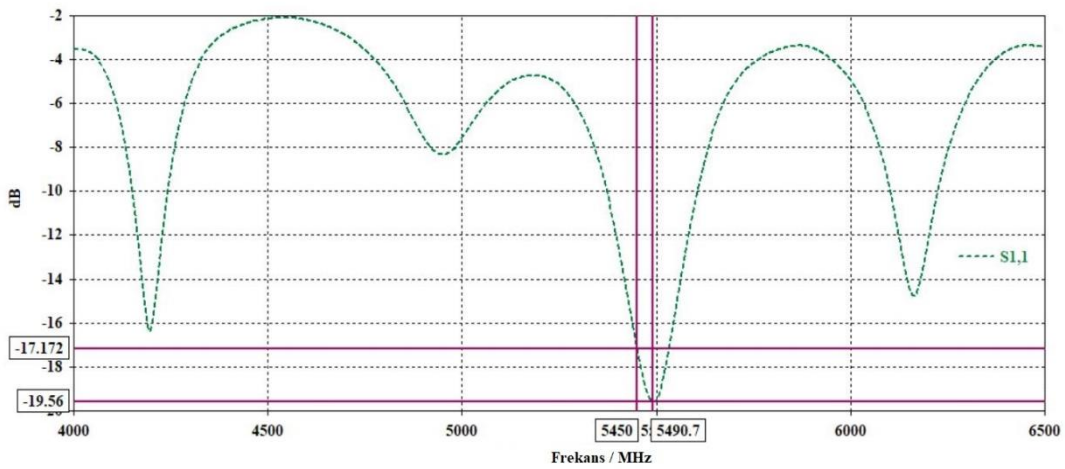
Şekil 4.8'teki dizi anten 5450 MHz için tasarlanmış olup kazanç değeri 18 dBi olarak ölçülmektedir. Her bir ışıyıcı kısmı 4.1.2 tek eleman 5450 Mhz panel anten başlığı altındaki değerler baz alınarak oluşturulmuştur. Matematiksel ifadeler ile tasarlanmış olan dizi anten geri dönüş kaybı ise şu şekildedir;



**Şekil 4.9:** Matematiksel ifadeler ile tasarlanmış olan dizi anten geri dönüş kaybı.

Şekil 4.9'taki sonuçta görüleceği üzere 5450 MHz'te -17.017 dB seviyelerinde geri dönüş kaybı bilgisayar destekli EM çözücü program ile elde edilebilmiştir. Geri dönüş kaybının tam tepe yapmış kısmı olan -21 dB seviyeleri ise 5480 MHz seviyelerine denk gelmektedir. Şekil 4.9 sonucu FR4 baskı devre kartı baz alınıp tüm frekanslarda değerler sabit tutulup kayıplar göz ardı edilerek çıkmış değerlerdir. Matematiksel ifadelerin sonuçları doğrultusunda çıkan cevap görmek istenilen değerleri göstermektedir.

Gerçek bir FR 4 baskı devre kartını göz önünde bulundurarak bulunan s parametre cevapları ise bilgisayar destekli EM çözücü program ile şekil 4.10'daki gibi olacaktır;

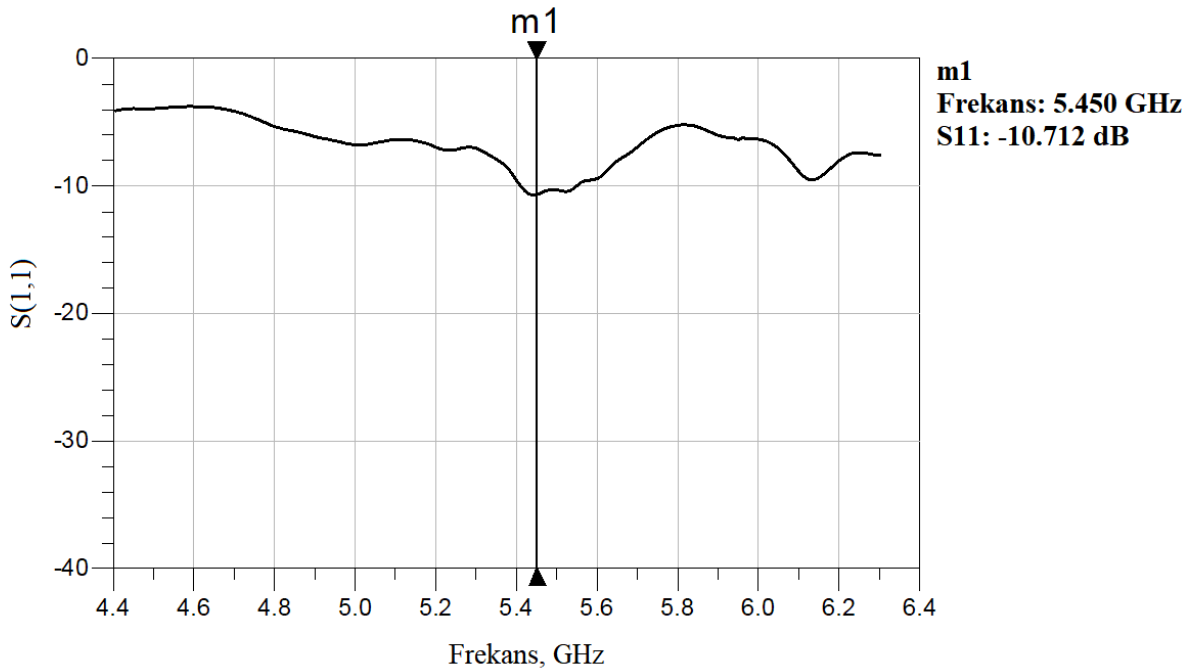


**Şekil 4.10:** Kayıplı FR 4 ile sonuçları alınmış 4x4 dizi anten geri dönüş kaybı.

Şekil 4.10’da görüleceği üzere 5450 MHz -17.17 dB değerlerine denk gelip istenilen frekansta değerin önemli ölçüde değişmediği görülüp diğer frekanslarda farklı tepeler oluştuğu gözlemlenebilmektedir.

#### 4.4 4x4 Dizi Panel Anten Parametre Sonuçları

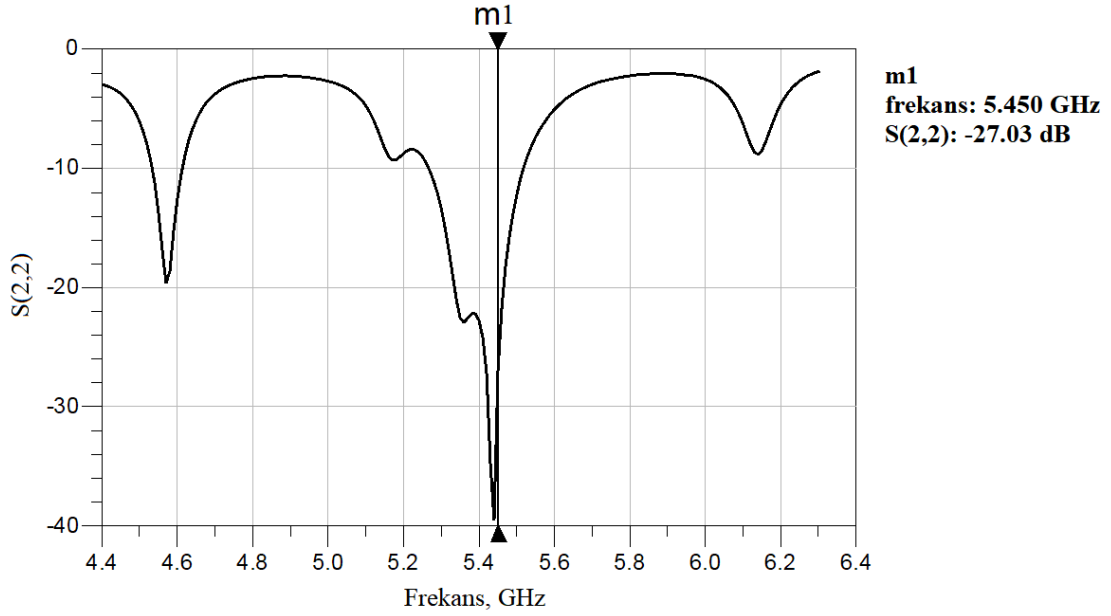
Tasarlanmış olan 4x4 5450 MHz anten yapısının FR4 pcb üzerine çıkartılıp ölçüldükten sonraki geri dönüş kaybı sonuçlarını şekil 4.11 4x4 üretilmiş dizi anten sonucu görselinde verildiği gibidir.



Şekil 4.11: 4x4 üretilmiş dizi anten geri dönüş kaybı.

Şekil 4.11, Şekil 4.8’de gösterilen matematiksel ifadelerin sonucu çıkmış olan yapının gerçekte oluşturulup, oluşturulan antenin ölçülmüş geri dönüş kaybı sonucudur. Buradaki sonucun şekil 4.10 ile benzerlikler göstermesi beklenirken istenilen frekanstaki değerlerde kötüleşme olduğu gözükmemektedir. Bunun en büyük nedeni kullanılan olan FR4 pcb kartın 5 GHz seviyelerinde stabil değerler gösterememesinden kaynaklanmaktadır. Diğer nedenlerden biri ise antenin mikrometre hassasiyetindeki üretimi yakalayamamış olmasından kaynaklanmaktadır.

Çalışılan frekans olan 5450 MHz seviyelerinde daha iyi bir geri dönüş kaybı için anten üzerinde saplamalar ile empedans uyumlama gerçekleştirilmiştir. Saplama ile empedans uyumu sonucu ise Şekil 4.12’ de gösterilmiştir.



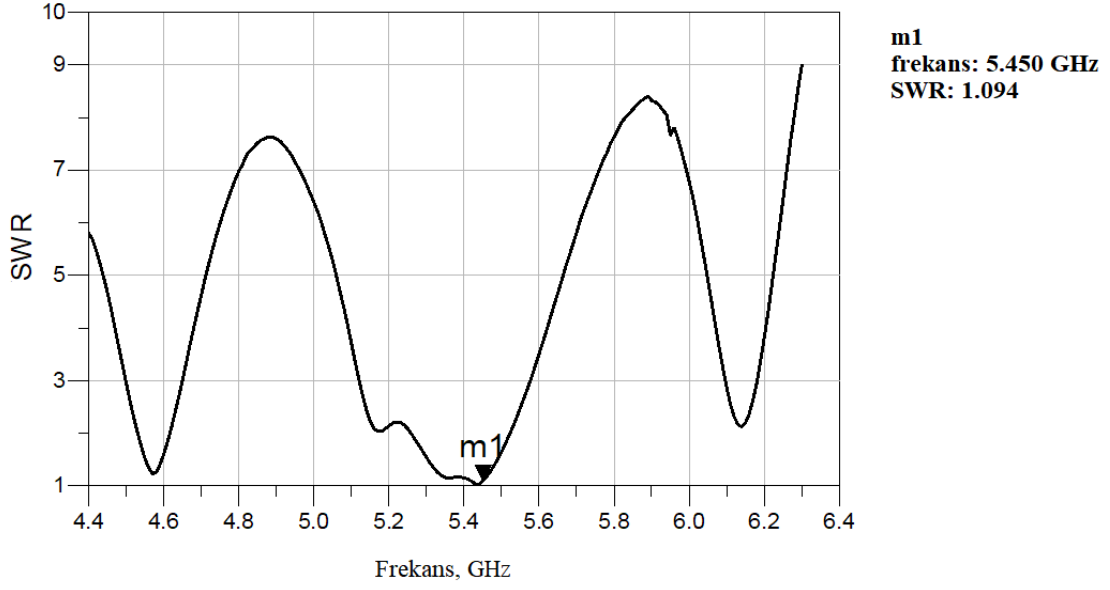
**Şekil 4.12:** Empedans uyumu sonrası 4x4 anten geri dönüş kaybı.

Saplamalar sonucu empedans uyumu ile 5450 MHz frekans değerindeki dönüş kaybı -10 seviyelerinden -27 seviyelerine çekilerek iyileştirilmiştir. Üretilen dizi antenin görseli ise Şekil 4.15’te verilmiştir.

#### **4.4.1 4x4 Dizi Panel Anten Duran Dalga Oranı(SWR) Sonuçları**

Empedans uyumlaması yapılmış olan 4x4 dizi anten duran dalga oranı Şekil 4.13’ te verilmiştir. Şekil 4.13’te görüldüğü üzere 5450 MHz merkez frekansının değeri 1.093 olarak görülmektedir. Bu değer antenin merkez frekansında 50 ohm empedansa çok yakın bir sonuç verdiğini göstermektedir. Bunun sonucunda da antene gönderilen gücün neredeyse tamamının anten üzerinde harcandığı ilk kısımdaki anten parametreler kısmına bakarak söyleyebiliriz.



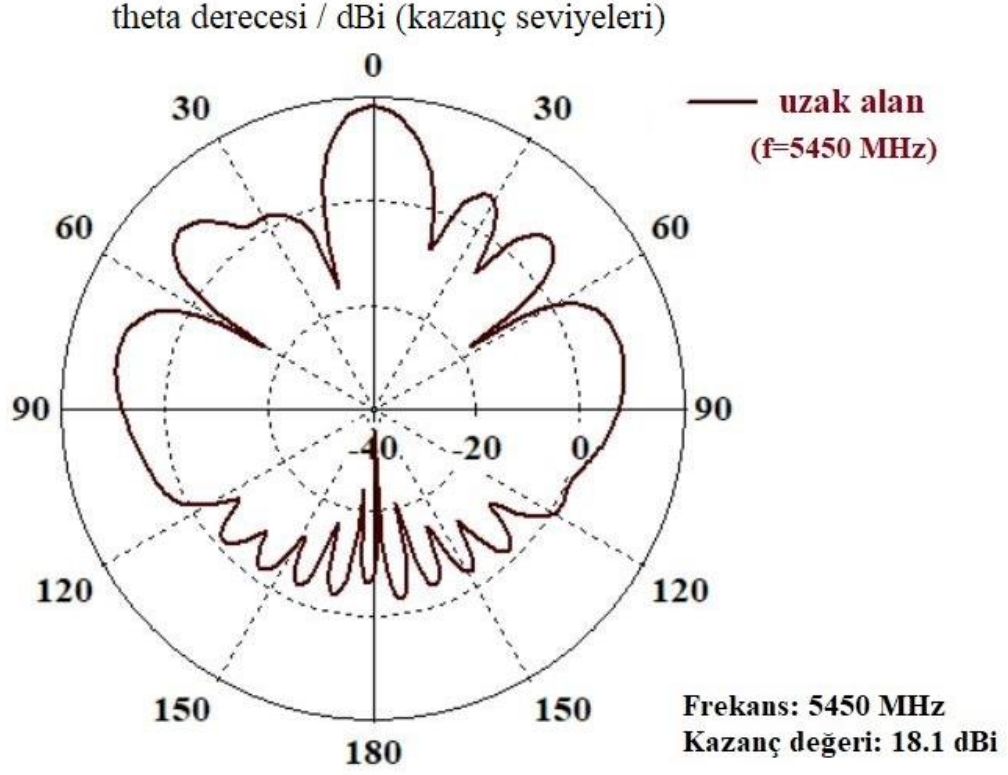


**Şekil 4.13:** Üretilmiş olan dizi antenin duran dalga oranı (SWR) sonucu.

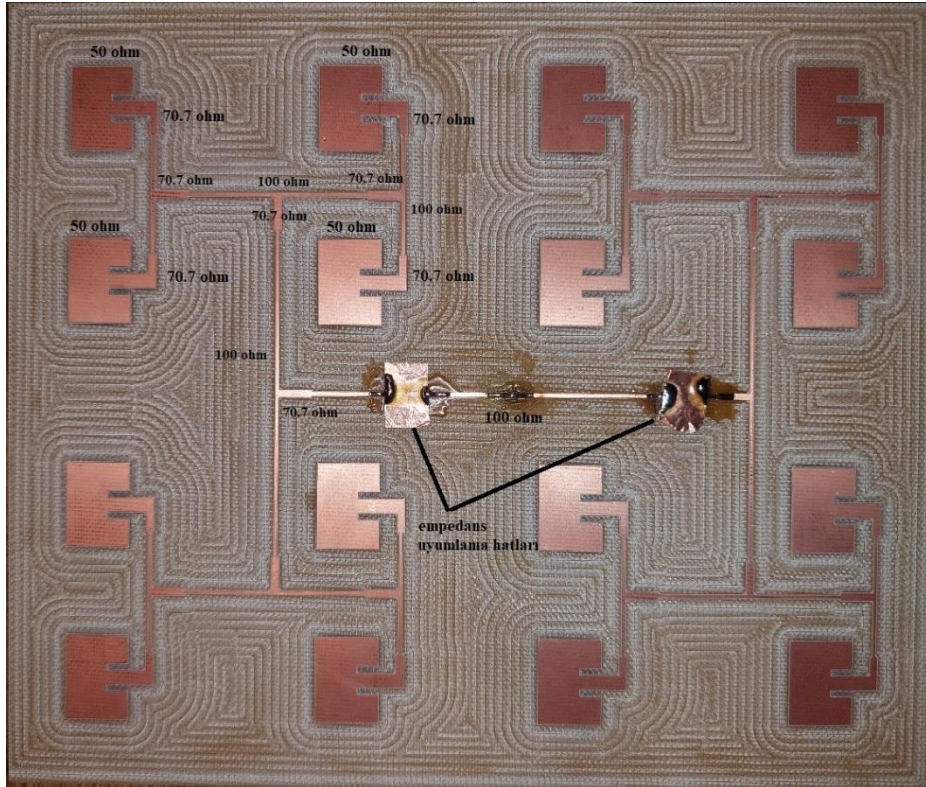
Şekil 4.13'teki merkez frekans değeri geri dönüş kaybında -27 dB seviyelerine denk gelmektedir.

#### 4.4.2 4x4 Dizi Panel Anten Işıma Grafiği

Tasarlanıp üretilmiş 4x4 dizi antenin kayıpsız durumdaki dikey kazanç grafiği Şekil 4.14'teki gibidir. Kayıpsız durumdaki maksimum kazanç değeri 18 dBi değerlerinde ölçülürken kayıplı durumda bu değer 12 dBi seviyelerine kadar düştüğü bilgisayar ortamında görülmüştür.



Şekil 4.14: Tasarlanmış olan 4x4 dizi antenin dikeydeki 2d polar kazanç grafiği.



Şekil 4.15: Üretilmiş olan dizi anten görseli.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması boyunca farklı yapılardaki yönlü antenlerin tasarım ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Yönlü anten yapıları oluşturulurken tasarım denklemlerinden faydalanılmış ve ölçüm sonuçları üzerinde beklenen değerler karşılaştırılıp üretilen antenin boyutları üzerinde değişiklikler yapılarak anten sonuçları daha verimli hale getirilmiştir.

Tezin ilk kısmında, yönlü antenler ile ilgili genel bilgiler ve teorik temeller verilmiştir. Özellikle Yagi ve SIW antenler, karakteristikleri gereği sırasıyla akı indüklemeli ve dalgayı kılavuzlamalı yöntemler temelinde çalışıyor olması nedeniyle, bu antenler detaylı şekilde irdelenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde silindirik dalga kılavuzu anten tasarımı, üretim ve karakterizasyonu sürecindeki çalışmalar verilmiştir. Tasarım denklemleri üzerinden ilksel tasarım elde edilmiş ve bu tasarım nümerik elektromanyetik analiz programı üzerinden analiz edilerek nihai tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretilen antenin empedans karakterizasyonu ve yansımali açık alanda yapılan testler, ölçüm sonuçlarının tasarımıyla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Dalga kılavuzu sinyal geçirgenliği açısından düşünüldüğünde yüksek geçiren filtre cevabı sergilediği için, bant dışı alt frekanslarda dış etkilerin bozuculuğundan haberleşme kalitesi anlamında önemli bir katkı sağlamaktadır. Dalga kılavuzu antenler özellikle hava boşluklu olarak kullanıldığı için dielektrik malzeme içeren yapılara kıyasla önemli derecede kayıpları azaltmış olup frekansa bağlı önemli bir dielektrik değer farklılığı ve güç kaybı göstermemiş olacaktır.

Tezin üçüncü bölümünde 4800-6200 MHz'de radyolink uygulamaları için çanak anten tasarım, üretim ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Buradaki çanak antenin odağında sıçrama yüzeyi (splash plate) yapısı kullanılmış ve bu sıçrama yüzeyi ikinci bölümde tasarlanan dalga kılavuzu ile beslenmiştir. Üretilen antende, dalga klavuzu ile sıçrama plakası arasındaki mesafe, odak noktası ve sıçrama plakasının boyutları değiştirilerek antenin ışımaya ve empedans karakteristikleri optimize edilmiştir. Burada sıçrama plakasının modüler yapısından dolayı, üretilen antenin nihai hali rahatlıkla optimize edilmiştir.

Tezin beşinci kısmında ise, düzlemsel ışıyıcılar ile dizi anten formunda panel yapıda anten tasarım, üretim ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda  $4 \times 4 = 16$  eleman ile 18 dBi kazanç elde edilmiştir. Baskı devre kartı üzerine yapılmış olan dizi antenlerin ışıyıcı yolları tam ters yönde aynı mesafede olması gerekliliği tezde yer verilen panel antende de olup anten ışıma paterninin bozulmamasını sağladığı görülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] R. F. Graf, *Modern Dictionary of Electronics*, Elsevier, 1999.
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2015.
- [3] Y. Soylu, B. Yorulmaz, A. Soylu, S. A. Sis,” 868 MHz LORAWAN Uygulamaları İçin Doğrudan Dipol Dizi Anten Tasarımı”, *ELECO*, 2022
- [4] E. Bogatin, *Signal and Power Integrity- Simplified*, 2009.
- [5] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*, 1984.
- [6] C. G. Someda, *Electromagnetic Waves*, CRC Press, 2017.
- [7] G. S. N. Raju, *Antennas and Wave Propagation*, Pearson Education India, 2006.
- [8] F. Ali, “Low profile substrate integrated waveguide (SIW) wideband antenna for Ku-band applications”, *Proceedings of 2nd International Multi-Disciplinary Conference Theme: Integrated Sciences and Technologies*, IMDC-IST 2021, 7-9 September 2021.
- [9] <https://www.easytechjunkie.com/what-is-a-yagi-antenna.htm>
- [10] C. A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, John Wiley & Sons, 2011.
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Featured\\_picture\\_candidates/January-2017](https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Featured_picture_candidates/January-2017)
- [12] J. Radatz, I. of EE, I. C. Society. S. C. Committee, *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*, Institute of Electrical & Electronics Engineers(IEEE), 1997.
- [13] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 2011.
- [14] P. C. Magnusson, A. Weisshaar, V. K. Tripathi, G. C. Alexander, *Transmission Lines and Wave Propagation*, CRC Press, 2000.
- [15] [www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn.php](http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn.php)
- [16] [www.ainfoinc.com/antenna-products/horn-antennas/conical-horn-antennas/conical-horn-with-other-circular-wg-interface](http://www.ainfoinc.com/antenna-products/horn-antennas/conical-horn-antennas/conical-horn-with-other-circular-wg-interface)
- [17] R. P. Jadhav, V. J. Dongre ve A. Heddallikar, “Design of X-band conical horn antenna using coaxial feed and improved design technique for bandwidth enhancement”, 2017, doi: 10.1109/iccube.2017.8463932.
- [18] R. Colella, F. P. Chietera, G. Muntoni, G. A. Casula, G. Montisci, L. Catarinucci, “Evaluating the effectiveness of planar and waveguide 3D-printed antennas manufactured using dielectric and conductive filaments”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 34891–34898, Jan. 2023, doi: 10.1109/access.2023.3265563.
- [19] H. Engan, “*Waveguide Propagation*”, NTNU Institutt for elektronikk og telekommunikasjon, 2006

- [20] <https://www.shutterstock.com/tr/image-illustration/raster-illustration-satellite-dish-antenna-outline-358904876>
- [21] R. L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunications*, John Wiley & Sons, 2006.
- [22] P. Biswas, S. Rathore, Khan, *Basic Antenna & Wave Propagation with its MATLAB Volume I*. Blue Rose Publishers, 2022.
- [23] P. Wade, “Feeds for Parabolic Dish Antennas”, QEX, 1999.
- [24] C. Granet, "Designing axially symmetric Cassegrain or Gregorian dual-reflector antennas from combinations of prescribed geometric parameters", in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 76-82, April 1998, doi: 10.1109/74.683545.
- [25] F. F. Sobirin, S. Nugraha, F. Haz ve P. Sitompul, “Study of Cassegrain-type antenna for radio telescope”, *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2214, no. 1, p. 012028, Feb. 2022
- [26] M. T. Ali, M. R. B. Kamarudin, T. B. A. Rahman, R. Sauleau, ve M. veyya M. Tan, “Design of reconfigurable multiple elements microstrip rectangular linear array antenna”, *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 6, pp. 21–35, Jan. 2009, doi: 10.2528/pierc08122101.
- [27] D. R. Voltmer, *Fundamentals Of Electromagnetics: Quasistatics And Waves*, 2007.

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Berk YORULMAZ

Doğum tarihi ve yeri :

E-posta :

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Elektrik – Elektronik Mühendisliği	2020
Lise	Balıkesir Anadolu Lisesi	2016

## Yayınlar

868 MHz LORAWAN Uygulamaları İçin Doğruduş Dipol Dizi Anten Tasarımı Yusuf Soylu<sup>1</sup>, Berk Yorulmaz<sup>1,2</sup>, Ayşenur Soylu<sup>2</sup>, Seyit Ahmet Sis<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü <sup>2</sup>Kuvayi Technologies Savunma ve Haberleşme Teknoloji. San. ve Tic. A.Ş. ISBN: 978-605-01-1437-9