

**UHF (AŞIRI YÜKSEK FREKANS) BANDINDA YERE NÜFUZ  
EDEN RADAR UYGULAMALARI İÇİN GENİŞ BANTLI  
ANTEN TASARIMI**

**DESIGN OF BROADBAND ANTENNAS IN UHF (ULTRA-  
HIGH FREQUENCY) BAND FOR GPR (GROUND  
PENETRATING RADAR) APPLICATIONS**

**HAKAN ŞENGÜL**

**PROF. DR. BİRSEN SAKA TANATAR**  
**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

HAKAN ŞENGÜL'ün hazırladığı “UHF (Aşırı Yüksek Frekans) Bandında Yere Nüfuz Eden Radar Uygulamaları İçin Geniş Bantlı Anten Tasarımı” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Başkan



Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Danışman



Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

Üye



Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

Üye



Dr. Seniha Esen YÜKSEL

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŐDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

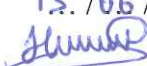
(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, teziniz arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun 31.12.2018 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

13./06/2018  
  
Hakan ŞENGÜL

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum tüm eserleri kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13.06.2018  
  
**Hakan ŞENGÜL**

## ÖZET

# UHF (AŞIRI YÜKSEK FREKANS) BANDINDA YERE NÜFUZ EDEN RADAR UYGULAMALARI İÇİN GENİŞ BANTLI ANTEN TASARIMI

**Hakan ŞENGÜL**

**Yüksek Lisans, Elektrik Ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR**

**Haziran 2018, 81 sayfa**

Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) önemli bir uzaktan algılama yöntemidir. Bu yöntem yerin altını ve içinde yer alan nesnelere, beton blokların ve asfalt zeminlerin içlerini görüntüleme amacıyla kullanılır. Yere Nüfuz Eden Radarlar; yer altına gönderilen elektromanyetik sinyallerin, belirli katmanlara ya da nesnelere çarparak yansıyan kısımlarının toplanıp, bu sinyallerin işlenerek yer altının görüntülenmesi prensibine dayanır. Elde edilen bu bilgiler sayesinde hedefin derinliği, boyutları, şekli ve bulunduğu ortamın su yoğunluğu tespit edilebilir.

Sistem performansı ortamın (toprak, asfalt, beton vs.) elektriksel kaybı ve gömülü cismin saçılma karakteristiği dikkate alınarak hesaplanan frekans bandı, verici gücü, anten kazancı, dinamik aralık gibi temel anten ve radar parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle sistemin amacına göre YNR için kullanılacak antenin parametreleri hesaplanır ve bu analize göre tasarım gerçekleştirilir. YNR sistemleri; verici anten, alıcı anten, işlemci birimi ve görüntüleme birimlerinden oluşmaktadır.

Bu tezde YNR sistemleri için kullanılabilecek bir anten türü olan Vivaldi anten tasarımından bahsedilmekte ve sistem performansının artırılması için çeşitli yöntemler anlatılmaktadır.

Yapılan alışmalar sonucunda tasarlanan Vivaldi anten 0.5 GHz – 3 GHz bandında çalışabilmektedir.

Tasarlanan antenin yan kulakçık seviyelerinin dşürölmesi amacıyla bir anten dizisi tasarlanmıştır. Doğrusal bir yapıya sahip olan bu anten dizisinde 8 adet Vivaldi anten aralarında en yüksek çalışma frekansındaki dalga boyunun yaklaşık yarısı kadar (65 mm) aralıklarla dizilmiştir. Bu alışma sonucunda antenin 0.5 GHz, 1 GHz, 1.5 GHz, 2 GHz, 2.5 GHz ve 3 GHz'deki yan kulakçık seviyelerinde önemli bir azalma gözlenmesinin yanında, sistemin kazancı da artmıştır. Anten dizisinin geri yönlü ışımalarının azaltılması amacıyla bir yansıtıcı plaka tasarlanmıştır. Bu yansıtıcı plaka anten dizisinin 170 mm arkasına yerleştirilmiştir. Tasarlanan bu yansıtıcı plaka ile birlikte antenin geri yönlü ışımaya seviyesi azalmış ve ön-arka ışımaya oranı 4-14 dB seviyelerine ulaşmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Vivaldi anten, Yere Nüfuz Eden Radar (YNR), anten dizisi, yansıtıcı plaka.

## **ABSTRACT**

# **DESIGN OF BROADBAND ANTENNAS IN UHF (ULTRA-HIGH FREQUENCY) BAND FOR GPR (GROUND PENETRATING RADAR) APPLICATIONS**

**Hakan ŞENGÜL**

**Master of Science, Department of Electrical and  
Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR**

**June 2018, 81 pages**

Ground Penetrating Radar (GPR) is an important remote sensing method. This method is used to detect underground and hidden objects inside concrete blocks and asphalt floors. Ground Penetrating Radars are based on the principle of electromagnetic reflection from different medium. The electromagnetic signal transmitted to the ground reflected back from some layers or objects are collected and processed to get underground images. This information can be used to determine the depth, size, shape, and water density of the target.

A basic GPR system consists of a transmitting antenna, a receiving antenna, processing and imaging units. The system performance depends on the basic antenna and radar parameters such as frequency band, transmitter power, antenna gain, dynamic range. These parameters are calculated by keeping the electrical loss of environment (earth, asphalt, concrete etc.) and scattering characteristics of buried object into consideration. Therefore, first antenna parameters are calculated and analyzed according to GPR system requirements and then the design is simulated and optimized on the basis of these parametric analysis.

In this thesis, Vivaldi antenna which is an antenna type that can be used for GPR systems is presented and various methods for improving system performance are explained. The optimized antenna is fabricated. The proposed Vivaldi antenna can operate in between 0.5 GHz to 3 GHz frequency band.

An antenna array is designed to reduce the side lobes of the designed antenna. This linear antenna array consists of eight Vivaldi antenna elements which are arranged at intervals of approximately a half wavelength (65 mm) of the highest operating frequency. As a result of this study, the gain of the system has increased whereas side lobe levels of the antenna has reduced significantly for 0.5 GHz, 1 GHz, 1.5 GHz, 2 GHz, 2.5 GHz and 3 GHz frequencies of the operating band. A reflector plate is inserted to reduce the back lobe of the antenna array. This reflector plate has reduced the backward radiation level and the front to back ratio has reached 4-14 dB.

**Keywords:** Vivaldi antenna, Ground Penetrating Radar (GPR), antenna array, reflector plate.



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR'a, bu surete benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen Tolga ÜSTÜNOVA ve Gökhan PAMUK'a, çalıőmalarım esnasında tüm zorlukları benimle göğsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan aileme teşekkür ederim.



## SÖZLÜK

- Ağ Analizörü : Network Analyzer  
Ağız Açıklığı : Mouth Opening  
Alçak Geçiren Filtre : Low Pass Filter  
Altaş: Substrate  
Ana Hüzme : Main Lobe  
Anten Saçılma Kaybı : Antenna Spreading Loss  
Anten Uyumsuzluk Kaybı : Antenna Mismatch Loss  
Anten Verimlilik Kaybı : Antenna Efficiency Loss  
Arka Hüzme : Back Lobe  
Aşırı Geniş Bant : Ultra-Wideband  
Aşırı Yüksek Frekans : Ultra High Frequency  
Bağıl Elektrik Geçirgenlik : Relative Permittivity  
Boğaz Uzunluğu : Throat Length  
Boynuz : Horn  
Kargaşa : Clutter  
Dairesel Koçan : Radial Stub  
Dalga Numarası : Wave Number  
Darbe : Pulse  
Derinlik Çözümlemesi : Depth Resolution  
Dizi Faktörü : Array Factor  
Havadan Zemine İletim Kaybı : Transmission Loss From Air To Ground  
Hedefin Saçılma Kaybı : Target Scattering Loss  
Hedefin Yansıtıcılığı : Target Reflectivity  
İtke : Impulse  
Koçan : Stub  
Koniklik Oranı : Taper Rate  
Koniklik Uzunluğu : Taper Length  
Menzil : Range  
Ön-Arka Işıma Oranı : Front-To-Back Ratio  
Papyon : Bowtie

Plan Çözümlemesi : Plan Resolution

Yalıtkan : Dielectric

Yan Kulakçık : Side Lobe

Yere Nüfuz Eden Radar : Ground Penetrating Radar

Yol Kaybı : Path Loss

Zeminden Havaya İletim Kaybı : Transmission Loss From Ground To Air

Zeminin Sönümlenme Kaybı : Attenuation Loss Of Ground



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
SÖZLÜK .....	vi
ŞEKİLLER .....	x
ÇİZELGELER .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. YERE NÜFUZ EDEN RADAR (YNR) TEORİSİ .....	6
2.1. Menzil .....	6
2.2. Yayılma Hızı .....	8
2.3. Kargaşa .....	8
2.4. Derinlik Çözümlemesi .....	9
2.5. Plan Çözümlemesi .....	11
2.6. Antenler Arası Mesafe .....	13
3. YERE NÜFUZ EDEN RADAR ANTENLERİ .....	14
3.1. Anten Çeşitleri .....	14
3.2. Bazı Anten Tanımları .....	15
3.2.1. Aşırı Geniş Bant .....	15
3.2.2. Gerilim Yansıma Katsayısı .....	16
3.2.3. Gerilim Duran Dalga Oranı .....	16
3.2.4. Işıma Örüntüsü .....	17
3.2.5. Işıma Verimi .....	17
3.2.6. Anten Kazancı .....	18
4. VİVALDİ ANTEN ANALİZİ .....	19
4.1. Tek Anten Teorisi ve Analizi .....	19
4.1.1. Giriş Empedansı .....	23
4.1.2. Koçan Yarıçapı ( $S_r$ ) ve Dairesel Açıklık Çapı ( $S_d$ ) .....	28
4.1.3. Anten Uzunluğu ( $L$ ) .....	29
4.1.4. Anten Genişliği ( $W$ ) .....	30
4.1.5. Anten Arkası Uzunluğu ( $B_o$ ) .....	31
4.1.6. Koniklik Uzunluğu ( $L_t$ ) .....	32
4.1.7. Ağız Açıklığı ( $W_{max}$ ) .....	32
4.1.8. Koniklik Oranı ( $p$ ) .....	33

4.2. Anten Dizisi Tasarımı .....	35
4.2.1. 2 Elemanlı Anten Dizisinin İncelenmesi.....	35
4.2.2. Antenler Arası Mesafe .....	40
4.2.3. Anten Sayısı .....	40
4.3. Yansıtıcı Plaka Tasarımı .....	45
5. VİVALDİ ANTEN TASARIMI ve SİMÜLASYON.....	51
5.1. Tek Anten Tasarımı .....	51
5.2. Üretilen Anten ve Ölçüm Sonuçları.....	56
5.3. Anten Dizisi Tasarımı .....	59
5.4. Yansıtıcı Plaka Tasarımı .....	68
6. SONUÇLAR ve İRDELEME.....	72
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	79
EK A. MATLAB FONKSİYONU .....	81

# ŞEKİLLER

## Sayfa

Şekil 1.1. YNR Çalışma Prensibi .....	3
Şekil 2.1. Kargaşa Oluşumu .....	9
Şekil 2.2. Toplam Yansıma .....	10
Şekil 2.3. Ortak Sapma Modu .....	11
Şekil 2.4. Ortak Kaynak Modu.....	12
Şekil 2.5. Ortak Alıcı Modu .....	12
Şekil 2.6. Ortak Derinlik Noktası Modu .....	12
Şekil 3.1. Papyon Anten .....	14
Şekil 3.2. Vivaldi Anteni .....	15
Şekil 3.3. YNR Antenin Yönlülüğü .....	17
Şekil 4.1. Vivaldi Anteni Parametreleri .....	19
Şekil 4.2. Dairesel Koçan .....	20
Şekil 4.3. Üstel Yarık .....	21
Şekil 4.4. Tasarlanan Vivaldi Anten ve Parametreleri .....	22
Şekil 4.5. Alttaş Parametreleri.....	24
Şekil 4.6. Giriş Empedansının Sanal Kısmı .....	24
Şekil 4.7. Giriş Empedansının Gerçel Kısmı.....	25
Şekil 4.8. Yansıtıcı Plaka Varken Giriş Empedansının Sanal Kısmı .....	26
Şekil 4.9. Yansıtıcı Plaka Varken Giriş Empedansının Gerçel Kısmı .....	26
Şekil 4.10. Koçan Yarıçapı ve Dairesel Açıklık Çapı için Geri Dönüş Kaybı Grafiği .....	29
Şekil 4.11. Farklı Anten Boyları için Geri Dönüş Kaybı .....	29
Şekil 4.12. Farklı Anten Genişlikleri için Geri Dönüş Kaybı .....	30
Şekil 4.13. Farklı Anten Arkası Uzunlukları İçin Geri Dönüş Kaybı .....	31
Şekil 4.14. Farklı Koniklik Uzunlukları İçin Geri Dönüş Kaybı .....	32
Şekil 4.15. Farklı Ağız Açıklığı Değerleri için Geri Dönüş Kaybı .....	33
Şekil 4.16. Farklı Koniklik Oranı Değerleri için Geri Dönüş Kaybı.....	33
Şekil 4.17. Vivaldi Anten Tasarımı için Akış Diyagramı .....	34
Şekil 4.18. İki Elemanlı Anten Dizisi .....	35
Şekil 4.19. Aynı Fazda Beslenen $\lambda/4$ Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü .....	36
Şekil 4.20. Aynı Fazda Beslenen $\lambda/2$ Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü .....	37

Şekil 4.21. 90° Faz Farkıyla Beslenen $\lambda/4$ Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü .....	37
Şekil 4.22. 90° Faz Farkıyla Beslenen $\lambda/2$ Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü .....	38
Şekil 4.23. 180° Faz Farkıyla Beslenen $\lambda/4$ Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü .....	39
Şekil 4.24. 180° Faz Farkıyla Beslenen $\lambda/2$ Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü .....	39
Şekil 4.25. Tasarlanan Anten Dizisi ve Parametreleri.....	40
Şekil 4.26. N = 5 için Farklı Frekanslardaki Dizi Faktörü Örüntüleri .....	42
Şekil 4.27. N = 8 için Farklı Frekanslardaki Dizi Faktörü Örüntüleri .....	43
Şekil 4.28. N = 11 için Farklı Frekanslardaki Dizi Faktörü Örüntüleri .....	45
Şekil 4.29. Tasarlanan Yansıtıcı Plaka ve Parametreleri.....	46
Şekil 4.30. Farklı Uzaklıklar için Ön-Arka Işıma Oranı .....	46
Şekil 4.31. Farklı Uzaklıklar için Kazanç Grafiği .....	47
Şekil 4.32. 0.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	47
Şekil 4.33. 1 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	48
Şekil 4.34. 1.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	48
Şekil 4.35. 2 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	49
Şekil 4.36. 2.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	49
Şekil 4.37. 3 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	50
Şekil 5.1. CST ile Tasarlanan Vivaldi Anteni .....	51
Şekil 5.2. Tasarlanan Anten için Geri Dönüş Kaybı .....	52
Şekil 5.3. Ön-Arka Işıma Oranı.....	53
Şekil 5.4. Anten Kazanç Grafiği.....	53
Şekil 5.5. Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri ( $\phi = 0^\circ$ ).....	54
Şekil 5.6. Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri ( $\theta = 90^\circ$ ) .....	56
Şekil 5.7. Üretilen Antenin Ön Yüzünün Görünümü .....	57
Şekil 5.8. Üretilen Antenin Arka Yüzünün Görünümü .....	58
Şekil 5.9. Simülasyon ve Ölçüm Sonucunda Elde Edilen Geri Dönüş Kayıpları .....	58
Şekil 5.10. Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri ( $\phi = 0^\circ$ ).....	60
Şekil 5.11. Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri ( $\theta = 90^\circ$ ) .....	60
Şekil 5.12. Anten Kazanç Grafiği.....	62
Şekil 5.13. Ön-Arka Işıma Oranı.....	62

Şekil 5.14. $N = 15$ ve $d = 32.5$ mm için Dizi Faktörü Örüntüleri.....	64
Şekil 5.15. 0.5 GHz için Uzak Alan Kazancı .....	65
Şekil 5.16. 1 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	65
Şekil 5.17. 1.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	65
Şekil 5.18. 2 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	66
Şekil 5.19. 2.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	66
Şekil 5.20. 3 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	66
Şekil 5.21. Anten Kazanç Grafiği.....	67
Şekil 5.22. Ön-Arka Işıma Oranı.....	67
Şekil 5.23. Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri.....	69
Şekil 5.24. Anten Kazanç Grafiği.....	70
Şekil 5.25. Ön-Arka Işıma Oranı.....	70
Şekil 6.1. 0.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	72
Şekil 6.2. 1 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	72
Şekil 6.3. 1.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	73
Şekil 6.4. 2 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	73
Şekil 6.5. 2.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	73
Şekil 6.6. 3 GHz için Uzak Alan Örüntüsü .....	74
Şekil 6.7. Anten Kazancı Karşılaştırması .....	74
Şekil 6.8. Ön-Arka Işıma Oranı Karşılaştırması.....	75



## ÇİZELGELER

### Sayfa

Çizelge 4.1. İşaretli Noktaların Değerleri .....	25
Çizelge 4.2. Yansıtıcı Plaka Varken İşaretli Noktaların Değerleri .....	27
Çizelge 5.1. Tasarlanan Vivaldi Anteni Parametreleri .....	52
Çizelge 5.2. Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri ( $\phi = 0^\circ$ ) .....	55
Çizelge 5.3. Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri ( $\theta = 90^\circ$ ) .....	56
Çizelge 5.4. Anten Dizisinin Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri .....	63
Çizelge 5.5. 15 Elemanlı Anten Dizisinin Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri .....	67
Çizelge 5.6. Yansıtıcı Plakalı 8 Elemanlı Anten Dizisinin Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri .....	71

# 1. GİRİŞ

Uzaktan algılama teknolojisi olan Yere Nüfuz Eden Radar (YNR, Ground Penetrating Radar (GPR)) yerin altını, beton blokların ve asfalt zeminlerin içlerini görüntülemek için kullanılan önemli bir yöntemdir. YNR sisteminin çalışma prensibi; toprak altına gönderilen elektromanyetik dalgaların, toprağın içinden yansıyan işaretlerinin toplanması ve işlenerek yer altının görüntülenmesi şeklindedir. Bu sayede hedef cisme ait derinlik, şekil, boyut ve su yoğunluğu gibi bilgiler elde edilir.

Hedefler elektriksel ve geometrik yapılarına göre uzun, ince, küresel veya silindirik bir cisim ya da düzlemsel bir toprak katmanı şeklinde sınıflandırılabilir. Sistem performansı ortamın (toprak, asfalt, beton vs.) elektriksel kaybı ve gömülü cismin saçılma karakteristiği dikkate alınarak hesaplanan frekans bandı, verici gücü, anten kazancı, dinamik aralık gibi temel anten ve radar parametrelerine bağlıdır. Yazılım ve donanım birimlerinin kabiliyetleri bütün sistemin performansını belirler [1].

YNR teknolojisi; şehirlerin alt yapılarının araştırılması, tünellerin araştırılması, maden araştırmaları, yer altındaki boru ve kabloların tespit edilmesi, asfalt kontrol araştırmaları, arkeolojik araştırmalar, askeri alan araştırmaları gibi birçok araştırma alanında kullanılmaktadır [2]. YNR sistemlerinin özellikleri, kullanıldığı uygulamalarının özelliklerine göre farklılık göstermektedir.

Kullanım alanlarını biraz daha detaylandırmak gerekirse, yeraltının haritalanması çalışmaları kapsamında; yeraltındaki anomali kütesinin bulunması, karstik alanların haritalanmasında, metalik yada metalik olmayan (gaz boruları, atık boruları, telefon kabloları vb.) yapıların bulunması, yeraltında maden alanlarının haritalanmasında, yanal süreksizliklerin değişimlerinin belirlenmesinde, ana kaya derinliğinin belirlenmesinde, ırmak ve göl tabanlarının haritalanmasında, heyelan düzlemlerinin araştırılması ve haritalanmasında kullanılmaktadır [3].

Bir diğer kullanım alanı ise herhangi bir tahribata neden olmadığı için köprü ve tünel araştırmalarıdır. Bu kapsamda; yeni tünel ve köprülerin incelenmesinde, yapıların inşa edileceği zeminin uygunluğuna karar verilmesinde, yenileme çalışmalarında yapının son durumunun belirlenmesinde, kolonların ve bağlantı yerlerinin araştırılmasında kullanılmaktadır. Ayrıca tünel araştırmalarında, park ve garaj alanlarının belirlenmesinde, temel kalınlığı tespit çalışmalarında, beton ya da duvar arkalarındaki boşlukların yerlerinin belirlenmesinde ve beton kalınlıklarının ölçülmesinde kullanılmaktadır [3].

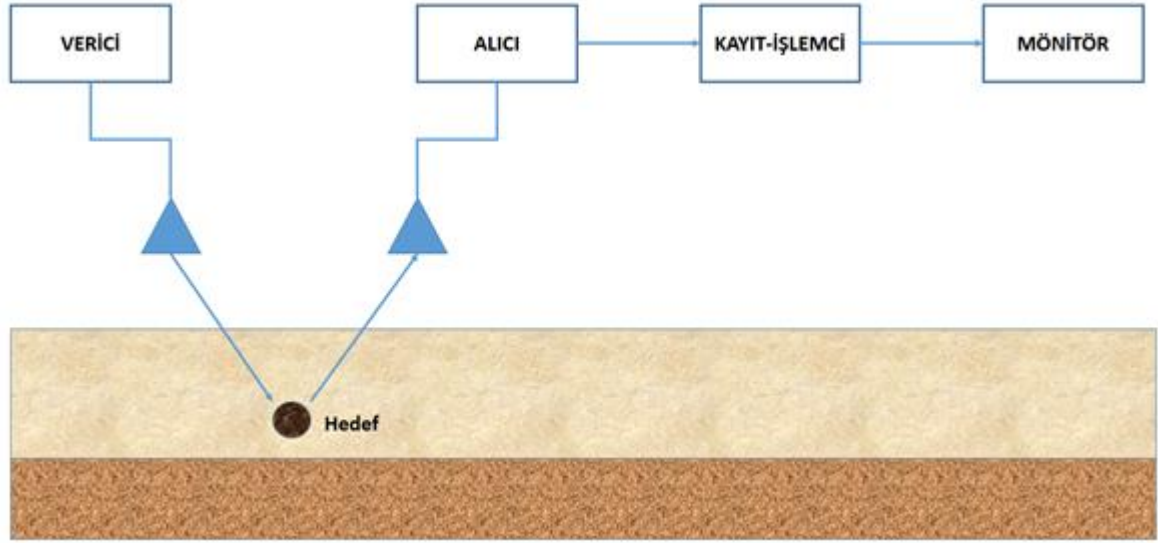
YNR sistemleri yol araştırmaları için de önemli bir hizmet sunmaktadır. Bu amaçla asfalt, beton vb. yapılardaki deformasyonların belirlenmesinde, yol vb. yapıların altındaki boşlukların belirlenmesinde, asfaltın kalite kontrolünde, asfalt ve beton kaldırımların kalınlıklarının haritalanmasında kullanılmaktadır [3].

Arkeolojik araştırmalarda da kullanılabilen YNR sistemleri eski medeniyetlere ait eşyaların ve yapıların yerlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca arkeolojik alan çalışmalarında kullanılmaktadır [3].

Önemli bir çalışma alanı olarak yapı analizi de sayılabilir. Bu kapsamda kolon ve kirişlerdeki demir donatının görüntülenmesinde, mevcut yapı temel tipinin belirlenmesinde ve kolon veya kirişlerdeki süreksizlik araştırmalarında kullanılmaktadır.

Son olarak YNR sistemleri çevre araştırmalarında kullanılmaktadır. Bu amaçla yeraltı kirlilik araştırmalarında, dolgu alanların ortaya çıkarılmasında ve atık alanların belirlenmesinde kullanılmaktadır.

YNR’de kaynak olarak yüksek frekanslı dalgalar (radyo dalgaları) kullanılmaktadır. Araştırma derinliğine göre frekans seçimi yapılmaktadır. Bir YNR sistemi verici-alıcı antenlerden ve kayıt-analiz cihazından oluşur. Verici anten elektromanyetik dalgayı yeraltına gönderir. Alıcı anten ise yeraltından yansıyan elektromanyetik dalgaları algılayarak kayıt-analiz cihazına iletir. Yeraltına gönderilen sinyal farklı yalıtkan özelliklere sahip cisimlere ulaşır ve bu cisim üzerinden saçılmaya ve yansımaya uğrar. Daha sonrasında yüzeyde konumlanmış alıcı anten ve kayıt-analiz cihazı ile kaydedilir. Gerekli olan veri işleme yöntemleri uygulandıktan sonra yeraltına ait radar görüntüsü elde edilmiş olur. Bu süreç Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 1.1.** YNR Çalışma Prensibi

Yere nüfuz eden radar ile ilgili literatüre girmiş bazı çalışmalardan bahsedilerek bu bölüme devam edilecektir. Gömülü nesnelere uzaktan algılama imkânı, insanlığı yüzyıllar boyu büyülemiştir. Zemin ve içeriğini net bir şekilde gösterebilecek tek bir teknik potansiyel olarak o kadar caziptir ki, insanlığı araştırma ve inceleme yöntemlerini tasarlamak için önemli bilimsel ve mühendislik çaba harcamıştır.

Tam bir cevap vermek için tek bir yöntem bulunmamakla birlikte; sismik, elektriksel direnç, indüklenmiş polarizasyon, yerçekimi ölçümü, manyetik ölçme, radyometrik, termografik ve elektromanyetik yöntemlerin hepsinin yararlı olduğu kanıtlanmıştır. En önemlisi YNR (Yere Nüfuz Eden Radar) özel olarak cazip bir seçenek olduğu tespit edilmiştir [4].

Metal nesnelere varlığını belirlemek için elektromanyetik sinyallerin ilk kullanımı Hülsmeier tarafından 1904 yılında gerçekleştirildiği düşünülse de, gömülü nesnelere yerlerinin belirlenmesi için bu sinyallerin tanımlanması Leimbach ve Lowy tarafından yapılmıştır. Bu iş için dipol antenler kullanarak, genlik karşılaştırması yapmışlardır. 1926'da Hülsenbeck'in gerçekleştirdiği çalışmalarda, gömülü nesnelere özelliklerini ve yapısını belirlemek için ilk kez darbeler halinde gönderilen elektromanyetik dalgaları kullanmıştır [5].

Elektromanyetik dalgaların darbeli şekilde kullanımını 1930'lu yıllardan itibaren buzda [6, 7], tatlı su, tuz yatakları [8], çöl kumu ve kaya oluşumları [9, 10] üzerinde önemli derinliklere kadar tarama aracı olarak geliştirilmiştir. Cook [11, 12] ve Roe ve Ellerbruch [13] tarafından

kaya ve kömür sondalanması da araştırılmış, ancak ikinci materyaldeki zayıflama birkaç metreyi aşan derinliklerinde çok olması nedeniyle pratik olmadığı anlaşılmıştır [14].

1970'lerden günümüze kadar, YNR'nin uygulama alanları istikrarlı bir şekilde artış göstermektedir. Günümüzde bina ve yapısal inceleme, arkeoloji, yol ve tünel kalite değerlendirmesi, boşlukların tespiti, boru ve kablo tespiti, uydu ile uzaktan algılama gibi alanlarda kullanılmaktadır [15].

Son zamanlarda aşırı geniş bantlı radar sistemlerine olan ilgi, uygun performans sağlayabilecek ek anten tasarımlarının geliştirilmesiyle artmış ve yüksek enerjili elektromanyetik darbelerin yayılması için çok fazla çalışma yapılmıştır [16].

Zeminin antenin yakınındaki etkisini değerlendirmek önemlidir. Genel olarak, çoğu durumda toprak ya da kaya olacak olan bu zemin kayıplı yalıtkan olarak kabul edilebilir ve bunun sonucunda oluşan yükleme efekti, antenin düşük frekans performansını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Hem kayıplı yalıtkanlarda hem de aşırı kayıplı yalıtkanlarda antenlerin davranışı Junkin ve Anderson [17], Brewitt-Taylor [18], Burke [19] ve Rutledge ve Muha [20] tarafından araştırılmıştır.

Aşırı geniş bantlı antenler, özellikle iki faktörden dolayı öne çıkmakta ve oldukça cazip hale gelmektedirler. Birincisi, yüksek haberleşme hızı, düşük güç tüketimi ve düşük maliyet gibi özellikleri aşırı geniş bantlı antenlerin giderek daha fazla talep görmesini sağlamaktadır. İkincisi, günümüzdeki cihazlar, çeşitli kablosuz iletim fonksiyonları için farklı frekanslarda çalışan antenlere ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden çalışma bantları ve fonksiyonları gittikçe artmakta, bu da anten alanı sınırlaması, çoklu anten girişimi gibi anten tasarımında zorluklarla sonuçlanabilmektedir. Birçok geniş bant anteni, anten sayısını etkili bir şekilde azaltabilen, çok dar bantlı antenlerin yerini almak için kullanılabilir. Bant genişliği; giriş empedansı, ışıma örüntüsü, kazanç, verim, vb. anten parametrelerinin arzu edildiği seviyede olan çalışma frekansı aralığıdır.

1898'de Oliver Lodge [21] ilk olarak küresel dipoller, kare plaka dipoller, üçgen veya papyon dipoller ve bikonik dipoller gibi aşırı geniş bantlı anten tasarımı kavramını tanıtmıştır.

Daha sonra, birkaç yıl içinde farklı tipte aşırı geniş bant anteni geliştirilmiştir. 1939'da P.S. Carter, geniş bant antenlerinin tasarımına yönelik en önemli adımlardan biri olan konik beslemeyi kullanarak Lodge'un orijinal tasarımını geliştirmiştir [22].

1940 yılında, S. A. Schelkunoff [23], küresel bir dipol anten geliştirmiştir. Ancak küresel dipol antenin tasarımı çok kullanışlı değildir. O zamanların en tanınmış aşırı geniş bantlı anteni, N. E. Lindenblad [24] tarafından tasarlanan koaksiyel boynuz antenidir.

1940'da J. C. Kraus [25] ayrıca Lindenblad'ın koaksiyel boynuz antenine benzer bir anten geliştirdi ve televizyon gelişiminin temel taşı olan bu antene yanardağ duman anteni adını vermiştir.

1947'de R. W. Masters [26], daha sonra elmas anteni olarak adlandırılan ters üçgen dipol benzeri benzer bir anten geliştirmiştir. W. Stohr [27], 1968'de elipsoidal monopol ve dipol antenlerini tanıtmıştır. P. J. Gibson, Vivaldi antenini [28] 1979'da tasarlamıştır.

Aşırı geniş bantlı anten için günümüzde en çok kullanılan örnekleri; Vivaldi anteni, Pacman anteni, yuvarlak papyon anteni, yarık papyon anteni, boynuz antenler olarak sıralanabilir. Bu tezde tasarlanan Vivaldi anten ile ilgili daha detaylı bilgi dördüncü bölümde verilmiştir.

Bu tez 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde teze giriş yapılmaktadır. Bu bölümde YNR sistemlerinden ve bu sistemlerin çalışma prensibinden, aşırı geniş bantlı antenlerden (UWB), aşırı geniş bantlı antenlerin tarihçesinden ve literatüre girmiş çalışmalardan bahsedilmiştir.

İkinci bölümde YNR sistemlerinin teorik altyapısından ve bir YNR sisteminin gereksinimlerinden bahsedilmiş ve Yere Nüfuz eden Radarlar için önemli bazı parametreler anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde YNR sistemlerinde kullanılan papyon antenleri, boynuz antenleri ve Vivaldi antenleri anlatılmıştır. Ayrıca bazı anten parametreleri anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde bu tez kapsamında tasarlanan Vivaldi anteninin analizi, anten dizisi oluşturma ve yansıtıcı plaka tasarımı verilmiştir. Vivaldi anten teorisi ve giriş empedansı, koçan yarıçapı, dairesel açıklık çapı, anten uzunluğu, anten genişliği, anten arkası uzunluğu, koniklik uzunluğu, koniklik oranı ve ağız açıklığı gibi Vivaldi anten parametreleri, anten dizisi oluşturmak için gerekli olan antenler arası mesafe ve anten sayısı parametreleri verilmiştir.

Beşinci bölümde tasarlanan Vivaldi anteni, anten dizisi ve yansıtıcı plakanın simülasyonları gösterilmiştir. Her bir tasarım için ışınma örüntüsü, kazanç ve ön-arka ışınma oranı grafikleri ve üretilen anten ile tasarlanan anten karşılaştırması verilmiştir.

Altıncı bölümde yapılan çalışmalar ve bunlardan elde edilen sonuçlar paylaşılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

## 2. YERE NÜFUZ EDEN RADAR (YNR) TEORİSİ

Bir YNR sisteminin başarılı bir şekilde çalışabilmesi için uygun bir sinyal kargaşa oranı, yeterli bir sinyal gürültü oranı, yeterli bir hedef çözünürlüğü ve derinlik çözünürlüğü olması gereklidir. Genel olarak bir YNR sisteminin blok diyagramı önceki bölümdeki Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Enerji kaynağı bir genlik, frekans veya faz modülasyonlu dalga sinyali olabilir. Bant genişliği, tekrarlama oranı ve ortalama gücün seçimi ise yol kaybı ve hedef boyutlarına bağlı olarak değişecektir. Alıcı ve verici anten genellikle aynı anten olacaktır ve üretilen dalga formunun özelliklerini karşılayacak şekilde seçilecektir. Alıcı anten, modülasyon tipi için uygun olmalı ve karşılaşılabilecek olan yol kayıpları için yeterli bir dinamik aralığa sahip olmalıdır.

YNR sisteminin menzil performansı; yol kaybı, hedefin yansıtıcılığı, kargaşa ve sistemin menzili gibi faktörler göz önünde bulundurularak elde edilebilir. Radar sisteminin mekansal çözümlemesi; derinlik ve plan çözümlemesi ayrı ayrı ele alınarak belirlenebilir.

YNR sistemlerinin çoğunluğu itki dalga formu kullanır. Yansıyan sinyal ise bir örnek alma alıcı anteni tarafından alınır. Son yıllarda FMCW (Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga) ve kademeli frekans radar modülasyonları daha fazla kullanılmaya başlanmıştır.

### 2.1. Menzil

Bir YNR menzili, esas olarak toplam yol kaybına bağlıdır ve bu yol kaybı malzeme kaybı, yayılma kaybı ve hedef yansıma kaybı veya saçılma kaybı olarak üç başlığa ayrılır. Verici antenden çıkan bir sinyal alıcı antene ulaşmaya belirli bir mesafe için toplam yol kaybı;

$$L_T = L_e + L_m + L_{t1} + L_{t2} + L_s + L_a + L_{sc} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. 2.1’de verilen denklemde  $L_T$  yol kaybı,  $L_e$  anten verimlilik kaybı,  $L_m$  anten uyumsuzluk kaybı,  $L_{t1}$  havadan zemine iletim kaybı,  $L_{t2}$  zeminden havaya iletim kaybı,  $L_s$  anten saçılma kaybı,  $L_a$  zeminin sönümlenme kaybı,  $L_{sc}$  hedefin saçılma kaybıdır ve aşağıda sırasıyla tanımlanmıştır [29].

$$L_e = 10 \log \left( \frac{P_{radiated}}{P_{input}} \right) \quad (2.2)$$

$$L_m = 10 \log \left( \frac{P_i}{P_i - P_r} \right) \quad (2.3)$$

$$L_{t1} = L_{t2} = 20 \log \left( \frac{4Z_m Z_a}{|Z_m + Z_a|^2} \right) \quad (2.4)$$

Burada  $P_{radiated}$  antenden yayılan güç,  $P_{input}$  antenin giriş gücü,  $P_i$  antene gelen güç,  $P_r$  antenden yansıyan güç,  $Z_a$  havanın karakteristik empedansı ( $377 \Omega$ ),  $Z_m$  zeminin karakteristik empedansıdır ve

$$Z_m = \left( \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right) \frac{1}{(1 + \tan^2 \delta)^{1/4}} \left( \cos \frac{\delta}{2} + j \sin \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\mu_0$  boş uzayın manyetik geçirgenliği,  $\mu_r$  bağlı manyetik geçirgenliği,  $\epsilon_0$  boş uzayın elektrik geçirgenliği,  $\epsilon_r$  bağlı elektrik geçirgenliği ve  $\delta$  zeminin kayıp faktörüdür.

$$L_s = 10 \log \left( \frac{G_t A_r \sigma}{(4\pi R^2)^2} \right) \quad (2.6)$$

$$L_a = 8.686 * 2 * R * 2 \pi f \sqrt{\left( \frac{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta}) - 1 \right)} \quad (2.7)$$

$$L_{sc} = 20 \log \left( 1 - \left| \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| \right) + 20 \log \sigma \quad (2.8)$$

Burada  $G_t$  verici antenin kazancı,  $A_r$  alıcı antenin etkin alanı ( $m^2$ ),  $\sigma$  radar kesit alanı ( $m^2$ ) ve  $R$  hedefin uzaklığı (m),  $\mu_0$  boş uzayın manyetik geçirgenliği,  $\mu_r$  bağlı manyetik geçirgenliği,  $\epsilon_0$  boş uzayın elektrik geçirgenliği,  $\epsilon_r$  bağlı elektrik geçirgenliği,  $\tan \delta$  zeminin kayıp tanjantı,  $R$  hedefin uzaklığı (m) ve  $f$  frekans (Hz),  $Z_1$  birinci katmanın karakteristik



empedansı,  $Z_2$  ikinci katmanın karakteristik empedansı ve  $\sigma$  hedefin radar kesit alanıdır ( $m^2$ ).

## 2.2. Yayılma Hızı

Yayılma hızı, radarın derinlik ya da kalınlık ölçüm sınırını belirler. Homojen ve izotropik malzemeler için, havaya göre bağıl yayılma hızı;

$$v_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ ms}^{-1} \quad (2.9)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada  $c$  ışık hızı ve  $\epsilon_r$  malzemenin dielektrik sabitidir. Derinlik ise;

$$d = v_r \frac{t}{2} \text{ m} \quad (2.10)$$

eşittir. Burada  $v_r$  havaya göre bağıl yayılma hızı ve  $t$  sinyalin hedefe gidip gelme zamanıdır. Pratikte bir ortamın bağıl geçirgenliği tam olarak bilinmemektedir. Bu sebeple yayılma hızını teorik olarak hesaplamak yerine sistemin kullanılacağı zeminde denemeler yapılarak yayılma hızı hesaplanmalıdır.

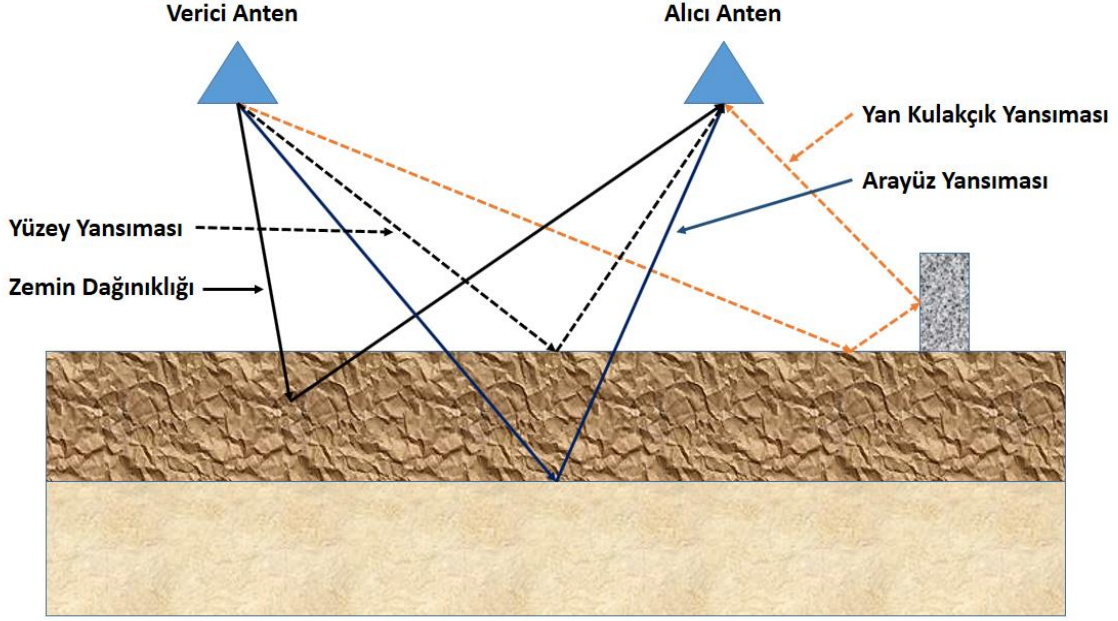
Yayılma hızı, bağıl elektrik geçirgenliğinin artmasıyla azalır. Dalga boyu ise yayılma hızıyla orantılı bir şekilde azalmaktadır. Dalga boyunun havaya göre bağıl hızı ve frekansa bağlı denklemi 2.11 numaralı denklemde verilmiştir.

$$\lambda_m = \frac{v_r}{f} \quad (2.11)$$

Yukarıda verilen denklemde  $\lambda_m$  dalga boyunu,  $f$  frekansı göstermektedir.

## 2.3. Kargaşa

Bir YNR'yi etkileyen kargaşa, hedeften yansıyan sinyallerle ilgisi olmayan, ancak aynı örnek zaman penceresinde ortaya çıkan ve hedeften yansıyan dalgalar ile benzer spektral özelliklere sahip olan sinyaller olarak tanımlanabilir. Kargaşa oluşumu Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Kargaşa Oluşumu

Kargaşa, anten ve zemin yüzeyi arasındaki çoklu yansımaların yanı sıra, gönderme ve alma antenleri arasındaki girişimden de kaynaklanabilir. Kargaşa, anten konfigürasyonunun türüne göre değişiklik gösterebilir.

Toprağın karakteristik empedansındaki kısmi değişimler ve zemin içindeki yansıma kaynakları dağınıklığa neden olabilir. Diğer taraftan, antenin yan kulakçıklarındaki, genellikle yer yüzeyinin üstündeki hedeflerden gelen yansımalar sorun yaratabilmektedir. Bu sorun, antenin yan ve arka hüzmeye ışınması zayıflatılarak giderilebilir.

#### **2.4. Derinlik Çözümlemesi**

Asfalt kalınlığı ölçümünde kullanılan bazı YNR uygulamaları mevcuttur. Bu radarlarda yayılma hızının tam olarak bilinmesi koşuluyla asfaltın kalınlığı tam olarak belirlenebilmektedir.

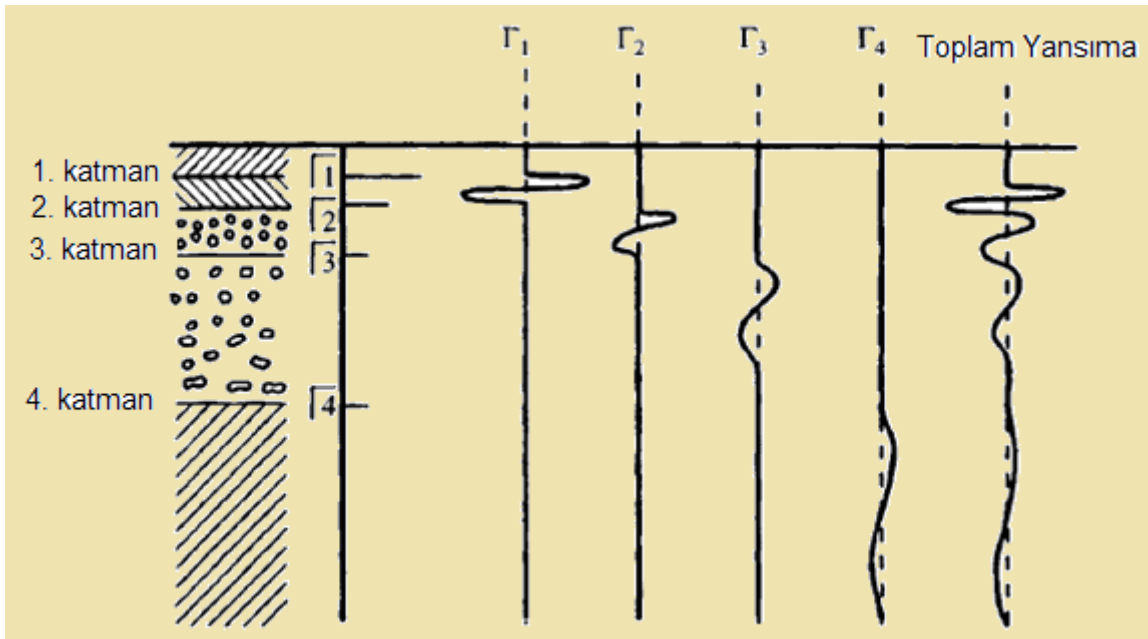
Bununla birlikte, gömülü boruların ve kabloların saptanması gibi bir durum söz konusu olduğunda, çeşitli hedefler arasında ayırım yapabilmek ve bir hedefin yapısını detaylı olarak gösterebilmek için daha büyük bir bant genişliğine sahip olan bir sinyale ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda, iletilen dalgadan ziyade alınan sinyalin bant genişliği daha önemlidir. Burada toprak alçak geçiren filtre görevi görür.

Malzemenin bağıl geçirgenliğine bağlı olarak 5 ile 10 cm arasında tipik bir çözünürlük sağlamak için 500 MHz ile 1 GHz arasında bir alıcı bant genişliği gereklidir [30]. Bunun için;

$$\Delta_z = \frac{v_r}{2BW} \quad (2.12)$$

denklemini kullanılır. Burada  $\Delta_z$  derinlik çözünürlüğü (m),  $v_r$  havaya göre bağıl yayılma hızı ve BW bant genişliğidir (Hz). Islak zeminlerde daha büyük derinlik çözümü elde edilse de, zeminin ıslak olması elektromanyetik dalgaların daha çok zayıflamasına neden olur. Çünkü ıslak zeminlerde elektromanyetik dalgalar elektrik akımı ürettiği için daha kolay soğurulmaktadır.

Katmanların bir yarım dalga boyundan daha yakın bulunduğu durumlarda, bir katmandan yansıyan sinyal, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, diğeriyle birleşecektir ve çözülmesi zorlaşacaktır. Bu gibi durumda, ara katmandan gelen sinyalleri tanımak ve bunların karakterize edilmesini ve izlenmesini sağlamak için birtakım dekonvolüsyon işlemi gerekli olacaktır.

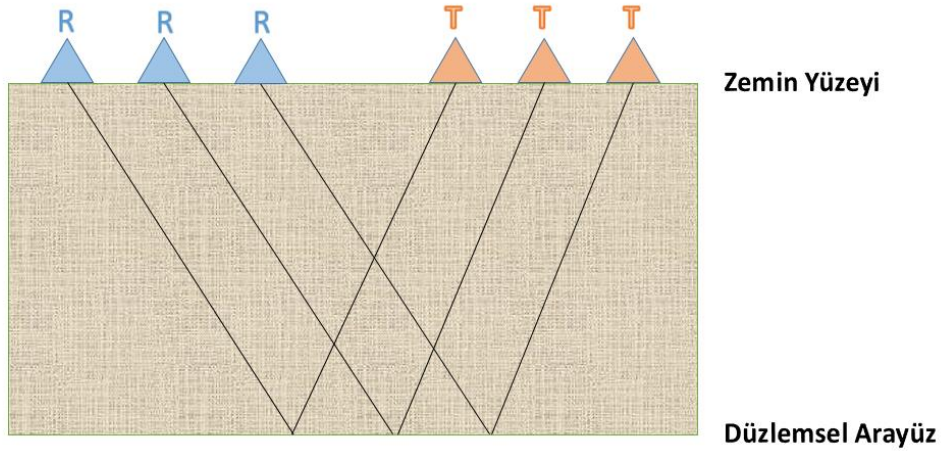


Şekil 2.2. Toplam Yansımaya [29]

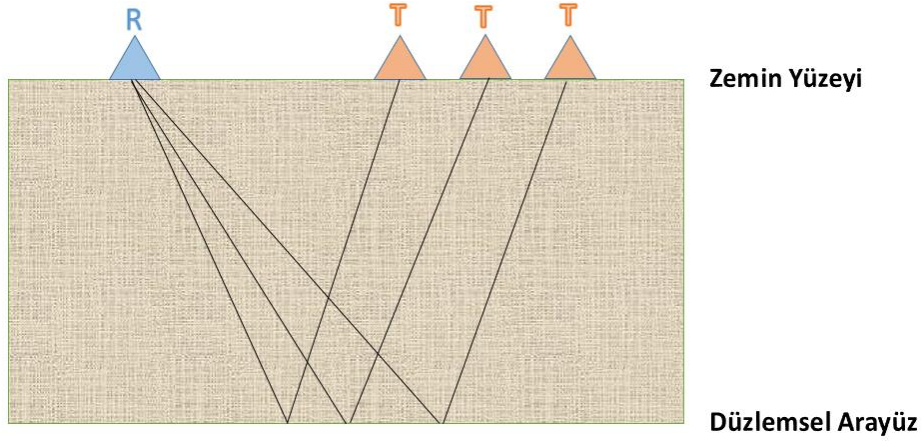
## 2.5. Plan Çözümlemesi

Yeraltı hedefleri araştırıldığında, aynı derinlikte birden fazla hedef varsa ve bunların arasında ayırım yapılması gerektiğinde, bir radar sisteminin plan çözümü önemlidir. Plan çözümü, antenin özellikleri ve kullanılan sinyal işleme ile tanımlanır. Kabul edilebilir bir plan çözümüne ulaşmak için yüksek kazançlı bir anten gereklidir. Bunun için antenin en düşük çalışma frekansında belirgin bir açıklığa sahip olması gerekir. Belirli bir uygulama için parametreler seçilirken plan çözümü, anten boyutu, sinyal işleme kapsamı ve nüfuz derinliği gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır.

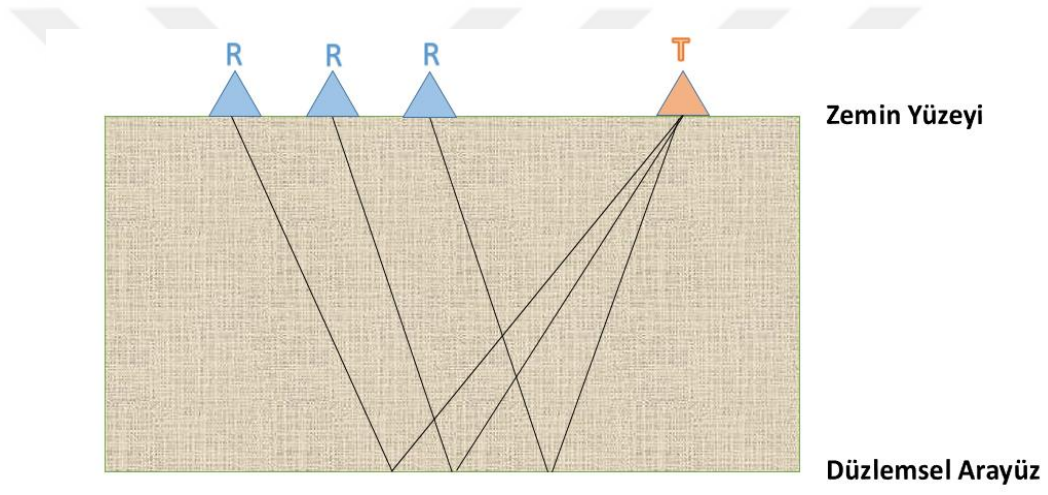
Genelde tek bir anten kullanan geleneksel radarlardan farklı olarak, çoğu YNR sistemi, bistatik mod olarak adlandırılan ayrı alıcı ve verici antenleri olan konfigürasyonu kullanır. Ayrı alıcı ve verici antene sahip YNR sistemleri dört ana moda sınıflandırmaktadırlar. Bunlar; ortak sapma modu, ortak kaynak modu, ortak alıcı modu ve ortak derinlik noktası modu olarak adlandırılırlar ve Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilmektedirler.



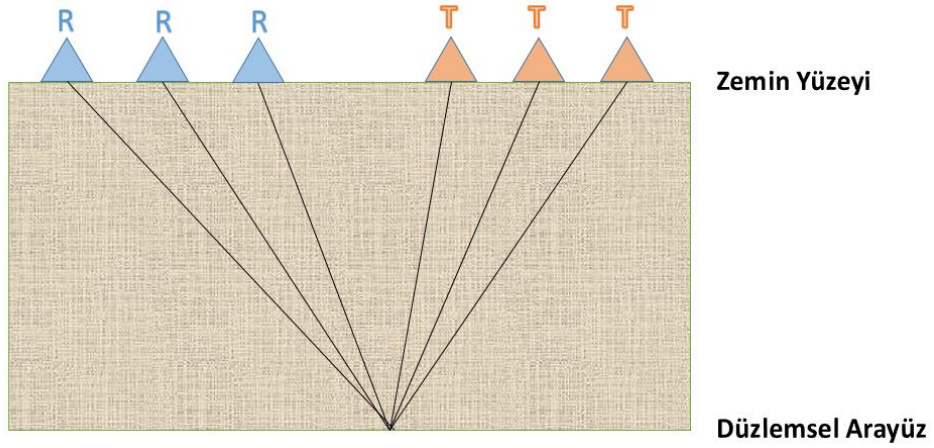
Şekil 2.3. Ortak Sapma Modu



Şekil 2.4. Ortak Kaynak Modu



Şekil 2.5. Ortak Alıcı Modu



Şekil 2.6. Ortak Derinlik Noktası Modu

YNR sistemlerinin çoğu, verici ve alıcı antenler arası mesafenin sabit olduğu ortak sapma modunu kullanır. Ortak sapma modunda, verici ve alıcı antenleri, Şekil 2.3’de gösterildiği gibi gömülü bir hedef üzerinde zemin yüzeyine paralel olarak taranır.

Bununla birlikte, YNR sistemlerinde ortak derinlik noktası modu, ortak kaynak modu ve ortak alıcı modu da kullanılmaktadır fakat bunların her biri için farklı sinyal işleme yöntemleri gerekmektedir.

## 2.6. Antenler Arası Mesafe

Çoğu YNR sistemi, tek bir anten kullansa da, iletme ve alma için ayrı antenlerin kullanımı da yaygındır. Anten aralığını değiştirmek, belirli hedefleri algılamak için sistemi optimize etmede kullanışlı bir yöntemdir. Anten saçılması, hava-toprak ara yüzünün kritik açısında en yüksek değerine ulaştığı için [31, 32] optimum anten ayrımı denklemi aşağıdaki gibidir.

$$s = \frac{2D}{\sqrt{K-1}} \quad (2.13)$$

Burada s antenler arası mesafe (m), D sistemin nüfuz ettiği derinlik (m) ve K zeminin bağlı elektrik geçirgenliğidir. Antenler arası mesafeyi arttırmak, düzlemsel hedeflerin yansıtıcılığını artırır, bu da hedeflerin daha kolay tespitine olanak sağlamaktadır. Bu denklemden güvenilir bir sonuç elde etmek için s değişkeni hedef derinliğinin %20’si olmalıdır. YNR uygulamalarında genelde küçük anten aralıkları kullanılır. Bu şekilde sistem daha küçük hale geldiği için taşınabilirliği artmakta ve daha kullanışlı olmaktadır.

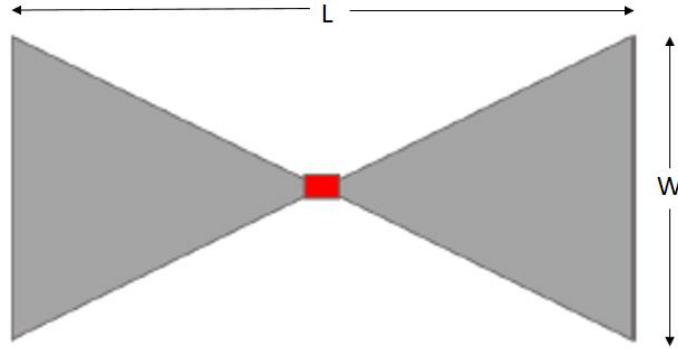
### 3. YERE NÜFUZ EDEN RADAR ANTENLERİ

#### 3.1. Anten Çeşitleri

Yere Nüfuz Eden Radar uygulamaları için bir dizi geniş bantlı anten tasarlanmıştır. Düşük frekans bandına dayanan çalışma esasen nüfuz derinliğini iyileştirmek için yapılırken, YNR sistemleri için daha iyi çözünürlükte görüntüleme sağlamak için yüksek frekans bandında tasarımlar yapılır. YNR sistemlerinde kullanılan antenlerin bir taraftan kazançları arttırılmaya çalışılırken, diğer taraftan bant genişliğini daha da arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır.

Bant genişliği ve kazanç gerekliliklerine dayanarak, YNR uygulamaları için papyon (bowtie) antenler, boynuz (horn) antenler ve Vivaldi antenler gibi farklı anten tipleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

YNR uygulamaları için tasarımda geniş bantlı papyon anteni yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çünkü papyon antenler yüksek kazanç değerlerine sahiptirler [33]. Şekil 3.1 ortak beslemeye bağlı basit bir papyon anten tasarımını göstermektedir.



Şekil 3.1. Papyon Anten

Papyon antenin eni ( $W$ ) ve boyu ( $L$ ) ile ilgili genelde kullanılan denklemler sırasıyla 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.

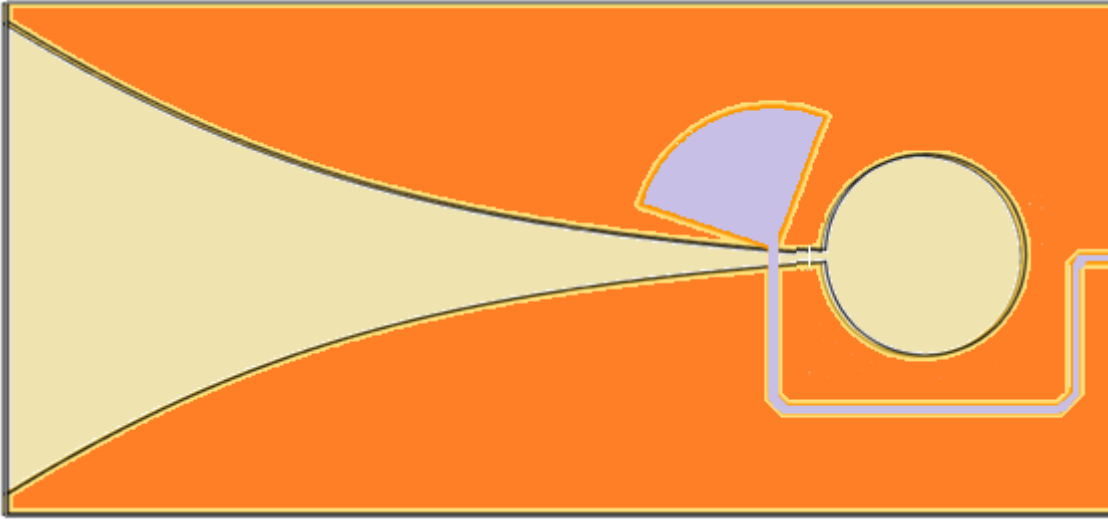
$$L = \frac{1.6\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1)$$

$$W = \frac{0.5\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

Bu denklemlerde  $\lambda_0$  en düşük çalışma frekansında boş uzaydaki dalga boyu,  $\epsilon_r$  kullanılan alttaşın dielektrik sabitidir [34].

Bir YNR sisteminde, daha iyi derinlik nüfuzu ve sığ hedeflerin kolayca taranabilmesi için genellikle büyük antenler gereklidir. Çünkü tespit yapılabilmesi için enerji zeminde yayılmalıdır. Bu sebeple yüksek kazanç değerlerine ve bant genişliğine sahip olması dolayısıyla boynuz antenler YNR sistemlerinde kullanılırlar.

Şekil 3.2'de Vivaldi antenin genel yapısı gösterilmiştir. Vivaldi anteni; yüksek verimliliğe, yüksek anten kazancına, geniş bant genişliğine ve basit geometriye sahip olması dolayısıyla önemli avantajlara sahiptir. Bu nedenlerle YNR sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar.



Şekil 3.2. Vivaldi Anteni

## 3.2. Bazı Anten Tanımları

### 3.2.1. Aşırı Geniş Bant

Aşırı geniş bant, sistemin -10 dB noktalarında ölçülen bant genişliğinin merkez frekansın % 20'sinden daha büyük olması anlamına gelmektedir. Dar bant ise sistemin -10 dB noktalarında ölçülen bant genişliğinin merkez frekansın % 1'inden az olması olarak tanımlanmaktadır. Eğer bir sistemin bant genişliği 500 MHz'den daha büyük ise bu sistem de Aşırı Geniş Bantlı olarak kabul edilir [35, 36, 37].



$$f_b = \frac{f_h - f_l}{f_c} \quad (3.5)$$

$$f_c = \frac{f_h + f_l}{2} \quad (3.6)$$

Bu denklemlerde  $f_b$  bant genişliği,  $f_l$  en düşük çalışma frekansı,  $f_h$  en yüksek çalışma frekansı ve  $f_c$  merkez frekansıdır.

### 3.2.2. Gerilim Yansıma Katsayısı

Gerilim Yansıma katsayısı:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $\Gamma$  gerilim yansıma katsayısı,  $Z_L$  yük empedansı ve  $Z_0$  iletim hattının karakteristik empedansıdır. Ayrıca gerilim yansıma katsayısı saçılma parametresi olan  $S_{11}$  şeklinde de gösterilmektedir.

### 3.2.3. Gerilim Duran Dalga Oranı

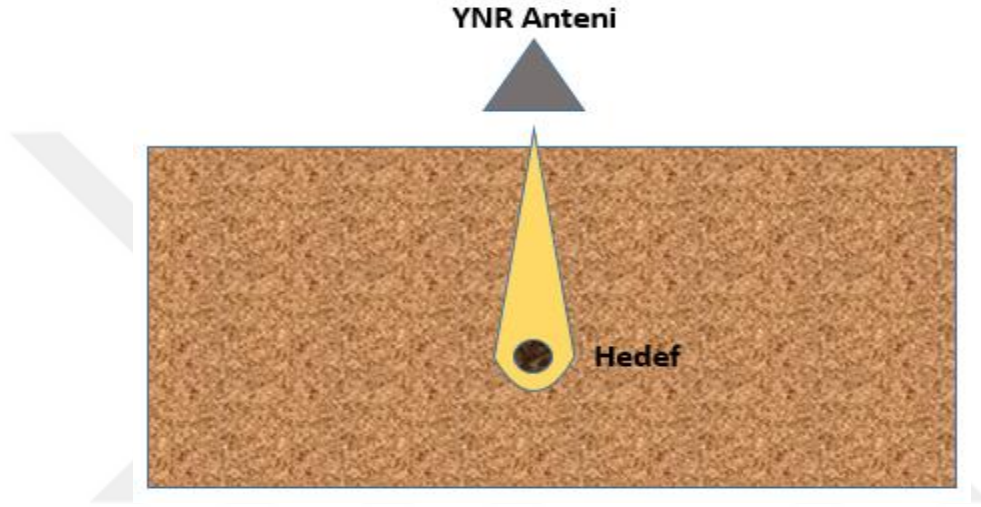
Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR), iki iletim hattının ne kadar iyi eşleştiğini hesaplamanın bir yoludur. Bu oran birden sonsuza kadar olan aralıktaki herhangi bir değeri alabilir. Gerilim duran dalga oranının bir olması iki iletim hattının mükemmel şekilde eşleşmesi anlamına gelir. Anten tasarımı ile ilgili olarak, mümkün olduğunca düşük bir Gerilim Duran Dalga Oranı istenir çünkü yük ve anten arasındaki herhangi bir yansıma antenin etkinliğini azaltacaktır. Gerilim Duran Dalga Oranı;

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (3.8)$$

denkleminde tanımlanır. Burada  $\Gamma$  eşitlik 3.7’de verilen gerilim yansıma katsayısıdır.

### 3.2.4. Işıma Örüntüsü

Işıma örüntüsü, antenin gücünün ne kadar yönlü yayıldığını gösterir, bu parametre, anten çevresinde yayılan 3 boyutlu uzak alan olarak ölçülür. YNR uygulamaları için gerekli olan ışırma örüntüsü tek yönlü olmalıdır. Bu durum yayılan gücün antenin etrafına düzgün yayılmak yerine dar bir hüzme şeklinde daha fazla odaklanması gerektiği anlamına gelir. Şekil 3.3'te YNR anteninin yönlülüğü gösterilmektedir.



Şekil 3.3. YNR Anteninin Yönlülüğü

### 3.2.5. Işıma Verimi

Bir antenin ışırma verimliliği  $\eta$ , anten tarafından yayılan toplam gücün, ışırma sırasında giriş terminallerindeki anten tarafından alınan net güce oranı olarak tanımlanmaktadır [38].

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad (3.9)$$

Burada  $P_r$  gönderilen toplam güç,  $P_a$  alınan net güçtür.

### 3.2.6. Anten Kazancı

Bir antenin performansını açıklayan bir başka yararlı parametre ise anten kazancıdır. Antenin kazancı doğrudan yönlülük ile ilgili olsa da, antenin verimliliğini ve yönlendirme yeteneklerini hesaba katan bir ölçektir.

$$G = 4\pi \frac{\text{Işıma Şiddeti}}{\text{Toplam Giriş Gücü}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (3.10)$$

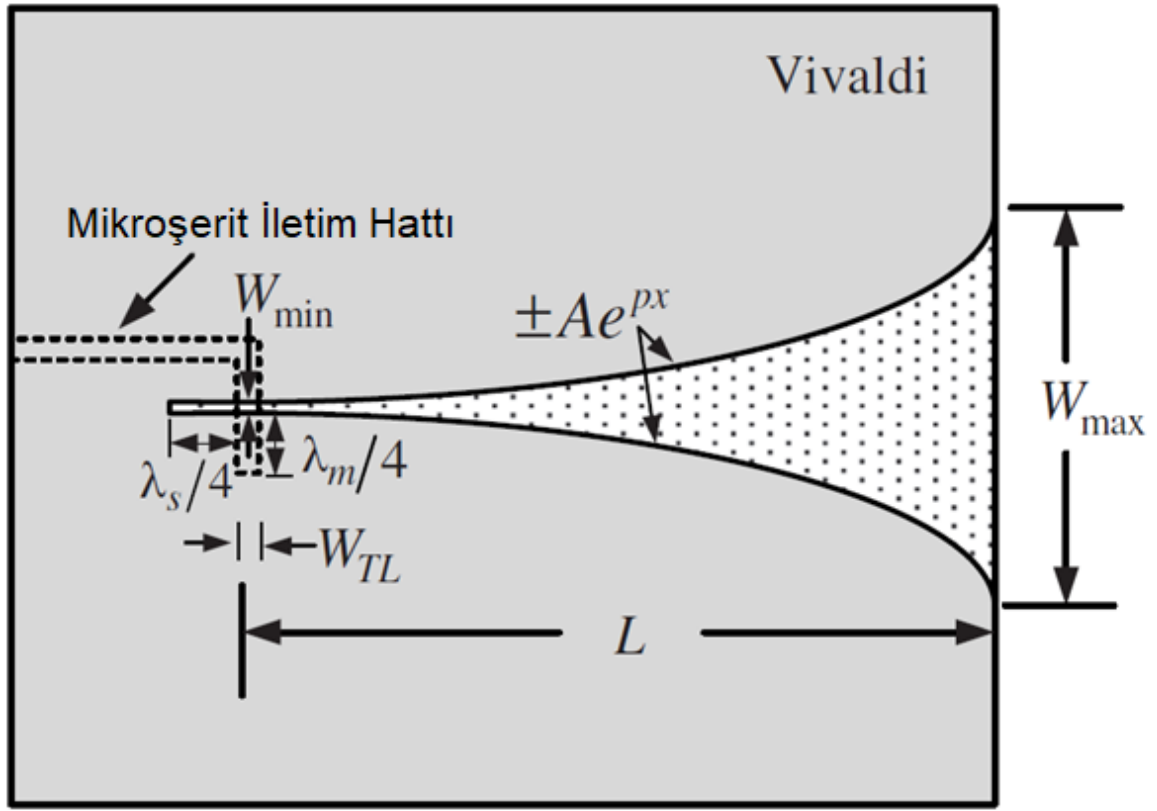
Bir antenin (belirli bir yönde) kazancı, antene verilen gücün izotropik olarak yayılması durumunda elde edilecek olan yoğunluğun, belirli bir yönde, ışıma şiddetine oranı olarak tanımlanır.



## 4. VİVALDİ ANTEN ANALİZİ

### 4.1. Tek Anten Teorisi ve Analizi

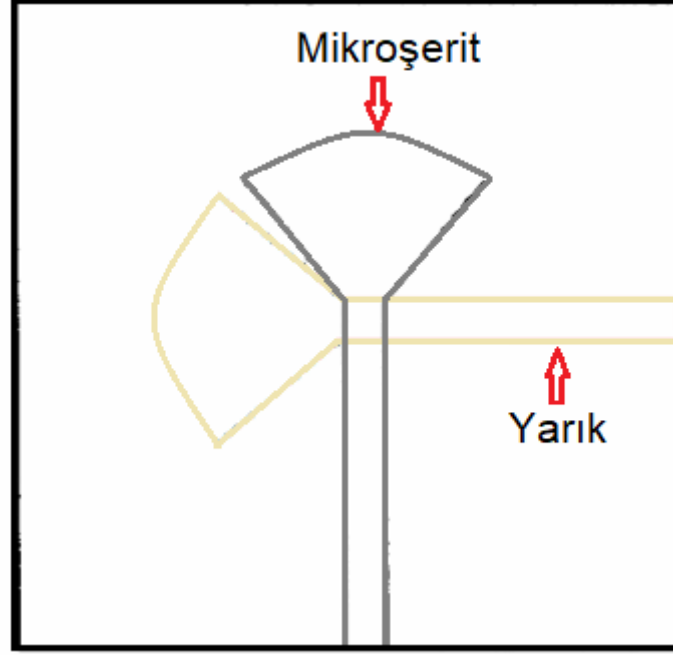
Vivaldi anteni geniş bantlı bir anten örneğidir. Gibson [28] tarafından ilk kez sunulduğunda, tasarlanmış olduğu Vivaldi anten 10 dB'lik bir kazanç ve -20 dB'lik yan kulakçıklarla 2 GHz'den 40 GHz'e kadar bir bant genişliği göstermekteydi. Daha sonraki geniş bant uygulamalarında, Vivaldi anten geometrisini kullanılarak anten dizileri tasarlanmıştır [39, 40]. Vivaldi antenin temel geometrisi ve bazı parametreleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Vivaldi Anteni Parametreleri [41]

Üstel olarak kıvrılmış  $L$  uzunluğundaki bir yapıya  $\lambda_s/4$  uzunluğundaki bir yuvanın bağdaştırılmasıyla antenin üst kısmı oluşur. Antenin üst tabakasında yer alan yuva alttaşın alt yüzeyinden bir mikroşerit iletim hattı tarafından uyarılır. Alt yüzeyde yer alan yuvanın uzunluğu ise  $\lambda_m/4$  kadardır. Burada  $\lambda_m$  ve  $\lambda_s$  merkez frekanstaki (1750 MHz) dalga boylarıdır.

Alternatif bir tasarım olarak, genellikle bir mikroşerit çizgisi tarafından uyarılan  $\lambda_s/4$  uzunluğundaki yuva yerine, tipik olarak kare veya dairesel olan bir koçanın kullanılmasıdır. Koçan üstel olarak kıvrılmış koniklik uzunluğuna bağlanır. Dairesel koçan Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Dairesel Koçan

Vivaldi antenler yüksek kazanç, geniş bant performansı, sabit hüzmeye genişliği ve düşük yan kulakçık seviyesi gibi ışınma özelliklerine sahiptir. Bu antenlerinin yönlülüğü, antenin uzunluğu olan L parametresi arttıkça artar ve 17 dB’ye varan kazanç sağlarlar [42].

Vivaldi antenleri geniş bant veya frekans bağımsız antenler olarak kategorize edilebilirler. Bant genişliği 6:1’e kadardır [17]; VSWR<2 ( $S_{11}<-10$  dB) için 10: 1 veya daha büyük oranlara sahiptir. Anten dizileri için, ışınma örüntüsünün ana hüzmeye  $\cos(\theta)$  ile neredeyse orantılıdır ve temel olarak  $50^\circ - 60^\circ$  ‘ye kadar tarama açılarına sahiptirler [42].

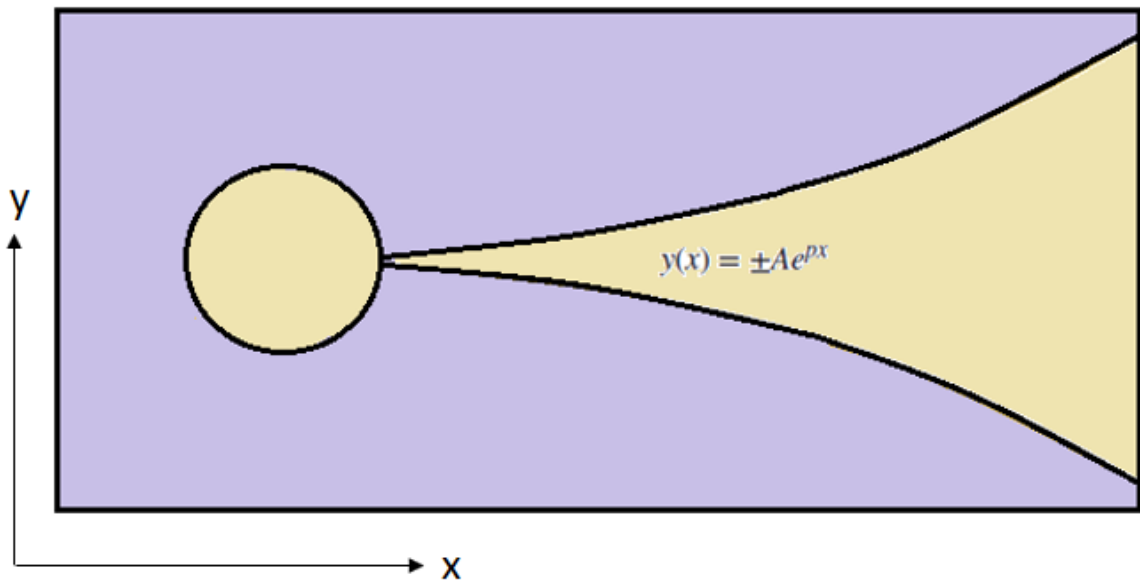
Bant genişliği, mikroşerit çizgisi ve antenin yarık çizgisi arasındaki geçiş ile sınırlıdır [43]. Bu geçişin uygun tasarımı, anten performansına uyumlu bir geniş bant performansı sağlar [44]. Uygun bir geçiş için  $\lambda_m/4$  uzunluğundaki bir mikroşerit ile  $\lambda_s/4$  uzunluğundaki bir yarık çizgisine ihtiyaç duyulmaktadır.

Vivaldi anten tasarımında düzlemsel dalga kılavuzu beslemesi de kullanılabilir ve bu tasarım da yine geniş bir bant genişliği sağlamaktadır. Vivaldi antenlerde tüm bant genişliği

boyunca, hüzme genişliği neredeyse sabittir [44]. Ayrıca, Vivaldi antenler simetrik ışınma sergilerler [45]; diğer bir deyişle, hüzme genişliği, hem E düzleminde (alttaşa paralel) hem de H düzleminde (alttaşa dik) yaklaşık olarak aynıdır. Antenin uzunluğu arttıkça, hüzme genişliği daralmaktadır [38].

Şekil 4.3'te görülebileceği gibi anten, bir alttaş tarafından desteklenen ince bir metal filmdeki üstel yarıkta oluşur. Üstel yarık aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir [28].

$$y(x) = \pm Ae^{px} \quad (4.1)$$



Şekil 4.3. Üstel Yarık

Bu denklemde  $y$  ağız açıklığı olan  $W_{max}$ 'ın yarısını ve  $x$  antenin koniklik uzunluğunu,  $A$  boğaz genişliği olan  $W_{min}$ 'in yarısını ve  $p$  ise koniklik oranını ifade eder. Geniş bant uygulamaları için, koniklik oranı  $p$  ve kare ya da dairesel koçan arasında bir uyum gereklidir [40].

Koniklik oranı, antenin bant genişliği ve hüzme genişliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genel olarak, koniklik oranı arttıkça, E-düzlemindeki hüzme genişliği artmakta, H-düzlemindeki hüzme genişliği azalmakta ve bant genişliği artmaktadır.

Parametrik çalışmalar, koniklik uzunluğunun en düşük frekansta bir dalga boyunun yarısından daha büyük olduğu zaman optimal performansın elde edildiğini göstermiştir.  $W_{max}$  olarak ifade edilen ağız açıklığı parametresi düşük frekans etkiler [28]. Ayrıca,  $W_{max}$

ağız açıklığının değeri, parametrik incelemelere dayalı olarak,  $W_{max1}$  ve  $W_{max2}$  aralığında olmalıdır.

$$W_{max1} \approx \lambda_0 \quad (4.2)$$

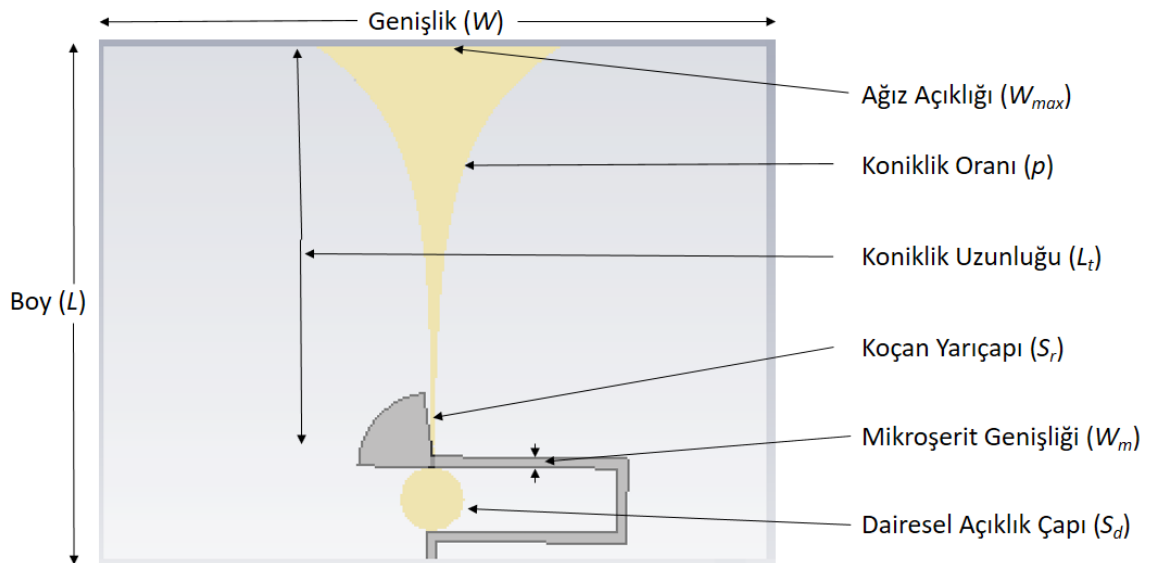
$$W_{max2} \approx \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (4.3)$$

Diğer bir ifade ile  $W_{max1} < W_{max} < W_{max2}$  bağıntısı sağlanıyor olmalıdır. Burada  $\lambda_{min}$  minimum frekanstaki (500 MHz) dalga boyu ve  $\lambda_0$  ise merkez frekanstaki (1750 MHz) dalga boyudur [42].

Bu bölümün geri kalanında belirli teknik özelliklere sahip bir antenin tasarımı ile ilgili Vivaldi antenlerinin parametrik çalışması yapılacak ve simülasyon kullanılarak elde edilen sonuçlar neticesinde tasarlanacak olan antenin parametreleri belirlenecektir. Simülasyon için CST – Computer Simulation Technology kullanılacaktır. Bu bölümde tasarlanacak anten için;

- 0.5 - 3 GHz frekans bant genişliği
- -10 dB veya daha küçük geri dönüş kaybı
- 50 Ohm'luk karakteristik empedans

özellikleri göz önünde bulundurulacaktır. Şekil 4.4'te tasarlanan Vivaldi anten ve parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.4. Tasarlanan Vivaldi Anten ve Parametreleri

#### 4.1.1. Giriş Empedansı

Antenin giriş empedansı alttaş tipine, alttaş kalınlığına ve mikroşeritin genişliğine bağlıdır. Uygun dielektrik sabiti ve tanjant kaybına sahip bir alttaş malzemesinin seçilmesi tasarımın en önemli adımlarından biridir. Çünkü dielektrik sabiti ve alttaş kalınlığı, dalgaların faz hızını belirler. Sabit anten empedansı elde etmek ve empedans uyumu gerçekleştirmek için dielektrik sabiti havadan daha büyük olan bir alttaş malzemesi kullanılmalıdır.

Dielektrik sabiti ve alttaş kalınlığı hüzmeye genişliği, yan kulakçık seviyesi ve antenin kazancı gibi performans ve ışınım örüntülerini belirleyen parametrelerdir. Daha yüksek dielektrik sabitine sahip alttaşlar, aynı performans için daha küçük anten boyutlarına sahip antenlerin tasarlanmasına olanak sağlar. Bununla birlikte, düşük dielektrik sabitine sahip alttaşlar daha verimli bir tasarım ve daha geniş bir bant genişliğini mümkün kılmaktadır.

Antenin performansı, daha önce belirtildiği gibi, alttaş kalınlığına da bağlıdır. Alttaş kalınlığının artması, daha yüksek anten kazancına, ana hüzmeye daralmaya ve yan kulakçıklarda artışa neden olur. Ancak herhangi bir değişiklik (alttaş kalınlığında artış / azalma) bant genişliğini önemli ölçüde etkilemez.

Giriş empedansını etkileyen bir diğer önemli parametrede mikroşeritin genişliğidir. Aşağıdaki denklemler kullanılarak mikroşeritin genişliği hesaplanabilir.

$\left(\frac{W}{H}\right) < 1$  ise;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12\left(\frac{H}{W}\right)}} + 0.04\left(1 - \left(\frac{H}{W}\right)\right)^2 \right] \quad (4.4)$$

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left( 8 \left( \frac{H}{W} \right) + 0.25 \left( \frac{W}{H} \right) \right) \quad (4.5)$$

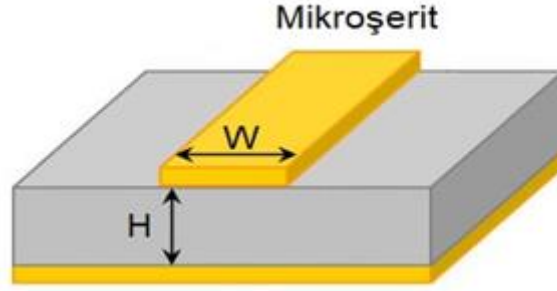
$\left(\frac{W}{H}\right) > 1$  ise;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \left[ \frac{\varepsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 12\left(\frac{H}{W}\right)}} \right] \quad (4.6)$$



$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{W}{H} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left( \frac{W}{H} + 1.444 \right) \right]} \quad (4.7)$$

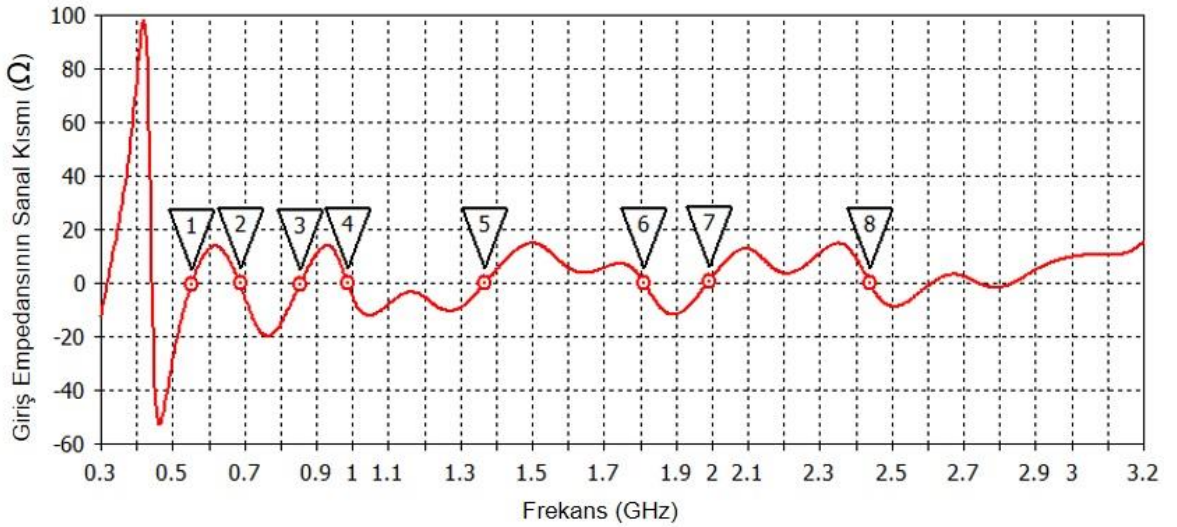
Bu denklemlerde  $W$  mikroşeritin genişliğini,  $H$  alttaşın kalınlığını,  $\epsilon_{eff}$  etkin dielektrik katsayısını,  $\epsilon_r$  alttaşın dielektrik katsayısını ve  $Z_c$  karakteristik empedansı ifade etmektedir. Şekil 4.5'te ilgili parametreler verilmiştir.



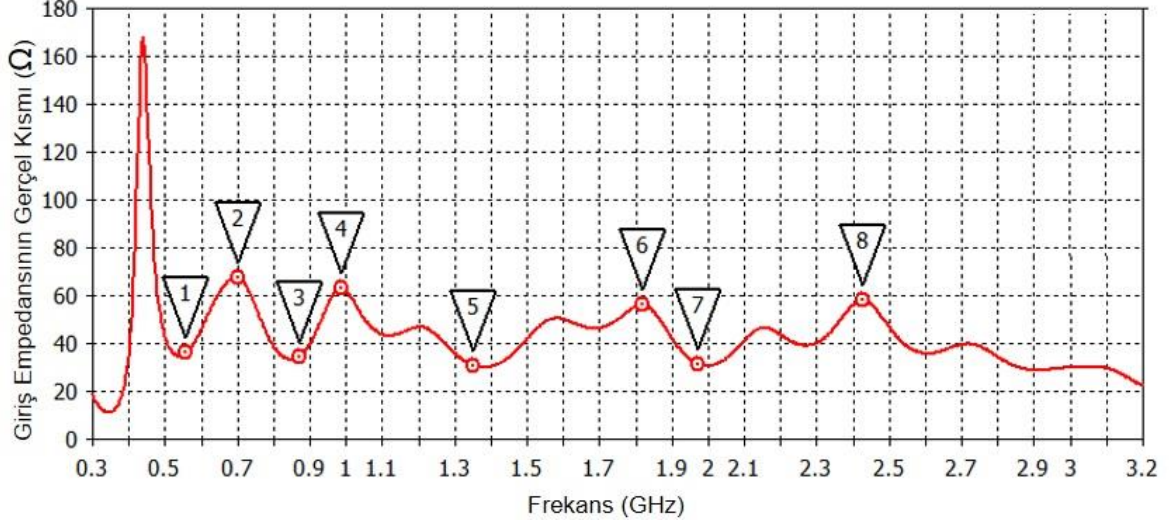
Şekil 4.5. Alttaş Parametreleri

Tasarlanacak olan Vivaldi anteninde 1.6 mm kalınlığında FR-4 alttaşı kullanılacaktır. FR-4 için  $\epsilon_r = 4.3$ 'tür.

Şekil 4.6'da giriş empedansının sanal kısımlarında işaretlenen sıfır noktalarının Şekil 4.7'de giriş empedansının gerçel kısmına karşılık gelen noktalar gösterilmiştir. Gerçel kısımdaki işaretli noktaların değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Giriş Empedansının Sanal Kısmı

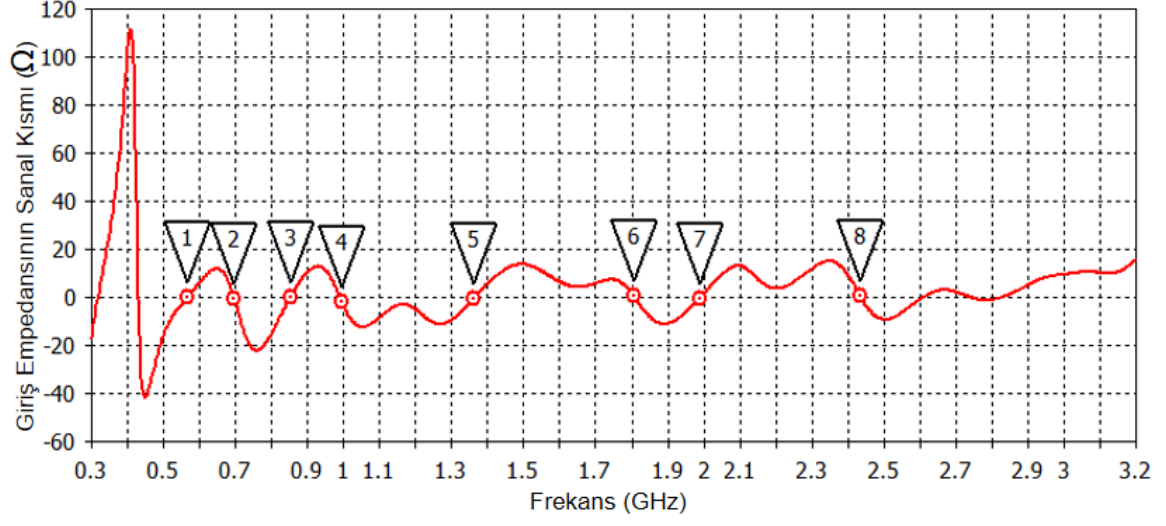


Şekil 4.7. Giriş Empedansının Gerçel Kısmı

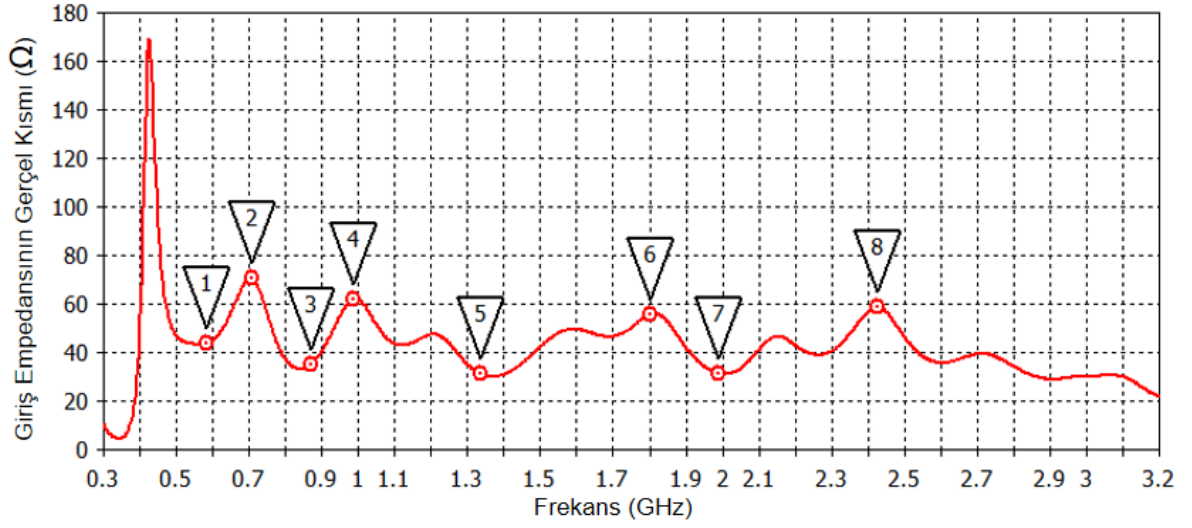
Çizelge 4.1. İşaretli Noktaların Değerleri

İşaretlenen Nokta	Frekans (GHz)	Sanal Kısmı (Ω)	Gerçel Kısmı (Ω)
1	0.56	0	36
2	0.7	0	68
3	0.87	0	35
4	0.99	0	63
5	1.34	0	33
6	1.82	0	56
7	1.98	0	33
8	2.43	0	58

Şekil 4.8’de tasarlanan antenin arkasına yansıtıcı plaka yerleştirildiğinde giriş empedansının sanal kısımlarında işaretlenen sıfır noktalarının Şekil 4.9’da giriş empedansının gerçel kısmına karşılık gelen noktalar gösterilmiştir. Gerçel kısımdaki işaretli noktaların değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Yansıtıcı Plaka Varken Giriş Empedansının Sanal Kısmı



Şekil 4.9. Yansıtıcı Plaka Varken Giriş Empedansının Gerçek Kısmı

**Çizelge 4.2.** Yansıtıcı Plaka Varken İşaretli Noktaların Değerleri

İşaretlenen Nokta	Frekans (GHz)	Sanal Kısım ( $\Omega$ )	Gerçel Kısım ( $\Omega$ )
1	0.58	0	44
2	0.71	0	71
3	0.87	0	35
4	0.99	0	62
5	1.34	0	31
6	1.80	0	56
7	1.99	0	33
8	2.43	0	59

Çizelge 4.1'deki değerlerin ortalamaları alındığında yaklaşık olarak 47.5  $\Omega$ 'luk giriş empedansı değeri elde edilmektedir. Tasarlanan antenin arkasına yansıtıcı plaka konulduğunda elde edilen değerler Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Bu değerlerin ortalaması alındığında ise yaklaşık olarak 49  $\Omega$ 'luk giriş empedansı değeri elde edilmektedir. Bu sebeple giriş empedansı olarak 50  $\Omega$  kullanılabilir. 50  $\Omega$ 'luk giriş empedansı elde etmek için  $\left(\frac{W}{H}\right) < 1$  durumu için 4.4 ve 4.5'teki eşitlikler kullanılır. Ancak bu eşitliklerden sonuç elde edilemez.

$\left(\frac{W}{H}\right) > 1$  koşulu için ise 4.6 ve 4.7'de verilen denklemler kullanılır.  $W = 3.11$  mm için;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{4.3 + 1}{2} + \left[ \frac{4.3 - 1}{\sqrt{1 + 12\left(\frac{1.6}{3.11}\right)}} \right] = 3.27$$

bulunur. Bu değer 4.7'teki eşitlikte yerine konulursa;

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{3.27} \left[ \frac{3.11}{1.6} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left( \frac{3.11}{1.6} + 1.444 \right) \right]} = 50$$

bulunur. Sonuç olarak anten tasarımında mikroşerit genişliği olarak 3.11 mm değeri kullanılacaktır.

#### 4.1.2. Koçan Yarıçapı ( $S_r$ ) ve Dairesel Açıklık Çapı ( $S_d$ )

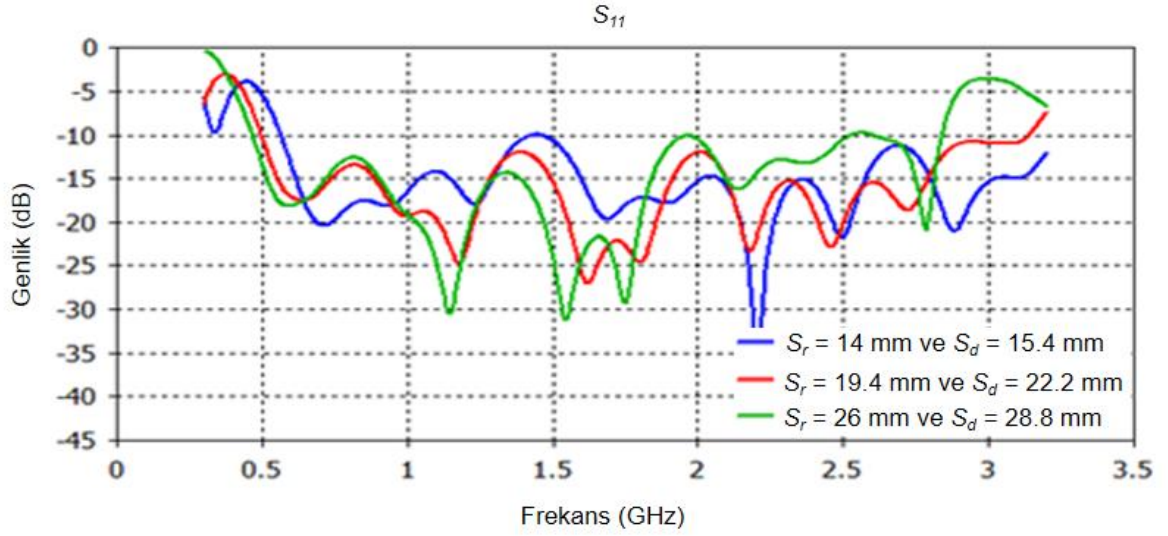
Koçan yarıçapı ve dairesel açıklık çapı parametreleri mikroşerit hattan antenin üst yüzeyindeki yarığa geçişi etkileyen en önemli parametrelerdir. Bölüm 4.1’de anlatıldığı gibi koçan yarıçapı ve dairesel açıklık çapı parametreleri merkez frekanstaki dalga boyunun  $\frac{1}{4}$ ’üne eşit olmalıdır.

$$f_c = \frac{f_l + f_h}{2} \quad (4.8)$$

4.8’de verilen denklemde  $f_c$  merkez frekansı,  $f_l$  en düşük çalışma frekansını ve  $f_h$  en yüksek çalışma frekansını ifade etmektedir.  $f_l = 0.5 \text{ GHz}$  ve  $f_h = 3 \text{ GHz}$  için  $f_c = 1.75 \text{ GHz}$  olarak bulunur. Merkez frekanstaki dalga boyu ise 4.9’daki denklem ile bulunur.

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.9)$$

4.9’da verilen denklemde  $\lambda$  dalga boyunu,  $c$  ışık hızını,  $f$  frekansı ve  $\epsilon_r$  alttaşın dielektrik sabitini ifade etmektedir. Değerler yerine konulup merkez frekanstaki dalga boyu bulunursa 84 mm bulunur. Sonuç olarak koçan yarıçapı ve dairesel açıklık çapı yaklaşık olarak 21 mm olacaktır. 3 farklı durum için geri dönüş kaybı Şekil 4.10’da verilmiştir.

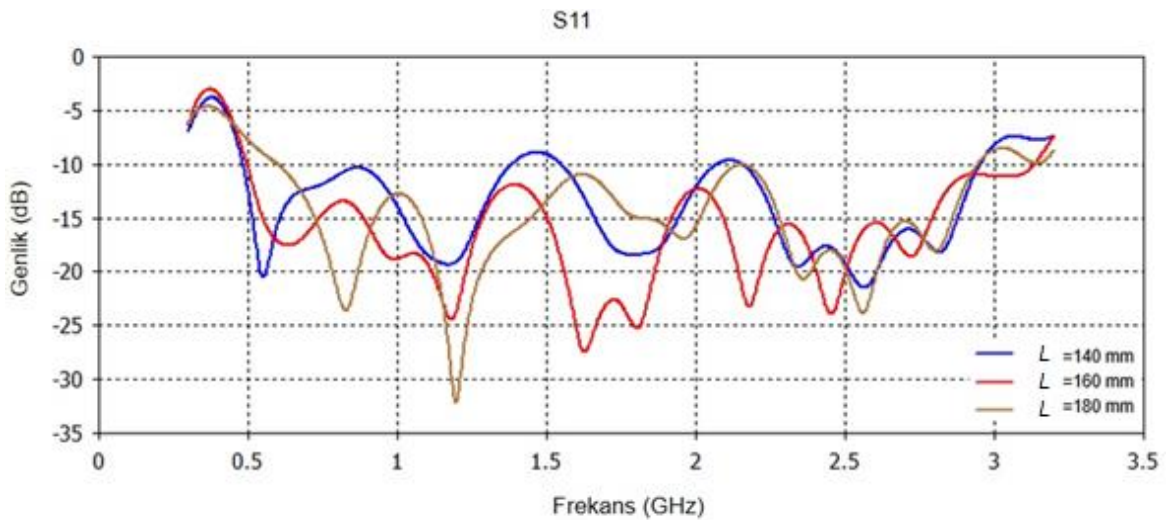


**Şekil 4.10.** Koçan Yarıçapı ve Dairesel Açıklık Çapı için Geri Dönüş Kaybı Grafiği  
Grafik incelendiğinde en iyi sonucu  $S_r = 19.4$  mm ve  $S_d = 22.2$  mm değerlerinde verdiği görülmektedir. Bu sebeple tasarlanacak olan antende bu değerler kullanılacaktır.

#### 4.1.3. Anten Uzunluğu ( $L$ )

Anten uzunluğu parametresi, antenin en düşük çalışma frekansı ve bant genişliği üzerinde etkilidir. Anten uzunluğundaki artış, daha geniş bir bant genişliği sağlamaktadır.

Bununla birlikte, bant genişliği ve kazanç gereksinimlerini sağlayan küçük anten boyunun seçilmesi, antenin kullanımını kolaylaştıracaktır. Şekil 4.11'de farklı anten uzunlukları için geri dönüş kaybı grafiği verilmiştir.



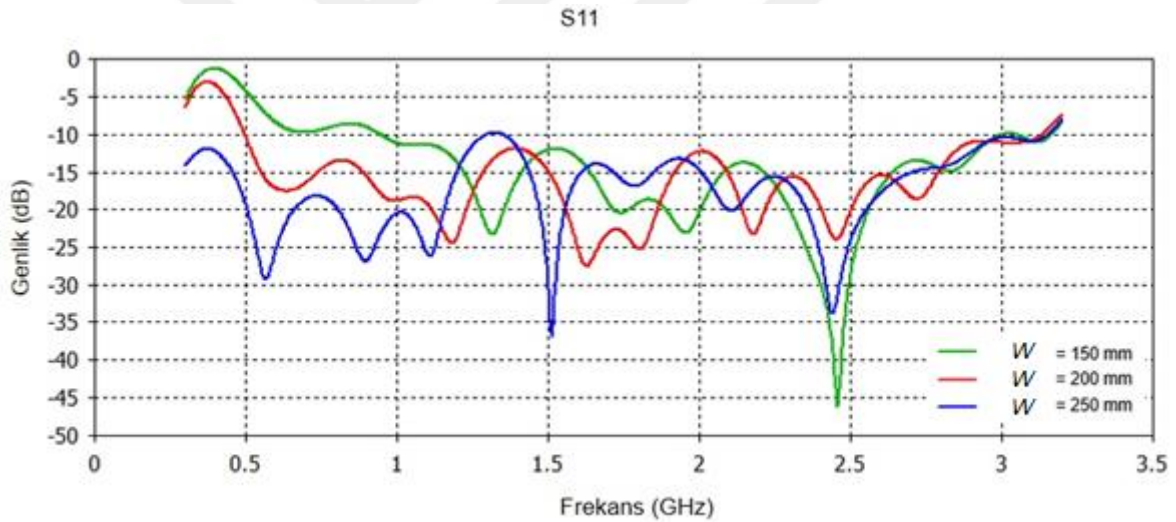
**Şekil 4.11.** Farklı Anten Boyları için Geri Dönüş Kaybı

Bant genişliği göz önünde bulundurulduğunda anten boyu için 160 mm'de en iyi bant genişliği elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle tasarlanacak olan antende anten boyu için 160 mm değeri kullanılacaktır.

#### 4.1.4. Anten Genişliği ( $W$ )

Anten genişliği; istenilen bant genişliğinin ve ışıma örüntüsünün sağlanabilmesi için en düşük çalışma frekansındaki dalga boyunun yarısından büyük olmalıdır. 4.9'da verilen denklem kullanılarak en düşük çalışma frekansındaki dalga boyu 290 mm'dir.

Anten genişliği 500 MHz'deki dalga boyunun yarısından büyük olacağı için  $W > 145$  mm koşulu sağlanmalıdır. Bu değer altındaki anten genişliği, en düşük çalışma frekansını azaltarak anten bant genişliğini önemli ölçüde azaltır. Şekil 4.12'de farklı anten genişlikleri için geri dönüş kaybı grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.12.** Farklı Anten Genişlikleri için Geri Dönüş Kaybı

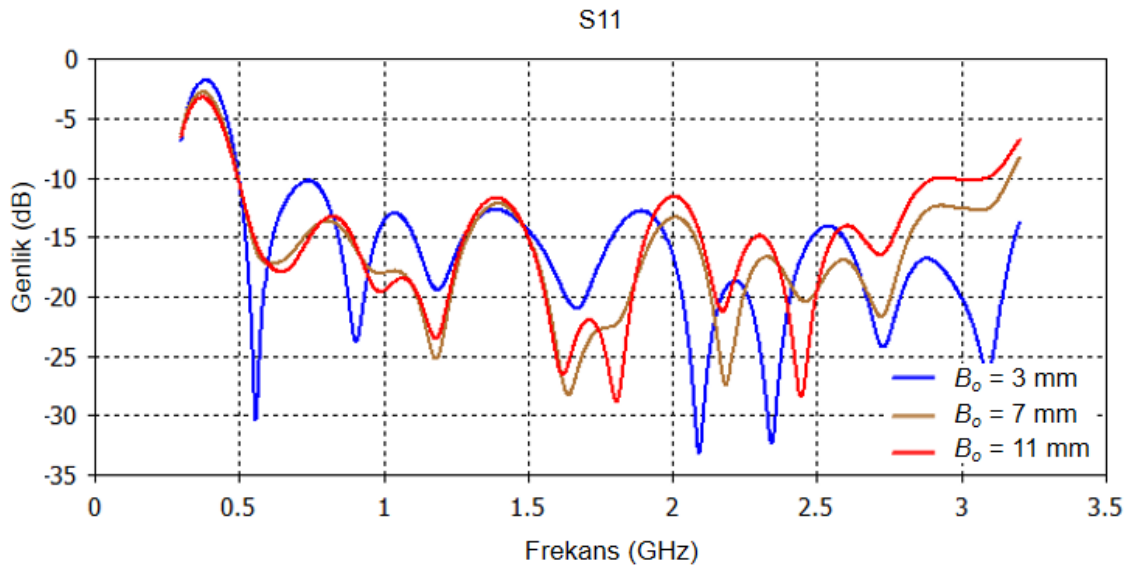
Grafik incelendiğinde anten genişliği arttığında en düşük çalışma frekansının düştüğü görülmektedir.  $W = 250$  mm değeri için en düşük çalışma frekansını bulmak istersek 4.9'da verilen denklemi kullanabiliriz. İlgili değerler yerine konulduğunda en düşük çalışma frekansı 280 MHz olmaktadır. Diğer taraftan anten genişliği azaldığında en düşük çalışma frekansı artmaktadır.  $W = 150$  mm değeri için yine 4.9'da verilen denklem kullanılarak en düşük çalışma frekansı yaklaşık olarak 600 MHz çıkmaktadır. Anten genişliği için başta belirtilen en düşük çalışma frekansındaki yarım dalga boyundan daha büyük olmalıdır koşulu düşünüldüğünde  $W = 150$  mm değeri için en düşük frekans 600 MHz'den daha büyük

olmalıdır. Nitekim Şekil 4.6 incelendiğinde en düşük çalışma frekansı yaklaşık 900 MHz olarak görülmektedir. 500 MHz’lik en düşük çalışma frekansı elde etmek için 150 mm’den daha büyük anten genişliği gerekmektedir. Bu sebeple tasarlanacak olan antende  $W = 200$  mm değeri kullanılacaktır.

#### 4.1.5. Anten Arkası Uzunluğu ( $B_o$ )

Anten arkası uzunluğu, bu bölümdeki akımların ani geçişini önlemek için dairesel yarıktan sonrasına eklenmiş olan ekstra uzunluktur. Anten arkası uzunluğu optimize edilecek bir parametredir, optimum değerdeki herhangi bir artış veya azalış, antenin geri dönüş kaybı grafiğini olumsuz etkiler.

Şekil 4.13’te farklı anten arkası uzunlukları için geri dönüş kaybı grafiği verilmiştir.



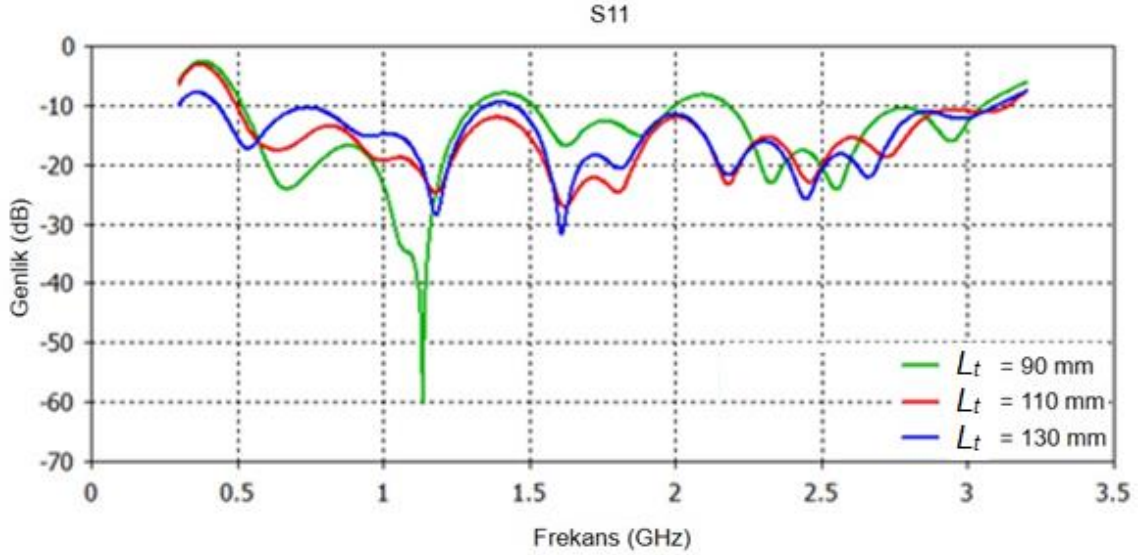
**Şekil 4.13.** Farklı Anten Arkası Uzunlukları İçin Geri Dönüş Kaybı

Sonuçlar incelendiğinde anten arkası uzunluğu için 3 mm değeri seçildiğinde 0.75 GHz civarında geri dönüş kaybında artış gözlemlenmiştir. 7 mm değerinde 0.5 – 3.2 GHz arasında -10 dB’den daha küçük geri dönüş kaybı elde edilmiştir. 11 mm değerinde ise en yüksek çalışma frekansı 3.2 GHz’den 2.8 GHz civarına düşmüştür. En iyi bant genişliğini 7 mm anten arkası uzunluğu sağladığı için tasarımda  $B_o = 7$  mm değeri kullanılacaktır.



#### 4.1.6. Koniklik Uzunluğu ( $L_t$ )

Koniklik uzunluğunun seçilmesi anten boyunu da etkilediği için önemli parametrelerden biridir. Bant genişliğini de etkileyen bu parametredeki artış bant genişliğinde de bir miktar artış sağlamaktadır. Şekil 4.14'te farklı koniklik uzunluğu için geri dönüş kaybı grafiği verilmiştir.



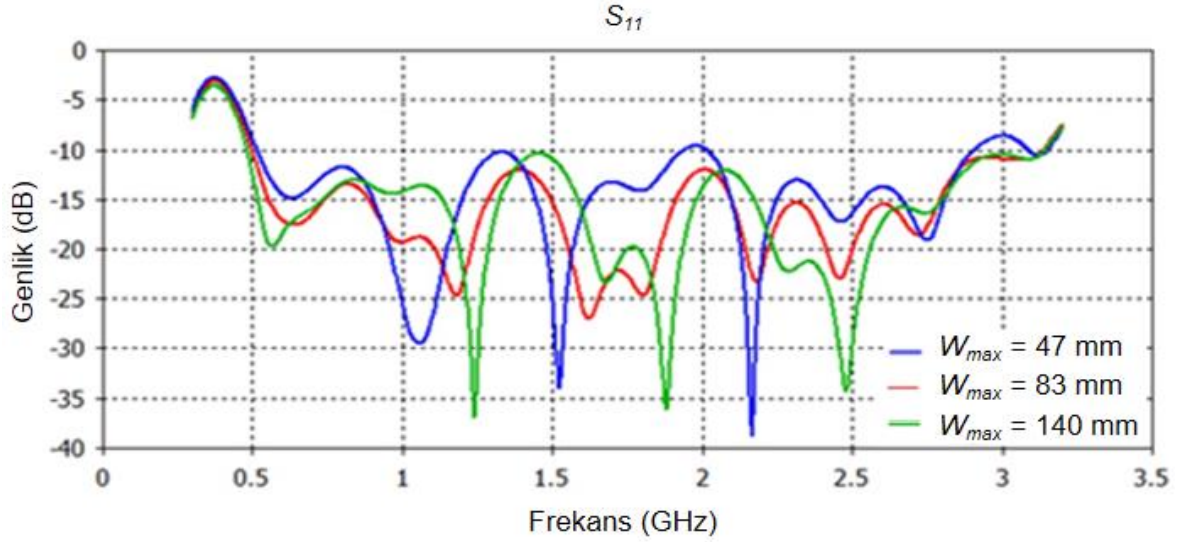
Şekil 4.14. Farklı Koniklik Uzunlukları İçin Geri Dönüş Kaybı

Koniklik uzunluğundaki artış antenin boyunu büyüttüğü için hem minimum çalışma frekansını düşürmüştür hem de bant genişliğini artırmıştır. İstenilen geri dönüş kaybını 110 mm değeri sağladığı için, koniklik uzunluğu olarak bu değer kullanılacaktır.

#### 4.1.7. Ağız Açıklığı ( $W_{max}$ )

Ağız açıklığı antenin en düşük çalışma frekansını, en yüksek çalışma frekansını ve geri dönüş kaybını etkiler. Daha önceden verilen 4.2 ve 4.3'teki denklemlere göre ağız açıklığı hesaplanabilir.

Bu denklemlere göre  $W_{max1} \approx \lambda_0 \approx 82.6$  mm ve  $W_{max2} \approx \frac{\lambda_{min}}{2} \approx 144.6$  mm değerleri elde edilir. Ağız açıklığı bu iki değer arasında olmalıdır. Şekil 4.15'te farklı değerler için antenin geri dönüş kaybı grafiği verilmiştir.

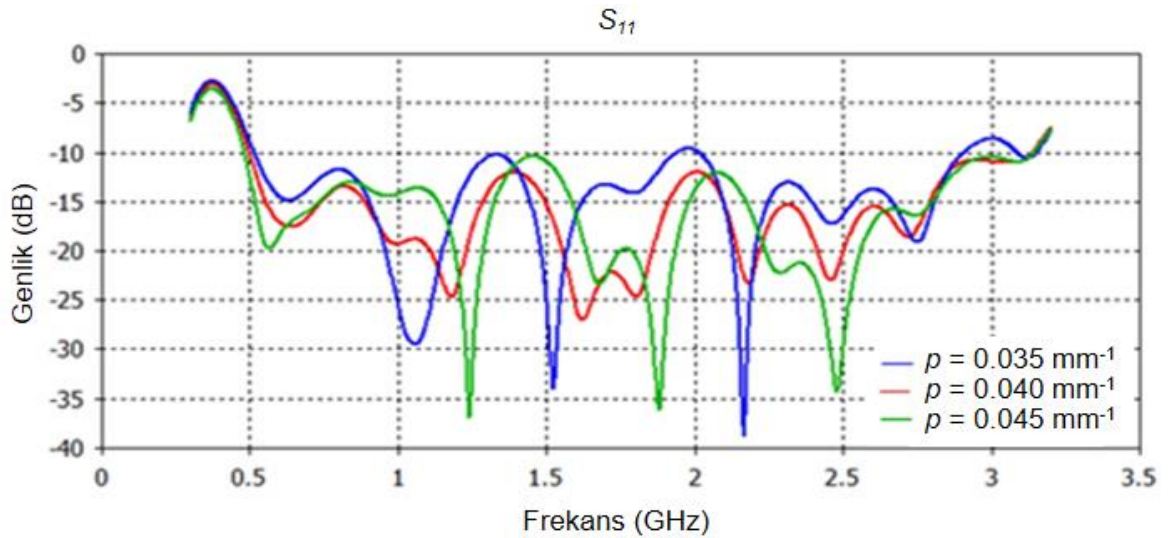


**Şekil 4.15.** Farklı Ağız Açıklığı Değerleri için Geri Dönüş Kaybı

Bant genişliği gerekliliği düşünüldüğünde ağız açıklığı için 83 mm değeri en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Bu nedenle tasarlanacak olan antende ağız açıklığı için 83 mm değeri kullanılacaktır.

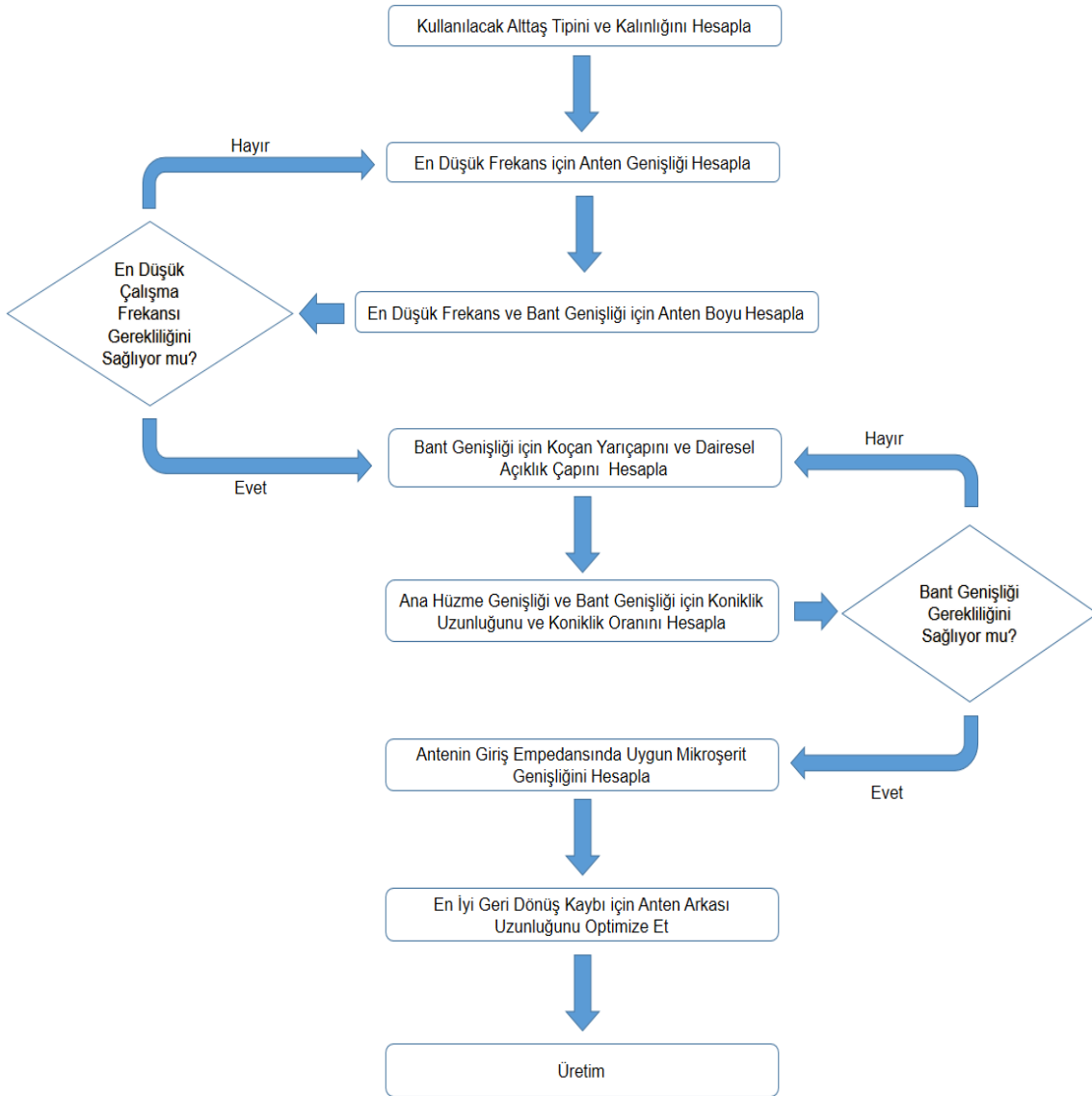
#### 4.1.8. Koniklik Oranı ( $\rho$ )

Konik oranının antenin geri dönüş kaybı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Koniklik oranının azalması bant genişliğinde bir miktar azalmaya neden olmaktadır. Koniklik oranının artması ise ana hüzmeye bir miktar daralmaya ve yan kulakçıklarda bir miktar artışa neden olur. Şekil 4.16'da farklı koniklik oranları için antenin geri dönüş kaybı grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.16.** Farklı Koniklik Oranı Değerleri için Geri Dönüş Kaybı

Koniklik oranı, ağız açıklığı parametresini de etkilemektedir.  $p = 0.035 \text{ mm}^{-1}$  değeri 47 mm'lik bir ağız açıklığına olanak verdiği için bant genişliği gerekliliğini sağlayamamaktadır. Ağız açıklığı önceki bölümde hesaplandığı üzere en az 82.6 mm olmalıdır.  $p = 0.045 \text{ mm}^{-1}$  için ağız açıklığı yaklaşık olarak 141 mm olmakta ve en büyük ağız açıklığı değerinden (144.6 mm) daha küçük olduğu görülmektedir. Ancak merkez frekansı yakınlarında geri dönüş kaybında bir miktar kötüleşme görülmektedir. Koniklik oranı için  $0.04 \text{ mm}^{-1}$  değeri en uygun seçenek olduğu Şekil 4.10'a bakıldığında görülmektedir. İlgili değerde ağız açıklığı 83 mm olmakta ve çalışma bandı gereksinimini sağlamaktadır. Bu nedenle tasarlanacak olan antende  $p = 0.040 \text{ mm}^{-1}$  değeri kullanılacaktır. Şekil 4.17'de Vivaldi anten tasarımı takip edilecek adımlar gösterilmiştir. Bu adımlardaki hesaplamalar için bölüm 4.1'de anlatılan analizler kullanılabilir.



Şekil 4.17. Vivaldi Anten Tasarımı için Akış Diyagramı

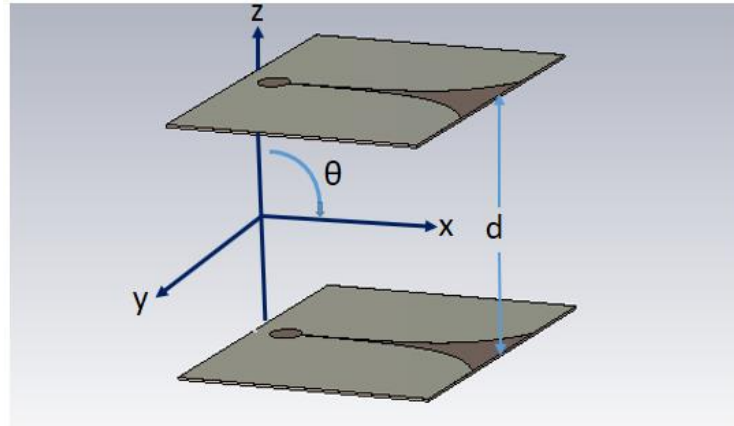
## 4.2. Anten Dizisi Tasarımı

Bölüm 4.1’de tek elemanlı Vivaldi antenin parametreleri tartışılmış ve analiz edilmiştir. Genellikle tek bir antenin ana hüzmesi göreceli olarak geniştir ve her bir anten düşük kazanç değerlerine sahiptir. Kazancı arttırmak ve ana hüzmeye genişliğini düşürmek için anten dizileri kullanılmaktadır. Bu sebeple tek bir Vivaldi antenin birkaç tanesinin bir doğrultuda eşit aralıklarla yerleştirilip, aynı faz ve büyüklükteki sinyallerle beslenerek anten dizini oluşturulacaktır. Bu yapı düzgün doğrusal dizi olarak adlandırılmaktadır.

Anten dizisi, tek bir antene kıyasla birçok avantajı vardır. Dizi tasarımıyla birlikte anten kazancı artabilir ve hüzmeye genişliği azalabilir. Anten dizisinin ışınım örüntüsü; tek bir antenin ışınım örüntüsünden ve dizi faktörünün ışınım örüntüsünden etkilenir. Dizi faktörü, eleman sayısına, elemanlar arası boşluğa, her bir elemana gönderilen sinyalin büyüklüğüne ve her bir elemana gönderilen sinyalin fazına bağlıdır.

### 4.2.1. 2 Elemanlı Anten Dizisinin İncelenmesi

Bu bölümde iki Vivaldi anteninden oluşan bir anten dizisinin  $\lambda/2$  ve  $\lambda/4$  aralıklarla dizilerek  $0$ ,  $\pi/2$  ve  $\pi$  faz farkıyla beslenip dizi faktörü ve anten dizisinin ışınım örüntüsü incelenecektir. İki elemanlı bir anten dizisi Şekil 4.18’ de, dizi faktörü ise eşitlik 4.10’da verilmiştir [41].

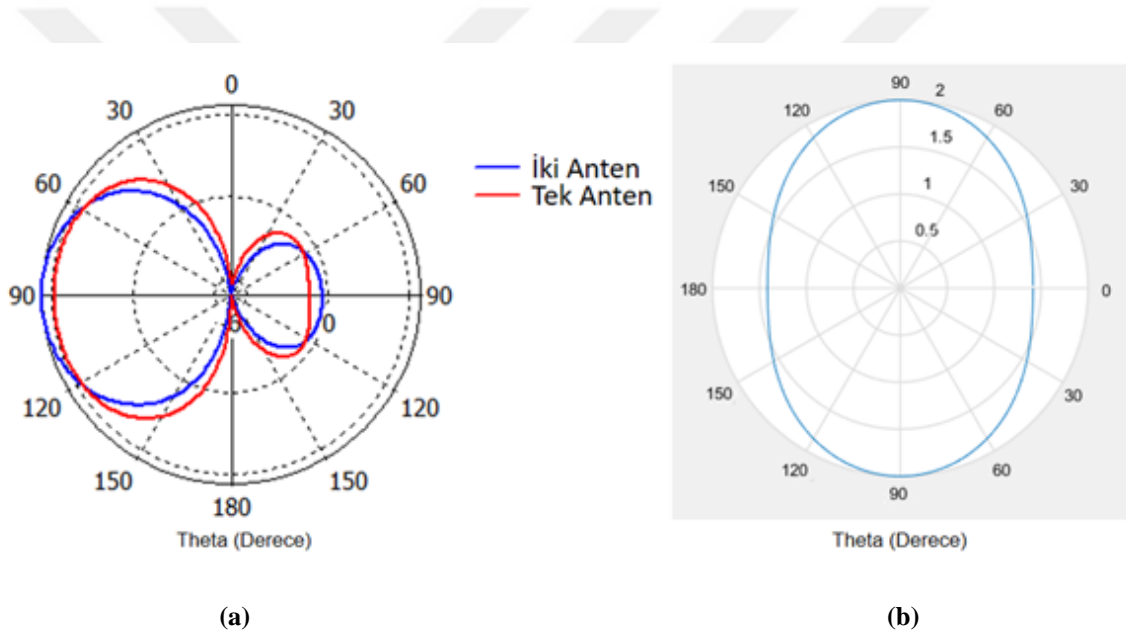


Şekil 4.18. İki Elemanlı Anten Dizisi

$$AF = 2\cos[0.5(kd\cos\theta + \beta)] \quad (4.10)$$

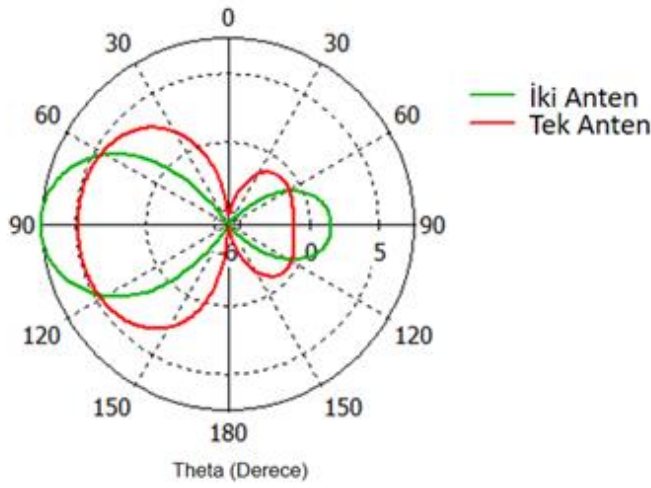
Bu denklemde  $k$  dalga numarası,  $d$  antenler arası mesafe,  $\theta$  antenlerin dizildiği eksene göre ışıma yönü ve  $\beta$  antenler arasındaki faz farkıdır.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de sırasıyla  $\lambda/4$  ve  $\lambda/2$  kadar mesafeyle dizilmiş ve aynı fazda beslenen iki Vivaldi antenin ışıma örüntüsü ve dizi faktörünün örüntüsü gösterilmiştir.  $\lambda/4$  aralıklı iki antenin dizi faktörü Şekil 4.19’da görüldüğü gibi neredeyse her yöne eşit ışıma gösterdiği için iki antenden oluşan anten dizisi ile tek antenin ışıma örüntüleri hemen hemen aynı çıkmıştır.

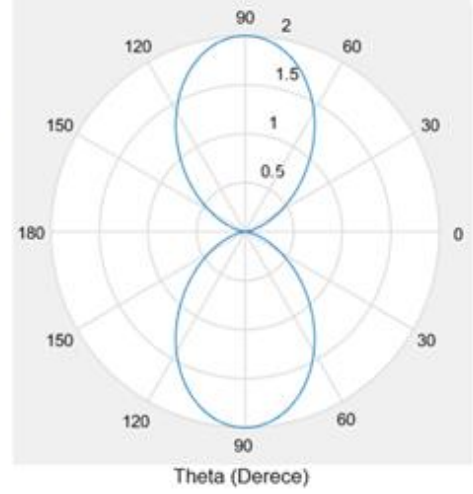


**Şekil 4.19.** Aynı Fazda Beslenen  $\lambda/4$  Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü

Şekil 4.20’deki  $\lambda/2$  aralıklı anten dizisinin dizi faktörü incelendiğinde ana hüzmelerin ve arka kulakçığın olduğu, yan kulakçıkların ise olmadığı görülmektedir. Bu sebeple anten dizisinin ışıma örüntüsü tek antene göre karşılaştırıldığında, ön ve arka hüzmelerin büyüdüğü görülmektedir.



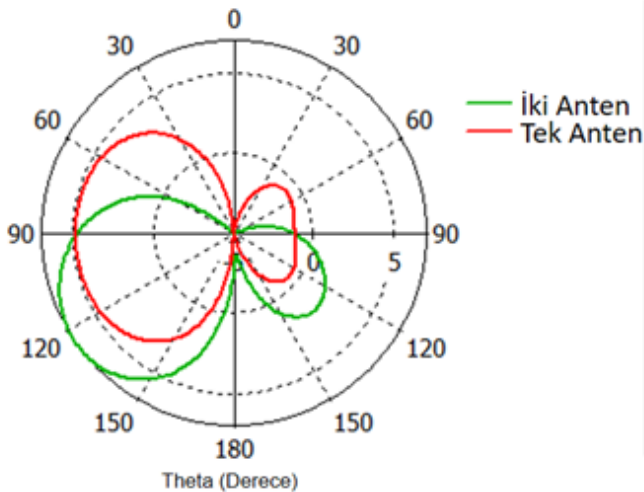
(a)



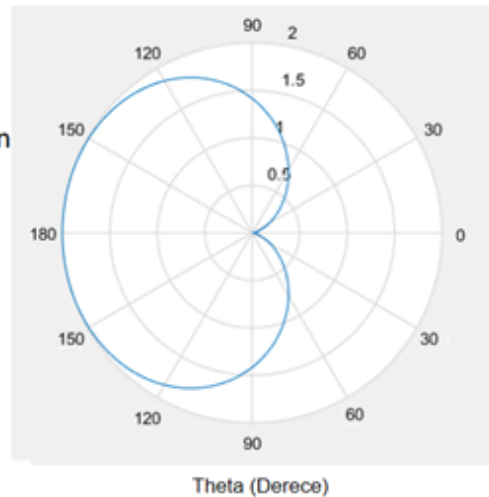
(b)

**Şekil 4.20.** Aynı Fazda Beslenen  $\lambda/2$  Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de sırasıyla  $\lambda/4$  ve  $\lambda/2$  kadar mesafeyle dizilmiş ve  $90^\circ$  faz farkıyla beslenen iki Vivaldi antenin ışım örüntüsü ve dizi faktörünün örüntüsü gösterilmiştir. Şekil 4.21’e bakıldığında dizi faktörünün  $\theta = 180^\circ$  için maksimum değere ulaştığı ve  $\theta = 0^\circ$  için minimum değerde olduğu görülmektedir. Antenin ışım örüntüsü incelendiğinde tek anten göre anten dizisinin  $\theta = 180^\circ$  yönüne doğru yöneldiği görülmektedir.



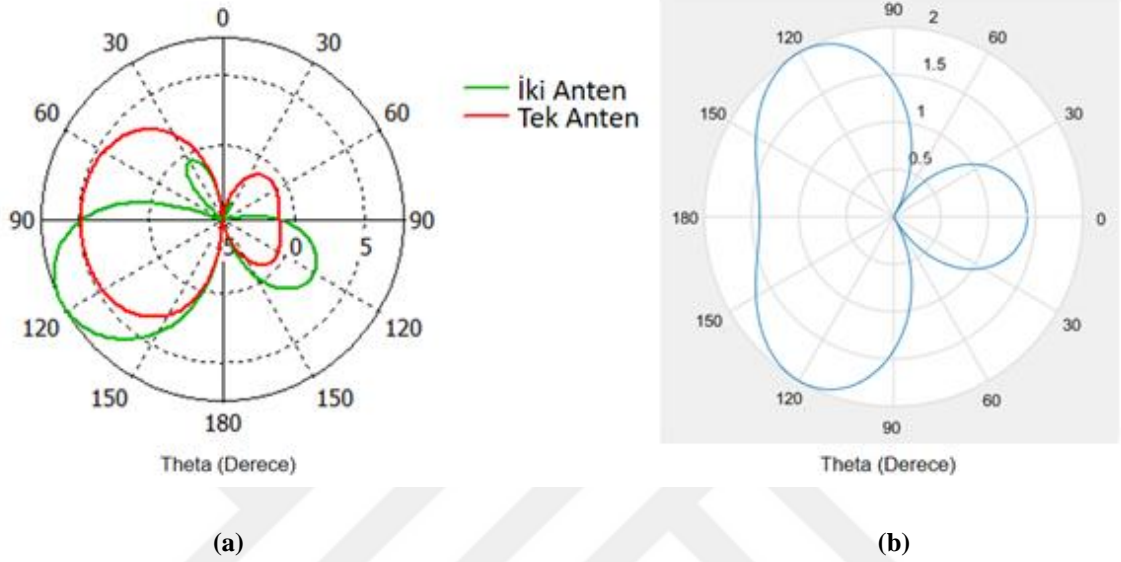
(a)



(b)

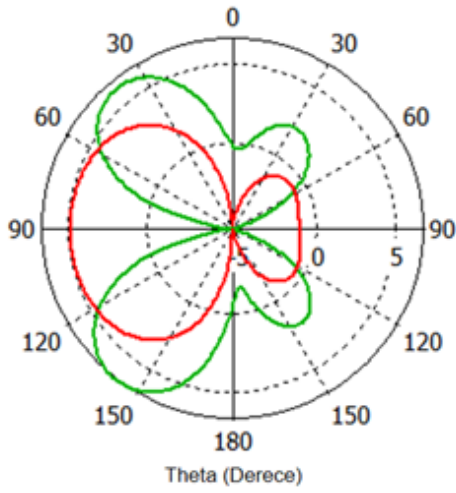
**Şekil 4.21.**  $90^\circ$  Faz Farkıyla Beslenen  $\lambda/4$  Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü

Şekil 4.22'deki  $\lambda/2$  aralıklı anten dizisinin dizi faktörü incelendiğinde  $+60^\circ$  ve  $-60^\circ$ 'de sıfır noktalarının olduğu görülmektedir. Ayrıca  $+120^\circ$  ve  $-120^\circ$ 'de maksimum noktalarının olduğu görülmektedir. Anten dizisinin ışıma örüntüsü incelendiğinde ise  $+60^\circ$  ve  $-60^\circ$ 'de sıfır noktalarının oluştuğu,  $+120^\circ$  ve  $-120^\circ$ 'de ise ışıma örüntüsünün maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir.

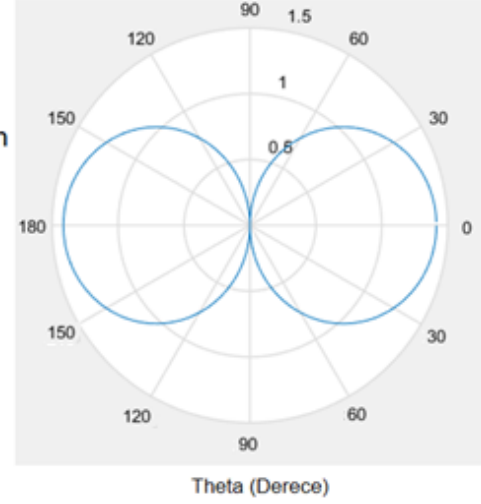


**Şekil 4.22.**  $90^\circ$  Faz Farkıyla Beslenen  $\lambda/2$  Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te sırasıyla  $\lambda/4$  ve  $\lambda/2$  kadar mesafeyle dizilmiş ve  $180^\circ$  faz farkıyla beslenen iki Vivaldi antenin ışıma örüntüsü ve dizi faktörünün örüntüsü gösterilmiştir. İki anteni  $180^\circ$  faz farkıyla beslemek antenlerin fark modunda çalışması anlamına gelir. Dizi faktörünün örüntüsü incelendiğinde  $\theta = \pm 90^\circ$ 'de sıfır noktaları görülmektedir.



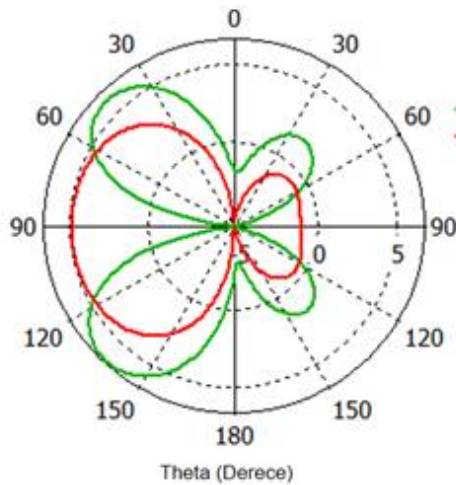
(a)



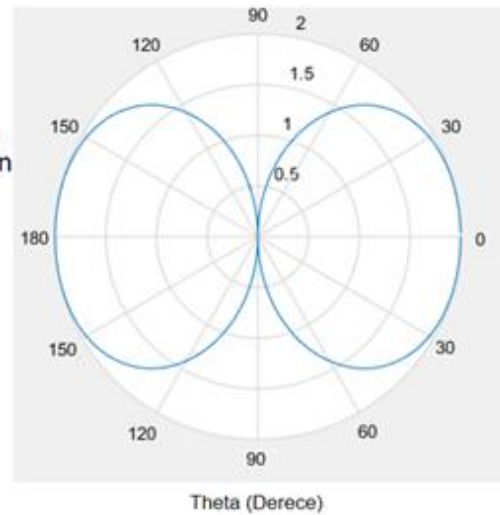
(b)

**Şekil 4.23.**  $180^\circ$  Faz Farkıyla Beslenen  $\lambda/4$  Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü

$\lambda/2$  aralıkla dizilen antenler  $180^\circ$  faz farkıyla beslendiğinde yine dizi faktörü için  $\theta = \pm 90^\circ$ 'de sıfır noktaları görülmektedir. Bu durumda antenler  $\theta = \pm 90^\circ$ 'de değil  $\theta = 0^\circ$ 'de ve  $\theta = 180^\circ$ 'de alma ve gönderme yapmaktadırlar. Işıma örüntüleri incelendiğinde  $\theta = \pm 90^\circ$ 'de sıfır noktalarının oluştuğu, geri kalan noktalarda ışımının  $\theta = 0^\circ$ 'ye ve  $\theta = 180^\circ$ 'ye doğru arttığı görülmektedir.



(a)



(b)

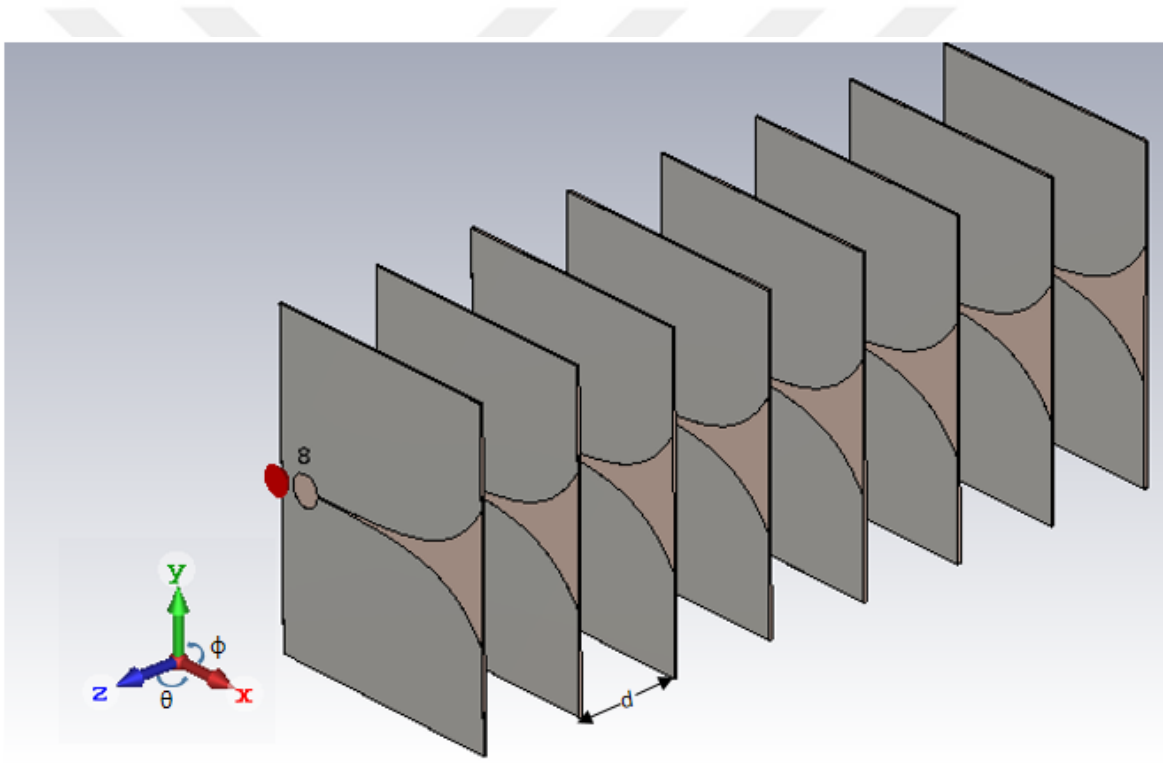
**Şekil 4.24.**  $180^\circ$  Faz Farkıyla Beslenen  $\lambda/2$  Uzaklıkta Dizilmiş İki Anten için (a) Işıma Örüntüsü (b) Dizi Faktörü



#### 4.2.2. Antenler Arası Mesafe

Antenler arası mesafe; hüzme seviyelerini ve ışıma örüntüsünü etkileyen önemli bir parametredir. Şekil 4.25'te Vivaldi antenlerden oluşan bir anten dizisi gösterilmiştir. Anten dizisi tasarlanırken en yüksek çalışma frekansındaki dalga boyu göz önünde bulundurularak tasarım yapılır. Antenler arası mesafe en yüksek çalışma frekansındaki dalga boyundan küçük olmalıdır. Aksi takdirde yan kulakçıklarda da maksimum noktaları ortaya çıkacaktır.

Tasarlanacak olan anten dizisinin elemanları bölüm 4.2.1'de tartışıldığı üzere aynı fazda aralarında  $\lambda/2$  (en yüksek çalışma frekansında) kadar mesafe olacak şekilde yerleştirildiklerinde istenilen sonucu verecektir. Çünkü bu konfigürasyonda ana hüzme büyümüş ve yan kulakçıklar küçülmüştür.



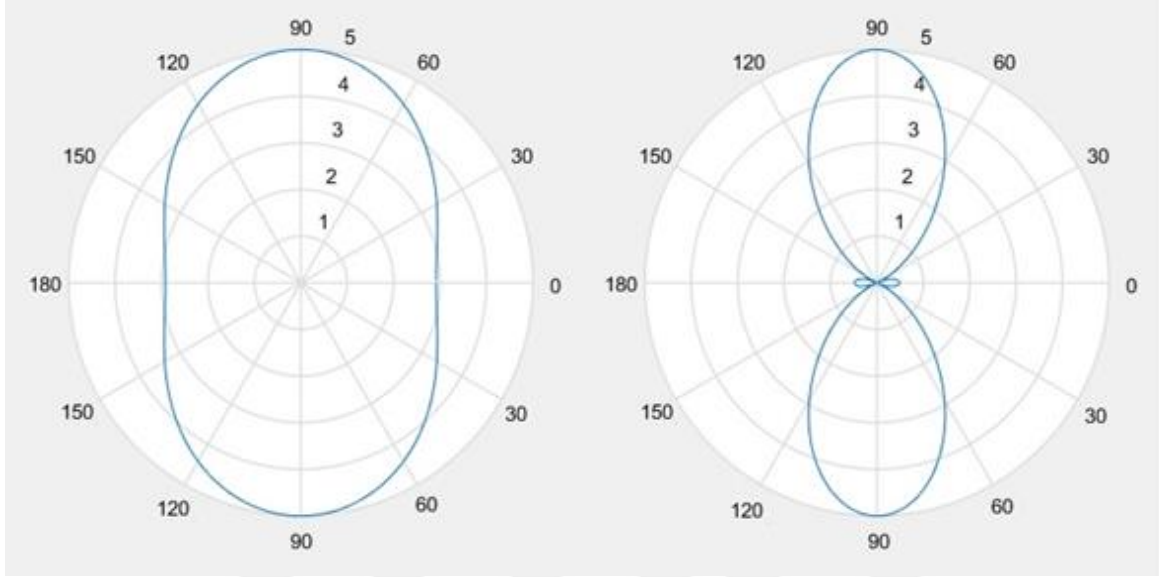
Şekil 4.25. Tasarlanan Anten Dizisi ve Parametreleri

Yukarıdaki şekilde  $d$  antenler arasındaki mesafeyi,  $\theta$   $xz$  düzleminde  $z$  eksenine göre yapılan açıyı,  $\phi$   $xy$  düzleminde  $x$  eksenine göre yapılan açıyı göstermektedir.

#### 4.2.3. Anten Sayısı

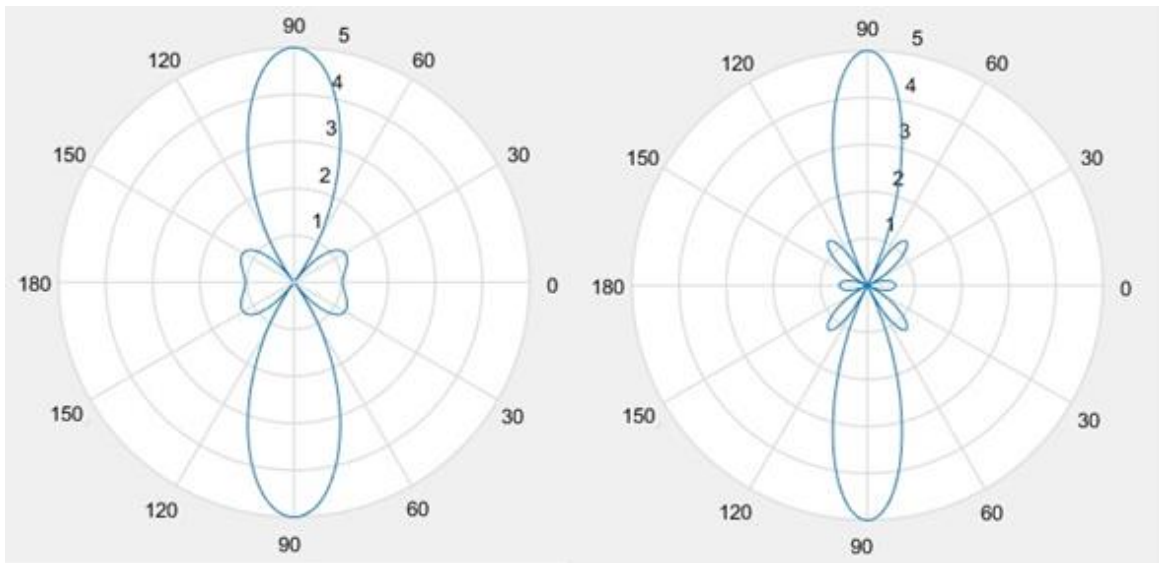
$N$ , eleman sayısı, esas olarak dizi yönelimini belirler. Aslında, artan anten aralığı ve anten sayısı, ana hüzme de bir daralma ve dizi yöneliminde bir iyileşme sağlar. İstenilen hüzme genişliğini ve yan kulakçık seviyelerini elde etmek için anten sayısı ayarlanmalıdır. Aynı

zamanda, anten sayısındaki artışın, tasarlanan diziyi uygulamak için gerekli olan alanda bir artışa neden olur. Bununla birlikte anten sayısının artması maliyeti de arttıracığı için optimum düzeyde bir seçim yapılması gerekmektedir. Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de farklı anten sayıları için 0.5 GHz, 1 GHz, 1.5 GHz, 2 GHz, 2.5 GHz ve 3 GHz frekanslarındaki dizi faktörünün örüntüsü verilmiştir.



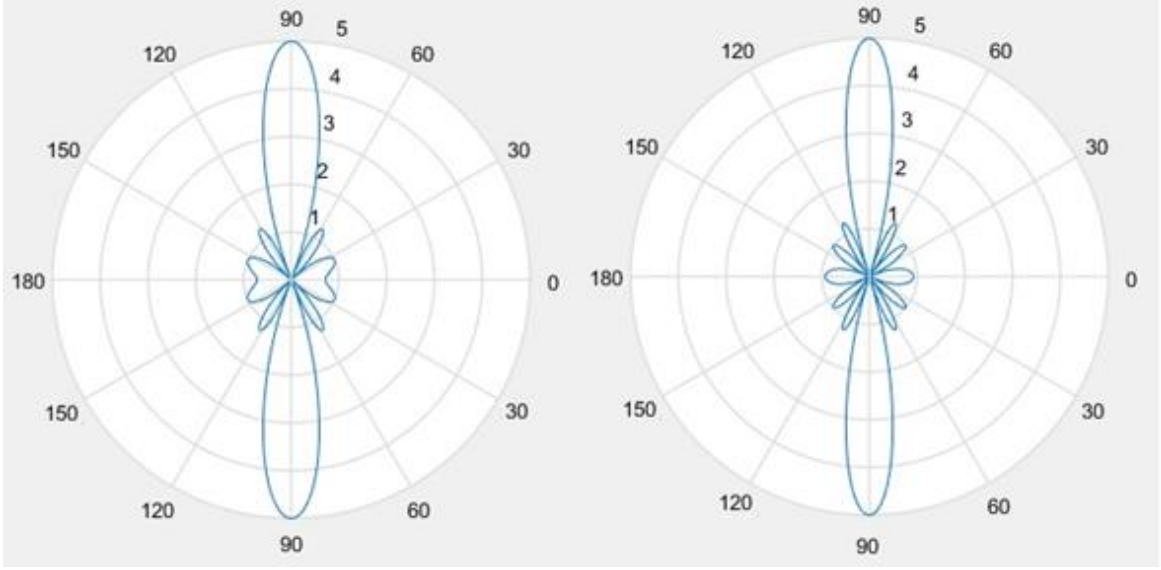
(a) 0.5 GHz

(b) 1 GHz



(c) 1.5 GHz

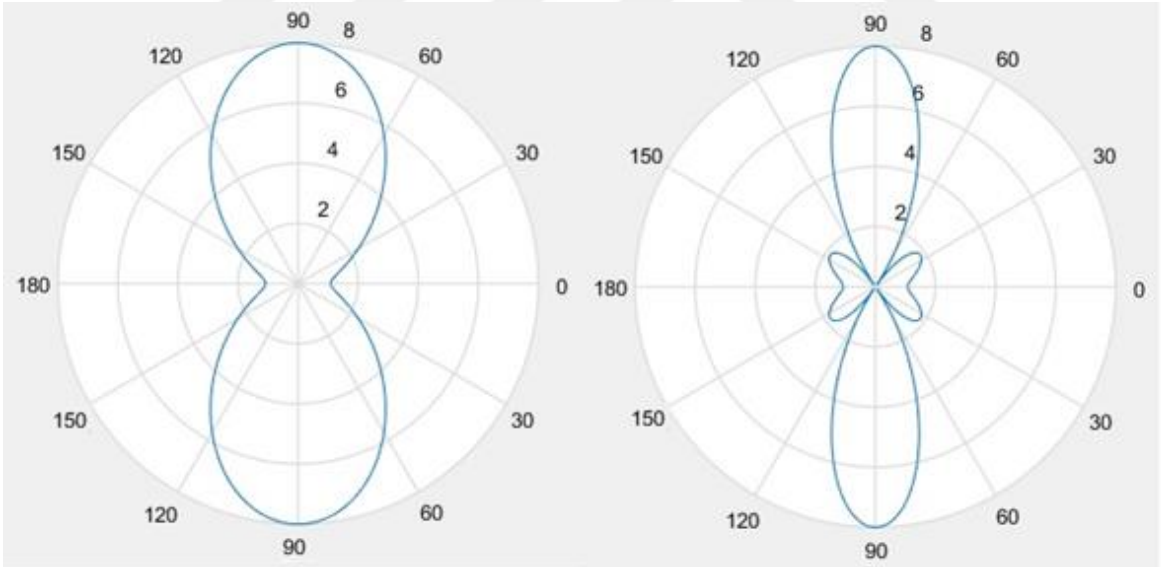
(d) 2 GHz



(e) 2.5 GHz

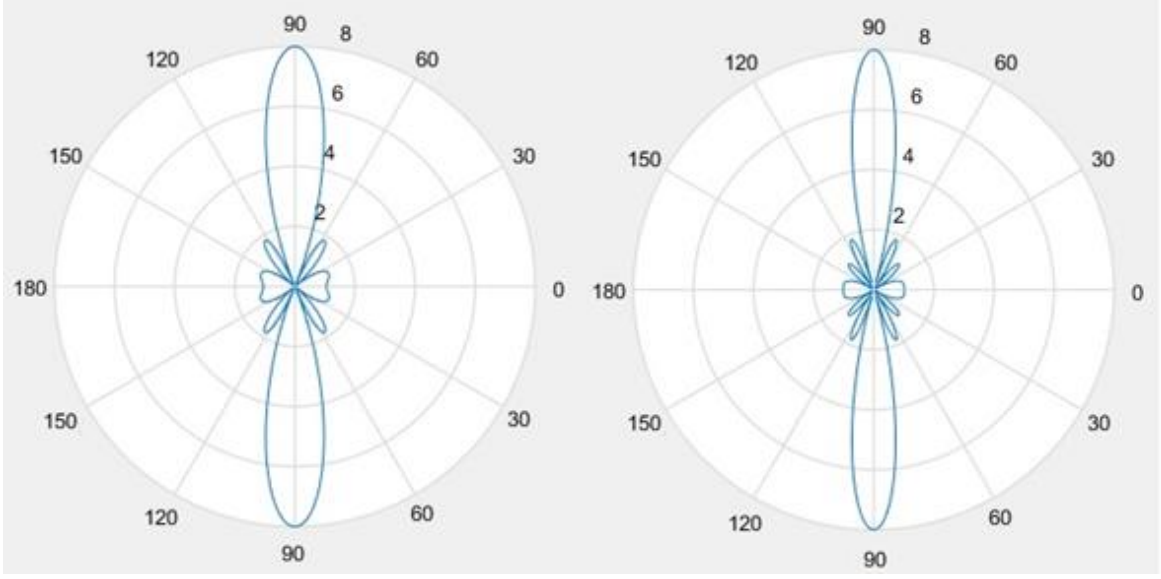
(f) 3 GHz

Şekil 4.26.  $N=5$  için Farklı Frekanslardaki Dizi Faktörü Örüntüleri



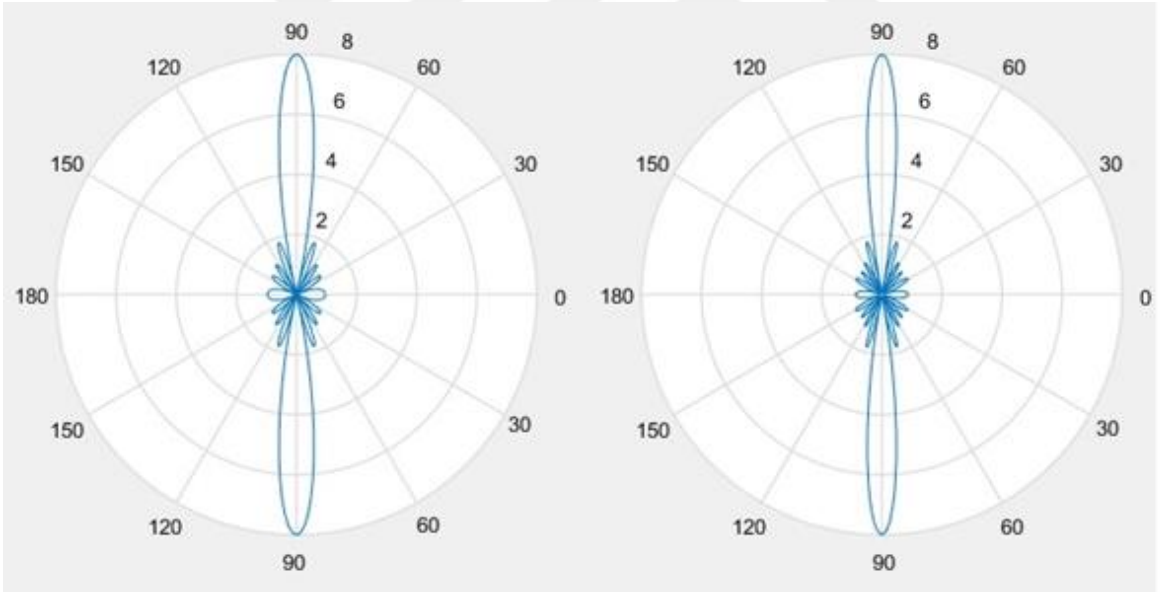
(a) 0.5 GHz

(b) 1 GHz



(c) 1.5 GHz

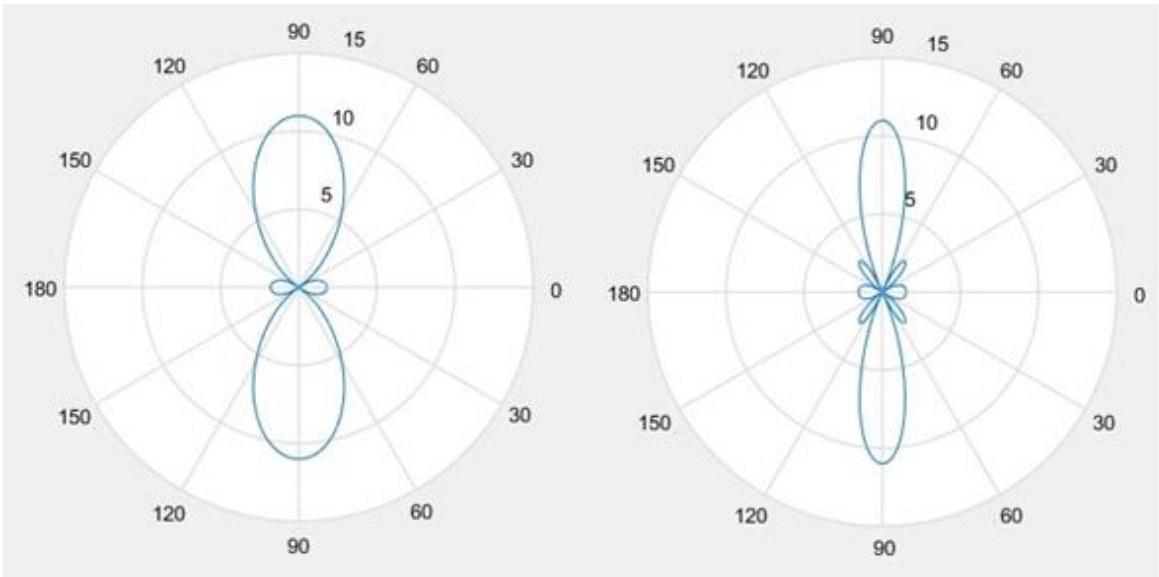
(d) 2 GHz



(e) 2.5 GHz

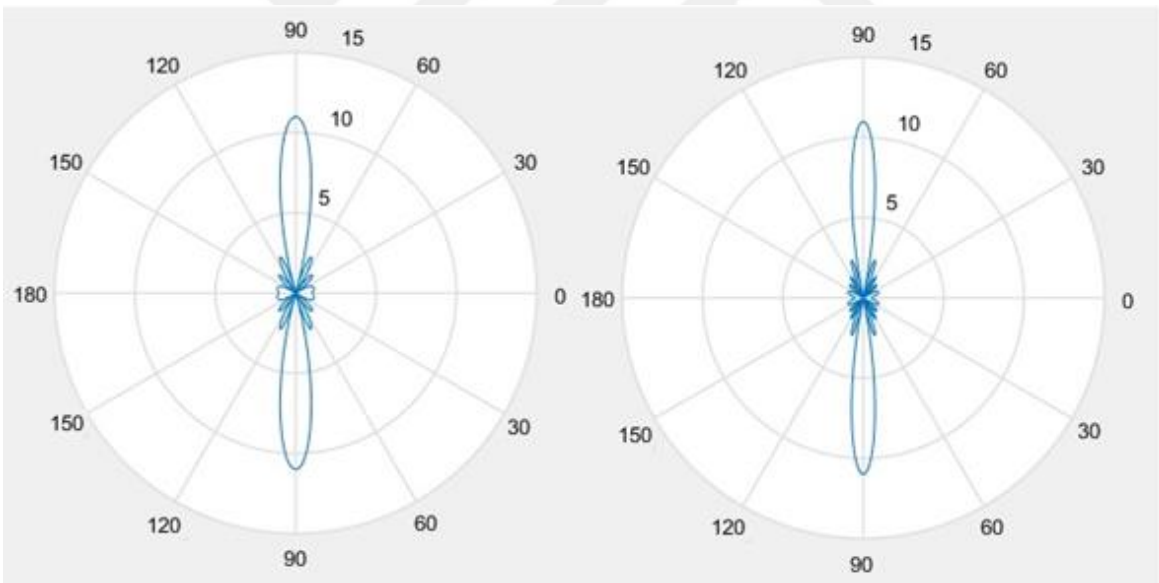
(f) 3 GHz

Şekil 4.27.  $N=8$  için Farklı Frekanslardaki Dizi Faktörü Örüntüleri



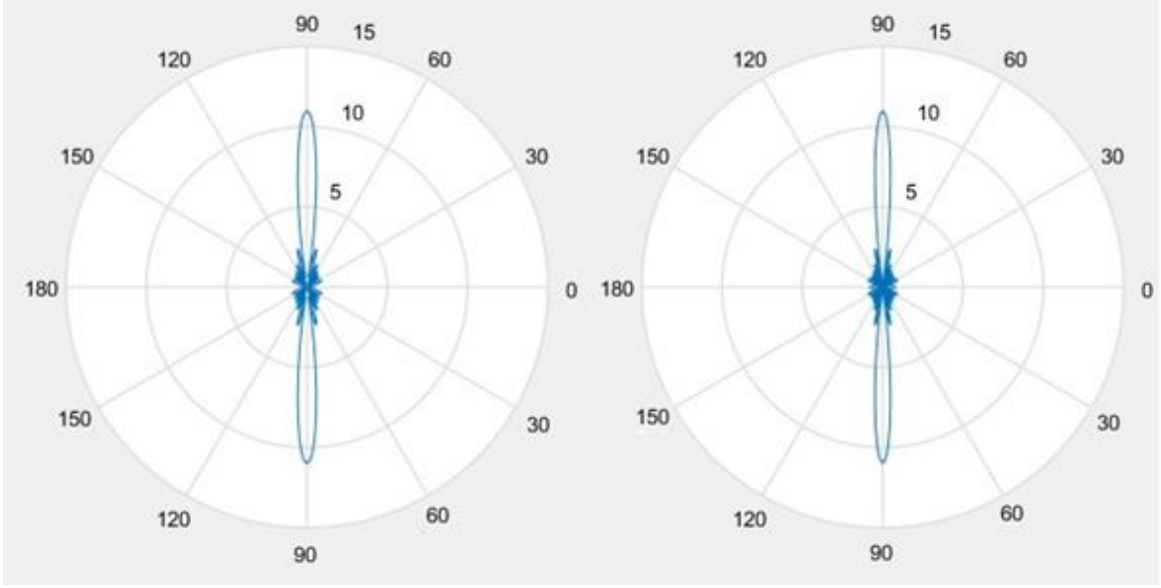
**(a) 0.5 GHz**

**(b) 1 GHz**



**(c) 1.5 GHz**

**(d) 2 GHz**



(e) 2.5 GHz

(f) 3 GHz

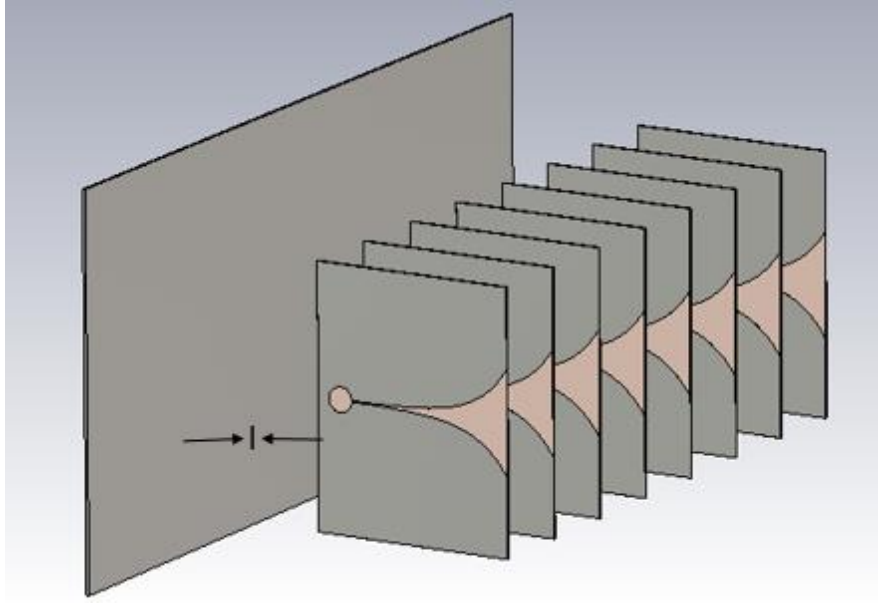
**Şekil 4.28.** N=11 için Farklı Frekanslardaki Dizi Faktörü Örüntüleri

Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de farklı sayıdaki antenlerin dizi faktörlerinin örüntüleri gösterilmiştir. Dizi faktörünün farklı frekanslardaki örüntülerinin gösterilmesi amacıyla Matlab’ta yazılan kod EK-A’da verilmiştir.

5, 8 ve 11 antenden oluşan konfigürasyonlar için 0.5 GHz, 1 GHz, 1.5 GHz, 2 GHz, 2.5 GHz ve 3 GHz’deki dizi faktörleri örüntüleri incelendiğinde en ideal sonucu 8 elemandan oluşan konfigürasyonun sağladığı görülmektedir. Çünkü gerek yan kulakçık seviyelerini düşürmek, gerekse de ana hüzmeye seviyesini arttırmak için iyi bir seçimdir. Ayrıca maliyet açısından 11 antenli konfigürasyona göre daha avantajlıdır. Tasarlanacak olan anten dizisinde 8 elemandan oluşan konfigürasyon kullanılacaktır.

### 4.3. Yansıtıcı Plaka Tasarımı

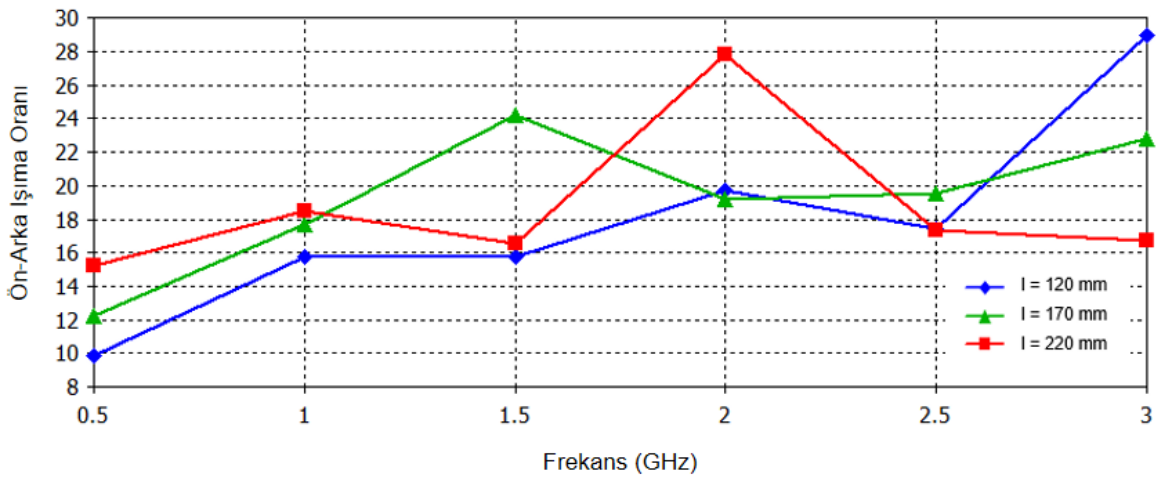
Yere nüfuz eden radar sistemi için tasarlanan anten dizisinin geriye doğru yaptığı ışınımı düşürmek için anten dizisinin arkasına yansıtıcı bir yüzey yerleştirilecektir. Şekil 4.29 anten dizisinin arkasına yerleştirilen yansıtıcı plakayı göstermektedir ve 1 antenler ile yansıtıcı plaka arasındaki uzaklıktır.



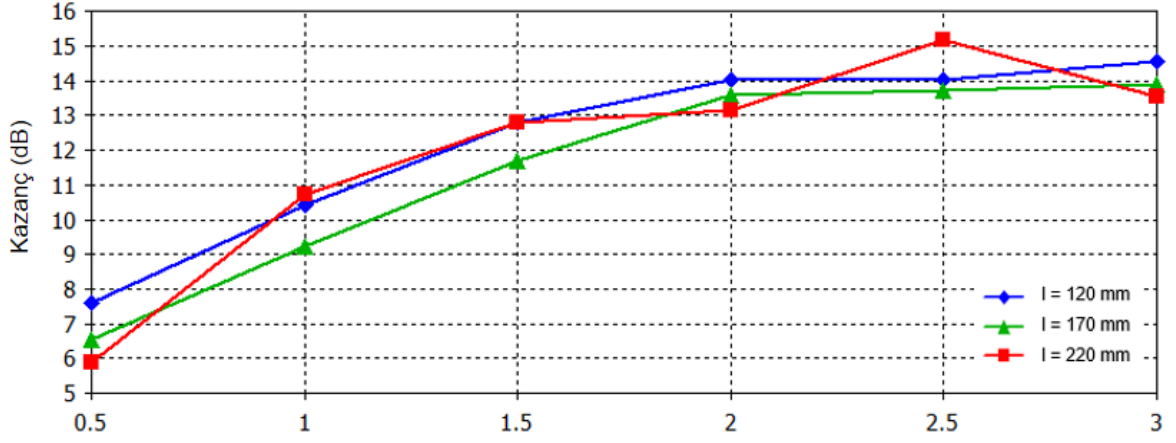
**Şekil 4.29.** Tasarlanan Yansıtıcı Plaka ve Parametreleri

Anten dizisi ile yansıtıcı yüzey arasındaki mesafe en düşük çalışma frekansında boş uzaydaki dalga boyunun yaklaşık olarak  $1/4$ 'ü kadar olmalıdır. Ayrıca yansıtıcı yüzeyin dielektrik sabiti antenden küçük olmalıdır. Bu sebep mükemmel iletken bir malzeme yansıtıcı yüzey olarak kullanılacaktır.

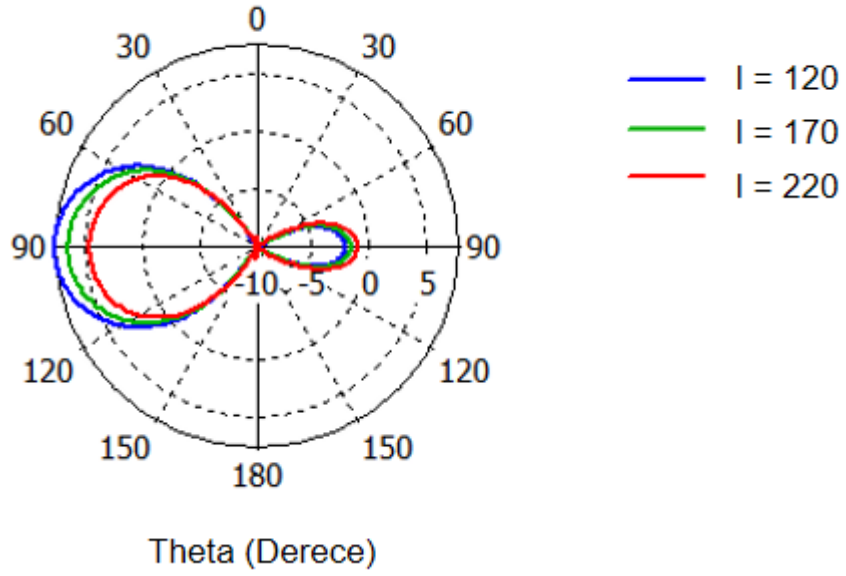
Şekil 4.30'da ön-arka ışıma oranı grafiği, Şekil 4.31'de kazanç grafiği, Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de ise farklı mesafelere konulan yansıtıcı plaka için ışıma örüntüleri gösterilmiştir.



**Şekil 4.30.** Farklı Uzaklıklar için Ön-Arka Işıma Oranı Grafiği

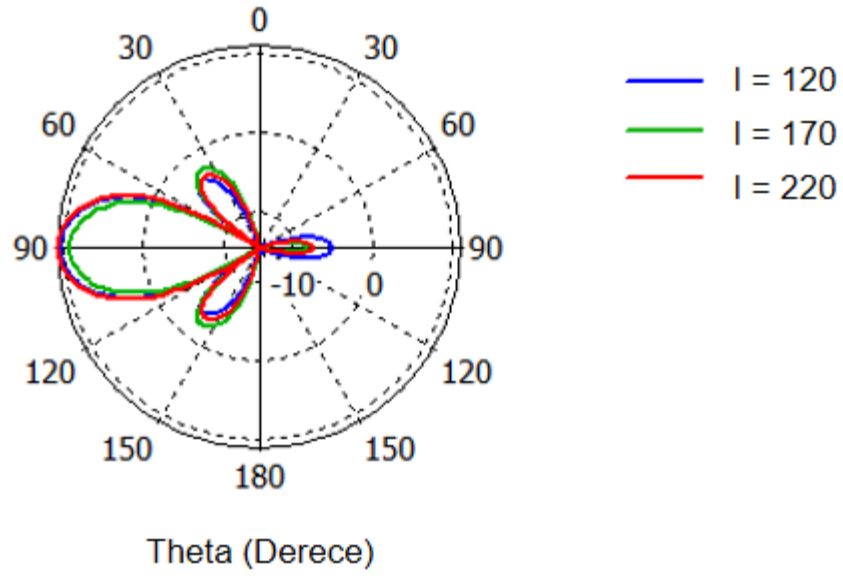


Şekil 4.31. Farklı Uzaklıklar için Kazanç Grafiği

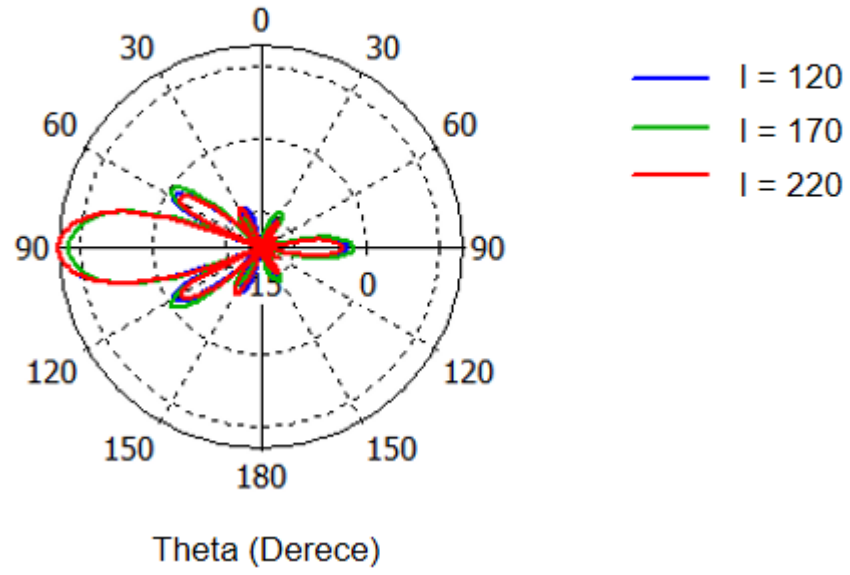


Şekil 4.32. 0.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü

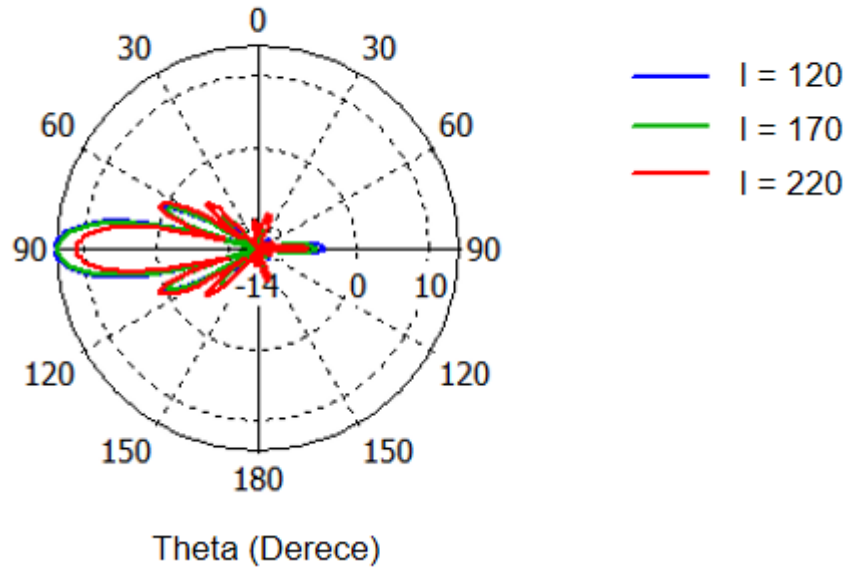




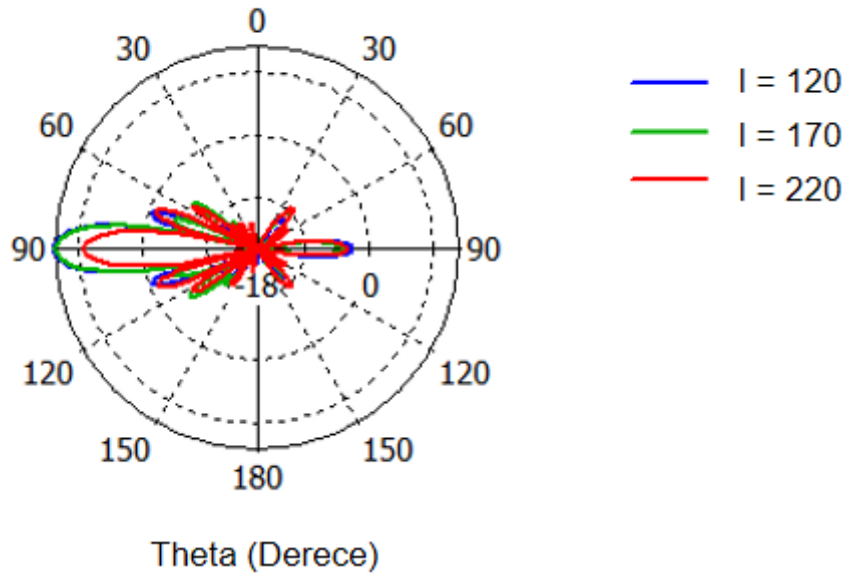
Şekil 4.33. 1 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



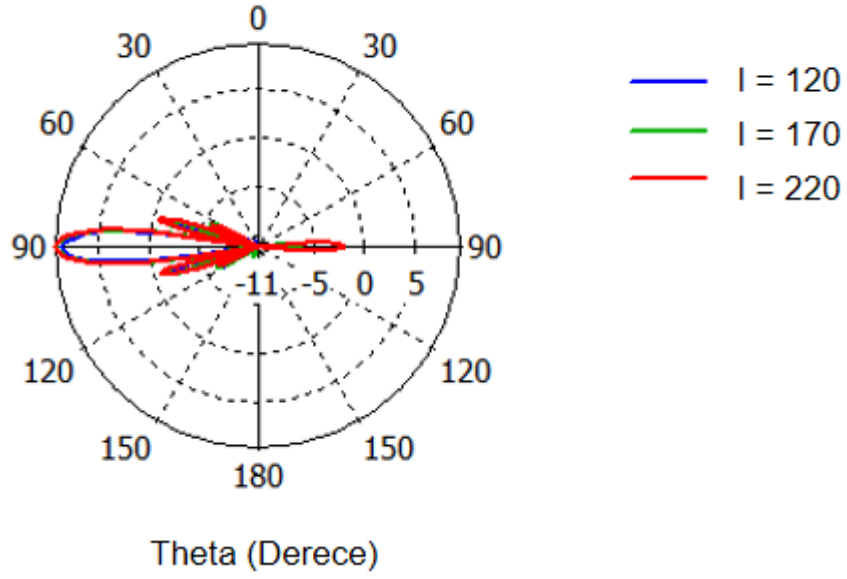
Şekil 4.34. 1.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



Şekil 4. 35. 2 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



Şekil 4.36. 2.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



**Şekil 4.37.** 3 GHz için Uzak Alan Kazanç Örüntüsü

Ön-arka ışıma oranı grafiği, kazanç grafiği ve uzak alan örüntüleri incelendiğinde en iyi sonucun  $d=170$  mm değerinde elde edildiği görülmektedir ve bu değer yaklaşık olarak en düşük çalışma frekansında (500 MHz) boş uzaydaki dalga boyunun çeyreğine eşittir. Bu nedenle tasarlanacak olan yansıtıcı plaka anten dizisinden 170 mm uzağa konulacaktır.

## 5. VİVALDİ ANTEN TASARIMI ve SİMÜLASYON

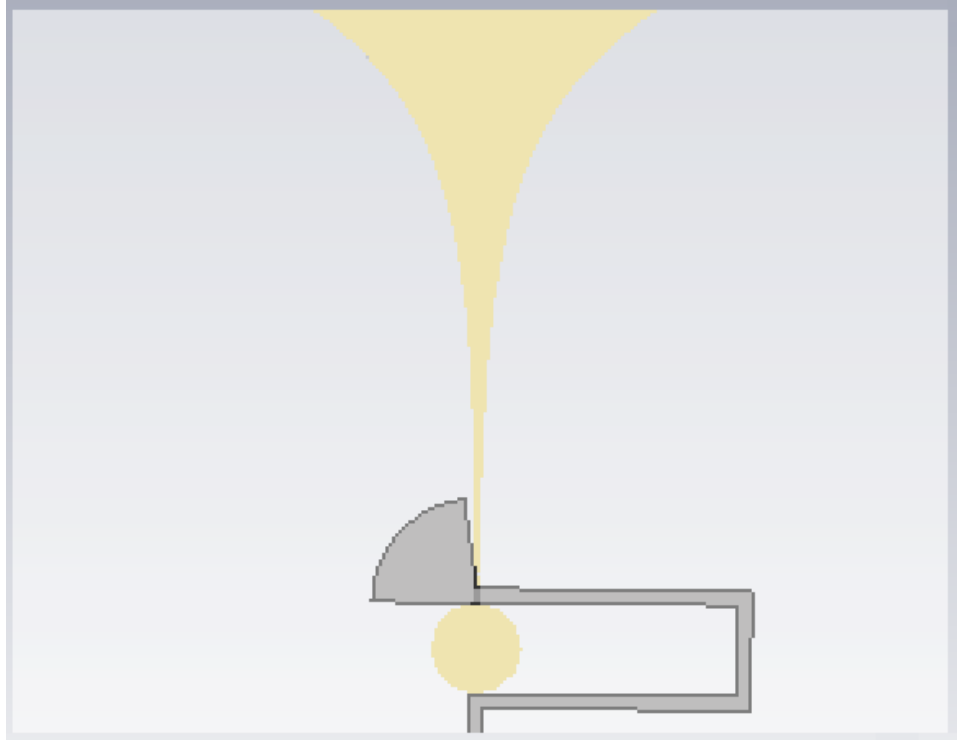
Bu bölümde tasarlanan Vivaldi antenden, oluşturulan anten dizisinden ve geri yönlü ışımayı düşürmek için konulan yansıtıcı plakadan bahsedilecektir. Tasarımların çeşitli parametrelerinin ölçümü için simülasyon sonuçları da gösterilecektir. Her bir simülasyon CST - Computer Simulation Technology kullanılarak yapılacaktır.

### 5.1. Tek Anten Tasarımı

Bölüm 4.1’de analizi yapılan anten bazı özellikler göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Tasarlanmış anten;

- 0.5 - 3 GHz frekans bant genişliği
- -10 dB veya daha küçük geri dönüş kaybı
- 50 Ohm’luk giriş empedansı

özelliklerine sahiptir. Şekil 5.1’de CST kullanılarak tasarlanan anten verilmiştir. Çizelge 5.1’de ise tasarlanan antenin parametreleri verilmiştir.

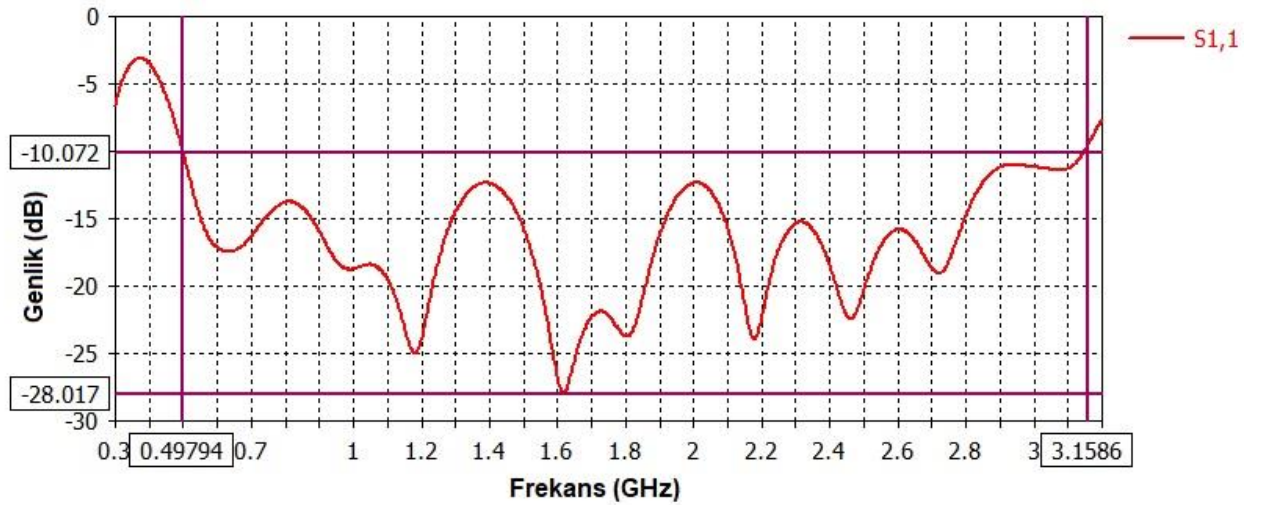


Şekil 5.1. CST ile Tasarlanan Vivaldi Anteni

**Çizelge 5.1.** Tasarlanan Vivaldi Anteni Parametreleri

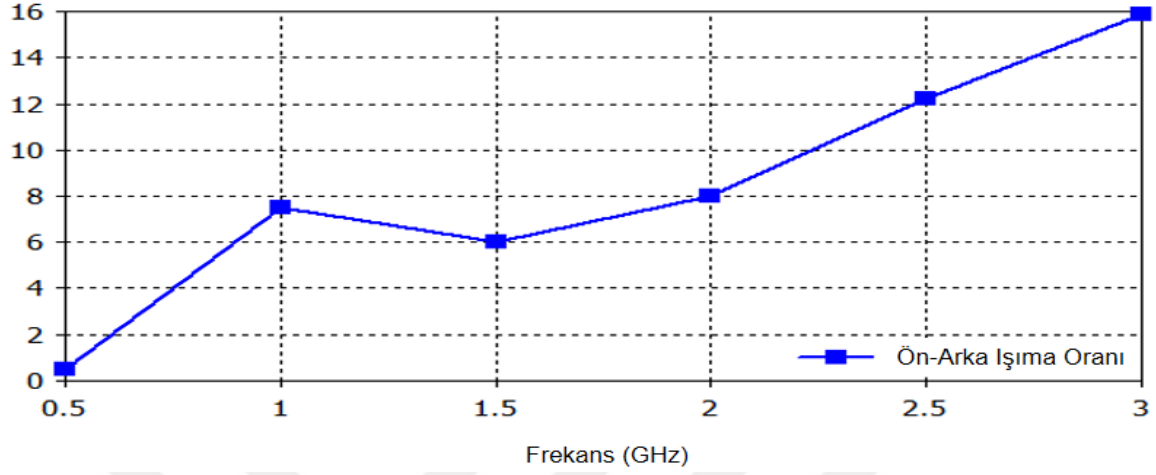
Anten Parametreleri	Uzunluk(mm)
Anten Boyu	160
Anten Genişliği	200
Ağız Açıklığı	83
Koniklik Uzunluğu	110
Koniklik Oranı	0.04 mm <sup>-1</sup>
Koçan Yarıçapı	22.2
Koçan Açısı	82.5°
Dairesel Açıklık Çapı	19.4
Mikroşerit Genişliği	3.11
Boğaz Uzunluğu	18
Boğaz Genişliği	1
Altaş Tipi	FR – 4
Altaş Dielektrik Sabiti	4.3
Altaş Kalınlığı	1.6

Çizelge 5.1’de parametreleri verilen antenin; geri dönüş kaybı grafiği, 0.5 GHz, 1 GHz, 1.5 GHz, 2 GHz, 2.5 GHz ve 3 GHz’deki ışımaya örüntüleri grafikleri, kazanç grafiği ve ön-arka ışımaya oranı grafiği sırasıyla aşağıda verilmiştir.



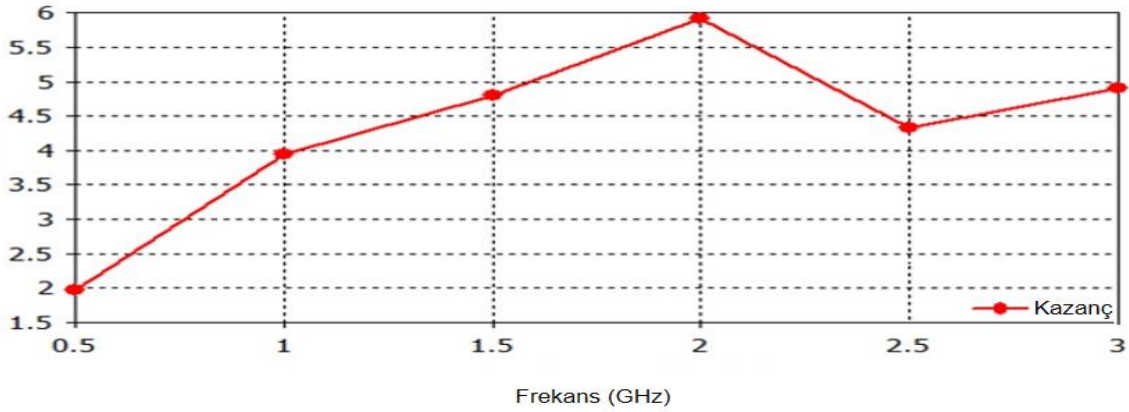
**şekil 5.2.** Tasarlanan Anten için Geri Dönüş Kaybı

Grafik incelendiğinde tasarlanan antenin 0.5 – 3.15 GHz bandında çalışabildiği görülmektedir. Bu çalışma bandında anten -28 dB değerine kadar geri dönüş kaybına sahiptir. Şekil 5.3'te antenin ön-arka ışıma oranı grafiği verilmiştir.



Şekil 5.3. Ön-Arka Işıma Oranı

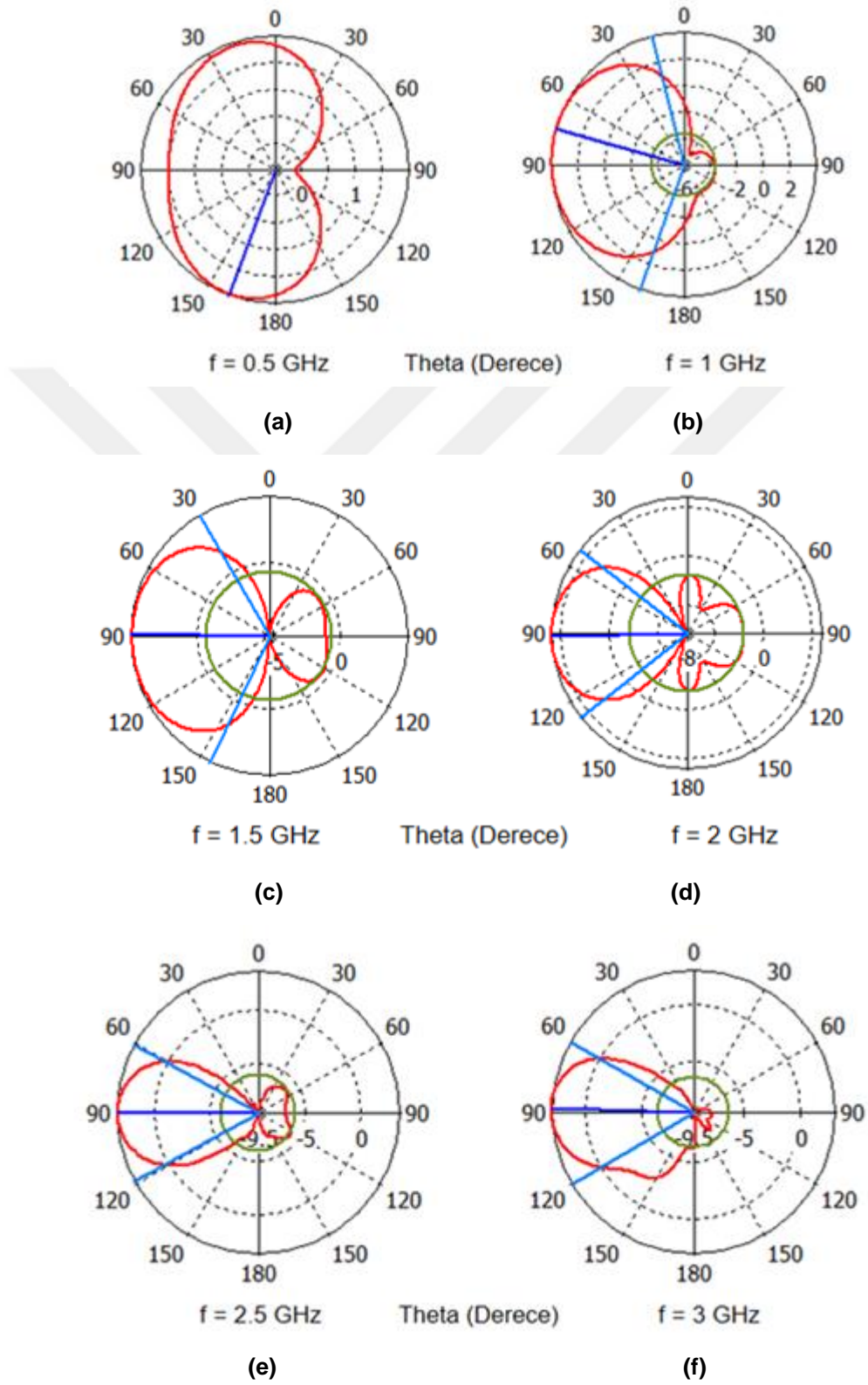
Grafik incelendiğinde frekans arttıkça ön-arka ışıma oranının da arttığı görülmektedir. Anten dizisi tasarımı ile birlikte bu grafiğin nasıl değiştiği 6. bölümde paylaşılmıştır. Şekil 5.4'te tasarlanan antenin kazanç grafiği görülmektedir. Grafiğe bakıldığında tasarlanan antenin çalışma bandında 2 – 6 dB arası kazançta sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4. Anten Kazanç Grafiği

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da tasarlanan antenin uzak alandaki ışıma örüntüleri gösterilmiştir. Burada Şekil 5.5.a'da 0.5 GHz için, Şekil 5.5.b'de 1 GHz için, Şekil 5.5.c'de 1.5 GHz için, Şekil 5.5.d'de 2 GHz için, Şekil 5.5.e'de 2.5 GHz için ve Şekil 5.5.f'de 3 GHz için uzak alan

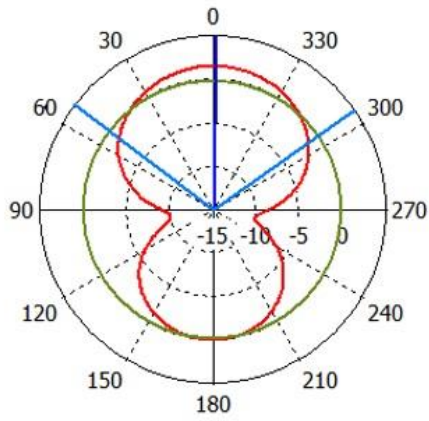
örüntüleri  $\phi = 0^\circ$  için verilmiştir. Şekil 5.6'da ise aynı örüntüler  $\theta = 90^\circ$  için verilmiştir. Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te sırasıyla bu uzak alan ışınma örüntülerinin  $\phi = 0^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$  için farklı frekanslardaki özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.5. Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri ( $\phi = 0^\circ$ )

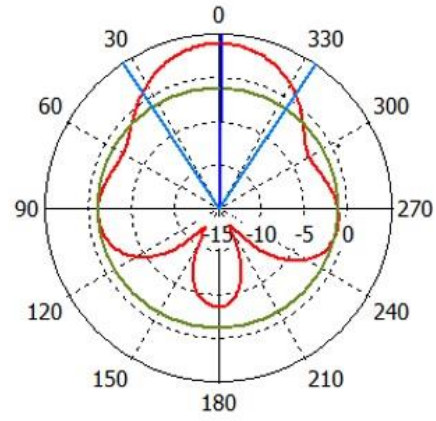
**Çizelge 5.2.**  $\phi = 0^\circ$  için Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri

Frekans	Ana Hüzme Seviyesi	Ana Hüzme Yönü	Hüzme Genişliği (3 dB)	Yan Hüzme Seviyesi
0.5	2 dB	160 °		
1	4 dB	75 °	146.3 °	-7.4 dB
1.5	4.8 dB	90 °	124.4 °	-5.4 dB
2	5.9 dB	91 °	76.4 °	- 7.9 dB
2.5	3.3 dB	90 °	57.5 °	-9.2 dB
3	3 dB	88 °	60.4 °	-9.3 dB



f = 0.5 GHz

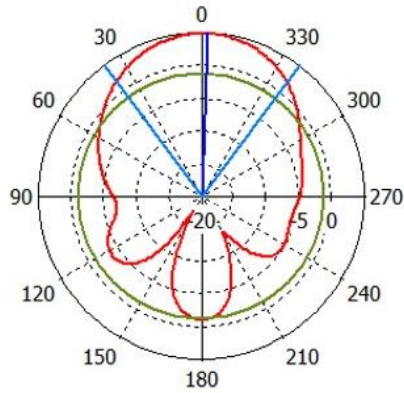
(a)



Phi (Derece)

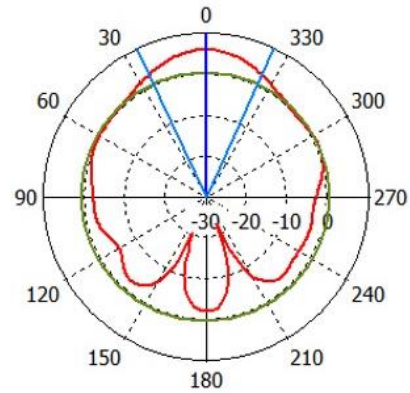
f = 1 GHz

(b)



f = 1.5 GHz

(c)

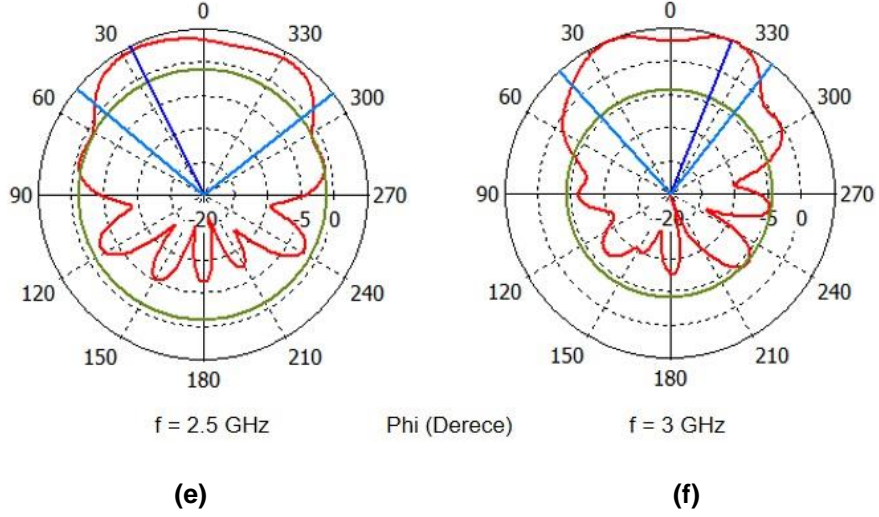


Phi (Derece)

f = 2 GHz

(d)





Şekil 5.6. Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri ( $\theta = 90^\circ$ )

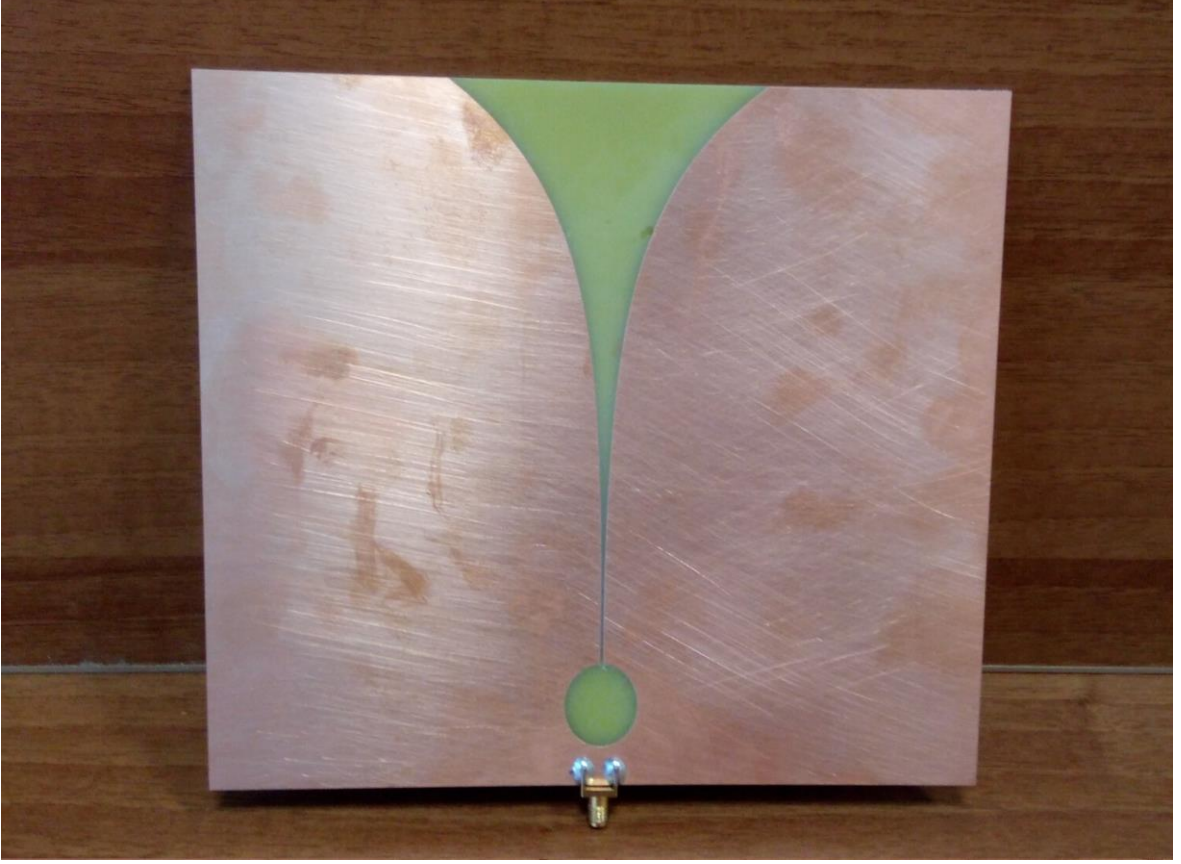
Çizelge 5.3.  $\theta = 90^\circ$  için Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri

Frekans	Ana Hüzme Seviyesi	Ana Hüzme Yönü	Hüzme Genişliği (3 dB)	Yan Hüzme Seviyesi
0.5	1.5 dB	0 °	107.8	-1.6 dB
1	3.9 dB	0 °	67 °	-5 dB
1.5	4.8 dB	0 °	73.2 °	-6 dB
2	5.9 dB	0 °	49.5 °	- 5.5 dB
2.5	4.3 dB	26 °	102.2 °	-5.4 dB
3	5 dB	338 °	80.5 °	-9.2 dB

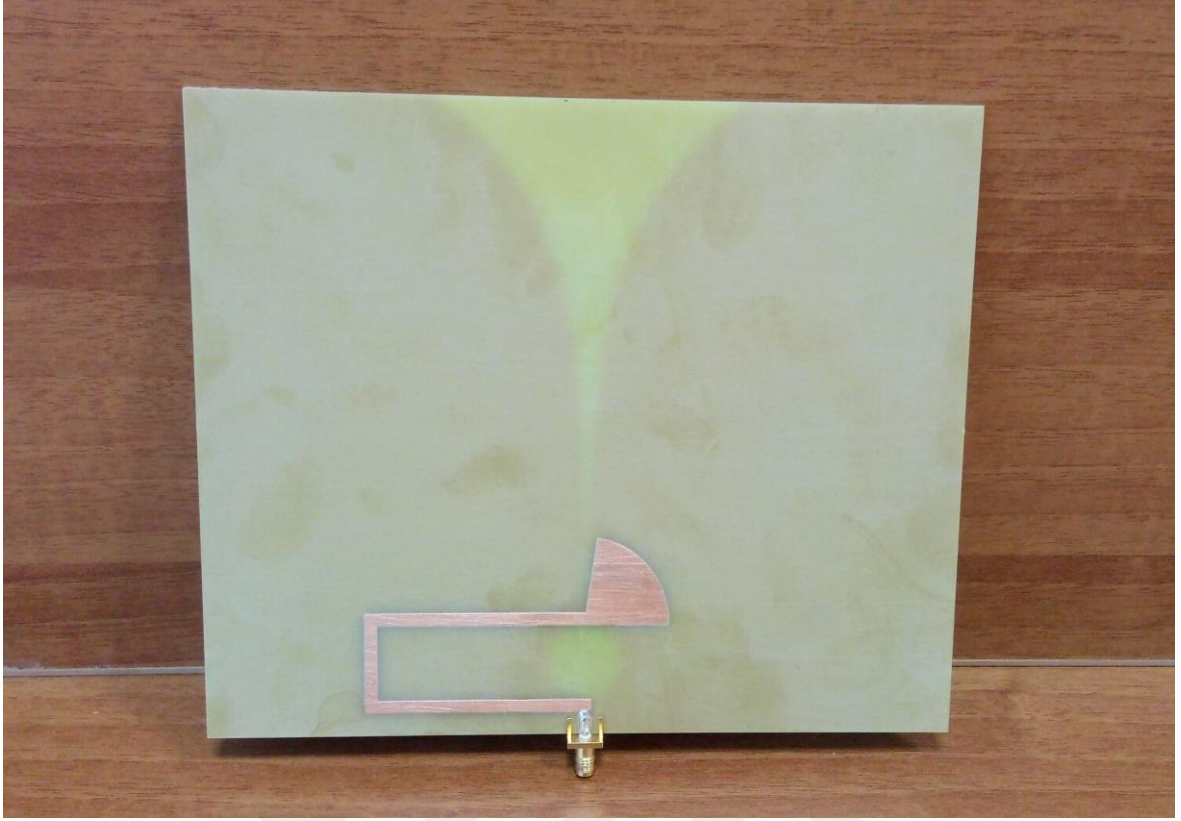
## 5.2. Üretilen Anten ve Ölçüm Sonuçları

Parametrik analizi ve simülasyonu yapılan Vivaldi Anteni üretilmiş ve geri dönüş kaybı ölçümü için kurulum yapılmıştır. Geri dönüş kaybı, bir anten ve beslemesi arasındaki eşleşmeyi görmek için ölçülür.  $S_{11}$  ölçümü olarak da bilinen bu ölçüm, bir ağ analizörü kullanılarak yapılır. Ölçümden önce; açık devre, kısa devre ve yük konnektörleri ağ analizörün port-1'ine bağlanıp gerekli frekans bandında kalibrasyon gerçekleştirilir. Daha sonra anten, kalibrasyonu gerçekleştirilen ağ analizörünün port-1'ine bağlanarak geri dönüş kaybı ölçümü gerçekleştirilir.

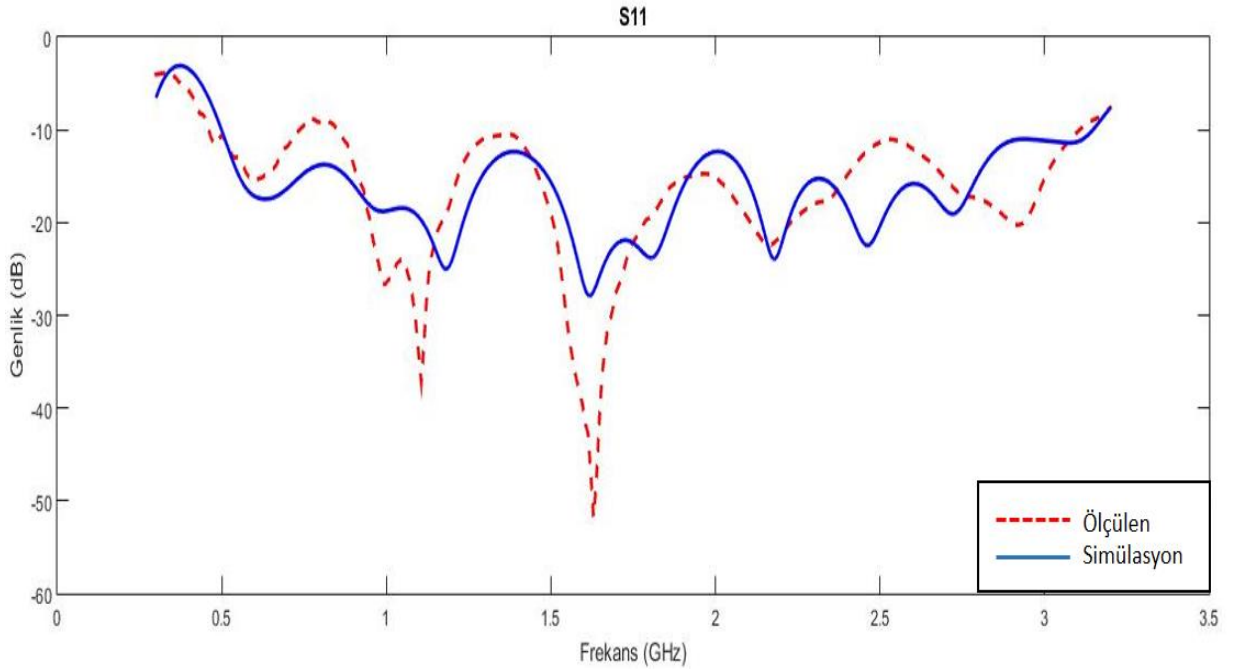
Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de üretilen Vivaldi Anteninin ön ve arka yüzleri gösterilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen geri dönüş kaybı grafiği ile üretilen antenin ağ analizörü yardımıyla ölçülen geri dönüş kaybı grafiği Şekil 5.9’da verilmiştir.



**Şekil 5.7.** Üretilen Anteninin Ön Yüzünün Görünümü



**Şekil 5.8.** Üretilen Antenin Arka Yüzünün Görünümü



**Şekil 5.9.** Simülasyon ve Ölçüm Sonucunda Elde Edilen Geri Dönüş Kayıpları

Şekil 5.9 incelendiğinde ağ analizörüyle yapılan ölçümler ile simülasyon sonuçlarının benzer çıktığı görülmektedir. Arada bazı farklılıkların bulunması kullanılan alttaş kalınlığının her yerde aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. Yapılan ölçümlerde alttaş kalınlığı bazı yerlerde 1.3 mm'ye kadar düştüğü görülmüştür. Ayrıca yapılan ölçümler esnasında çevreden kaynaklanan yansılarda geri dönüş kaybını etkilemektedir.

### 5.3. Anten Dizisi Tasarımı

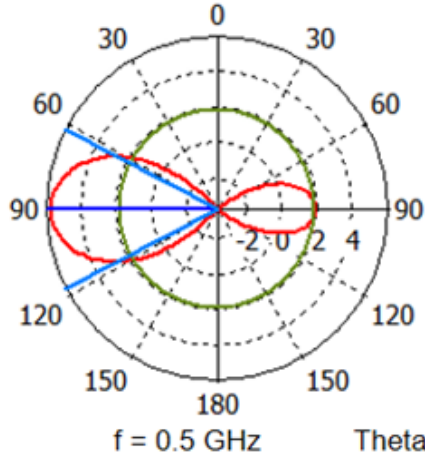
Bu bölümde, ışınma örüntüsü, yarı güç hüzmeye genişliği ve yan kulakçık seviyesinde iyileşme sağlanması amacıyla tasarlanan Vivaldi anten dizisinden bahsedilecektir. Anten dizileri, daha önce belirtildiği gibi kazanç seviyesini arttırmak ve ışınma örüntülerinde daha iyi sonuçlar elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Anten dizisi oluşturulurken kullanılan en önemli parametre dizi faktörüdür. Dizi faktörü, bölüm 4.2'de verilen denklemde görüldüğü gibi tek tek antenlerin fazlarına ve aralarındaki mesafeye bağlıdır.

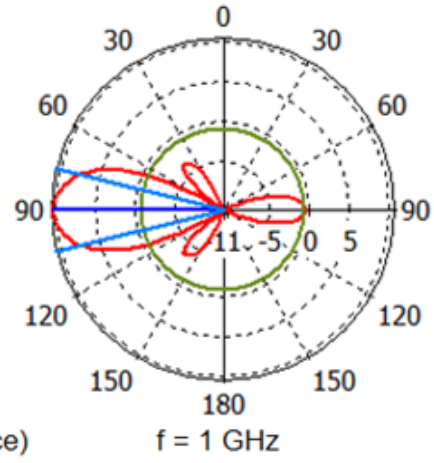
YNR sistemleri için doğrusal dizi tasarımı uygundur. Bu tasarımda bütün antenler merkez frekansındaki dalga boyunun yarısı kadar aralıklarla dizilir ve aynı büyüklükteki ve fazdaki sinyallerle beslenir.

Bu teze konu olan anten dizisinde 8 adet Vivaldi anteni aralarında yaklaşık olarak en yüksek çalışma frekansındaki dalga boyunun yarısı kadar mesafe (65 mm) bırakılarak dizilmiştir.

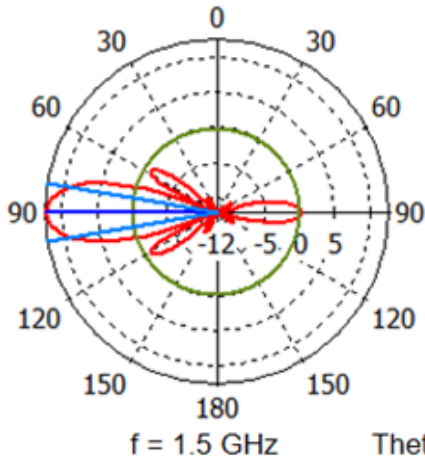
Şekil 5.10 ve şekil 5.11' de sırasıyla  $\phi = 0^\circ$  ve  $\theta = 90^\circ$ 'de 0.5 GHz, 1 GHz, 1.5 GHz, 2GHz, 2.5 GHz ve 3 GHz'deki 8 anten için uzak alan ışınma örüntüleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde yan kulakçıkların seviyelerinin düştüğü ve ana hüzmelerin seviyelerinin arttığı görülmektedir. Tasarlanan anten dizisi için kazanç ve ön-arka ışınma oranı grafikleri sırasıyla Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir.



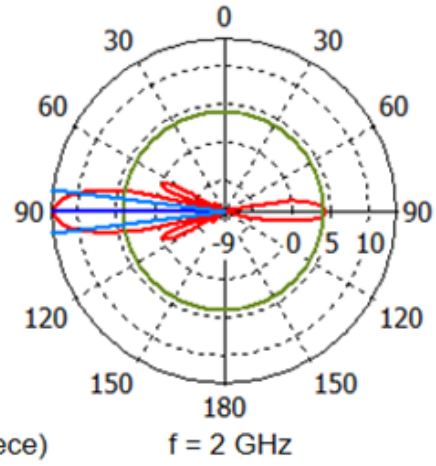
(a)



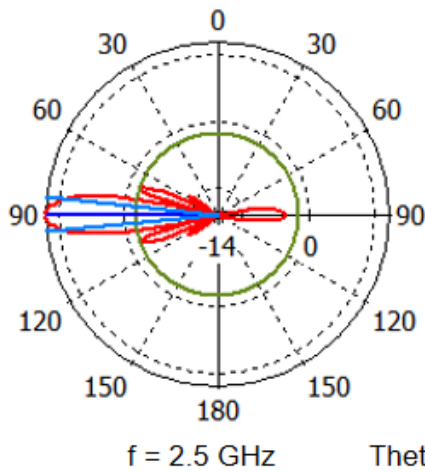
(b)



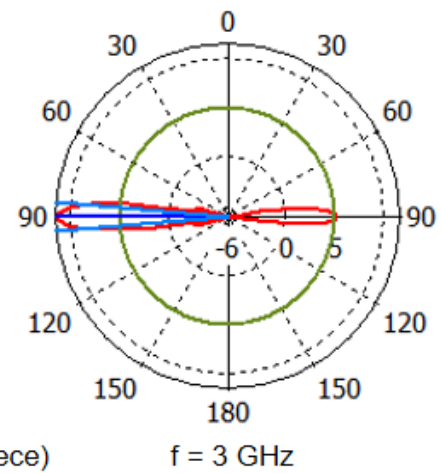
(c)



(d)

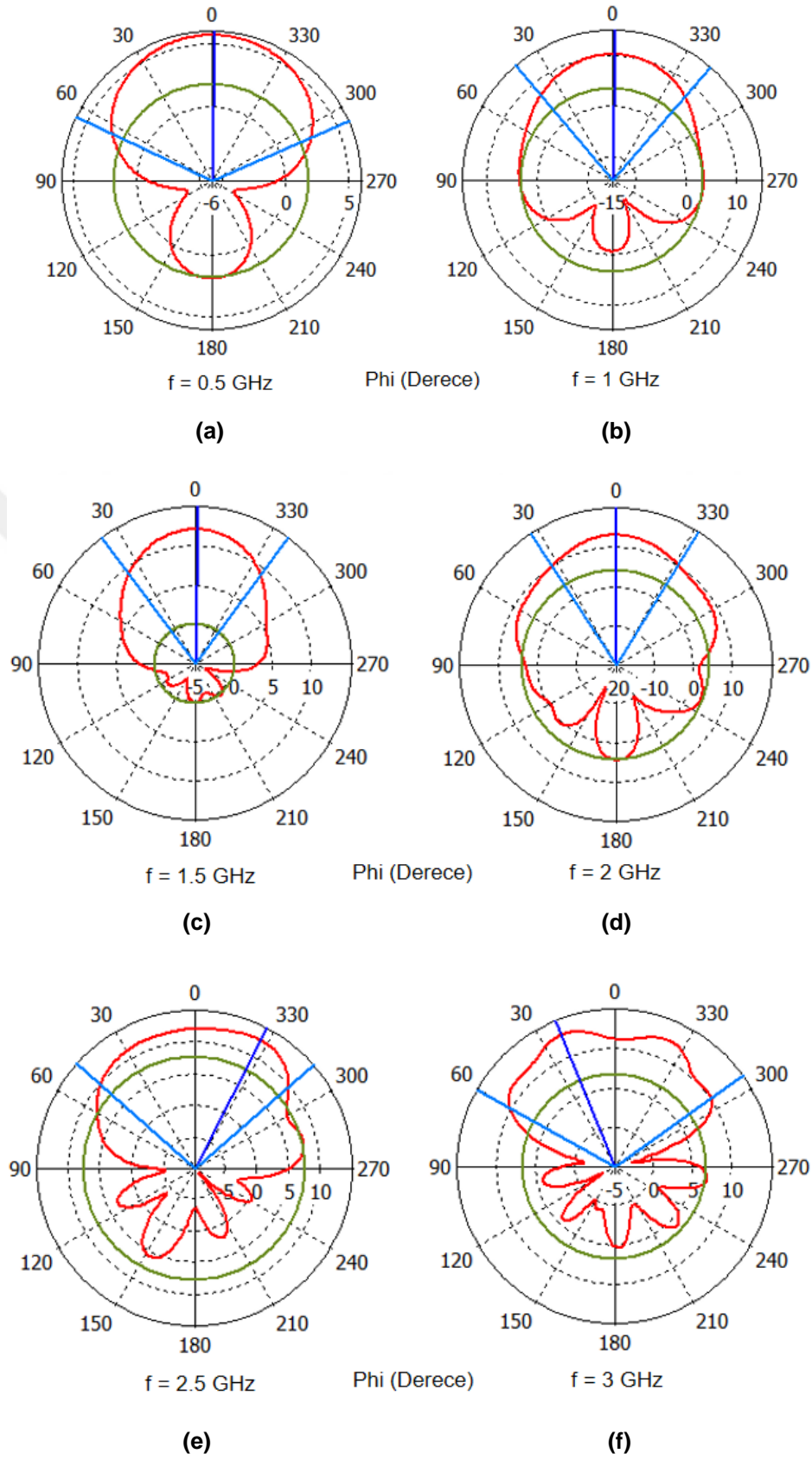


(e)

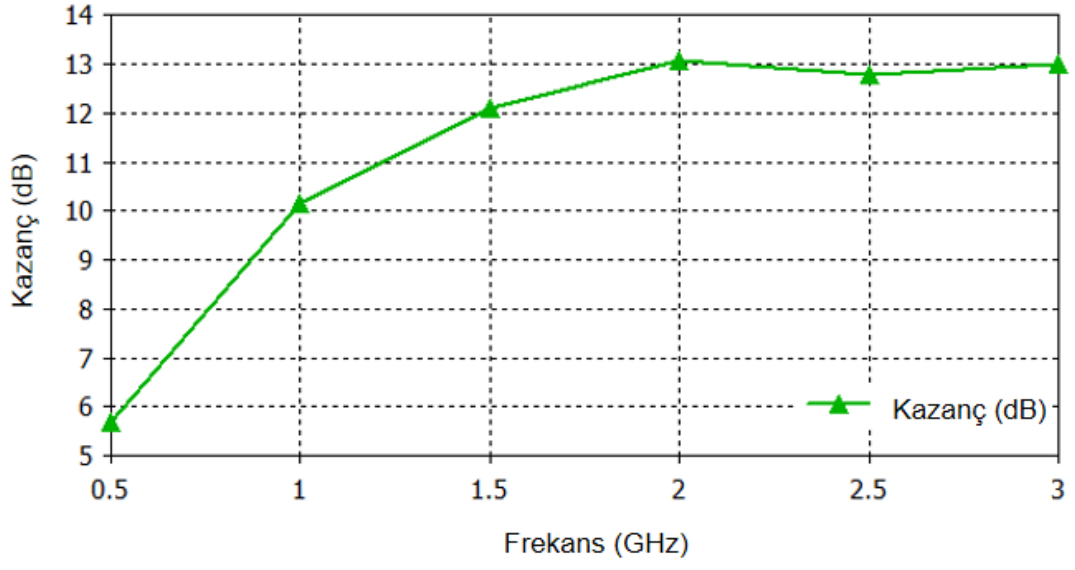


(f)

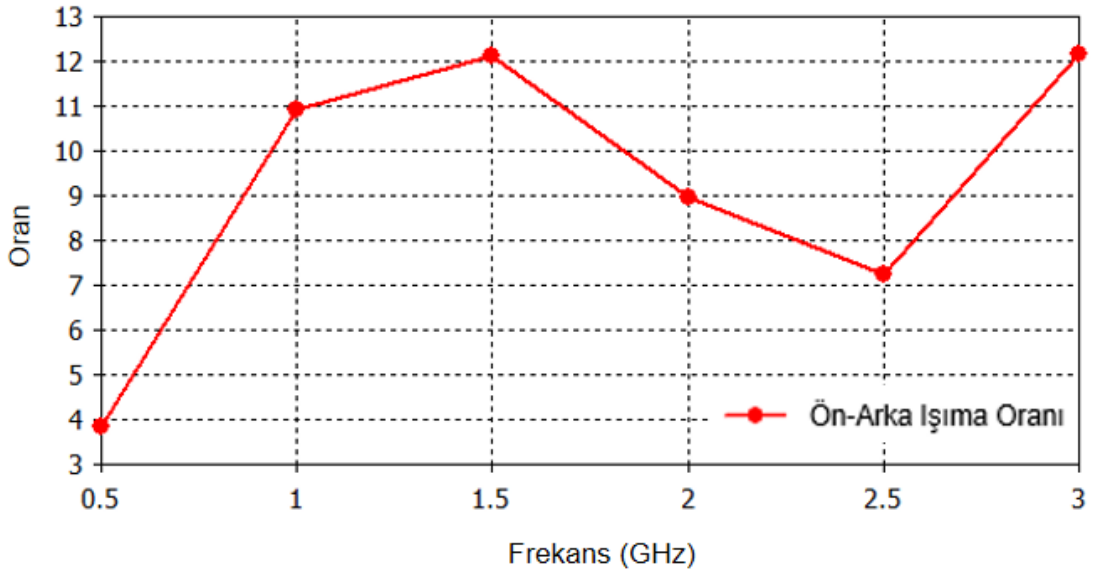
Şekil 5.6. Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri ( $\phi = 0^\circ$ )



**Şekil 5.11.** Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri ( $\theta = 90^\circ$ )



Şekil 5.12. Anten Kazanç Grafiği



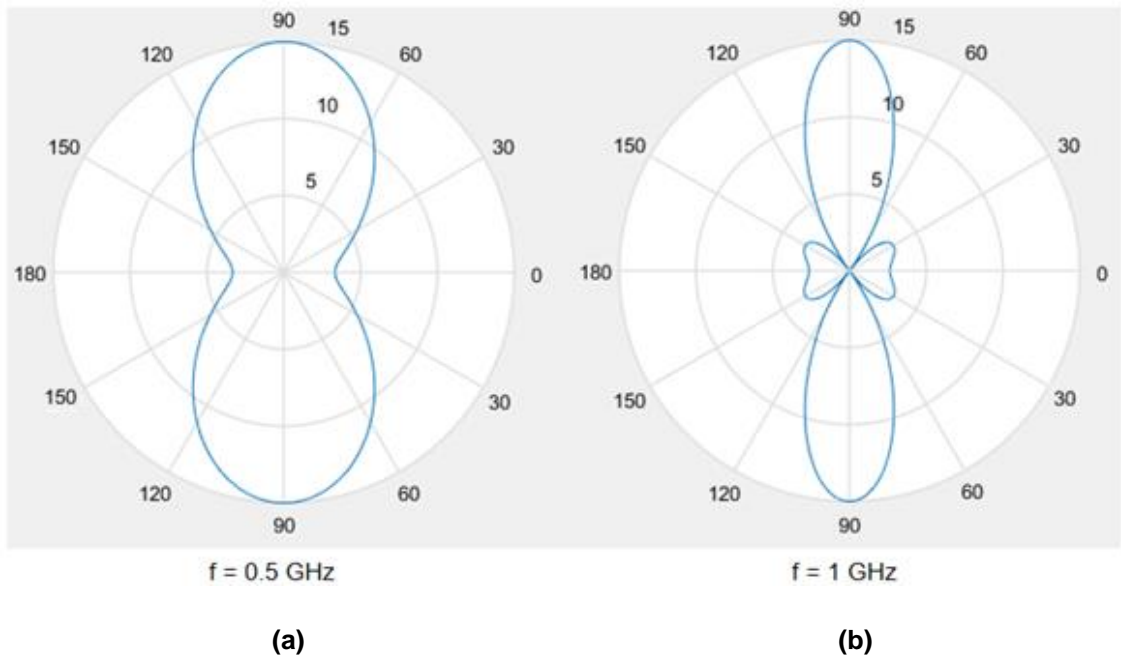
Şekil 5.13. Ön-Arka Işıma Oranı

**Çizelge 5.4.** Anten Dizisinin Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri ( $\phi = 0^\circ$ )

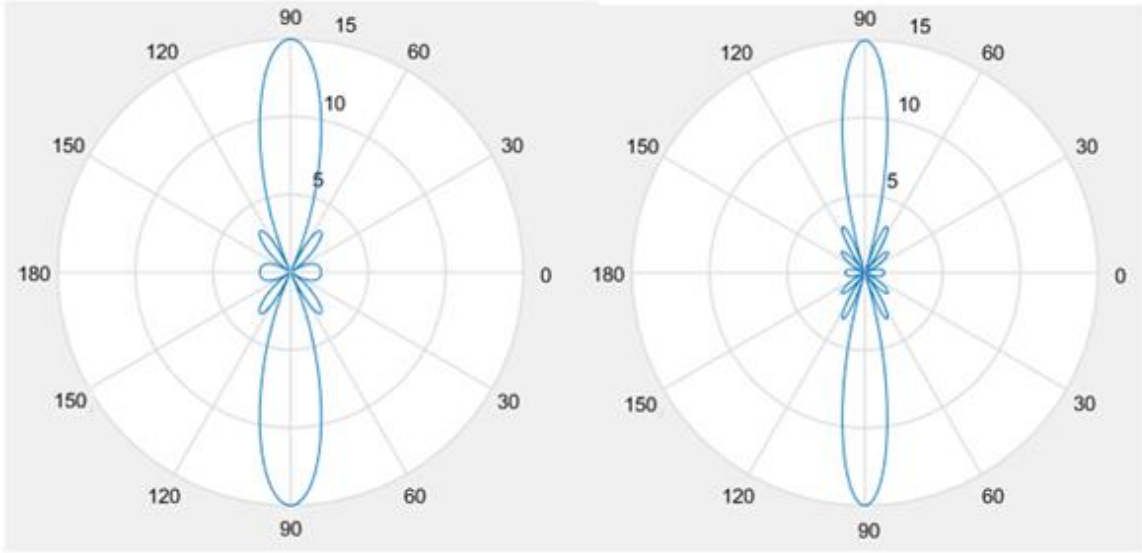
Frekans	Ana Hüzme Seviyesi	Ana Hüzme Yönü	Hüzme Genişliği (3 dB)	Yan Hüzme Seviyesi
0.5	5.7 dB	90 °	54.7	-3.8
1	10.2 dB	90 °	28.4 °	-10.9 dB
1.5	12.1 dB	90 °	19.2 °	-12.1 dB
2	13.1 dB	90 °	14.3 °	- 9 dB
2.5	12 dB	90 °	11.5 °	-13.7 dB
3	11.2 dB	90 °	9.5 °	-6.1 dB

Kazanç ve ön-arka ışınım oranı grafikleri incelendiğinde, anten dizisi tasarımı ile birlikte 5.7 – 13.1 dB arası kazanç ve 4 – 12 dB arasında ön-arka ışınım oranı elde edilmiştir.

Anten sayısı iki katına çıkarılıp, antenler arası mesafe yarıya düşürülerek yeni bir anten dizisi oluşturulacaktır. Bu sayede aynı hacimdeki yeni bir anten dizisiyle bu bölümün başında tasarlanan 8 elemandan oluşan anten dizisinin sonuçları karşılaştırılacaktır. Tasarlanacak olan yeni anten dizisi 15 elemandan oluşacak ve antenler arası mesafe 32.5 mm (en yüksek çalışma frekansındaki dalga boyunun yaklaşık olarak  $\frac{1}{4}$ 'ü) olacaktır. Bu anten dizisinin dizi faktörü Şekil 5.14'te verilmiştir.





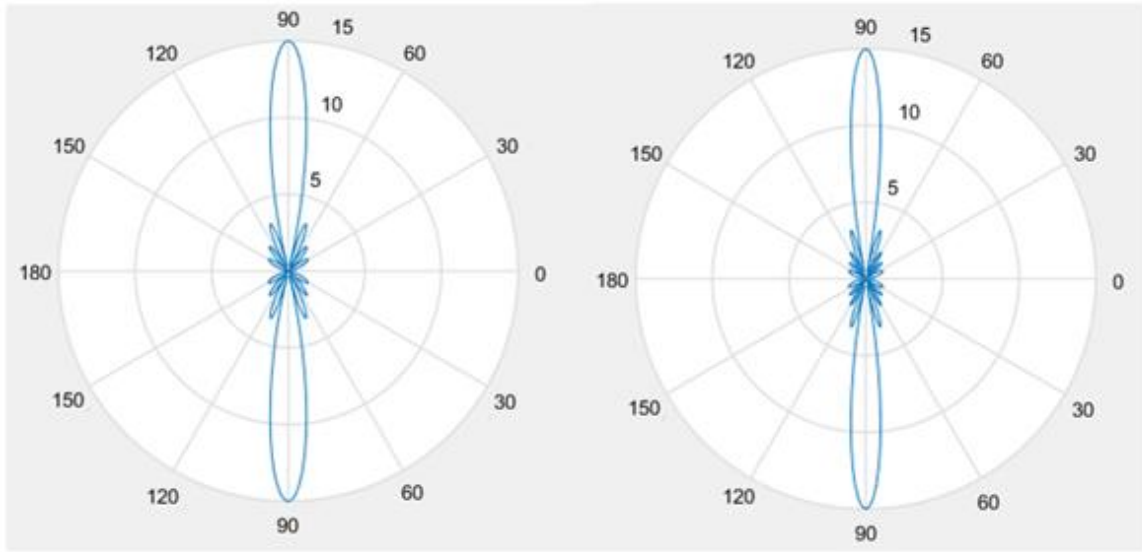


f = 1.5 GHz

f = 2 GHz

(c)

(d)



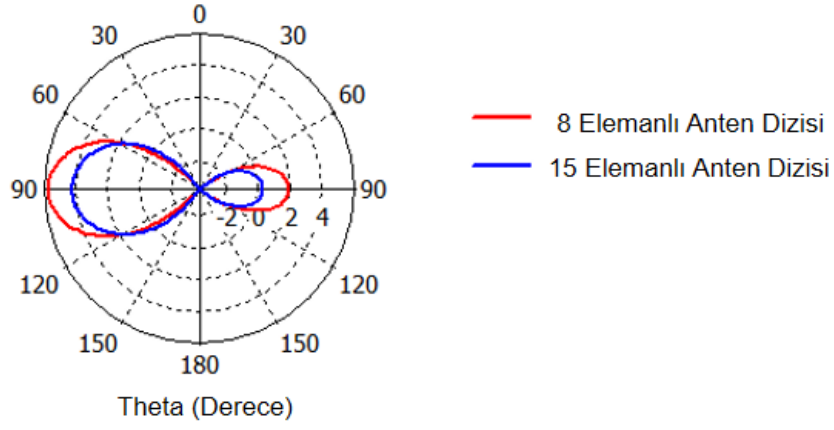
f = 2.5 GHz

f = 3 GHz

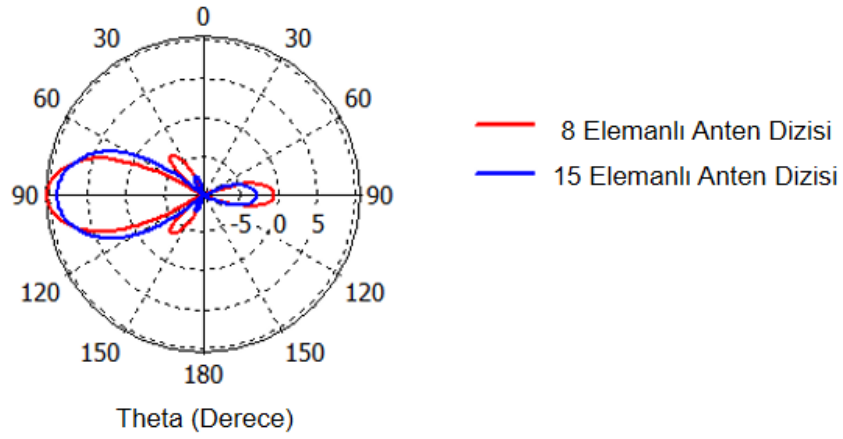
(e)

(f)

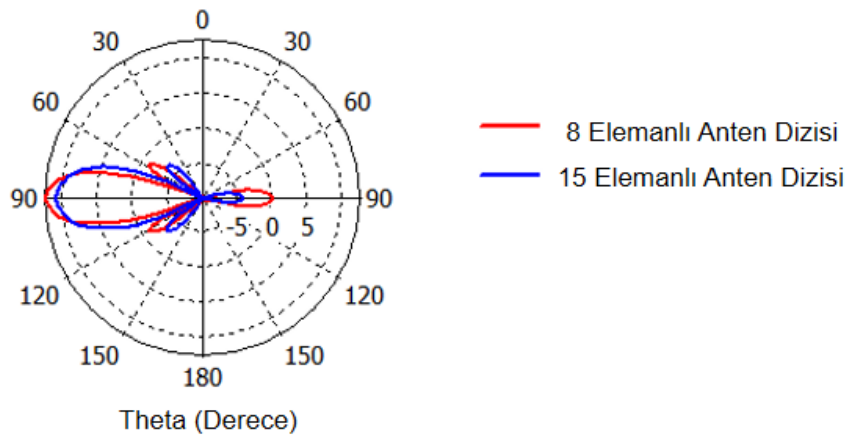
Şekil 5.14. N = 15 ve d = 32.5 mm için Dizi Faktörü Örüntüleri



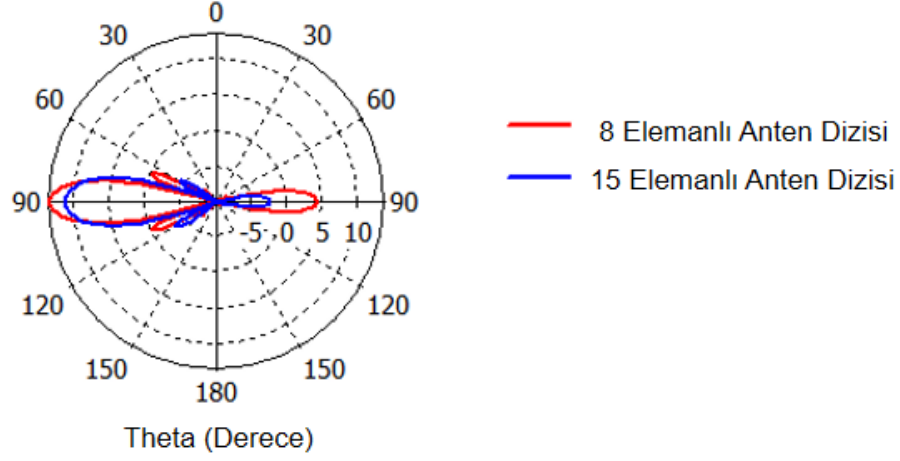
**Şekil 5.15.** 0.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



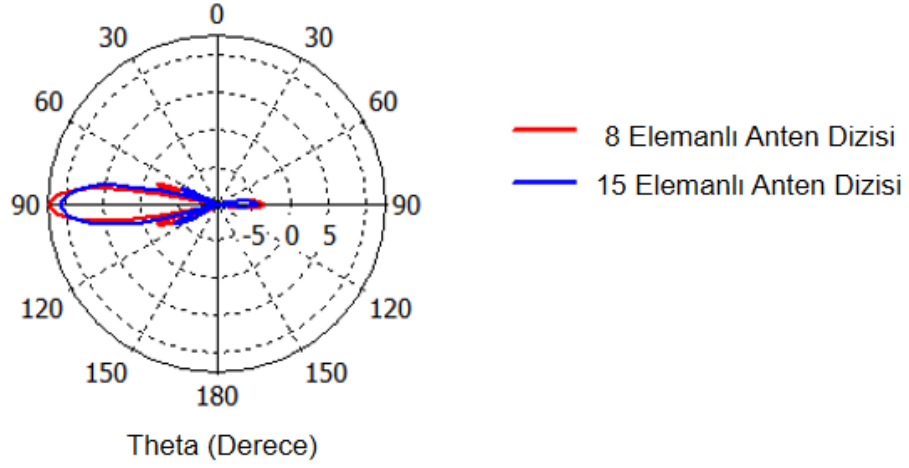
**Şekil 5.16.** 1 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



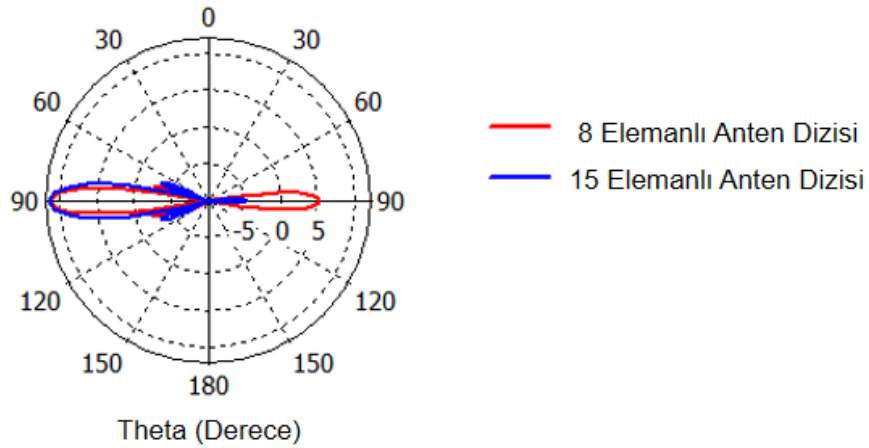
**Şekil 5.17.** 1.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



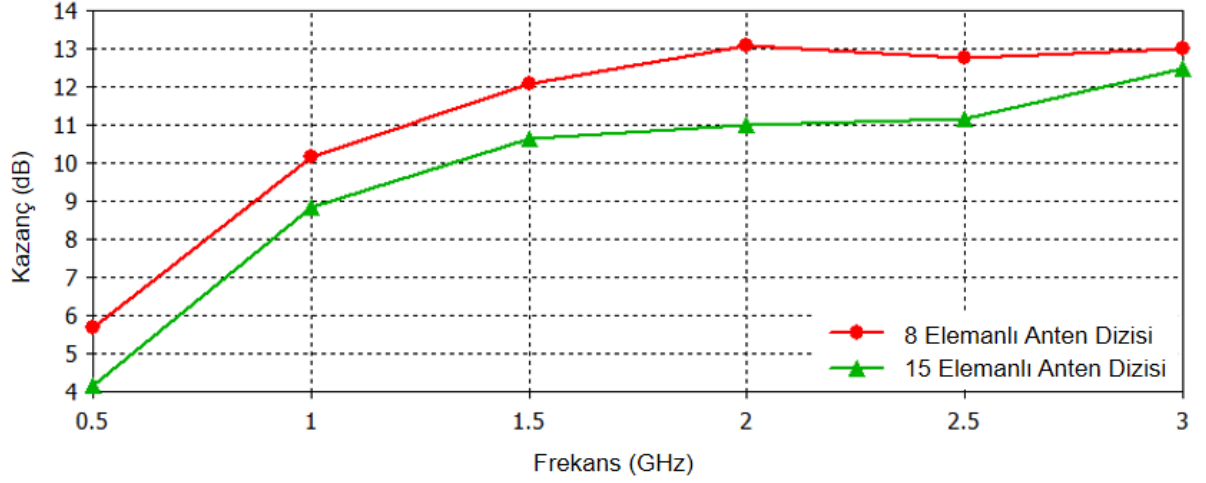
Şekil 5.18. 2 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



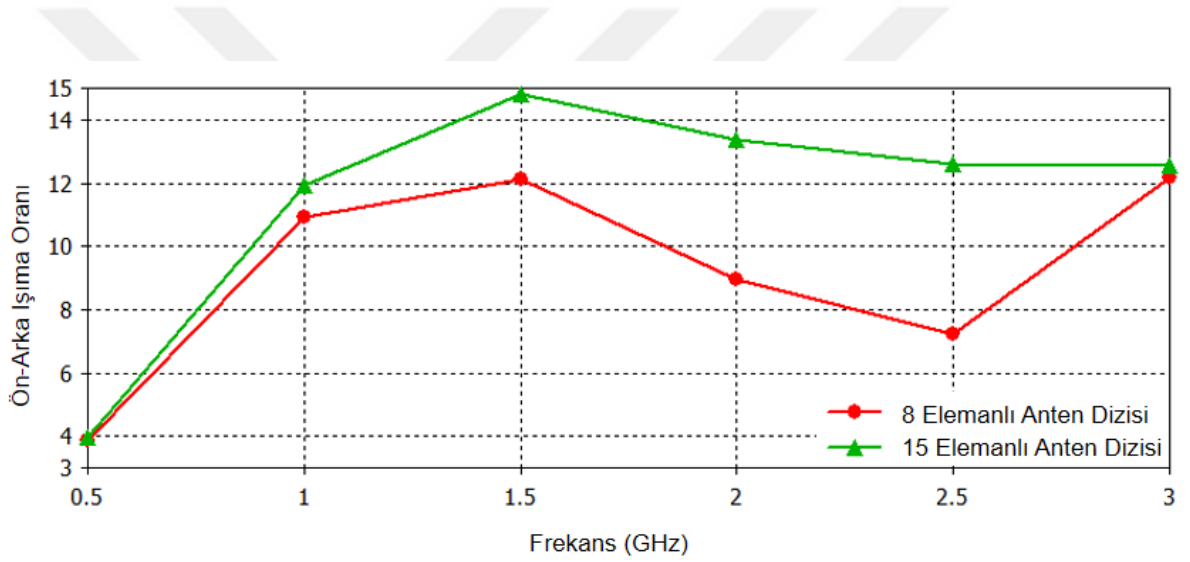
Şekil 5.19. 2.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



Şekil 5.20. 3 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



Şekil 5.21. Anten Kazanç Grafiği



Şekil 5.22. Ön-Arka Işıma Oranı

Çizelge 5.5. 15 Elemanlı Anten Dizisinin Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri

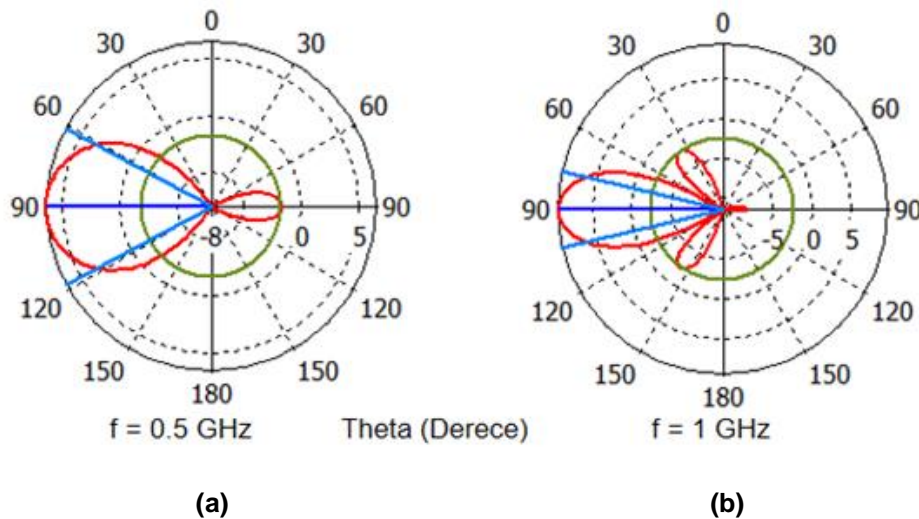
Frekans	Ana Hüzme Seviyesi	Ana Hüzme Yönü	Hüzme Genişliği (3 dB)	Yan Hüzme Seviyesi
0.5	4.17 dB	90 °	69 °	-4 dB
1	8.9 dB	90 °	37.4 °	-11.9 dB
1.5	10.7 dB	90 °	25.3 °	-14 dB
2	11 dB	90 °	18.6 °	- 13.4 dB
2.5	10.5 dB	90 °	15.1 °	-14.6 dB
3	11.3 dB	90 °	12.8 °	-14.6 dB

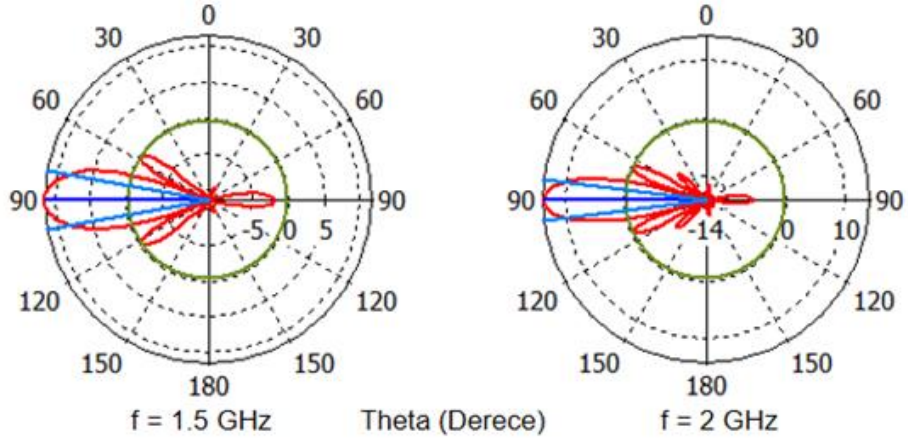
Işıma örüntüleri incelendiğinde 8 elemanlı anten dizisinin ana hüzme seviyeleri 15 elemanlı anten dizisinin ana hüzme seviyelerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Zaten bu durum kazanç grafiği incelendiğinde de görülecektir. 8 elemanlı anten dizisi 6 – 13 dB arası kazanç sağlarken, 15 elemanlı anten dizisi 4 – 12 dB arası kazanç sağlamaktadır. Ön-arka ışımada ise 15 elemanlı anten dizisi daha iyi sonuçlar vermiştir. 15 elemanlı anten dizisi 4 – 15 dB arası ön-arka ışımaya oranına sahipken, 8 elemanlı anten dizisi 4 – 12 dB arası ön-arka ışımaya oranına sahiptir. Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5 karşılaştırıldığında ise yan kulakçık seviyelerinin 8 elemanlı anten dizisinde daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum kazancın 8 elemanlı anten dizisinde bir miktar daha fazla olmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan anten sayısının artmasından dolayı 15 elemanlı anten dizisinin ana hüzme genişlikleri 8 elemanlı anten dizisine göre bir miktar daha dardır. 8 elemanlı anten dizisinin maliyeti 15 elemanlı anten dizisinin yarısı olduğu ve ışımaya örüntüleri ile kazanç grafiği düşünüldüğünde 8 elemanlı anten dizisi tercih edilmelidir.

#### 5.4. Yansıtıcı Plaka Tasarımı

Tasarlanan anten dizisinin geri yöndeki ışımalarını düşürme amacıyla anten dizisinin arkasına bir yansıtıcı plaka yerleştirilmiştir. Bu plaka mükemmel iletken bir malzeme olup anten dizisine olan uzaklığı, en düşük çalışma frekansında boş uzaydaki dalga boyunun yaklaşık çeyreği kadardır. Diğer bir ifade ile anten dizisi ile yansıtıcı plaka arasındaki mesafe 170 mm'dir.

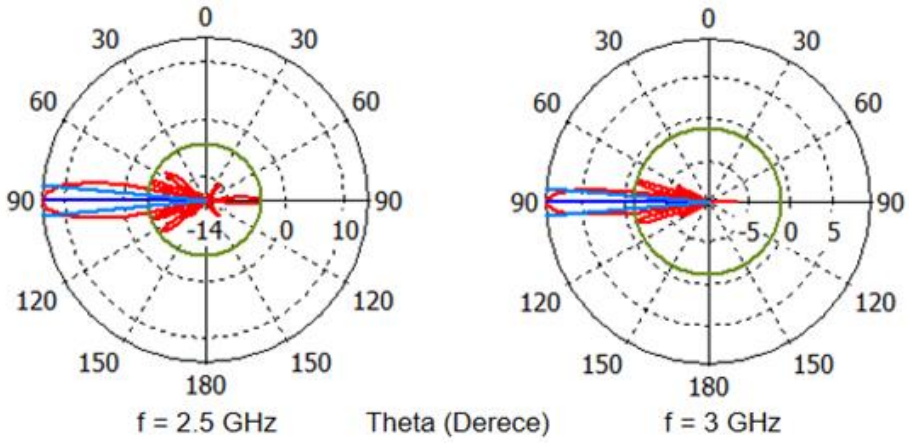
Şekil 5.22'de anten dizisinin arkasına yerleştirilen yansıtıcı plaka sonucunda elde edilen uzak alan örüntüleri farklı frekanslar için verilmiştir.





(c)

(d)

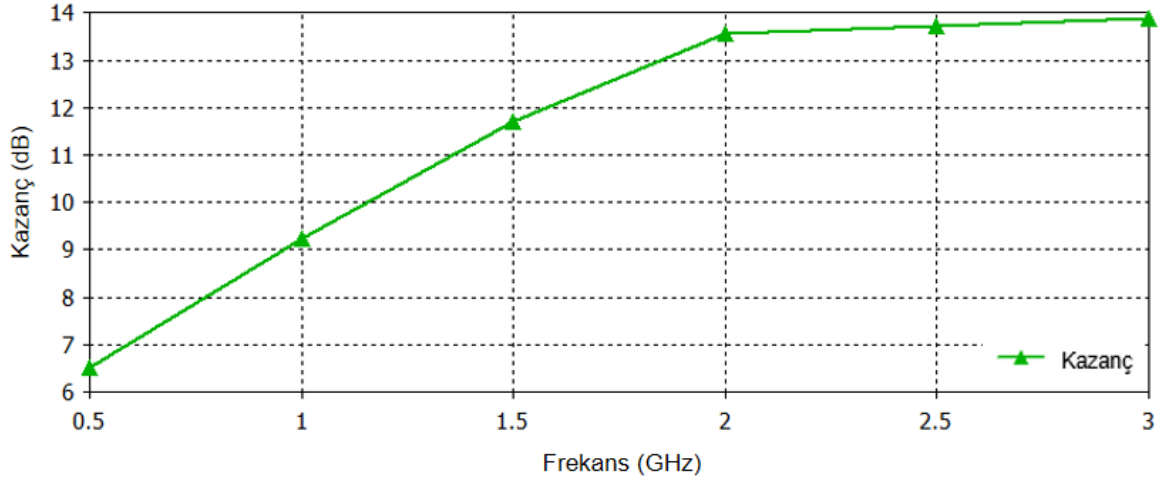


(e)

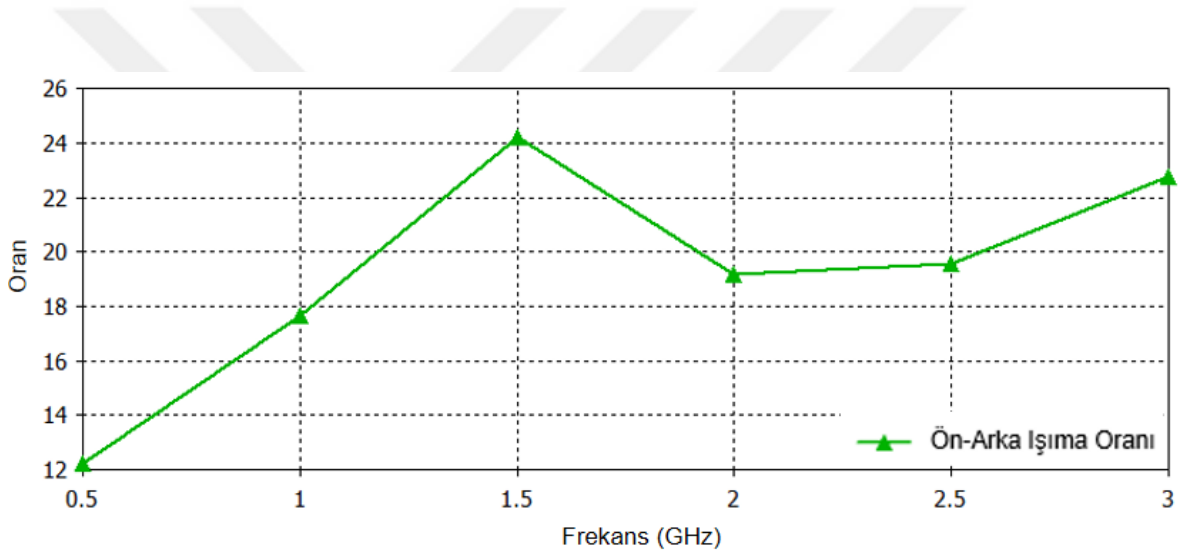
(f)

**Şekil 5.23.** Farklı Frekanslardaki Uzak Alan Örüntüleri

Tasarlanan yansıtıcı plaka ile sistemin kazancı ve ön-arka ışırma oranı sırasıyla Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.24. Anten Kazanç Grafiği



Şekil 5.25. Ön-Arka Işıma Oranı

**Çizelge 5.6.** Yansıtıcı Plakalı Anten Dizisinin Uzak Alan Örüntülerinin Özellikleri

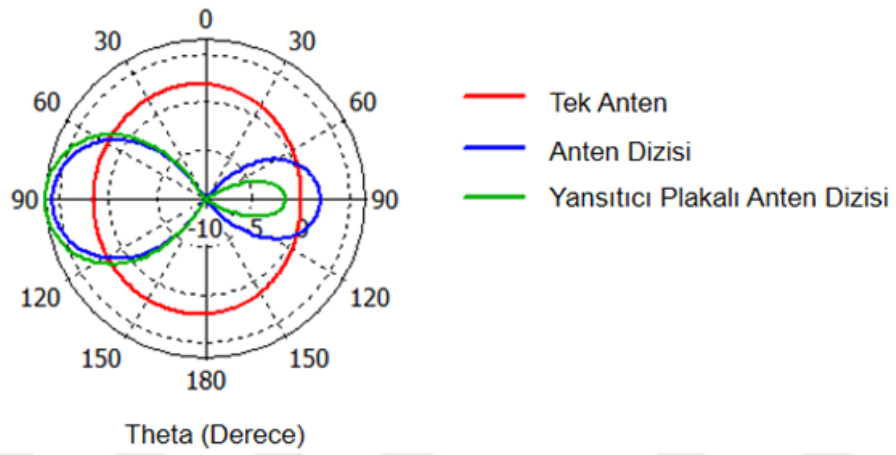
Frekans	Ana Hüzme Seviyesi	Ana Hüzme Yönü	Hüzme Genişliği (3 dB)	Yan Hüzme Seviyesi
0.5	6.2 dB	90 °	56.4 °	-8.2 dB
1	9.2 dB	90 °	27 °	-11.6 dB
1.5	11.4 dB	90 °	20.4 °	-11.7 dB
2	13.6 dB	90 °	14 °	- 13.9 dB
2.5	13.7 dB	90 °	11.3 °	-17.8 dB
3	9.2 dB	90 °	9.8 °	-10.3 dB

Tasarlanan yansıtıcı plaka ile 6 dB ile 14 dB arası kazanç ve 12 ile 24 arası ön-arka ışım oranı elde edilmiştir. Yansıtıcı plaka olmadan tasarlanan anten dizisi ile yansıtıcı plakalı anten dizisinin ön-arka ışım oranı karşılaştırıldığında, önemli bir artışın olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırma grafiği 6. Bölümde verilmiştir.

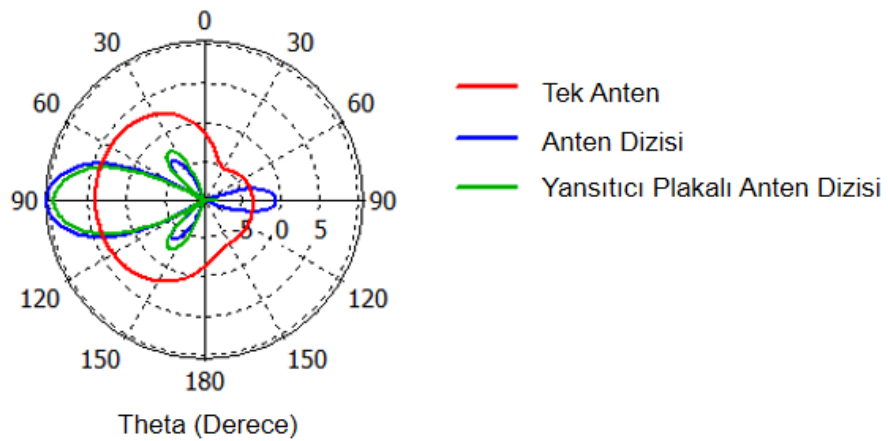


## 6. SONUÇLAR ve İRDELEME

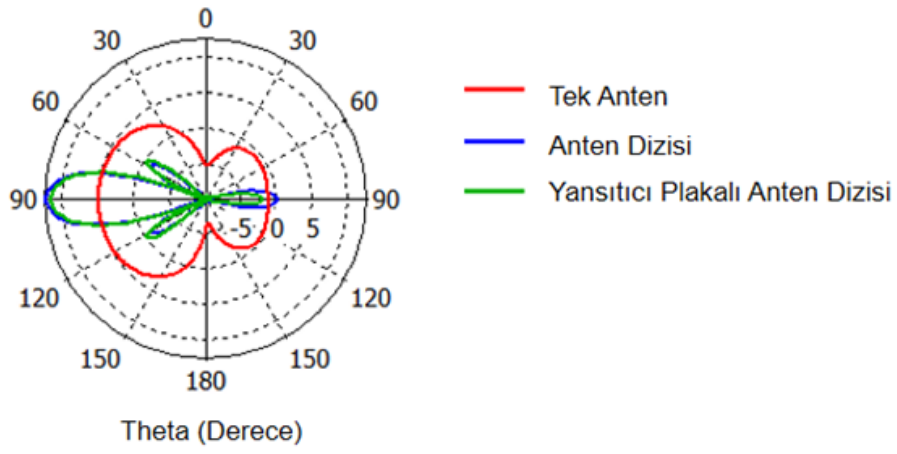
Bu bölümde tasarlanan Vivaldi anten, anten dizisi ve yansıtıcı plakanın ışırma örüntüleri karşılaştırılacaktır. Tek antenin, anten dizisinin ve arka plakanın kazanç ve ön-arka ışırma oranları incelenecek ve bu tasarımların ne kadar başarılı oldukları gösterilecektir. Şekil 6.1'den Şekil 6.6'ya kadar her üç tasarım için farklı frekanslardaki ışırma örüntüleri gösterilmiştir.



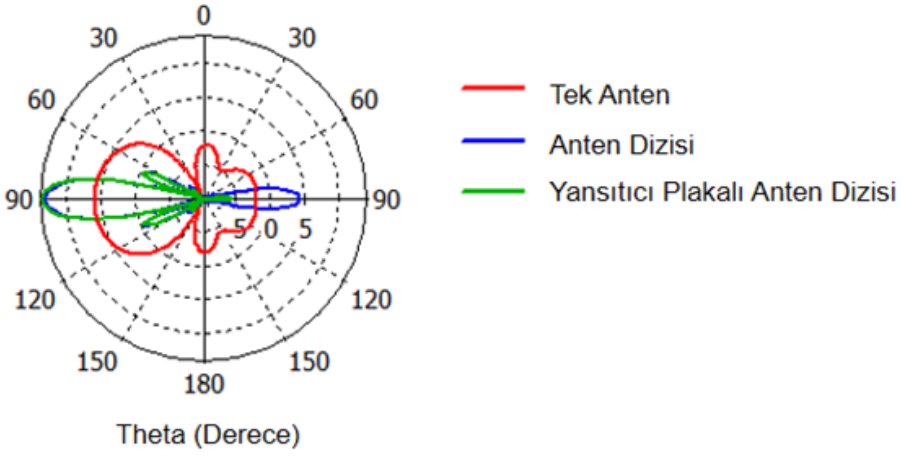
Şekil 6.1. 0.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



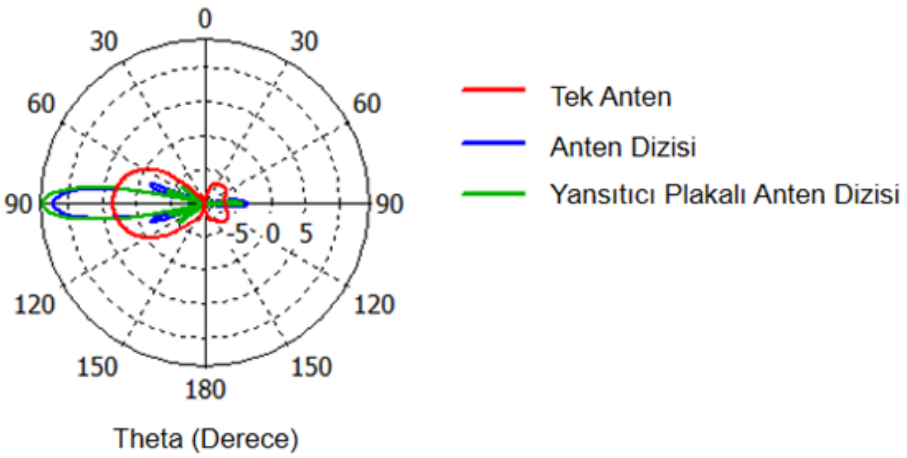
Şekil 6.2. 1 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



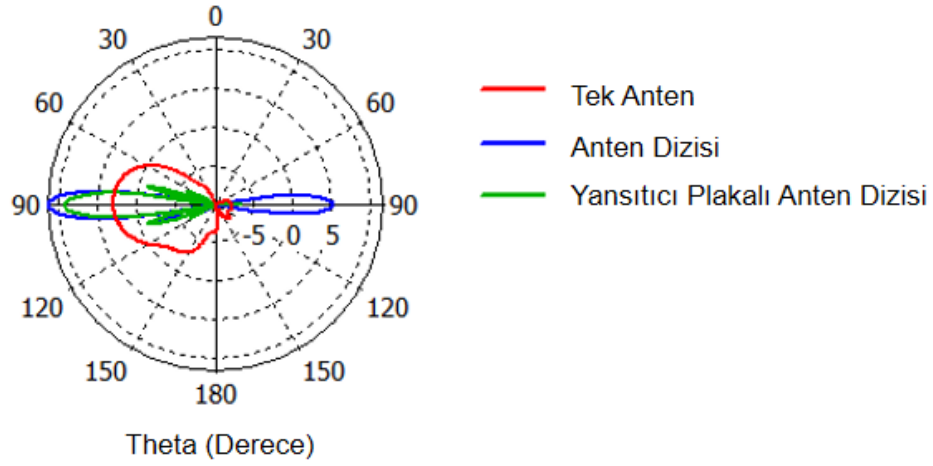
Şekil 6.3. 1.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



Şekil 6.4. 2 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



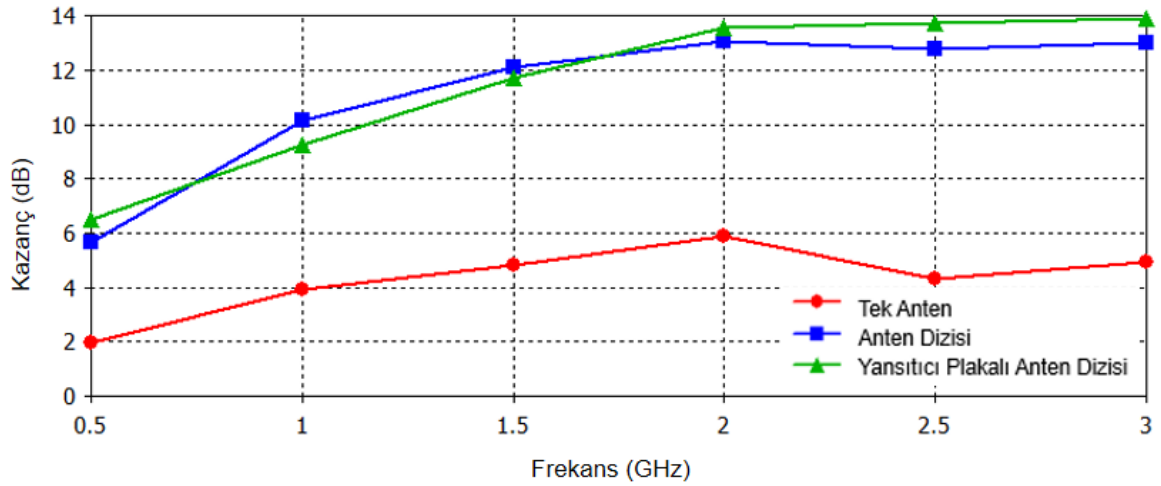
Şekil 6.5. 2.5 GHz için Uzak Alan Örüntüsü



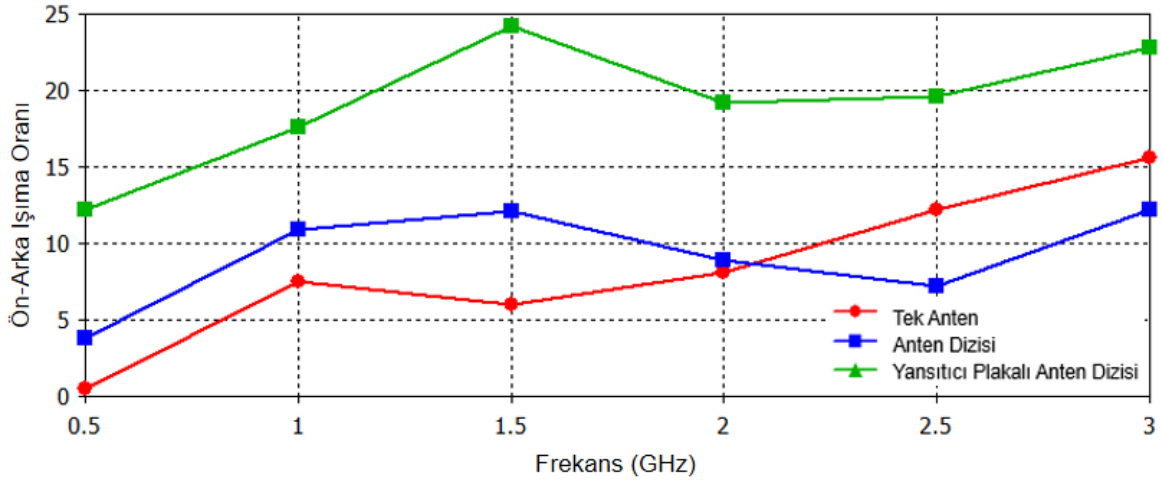
Şekil 6.6. 3 GHz için Uzak Alan Örüntüsü

Uzak alan örüntüleri incelendiğinde tek antenin yan kulakçıklarının ve arka hüzmelerinin seviyeleri anten dizisi ve yansıtıcı plaka tasarımıyla elde edilen sisteme göre daha büyüktür. Anten dizisi tasarımıyla yan kulakçık seviyelerindeki azalma uzak alan örüntüleri incelendiğinde görülmektedir. Ayrıca yansıtıcı plaka tasarımıyla da arka hüzmelerinin küçüldüğü görülmektedir.

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de ise sırasıyla kazanç ve ön-arka ışıma oranları gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Anten Kazancı Karşılaştırması



**Şekil 6.8.** Ön-Arka Işıma Oranı Karşılaştırması

Şekil 6.7’deki anten kazancı grafiği incelendiğinde tek antende 2 - 6 dB arası kazanç elde edilmiştir. Anten dizisi tasarımıyla birlikte anten kazancı 4 – 12 dB seviyelerine çıkmıştır. Bu da anten dizisinin tek antene göre önemli derece de kazanç sağladığının bir göstergesidir. Diğer taraftan anten dizisinin arkasına konulan yansıtıcı plaka da kazançta bir miktar katkı sağlamıştır.

Şekil 6.8’deki ön-arka ışıma oranı grafiğine bakıldığında tasarlanan tek antenin 1 ile 16 arası ön-arka ışıma oranına sahip olduğu görülmektedir. Anten dizisi tasarımıyla birlikte yan kulakçıkların küçülmesiyle ön-arka ışıma oranında bir artış gözlemlenmiştir. Bu oran anten dizisinin kullanılmasıyla 4 – 14 dB arası değerleri bulmaktadır. Anten dizisinin arkasına konulan yansıtıcı plaka ile birlikte bu oran 13 – 20 dB seviyelerine çıkmıştır. Çünkü yansıtıcı plaka ile birlikte arka hüzmeler küçülmüş ve ana hüzmeler büyümüştür. Bu durum ön-arka ışıma oranının büyümesini sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Türk, Aksoy, Şentürk, Özakin, Ünal, Mağat, Çalışkan, Araca Monteli İleri Bakan Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) için Çok Geniş Bantlı Anten Sistemleri Tasarımı ve Uygulaması, İstanbul, **2013**.
- [2] J. McDonald et al., “Alternatives for Landmine Detection,” Rand Corporation, Arlington, VA, **2003**.
- [3] <http://www.zeminarastirma.com/jeoradar/> (Mayıs, **2018**).
- [4] D.J. Daniels, Ground Penetrating Radar 2nd Ed, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 15, Cornwall, U.K., **2004**.
- [5] Hulsenbeck Et Al.: German Pat. No. 489434, **1926**.
- [6] Steenson, B. 'Radar Methods for the Exploration Of Glaciers'. Phd Thesis, Calif. Inst. Tech., Pasadena, CA, USA, **1951**.
- [7] Evans, S.: 'Radio Techniques for the Measurement Of Ice Thickness', Polar Record, 11, pp. 406-410, **1963**.
- [8] Unterberger, R. R.: 'Radar and Sonar Probing Of Salt'. 5th Int. Symp. on Salt, Hamburg (Northern Ohio Geological Society), Pp. 423-437, **1978**.
- [9] Kadaba, P. K.: 'Penetration of 0.1 Ghz to 1.5 Ghz Electromagnetic Waves into the Earth Surface for Remote Sensing Applications'. Proc. IEEE S. E. Region 3 Conf, Pp. 48-50, **1976**.
- [10] Morey, R. M.: 'Continuous Sub-Surface Profiling By İmpulse Radar'. Proc. Conf. Subsurface Exploration for Underground Excavation And Heavy Construction. Am. Soc. Civ. Eng., pp. 213-232, **1974**.
- [11] Cook, J. C: 'Status of Ground-Probing Radar and Some Recent Experience'. Proc. Conf. Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction. Am. Soc. Civ. Eng., pp. 175-194, **1974**.
- [12] Cook, J. C: 'Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks', Geophys., 40, Pp. 865-885, **1975**.
- [13] Roe, K. C, Ellerbruch, D. A.: 'Development and Testing of A Microwave System to Measure Coal Layer Thickness Up to 25 Cm'. Nat. Bur. Stds., Report No.SR-723-8-79 (Boulder, CO), **1979**.
- [14] Nilsson, B.: 'Two Topics in Electromagnetic Radiation Field Prospecting'. Doctoral Thesis, University of Lulea, Sweden, **1978**.
- [15] Peters, L.P., Jr.; Daniels, J.J.; Young, J.D.; “Ground Penetrating Radar As A Subsurface Environmental Sensing Tool”, Proceedings Of The IEEE, Vol. 82, Issue 12, 1802 – 1822, **1994**.
- [16] King, R. W. P., and Smith, G. S.: 'Antennas in Matter' (MIT Press, **1981**).
- [17] Junkin, G. and Anderson, A. P. 'Limitations in Microwave Holographic İmaging Over A Lossy Half Space'. IEE Proc. F,135, (4), pp. 321-329, **1988**.

- [18] Brewitt-Taylor, C. R., Gunton, D. J., And Rees, H. D.: 'Planar Antennas On A Dielectric Surface', *Electron. Lett*, 17, (20), pp. 729-731, **1981**.
- [19] Burke, G. J., Johnson, W. A., and Miller, E. K.: 'Modelling of Simple Antennas Near to and Penetrating an Interface', *Proc. IEEE*, 71, (I), pp.174-175, **1983**.
- [20] Rutledge, D. B., and Muha, M. S.: 'Imaging Antenna Arrays', *IEEE Trans.*, AP-130, (Q), pp. 533-540, **1982**.
- [21] Lodge, Electric Telegraphy. U.S. Patent 609,154 (August 16, **1898**).
- [22] Carter PS. Wideband, Short Wave Antenna and Transmission Line System. U.S. Patent 2,181, 870 (December 5, **1939**).
- [23] Schelkunoff SA. *Advanced Antenna Theory*. New York: John Wiley and Sons; p 160, **1952**.
- [24] Lindenblad NE. Wide Band Antenna. U.S. Patent 2,239,724 (April 29, **1941**).
- [25] Paulsen L, West JB, Perger WF, Kraus J. Recent Investigations on the Volcano Smoke Antenna. *IEEE Antennas and Propagation International Symposium (Digest)*, Columbus, OH, Jun. **2003**.
- [26] Masters RW. Antenna, U.S. Patent 2430353 (November 4, **1947**).
- [27] Stohr W. Broadband Ellipsoidal Dipole Antenna. U.S. Patent 3,364,491, (January 16, **1968**).
- [28] Gibson PJ. The Vivaldi Aerial, *Proc. 9th Europe Microwave Conf.*, Brighton, U.K. **1979**.
- [29] David J. Daniels, *Ground Penetrating Radar*, 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, London, **2004**.
- [30] Cook, J.: 'Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks', *Geophysics*, 40, (5), pp. 865-885, **1975**.
- [31] Annan, A.P., Waller, W.M., Strangway, D.W., Rossiter, J.R., Redman, J.D., and Watts, R.D., The Electromagnetic Response of A Low-Loss, 2-Layer, Dielectric Earth for Horizontal Electric Dipole Excitation. *Geophysics*, Vol. 40, No. 2, 285-298, **1975**.
- [32] Smith, G.S., Directive Properties of Antennas for Transmission into A Material Half-Space. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 32, 232-246, **1984**.
- [33] F. B. Gross, *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*, New York: Mcgraw-Hill Professional, **2011**.
- [34] G. Chen, and R. C. Liu, "A 900 MHz Shielded Bow-Tie Antenna System for Ground Penetrating Radar," *Proceedings of the XIII Int. Conference on Ground Penetrating Radar*, Lecce, pp. 1-6, **2010**.
- [35] R. Clarke, R. Karunaratni, C. Schrader, "Ultra-Wide Band Antenna", *College of Engineering, San Jose State University*. Fall **2004**.

- [36] Seok H Choi, Jong K. Park, Sun K. Kim and Jae Y. Park, “A New Ultra-Wideband Antenna for UWB Applications”, Department of Radio Wave Engineering, Hanbat National University, August **2003**.
- [37] J. Silvertrim, “IEEE Ultra Wideband Presentation”, Innovative Wireless Technologies, 1047 Vista Park Drive Suite A, Forest, October **2003**.
- [38] Hans Gregory Schantz, “Radiation Efficiency Of UWB Antennas”, Proceedings of the 2002 IEEE UWBST Conference, **2002**.
- [39] L. R. Lewis, M. Fasset And J. Hunt, “A Broadband Stripline Array Element,” *IEEE Antennas Propagat. Symposium Digest*, pp. 335–337, **1974**.
- [40] W. F. Croswell, T. Durham, M. Jones, D. Schaubert, P. Friedrich And J. G. Maloney, “Wideband Arrays,” Chapter 12 in *Modern Antenna Handbook* (C. A. Balanis, Editor), John Wiley & Sons, Publishers, **2008**.
- [41] Balanis, C., *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Edition, John Wiley and Sons, New York, **2016**.
- [42] K. S. Yngvesson, T. L. Korzeniowski, Young-Sik Kim, E. L. Kollberg, J. F. Johansson, “The Tapered Slot Antenna - A New Integrated Element for Millimeter-Wave Applications,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, Vol. 37, No. 2, pp. 365–374, Feb. **1989**.
- [43] B. Schuppert, “Micorstrip/Slotline Transitions: Modeling and Experimental Investigation,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 36, No. 8, pp. 1272–1282, Aug. **1988**.
- [44] E. Gazit, “Improved Design of the Vivaldi Antenna,” *IEE Proceedings Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 135, No. 2, Pp. 89–92, April **1988**.
- [45] J. B. Knorr, “Slot-Sine Transitions,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 22, No. 5, pp. 548–554, May **1974**.

# ÖZGEÇMİŞ

## Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Hakan ŞENGÜL

Doğum Yeri: ZONGULDAK

Medeni Hali: Bekar

E-posta: [sengulhakan67@gmail.com](mailto:sengulhakan67@gmail.com)

Adresi: Keklik Pınarı Mahallesi 906. Sokak No:10, 06450 Çankaya/ANKARA

## Eğitim

Lisans: HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
BÖLÜMÜ (2009-2014)

## Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce- İyi

## İş Deneyimi

Enginsoft Turkey Mühendislik Yazılım Tic. Ltd. Şti. (2016-2017)

Üstünova Mühendislik ve Arge Ltd. Şti. (2017-)

## Deneyim Alanları

-

## Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-



## **Tezden Üretilmiş Yayınlar**

-

## **Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar**

-



## EK A. MATLAB FONKSİYONU

```
% Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği
% Hakan SENGUL
% N14120977
% 2018
% l aralıkla dizilmiş aynı fazda beslenen N tane antenin dizi faktörü
clear all;

% Antenler arası boşluk (dalga boyu cinsinden)
l = 0.5;

% Anten sayısı
N = 8;

% ışınma yönü
theta = 90;

A = 1;
i = sqrt(-1);
DF = zeros(1,360);

for theta=1:360

    % derece radyana çevirilir
    deg2rad(theta) = (theta*pi)/180;

    % Dizi faktörü hesaplama
    for n=0:N-1
        DF(theta) = DF(theta) + A*exp(i*n*2*pi*1*(cos(deg2rad(theta))-cos(theta*pi/180))) ;
    end
    DF(theta) = abs(DF(theta));

end

% Dizi faktörü örüntüsünün çizilmesi
polar(deg2rad,DF);
```



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 08/06/2018

Tez Başlığı / Konusu: UHF (Aşırı Yüksek Frekans) Bandında Yere Nüfuz Eden Radar Uygulamaları için Geniş Bantlı Anten Tasarımı

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 76 sayfalık kısmına ilişkin, 04/06/2018 tarihinde ~~şahsım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 7 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dâhil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: HAKAN ŞENGÜL  
Öğrenci No: N14120977  
Anabilim Dalı: ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
Programı: ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ-Y. LİSANS  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

08.06.2018

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Birsen Saka TANATAR

(Unvan, Ad Soyad, İmza)