

5G SİSTEMLERİ İÇİN ANTEN TASARIMI

ANTENNA DESIGN FOR 5G SYSTEMS

OZAN ONURLU

PROF. DR. BİRSEN SAKA TANATAR
Tez Danışmanı

PROF. DR. CENK TOKER
Yardımcı Tez Danışmanı

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

2021

ÖZET

5G SİSTEMLERİ İÇİN ANTEN TASARIMI

OZAN ONURLU

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Yardımcı Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cenk TOKER

Mayıs 2021, 84 Sayfa

Bu tez 5G sistemleri için aday olan milimetre dalga bantlarından 28 GHz bandında çalışan MIMO yapısındaki antenin tasarımı, üretimini ve ölçümlerini içermektedir. İlk önce literatür araştırılarak 5G sistemleri için aday frekans bantları incelenmiştir. Bu bantların avantaj ve dezavantajları tartışılmış ve yüksek frekans haberleşmesi için MIMO çözümü irdelenmiştir. Anten tasarımı teorik olarak incelenmiştir. Daha sonra tek anten tasarımı yapılmıştır. Besleme noktasının, altta yüksekliğinin anten geri dönüş kaybı, kazanç, bant genişliği gibi anten parametrelerine etkisi HFSS elektromanyetik çözümleyici yazılımı kullanılarak parametrik analizlerle incelenmiştir. Tek anten çoklanarak 2x2 ve 4x4 düzlemsel dizi yapıları elde edilmiş ve parametrik analizleri yapılmıştır. Tek anten analizlerine ek olarak, antenler arasındaki izolasyon değerleri, antenler arasında faz farkı uygulanarak hüzmeye yönlendirme kabiliyetleri incelenmiştir. Son olarak, tek anten ve 2x2 düzlemsel dizi yapısının üretimi yapılmıştır. Antenlerin üretim aşamaları gösterilmiş, ölçüm sonuçları simülasyonda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 5G, anten tasarımı, dizi anten, mmDalga, 28 GHz.

ABSTRACT

ANTENNA DESIGN FOR 5G SYSTEMS

OZAN ONURLU

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Assistant Supervisor: Prof. Dr. Cenk TOKER

May 2021, 84 Pages

This thesis contains the design, production and measurement of the MIMO antenna which works at 28 GHz frequency band which is one of the most important candidates of the 5G systems. Firstly, the literature was searched and candidate frequency bands of 5G were examined. The advantages and disadvantages of these bands are discussed and the MIMO solution for high frequency communication is scrutinized. Antenna design is theoretically examined. Later, the single antenna element was designed. The effect of the feed point and substrate height on antenna parameters such as return loss, gain, bandwidth was investigated by using HFSS electromagnetic analyzer software parametric analysis tool. 2x2 and 4x4 planar array structures were obtained by multiplexing a single antenna and parametric analysis was examined. In addition to the analysis of a single antenna, the isolation values and their beamsteering ability were examined by applying phase difference between the antenna. Finally, a single antenna element and 2x2 planar array structure were produced. Production stages of the antennas have been shown and the measurement results have been compared with the results obtained in the simulation.

Key Words: 5G, antenna design, array antenna, mmWave, 28 GHz

TEŐEKKÖR

Tez çalışmamın her aşamasında kıymetli desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, rehberliği, önerileri ve bilgi paylaşımları sebebiyle değerli hocalarım; tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR’a ve yardımcı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Cenk TOKER’e, bu süreçteki maddi ve manevi katkıları sebebiyle dostlarıma ve iş arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Ozan ONURLU
Mayıs 2021, Ankara

İÇİNDEKİLER

1.5G TEKNOLOJİSİ	1
1.1 HABERLEŞME TARİHÇESİ	1
1.2 NEDEN 5G'YE İHTİYAÇ VAR?	3
1.3 BEŞİNCİ NESİL TELSİZ HABERLEŞME TEKNOLOJİSİ	3
1.3.1 Nesnelerin İnterneti (IoT)	4
1.3.2 Sürükleyici Multimedya Deneyimi	5
1.3.3 Bulut Teknolojisi	5
1.3.4 Sezgisel Uzaktan Erişim	5
1.4 5G GEREKSİNİMLERİ	6
1.4.1 Kullanıcı Deneyimi	6
1.4.2 Sistem Performansı	7
1.4.3 Cihaz Gereksinimleri	8
1.5 RF MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN 5G	9
1.5.1 5G İçin Aday Frekans Bantları	10
1.5.2 5G'de Milimetre Dalga Çözümü	12
1.5.3 Kullanım Senaryosuna Göre Olası Bant Dağılımı	14
1.6 NEDEN MIMO'YA İHTİYAÇ VAR?	16
1.7 LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN AMACI	16
2.MİKROŞERİT DİZİ ANTENLER	18
2.1 ANTEN TASARIMI	18
2.1.1 Antenin Genişliğinin Belirlenmesi	19
2.1.2 Etkin Dielektrik Sabitinin Belirlenmesi	19
2.1.3 Etkin Yama Uzunluğunun Belirlenmesi	19
2.1.4 Anten Besleme Noktasının Belirlenmesi	20
2.2 ALTTAŞ SEÇİMİNİN VE DİELEKTRİK SABİTİNİN ANTEN TASARIMINA ETKİSİ	20
2.3 MİKROŞERİT ANTENLERDE BESLEME YÖNTEMLERİ	21
2.4 DİZİ ANTENLER	22
2.5 DİZİ FAKTÖRÜ	23
2.5.1 İki Elemanlı Dizi Faktörü	23
2.5.2 N Elemanlı Doğrusal Dizi Faktörü	25

2.5.3 N Elemanlı Düzlemsel Dizi Faktörü.....	27
2.6 Dizi BOYUTLARININ ANTEN ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ.....	28
3.MİKROŞERİT TEK ANTEN VE BENZETİMLERİ	31
3.1 TEK ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ.....	31
3.2 ANTEN BESLEME NOKTASININ ANTEN PERFORMANSINA ETKİSİ	37
3.3 ALTTAŞ YÜKSEKLİĞİNİN ANTEN PERFORMANSINA ETKİSİ	39
3.4 HFSS FLOQUET PORT ANALİZİ.....	43
4.DÜZLEMSEL DİZİ ANTEN YAPILARI VE BENZETİMLERİ	46
4.1 2x2 DÜZLEMSEL DİZİ ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ	46
4.2 ALTTAŞ YÜKSEKLİĞİNİN DÜZLEMSEL DİZİ PERFORMANSINA ETKİSİ	53
4.3 4x4 DÜZLEMSEL DİZİ ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ	60
5.ÜRETİLEN ANTENLERİN SONUÇLARI.....	68
5.1 TEK ANTEN SONUÇLARI	68
5.2 2x2 DÜZLEMSEL DİZİ ANTEN SONUÇLARI.....	71
6.SONUÇLARIN YORUMLANMASI	77
7.KAYNAKLAR	80

ÇİZELGELER

Çizelge 1-1 Hız, Gecikme, Mobilite İsterleri [13].....	7
Çizelge 1-2 Bağlantı Yoğunluğu & Trafik Yoğunluğu [13].....	8
Çizelge 1-3 Kullanım Senaryosuna Göre Bantlar [15].....	15
Çizelge 3-1 Anten Değişkenleri.....	32
Çizelge 3-2 LX Değişimi.....	37
Çizelge 3-3 HS Değişimi.....	40
Çizelge 3-4 Anten Değişkenleri.....	43
Çizelge 4-1 Anten Değişkenleri.....	46
Çizelge 4-2 Anten Değişkenleri.....	53
Çizelge 4-3 Anten Değişkenleri.....	60
Çizelge 5-1 Tek Anten Boyutları.....	69
Çizelge 5-2 2x2 Düzlemsel Dizi Boyutları.....	71

ŞEKİLLER

Şekil 1-1 Frekans – Zayıflama [14]	13
Şekil 1-2 Frekansa Bağlı Atmosfer Yol Kaybı [14]	14
Şekil 2-1 Mikroşerit Anten Yapısı	18
Şekil 2-2 (a) İki Elemanlı Anten Dizisi (b) Uzak Alan Gösterimi [30].....	24
Şekil 2-3 (a) N Elemanlı Doğrusal Dizi (b) Fazör Gösterim [30]	26
Şekil 2-4 Doğrusal ve Düzlemsel Dizi Geometrilere [30]	28
Şekil 2-5 (a) N=4 d=5mm, N=16 d=5mm, (b) N=4 d=16mm, N=16 d=16mm [35].....	30
Şekil 3-1 Mikroşerit Tek Anten	33
Şekil 3-2 Tek Anten Genel Görünümü	33
Şekil 3-3 Yanca ve Yükseliş Eksenleri.....	34
Şekil 3-4 Tek Anten Geri Dönüş Kaybı.....	34
Şekil 3-5 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Kazanç Grafikleri	35
Şekil 3-6 $\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Kazanç (Polar Grafik)	36
Şekil 3-7 3 Boyutlu Kazanç Grafiği	36
Şekil 3-8 Geri Dönüş Kaybı Besleme Noktası Analizi.....	37
Şekil 3-9 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Besleme Noktası Kazanç Analizleri	38
Şekil 3-10 $\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Besleme Noktası Kazanç Analizi (Polar Grafik)	39
Şekil 3-11 Alttaşı Yüksekliği Geri Dönüş Kaybı Analizi.....	40
Şekil 3-12 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Alttaşı Yüksekliği Kazanç Analizi.....	42
Şekil 3-13 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Alttaşı Yüksekliği Kazanç Analizi (Polar Grafik)	42
Şekil 3-14 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Tarama Açılarında Geri Dönüş Kaybı	44
Şekil 3-15 (a) $\phi=0^\circ$ (b) $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Geri Dönüş Kaybı	45
Şekil 4-1 Anten Görseli	47
Şekil 4-2 2x2 Düzlemsel Dizi Yapısı Genel Görünümü.....	47
Şekil 4-3 1. & 2. & 3. & 4. Anten Elemanlarının Geri Dönüş Kaybı.....	48
Şekil 4-4 1. Anten Elemanı İzolasyon Değerleri	49
Şekil 4-5 2. Anten Elemanı İzolasyon Değerleri	49
Şekil 4-6 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenleri Kazanç Değerleri	50

Şekil 4-7 $\varphi=0^\circ$ & $\varphi=90^\circ$ Eksenleri Kazanç (Polar Grafik).....	51
Şekil 4-8 3 Boyutlu Kazanç Grafiği	51
Şekil 4-9 $\varphi=0^\circ$ Eksen 3 Boyutlu Hüzme Yönlendirme	52
Şekil 4-10 $\varphi=90^\circ$ Eksen 3 Boyutlu Hüzme Yönlendirme	52
Şekil 4-11 Değişken Alttaş Yüksekliklerinde Anten Elemanları Geri Dönüş Kaybı Değerleri	55
Şekil 4-12 Değişken Alttaş Yüksekliklerinde Anten Elemanları İzolasyon Analizi	57
Şekil 4-13 $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ Eksenlerinde Değişken Alttaş Yüksekliklerinde Kazanç Analizi.....	58
Şekil 4-14 $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ Eksenlerinde Değişken Alttaş Yüksekliklerinde Kazanç Analizi (Polar Grafik)	59
Şekil 4-15 4x4 Düzlemsel Dizi Anten Görseli	61
Şekil 4-16 4x4 Düzlemsel Dizi Anten Genel Görünümü	61
Şekil 4-17 1. & 6. & 11. & 16. Anten Elemanlarının Geri Dönüş Kaybı.....	62
Şekil 4-18 1-2 & 5-6 & 10-11 & 15-16. Anten Elemanlarının Arasındaki İzolasyon....	63
Şekil 4-19 $\varphi=0^\circ$ & $\varphi=90^\circ$ Eksenlerinde Kazanç.....	64
Şekil 4-20 $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ Eksenlerinde Kazanç (Polar Grafik)	66
Şekil 4-21 3 Boyutlu Kazanç Grafiği	66
Şekil 4-22 X Ekseninde 3 Boyutlu Hüzme Yönlendirme.....	67
Şekil 4-23 Y Ekseninde 3 Boyutlu Hüzme Yönlendirme.....	67
Şekil 5-1 LPKF ProtoLaser S4	68
Şekil 5-2 Lazer ile Çizme İşlemi	68
Şekil 5-3 LPKF Protomat H100PCB Kullanılarak Kesme ve Delme İşlemi	69
Şekil 5-4 Tek Anten Görselleri	70
Şekil 5-5 Tek Antenin Geri Dönüş Kaybı Ölçümü.....	70
Şekil 5-6 2x2 Düzlemsel Dizi Görselleri.....	72
Şekil 5-7 1. Anten Elemanı Geri Dönüş Kaybı Ölçümü.....	73
Şekil 5-8 2. Anten Elemanı Geri Dönüş Kaybı Ölçümü.....	73
Şekil 5-9 3. Anten Elemanı Geri Dönüş Kaybı Ölçümü.....	74
Şekil 5-10 4. Anten Elemanı Geri Dönüş Kaybı Ölçümü.....	74
Şekil 5-11 1. Anten Elemanının 2 ve 4. Anten Elemanlarıyla Olan İzolasyon Ölçümü	75
Şekil 5-12 2. Anten Elemanının 3 ve 4. Anten Elemanlarıyla Olan İzolasyon Ölçümü	75
Şekil 5-13 3. Anten Elemanının 1 ve 2. Anten Elemanlarıyla Olan İzolasyon Ölçümü	76
Şekil 5-14 4. Anten Elemanının 2 ve 3. Anten Elemanlarıyla Olan İzolasyon Ölçümü	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

f_r	Rezonans Frekans
W	Anten Elemanının Genişliği
L	Anten Elemanının Uzunluğu
h	Alttaşın Yüksekliği
Δ_L	Saçaklanmaya Bağlı Olan Uzunluk Değişimi
y_0	Antenin Besleme Noktasının Yama Kenarına Olan Uzaklığı
μ_0	Boş Uzay Manyetik Geçirgenliği
ϵ_0	Boş Uzay Elektrik Geçirgenliği
ϵ_r	Dielektrik Sabiti
ϵ_{ref}	Etkin Dielektrik Sabiti
v_0	Boş Uzay Işık Hızı
η	Öz Empedans
k	Faz Sabiti
I_0	Uyarım Akımının Genliği
β	Faz Farkı
θ	Yükseliş Açısı
φ	Yanca Açısı
$\vec{E}$	Elektrik Alan Vektörü
D	Antenin Yönlülüğü
D_x	X Eksenindeki Doğrusal Dizin Yönlülüğü
D_y	Y Eksenindeki Doğrusal Dizin Yönlülüğü
N	Anten Dizisinde Bulunan Anten Elemanı Sayısı

Kısaltmalar

1G	Birinci Nesil (First Generation)
2G	İkinci Nesil (Second Generation)
3G	Üçüncü Nesil (Third Generation)
4G	Dördüncü Nesil (Fourth Generation)
5G	Beşinci Nesil (Fifth Generation)
bit/s	Saniyedeki Bit Sayısı (Bit per second)

CBRS	Yurttaşların Genişbant Telsiz Hizmeti (Citizens Broadband Radio Service)
CDMA	Kod Bölmesi Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)
DF	Dizi Faktörü (Array Factor)
EDGE	Küresel Evrim İçin Geliştirilmiş Veri Hızları (Enhanced Data Rate for Global Evolution)
ESSS	Yer Arama Uydu Hizmeti (Earth Exploration Satellite Service)
ETSI	Avrupa Telekomünikasyon Standartları Komitesi (European Telecommunications Standards Institute)
FCC	ABD Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission)
FDMA	Frekans Bölmesi Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)
Gbps	Saniyedeki Gigabit Sayısı (Gigabits per Second)
GPRS	Genel Paket Telsiz Hizmeti (General Packet Radio Service)
GSM	Küresel Mobil İletişim Sistemi (Global System for Mobile Communications)
HFSS	Yüksek Frekans Yapısı Simülatörü (High Frequency Structure Simulator)
HSCSD	Yüksek Hızlı Devre Anahtarlama Veri (High-Speed Circuit-Switched Data)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union)
ITU-R	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği-Radyo İletişimi (International Telecommunication Union-Radiocommunication)
Kbps	Saniyedeki Kilobit Sayısı (Kilobits per Second)
LTE	Uzun Vadeli Dönüşüm (Long Term Evolution)
Mbps	Saniyedeki Megabit Sayısı (Megabits per second)
MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output)
MASSIVE MIMO	Dev Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Massive Multiple Input Multiple Output)
MMS	Multimedya Mesaj Servisi (Multimedia Messaging Service)
ms	Milisaniye (Milisecond)

PCB	Baskı Devre Kartı (Printed Circuit Board)
RF	Radyo Frekans (Radio Frequency)
SMS	Kısa Mesaj Servisi (Short Messaging Service)
SNR	Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
TDMA	Zaman bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access) Global Evolution)
UMTS	Uluslararası Mobil İletişim Sistemi (Universal Mobile Telecommunication System)
W-CDMA	Genişbant Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Wideband-Code Division Multiple Access)



1. 5G TEKNOLOJİSİ

Beşinci nesil haberleşme teknolojisi (5G) İngilizcede “5th Generation” olarak adlandırılan bir mobil haberleşme sistemidir. Türkçeye ise “5. Nesil Mobil Telekomünikasyon Hizmeti” olarak çevrilmiştir. Öncülü 4. Nesil Telekomünikasyon sistemi olan bu mobil haberleşme sisteminin 2020’li yıllarda dünya çapında yaygınlaşması beklenmektedir.

1.1 Haberleşme Tarihçesi

Kablosuz haberleşme ilk olarak 1895 yılında Morse kodlarının elektromanyetik dalga kullanılarak bir noktadan diğer bir noktaya aktarılmasıyla başlamıştır. Modern haberleşme teknolojisi de verinin elektromanyetik dalgalar kullanılarak bir noktadan bir noktaya aktarılmasını sağlamak üzerine kurulmuştur. Geçmişten bugüne her on yılda bir telekomünikasyon hizmetinin daha da gelişerek bir üst jenerasyona geçtiği görülmektedir.

1. Nesil telekomünikasyon hizmeti (1G) 1980’li yıllarda kullanılmış ve kablosuz haberleşme için ilk hücreli yapıyı kullanan jenerasyon olmuştur. Bu jenerasyon sadece ses iletimini sağlayabilen ve bunu frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA) tekniğiyle yapan bir sistemdir [1]. Bu sistemde analog modülasyon teknikleri kullanılmış ve kanal başına bant genişliği 30 KHz mertebelerinde oluşturulmuştur [2].

1990’lı yılların başında 2. Nesil Telekomünikasyon hizmeti olan 2G’ye geçiş yapılmıştır. 2. Nesildeki protokol Genel Paket Telsiz Hizmeti (GSM) olarak tanımlanmıştır. GSM, Avrupa Telekomünikasyon Standartları Komitesinin (ETSI) 2. nesil telekomünikasyon hizmeti (2G) için belirlediği standarda verilen addır. 2G, 1G’den farklı olarak dijital modülasyon tekniklerini kullanmaktadır. GSM, zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) tekniğini kullanarak 900/1800 MHz bandında çalışan bir standarttır. 2G ile birlikte sadece ses iletimi değil data iletimi de mümkün olmuştur. İlk kısa mesaj (SMS) transferi ve ilk multimedya mesaj (MMS) transferi 2. Nesil ile birlikte gerçekleştirilmiştir. GSM teknolojisinin veri aktarım hızı tekli ses kanalı için 9.6 Kbps iken sonradan geliştirilen Yüksek Hızlı Devre Anahtarlama Veri (HSCSD) radyo link protokolü ile birlikte 14.4 Kbps’a çıkarılmıştır. 1994 yılında ETSI Tarafından GSM Radyo Erişim ağında kullanılmak üzere Genel Paket Telsiz Hizmeti (GPRS) protokolü tanıtılmıştır. GPRS ile birlikte data transfer hızı kullanıcı terminal kapasitesi ve diğer şartlara bağlı olmak üzere 14.4 Kbps ile 115.2 Kbps arasına çıkarılmıştır [3]. GPRS ile birlikte web tarayıcılar

üzerinden internet sayfaları daha rahat görüntülenebilir hale gelmiştir. Daha sonra 2.5G olarak adlandırılacak Küresel Evrim İçin Geliştirilmiş Veri Hızları (EDGE) protokolü tanıtılmıştır. EDGE protokolü ile birlikte veri transfer hızları maksimum 384 Kbps'lere ulaşmıştır [4]. 2G günümüzde hala kullanılmaktadır.

2000'li yılların başında 3. Nesil Telekomünikasyon hizmeti (3G) olarak adlandırılan standarda geçiş yapılmıştır. Uluslararası Mobil İletişim Sistemi (UMTS), ETSI'nın 3. Nesil telekomünikasyon hizmeti için belirlediği standarda verilen addır. UMTS iki standart içermektedir. Bunlardan ilki Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA) veya Genişbant Kod Bölmeli Çoklu Erişim (W-CDMA) diğeri ise TDMA'dır. Bu standartlarla birlikte veri aktarım hızı 2 Mbps'a çıkarılmıştır. 3G ile birlikte gerçek zaman uygulamaları telefonlar için kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu uygulamalara örnek olarak mobil televizyon ve video konferans yetenekleri verilebilir [5]. 3G Frekans bantları ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir. Örnek olarak Türkiye'de 3G için ayrılmış bantlar 800/1800/2500/2600 MHz'dir [6]. Artan kullanıcı sayısı ve veri aktarım hızlarındaki ihtiyaç artışı sebebiyle 3. nesil telekomünikasyon hizmeti 2000'li yılların sonuna doğru yetersiz kalmıştır.

2010'lu yılların başında 4. Nesil telekomünikasyon hizmetine (4G) geçiş yapılmıştır. Uzun Vadeli Dönüşüm (LTE) ETSI'nın GSM/UMTS standartları üstüne getirdiği bir standarttır. 4G teknolojisi, 2G ve 3G'nin devamı olarak geliştirilmiştir. 4G ve "LTE" literatürde birlikte anılmaktadır. 4G teknolojisi yüksek kaliteli sayısal video yayınlama, video sohbet, yüksek çözünürlüklü televizyon, düşük gecikmeye sahip çevrimiçi oyun gibi uygulamaların hız ve gecikme isterlerini karşılayabilmek için geliştirilmiştir. 4G teknolojisinde hedeflenen hız limitleri ise hızlı hareket halindeki nesnelerde bulunan mobilitesi yüksek olan kullanıcılar için 200 Mbps, mobilitesi düşük olan kullanıcılar için ise 1 Gbps'dır [7]. 4G'de de bant genişliği ve frekans bantları her ülke için farklılıklar göstermektedir. 1 Gbps veri transfer hızı ancak maksimum bant genişliği olan 20 MHz tamamen kullanıldığında elde edilebilmektedir. Bu veri hızlarına erişilebilmesi için taşıyıcı birleştirme tekniklerinin uygulanması gerekmektedir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin (ITU) belirlediği 1. Bölgede bulunan Türkiye için ayrılan 4G frekans bantları sırasıyla 800/900/1800/2100/2600 MHz'dir [8].

1.2 Neden 5G'ye İhtiyaç Var?

Her geçen gün internete erişen cihaz/kullanıcı sayısı artmaktadır. Çevrimiçi olan cihaz sayısındaki artış 4G'nin kapasitesini zorlamaktadır. İnternete olan erişim hızının artmasına ve internete olan erişim esnasındaki gecikmelerin azalmasına yönelik kullanıcı talepleri her geçen gün artmaktadır. Kullanıcı sayılarının artmasıyla birlikte kapsama alanlarının da artması gerekmektedir. Bunların yanında teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerjiye olan ihtiyaç artmakta, bu da farklı sorunları ortaya çıkartmaktadır. Aşağıdaki gibi bazı ihtiyaçlar sebebiyle 4G talebi karşılamakta zorlanmaktadır [9].

- Hareketli kullanıcıda 1 Gbps civarı veri aktarım hızı
- Düşük enerji tüketimi
- Hücre değişimi esnasında daha düşük kesinti, daha iyi kapsama, hücre sınırlarında daha yüksek hız
- Çoklu ve eşzamanlı veri aktarım imkanı
- Daha güvenli haberleşme imkanı
- Daha yüksek spektral verimlilik
- Yapay zeka uygulamalarının daha çok kullanılabilmesi
- Daha ucuz olması

5G teknolojisi ile tek bir cihazdan diğer tüm cihazların ve uygulamaların kontrol edilebildiği mevcut iletişim ağlarını da birbirine bağlayan bir altyapı hedeflenmektedir. Gereken yapılandırma ayarlarının internet üzerinden terminale iletebilmesi ve terminallerin son kullanıcının ihtiyacı olduğu şekilde veri akışını değişken olarak yönetebilmesi için 5G terminallerinin yeniden yapılandırılabilir yazılım tabanlı radyo özelliğinde olması istenmektedir. 5G çekirdeklerinin de yeniden yapılandırılabilir ve çoklu teknolojik altyapıya sahip olması beklenmektedir. Bu teknolojik altyapılara örnek olarak nano teknoloji, bulut teknolojisi, yazılım tabanlı radyo örnek verilebilir.

1.3 Beşinci Nesil Telsiz Haberleşme Teknolojisi

İnternete bağlı cihaz sayısında meydana gelen yüksek miktarda artış ve hız taleplerinin karşılanamaması 5. Nesil telekomünikasyon hizmetine olan ihtiyacı gözler önüne sermektedir. 2020 yılı itibariyle internete bağlanan cihaz sayısının 50 milyar adeti bulması beklenmektedir [10]. Bununla birlikte aylık gerçekleşen veri transferi miktarı ise her geçen yıl artmaktadır [11]. 5G'nin kullanılmaya başlamasıyla mobil haberleşme teknolojilerinde devrimsel gelişmeler olması beklenmektedir [12].

1.3.1 Nesnelerin İnterneti (IoT)

5G ile birlikte her şeyin birbiriyle bağlantılı olması hedefinin gerçekleşmesi beklenmektedir. Cihazların zaman ve mekândan bağımsız olarak diğer cihazlarla insan müdahalesi olmadan haberleşmesi beklenmektedir. 5G standartlarında bu hedefin sağlanabilmesi amacıyla kilometre kare başına bağlantı kurulan cihaz sayısının 1 milyon adet olabilmesi hedeflenmektedir. Cihazdan cihaza olacak bu haberleşme yapısının insan hayatını bütünüyle değiştireceği öngörülmektedir. Nesnelerin interneti kapsamında meydana gelebilecek gelişmeler aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Evlerde kullanılan akıllı ev aletleri kuracakları internet bağlantısı sayesinde kendilerinde oluşacak arızaların sebeplerini aynı model cihazların deneyimlerinden yola çıkarak tespit edebilir ve kullanıcıya yaşanan sorunun çözümü hakkında fikir verebilir. Başka bir örnek olarak ise buzdolapları kullanıcılara içlerinde bulunan gıda maddeleriyle yapılacak yemek önerileri ve hatta yemek tarifleri sunabilir. Evler uzaktan izlenebilir ve evdeki ekipmanlara çeşitli komutlar verilebilir.

Bir diğer gelişme alanı olarak sağlık gösterilebilir. Kola takılacak bir akıllı bileklik sayesinde gün içinde olan tüm egzersiz verileri kullanıcıyla paylaşılabilir veya depolanabilir. Bu akıllı bileklik sayesinde kan basıncı, kalp atış hızı, beyin dalgaları gibi hayati fonksiyonlar izlenebilir ve cihazın internete bağlanabilmesi sayesinde çok daha profesyonel bir otoriteyle (hastane, doktor vb.) verileri paylaşabilir. Meydana gelebilecek rahatsızlıklar bireyden alınan bu veriler sayesinde önceden bilinebilir ve bireyin rahatsızlığa yakalanmadan önlem alabilmesi için gerekli desteğin sağlanması mümkün olabilir.

Nesnelerin interneti ile birlikte akıllı ofislerin hayatlarımıza girmesi beklenmektedir. Ofislerde kullanılan cihazların kablosuz bir şekilde birbirleriyle haberleşebilmesiyle bir ofis çalışanı cihaz tarafından tanınabilir. Örneğin, bir çıktı makinasının başına gelen personel cihaz tarafından tanınabilir ve otomatik olarak çıktı almak istediği dosyayı çıkartabilir. Ya da her bilgisayar her kullanıcı için kullanılabilir hale gelebilir. Bilgisayarın başına gelen personeli tanıyan bilgisayar IoT bulutunda depolanmış personel masaüstünü bilgisayarda otomatik olarak açabilir.

Bir diğerk gelişme alanı olarak ise trafik gösterilebilir. Trafikte bulunan araçların birbirleriyle haberleşebilmesinin oldukça büyük değişimlere yol açması beklenmektedir. Araçlar diğerk araçlarda bulunan sensör/kamera verilerini elde edip araç kullanıcısını acil ve önemli durumlar hakkında bilgilendirebilecek, yaşanılacak acil durumlarda gerekli otoriteleri bilgilendirebilecektir. Nesnelerin interneti konseptinin ilerleyen aşamalarında araçların kullanıcı müdahalesi olmaksızın otonom bir şekilde sürüş yapabilmesi öngörülmektedir.

1.3.2 Sürükleyici Multimedya Deneyimi

5G ile birlikte artacak veri transfer hızlarıyla kullanıcılara her yer ve her zamanda multimedya akışı sunulabilmesi hedeflenmektedir. Günümüzde cep telefonları dahi 4K çözünürlüklerde video kaydedebilmektedir. Bu yüksek çözünürlük değerlerindeki multimedya içerikleri kullanıcılara 5G ile birlikte bir standart olarak sunulacaktır. Yüksek çözünürlüklü multimedya deneyimine ek olarak sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik konseptlerinin de 5G ile birlikte standart hale gelmesi beklenmektedir. Bu konseptler kullanıcıyı bulunduğu mekândan çıkartıp, kendisini izlemekte olduğu mekânda hissetmesini amaçlamaktadır. Bu konseptlerin kullanılmaya başlanması ile birlikte multimedya deneyimi kullanıcılar için eşsiz hale gelecektir.

1.3.3 Bulut Teknolojisi

5G ile birlikte bulut teknolojisinin de çok daha fazla kullanıcı tarafından kullanılması beklenmektedir. İnternet hızında beklenen artış ve gecikmelerde beklenen azalma ile birlikte kullanıcıların verilerine çok daha hızlı ulaşabilmesi hedeflenmektedir. Zaman ve mekândan bağımsız olarak yüksek boyuttaki verilerin her an erişilebilir olması hedeflenmektedir.

1.3.4 Sezgisel Uzaktan Erişim

5G Sayesinde gecikme sürelerinin 1 ms civarına düşmesi beklenmektedir. Bu süre literatürde “gerçek zamanlı” olarak ifade edilmektedir. Gerçek zamanlı uzaktan erişim ile birlikte kullanıcı binlerce kilometre uzaklıktan dahi bir cihaza komut gönderebilecek ve bu komut ise gerçek zamanlı olarak cihaza iletilebilecek. Bu yeniliğin operatörlerin tehlikeli bölgelerde kullanılan cihazların yanında bulunma zorunluluğunu ortadan kaldırması gibi gelişmeleri sağlaması hedeflenmektedir.

1.4 5G Gereksinimleri

5. Nesil telekomünikasyon hizmetinin gereksinimleri hakkında literatürde birçok öngörü mevcuttur. Bu öngörülerini birkaç başlık altında incelemek mümkündür [13].

1.4.1 Kullanıcı Deneyimi

Kullanıcı deneyimi, son kullanıcının bir veya birden çok hizmeti kullanırken elde ettiği hız, gecikme, hareketlilik gibi deneyimleri kapsar.

Veri aktarım hızı bu deneyimlerden ilkidir ve bit/s birimiyle ölçülen ve 5G standartlarında lokasyonların (hücre sınırları dahil) ve zamanın en az %95'inde tutarlı bir şekilde son kullanıcının elde etmesi gereken isterdir. Öngörülere göre kullanıcıların ofis gibi spesifik kapalı alanlarda 1 Gb/s elde etmesi beklenmektedir. Buna karşılık hareketli ve veri trafiğinin yoğun olduğu yerlerde dahi maliyet etkin bir şekilde 50 Mb/s veri aktarım hızlarına ulaşması beklenmektedir.

Bir diğer deneyim ise gecikmedir. Gecikme verinin kaynak düğümünden hedef düğüme gidip, gereken işlemi görüp tepki vermesi esnasında geçen süreye verilen isimdir. Literatürde değişik görüşler bulunmakla birlikte uçtan uca gecikmenin 10 ms mertebelerinde olması, özel durumlu uygulama ve erişim alanlarında ise 1 ms ve altında olması öngörülmektedir.

Son olarak, mobilite bir başka kullanıcı deneyimini tanımlamaktadır. 5G'de internet erişimi olan her cihazın mobil olmayacağı ancak mobil olması gereken cihaz ve kullanıcıların ihtiyaçlarına göre hareketleri esnasında elde edebilecekleri haberleşme hizmeti kalitesinin değişeceği öngörülmektedir. Literatürde yer alan veri aktarım hızı, gecikme ve hareketlilik istekleri Çizelge 1-1'den görülebilir.

Çizelge 1-1 Hız, Gecikme, Mobilite İsterleri [13]

Kullanım Şekli Kategorisi	Kullanıcı Deneyimi Veri Aktarım Hızı	Uçtan Uca Gecikme	Hareketli
Yoğun Alanlardaki Genişbant Erişim	İNDİRME: 300 Mbps YÜKLEME: 50 Mbps	10 ms	Talep Üzerine : 0-100 km/h
İç Mekan Ultra Yüksek Genişbant Erişim	İNDİRME: 1 Gbps, YÜKLEME: 500 Mbps	10 ms	Yaya
Kalabalık Alanlardaki Genişbant Erişim	İNDİRME: 25 Mbps YÜKLEME: 50 Mbps	10 ms	Yaya
Araçlardaki Genişbant Erişim (Arabalar, trenler)	İNDİRME: 50 Mbps YÜKLEME: 25 Mbps	10 ms	Talep üzerine 500 km/sa'e kadar
Uçak Bağlantıları	İNDİRME: 15 Mbps Kullanıcı başına YÜKLEME: 7.5 Mbps Kullanıcı başına	10 ms	1000 km/sa'e kadar
Ultra yüksek güvenilirlik & Ultra düşük gecikme	İNDİRME: 50 Kbps-10 Mbps arası YÜKLEME: Bir kaç bps-10 Mbps arası	1 ms	Talep Üzerine: 0-500 km/sa
Ultra yüksek kullanılabilirlik & güvenilirlik	İNDİRME: 10 Mbps YÜKLEME: 10 Mbps	10 ms	Talep Üzerine: 0-500 km/sa

1.4.2 Sistem Performansı

Sistem performansı kullanıcıların ve kullanım örneklerinin ihtiyaç ve çeşitliliğini sağlamak için gereken sistem yeteneklerinin bütünüdür.

Bağlantı yoğunluğu kilometrekare başına tek bir hizmet sağlayıcısı tarafından aktif veri transferi yapan cihaz sayısını belirtir. Trafik yoğunluğu alan başına oluşan tüm veri trafiği olarak ifade edilmektedir. Birimi bit/s/m^2 'dir. Literatürde değişik yoğunluklar için değişken isterler mevcuttur. Bağlantı ve trafik yoğunluğu için öngörülen değerler Çizelge 1-2'den görülebilir [13].

Sistem performansını etkileyecek bir diğer faktör ise spektrum verimliliğidir. 5G ile birlikte hizmet alacak kullanıcı sayısındaki artış ve ihtiyaç olacak veri transfer hızları göz önüne alındığında spektrum verimliliğinin yükselmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Elektromanyetik spektrumu hem alt bant hem de üst bant frekanslarında küçük ölçekli hücreler ve büyük hücreler için 4G'den daha verimli kullanma ihtiyacı ortaya çıkacaktır.

Çizelge 1-2 Bağlantı Yoğunluğu & Trafik Yoğunluğu [13]

Kullanım Şekli Kategorisi	Bağlantı Yoğunluğu (Adet)	Trafik Yoğunluğu
Yoğun Alanlardaki Genişbant Erişim	200-2500 /km ²	İNDİRME: 750 Gbps / km ² YÜKLEME: 125 Gbps / km ²
İç Mekan Ultra Yüksek Genişbant Erişim	75,000 / km ² (75/1000 m ² Ofis)	İNDİRME: 15 Tbps/ km ² (15 Gbps / 1000 m ²) YÜKLEME: 2 Tbps / m ² (2 Gbps / 1000 m ²)
Kalabalık Alanlardaki Genişbant Erişim	150,000 / km ² (30.000 / Stadyum)	İNDİRME: 3.75 Tbps / km ² (İNDİRME: 0.75 Tbps / stadyum) YÜKLEME: 7.5 Tbps / km ² (1.5 Tbps / stadyum)
Araçlardaki Genişbant Erişim (Arabalar, trenler)	2000 / km ² (Tren başına 500 aktif kullanıcı x 4 tren veya Araç başına 1 aktif kullanıcı x 2000 araç)	İNDİRME: 100 Gbps / km ² (Tren başına 25 Gbps, Araç başına 50 Mbps) YÜKLEME: 50 Gbps / km ² (Tren başına 12.5 Gbps , Araç başına 25 Mbps)
Uçak Bağlantıları	Uçak başına 80 adet Her 18,000 km ² 60 Uçak	İNDİRME: Uçak Başına 1.2 Gbps YÜKLEME: Uçak Başına 600 Mbps
Ultra yüksek güvenilirlik & Ultra düşük gecikme	Kritik değil	Muhtemelen yüksek
Ultra yüksek kullanılabilirlik & güvenilirlik	Kritik değil	Muhtemelen yüksek

1.4.3 Cihaz Gereksinimleri

5G hizmetinden yararlanacak akıllı cihaz sayısının yakın bir gelecekte 50 milyar adeti aşması öngörülmektedir. Bu cihazların yazılımsal ve donanımsal karmaşıklıklarının artacağı da beklenmektedir. Bu cihazların yakın gelecekte aşağıda örnekleri verilmiş gereksinimlerinde iyileşmeler olması öngörülmektedir.

5G hizmetinden yararlanacak akıllı cihazların operatöre yazılım ve donanım versiyonunu sorgulama ve hatta radyo link üzerinden gerekli güncellemeleri yapma yetkisi vermesinin mümkün olabileceği değerlendirilmektedir. Bu ihtiyacın son kullanıcı veya tüm sistemin performansını etkileyen problemlerin veya eksiklerin giderilmesinde önemli olduğu belirtilmektedir. Bunların yanında bu akıllı cihazlar üzerinden operatörlerin sadece anlık yaşanan hataları (bağlantı problemleri hat düşmesi, komşu hücreye geçiş hataları, ağ erişim hataları gibi) değil, geçmişe yönelik hataları da görüntüleyebilmesinin gerekliliği bulunmaktadır.

Kullanıcıların tüm dünyada haberleşme hizmetinden yararlanabilmesi için cihazların ülkelerin kullanacağı değişik frekans bantı ve değişik modlardaki yayınlarda çalışabilmesi gerekmektedir. Bu gereklilik sabit kullanımda olacak cihazlardan ziyade hareketli olacak cihazlar için önemlidir. Bunun haricinde 5G’de hedeflenen veri transferi hız gerekliliklerini karşılayabilmek için bu cihazların aynı anda değişik frekans bantlarında tanımlı taşıyıcılardan veri akışını destekleyebilmesi gerekliliği bulunmaktadır.

Teknolojinin enerji kullanımı ve enerjinin depolanması alanlarında ilerlemesiyle, akıllı cihazların güç tüketimlerinin artan kapasitelerine rağmen düşeceği, kullanılan batarya performanslarının ise artacağı öngörülmektedir.

1.5 RF Mühendisliği Açısından 5G

Radyo frekans (RF) mühendisliği açısından 5G’nin birçok yenilik sunması beklenmektedir. 5G standartlarında belirtilen hız ve gecikme gerekliliklerinin hizmetten yararlanacak aktif cihaz sayısında beklenen büyük artışla birlikte sağlanabilmesi için 4G’de kullanılan bant genişliklerinin yetersiz kalacağı ifade edilmektedir. İlerleyen süreçte 5G’nin yeni taşıyıcı frekans bantlarında ve çok daha büyük bant genişliklerinde hizmet vermesi beklenmektedir. 4G hizmeti 6 GHz spektrum altında hizmet vermektedir. 5G’de hem 6 GHz spektrumun altında hem de üstünde tanımlı bantlar olması önerilmektedir.

1.5.1 5G İçin Aday Frekans Bantları

Her ülkenin haberleşme bantlarını belirleyen otoriteler farklı olsa da ülkelerin operatörlere birkaç on MHz mertebelerinden GHz mertebelerine kadar bant genişlikleri sağlamaları hedeflenmektedir [17]. Ülkelere göre değişkenlik göstermesi beklenen aday frekans bantlarından bazıları şunlardır;

24 GHz altı spektrumda önerilen bazı bantlar: 2.5, 3.5, 4.5, 6 ve 12 GHz bantlarıdır [15, 17].

24GHz üstü spektrumda önerilen bazı bantlar ise: 24, 28, 37, 39, 47, 64-71, 70/80 GHz bantlarıdır [15, 16, 18].

3.55-3.7 GHz bandı ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından Yurttaşların Genişbant Telsiz Hizmeti (CBRS) olarak adlandırılmıştır. Bu bant 6 GHz spektrum altında bulunan ve gönderme yapılarında düşük güç çıkışına izin verilen dar bir bant genişliğine sahip olsa da 5G için adaydır.

Şu anda 3.7-4.2 GHz bandı uydu yer haberleşmelerinde kullanılmaktadır. Fakat bu bant alt frekans bantlarında halihazırda kullanılmakta olan mobil haberleşme bantlarının ve üst bantlarda olması planlanan 5G frekans bantlarının ortasında olması dolayısıyla önemli bir aday olarak görülmektedir. 500 MHz bant genişliği bulunan kanal, 5G’de ki isterlerin karşılanabilmesi için önemli bir genişliğe sahiptir. Bu bandın hepsi olmasa bile bir kısmının karasal mobil haberleşme için kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

12.2-12.7 GHz bandı günümüzde uydu yayıncılığı hizmetleri için kullanılmaktadır. Bu bandın 5G hizmetleri için kullanılması yönünde görüşler mevcuttur. Uydu yayıncılık frekanslarının başka bir banda taşınması tartışılmaktadır. Henüz alınmış bir karar olmamasına karşın bu bandın 5G için aday bantlardan biri olduğu görülmektedir.

24 GHz bandı 2 adet alt banttandır oluşmaktadır. Bunlar 24.25-24.45 GHz ve 24.75-25.25 GHz bantlarıdır. Frekans yükseldikçe elektromanyetik dalganın atmosferde olan emiliminin arttığı bilinmektedir. Bu bandın önemi mmDalga bantlarında en düşük yol kayıplarından birine sahip olmasıdır. Bu banttaki atmosferik emilim, yol kaybı-frekans eğrisindeki lokal zirveye rağmen 28 GHz bandından sadece 0.15 dB / km daha fazladır. Bu da 24 GHz bandının üst frekans bantlarındaki en düşük 2. Yol kaybına sahip olduğunu

göstermektedir. Bu sebeple literatürde 5G için aday bantlardan biri olarak gösterilmektedir.

28 GHz bandı 27.5-28.35 GHz frekansları arasını kapsayan bir aralıktan oluşmaktadır. Literatürde ileride kullanılması muhtemel mmDalga bantlarının başında geldiği gösterilmektedir. Güney Kore, Japonya, İsveç, Finlandiya ve ABD gibi birçok ülkede bu bant için birçok çalışma mevcuttur [16]. Literatürde ise bu bandı kapsayan çalışma aralığına sahip birçok alt sistem tasarımı ile ilgili çalışma vardır [19]. Kanada’da ise 2017 ve 2018’de 2 farklı çalışma grubu bu bantla ilgili çalışmalar yapmıştır. İlk grup 2017 yılında 27.5-28.35 GHz bandıyla ilgili, ikinci grup ise 2018 yılında 26.5-27.5 GHz bandıyla ilgili çalışmalar yapmıştır. 2021 yılı içerisinde bu bandın 5G’de kullanılıp kullanılamayacağı ile ilgili karar verileceği belirtilmektedir [20] [21].

37 GHz bandı 37-38.6 GHz frekansları arasını kapsayan bir aralıktan oluşmaktadır. Daha alt frekansta bulunan bantlara göre aktif kullanımı daha az olan bir banttır. ABD’de bu bant birincil derece mobil haberleşme hizmetlerine tahsis edilmiştir. Bu bandın bir bölümü şu anda Uzay Araştırma Enstitüsü’ne bir başka bölümü ise sabit uydu servisine verilmiştir. Her ikisi de tek yönlü olarak uzaydan dünyaya olan haberleşmede kullanılmaktadır. Şu anda aktif olarak kullanılan dünya keşif uydu servisinin (EESS) pasif sensörlerinin etkilenmemesi için ITU çalışmalarını sürdürmektedir.

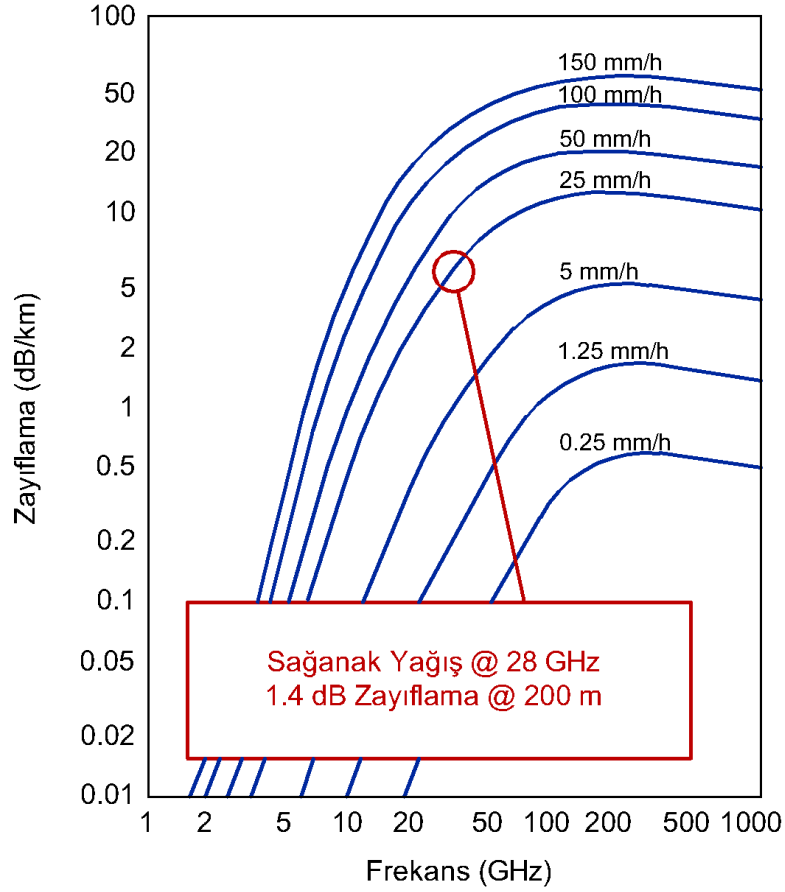
47.2 – 50.2 GHz bandı ITU tarafından belirlenmiş olan ve tüm dünyayı kapsayan 3 bölgede de uydu haberleşmesi ve mobil haberleşme için ayrılmış bulunmaktadır. İlgili bandın ilerleyen süreçte mobil haberleşme sistemlerinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

7 GHz büyüklüğünde bant genişliğine sahip olan 64-71 GHz bandı ABD’de lisanssız kullanım için mevcuttur. 5G ve daha ileri jenerasyonlarda kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Aynı zamanda yüksek frekansların atmosfer yol kaybının düşük frekanslara göre çok daha fazla olduğu bilinmektedir. Bu gerekçenin bandın kullanılmasını zorlaştıracığı da değerlendirilmektedir.

1.5.2 5G’de Milimetre Dalga Çözümü

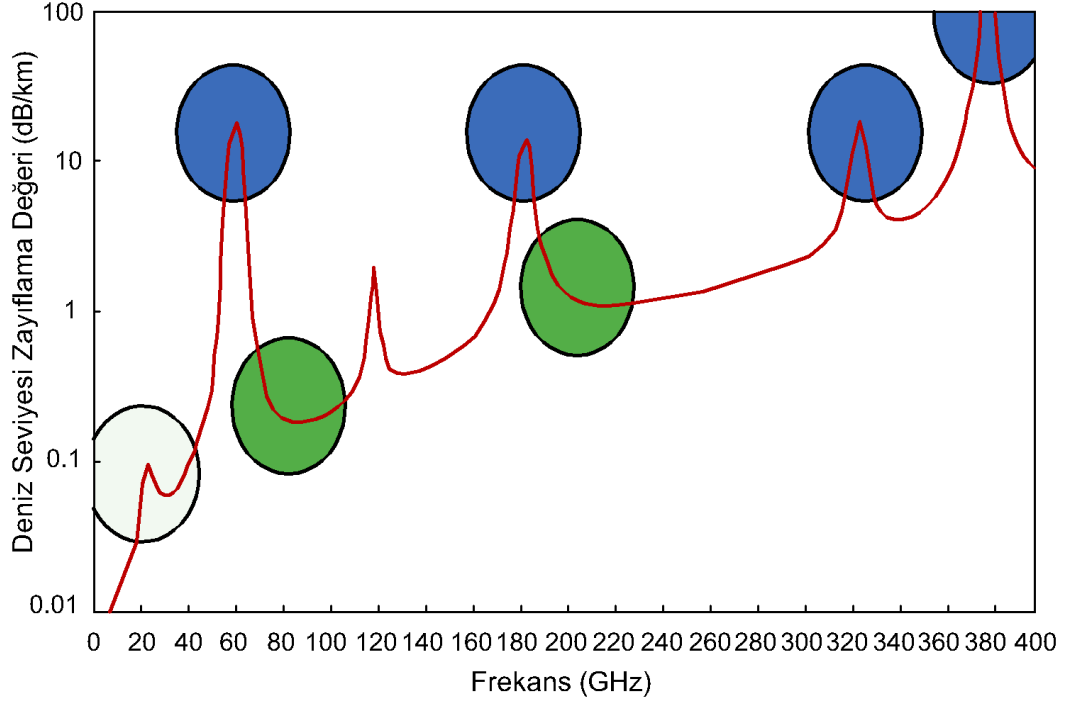
Haberleşme teknolojilerinin gelişimi incelendiğinde jenerasyon değişiminin doğal sürecinde ilerleyen bilgisayar ve haberleşme teknolojilerinin gelişimiyle her 10 yılda bir veya daha kısa sürede gerçekleştiği görülmektedir. Literatür incelendiğinde yakın gelecekte saniyede birkaç gigabit hızlara ulaşılacağı ve bu iletişimin 6 GHz altı spektrumun aşırı doymuş olmasından dolayı 6 GHz altı spektrum ve mmDalga bandında hüzmeleri yönlendirilebilir antenlerin birlikte kullanılmasıyla sağlanabileceği tartışılmaktadır. Milimetre dalga bantlarının görece 6 GHz altı spektruma göre boş olması ve yüksek bant genişlikleri sağlayabilmeleri 5G’deki hız ve gecikme isterlerini sağlamada büyük bir önem arz etmektedir. Bant genişliklerinin artmasıyla birlikte aynı anda aktarılan veri boyutu artarken gecikme sürelerinin de azalması beklenmektedir. Milimetre dalga bantlarında frekansın yüksek, dalga boyunun ise küçük olmasından dolayı çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) olarak adlandırılan çok sayıda elemana sahip antenler tasarlanabileceği belirtilmektedir [14].

Literatürde mmDalga bantlarına atmosfer kayıpları ve hava durumu koşullarından etkilenme ihtimalleri nedeniyle mesafeli duran görüşler olsa da birçok çalışma bazı kısıtlar altında bu bantların kullanılmasında bir sorun olmayacağını ifade etmektedir. Günümüzde haberleşme teknolojilerinde kullanılan baz istasyonları arasındaki mesafeler kapsama ve cihaz yoğunluğundan dolayı oluşan veri trafiğini destekleyebilmek için oldukça kısalmıştır. Yapılan araştırmalar mmDalga bandının 200 metre mesafelerde kullanılmasının hava koşullarından ve atmosferdeki yol kaybından kaynaklanan negatif etkilerin üstesinden gelebileceğini göstermektedir. Şekil 1-1’de frekansa bağlı olarak yağmurlu hava koşullarında ve açık hava koşullarında atmosfer yol kaybı grafikleri gösterilmektedir. 200 metrelik bir radyo link uzaklığının 28 ve 38 GHz bandı için çok önemli bir ek kayıp yaratmadığı söylenebilir. Şekil 1-1’deki grafik incelendiğinde 28 GHz için 25 mm/h yağış oranı altında 7 dB/km zayıflama beklenmektedir. Bu da 200 metre mesafede 1.4 dB yol kaybı anlamına gelmektedir. Birçok araştırma 1 km ve altındaki mesafelerde mmDalga bantlarının kullanımının mobil haberleşme teknolojileri için sorun yaratmayacağı görüşündedir [22].



Şekil 1-1 Frekans – Zayıflama [14]

28 GHz’de atmosferde oluşan yol kaybı 200 metre mesafe için 0.012 dB’dir. 38 GHz için yol kaybı ise 200 metre mesafe için 0.016 dB’dir. 70-100 GHz ve 125-160 GHz frekans aralıklarının da yol kaybı konusunda avantajlı olduğu Şekil 1-2’de görülmektedir.



Şekil 1-2 Frekansa Bağlı Atmosfer Yol Kaybı [14]

1.5.3 Kullanım Senaryosuna Göre Olası Bant Dağılımı

5G’de kullanılmaya aday olan bantların çeşitli kullanım senaryolarına göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu yerler bulunmaktadır. 24-86 GHz arası önerilen bandın daha çok açık alan hotspot noktaları veya kapalı alan uygulamalarında olabileceği değerlendirilmektedir. 6 GHz ve altında bulunan spektrumun birçok senaryoda kullanılabileceği görüşleri mevcuttur. 5G’de bulunan isterlere erişilebilmesi için hem 6 GHz altındaki bantların hem de üstündeki bantların iyi bir planlama ile birlikte kullanılmaları gerekmektedir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği-Radyo İletişimi’nin (ITU-R) 5G mobil haberleşme hizmetleri için 5G gereksinimlerine göre olası kullanım senaryolarının yer aldığı önerilerine Çizelge 1-3’den ulaşılabilir.

Çizelge 1-3 Kullanım Senaryosuna Göre Bantlar [15]

Kullanım Senaryosu	Gereksinim	Spektrumla Alakalı Potansiyel Etkiler	Önerilen Spektrum Aralıkları
Geliştirilmiş Genişbant Mobil Kullanım	Ultra Yüksek Hızlı Radyo link	Ultra Genişbant taşıyıcı gerekliliği >500 MHz	>24 GHz
	Yüksek Hızlı Radyo link	Genişbant taşıyıcı gerekliliği Ör: 100 MHz	3-6 GHz
	Ultra Düşük Gecikme	Kısa menzilli	3-6 GHz & > 24 GHz
	Düşük Gecikme	Orta – Kısa menzilli	3-6 GHz
	Ultra Yüksek Güvenlik	Yağmur, sis gibi hava şartlarının mmDalgalar üzerindeki etkilerinin fazla olmasından dolayı önerilmemektedir.	<6 GHz
	Yüksek Güvenlik	Yağmur, sis gibi hava şartlarının mmDalgalar üzerindeki etkilerinin fazla olmasından dolayı önerilmemektedir.	<6 GHz
Ultra Güvenilir İletişim	Kısa Menzil	Yüksek frekans Ör: mmDalga	>24 GHz
	Orta – Uzun Menzil	Düşük Frekanslar	<6 GHz
	Zemin veya engel penetrasyonu	Düşük Frekanslar	<1 GHz
Büyük Makine Tipi İletişim	RF Engel (Clutter vb.)	Düşük frekanslarda kırınım baskın ortam Yüksek frekanslarda yansımanın hakim olduğu ortam	Tüm frekans bandı
	Hızlı hareket eden engellerin yakınında çalışma	Frekans Seçici Kanallar	Tüm aralıklar, özellikle <6 GHz
	Mesh Ağı	Bant içi veya bant dışı çalışan yüksek hızlı dağıtılmış kablosuz ana taşıyıcılar	>24 GHz

1.6 Neden MIMO'ya İhtiyaç Var?

5G'yle birlikte olması beklenen kapasite artışı, spektral verimlilik gibi konuların yüksek miktarda artacak kullanıcı sayısı ile birlikte sağlanabilmesi için 3 bağımsız alanda büyük gelişmeler olması beklenmektedir [23].

- Yüksek kapsama alanına sahip büyük baz istasyonları yerine pico ve femtocell olarak adlandırılan kapsama alanı 10-200 metre arasında olacağı öngörülen küçük baz istasyonlarına geçilmesi.
- Milimetre dalga bantlarının güncel kullanılan daha düşük frekans bantlarına göre görece daha az kullanılması ve büyük bant genişliklerine sahip olmaları dolayısıyla hücresel haberleşme teknolojilerinde kullanıma alınması.
- Yüksek frekansların kullanılabilir olmasının öngörülmesiyle baz istasyonlarında 100 ve üzerinde sayıda anten elemanı bulunan anten dizilerinin kullanılma ihtiyacının ortaya çıkacağı belirtilmektedir. Büyük sayılarda anten elemanı ile oluşturulan bu anten dizileri dev çoklu giriş çoklu çıkış (MASSIVE MIMO) olarak ifade edilmektedir.

Frekans artışı ile birlikte atmosfer yol kaybının arttığı bilinmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için yüksek kazançlı anten yapılarının kullanılabileceği belirtilmektedir. Yüksek kazancın yanında hüzme yönlendirme kapasitesinin artması gerektiği belirtilmektedir [23]. Hüzme yönlendirme tekniklerinin uygulanmasıyla RF güç belirli yönlerde yoğunlaştırılabilmektedir. Hüzme yönlendirme yapılmaksızın her yöne yayın yapılan durumlarda, kullanıcının olmadığı bölgeye aktarılan enerji gereksiz yere harcanmaktadır. Hüzme yönlendirmenin yapılabilmesiyle haberleşme kalitesine olumlu katkı sağlanacağı belirtilmektedir. Yükselen frekansla birlikte dalga boyu küçülmektedir. Bu da RF komponentlerin küçülmesine sebep olacaktır. Örnek olarak anten yapılarının küçülecek olması çok sayıda anten elemanından oluşan anten dizilerinin kullanılabilmesine imkân sağlayacaktır. Artan dizi elemanı sayısı ise daha yüksek tarama açılarında hüzme yönlendirme yeteneğine sahip olunacağı anlamına gelmektedir.

1.7 Literatürdeki Çalışmalar ve Tezin Amacı

Literatürde mikroşerit yama antenlerle yapılmış birçok MIMO anten çalışması bulunmaktadır. Polarizasyon oluşturma teknikleri kullanılarak dairesel polarizasyon özelliğine sahip bir anten elemanının MIMO yapısında kullanılabileceği belirtilmektedir [26]. Mikroşerit antenlerde çok bantlı yapılar da çalışılmaktadır, yapıda oyuk açma

yöntemleriyle oluşturulan 1x4 doğrusal dizi yapısında 28 GHz, 37GHz, 41 GHz ve 74 GHz bantlarında yayın yapan örnekler mevcuttur [24]. Genişbant özelliklerine sahip anten tasarımlarına dair çalışmalar da bulunmaktadır. Çiçek şeklinde yama yapılarıyla tasarlanan ve 14.5 GHz gibi büyük bantgenişliğine sahip yapılar incelenmiştir [25]. Massive MIMO yapılarına örnek olarak yapılan çalışmalara 8x16 ve 16x16 anten elemanından oluşan büyük diziler gösterilebilir. Bu yapılarda anten elemanı sayısı artışının anten kazancına olumlu etkisi olduğu görülmektedir [27, 28].

Bu tez çalışmasında ise aşağıda belirtilen özelliklere sahip anten tasarımı çalışmaları yapılması hedeflenmektedir.

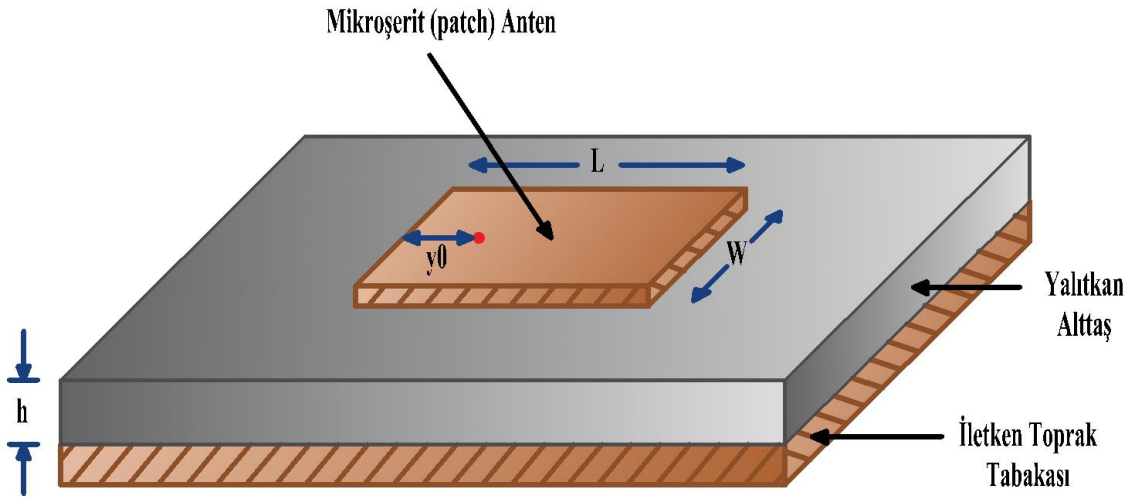
- 5G için güçlü mmDalga bandı adaylarından olan 28 GHz bandında üretilebilir MIMO anten tasarımı yapmak
- MIMO yapısının düzlemsel dizi yapısında olması ve 4 anten elemanından oluşması
- Her bir anten elemanının rezonans frekanstaki geri dönüş kaybı değerinin -10 dB seviyesinin altında olması
- Anten elemanlarının arasındaki izolasyon seviyesinin -20 dB seviyesinin altında bulunması
- Tasarlanan yapının üretilmesi ve ölçümlerinin alınması

Bu tez çalışması kapsamında yukarıdaki hedeflere erişilmesi için önce tek anten tasarımı yapılmış ve ardından benzetim analizleriyle tek anten performansı incelenmiştir. Ardından 2x2 ve 4x4 düzlemsel dizi anten tasarımları ve benzetim analizleri yapılarak düzlemsel dizi antenlerin performansları incelenmiştir. Son olarak ise tek anten ve 2x2 düzlemsel dizi anten yapısının üretimi yapılmıştır. Üretim ve benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır.

Literatüre bakıldığı zaman MIMO anten notasyonunun $m \times n$ olarak ifade edildiği görülmektedir. Burada bulunan m gönderme yeteneğine sahip anten elemanı sayısı ve n alma yeteneğine sahip anten elemanı sayısıdır. Bu tez çalışmasında ise $m \times$ ekseni boyunca dizilmiş, n ise y ekseni boyunca dizilmiş anten sayılarını ifade etmektedir.

2. MİKROŞERİT DİZİ ANTENLER

Mikroşerit antenler Şekil 2-1’de gösterildiği gibi bir dielektrik katmanın her iki yüzeyinde bulunan 2 adet iletken yapıdan oluşur. Alt tarafta bulunan iletken yüzey genel olarak toprak katmanı olarak adlandırılır, üst katmanda bulunan yüzey ise yama olarak adlandırılan, yayın yapan yüzeydir. Mikroşerit antenler uzun bir süredir endüstrinin değişik alanlarında kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına örnek olarak hücresel haberleşme sistemleri, uydu uygulamaları, kablosuz yerel ağ uygulamaları gösterilebilir. Ucuz olmaları, görece üretilebilirliklerinin diğer anten çeşitlerine göre kolay olması tercih edilmelerindeki önemli sebeplerdendir [29]. Mikroşerit anten elemanları kullanılarak oluşturulan anten dizilerine mikroşerit dizi antenler denilmektedir. Tek boyutlu doğrusal dizi antenler, 2 boyutlu düzlemsel dizi antenler, düzlemsel olmayan yapılarıdaki dizi antenler gibi birçok uygulama çeşidi vardır.



Şekil 2-1 Mikroşerit Anten Yapısı

2.1 Anten Tasarımı

Mikroşerit yama antenin tasarımına başlamadan önce birkaç tasarım parametresinin belirlenmiş olması gerekmektedir. Bunlar tasarımda kullanılacak alttaşın dielektrik sabiti (ϵ_r), alttaşın yüksekliği (h) ve antenin rezonans frekansıdır (f_r). Bu 3 parametre belirlendikten sonra tasarım aşaması 3 madde altında incelenebilir [30].

2.1.1 Antenin Genişliğinin Belirlenmesi

Anten tasarımında kullanılacak alttaşın belirlenmiş olmasıyla birlikte alttaş yüksekliği ve alttaşın dielektrik sabiti belirlenmiş olmaktadır (h ve ϵ_r). Antenin rezonans frekansı da bilindiği için (1.1) ile belirtilen denklem kullanılarak yama yapısının genişliği belirlenebilir [30].

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1.1)$$

Denklemden bulunan W anten elemanının genişliğini, f_r anten elemanının rezonans frekansını, μ_0 boş uzay manyetik geçirgenliği, ϵ_0 boş uzay elektrik geçirgenliği, ϵ_r dielektrik sabitini ve v_0 boş uzay ışık hızını ifade etmektedir.

2.1.2 Etkin Dielektrik Sabitinin Belirlenmesi

Antenin yama kısmı sonlu bir büyüklüğe sahip olduğu için kenar kısımlarında saçaklanma denilen bir durum oluşmaktadır. Bu durum sonucunda antenin yama boyutları elektriksel olarak fiziksel boyutlarına göre daha büyük olmaktadır. Bu da antenin rezonans frekansını etkileyen önemli bir parametredir. Bu saçaklanma etkisini anten boyutlarının hesaplamasına dahil edebilmek için etkin dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) ismi verilen parametrenin hesaplanması gerekmektedir [30]. Etkin Dielektrik sabiti $W/h > 1$ için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (1.2)$$

Denklemden bulunan ϵ_{eff} etkin dielektrik sabitini, W anten elemanının genişliğini, h alttaşın yüksekliğini ve ϵ_r dielektrik sabitini ifade etmektedir.

2.1.3 Etkin Yama Uzunluğunun Belirlenmesi

Elektrik alan çizgilerinin yama kenarlarında olan saçaklanmasından dolayı anten elektriksel olarak fiziksel boyutlarından daha büyük olmaktadır. Δ_L ile belirtilen saçaklanmaya bağlı olan uzunluk değişimi (1.3)'te belirtilen denklem kullanılarak hesaplanır [30].

$$\frac{\Delta_L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (1.3)$$

Yama kısmının gerçek uzunluğu ise (1.3)'te bulunan Δ_L değerinin (1.4) denkleminde yerleştirilmesi ile bulunur.

$$L = \frac{1}{2fr\sqrt{\epsilon_{ref}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta_L \quad (1.4)$$

2.1.4 Anten Besleme Noktasının Belirlenmesi

Antenin boyutları belirlendikten sonra anten beslemesinin verileceği konumun hesaplanması gerekmektedir. Anten besleme noktası giriş empedansı ile uyumlandırılmazsa anten performansında kayıplar meydana gelmektedir. Besleme noktasının yama üzerindeki yeri (1.5) denklemi kullanılarak hesaplanır [30].

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0)\cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right) \quad (1.5)$$

Denkleminde bulunan $R_{in}(y = y_0)$ besleme noktasındaki empedansı (genelde 50 Ω), $R_{in}(y = 0)$ yamanın kenarındaki empedansı, L yamanın uzunluğunu ve y_0 ise besleme noktasının denkleminde kullanılan empedansa göre konumlanması gereken uzunluğun yamanın kenarına olan uzaklığını belirtmektedir. y_0 noktasının anten üzerindeki konumu Şekil 2-1'den görülebilir. Bulunan bu y_0 noktasının etrafında parametrik analizler yapılarak en uygun besleme noktası bulunmaktadır.

2.2 Altaş Seçiminin ve Dielektrik Sabitinin Anten Tasarımına Etkisi

Mikroşerit anten tasarımına başlamadan önce belirlenmesi gereken üç ana parametre olduğu ve bunların altaşın dielektrik sabiti (ϵ_r), altaşın yüksekliği (h) ve antenin rezonans frekansı (f_r) olduğu belirtilmişti. Altaşın seçimini yapabilmek için altaşın dielektrik sabitinin ve altaşın yüksekliğinin anten performansına etkisinin bilinmesi tasarımcının daha doğru seçimler yapabilmesi açısından önemlidir. Dielektrik sabiti anten tasarlanırken yapılan birçok hesaplamada yer alan önemli bir parametredir. Literatür incelendiğinde dielektrik sabitin anten performansına etkisiyle ilgili çalışmalar olduğu görülebilir. Anten tasarımında seçilen altaşın dielektrik sabitin artmasıyla birlikte antenin genişlik ve uzunluğunun küçüldüğü, yönlülüğü ve kazancının azaldığı, bant genişliğinin azaldığı bilinmektedir. Literatürde aynı rezonans frekansta çalışan fakat farklı altaşlar kullanılarak tasarlanan anten yapıları incelenmiştir. Farklı altaş seçiminden dolayı değişen etkin dielektrik sabitin anten performansına yukarıda bahsedilen etkileri gösterilmiştir [31].

Farklı alttaşı kullanılması kadar kullanılan alttaşı yüksekliğinin de anten performansı için oldukça önemli olduğu bilinmektedir. Tasarımda kullanılan alttaşı yüksekliğinin artmasıyla birlikte antenin genişlik ve uzunluğunun küçüldüğü, yönlülüğünün ve kazancının arttığı, rezonans frekansının küçüldüğü, bant genişliğinin arttığı bilinmektedir. Yapılan bir çalışmada dielektrik sabiti $\epsilon_r=2.2$ olan RT Duroid 5880 alttaşının yüksekliğinin 0.5 mm'den 4.5 mm'ye kadar arttırılmasıyla yukarıda bahsedilen etkiler gösterilmiştir [31].

2.3 Mikroşerit Antenlerde Besleme Yöntemleri

Mikroşerit antenlerin çeşitli besleme yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Besleme yöntemleri temaslı ve bağlaşımlı besleme olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir.

Temaslı besleme yönteminde RF güç doğrudan fiziksel temas ile mikroşerit yama yapısına iletilir. İki çeşit temaslı besleme yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan ilki mikroşerit beslemedir. Bu besleme türü antenin yama kısmına doğrudan bağlanmış olan bir besleme hattından meydana gelir. Mikroşerit hattın genişliği yama kısmının genişliğinden daha küçük olmaktadır. Oldukça basit bir yapıya sahip olması ve üretilebilirliğinin yüksek olması sebebiyle mikroşerit besleme oldukça yaygın olarak kullanılan bir besleme türüdür. Bir diğer temaslı besleme türü ise koaksiyel beslemedir. Koaksiyel besleme mikroşerit antenlerde sık kullanılan bir diğer besleme türüdür. Bu besleme türünde antenin toprak kısmından yama kısmına açılan bir delik bulunmaktadır. Bu delik içerisinden geçirilen konektörün canlı ucunun antenin yama kısmına lehimlenmesiyle direk bağlantı olması sağlanır. Konektörün toprak kısmı antenin toprak kısmına lehimlenerek bağlantı oluşturulmuş olur. Koaksiyel beslemenin en büyük avantajı besleme noktasının rahat bir şekilde değiştirilebilmesidir. Giriş empedansı uyumlaması yaparken bu özellik oldukça avantaj sağlamaktadır.

Antenin besleme hattının fiziksel olarak antenin yama kısmına temas etmediği besleme çeşitlerine bağlaşımlı besleme denilmektedir. Besleme elektromanyetik bağlaşım yöntemi ile sağlanmaktadır. İki çeşit bağlaşımlı besleme yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan ilki açıklık bağlaşımlı beslemedir. Bu besleme yönteminde iki farklı alttaşı kullanılmaktadır. Antenin yama kısmı bir yüzeyde ve antenin besleme hattı diğer bir yüzeyde bulunmaktadır. İki alttaşı arasında ise toprak yüzey bulunmaktadır. Besleme alt

yüzeyde bulunan besleme hattından yama kısmına açılmış olan yarık/boşluk sayesinde iletilir. Açıklık bağlaşımlı beslemenin avantajlarından biri büyük bant genişlikleri sağlayabilmesidir. Dezavantaj olarak ise üretim zorlukları söylenebilir. Bir diğer bağlaşımlı besleme yöntemi ise yakınlık bağlaşımlı beslemedir. Bu tür besleme aynı zamanda “elektromanyetik bağlaşımlı besleme” olarak da anılmaktadır. Bu besleme çeşidinde de iki farklı alttaşı kullanılmaktadır. Besleme hattı iki alttaşın arasında bulunmakta iken antenin yama kısmı üst yüzeyde, antenin toprak hattı ise alt yüzeyde bulunmaktadır. Bu besleme çeşidinin avantajı oldukça yüksek bant genişlikleri elde edilebilmesidir. Dezavantaj olarak ise üretim zorlukları söylenebilir [32].

2.4 Dizi Antenler

5G teknolojilerinde milimetre dalga bantlarının kullanılacağına öngörülmesinin bant genişliği ihtiyaçlarına ve yüksek veri aktarım hızlarına ulaşılmasında büyük bir avantaj yaratacağı düşünülmektedir. Fakat bu yüksek frekansların kullanılmasının sistem tasarımına yüksek atmosfer soğrulma oranları ve sinyal blokaj/girişim oranlarının artması gibi dezavantajları olacağı bilinmektedir. Bu gibi olumsuz durumların önlenmesi için MASSIVE MIMO gibi çok sayıda antenden oluşan çözümlerin önem kazanacağı düşünülmektedir. MASSIVE MIMO yapılarında bulunan anten elemanı sayısı uygulamaya göre değişiklik göstermekle birlikte onlarca antenden binlerce antene kadar olabileceği belirtilmektedir. mmDalga bandında frekansın artmasıyla anten boyutları küçülecektir. Birim hacme daha fazla anten sığabilecek, MIMO performansında artış sağlanabilecektir [33]. Genellikle tek anten elemanında antenin yönlülüğünün ve kazancının düşük, anten hüzmelerinin ise geniş bir açıyı kapsadığı bilinmektedir. Bu 5G sistemlerinde kullanılacak milimetre dalga bandı için istenen bir özellik değildir. Atmosfer soğrulma oranı yüksek olduğundan dolayı yüksek kazanç ve yönlülüğe sahip anten yapılarının kullanılmasının avantaj yaratacağı bilinmektedir. Çok sayıda anten elemanı kullanılarak oluşturulan dizi anten yapılarının kazanç ve yönlülüklerinin arttığı dolayısıyla kapsama alanlarının arttığı bilinmektedir. Ayrıca çok sayıda anten elemanından oluşan MIMO yapılarının hüzmeye yönlendirme teknikleriyle kullanılmasıyla birlikte tekil kullanıcılara veya bir bölge/alana hüzmeye yönlendirilebilecek ve düşük hareket kapasitesine sahip kullanıcıların daha yüksek sinyal gürültü oranlarındaki (SNR) yayınlarda hizmet alabilmesi sağlanacaktır.

MIMO tipi anten yapılarında hüzmünün şeklini belirlemede dizi yapısının geometrik konfigürasyonu, anten elemanları arasındaki uzaklık, anten elemanlarına uygulanan faz farkları ve/veya genlik farkları ve anten elemanlarının kendi ışıma karakteristikleri gibi faktörler etkili olmaktadır. Hüzme yönlendirme için farklı teknikler kullanılabilir. Bunlara örnek olarak faz dizili anten yapıları verilebilir. Faz dizili anten yapılarında, dizide bulunan anten elemanları farklı fazlarla uyarılarak anten ana hüzmünün istenilen yöne yönlendirilmesi sağlanır.

Dizi anten mimarilerinde mikroşerit antenler, boynuz antenler, dipol antenler gibi değişik anten elemanı tipleri kullanılabilir. Anten elemanı seçimi, uygulama türüne, performans ihtiyacına, fiziksel boyut kısıtlarına, üretim zorluklarına ve maliyete göre değişebilmektedir [34].

2.5 Dizi Faktörü

Anten dizileri çok sayıda antenin bir araya gelmesiyle oluşmuş yapılardır. Bu yapılarda tüm antenlerden gelen ışımlar toplanarak bütüncül anten ışıması elde edilir. Oluşan bu bütüncül ışımayı incelemek için her anten elemanından gelen katkı dikkate alınmalıdır. Anten sayısının artması ve anten dizilim mimarisinin karmaşık hale gelmesi hesaplamaları zorlaştırmaktadır. Dizi faktörü (DF) bu hesaplamaların daha kolay yapılabilmesi amacıyla antenin uzak alan radyasyon karakteristiğinin belirlenmesinde hesaplamaları kolaylaştıran bir yöntemdir.

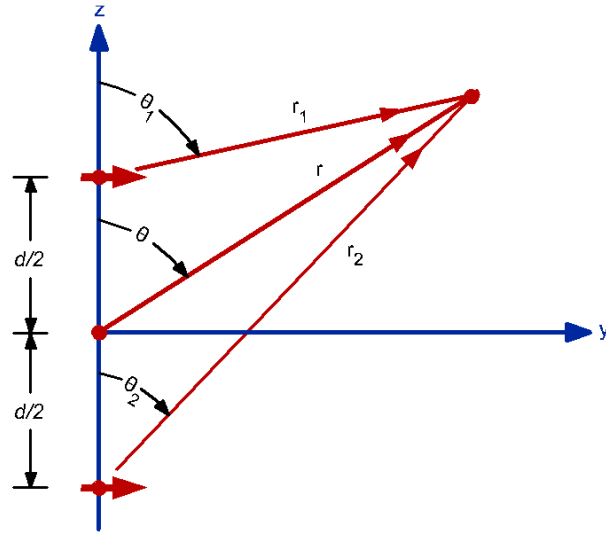
2.5.1 İki Elemanlı Dizi Faktörü

İki elemanlı dizi olabilecek en basit dizi yapısıdır. İki adet sonsuz küçüklükte dipol anten elemanı yatay bir şekilde z eksenine Şekil 2-2’de görüldüğü gibi yerleştirilmiş olsun.

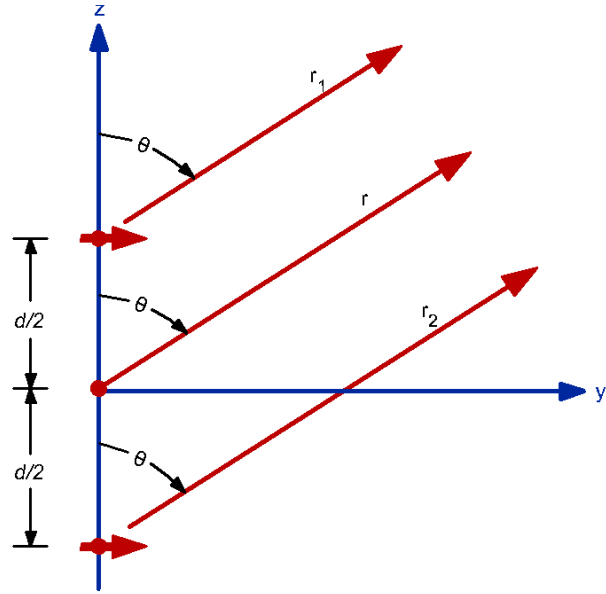
Tek anten elemanının elektrik alan ifadesi (1.6)’da görüldüğü gibi ifade edilir.

$$\vec{E}_1 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kl_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \quad (1.6)$$

(1.6) ile verilen denklemde $\vec{E}_1$ 1. anten elemanının r kadar uzaklıkta oluşturduğu elektrik alanı ifade etmektedir. η ortamın öz empedansını (120π), k faz sabitini ($2\pi/\lambda$), I_0 uyarım akımının genliğini, l anten uzunluğunu ifade etmektedir.



(a) İki Adet Sonsuz Küçük Dipol Anten Elemanı



(b) Uzak Alan Gözlemleri

Şekil 2-2 (a) İki Elemanlı Anten Dizisi (b) Uzak Alan Gösterimi [30]

Gözlem noktasında toplam elektrik alan ifadesi, anten elemanlarının tek başlarına oluşturdukları elektrik alan ifadelerinin toplamı olarak (1.7)'de ki gibi ifade edilir.

$$\vec{E}_t = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j|kr_1-(\beta/2)|}}{r_1} \cos \theta_1 + \frac{e^{-j|kr_2+(\beta/2)|}}{r_2} \cos \theta_2 \right\} \quad (1.7)$$

(1.7) ile verilen denklemde $\vec{E}_1$ 1. anten elemanının r kadar uzaklıkta oluşturduğu elektrik alanı, $\vec{E}_2$ 2. anten elemanının r kadar uzaklıkta oluşturduğu elektrik alanı $\vec{E}_t$ ise toplam elektrik alanı ifade etmektedir. η ortamın öz empedansını (120π), k faz sabitini ($2\pi/\lambda$), I_0

uyarım akımının genliğini, l anten uzunluğunu ve β elemanlar arasındaki besleme akımının faz farkını ifade etmektedir.

Şekil 2-2 (b)'de gösterimi yapılan uzak alan hesaplamalarında $r_1=r_2=r$ ve $\theta_1=\theta_2=\theta$ olduğu varsayılmaktadır. (1.7) denkleminde belirtilen eşitlikler uygulandığında (1.8) denklemi elde edilir.

$$\vec{E}_t = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kl_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (1.8)$$

(1.8) denklemi incelendiğinde toplam elektrik alan ifadesinin tek anten elemanının elektrik alan ifadesi ve başka bir ifadeyle çarpımı olduğu görülmektedir. Burada yer alan bu ifadeye dizi faktörü denilmektedir ve (1.9) denkleminde verilen şekliyle ifade edilmektedir.

$$DF = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (1.9)$$

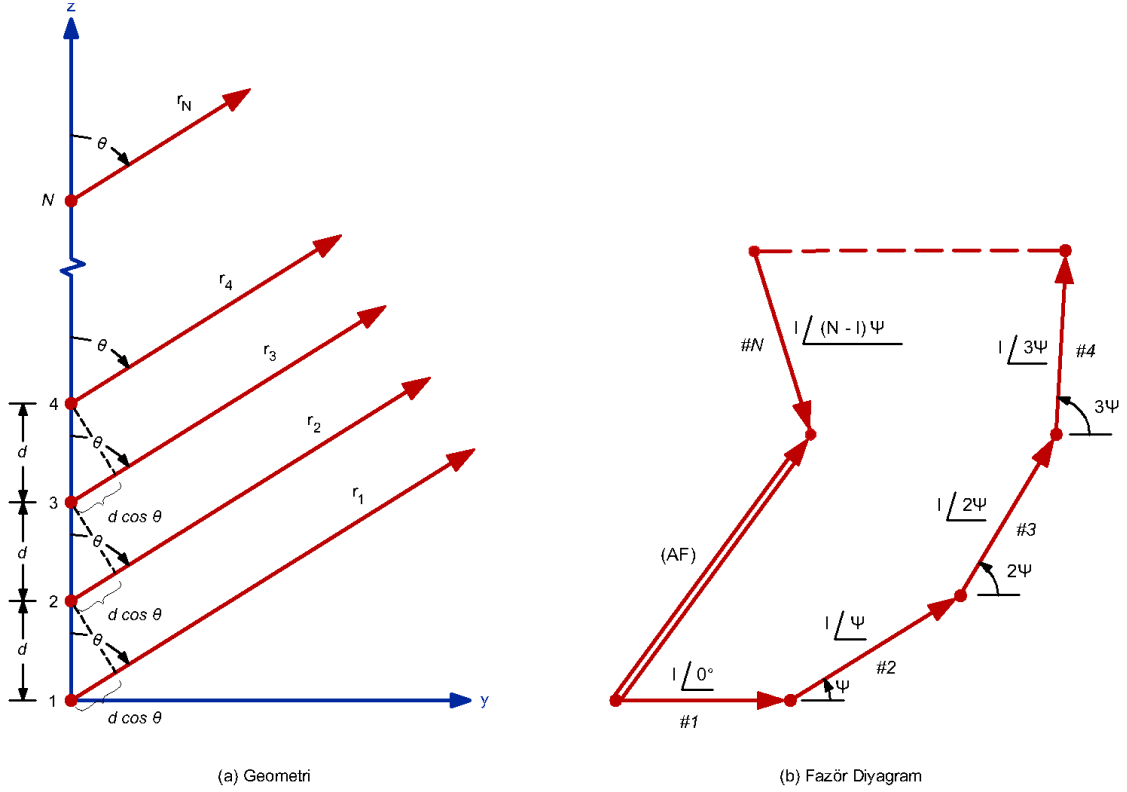
Normalize edilmiş dizi faktörü ise (1.10)'da verilen şekilde ifade edilir.

$$(DF)_n = \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (1.10)$$

Dizi faktörü dizinin geometrisi ve anten elemanlarının uyarımları arasındaki faz farkının bir fonksiyonudur. Anten elemanları arasındaki uzaklık ve uyarımlar arasındaki faz farkları değiştirilerek dizi faktörünün karakteristiği değiştirilebilir. İki özdeş elemanlı anten dizisinin uzak bir noktadaki elektrik alan ifadesi, bir elemanın elektrik alan ifadesi ve dizi faktörünün çarpımı olarak ifade edilir [30].

2.5.2 N Elemanlı Doğrusal Dizi Faktörü

Şekil 2-3 (a)'da görüldüğü gibi z ekseninde bulunan N elemanlı doğrusal bir anten dizisi olsun. Anten elemanlarının özdeş olduğu ve aynı genlikle fakat β faz farkıyla uyarıldığı bu dizi yapısına düzgün dizi yapısı denilir [30].



Şekil 2-3 (a) N Elemanlı Doğrusal Dizi (b) Fazör Gösterim [30]

Düzgün dizi yapısında dizi faktörü (1.11)'de verildiği gibi her anten elemanının r kadar uzaklıkta oluşturduğu katkıların toplamı şeklinde ifade edilebilir.

$$DF = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{+j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (1.11)$$

(1.11) Eşitliği daha kısa bir şekilde (1.12)'de verildiği şekilde yazılabilir.

$$DF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (1.12)$$

burada $\psi = kd \cos \theta + \beta$ ifade etmektedir.

Düzgün dizi yapısında dizi faktörü üstel ifadelerin toplamı şeklinde ifade edilmektedir. Bu ifade N adet eş genliğe sahip fakat bir önceki anten elemanına göre ψ kadar faz farkı olan vektör toplamı şeklinde Şekil 2-3 (b)'de gösterildiği gibi ifade edilebilir. Şekil 2-3 (b)'deki fazör diyagramı incelendiğinde dizi faktörü karakteristiğinin değişmesi için anten elemanları arasındaki faz farkının değişmesi gerektiği görülebilir. Düzgün olmayan dizi yapılarında ise anten elemanları arasındaki uyarım faz farkları kadar uyarım genliklerinin değiştirilmesi de dizi faktörünün karakteristiğini değiştirecektir.

2.5.3 N Elemanlı Düzlemsel Dizi Faktörü

Anten dizileri doğrusal bir hatta dizilmiş anten elemanlarıyla oluşturulabileceği gibi, düzlemsel bir alan üzerinde her iki boyutta dizilmiş antenlerle de oluşturulabilir. Düzlemsel anten dizileri doğrusal anten dizilerine göre bazı konularda daha avantajlıdır. Düzlemsel dizilerde ana anten hüzmeleri doğrusal dizilere göre daha simetrik, bununla birlikte ikincil ve üçüncül yan hüzmeleri daha düşüktür. Ayrıca hüzmeyi her iki ekseninde yönlendirebilme imkanı bulunmaktadır. Düzlemsel diziler endüstride radarlar, haberleşme sistemleri ve uzaktan algılama yapılan sistemler gibi birçok alanda kullanılmaktadır [30].

Şekil 2-4 (a)'da gösterildiği gibi x eksenine yerleştirilmiş ve aralarında d_x uzaklığı bulunan M adet anten elemanından oluşan bir anten dizisi olsun. Bu doğrusal dizinin dizi faktörü (1.13)'te verilen denklemle ifade edilir. Burada I_{m1} her elemanın uyarım katsayısını, d_x anten elemanları arasındaki uzaklığı, β ise anten elemanları uyarımları arasındaki faz farkını belirtmektedir.

$$DF = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \quad (1.13)$$

Düzlemsel dizi elde etmek için Şekil 2-4 (b)'de gösterildiği gibi x eksenindeki her anten elemanının yanına y eksenini doğrultusunda N adet anten elemanından oluşan antenler eklendiğini düşünelim. Bu durumda dizi faktörü (1.14)'de gösterildiği gibi olacaktır. Burada I_{ln} her elemanın uyarım katsayısını, d_y anten elemanları arasındaki uzaklığı, β_y ise anten elemanları uyarımları arasındaki faz farkını belirtmektedir.

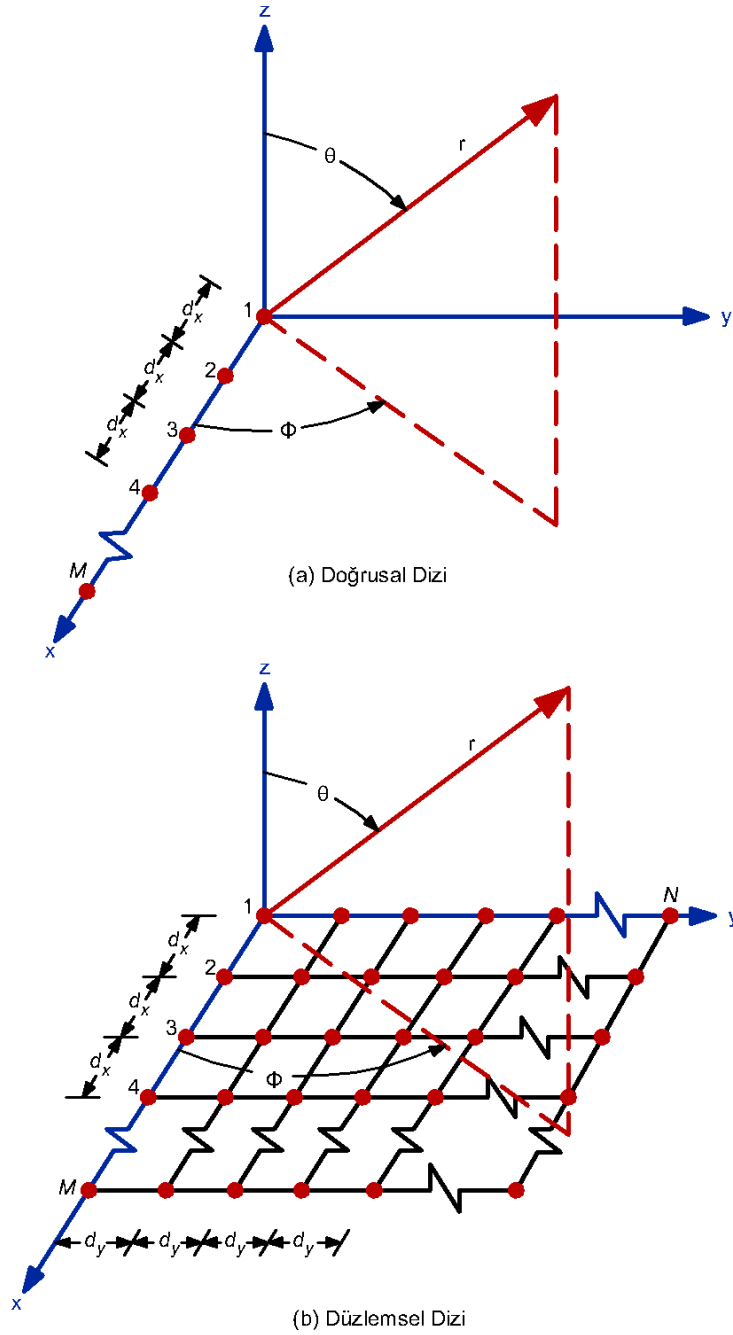
$$DF = \sum_{n=1}^N I_{ln} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)} \quad (1.14)$$

Dizi faktörü kısaca (1.15)'de gösterildiği gibi ifade edilebilir. Burada S_{xm} ve S_{yn} sırasıyla x ve y doğrultusundaki dizi faktörleridir. İki boyutta olan düzlemsel dizilerin dizi faktörü bu iki doğrultudaki dizi faktörlerinin çarpımı cinsinden ifade edilir.

$$DF = S_{xm} S_{yn} \quad (1.15)$$

$$S_{xm} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \quad (1.16)$$

$$S_{yn} = \sum_{n=1}^N I_{ln} e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)} \quad (1.17)$$



Şekil 2-4 Doğrusal ve Düzlemsel Dizi Geometrileri [30]

2.6 Dizi Boyutlarının Anten Özelliklerine Etkileri

Anten dizilerinde toplam ışıma örüntüsünün anten elemanının örüntü özelliklerine ve dizi faktörünün örüntü özelliklerine bağlı olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti. Özdeş anten elemanlarıyla oluşturulan dizilerde kullanılan anten elemanı sayısının ve anten elemanlarının yerleşiminin toplam örüntü üzerinde önemli etkileri olduğu bilinmektedir [32].

Artan eleman sayısıyla birlikte toplamda oluşan ana hüzmelerin daha dar bir karakteristikte olduğu, daha yüksek yönlülük ve kazanç değerlerine sahip olduğu, ikincil ve daha üst mertebede oluşan hüzmelerin sayılarının arttığı fakat genlik seviyelerinin düştüğü, anten elemanları arasındaki izolasyon (etkileşim) değerlerinin kötüleştiği bilinmektedir.

Anten elemanları arasındaki mesafenin artmasıyla birlikte artan eleman sayısına benzer şekilde ana hüzmelerin daha dar bir karakteristikte olmasına ve daha yüksek yönlülük ve kazanç değerline sebep olduğu, ikincil ve daha üst mertebede oluşan hüzmelerin sayılarının arttığı fakat genlik seviyelerinin düştüğü, grating lobe gibi istenmeyen yüksek genlikli ışıma örüntülerine yol açabileceği bilinmektedir.

Grating lobe anten elemanları arasındaki mesafeye göre oluşabilen, antenin istenmeyen yönlerde yayın yapmasına veya gelen yayını almasına sebep olarak ifade edilen kavramdır. Anten elemanları arasındaki mesafeye bağlı olarak genişbantta yayın yapan dizilerde bandın bazı bölgelerinde etkili olabileceği gibi, tüm bant boyunca da oluşabilir. Grating lobe oluşmasının engellenmesi için anten elemanları arasındaki mesafe (1.18)'de belirtildiği gibi yayın yapılan bandın en yüksek frekansının dalga boyunun yarısından küçük olmalıdır. Dizi doğrusal bir dizi ise anten elemanları yerleştirildikleri doğrultuda bu kısıtı sağlamalıdır. Aynı şekilde eğer dizi düzlemsel ise, anten elemanlarının yerleşimi düzlemi oluşturan her iki doğrultuda bu kısıtı sağlamalıdır.

$$d < \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (1.18)$$

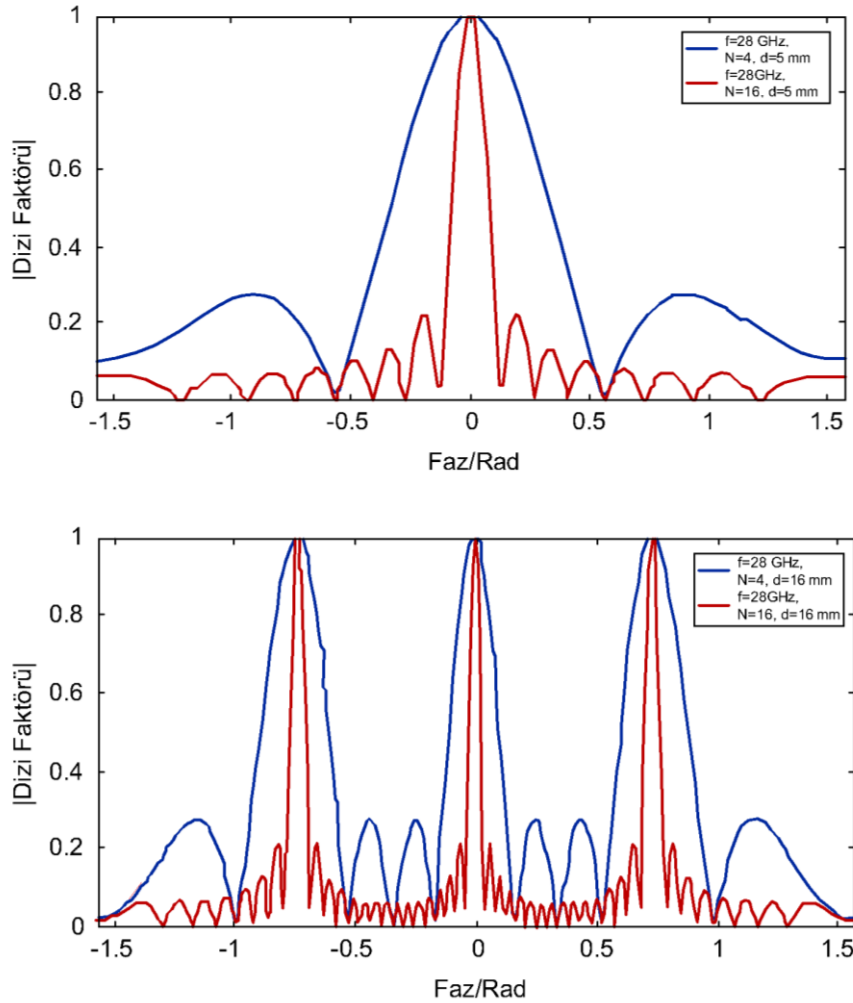
Anten elemanları arasındaki mesafe antenin yayın yaptığı en yüksek frekansın dalga boyunun yarısından daha büyük değerlere doğru gittikçe dizi faktöründe grating lobe denilen istenmeyen örüntüler oluşmaya başlamaktadır. Anten elemanları arasındaki mesafe bir dalga boyunu aşmaya başladığında ise grating lobe'un genliği ana hüzmeye genliğine eşit olmaya başlamaktadır. Grating lobe oluşmasının engellenmesi için anten dizisinin tarama açısının azaltılması veya anten elemanları arasındaki mesafenin azaltılması gerekmektedir. Grating lobe oluşmadan verilen anten elemanı mesafelerindeki tarama açısı (1.19)'da verilen denklemle belirlenmektedir.

$$\sin|\theta_0| \leq \frac{\lambda}{d} - 1 \quad (1.19)$$

(1.19)'da verilen eşitliğin tekrar düzenlenmesiyle elde edilen (1.20) eşitliğinde verilen bir tarama açısını sağlamak için oluşturulacak dizi yapısındaki anten elemanları arasındaki maksimum mesafe belirlenmektedir.

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1+\sin|\theta_0|} \quad (1.20)$$

Literatür incelendiğinde anten dizilerindeki anten eleman sayısının ve anten elemanları arasındaki yerleşimin etkileri üzerine çalışmalar olduğu görülmektedir. Yapılan bir çalışmada 28 GHz rezonans frekansında ışıma yapan bir doğrusal dizinin anten elemanı sayısının ve yerleşiminin etkilerine değinilmiştir. Yapılan çalışmada doğrusal dizinin anten elemanı sayısı 4 ve 16 olduğunda ve ayrıca anten elemanları arasındaki mesafe 5mm ($<\lambda/2$) ve 16 mm ($>\lambda/2$) olduğundaki durumlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2-5 incelendiğinde anten elemanı sayısının artışının dizi faktöründe ana hüzmeyi daralttığı, yönlülüğü ve kazancını arttırdığı, ikincil ve üst mertebede oluşan hüzmeye sayılarını artırdığı fakat genliklerinin düştüğü görülebilir. Ayrıca anten elemanlarının arasındaki mesafe arttıkça da ana hüzmelerin daraldığı, yönlülüğün ve kazancın arttığı, ikincil ve üst mertebede oluşan hüzmeye sayısının arttığı fakat genliklerinin düştüğü, ayrıca grating lobe oluşumu görülebilir [35].



Şekil 2-5 (a) N=4 d=5mm, N=16 d=5mm, (b) N=4 d=16mm, N=16 d=16mm [35]

3. MİKROŞERİT TEK ANTEN VE BENZETİMLERİ

Bu bölümde 28 GHz rezonans frekansını kapsayan tek antenin tasarlanma aşamaları, geri dönüş kaybı, kazanç, yönlülük, anten hüzmeye karakteristiği gibi özellikleri ve anten besleme noktası, seçilen alttaş malzemesinin yüksekliği gibi etmenlerin anten performansına etkileri incelenecektir.

3.1 Tek Anten Tasarımı ve Analizi

Antenin boyutlarının hesaplanabilmesi için birkaç parametrenin belirlenmiş olması gerekmektedir. Bunlar, antenin rezonans frekansı, alttaş malzeme seçimi ve kullanılacak alttaş malzemesinin yüksekliğidir. Bu tez çalışmasında dielektrik sabiti 3.55 (ϵ_r) olan Rogers RO4003 alttaşı kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılacak önceden belirlenmiş bazı parametreler aşağıda verilmiştir.

f_r = Tek antenin çalışacağı rezonans frekans = 28 GHz

ϵ_r = Dielektrik sabiti = Rogers RO4003 = 3.55

h = Alttaş yüksekliği = 0.8 mm

Tek antenin genişliğinin belirlenmesi için (1.1) ile belirtilen denklemin kullanılabileceği gösterilmiştir. Bilinmeyenler (1.1) denkleminde yerine konulduğunda tek antenin genişliği $W = 3.55$ mm olarak bulunmaktadır.

Daha sonra saçaklanma etkisiyle tek antenin boyutlarının elektriksel olarak fiziksel olduğundan daha büyük gözükecek olması sebebiyle etkin dielektrik sabitinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için (1.2)'de belirtilen denklem kullanılacaktır. (1.2)'de değişkenler yerine konulduğunda $\epsilon_{reff} = 2.94$ olarak bulunmaktadır.

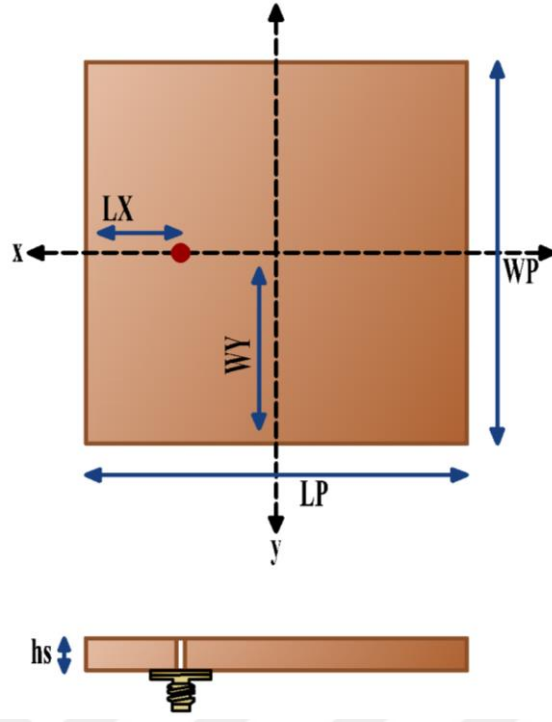
Etkin dielektrik sabitinin bulunmasından sonra ise saçaklanma sebebiyle elektriksel olarak oluşacak Δ_L ile belirtilen fazlalığın hesaplanması gerekmektedir. (1.3) denkleminde bilinmeyenler yerine konulduğunda $\Delta_L = 0.35$ mm olarak bulunmaktadır.

Son olarak tek antenin etkin uzunluğunun hesaplanması gerekecektir. Bunun için (1.4) ile belirtilmiş olan denklem kullanılacaktır. Bu denklemde bilinmeyenler yerine konulduğunda ise 2.42 mm değeri bulunmaktadır.

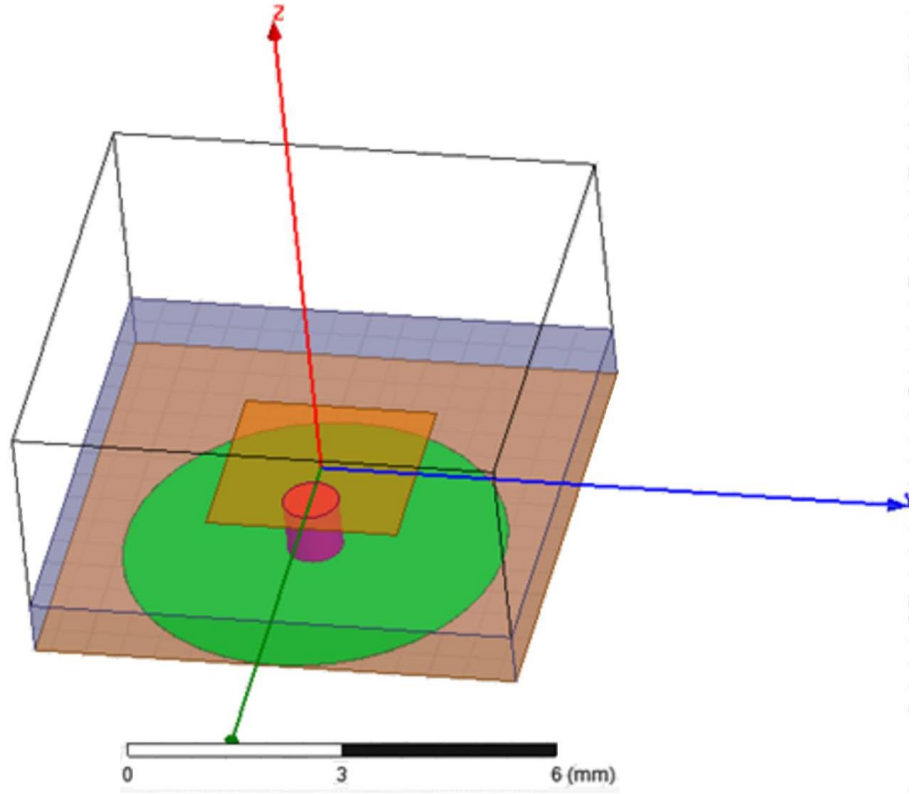
Anten boyutları hesaplandıktan sonra HFSS simülasyon programında benzetimler yapılmıştır. Besleme noktası antenin yama kısmı üzerinde giriş empedansı ile uyumlandırılarak, geri dönüş kaybının en düşük olduğu noktaya konumlandırılmıştır [36]. Yapılan parametrik analizlerde bu nokta 0.65 mm olarak bulunmuştur. Yapının hem dikey hem yatay polarizasyona sahip olabilmesi amacıyla tek antenin kare olarak tasarlanmasına karar verilmiştir. Anten tasarımında kullanılan HFSS simülasyon programında anten tasarlanırken parametrik analizlerin daha kolay yapılabilmesi amacıyla anten uzunluklarına çeşitli değişkenler atanmıştır. Bu değişkenler ve benzetimler sonucunda elde edilen değerler Çizelge 3-1’de, değişkenlerin anten üzerindeki konumları Şekil 3-1’de görülmektedir. HFSS Simülasyon programında tasarlanan tek antenin görünümü ise Şekil 3-2’de verilmiştir. Analizlerde kullanılacak olan ϕ ve θ ile tanımlı yanca ve yükseliş eksenleri Şekil 3-3’de görülmektedir.

Çizelge 3-1 Anten Değişkenleri

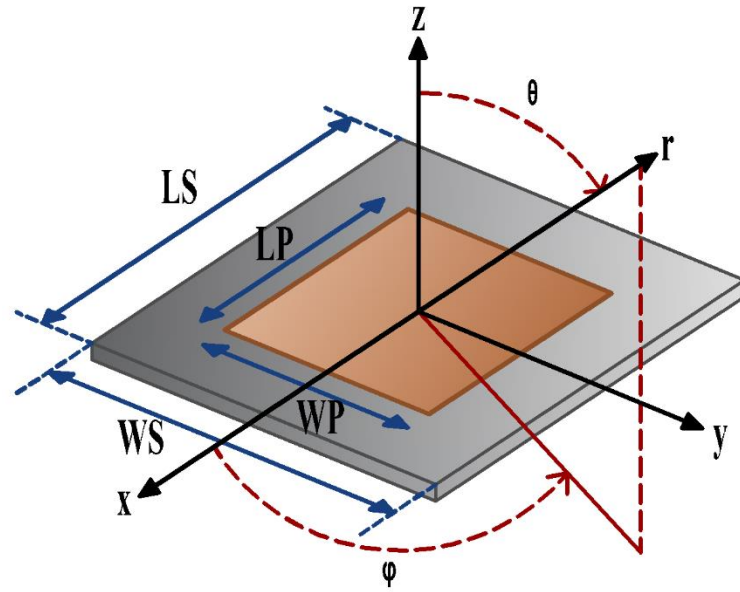
Parametre	Tanım	Değer
LS	Altaş Uzunluğu	7 mm
WS	Altaş Genişliği	7 mm
HS	Altaş Yüksekliği	0.8 mm
LP	Yama Uzunluğu	2.77 mm
WP	Yama Genişliği	2.77 mm
LX	Besleme Noktasının Yamanın X Eksenine Kenarına Olan Uzaklığı	0.65 mm
WY	Besleme Noktasının Anten Orijinine Y Eksenine Yönünde Olan Uzaklığı	0 mm
HX	Besleme Noktasının Toprak Yüzeyine Olan Uzaklığı	0 mm



Şekil 3-1 Mikroşerit Tek Anten

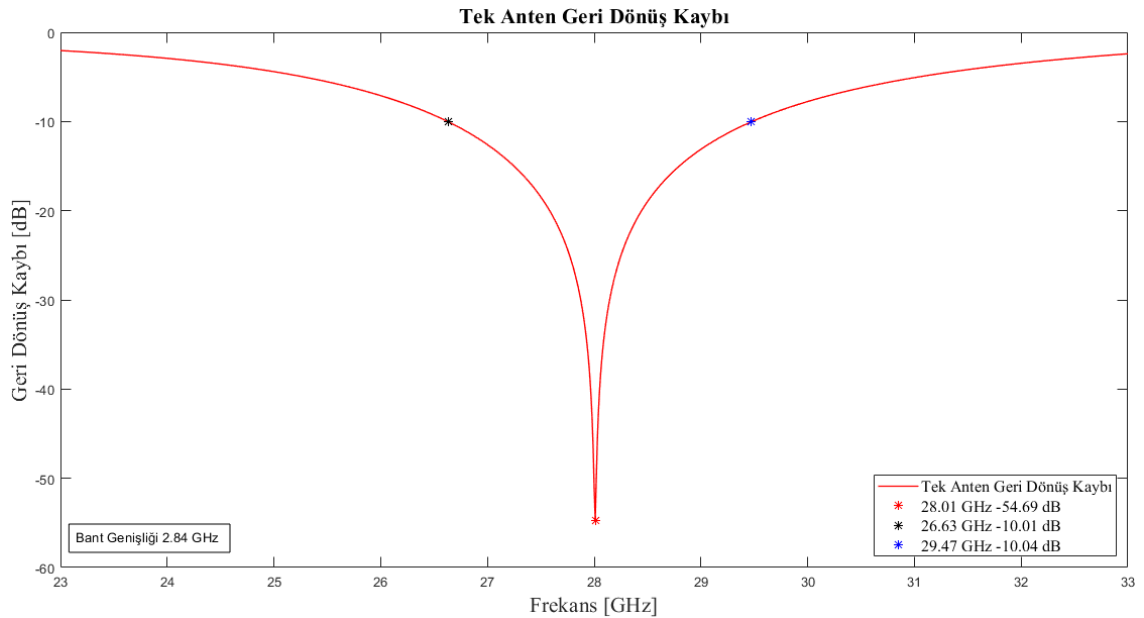


Şekil 3-2 Tek Anten Genel Görünümü



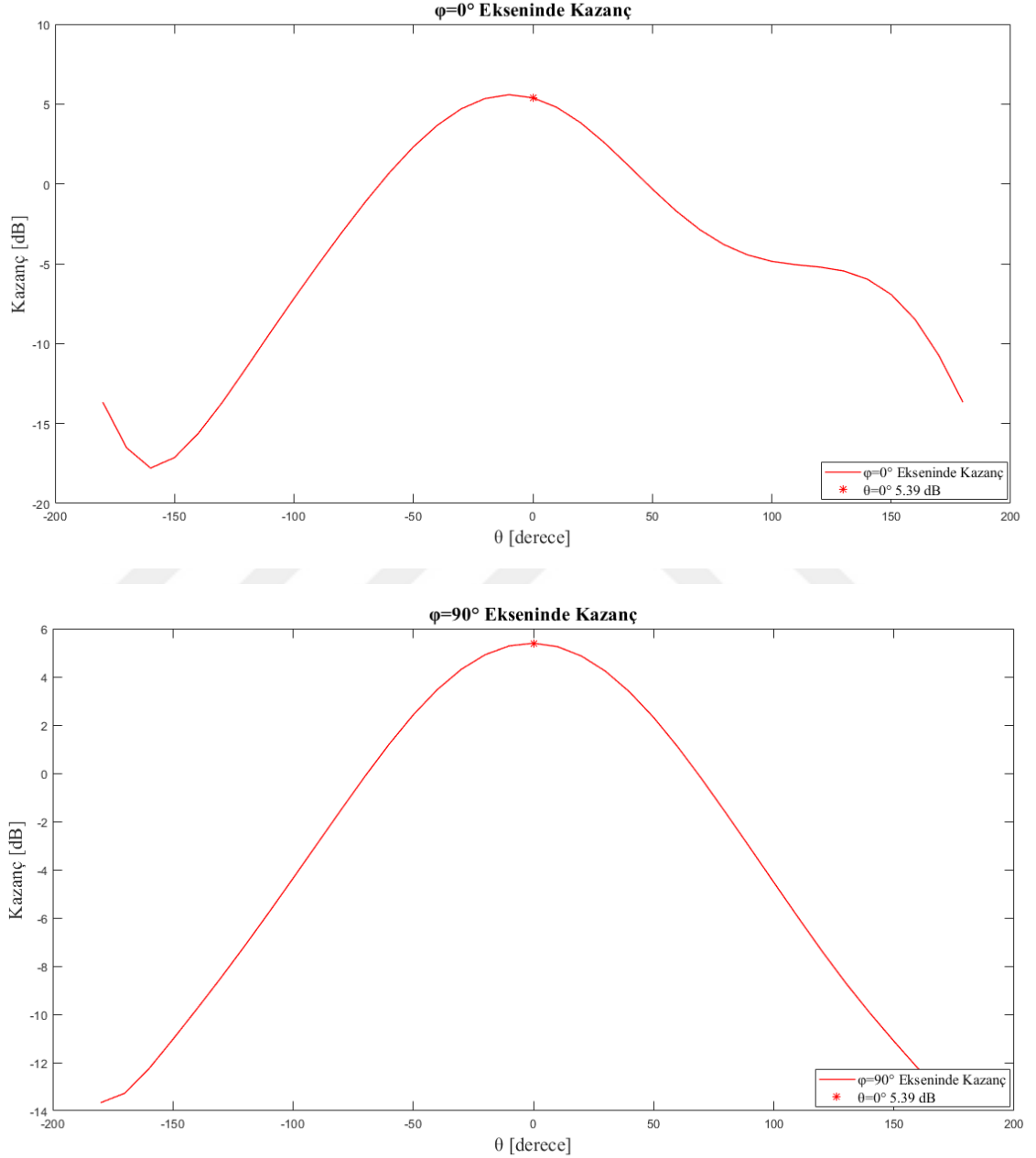
Şekil 3-3 Yanca ve Yükseliş Eksenleri

Bu tez çalışmasında tasarlanacak antenin üretilebilir olması hedeflenmiştir. Yapılan araştırmalar ve analizlerde antenin geniş bir bant boyunca yayın yapabiliyor olmasının avantaj sağlayacağı değerlendirilmiştir. Alttaş malzeme araştırması esnasında 0.8 mm yüksekliğinde Rogers RO4003 alttaşının temin edilebileceği ve tez çalışmasında tasarlanacak antenin üretiminde kullanılabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 3-4 Tek Anten Geri Dönüş Kaybı

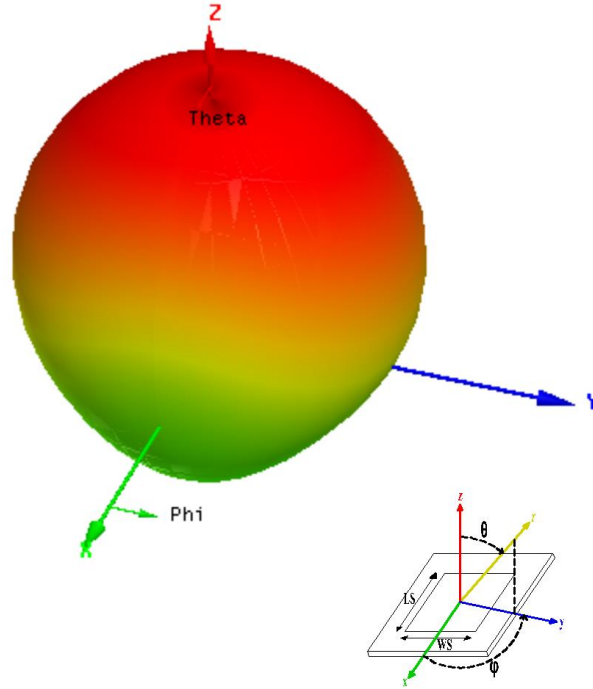
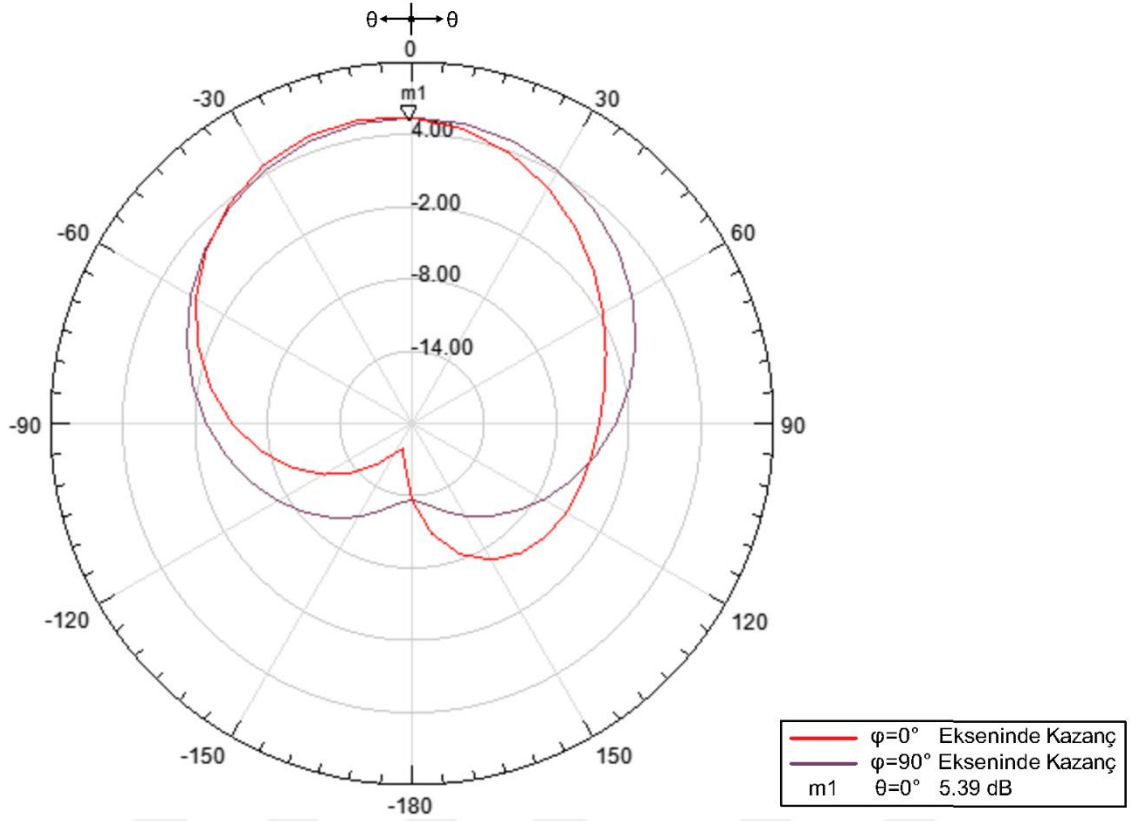
Şekil 3-4’de verilen antenin geri dönüş kaybı grafiği incelendiğinde -10 dB bant genişliğinin 26.63-29.47 GHz aralığında 2.84 GHz’lik bir büyüklüğe sahip olduğu görülmektedir. Belirtilen frekans aralığı 5G için aday bantlardan biri olan 28 GHz bandını kapsamaktadır. Maksimum geri dönüş kaybı ise 28.01 GHz’de -54.69 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 3-5 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Kazanç Grafikleri

Şekil 3-5’de $\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ ’de verilmiş olan kazanç grafikleri incelendiğinde tek antenin geniş bir açısal kapsamaya sahip olduğu ve maksimum 5.39 dBi kazanç değerine sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 3-6’da tek antenin $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ ’de ışıma karakteristiği, Şekil 3-7’de 3 boyutlu kazanç grafiği bulunmaktadır.



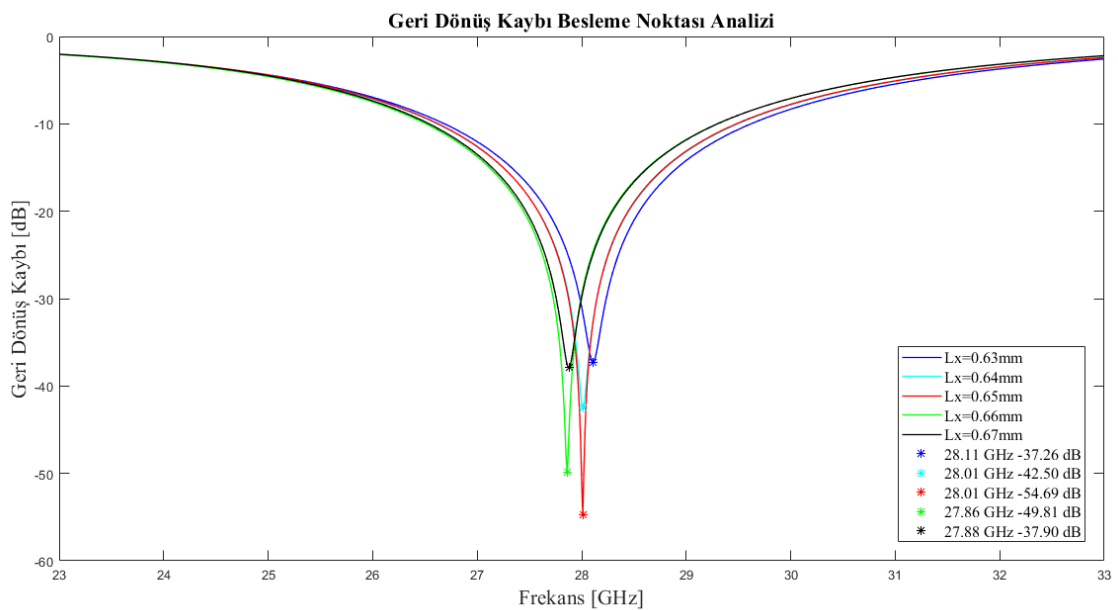
3.2 Anten Besleme Noktasının Anten Performansına Etkisi

Tek anten tasarlanırken koaksiyel besleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanılmasındaki asıl amaç düzlemsel dizi yapısına geçildiğinde antenin besleme hattının ışıma yapılan yüzeyden yalıtılmasının sağlanması ve dolayısıyla besleme hattının anten performansı üzerindeki olası olumsuz etkilerinin oluşmasının engellenmesidir. Bu bölümde sadece anten besleme noktasının yeri değiştirilecek ve diğer değişkenler sabit tutulacaktır. Böylece anten besleme noktasının anten performansına etkisi incelenebilecektir.

Yapılan analizdeki anten değişkenlerinin dağılımı Çizelge 3-2’de, geri dönüş kaybı grafiği ise Şekil 3-8’de verilmiştir.

Çizelge 3-2 LX Değişimi

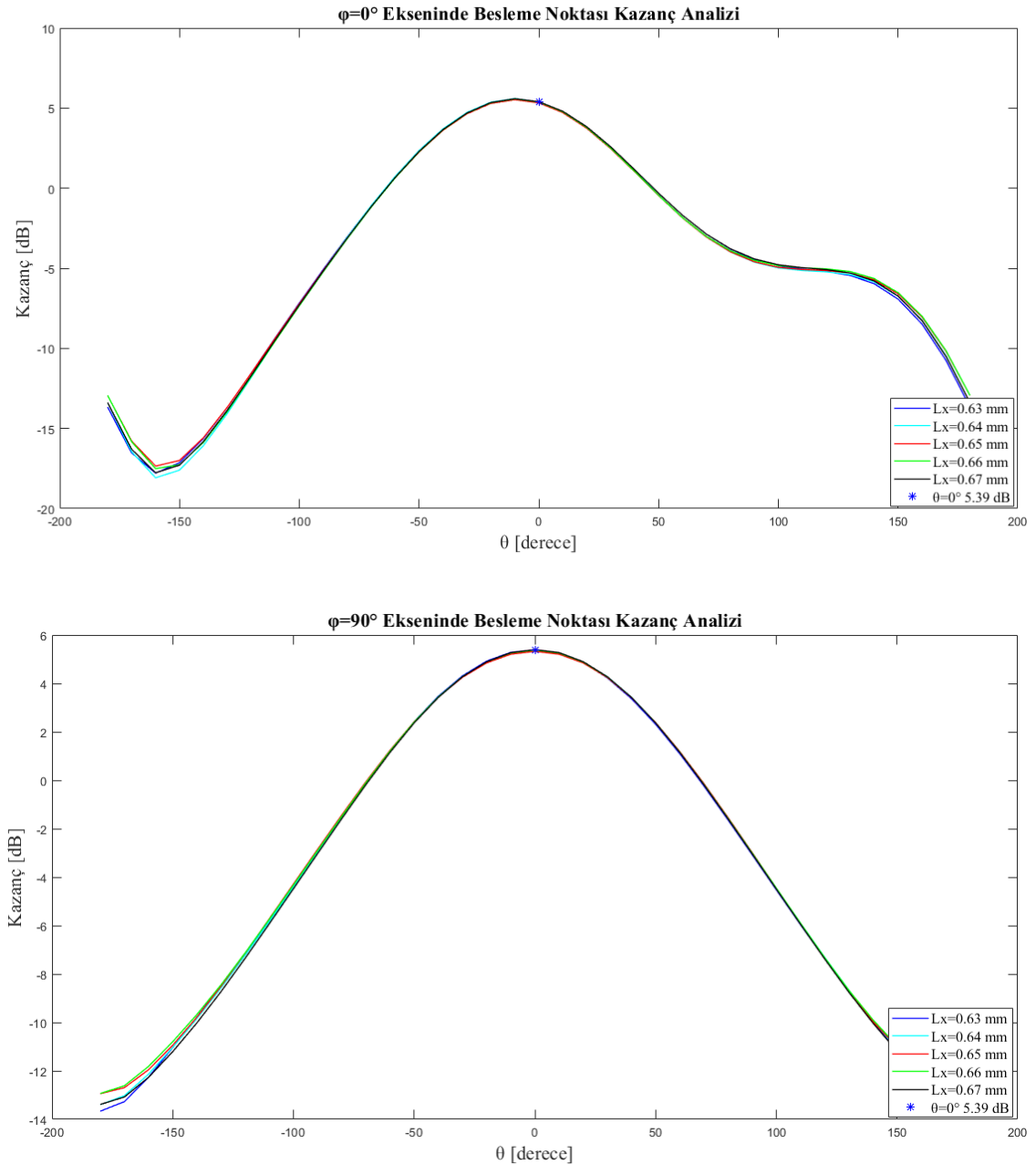
Durum	LS	WS	HS	LP	WP	LX	WY	HX
1	7 mm	7 mm	0.8 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.63 mm	0 mm	0 mm
2	7 mm	7 mm	0.8 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.64 mm	0 mm	0 mm
3	7 mm	7 mm	0.8 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
4	7 mm	7 mm	0.8 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.66 mm	0 mm	0 mm
5	7 mm	7 mm	0.8 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.67 mm	0 mm	0 mm



Şekil 3-8 Geri Dönüş Kaybı Besleme Noktası Analizi

Besleme noktasının yeri anten tasarımında giriş empedansını değiştirdiği için büyük etkilere yol açmaktadır. şekil 3-8’den de görüldüğü üzere besleme noktasının 5 farklı konumuna karşılık alınan geri dönüş kaybı değerlerinde -10 dB seviyesi bant genişliğini çok etkileyen bir durum olmasa da elde edilen maksimum geri dönüş kaybı değerleri açısından oldukça büyük farklar bulunmaktadır.

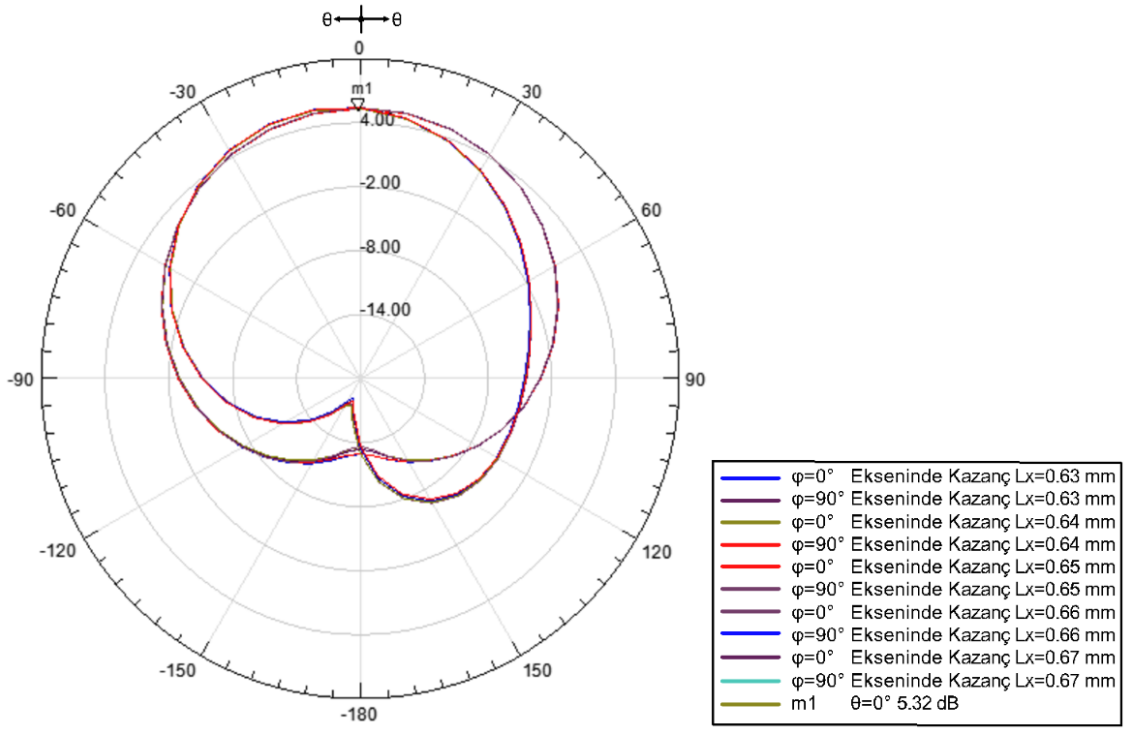
Kazanç değerlerinin $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ eksenleri üzerindeki değişimi şekil 3-9’dan görülebilir.



şekil 3-9 $\varphi=0^\circ$ & $\varphi=90^\circ$ Eksenlerinde Besleme Noktası Kazanç Analizleri

Kazanç değerlerinin besleme noktası değişiminden geri dönüş kaybı değerleri kadar etkilenmediği görülmektedir. Her 5 farklı besleme noktasında da benzer kazanç eğrileri elde edilmiştir.

Antenin değişen besleme noktası değerlerine göre kazanç analizi polar grafikte Şekil 3-10'da verilmiştir.



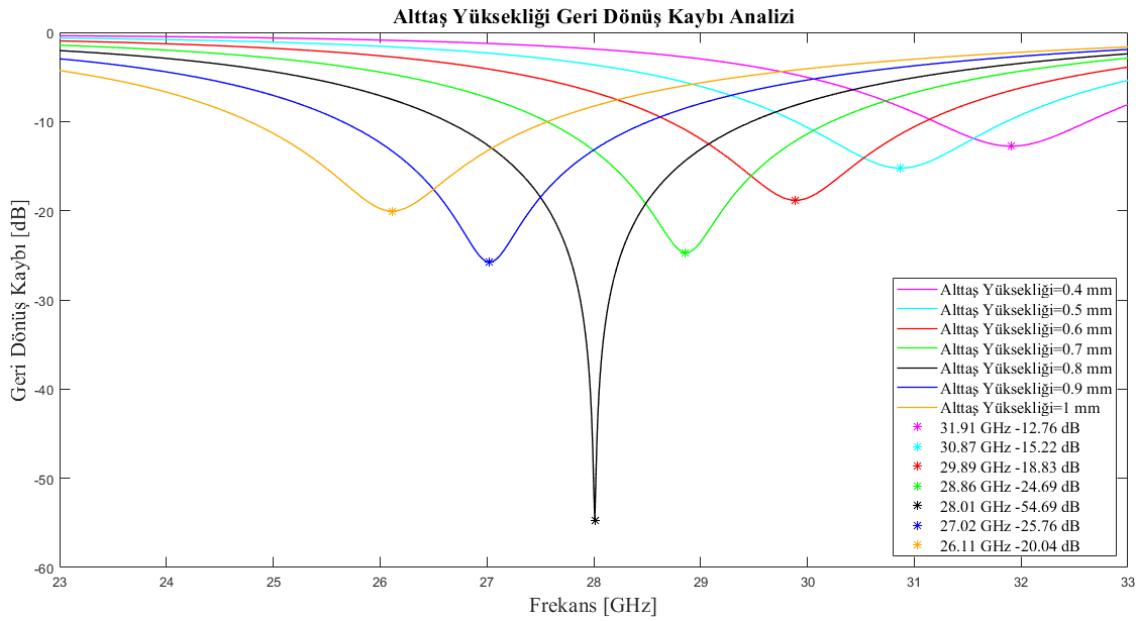
Şekil 3-10 $\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Besleme Noktası Kazanç Analizi (Polar Grafik)

3.3 Altaş Yüksekliğinin Anten Performansına Etkisi

Bu bölümde anten tasarımında kullanılan ve dielektrik sabiti 3.55 olan Rogers RO4003 altaşının yüksekliği değiştirilerek anten performansına etkisi gözlenecektir. Yapılan analizde diğer anten değişkenleri sabit tutulmuş sadece altaş yüksekliği parametresi olan HS değiştirilmiştir. Yapılan analizdeki anten değişkenlerinin dağılımı Çizelge 3-3'de, geri dönüş kaybı grafiği ise Şekil 3-11'de verilmiştir.

Çizelge 3-3 HS Değişimi

Durum	LS	WS	HS	LP	WP	LX	WY	HX
1	7 mm	7 mm	0.4 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
2	7 mm	7 mm	0.5 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
3	7 mm	7 mm	0.6 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
4	7 mm	7 mm	0.7 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
5	7 mm	7 mm	0.8 mm	2.5 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
6	7 mm	7 mm	0.9 mm	2.5 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
7	7 mm	7 mm	1 mm	2.5 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm

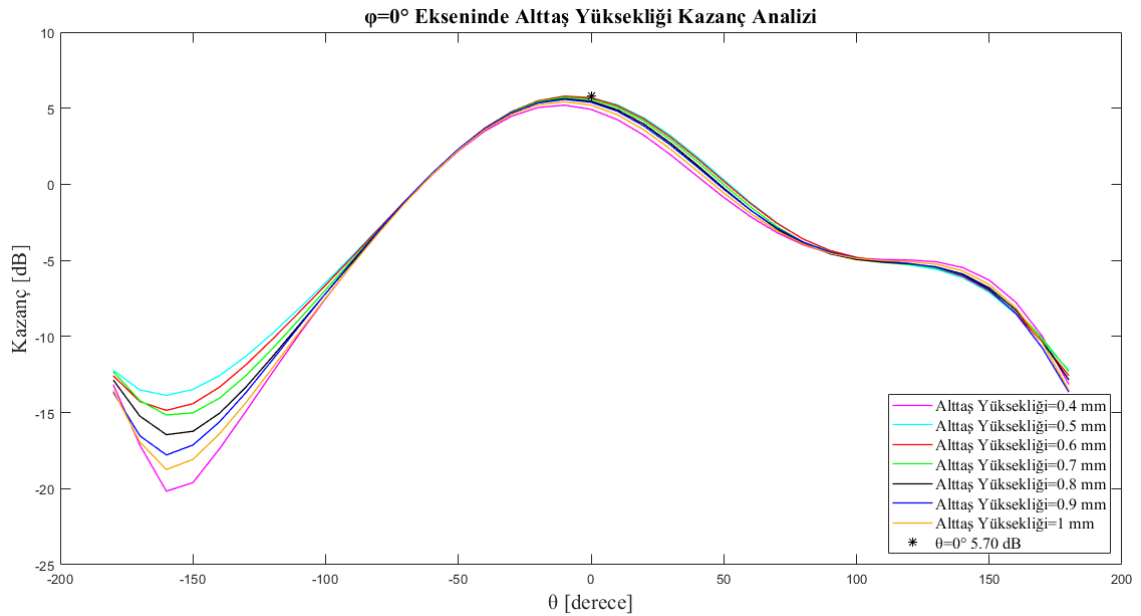


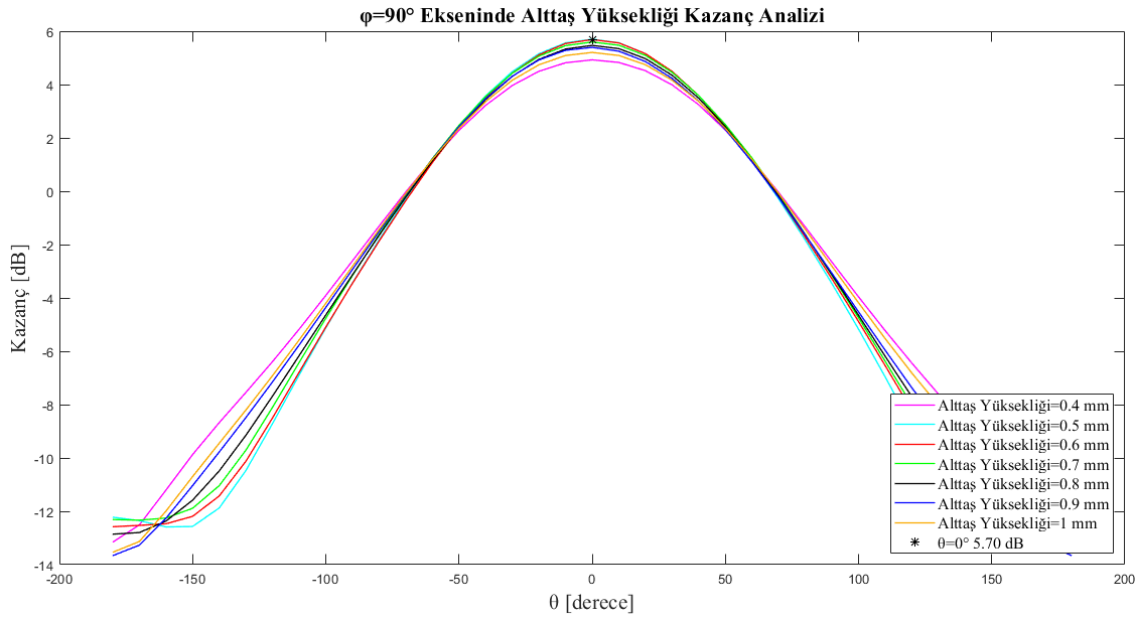
Şekil 3-11 Alttaş Yüksekliği Geri Dönüş Kaybı Analizi

Alttaş yüksekliği anten tasarımında oldukça önemli bir parametredir. Yapılan analizde sadece alttaş yüksekliği değiştirilmiş ve elde edilen geri dönüş kaybı grafiğinde rezonans frekansta değişimler görülmüştür. (1.2) denkleminde bakıldığında alttaş yüksekliği ve etkin dielektrik sabitinin ters orantılı olduğu görülmektedir. Alttaş yüksekliğinin azaltılması etkin dielektrik sabitinin değerini artırmaktadır. (1.4) ile ifade edilmiş olan yamanın uzunluğu denkleminde etkin dielektrik sabiti ile uzunluğun ters orantılı olduğu görülmektedir. (1.4) denkleminde göre antenin uzunluğunun artan etkin dielektrik sabitiyle

küçüleceği düşünülse de (1.3) denkleminde gelen Δ_L miktarı etkin dielektrik sabiti değişiminden çok daha büyük ölçüde etkilenmektedir. Sonuç olarak (1.4) denkleminde (1.3) denklemiyle hesaplanan Δ_L miktarı yerine konulup işlem yapıldığında antenin uzunluğunun alttaş yüksekliği azaldıkça artması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Yapılan analizde anten boyutlarının değiştirilmemiş olmasının sonucunda rezonans frekans, azalan alttaş yüksekliğine göre sabit tutulan yama boyutları dolayısıyla artmıştır. Alttaş yüksekliğinin 0.8 mm'den daha büyük değerlerde incelendiği 0.9 ve 1 mm boyutlarında da rezonans frekansın küçüldüğü görülmektedir.

Kazanç değerlerinin $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ eksenleri üzerindeki değişimi Şekil 3-12'den görülebilir.

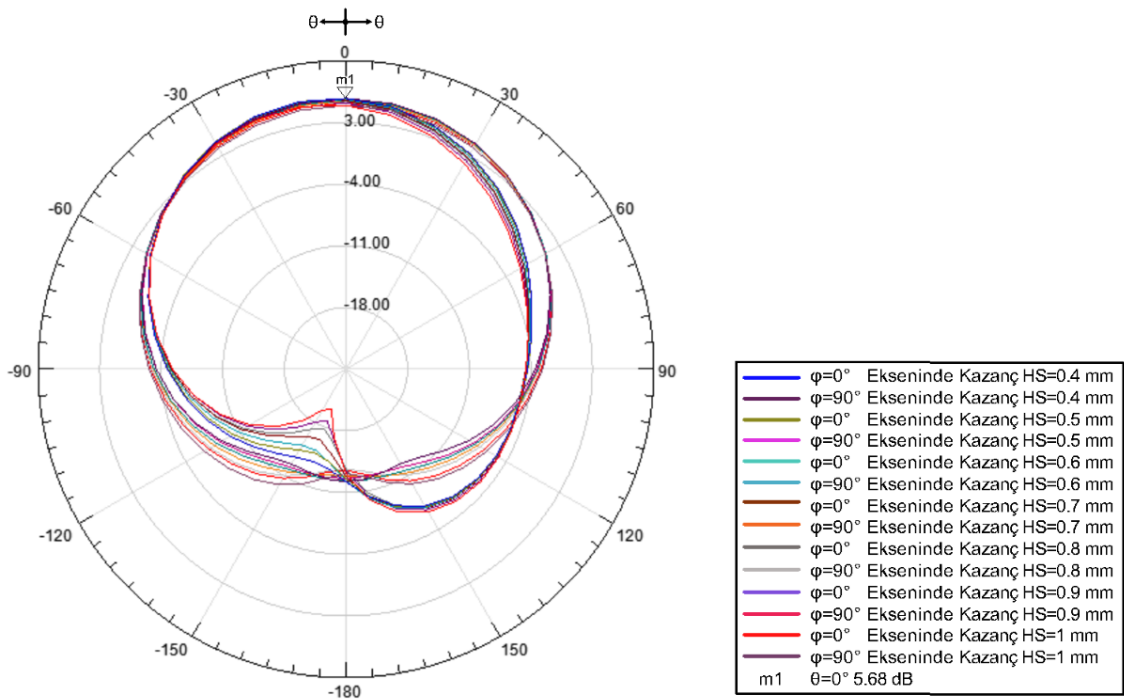




Şekil 3-12 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Alttaş Yüksekliği Kazanç Analizi

Kazanç değerlerinin alttaş yüksekliği değişiminden geri dönüş kaybı değerleri kadar etkilanmediği görülmektedir. Her 7 farklı alttaş yüksekliği değerinde de benzer kazanç eğrileri elde edilmiştir.

Antenin değişen alttaş yüksekliği değerlerine göre ışıma karakteristiği Şekil 3-13’de verilmiştir.



Şekil 3-13 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Alttaş Yüksekliği Kazanç Analizi (Polar Grafik)

3.4 HFSS Floquet Port Analizi

HFSS simülasyon programında bulunan Floquet Port analizi birbirini tekrarlayan yapıların analizi için kullanılan bir yöntemdir. Anten tasarımı açısından özellikle yüksek sayıda anten elemanı içeren dizi anten yapılarının analizi için kullanılmaktadır. Tasarlanan anten çoklanarak düzlemsel dizi yapısı oluşturulacaktır, Floquet Port Analizi oluşacak yapının performansı hakkında fikir edinmek için faydalıdır. Bu bölümde tasarlanan tek antene master ve slave sınır koşulları atanarak düzlemsel dizi yapısında kullanılacak anten elemanı elde edilecektir. Yayının anten elemanına belirli açılarda gelmesiyle anten elemanının performansı irdelenecektir. Anten elemanı boyutları Çizelge 3-4’de verilmiştir.

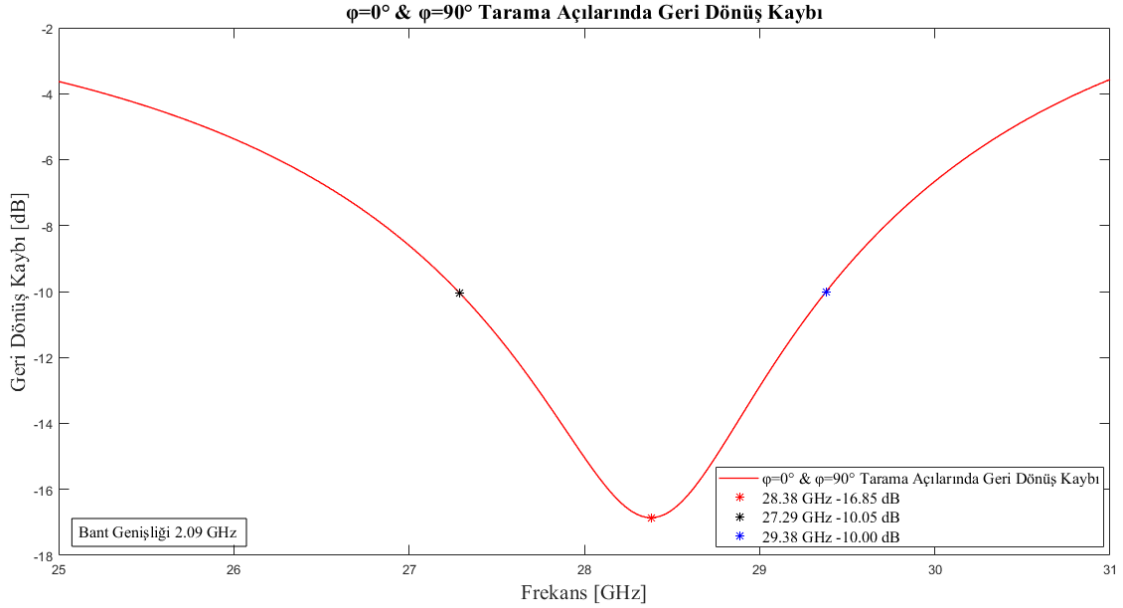
Çizelge 3-4 Anten Değişkenleri

Parametre	Tanım	Değer
LS	Alttaş Uzunluğu	7 mm
WS	Alttaş Genişliği	7 mm
HS	Alttaş Yüksekliği	0.8 mm
LP	Yama Uzunluğu	2.77 mm
WP	Yama Genişliği	2.77 mm
LX	Besleme Noktasının Yamanın X Eksenine Kenarına Olan Uzaklığı	0.65 mm
WY	Besleme Noktasının Anten Orijinine Y Eksenine Yönünde Olan Uzaklığı	0 mm
HX	Besleme Noktasının Toprak Yüzeyine Olan Uzaklığı	0 mm

HFSS Floquet Port analizinde yapı konumlandırıldığı düzleme göre her iki dik ekseninde sonsuz adet çoğaltılmış gibi analiz yapılmaktadır. Çok sayıda anten elemanından oluşan dizilerin analizi için kullanılmakla birlikte, daha az sayıda elemanlı dizi yapıları oluşturulmadan önce yapılması, oluşturulacak dizinin performansı hakkında bilgi sağlamaktadır.

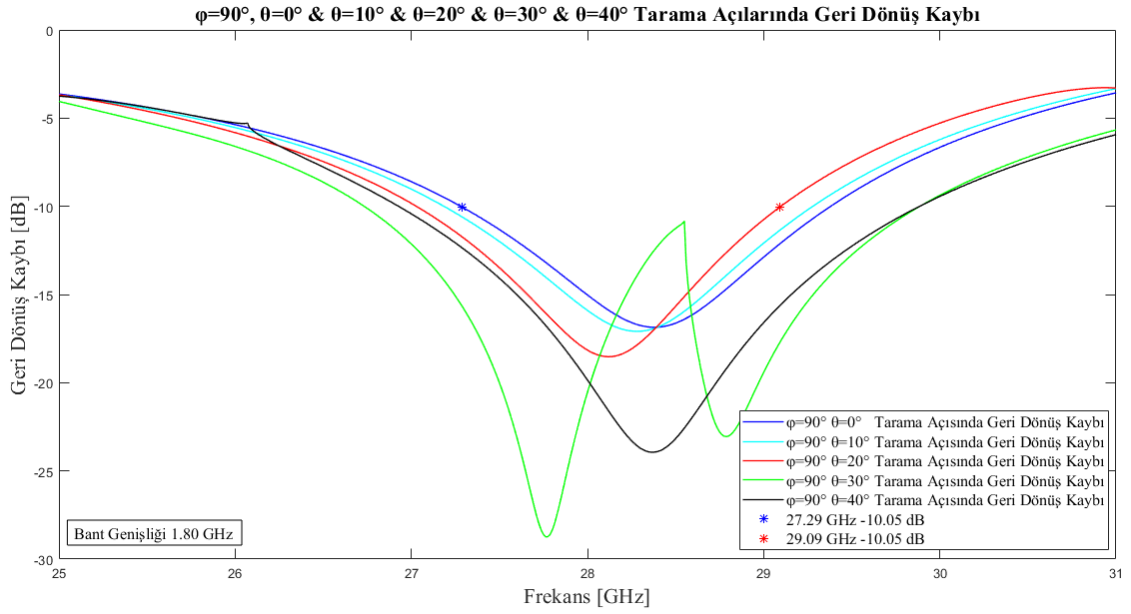
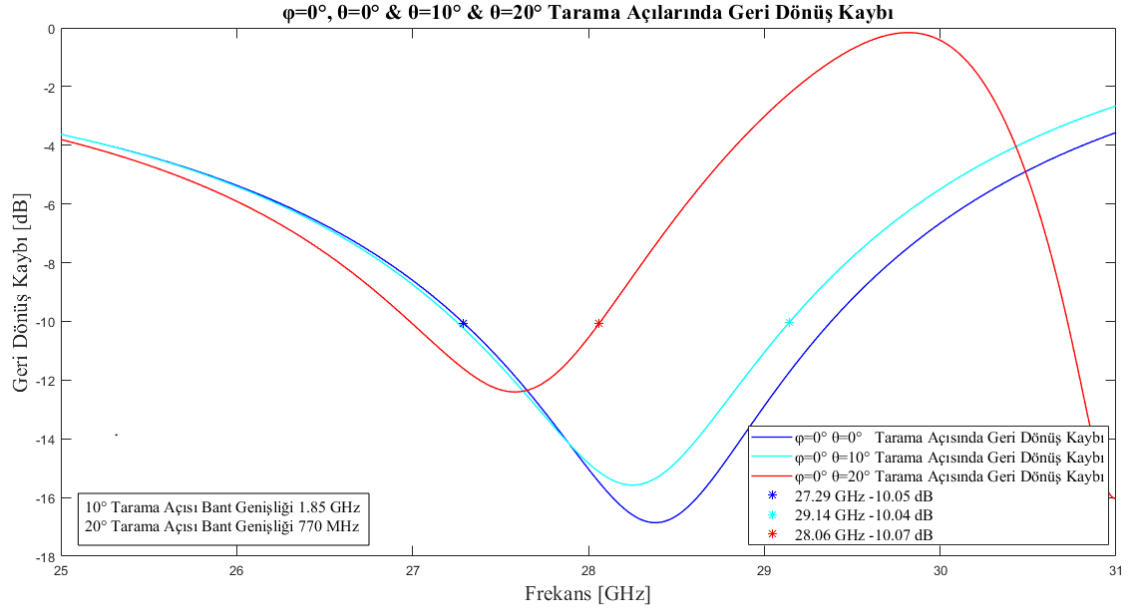
Şekil 3-14’de anten elemanı sonsuz sayıda çoğaltılıp dizi oluşturulduğunda z eksenine yönünden yayın yapıldığı esnada olan geri dönüş kaybı grafiği görülmektedir. Bu grafiğe

göre sonsuz adet çoğaltılmış bu dizinin 27.29 – 29.38 GHz arasını kapsayan 2.09 GHz büyüklüğünde bir bantta yayın yapacağı görülmektedir.



Şekil 3-14 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Tarama Açılarında Geri Dönüş Kaybı

Şekil 3-15'de ise sonsuz adet çoğaltılmış olan yapıya yönlü yayın gelmesi durumunda olan geri dönüş kaybı grafikleri yer almaktadır. Şekil 3-15 (a) grafiği incelendiğinde, $\phi=0^\circ$ ekseninde θ açısının 0-20 derece arasında 10 derecelik adımlarla değiştiği görülmektedir. -10 dB bant genişliği incelendiğinde ise 20 dereceye kadar 27.29 – 28.06 GHz aralığını kapsayan toplam 770 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3-15 (b) grafiği incelendiğinde ise $\phi=90^\circ$ ekseninde θ açısının 0-40 derece arasında 10 derecelik adımlarla değiştiği görülmektedir. -10 dB bant genişliği incelendiğinde ise 40 dereceye kadar 27.29-29.09 GHz aralığını kapsayan toplam 1.80 GHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3-15 (a) $\varphi=0^\circ$ (b) $\varphi=90^\circ$ Eksenlerinde Geri Dönüş Kaybı

4. DÜZLEMSEL DİZİ ANTEN YAPILARI VE BENZETİMLERİ

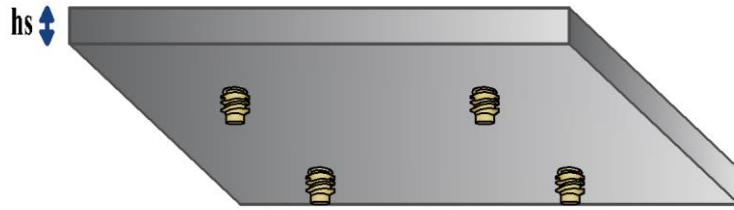
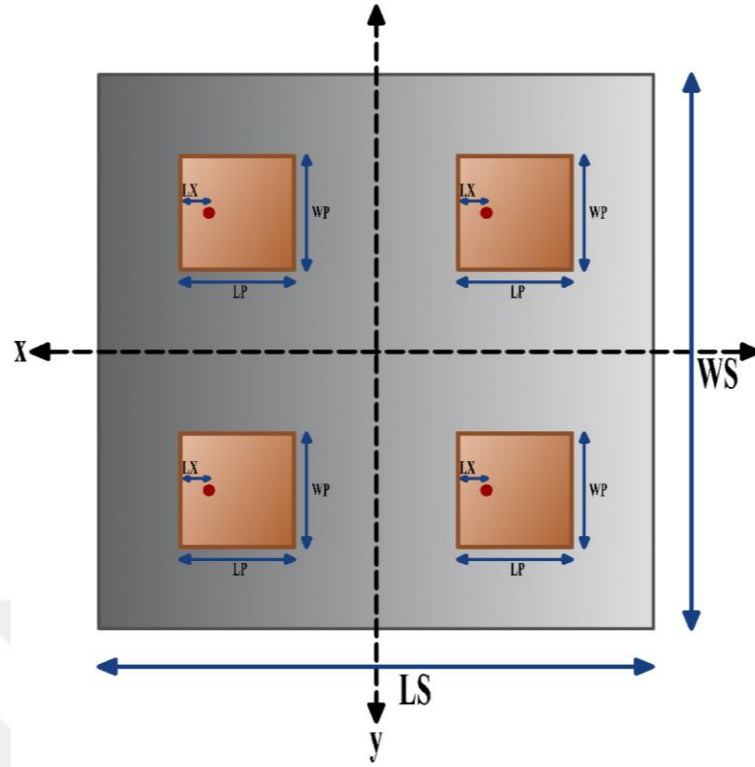
Bu bölümde dizi anten yapılarındaki anten elemanları arasındaki mesafeler hakkında incelemeler, 28 GHz rezonans frekansını kapsayan 2x2 ve 4x4 düzlemsel dizi antenlerinin tasarlanma aşamaları, portların geri dönüş kaybı, kazancı, yönlülüğü, anten hüzmeye karakteristiği, portlar arasındaki izolasyon analizleri ve seçilen alttaşı malzemesinin yüksekliğinin anten performansına etkileri incelenecektir.

4.1 2x2 Düzlemsel Dizi Anten Tasarımı ve Analizi

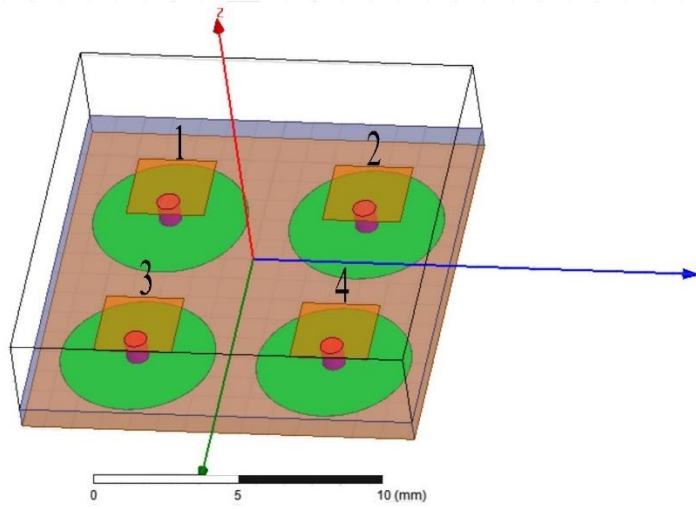
Tek antenin tasarlanmasının ardından tek anten çoklanarak düzlemsel dizi yapısı oluşturulmuştur. Tasarım HFSS simülasyon programında analiz edilmiştir. Tasarım aşamasında antenler arası izolasyon, kazanç, anten hüzmeye karakteristiği gibi parametreler incelenmiş ve yapılan benzetimlerle optimum çoklu anten yapısı elde edilmiştir. Tekli anten tasarımında olduğu gibi çoklu yapıda da anten boyutlarını tanımlamak için değişkenler kullanılmıştır. Bu değişkenler, değişkenlerin tanımları ve değerleri Çizelge 4-1’de, değişkenlerin anten üzerindeki konumları Şekil 4-1’de verilmektedir. HFSS Simülasyon programında tasarlanan düzlemsel dizi yapısının görseli ise Şekil 4-2’de verilmiştir.

Çizelge 4-1 Anten Değişkenleri

Parametre	Tanım	Değer
LS	Alttaşı Uzunluğu	15 mm
WS	Alttaşı Genişliği	14 mm
HS	Alttaşı Yüksekliği	0.8 mm
LP	Yama Uzunluğu	2.77 mm
WP	Yama Genişliği	2.77 mm
LX	Besleme Noktasının Yamanın X Eksenine Kenarına Olan Uzaklığı	0.65 mm
WY	Besleme Noktasının Anten Orijinine Y Eksenine Yönünde Olan Uzaklığı	0 mm
HX	Besleme Noktasının Toprak Yüzeyine Olan Uzaklığı	0 mm

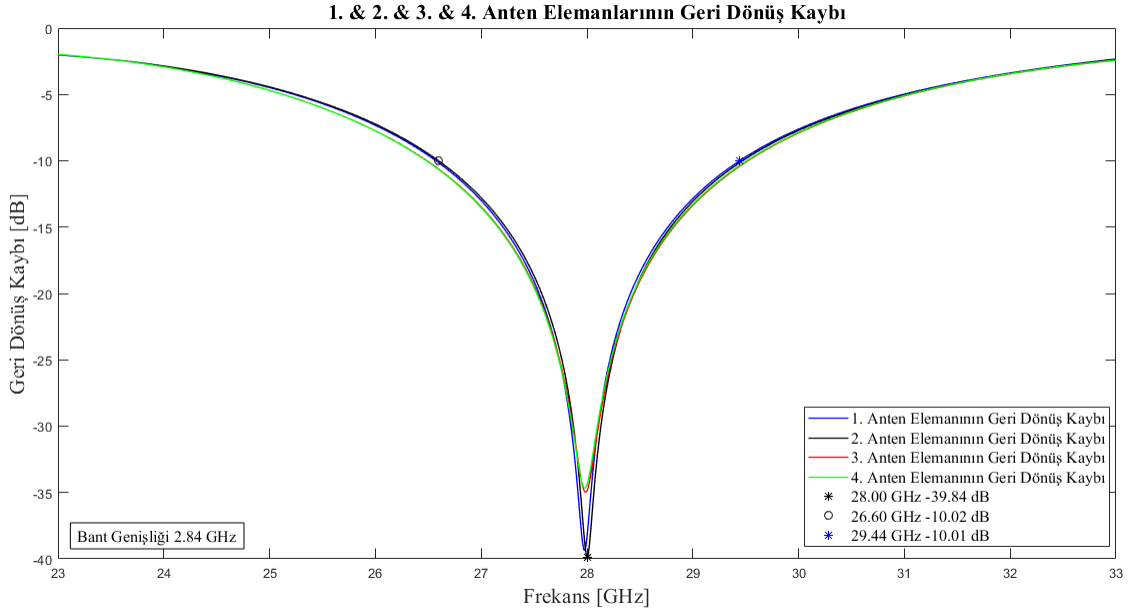


Şekil 4-1 Anten Görseli



Şekil 4-2 2x2 Düzlemsel Dizi Yapısı Genel Görünümü

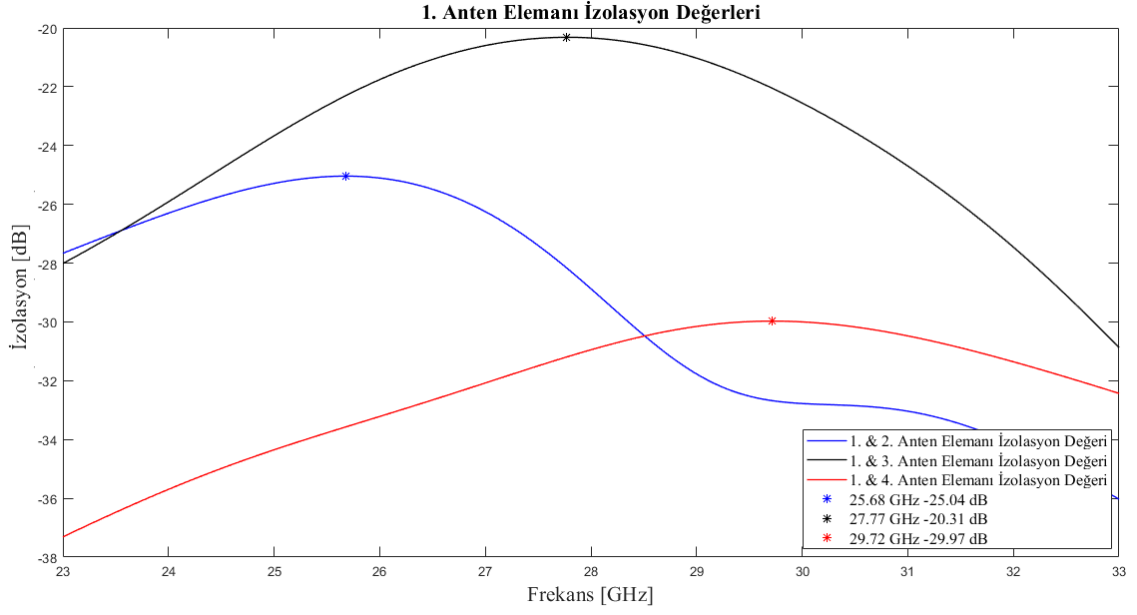
Bu tez çalışmasında düzlemsel dizi yapısının ürettirilerek ölçüm yapılabilmesi hedeflenmiştir. Anten dizi yapısı tek anten tasarımında da kullanılmış olan Rogers RO4003 alttaşı kullanılarak tasarlanmıştır.



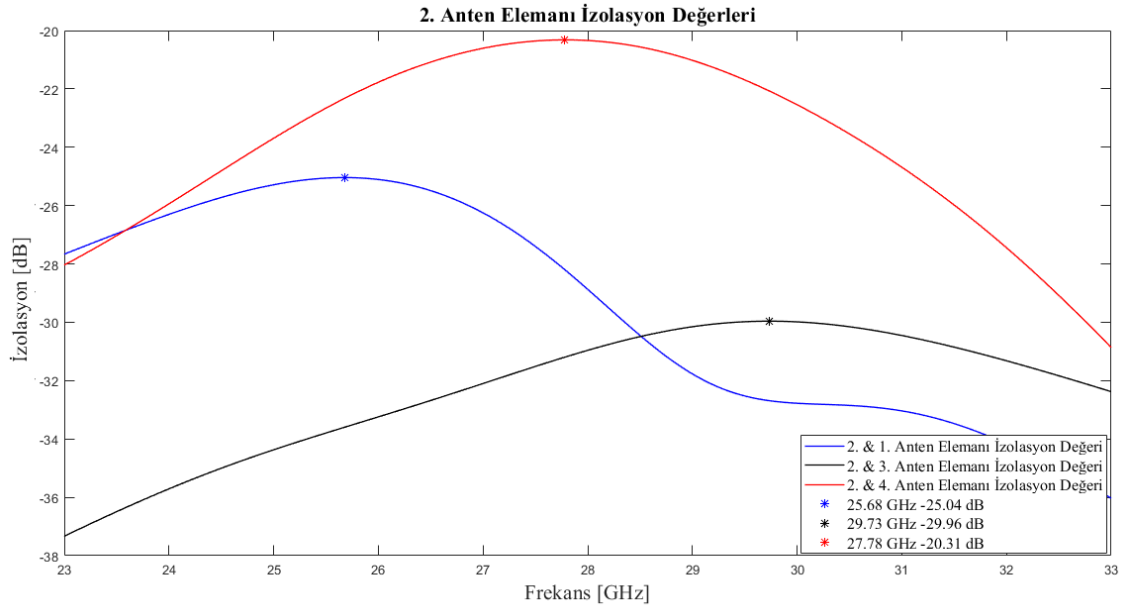
Şekil 4-3 1. & 2. & 3. & 4. Anten Elemanlarının Geri Dönüş Kaybı

Şekil 4-3'de 4 anten elemanının da geri dönüş kaybı grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde benzer geri dönüş kaybı grafikleri olduğu görülmektedir. Grafiklerde belirteçler ile -10 dB bant genişliği ve rezonans frekansta elde edilen minimum geri dönüş kaybı değeri gösterilmektedir. Her dört anteninde bant genişliği değerleri 26.60 – 29.44 GHz arasında olmak üzere 2.84 GHz olarak elde edilmiştir. Belirtilen frekans aralığı 5G için aday bantlardan biri olan 28 GHz mmDalga bandını kapsamaktadır. Anten elemanları aynı olsa da 1-2 ve 3-4. anten elemanları arasında 4 dB'lik geri dönüş kaybı farkı bulunmaktadır. Bu fark yapının x eksenı boyutundan kaynaklanmaktadır. Antenler arasındaki en düşük geri dönüş kaybı ikinci antende 28 GHz'de -39.84 dB olarak ölçülmüştür.

Anten elemanlarının aynı anda ışıma yapması tek anten performansında kayba sebep olmaktadır. Şekil 4-3'deki grafikler ve Şekil 3-4 incelendiğinde anten elemanlarının rezonans frekanslarında aldıkları minimum geri dönüş kaybı değerlerinin tek anten tasarımında verilen geri dönüş kaybı değerine göre 15 dB mertebelerinde yükseldiği görülmektedir.



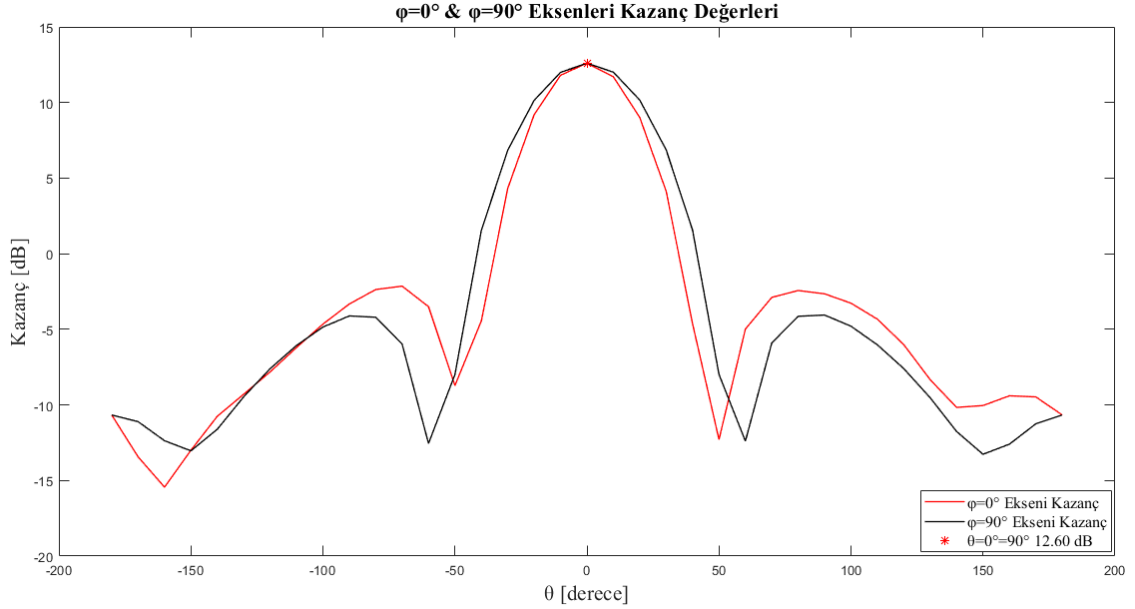
Şekil 4-4 1. Anten Elemanı İzolasyon Değerleri



Şekil 4-5 2. Anten Elemanı İzolasyon Değerleri

Çoklu antenin bulunduğu dizi yapılarında izolasyon bir diğer incelenmesi gereken parametre olmaktadır. İzolasyon portlar arasındaki etkileşim değerleri üzerinden yorumlanmaktadır. Şekil 4-4’de birinci anten ile diğer üç anten arasındaki izolasyon değerleri gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde en yüksek değer birinci ve üçüncü anten arasında 27.77 GHz’de -20.31 dB olduğu görülmektedir. Şekil 4-5 de ise ikinci anten ve diğer üç anten arasındaki izolasyon değerleri gösterilmektedir. Antenler arasındaki en yüksek değer ikinci ve dördüncü antenler arasında 27.78 GHz’de -20.31

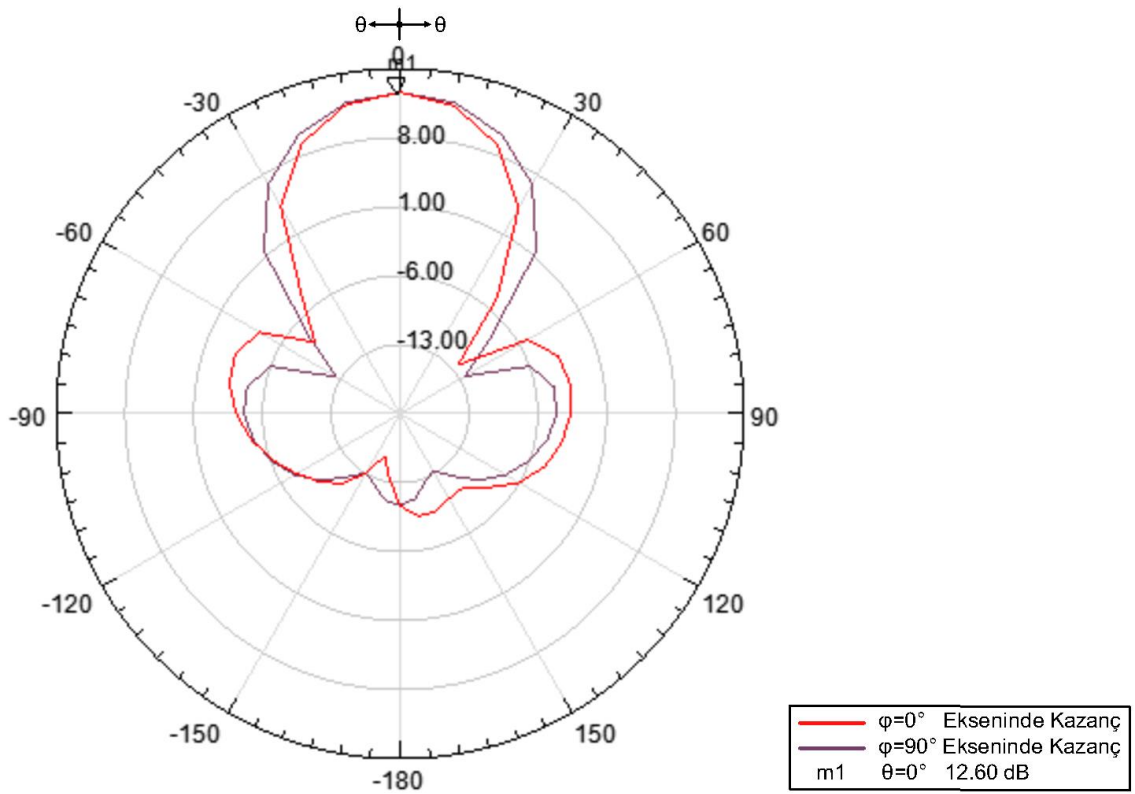
dB olduğu görülmektedir. Tek antenin ışıma örüntüleri incelendiğinde, besleme noktasının simetrik olmamasından kaynaklı hüzmengin x ekseninde az bir miktar yönlendiği Şekil 3-5’de görülmektedir. Bu ışıma örüntüsünün bir sonucu olarak x ekseninde doğrultusunda ardışık olan 1-3 ve 2-4. anten elemanları arasındaki etkileşimin en yüksek değerde olduğu düşünülmektedir.



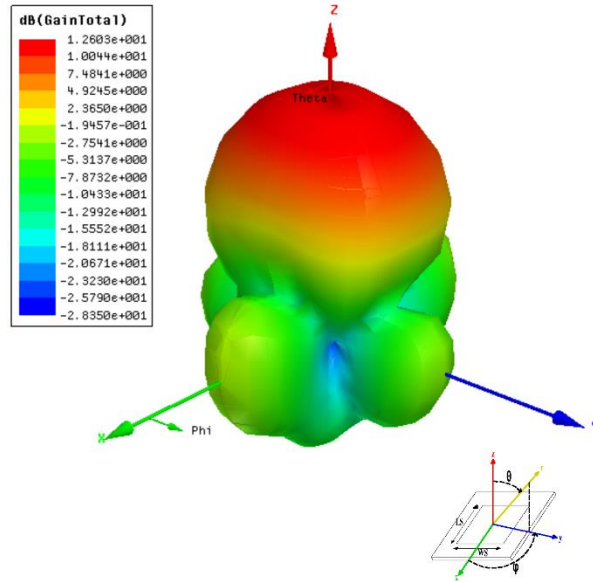
Şekil 4-6 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenleri Kazanç Değerleri

Tek anten tasarımında elde edilen maksimum kazanç değeri Şekil 3-5’de 5.39 dBi olarak gösterilmişti. Çoklu anten yapısına sahip dizi anten tasarımlarının kazanç değerleri açısından avantajlı olduğu bilinmektedir. Tasarımı yapılan 2x2 düzlemsel dizi yapısında kazanç değeri 5.39 dBi’den 12.60 dBi’a yükselmiştir.

Şekil 4-7’de düzlemsel dizi yapısının $\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ ’da polar kazanç grafiği, Şekil 4-8’de 3 boyutlu kazanç grafiği bulunmaktadır.



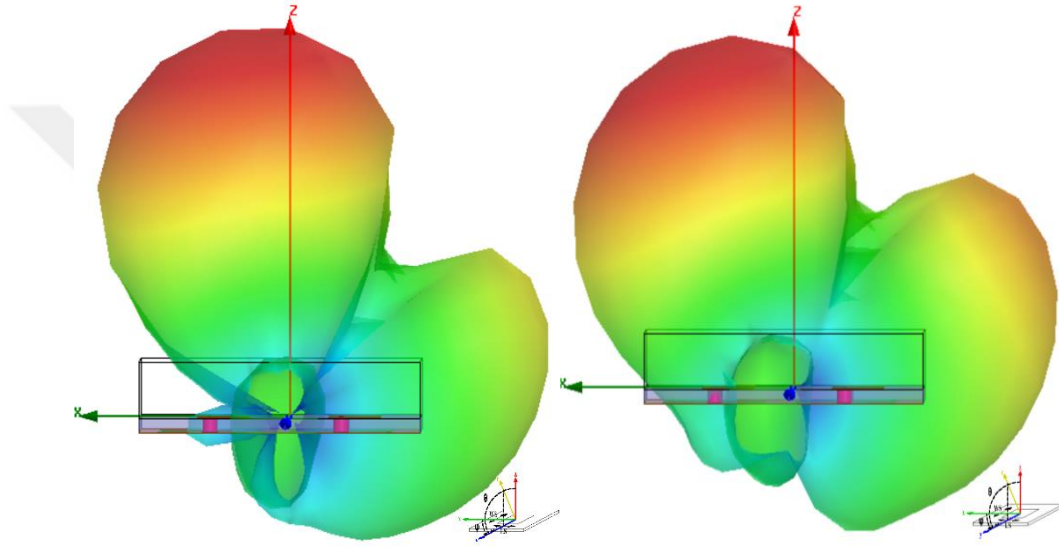
Şekil 4-7 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenleri Kazanç (Polar Grafik)



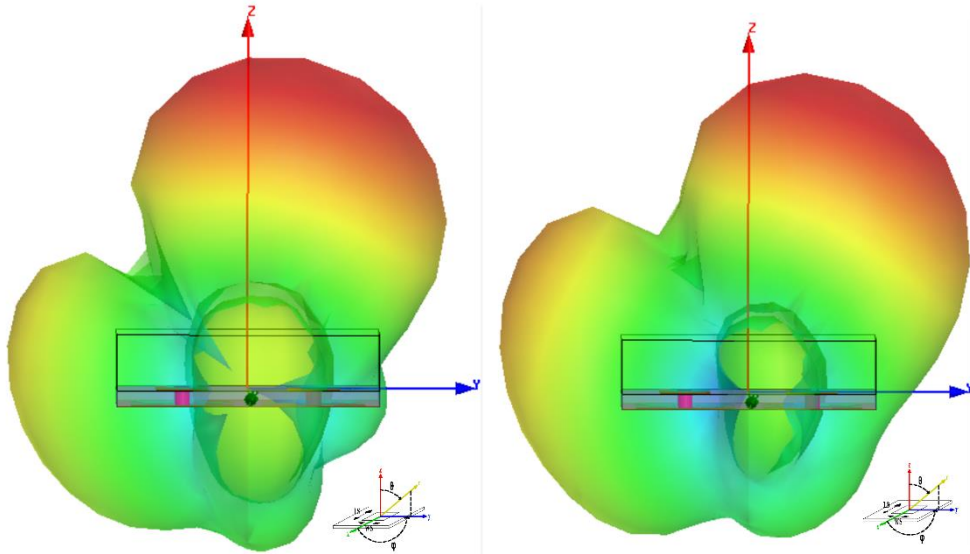
Şekil 4-8 3 Boyutlu Kazanç Grafiği

5G sistemlerinde mmDalga boyu kullanılmasının yol kaybı açısından dezavantaj yaratacağı ve atmosfer soğrulma oranlarının yükseleceği bilinmektedir. Buna karşılık düzlemsel dizi anten yapılarının kullanılmasının hüzme yönlendirme gibi yetenekleri olması dolayısıyla da tercih edilebileceği belirtilmişti. Anten elemanları uyarımlarının

arasında faz farkı uygulayarak anten hüzmesini yönlendirebilmek mümkündür. HFSS simülasyon programında anten elemanları uyarımları arasında faz farkı oluşturarak hüzme yönlendirme kabiliyetleri incelenmiştir. Şekil 4-9'da x eksenini yönünde 10° ve 20° yönlendirilmiş üç boyutlu hüzme görüntüsü yer almaktadır. Bu yönlendirmeyi sağlamak için 1 ve 2. anten elemanları, 3 ve 4. anten elemanlarına göre sırasıyla $+45^\circ$ ve $+90^\circ$ faz farkıyla beslenmiştir. Şekil 4-10'da ise y eksenini yönünde 10° ve 20° yönlendirilmiş üç boyutlu hüzme görüntüsü yer almaktadır. Bu yönlendirmeyi sağlamak için 1 ve 3. anten elemanları, 2 ve 4. anten elemanlarına göre sırasıyla $+45^\circ$ ve $+90^\circ$ faz farkıyla beslenmiştir.



Şekil 4-9 $\phi=0^\circ$ Ekseni 3 Boyutlu Hüzme Yönlendirme



Şekil 4-10 $\phi=90^\circ$ Ekseni 3 Boyutlu Hüzme Yönlendirme

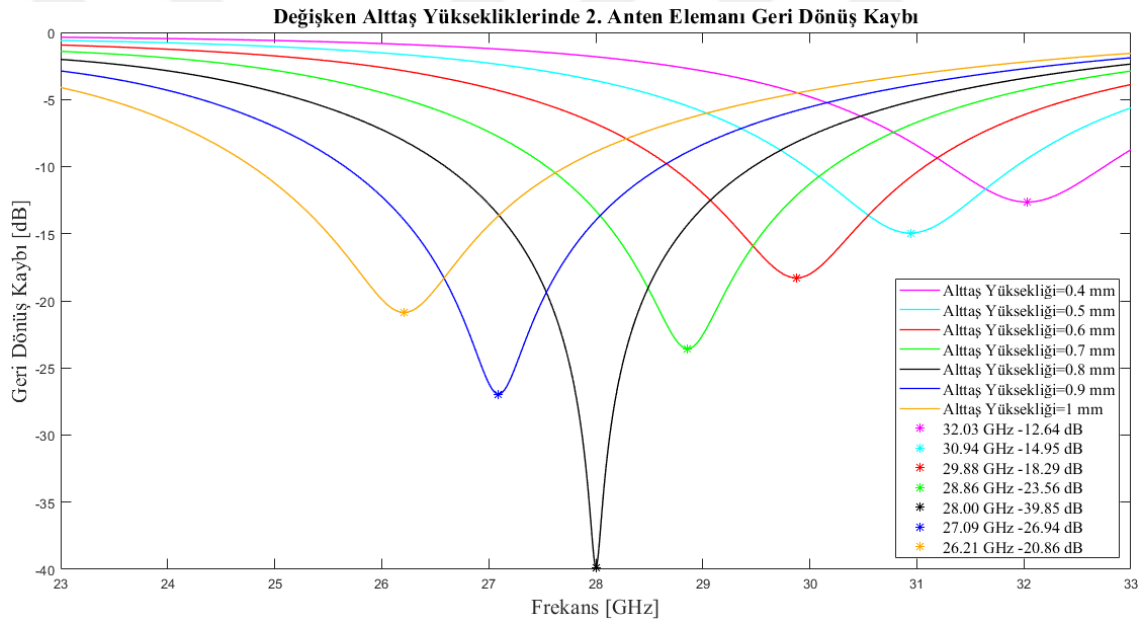
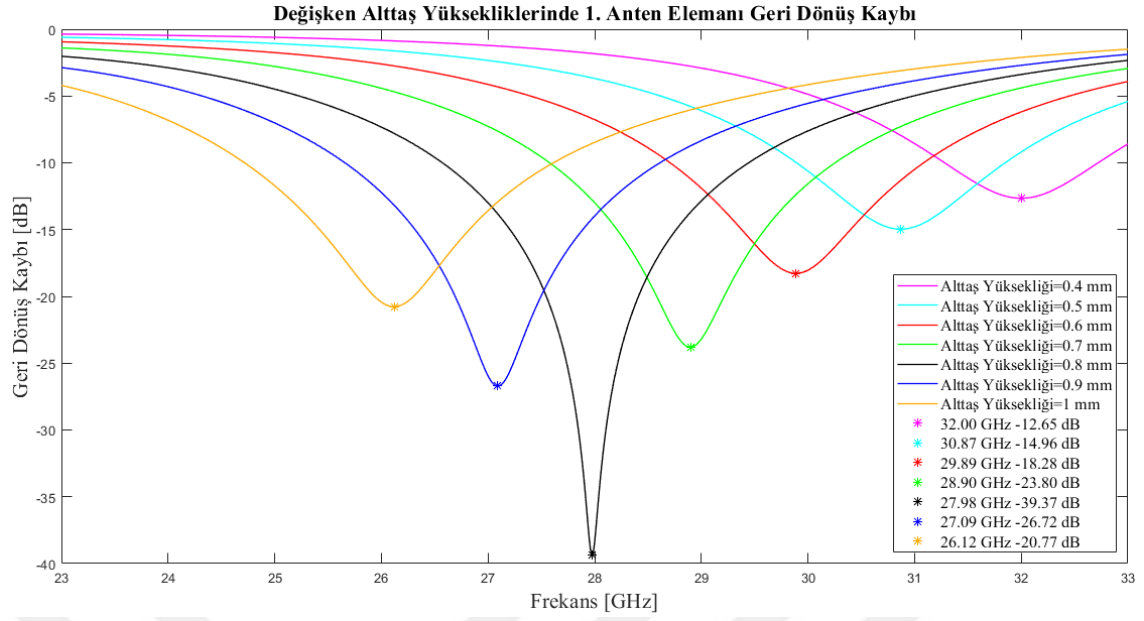
4.2 Alttaş Yüksekliğinin Düzlemsel Dizi Performansına Etkisi

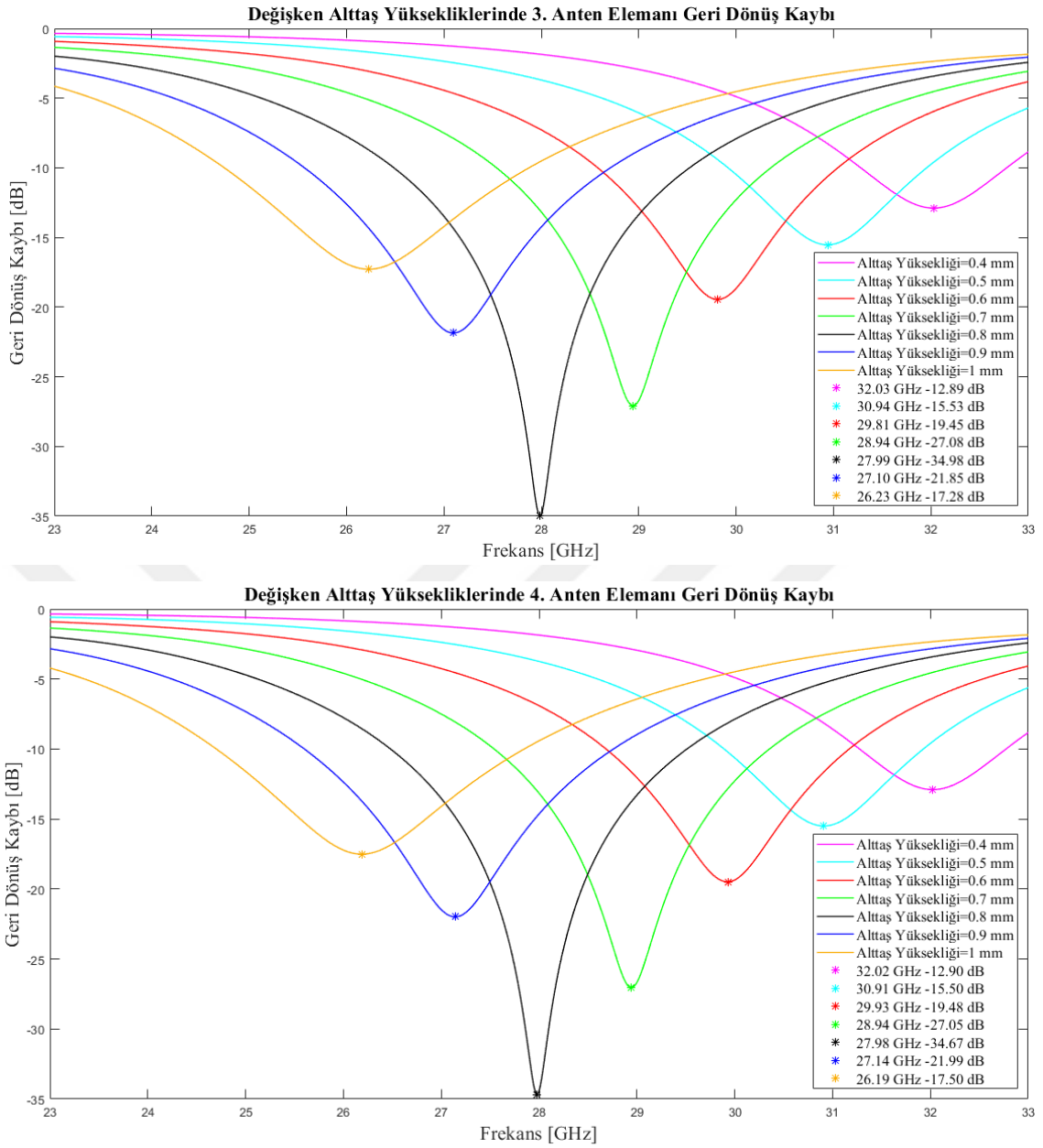
Bu bölümde düzlemsel dizi anten tasarımında kullanılan ve dielektrik sabiti 3.55 olan Rogers RO4003 alttaşının yüksekliği değiştirilerek anten performansına etkisi gözlenecektir. Yapılan analizde diğer anten değişkenleri sabit tutulmuş ve sadece alttaş yüksekliği parametresi olan HS değiştirilmiştir. Yapılan analizdeki anten değişkenlerinin dağılımı Çizelge 4-2’de verilmektedir.

Çizelge 4-2 Anten Değişkenleri

Durum	LS	WS	HS	LP	WP	LX	WY	HX
1	14 mm	15 mm	0.4 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
2	14 mm	15 mm	0.5 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
3	14 mm	15 mm	0.6 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
4	14 mm	15 mm	0.7 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
5	14 mm	15 mm	0.8 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
6	14 mm	15 mm	0.9 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm
7	14 mm	15 mm	1 mm	2.77 mm	2.77 mm	0.65 mm	0 mm	0 mm

3.3 bölümünde yapılan analizde alttaş yüksekliğinin azaltılmasının anten boyutlarının sabit tutulmasından dolayı rezonans frekansta yükselmeye sebep olduğu, alttaş yüksekliğinin arttırılmasının ise rezonans frekansta düşüşe sebep olduğu belirtilmişti. Çoklu anten yapılarında da benzer bir durum beklenmektedir. şekil 4-11’de değişen alttaş yüksekliklerine göre her dört antenin geri dönüş kaybı grafikleri verilmektedir. Grafikler incelendiğinde rezonans frekansın alttaş yüksekliğiyle ters orantılı olduğu görölmektedir. Alttaş yüksekliği 1 mm iken 26 GHz mertebelerinde olan rezonans frekans, alttaş yüksekliğinin 0.4 mm’ye düşürölmesiyle 32 GHz’lere kadar yükselmektedir.

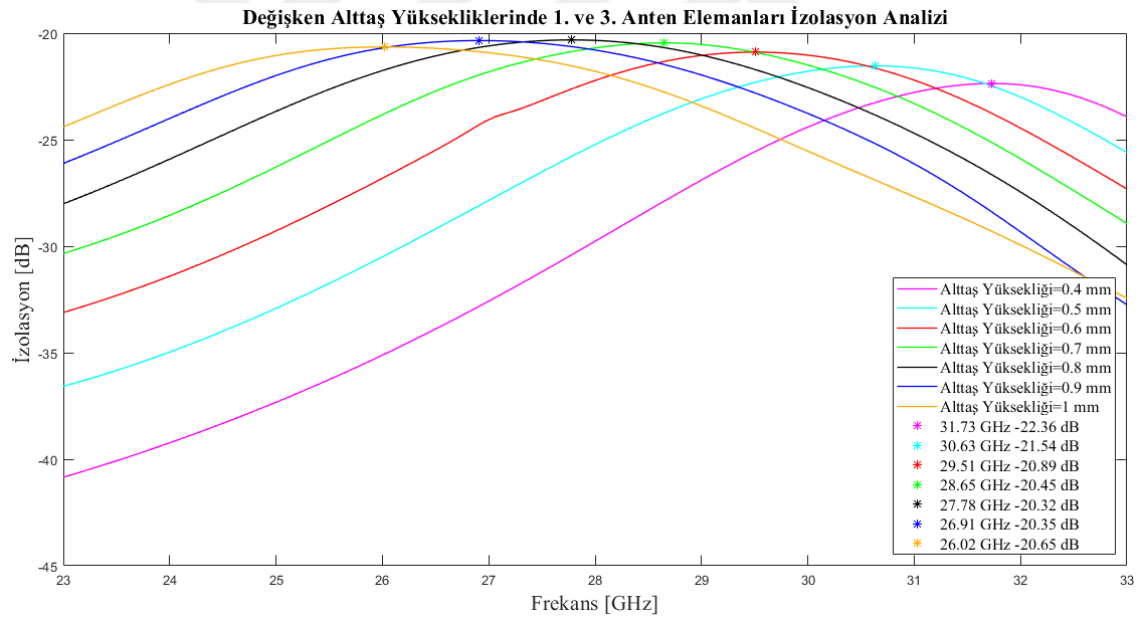
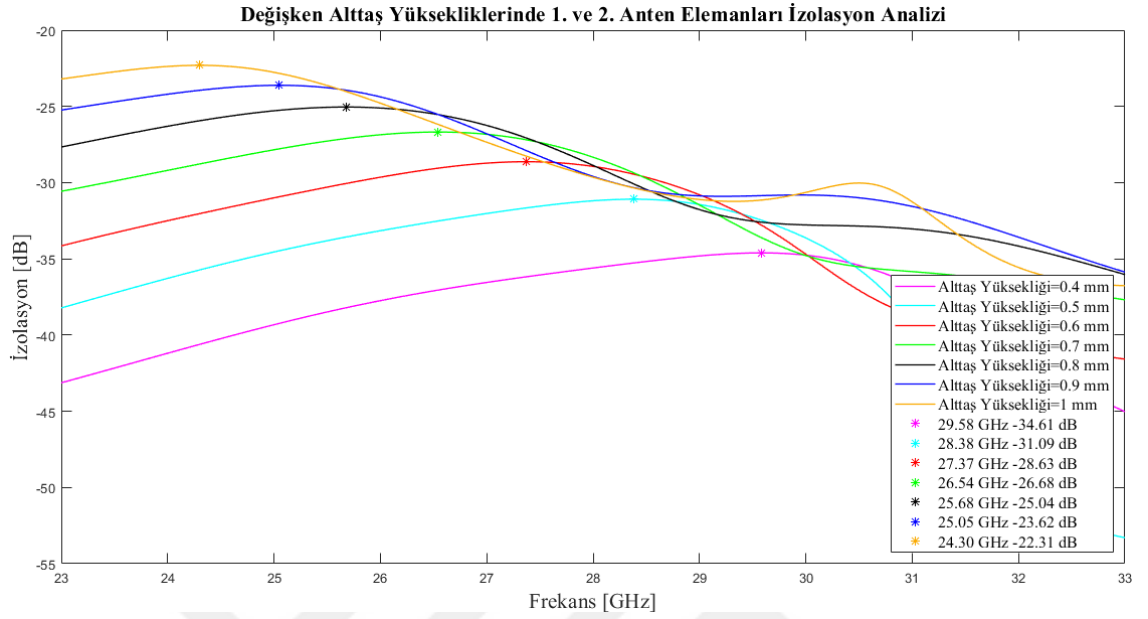


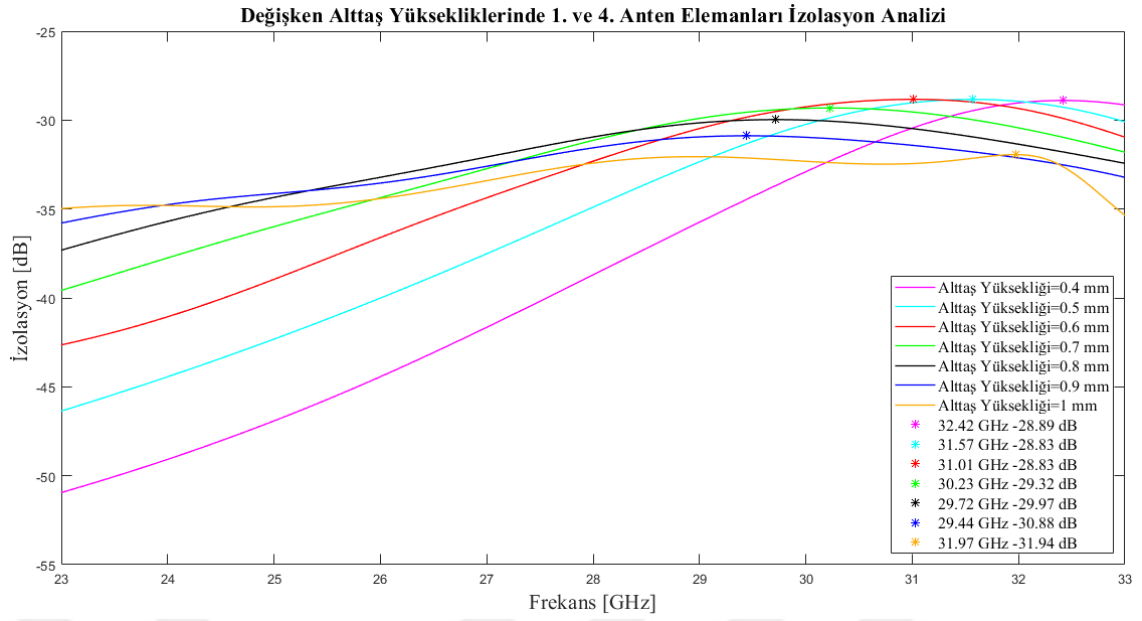


Şekil 4-11 Değişken Altaş Yüksekliklerinde Anten Elemanları Geri Dönüş Kaybı Değerleri

Şekil 4-12’de birinci anten ve diğer antenler arasındaki izolasyon değerleri verilmektedir. İzolasyon anten elemanları arasındaki mesafeden oldukça etkilenmektedir. Yapılan analizde sadece altaş yüksekliği değiştirilmiş, dolayısıyla anten elemanları arasındaki mesafe sabit tutulmuştur. Şekil 4-11’de altaş yüksekliğiyle rezonans frekansın ters orantılı olduğu gösterilmişti. Altaş yüksekliğinin azalışıyla birlikte, rezonans frekans artmakta, dalga boyu ise azalmaktadır. Anten elemanlarının arasındaki mesafe sabit tutulmasına rağmen dalga boyunun azalması sebebiyle elektriksel olarak anten elemanları daha yüksek dalga boyu uzaklığında konumlanmış olmaktadır. İzolasyon seviyesinin

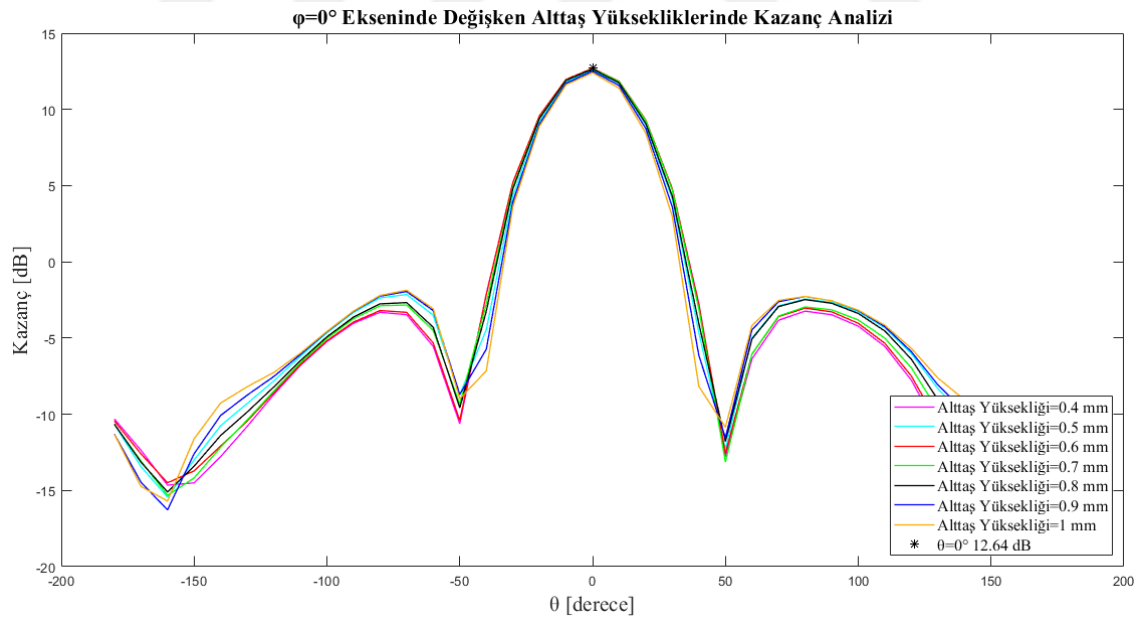
azalan alttaş yüksekliğiyle birlikte bu sebeple daha iyi değerlere geldiği değerlendirilmektedir.

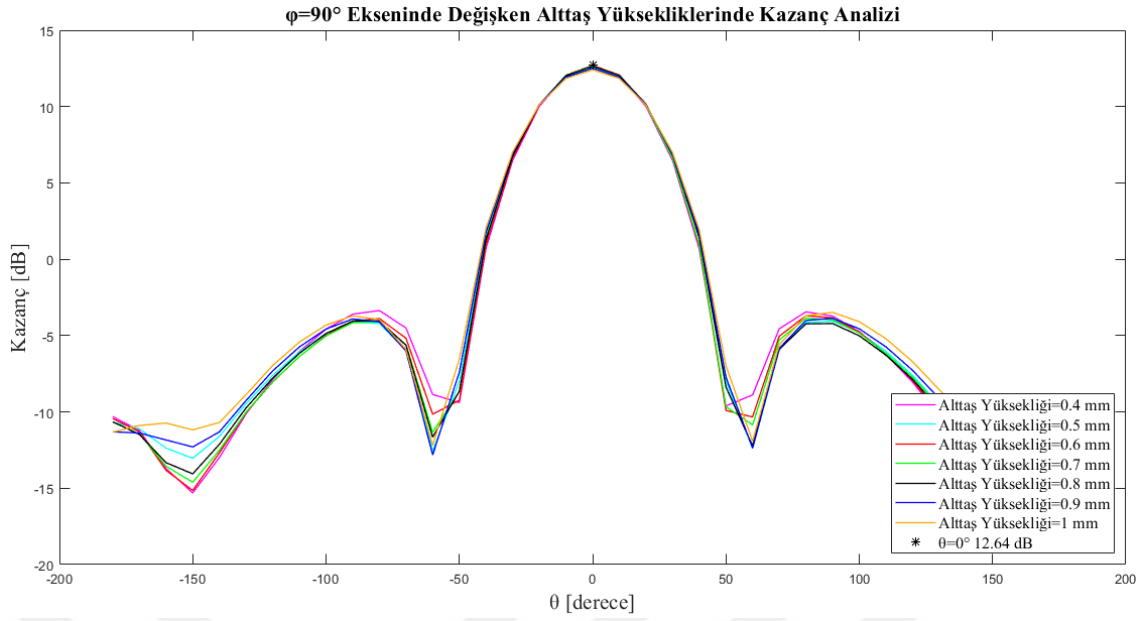




Şekil 4-12 Değişken Altaş Yüksekliklerinde Anten Elemanları İzolasyon Analizi

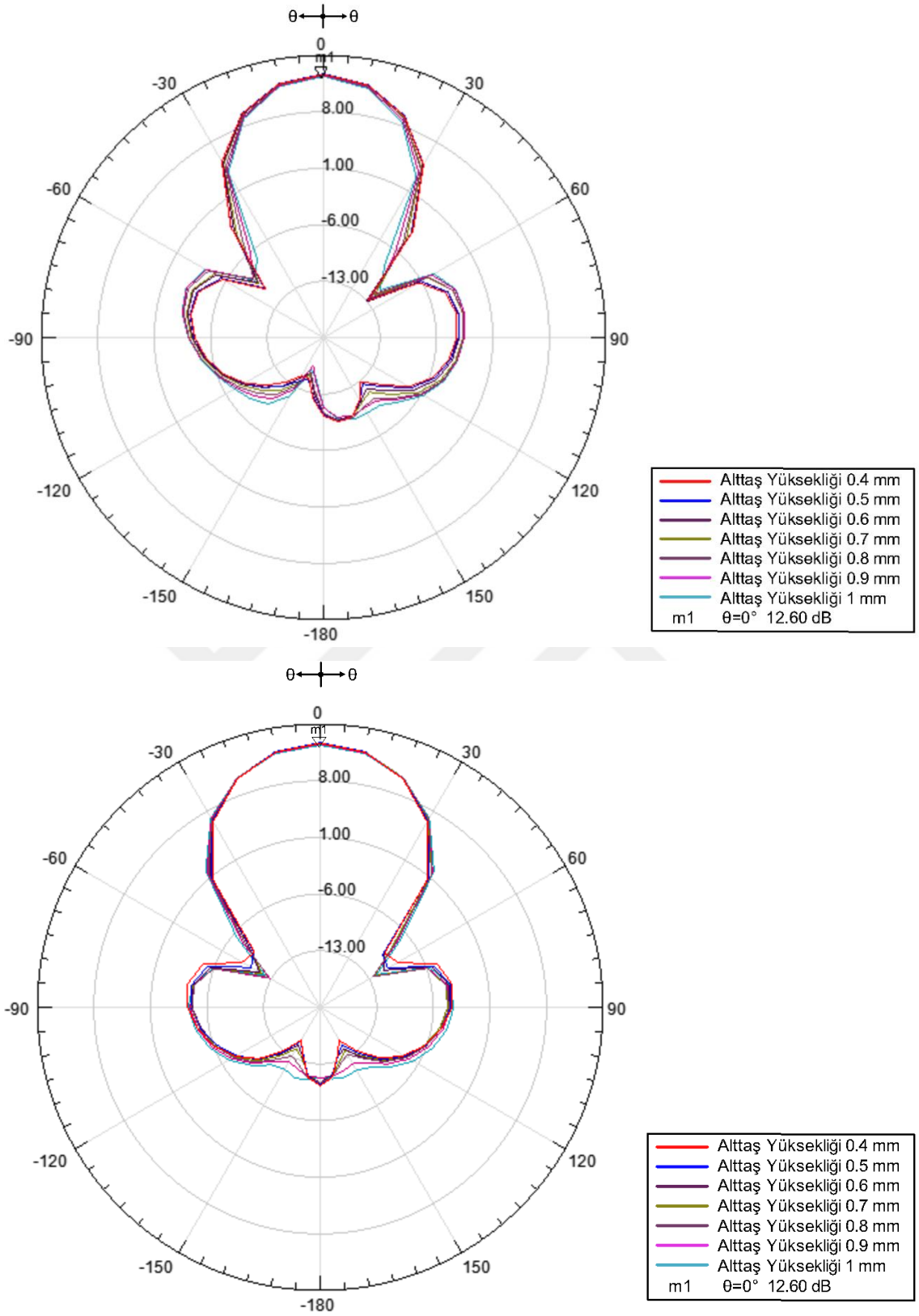
Şekil 4-13’de 1. Anten elemanının 7 farklı altaş yüksekliğinde kazanç eğrisi verilmiştir. Altaş yüksekliğinin kazanç parametresine olan etkisinin tek antene benzer şekilde çok olmadığı gözlenmiştir.





Şekil 4-13 $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ Eksenlerinde Değişken Altaş Yüksekliklerinde Kazanç Analizi

Şekil 4-14’de düzlemsel dizi yapısının polar grafik üzerinde $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ ’de ışıma karakteristiği verilmiştir.



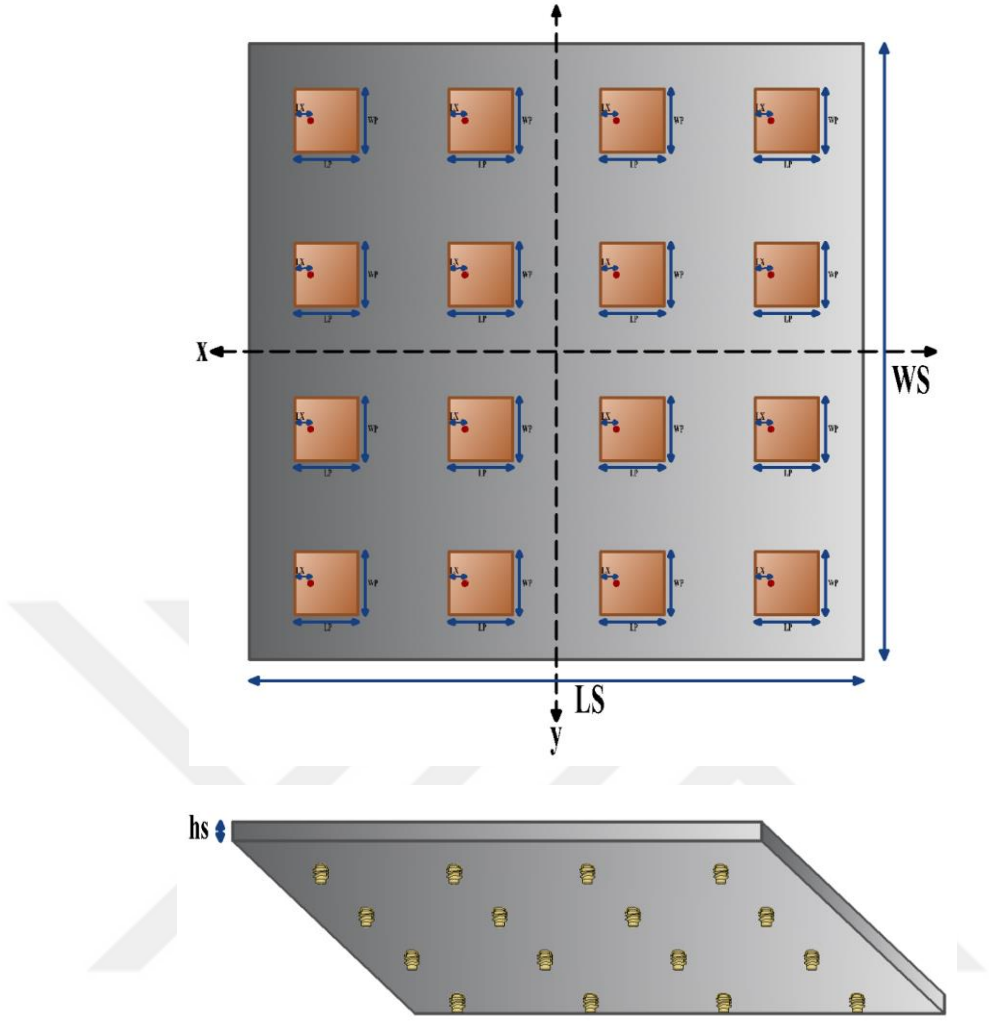
Şekil 4-14 $\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Değişken Altaş Yüksekliklerinde Kazanç Analizi (Polar Grafik)

4.3 4x4 Düzlemsel Dizi Anten Tasarımı ve Analizi

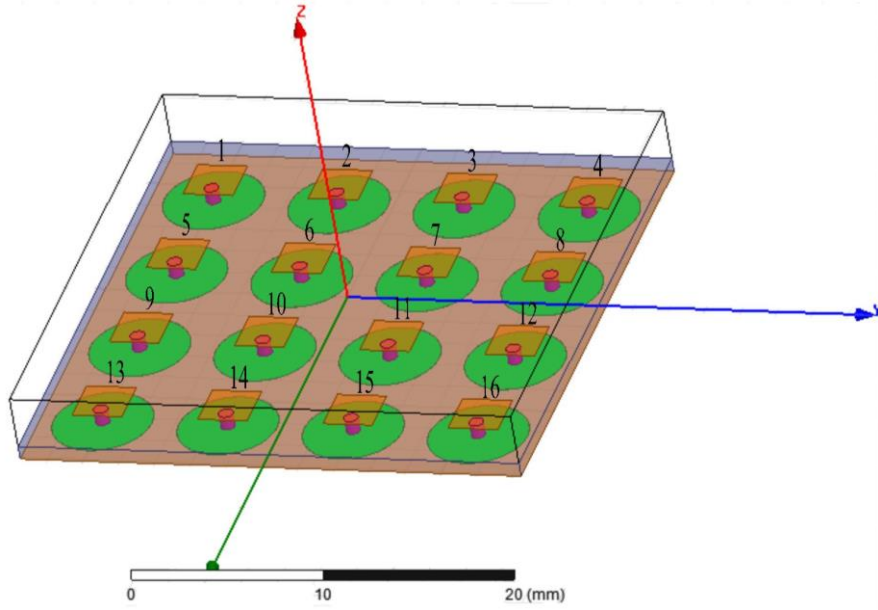
Bu bölümde anten elemanı sayısı 16'ya çıkarılarak elde edilen 4x4 düzlemsel dizi anteninin HFSS simülasyon programı kullanılarak yapılan analizi incelenecektir. Anten tasarlanırken önceki bölümlerde olduğu gibi Rogers RO4003 alttaşı kullanılmıştır. Analizde anten elemanları geri dönüş kayıpları, anten elemanlarının arasındaki izolasyon, kazanç, anten hüzme karakteristiği, hüzme yönlendirme yeteneği gibi parametreler incelenmiştir. Çoklu anten yapısını oluşturmak için daha önceki analizlerde olduğu gibi anten boyutlarını tanımlamak için değişkenler kullanılmıştır. Bu değişkenlerin tanımları ve değerleri Çizelge 4-3'de, değişkenlerin anten üzerindeki konumları Şekil 4-15'de verilmektedir. HFSS Simülasyon programında tasarlanan düzlemsel dizi yapısı ise Şekil 4-16'da verilmiştir.

Çizelge 4-3 Anten Değişkenleri

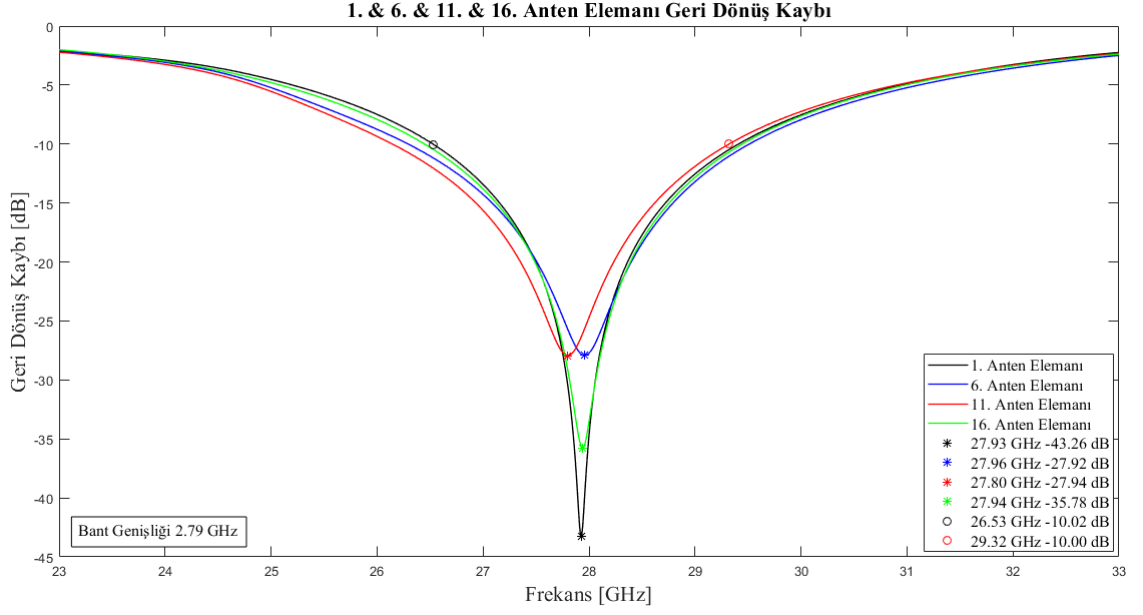
Parametre	Tanım	Değer
LS	Alttaşı Uzunluğu	29 mm
WS	Alttaşı Genişliği	28 mm
HS	Alttaşı Yüksekliği	0.8 mm
LP	Yama Uzunluğu	2.77 mm
WP	Yama Genişliği	2.77 mm
LX	Besleme Noktasının Yamanın X Eksenine Kenarına Olan Uzaklığı	0.65 mm
WY	Besleme Noktasının Anten Orijinine Y Eksenine Yönünde Olan Uzaklığı	0 mm
HX	Besleme Noktasının Toprak Yüzeyine Olan Uzaklığı	0 mm



Şekil 4-15 4x4 Düzlemsel Dizi Anten Görseli

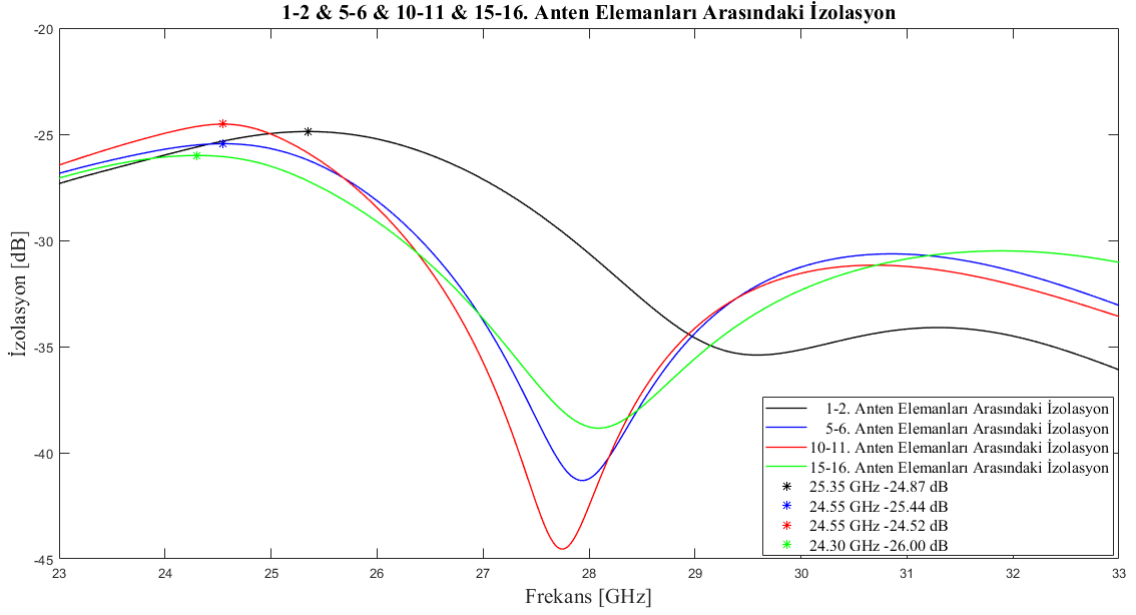


Şekil 4-16 4x4 Düzlemsel Dizi Anten Genel Görünümü



Şekil 4-17 1. & 6. & 11. & 16. Anten Elemanlarının Geri Dönüş Kaybı

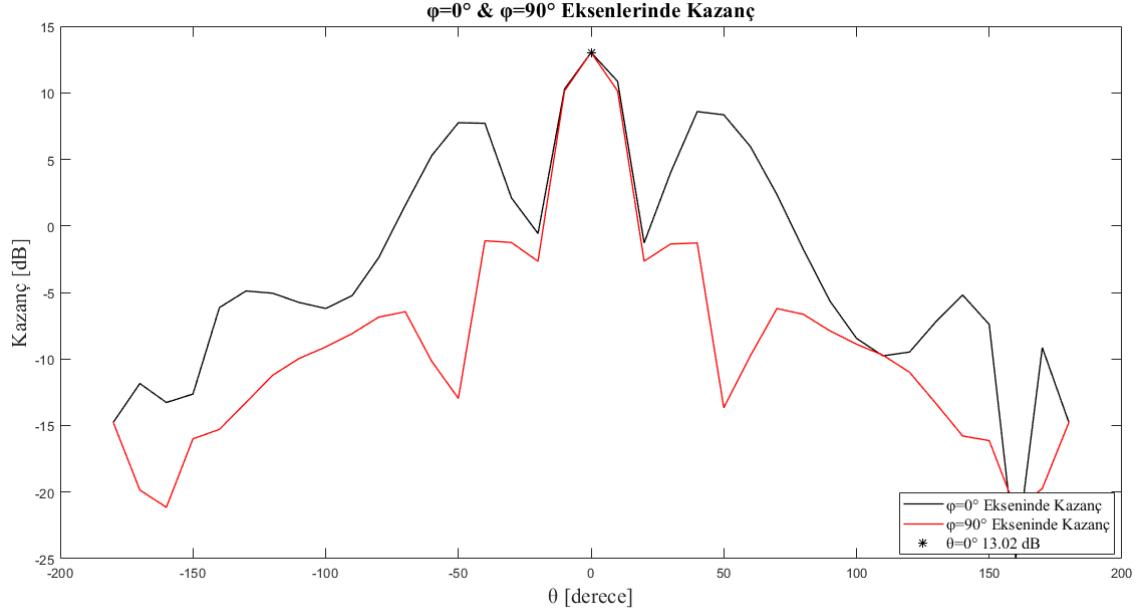
16 anten elemanının da geri dönüş kaybı grafikleri incelenmiştir, anten elemanlarının geri dönüş kaybı grafiklerinde tolere edilebilir farklarla birlikte benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örnek olarak Şekil 4-17’de 4 adet anten elemanının geri dönüş kaybı değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde benzer geri dönüş kaybı değerleri olduğu görülmektedir. Grafikte -10 dB bant genişliği ve rezonans frekansta elde edilen maksimum geri dönüş kaybı değeri gösterilmektedir. Her dört anten elemanının da bant genişliği değerleri 26.53 – 29.32 GHz arasında olmak üzere 2.79 GHz elde edilmiştir. Paylaşılan dört anten elemanında minimum geri dönüş kaybı birinci antende 27.93 GHz frekansında -43,26 dB olarak elde edilmiştir.



Şekil 4-18 1-2 & 5-6 & 10-11 & 15-16. Anten Elemanlarının Arasındaki İzolasyon

Çoklu antenin bulunduğu dizi yapılarında izolasyon bir diğer incelenmesi gereken parametre olmaktadır. Şekil 4-4’de birinci anten ile diğer üç anten arasındaki izolasyon değerleri gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde en yüksek değer birinci ve üçüncü anten arasında olduğu ve 27.77 GHz’de -20.31 dB olduğu görülmektedir. Şekil 4-5’de ise ikinci anten ve diğer üç anten arasındaki izolasyon değerleri gösterilmektedir. Antenler arasındaki en yüksek değer ikinci ve dördüncü antenler arasında ve 27.78 GHz’de -20.31 dB olduğu görülmektedir.

İzolasyon değerleri 2x2 yapısında incelendiği gibi bu bölümde de incelenmiştir. Anten sayısının çoğalması anten elemanları arasındaki etkileşimi artırmaktadır. Anten elemanı sayısı arttıkça izolasyon analizlerinin önemi artmaktadır. Şekil 4-18’de sırasıyla 1-2, 5-6, 10-11, 15-16. antenlerin arasındaki izolasyon değerleri incelenmiştir. Etkileşim değerleri yakın anten elemanlarında daha yüksek olmaktadır. Bu yüzden izolasyon incelemesi özellikle bitişik anten elemanları arasından seçilmiştir. Şekil 4-18’deki grafikler incelendiğinde en yüksek izolasyon değerinin 10-11. anten elemanları arasında olduğu ve 24.55 GHz’de -24.52 dB olarak ölçüldüğü görülmektedir. En yüksek sonucun düzlemsel dizi yapısının orta bölgesinde olması anlamlıdır. 10 ve 11. antenler yapının orta bölgesinde bulunmakta ve her iki eksende komşuluğu bulunan diğer anten elemanlarının yaptığı yayından etkilenmektedir.



Şekil 4-19 $\phi=0^\circ$ & $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Kazanç

Düzlemsel dizide bulunan anten elemanı sayısı arttıkça anten hüzmesinin daha yönlü, kazancının daha yüksek ve 3 dB açısıl bant genişliğinin daha düşük olduğu bilinmektedir. Şekil 4-19'da $\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ eksenlerinde kazanç grafikleri verilmiştir. Tek anten tasarımında elde edilen maksimum kazanç değeri Şekil 3-5'de 5.39 dBi olarak gösterilmişti. 2x2 düzlemsel dizi yapısında ise kazanç değeri 5.39 dBi'dan 12.60 dBi'a yükselmişti. Şekil 4-19'da verilen 4x4 düzlemsel dizi yapısının kazanç değerleri incelendiğinde ise kazancın 13.02 dBi'a yükseldiği görülmektedir.

Anten kazancının anten yönlülüğü ve antenin radyasyon verimliliğinin bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir. Doğrusal dizi anten yapılarında yönlülük ise (1.21) ile belirtilen denklem ile ifade edilmektedir [30].

$$D = 2 N \frac{d}{\lambda} \quad (1.21)$$

Denklemden bulunan N anten elemanı sayısını, d anten elemanlarının arasındaki mesafeyi, λ dalga boyunu ifade etmektedir.

İki boyutlu dizi yapılarında ise yönlülük (1.22) ile belirtilen denklem ile ifade edilir.

$$D_0 = \pi \cos \theta_0 D_x D_y \quad (1.22)$$

Denklemden bulunan θ_0 ana hüzmelin yükseliş eksenine yaptığı açıyı, D_x x eksenindeki doğrusal dizinin yönlülüğünü, D_y y eksenindeki doğrusal dizinin yönlülüğünü ifade etmektedir.

Burada

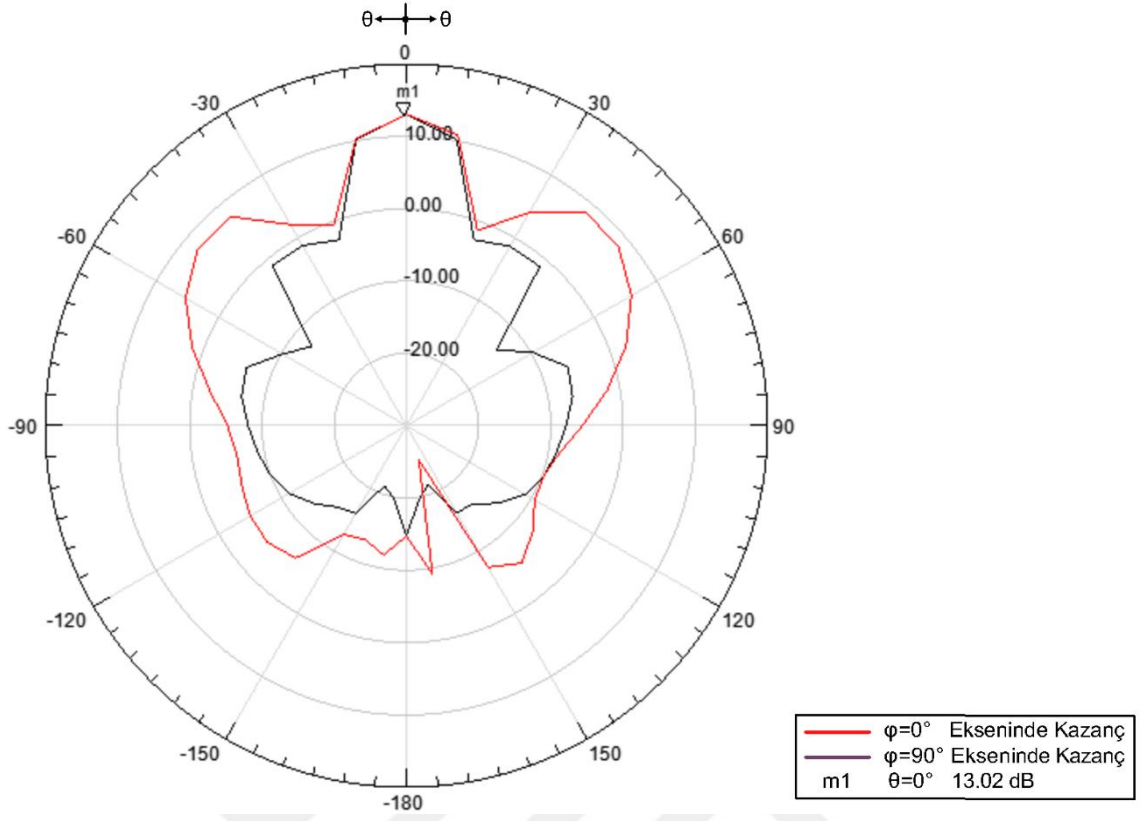
$$D_x = 2 N \frac{d_x}{\lambda} \quad (1.23)$$

$$D_y = 2 N \frac{d_y}{\lambda} \quad (1.24)$$

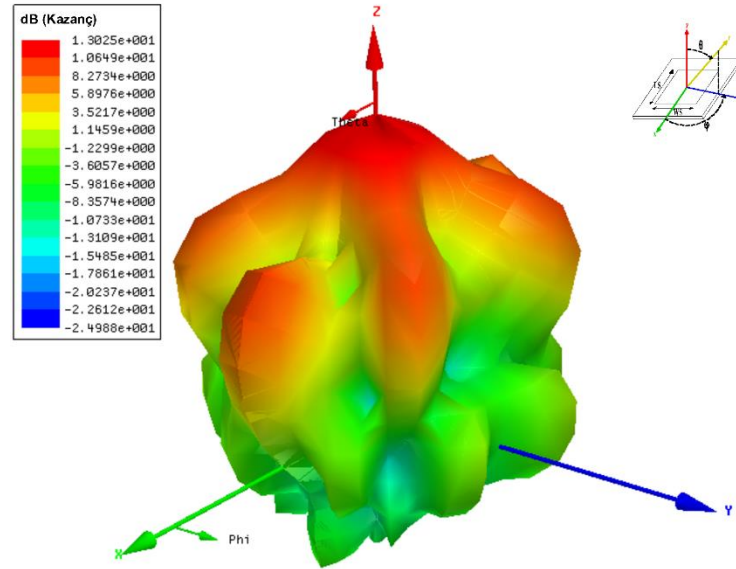
olarak ifade edilmektedir.

Gerekli işlemler yapıldığında 2x2 yapısının yönlülüğünün 13,3 dB, 4x4 yapısının ise 19,28 dB olduğu hesaplanmaktadır. Fakat 2x2 ve 4x4 yapısı incelendiğinde bu yapılardan elde edilen maksimum kazanç miktarları arasındaki oranın hesaplanandan daha az olduğu görülmektedir. 4x4 yapısının kazanç grafiği incelendiğinde yan hüzmeye seviyesinin yükseldiği görülmektedir. Bunun sebebinin konektör boyutlarından dolayı anten elemanlarının daha yakın konumlandırılmaması olduğu değerlendirilmektedir. Ana hüzmeye aktarılması gereken gücün bir kısmı yan hüzmelere aktarılmıştır bu sebeple elde edilen maksimum kazanç miktarı beklenenin altında kalmıştır.

Şekil 4-20’de düzlemsel dizi yapısının $\varphi=0^\circ$ ve $\varphi=90^\circ$ ’de ışıma karakteristiği, Şekil 4-21’de de 3 boyutlu kazanç grafiği bulunmaktadır.



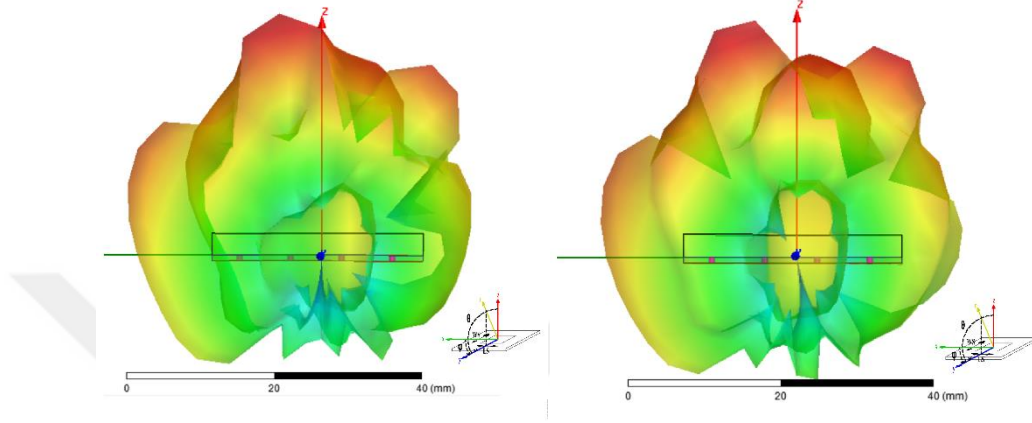
Şekil 4-20 $\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ Eksenlerinde Kazanç (Polar Grafik)



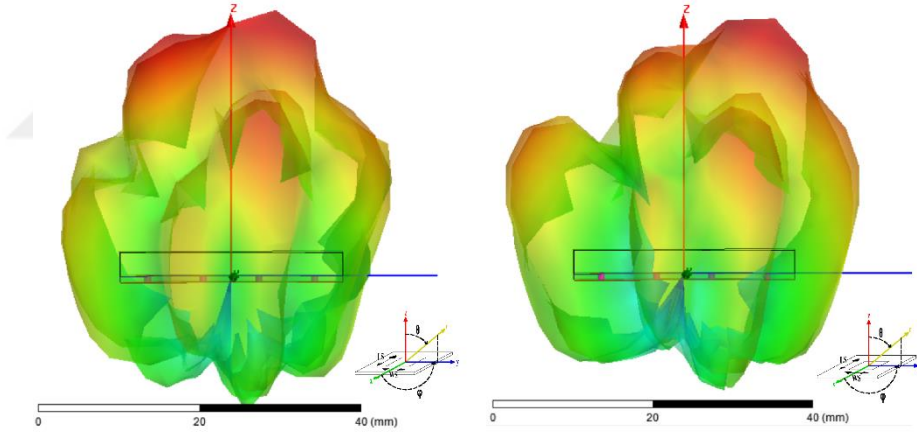
Şekil 4-21 3 Boyutlu Kazanç Grafiği

5G sistemlerinde mmDalga boyu kullanılmasının yol kaybı açısından dezavantaj yaratacağı ve atmosfer soğrulma oranlarının yükseleceği daha önce belirtilmişti. Bununla birlikte düzlemsel dizi yapısında kullanılan anten elemanı sayısının artırılmasının anten

kazancını artırdığı ve yol kaybının yarattığı olumsuz etkiyi gidermede etkili olabileceği bilinmektedir. Oluşan bu yüksek kazançlı hüzmelerin düzlemsel dizi yapısını fiziken yönlendirmeden anten elemanlarının beslemeleri arasında faz farkı uygulayarak yönlendirilebildiği 4.2 bölümünde gösterilmişti. Bu bölümde de analizi yapılan 4x4 düzlemsel dizi yapısının hüzmeye yönlendirme yetenekleri incelenmiştir. Şekil 4-22 ve Şekil 4-23'te yönlenmiş hüzmeye yapısının 3 boyutlu görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4-22 X Ekseninde 3 Boyutlu Hüzmeye Yönlendirme

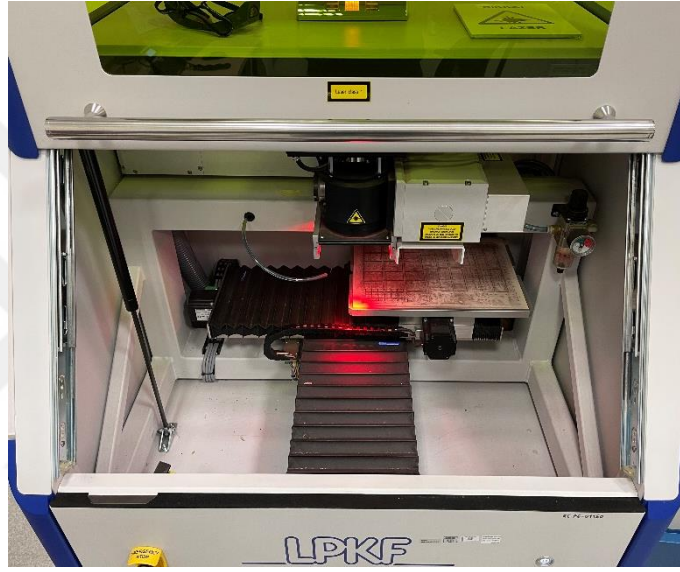


Şekil 4-23 Y Ekseninde 3 Boyutlu Hüzmeye Yönlendirme

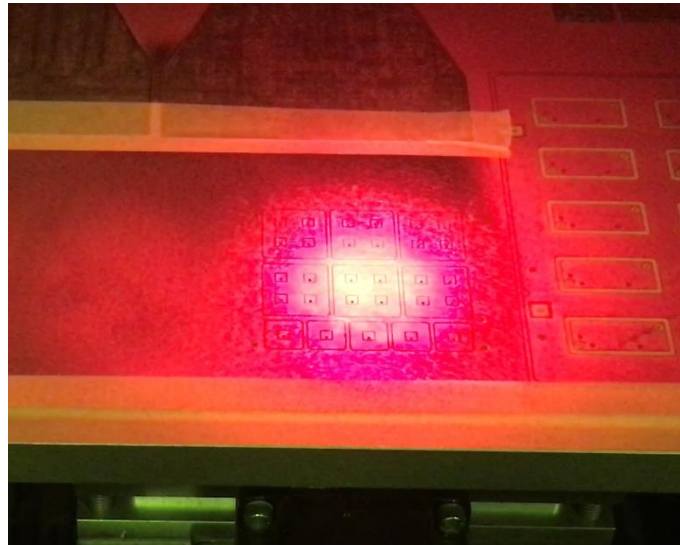
5. ÜRETİLEN ANTENLERİN SONUÇLARI

5.1 Tek Anten Sonuçları

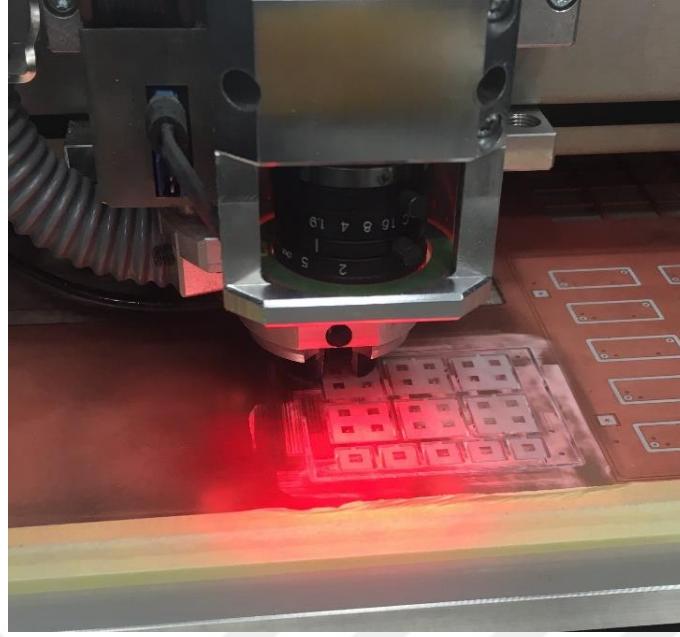
Bu tez çalışmasında üretilebilir bir anten tasarlanması hedeflenmiştir. Bu bölümde bölüm 3.1’de tasarımı yapılmış olan tek antenin üretim sonuçları irdelenecektir. Anten ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi bünyesinde bulunan ekipmanlar kullanılarak üretilmiştir. Antenin çizme işlemi LPKF ProtoLaser S4 makinası kullanılarak yapılmıştır. Delme ve kesme işlemleri ise LPKF Protomat H100PCB makinası kullanılarak yapılmıştır. Üretim sürecine ait görseller aşağıda verilmiştir.



Şekil 5-1 LPKF ProtoLaser S4



Şekil 5-2 Lazer ile Çizme İşlemi

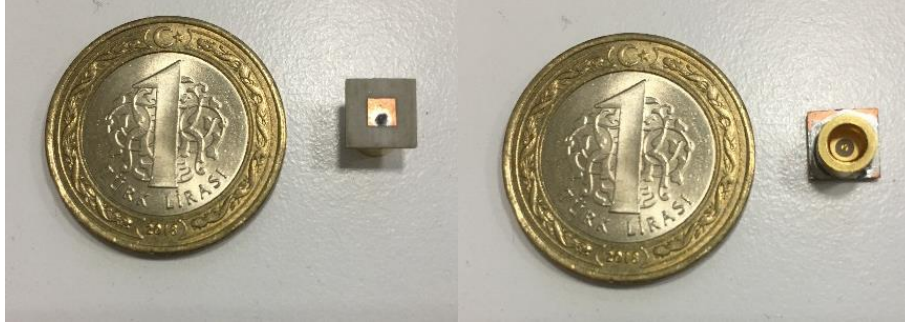


Şekil 5-3 LPKF Protomat H100PCB Kullanılarak Kesme ve Delme İşlemi

Üretimi yapılan antenin boyutları Çizelge 5-1’de, anten görselleri ise Şekil 5-4’de verilmektedir.

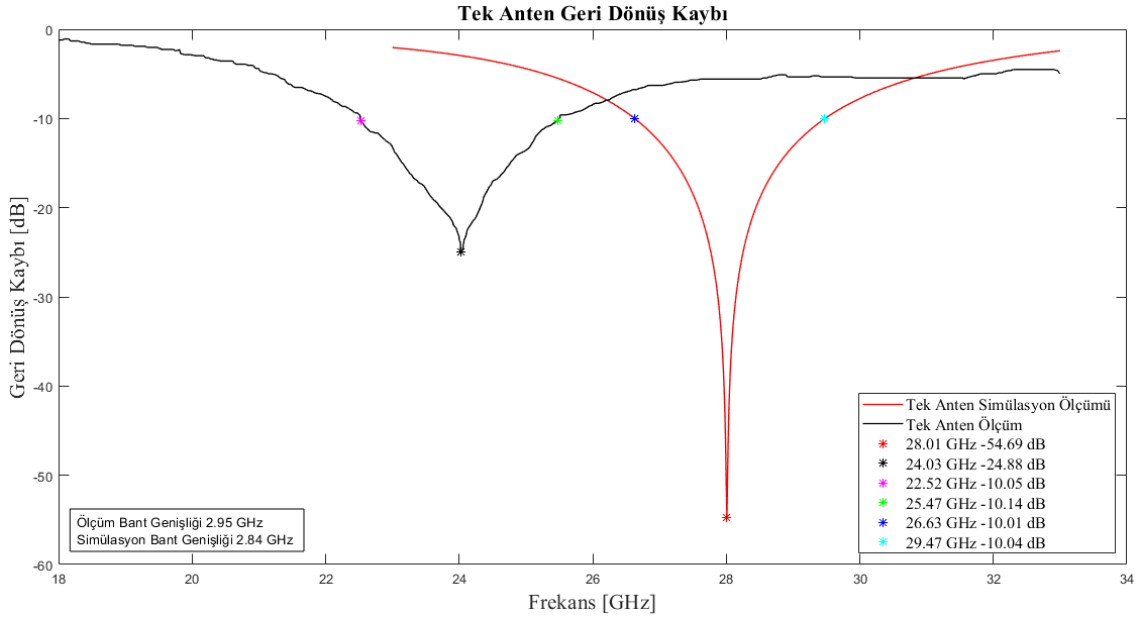
Çizelge 5-1 Tek Anten Boyutları

Parametre	Tanım	Değer
LS	Alttaş Uzunluğu	7 mm
WS	Alttaş Genişliği	7 mm
HS	Alttaş Yüksekliği	0.8 mm
LP	Yama Uzunluğu	2.77 mm
WP	Yama Genişliği	2.77 mm
LX	Besleme Noktasının Yamanın X Eksenine Kenarına Olan Uzaklığı	0.65 mm
RO	Antenin Alt Yüzeyindeki Konektör Boşluğu Yarıçapı	2.75 mm
RI	Antene Montajı Yapılan Konektör Canlı Ucu İçin Açılan Delik Yarıçapı	0.4 mm
WY	Besleme Noktasının Anten Orijinine Y Eksenine Yönünde Olan Uzaklığı	0 mm
HX	Besleme Noktasının Toprak Yüzeyine Olan Uzaklığı	0 mm



Şekil 5-4 Tek Anten Görselleri

Anten üretiminde Bölüm 3’de bahsedilen ve dielektrik sabiti 3.55 olan Rogers RO4003 alttaşı kullanılmıştır. Konektör olarak ise RADIALL firmasının R222426000 parça numaralı SMP tipi konektörü kullanılmıştır. Antenin network analizör kullanılarak geri dönüş kaybı ölçümü yapılmış ve elde edilen sonuç simülasyonla karşılaştırmalı olarak Şekil 5-5’de verilmiştir. Ölçüm sonucu incelendiğinde tek antenin 24.03 GHz rezonans frekansında -24.88 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmektedir. Antenin -10 dB bant genişliği ise 22.52-25.47 GHz arasını kapsamak üzere 2.95 GHz olarak ölçülmüştür. Rezonans frekansta simülasyona göre 4 GHz’lik bir kayma olduğu görülmektedir.



Şekil 5-5 Tek Antenin Geri Dönüş Kaybı Ölçümü

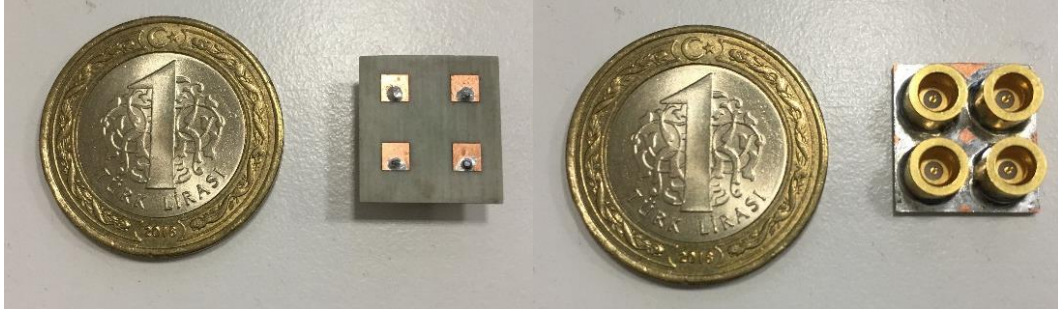
5.2 2x2 Düzlemsel Dizi Anten Sonuçları

Bölüm 3’de tasarımı yapılmış olan tek anten çoklanarak 2x2 düzlemsel dizi yapısı elde edilmiştir. Elde edilen bu yapı bölüm 4’de incelenmiştir. Bölüm 4.2’de ise parametrik analizleri yapılmıştır. 2x2 düzlemsel dizi yapısı 4 anten elemanından oluşmaktadır. Bu anten elemanları birbiriyle özdeşdir. Anten elemanlarının besleme hatlarında kullanılan konektör tek antende olduğu gibi RADIALL firmasının R222426000 parça numaralı SMP tipi konektördür.

Üretimi yapılan 2x2 düzlemsel dizi antenin boyutları Çizelge 5-2’de, görseli ise Şekil 5-6’da verilmektedir.

Çizelge 5-2 2x2 Düzlemsel Dizi Boyutları

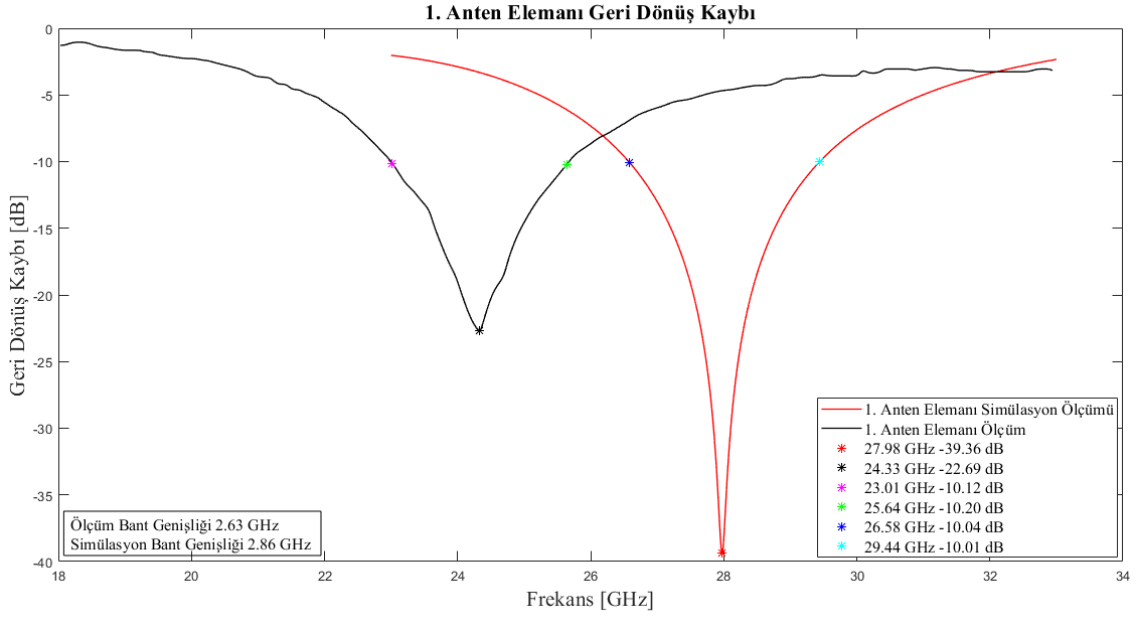
Parametre	Tanım	Değer
LS	Altaş Uzunluğu	15 mm
WS	Altaş Genişliği	14 mm
HS	Altaş Yüksekliği	0.8 mm
LP	Yama Uzunlukları	2.77 mm
WP	Yama Genişlikleri	2.77 mm
LX	Besleme Noktalarının Yamaların X Eksenine Kenarına Olan Uzaklıkları	0.65 mm
RO	Anten Elemanlarının Alt Yüzeyindeki Konektör Boşluklarının Yarıçapı	2.75 mm
RI	Antene Montajı Yapılan Konektör Canlı Ucu İçin Açılan Deliklerin Yarıçapı	0.4 mm
WY	Besleme Noktasının Antenlerin Orijinine Y Eksenine Yönünde Olan Uzaklığı	0 mm
HX	Besleme Noktalarının Toprak Yüzeyine Olan Uzaklığı	0 mm



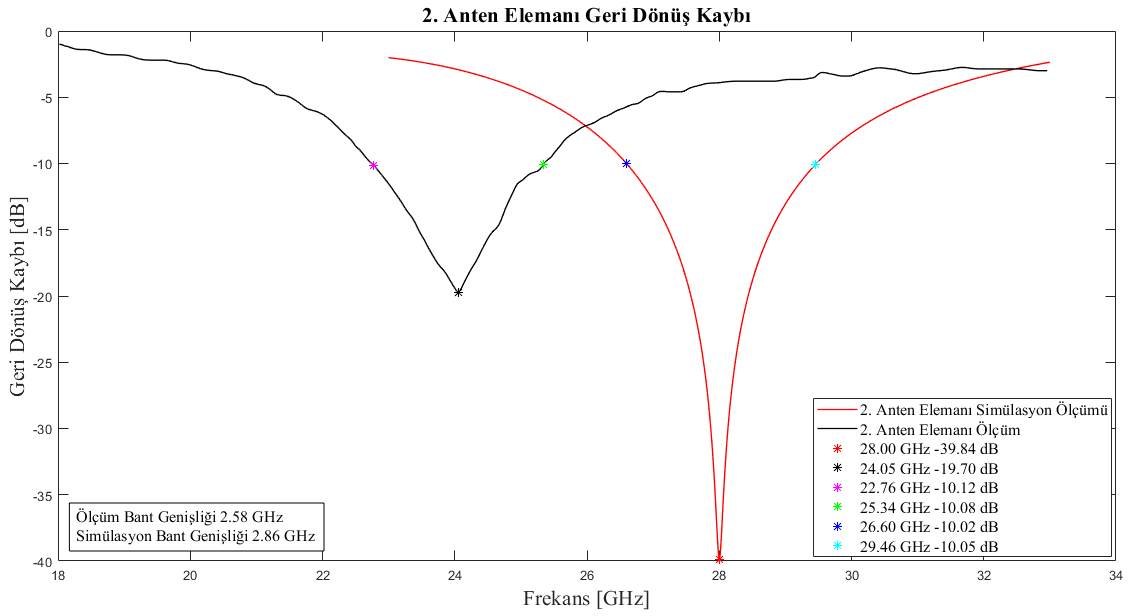
Şekil 5-6 2x2 Düzlemsel Dizi Görselleri

Düzlemsel dizi yapısının network analizör kullanılarak geri dönüş kaybı, anten elemanlarının arasındaki izolasyon ölçümleri alınmıştır. Dört anten elemanından elde edilen geri dönüş kaybı ölçümleri Şekil 5-7, Şekil 5-8, Şekil 5-9 ve Şekil 5-10'da verilmektedir.

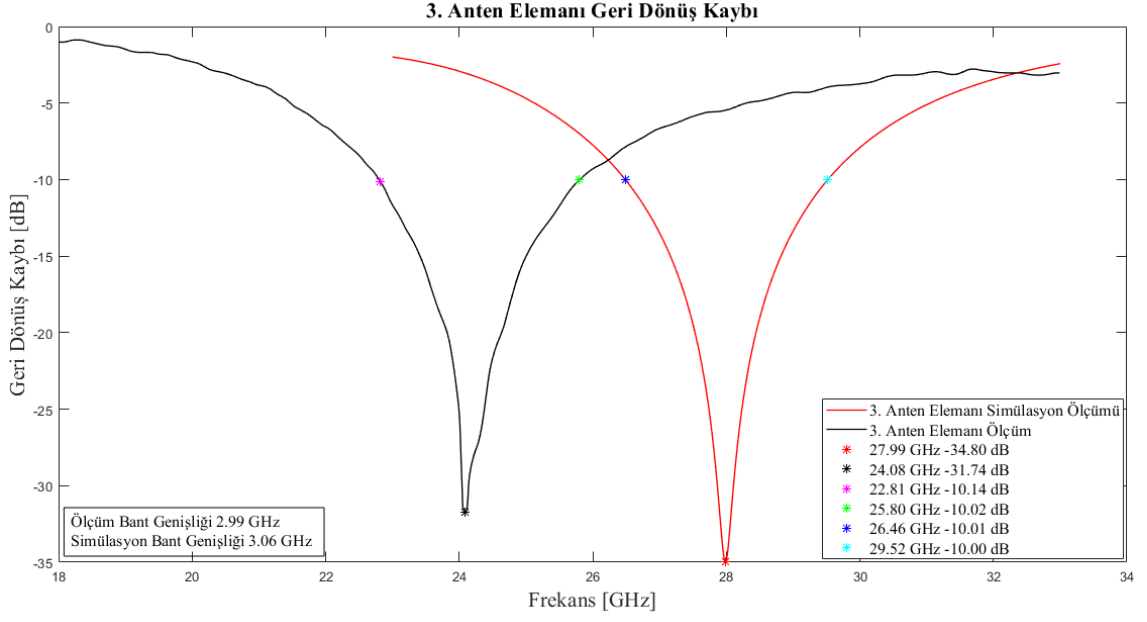
Ölçüm sonuçları incelendiğinde birinci anten elemanının 24.33 GHz rezonans frekansında -22.69 dB, ikinci anten elemanının 24.05 GHz rezonans frekansında -19.70 dB, üçüncü anten elemanının 24.08 GHz rezonans frekansında -31.74 dB, dördüncü anten elemanının 23.65 GHz rezonans frekansında -19.68 dB geri dönüş kaybı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Dört anten elemanının da minimum 23.01-25.34 GHz frekansları arasında olmak üzere toplam 2.33 GHz büyüklüğünde bir bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak verilmiş olan ölçüm sonuçları incelendiğinde anten elemanlarının rezonans frekanslarında 4 GHz'lik bir kayma olduğu, bant genişliklerinin de 400 MHz civarında daha az ölçüldüğü görülmüştür.



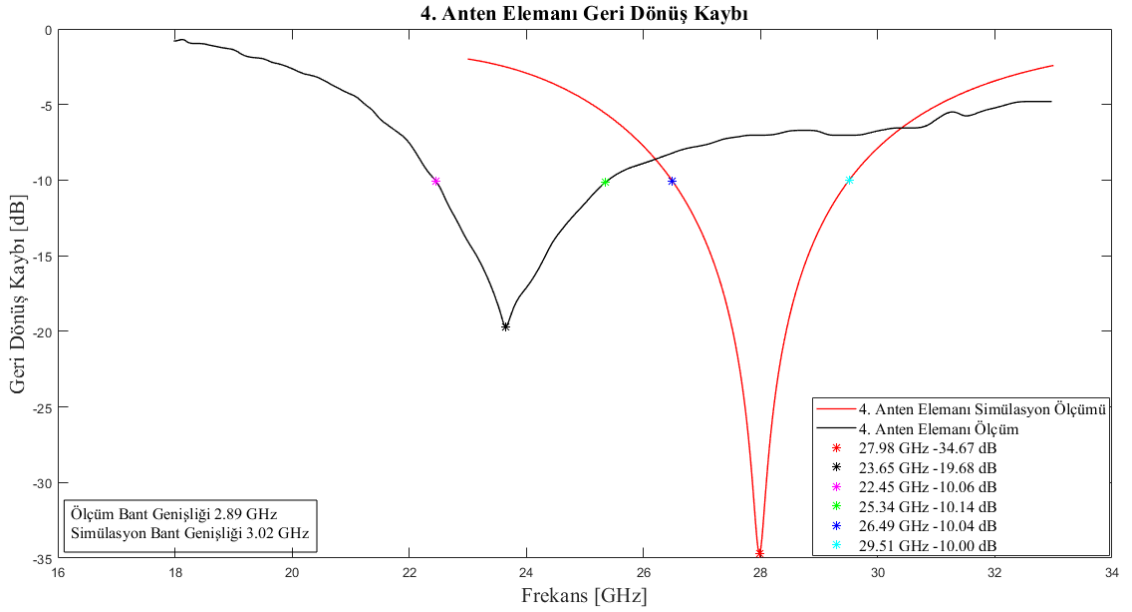
Şekil 5-7 1. Anten Elemanı Geri Dönüş Kaybı Ölçümü



Şekil 5-8 2. Anten Elemanı Geri Dönüş Kaybı Ölçümü



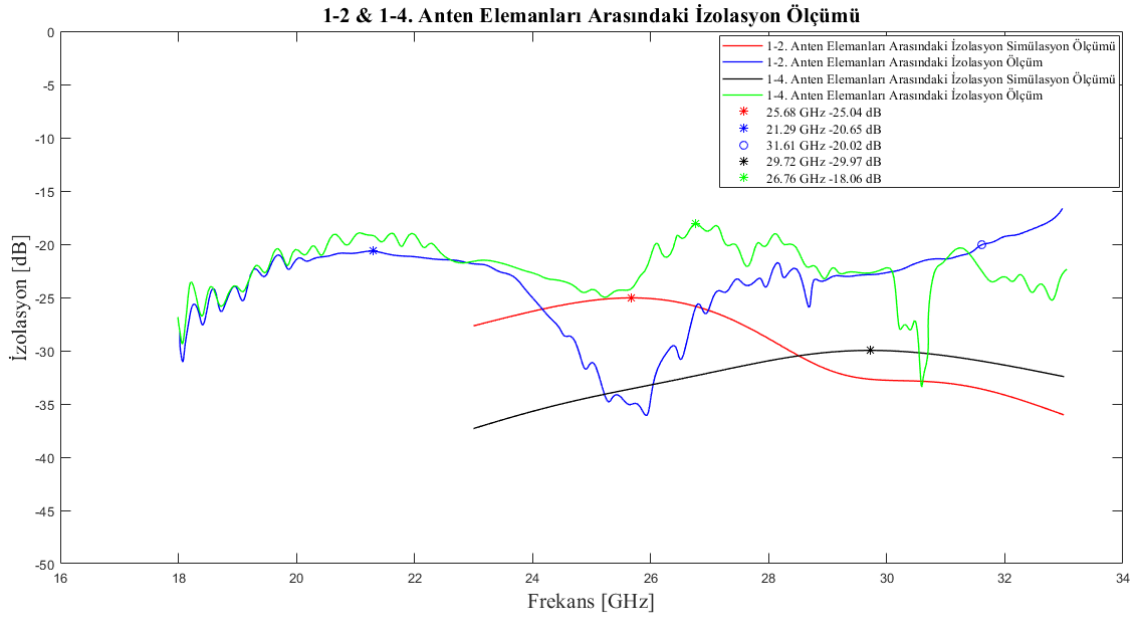
Şekil 5-9 3. Anten Elemanı Geri Dönüş Kaybı Ölçümü



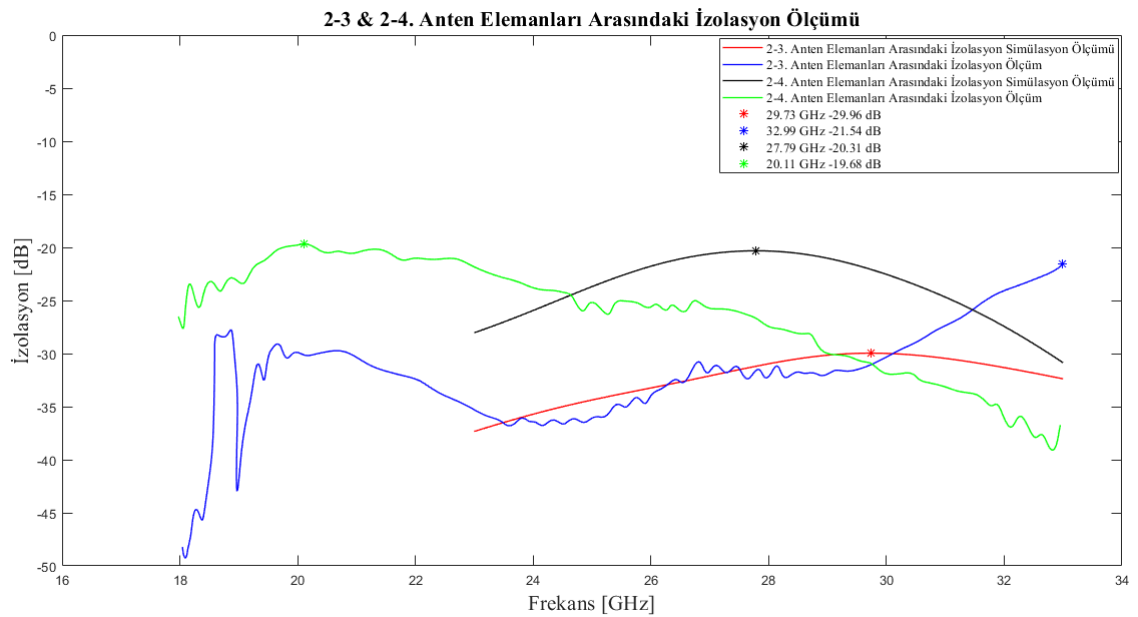
Şekil 5-10 4. Anten Elemanı Geri Dönüş Kaybı Ölçümü

Bu ölçümlere ek olarak anten elemanları arasındaki izolasyon değerleri de incelenmiştir. İzolasyon değerleri network analizör ölçüm cihazının iki portu kullanılarak iletim kaybı ölçümü alınarak incelenmiştir. Ölçümlerden elde edilen bazı izolasyon sonuçları, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak Şekil 5-11, Şekil 5-12, Şekil 5-13 ve Şekil 5-14’de verilmektedir. Yapılan literatür araştırmasında izolasyon için -20 dB seviyesi vurgulanmaktadır. Alınan ölçüm sonuçları incelendiğinde çalışma bandı içerisinde 1. ve

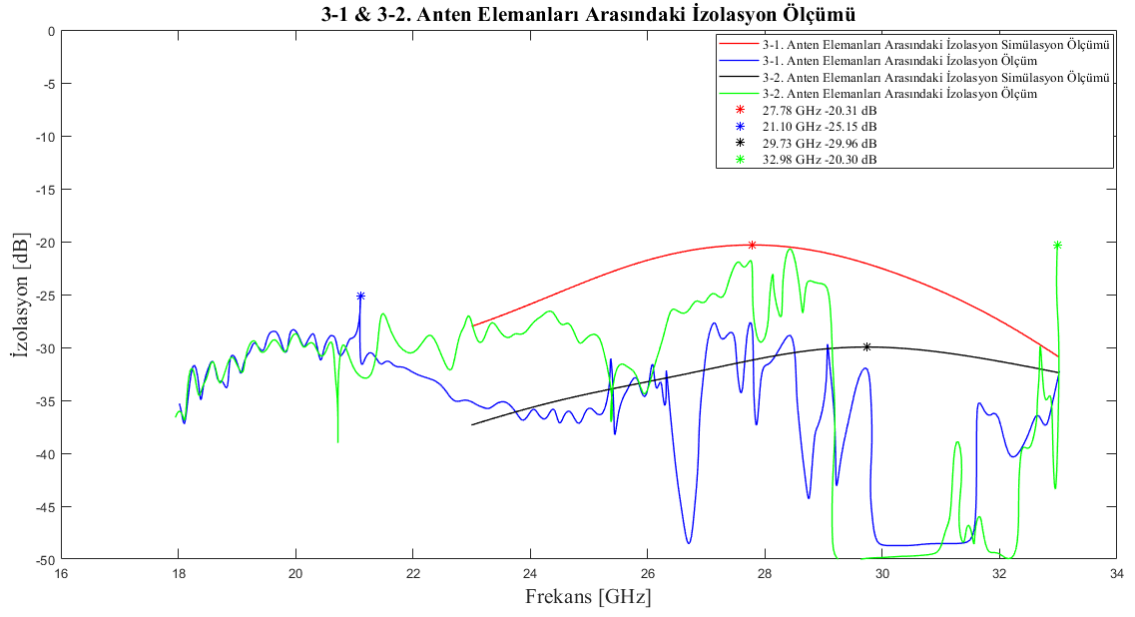
4. anten elemanları arasındaki izolasyon değerinin -18.06 dB olarak ölçüldüğü görülmektedir. 2. ve 4. anten elemanları arasındaki izolasyon değerinin -19.68 dB ,3. ve 4. anten elemanları arasındaki izolasyon değerinin ise -18.70 dB olduğu fakat bu değerlerin çalışma bandı dışında alındığı görülmektedir. Anten elemanlarının diğer izolasyon ölçümleri -20 dB seviyesinin altında kalmayı başarmıştır. Alınan sonuçların Bölüm 4’de simülasyonu yapılan sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.



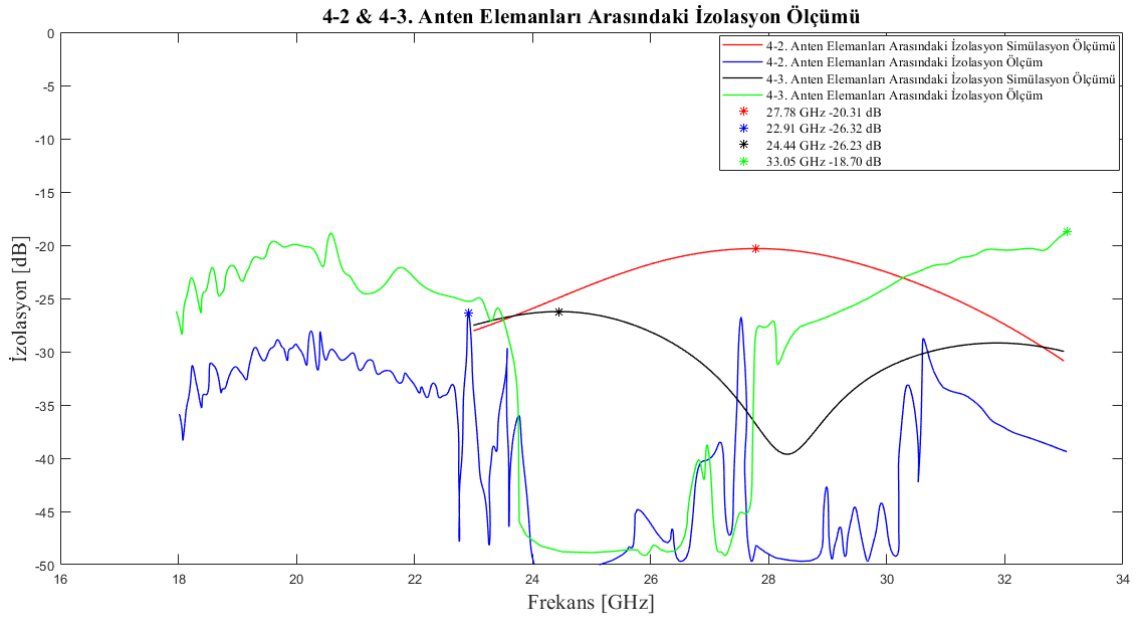
Şekil 5-11 1. Anten Elemanının 2 ve 4. Anten Elemanlarıyla Olan İzolasyon Ölçümü



Şekil 5-12 2. Anten Elemanının 3 ve 4. Anten Elemanlarıyla Olan İzolasyon Ölçümü



Şekil 5-13 3. Anten Elemanının 1 ve 2. Anten Elemanlarıyla Olan İzolasyon Ölçümü



Şekil 5-14 4. Anten Elemanının 2 ve 3. Anten Elemanlarıyla Olan İzolasyon Ölçümü

6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

Gelişen teknolojiyle birlikte ortalama her 10 yılda bir yenisi gelen haberleşme teknolojileri 2020'lerin başında 5. nesli ile hayatlarımıza girmeye hazırlanmaktadır. 5G ile birlikte gündelik yaşamdan, haberleşme alışkanlıklarına, multimedya deneyiminden, bulut teknolojilerine, sağlık, lojistik, ulaştırma sektörlerine kadar birçok alanda devrimsel gelişmeler olması beklenmektedir. 5G ile birlikte çok yüksek veri aktarım hızları, çok düşük gecikme süreleri, nesnelerin interneti gibi gelişmelerin yaşanması hedeflenmektedir. Bu gelişmelerin olabilmesi için elektromanyetik spektrumda yüksek bant genişliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek bant genişlikleri ise görece daha boş olan mmDalga boyu bantlarında bulunmaktadır.

Öncelikle literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. 5G için aday frekans bantları araştırılmış ve aday bantların 6 GHz'in altında ve üstünde olmak üzere ikiye ayrıldığı saptanmıştır. Bu çalışmada mmDalga boyutunda anten tasarlanması hedeflendiği için 6 GHz'in üstündeki spektruma odaklanılmış ve en güçlü aday bandın 28 GHz bandı olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacıların 28 GHz bandına odaklanmasında bandın müsait olması, atmosfer soğrulma oranının diğer mmDalga boyu aday bantlara göre daha az olması gibi avantajların olduğu görülmüştür. Her ne kadar atmosfer soğrulma oranı diğer aday yüksek frekans bantlarına göre düşük olsa da hali hazırda 2, 3 ve 4. jenerasyon haberleşme teknolojilerinde kullanılan 6 GHz altındaki banda göre oldukça yüksektir. Literatürde buna çözüm olarak kazancı yüksek, hüzmeye yönlendirme kabiliyeti olan çoklu anten dizilerinden oluşan düzlemsel dizi anten çözümlerinin çalışıldığı görülmüş ve bu alana yoğunlaşmıştır.

Bu araştırmalar sonucunda bu tez çalışmasında mmDalga bandında üretilebilir bir düzlemsel dizi anten tasarlanması ve üretilmesi kararlaştırılmıştır. Dizi anten yapısının 4 anten elemanından oluşması, düzlemsel dizi yapısında olması, anten elemanlarının ilgili bantta geri dönüş kaybı değerlerinin -10 dB'nin altında olması, bant genişliğinin 5G teknolojisinin ihtiyaç duyacağı büyüklükte olması, anten elemanları arasındaki izolasyon değerlerinin ise -20 dB'nin altında olması hedeflenmiştir. Bu tez çalışmasında belirlenen parametreleri sağlayacak çeşitli antenler tasarlanmıştır.

1. Öncelikle sık kullanılan alt taşlar olan FR4 ($\epsilon_r=4.4$) ve Rogers RT Duroid 5880 ($\epsilon_r=2.2$) ile mikroşerit besleme yöntemi kullanılarak tek anten tasarlanmıştır.

Alınan ölçümler literatürdeki örneklerle karşılaştırılmış ve besleme hattının düzlemsel dizi yapısına geçildiğinde ışımaya sebep olacağı dolayısıyla anten performansına olumsuz etki göstereceği değerlendirilmiştir.

2. Besleme hattını antenin yayın yaptığı yüzeyden ayırmak amacıyla bir diğer temaslı besleme yöntemi olan koaksiyel besleme yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.
3. Bu aşamada tasarım çalışmalarına Rogers RO4003 ($\epsilon_r=3.55$) alttaşı ile devam edilmiştir. Alttaş yüksekliği 0.4 mm olarak seçilerek önce tek anten sonra ise 2x2 düzlemsel dizi tasarımları yapılmıştır. İncelenen simülasyon sonuçlarında bant genişliğinin 1.5 GHz mertebesinde olduğu görülmüştür.
4. Bant genişliğinin daha fazla olabilmesi için çalışmalar yapılmış ve alttaş yükseklikleri artırılarak parametrik analizler yapılmıştır. Üretim sonucunda ortaya çıkacak antenin geri dönüş kaybı ve bant genişliği parametrelerinin en optimize olacağı düşünülen 0.8 mm alttaş yüksekliğinde olması kararlaştırılmıştır.
5. 0.8 mm yüksekliğinde olan Rogers RO4003 alttaşı temin edilmiş ve 2x2 düzlemsel dizi yapısının üretimi yapılmıştır. Üretim sonucunda konektör montajı yapılarak ölçümler alınmış ve hedeflenen -10 dB'nin altında geri dönüş kaybı seviyelerine ulaşamamıştır.
6. Tasarımda kullanılan konektörün değiştirilmesine karar verilmiş ve araştırmalar sonucunda RADIALL firmasının R222426000 parça numaralı SMP tipi konektörünün yapı için uygun olacağı değerlendirilmiştir.
7. Seçilen konektör boyutlarına göre tek anten, 2x2 ve 4x4 düzlemsel dizi yapılarının tasarımları tekrar yapılarak parametrik analizleri incelenmiştir.
8. Alınan simülasyon sonuçları doğrultusunda antenin üretilmesine karar verilmiş ve hem tek anten hem de 2x2 düzlemsel dizi yapısının üretimi yapılmıştır.
9. Alınan ölçüm sonuçları neticesinde hem tek antenin hem de 2x2 düzlemsel dizi yapısında bulunan anten elemanlarının rezonans frekansları 24 GHz mertebesinde ölçülmüştür. Üretilen antenin beslemesinde kullanılan konektörün 3 boyutlu çizimine ulaşamamış, bu sebeple simülasyonda modellenememiştir. Üretim yapılan alttaşın yüksekliği ölçüldüğünde, yüksekliğin 0.80 mm ile 0.86 mm arasında homojen olmayan değişim gösterdiği görülmüştür. Antenin çalışma bandında dalga boyunun küçük olması dolayısıyla toleranslara karşı çok hassas olduğu değerlendirilmektedir. Tek antende ve düzlemsel dizi yapısında bulunan anten elemanlarının uzunlukları ve genişlikleri 2.77 mm, konektör canlı ucu için

açılan deliğin çapı ise 0.8 mm'dir. Antenlerin oldukça küçük olan bu boyutlarında, konektörün simülasyonda modellenememesi, alttaşın yüksekliğinin 0.80-0.86 mm arasında değişmesi, antenin üretimini yapan makinanın toleransı, konektör montajı esnasında olan işçilik toleransları gibi faktörlerin bu kaymaya sebep olduğu düşünülmektedir. Benzetimde yapılan parametrik analizlerde anten parametrelerinin mm'nin onda biri hatalardan dahi oldukça etkilendiği gözlenmiştir.

10. Üretimi yapılan tek anten ve düzlemsel dizi yapısının network analizör kullanılarak ölçümleri alındığında minimum -19 dB'lik geri dönüş kayıp değerlerine, 2.5 GHz'den büyük bant genişliklerine ve maksimum -19 dB izolasyon değerlerine ulaşılmıştır.

Bu tez çalışmasında genel olarak 5G için en güçlü mmDalga boyu aday bantlarından biri olan 28 GHz'de üretilebilir bir anten tasarımı yapılmasına çalışılmıştır. Anten parametrelerinin en optimize sonuç vereceği alttaş çeşitleri ve yükseklikleri araştırılmış, besleme tekniklerinin yüksek frekans anten çözümlerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen tecrübe sonucunda yüksek frekans anten üretiminin düşük frekans anten üretimine göre çok daha hassas olduğu gözlenmiştir. Benzetim çalışması yapılmış olan 4x4 düzlemsel dizi yapısı ve çok daha fazla anten elemanı kullanılarak yapılacak olan düzlemsel dizi yapılarından elde edilecek yüksek kazanç ve hüzme yönlendirme yetenekleri sayesinde yüksek atmosfer soğrulma oranlarına çözüm olabileceği değerlendirilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Q. K. U. D. Arshad, A. U. Kashif ve I. M. Quershi, "A Review on the Evolution of Cellular Technologies," 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, Pakistan, 8-12 January 2019.
- [2] B. A. Kumar ve P. T. Rao, "Overview of Advances in Communication Technologies," 2015 13th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC), Visakhapatnam, India, 22-23 July 2015.
- [3] A. G. Agyei ve S. Halme, "GPRS-Features and Packet Random Access Channel Performance Analysis," Proceedings IEEE International Conference on Networks 2000 (ICON 2000). Networking Trends and Challenges in the New Millennium, Singapore, Singapore, 5-8 September 2000.
- [4] P. Neog ve R. Bera, "Multi-standard Radio for 2G to 5G," 2017 2nd International Conference on Telecommunication and Networks (TEL-NET), Noida, India, 10-11 August 2017.
- [5] E. Ezhilarasan ve M. Dinakaran, "A Review on Mobile Technologies: 3G, 4G and 5G," 2017 Second International Conference on Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM), Tindivanam, India, 3-4 February 2017.
- [6] C. Evci, U. Barth ve P. Sehier, "Strategic and Technological Challenges for Wireless Communications Beyond 3G," Journal of Communications and Networks (Volume: 4, Issue: 4, Dec. 2002), December 2002.
- [7] B. Kalra ve D. K. Chauhan, "A Comparative Study of Mobile Wireless Communication Network: 1G to 5G," International Journal of Computer Science and Information Technology Research Vol. 2, Issue 3, pp: (430-433), September 2014.
- [8] URL: <https://www.itu.int/en/ITU-R/information/Pages/emergency-bands.aspx> (Erişim tarihi: 07.03.2021)
- [9] A. M. Mousa, "Prospective of Fifth Generation Mobile Communications," International Journal of Next-Generation Networks , pp. 11-30, September 2012.
- [10] IDATE & UMTS Forum, "Mobile Traffic Forecasts 2010-2020 report," IDATE & UMTS Forum, London, 2011.
- [11] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile DataTraffic Forecast Update," Cisco, USA, 2016.
- [12] Samsung, "5G Vision," Samsung, Korea, August 2015.
- [13] NGMN Alliance, "5G White Paper," NGMN Alliance, 17-February-2015.
- [14] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi ve F. Gutierrez, "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," IEEE Access (Volume: 1) , pp. 335 - 349, 10 May 2013.

- [15] URL: <https://www.5gamericas.org/5g-spectrum-vision/>
(Erişim tarihi: 07.03.2021)
- [16] Federal Communications Commission, "Before the Federal Communications Commission Washington, D.C. 20554," FCC, Washington, D.C., October 17, 2014.
- [17] Samsung, "Who & How: Making 5G NR Standards," Samsung, Korea, June 25, 2018.
- [18] Y. Rahayu, I. P. Sari, D. I. Ramadhan ve R. Ngah, "High gain 5G MIMO Antenna for Mobile Base Station," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), cilt No. 1, no. Vol. 9,, p. 468~476, February 2019.
- [19] S. Seidel ve H. Arnold, "Propagation measurements at 28 GHz to Investigate the Performance of Local Multipoint Distribution Service (LMDS)," Proceedings of GLOBECOM '95, Singapore , 14-16 November 1995.
- [20] Government of Canada, "Consultation on Releasing Millimetre Wave Spectrum to Support 5G," Government of Canada, Canada, June 2017.
- [21] Government of Canada, "Addendum to the Consultation on Releasing Millimetre Wave Spectrum to Support 5G," Innovation, Science and Economic Development Canada, June 2018.
- [22] Z. Qingling ve J. Li, "Rain Attenuation in Millimeter Wave Ranges," 2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, Guilin, China, 26-29 October 2006.
- [23] A. L. Swindlehurst, E. Ayanoğlu, P. Heydari ve F. Capolino, "Millimeter-Wave Massive MIMO: the Next Wireless Revolution?," IEEE Communications Magazine, cilt Volume: 52, no. Issue: 9, pp. 56 - 62, September 2014.
- [24] P. M. Sunthari ve R. Veeramani, "Multiband Microstrip Patch Antenna for 5G Wireless Applications Using MIMO Techniques," 2017 First International Conference on Recent Advances in Aerospace Engineering (ICRAAE), Coimbatore, India, 3-4 March 2017.
- [25] A. Ejaz, S. Mehak, W. Anwer, Y. Amin, J. Loo ve H. Tenhunen, "Investigating a 28 GHz Wide-Band Antenna and its MIMO Configuration," 2019 2nd International Conference on Communication, Computing and Digital systems (C-CODE), Islamabad, Pakistan, Pakistan , 6-7 March 2019.
- [26] H. Aliakbari, A. Abdipour, R. Mirzavand, A. Costanzo ve P. Mousavi, "A single Feed Dual-Band Circularly Polarized Millimeter-Wave Antenna for 5G Communication," 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland , 10-15 April 2016.
- [27] S. Krishna, G. Mishra ve S. K. Sharma, "A Series Fed Planar Microstrip Patch Array Antenna With 1D Beam Steering for 5G Spectrum Massive MIMO applications," 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Anaheim, CA, USA , 15-18 January 2018.
- [28] S. Yamaguchi, H. Watanabe, H. Yoshioka, Y. Morimoto, H. Nakamizo, K. Tsutsumi, S. Shinjo, S. Uchida, A. Okazaki, T. Fukasawa ve N. Yoneda,

- “Development of 28GHz Band Massive MIMO Antenna RF Frontend Module for 5G,” 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, USA , 8-13 July 2018.
- [29] M. Küpeli, Çift Bant Mikroşerit GPS Anten Analizi ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2017.
- [30] C. A. BALANIS, Antenna Theory Analysis and Design Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [31] L. C. Paul, M. S. Hosain, S. Sarker ve M. H. Prio, “The Effect of Changing Substrate Material and Thickness on the Performance of Inset Feed Microstrip Patch Antenna,” American Journal of Networks and Communications, cilt Vol. 4, no. No. 3, pp. 54-58, May 2015.
- [32] N. Kaur, N. Sharma ve N. Singh, “A Study Of Different Feeding Mechanisms In Microstrip Patch Antenna,” International Journal of Microwaves Applications Volume 6, No. 1., p. 5 – 9, 2017.
- [33] K. Dizdar, Görüş Hattı Ortamında Çok Kullanıcı İçin Hüzme Yönlendirme, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2019.
- [34] H. E. Misilmani ve A. M. El-Hajj, “Massive MIMO Design for 5G Networks: An Overview on Alternative Antenna Configurations and Channel Model Challenges,” 2017 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), Genoa, Italy , 17-21 July 2017.
- [35] Rohde & Schwarz, “Millimeter-Wave Beamforming: Antenna Array Design Choices & Characterization,” Rohde & Schwarz, Munich, Germany, 2016.
- [36] A. Arora, A. Khemchandani, Y. Rawat, S. Singhai, G. Chaitanya, “Comparative Study of Different Feeding Techniques for Rectangular Microstrip Patch Antenna”, International Journal of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, Vol. 3, Issue 5, May 2015.