

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

**5G UYGULAMALARI İÇİN DİZİ YAMA ANTEN TASARIMI VE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alp Eren BAKIR

İletişim Sistemleri Anabilim Dalı

Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı

Temmuz 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

**5G UYGULAMALARI İÇİN DİZİ YAMA ANTEN TASARIMI VE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alp Eren BAKIR
705161019**

İletişim Sistemleri Anabilim Dalı

Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Sebahattin EKER

Temmuz 2020

İTÜ, Bilişim Enstitüsü'nün 705161019 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alp Eren Bakır, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**5G UYGULAMALARI İÇİN DİZİ YAMA ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Sebahattin EKER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri :
İstanbul Teknik Üniversitesi

İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Haziran 2020
Savunma Tarihi :





Aileme ve arkadaşlarıma,



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca zamanını ayırıp yol gösteren değerli hocam Sayın Sebahattin Eker'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tez aşamasında ilk günden bugüne göstermiş olduğu destek için Ülker Gizem Kılıçoğlu'na teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen ve bana güvenen aileme yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince desteklerini esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

Haziran 2020

Alp Eren BAKIR
(Mühendis)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Tezin Literatüre Katkısı.....	7
2. TELSİZ HABERLEŞME VE 5G TEKNOLOJİSİ.....	9
2.1 Haberleşme Teknolojilerindeki Gelişim	9
2.2 5. Nesil Telsiz Haberleşme Teknolojisi	12
2.3 5G Teknolojisinin Mimarisi	13
2.4 5G Uygulamaları ve Kullanım Alanları	15
3. 5G UYGULAMALARINDA KULLANILAN ANTEN ÇEŞİTLERİ	17
3.1 Mikroşerit Yama Anten.....	17
3.2 Dizi Anten	21
3.3 Çoklu Giriş – Çoklu Çıkış Anten	24
4. 5G UYGULAMALARI İÇİN ANTEN TASARIMI	28
4.1 Çoklu Giriş – Çoklu Çıkış (MIMO) Anten Tasarımı	29
4.1.1 İlk Antenin Tasarımı	30
4.1.1.1 Tek Elemanlı Anten Tasarımı	30
4.1.1.2 4x1 Anten Tasarımı.....	31
4.1.1.3 Simülasyon Sonuçları.....	31
4.1.2 İkinci Antenin Tasarımı	36
4.1.2.1 Tek Elemanlı Anten Tasarımı	37
4.1.2.2 4x1 Anten Tasarımı.....	37
4.1.2.3 Simülasyon Sonuçları.....	38
4.1.3 MIMO Antenlerin Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması	43
4.2 Mikroşerit Yama Anten Tasarımı	44
4.2.1 Tekli Mikroşerit Yama Anten Tasarımı ve Simülasyon Sonuçları	44
4.2.2 Mikroşerit Yama Dizi Anten Tasarımı ve Simülasyon Sonuçları.....	48
4.3 Mikroşerit Kafes Dizi Anten Tasarımı.....	55
4.3.1 Anten Tasarımı	55
4.3.2 Simülasyon Sonuçları.....	56
4.3.3 Mikroşerit Kafes Dizi Anten Optimizasyonu.....	60

5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	66



KISALTMALAR

GSM	: Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
LTE	: Uzun Süreli Gelişim
IoT	: Nesnelerin Haberleşmesi
LAN	: Yerel Alan Ağı
WAN	: Geniş Alan Ağı
AR	: Artırılmış Gerçeklik
IMT	: Uluslararası Mobil Telekomünikasyon
MIMO	: Çoklu Giriş – Çoklu Çıkış
CST	: Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi
PET	: Polietilen Tereftalat
AMPS	: Gelişmiş Cep Telefonu Sistemi
FM	: Frekans Modülasyonu
FSK	: Frekans Kaydırmalı Anahtarlama
SMS	: Kısa Mesaj Hizmeti
MTS	: Cep Telefonu Sistemi
AMTS	: Gelişmiş Cep Telefonu Sistemi
IMTS	: Geliştirilmiş Cep Telefonu Sistemi
FDMA	: Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
GPRS	: Genel Radyo Paket Servisi
EDGE	: GSM Evrimi İçin Geliştirilmiş Veri Hızları
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
CDMA	: Kod Bölmeli Çoklu Erişim
UMTS	: Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemleri
VC	: Görüntülü Konuşma
WCDMA	: Geniş Bant Kod Bölmeli Çoklu Erişim
IP	: İnternet Protokolü
OFDMA	: Dik Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
WiMAX	: Mikrodalga Erişimi İçin Dünya Çapında Birliktelik

eMBB	: Geliştirilmiş Mobil Geniş Bant
mMTC	: Kitlesel Makine Tipi Haberleşme
uRLLC	: Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli Haberleşme
RAN	: Radyo Erişimi Ağı
CN	: Çekirdek Ağ
HD	: Yüksek Çözünürlük
VR	: Sanal Gerçeklik
ESA	: Elektronik Taranan Dizi Anten
MSA	: Mekanik Taranan Dizi Anten
AESA	: Aktif Elektronik Taranan Dizi Anten
PESA	: Pasif Elektronik Taranan Dizi Anten
SISO	: Tek Giriş – Tek Çıkış
SIMO	: Tek Giriş – Çok Çıkış
MISO	: Çok Giriş – Tek Çıkış
QHD	: Dörtlü Yüksek Çözünürlük
VSWR	: Duran Dalga Gerilim Oranı

SEMBOLLER

ω	: Açısal frekans
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boş uzay manyetik geçirgenliği
ϵ	: Elektriksel geçirgenlik
ϵ_0	: Boş uzay geçirgenliği
ϵ_r	: Bağlı geçirgenlik
ϵ_{eff}	: Efektif bağlı geçirgenlik
σ	: İletkenlik
Z	: Empedans
λ_0	: Dalgaboyu
η	: Verimlilik
D	: Yöneltililik
E	: Elektrik alan
f_r	: Rezonans Frekansı
c	: Işık Hızı
I_0	: Akım Genliği
δ	: Tanjant Kaybı



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: IMT-2020 5G Standartları [5].	2
Çizelge 2.1: 1G ve 2G teknolojilerinin karşılaştırılması.	10
Çizelge 2.2: 3G ve 4G teknolojilerinin karşılaştırılması.	11
Çizelge 2.3: 4G ve 5G performans karşılaştırması.	13
Çizelge 3.1: Çok kullanılan dielektrik özellikleri.	18
Çizelge 4.1: Farklı anten geometrileri için tasarımlar kıyaslama.	28
Çizelge 4.2: Rogers RT 5880 Özellikleri.	29
Çizelge 4.3: FR-4 Özellikleri [4].	29
Çizelge 4.4: Anten Geometrisi (mm).	30
Çizelge 4.5: Anten Geometrisi (mm).	37
Çizelge 4.6: İki farklı MIMO anten geometrisi için anten parametre değerleri.	43



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: 5G Esnek mikroşerit yama anten [7].	4
Şekil 2.1: Mobil ağ teknolojisindeki kronolojik gelişim [1].	9
Şekil 2.2: 5G Teknolojisinin Temel Mimarisi [11].	13
Şekil 2.3: 5G Teknolojisi Katmanlı Mimari [15].	14
Şekil 3.1: Mikroşerit anten temel yapısı.	17
Şekil 3.2: Kullanılan farklı geometrideki yama şekilleri.	18
Şekil 3.3: Geleneksel dikdörtgen mikroşerit anten.	19
Şekil 3.4: Mikroşerit ve koaksiyel besleme.	21
Şekil 3.5: Doğrusal dizi anten geometrisi [24].	23
Şekil 3.6: Tek Girişli-Tek Çıkışlı Anten Konfigürasyonu.	25
Şekil 3.7: Tek Girişli-Çok Çıkışlı Anten Konfigürasyonu.	25
Şekil 3.8: Çok Girişli-Tek Çıkışlı Anten Konfigürasyonu.	26
Şekil 3.9: Çok Girişli-Çok Çıkışlı Anten Konfigürasyonu.	26
Şekil 4.1: (a) Anten geometrisi (b) Antenin tasarımı.	30
Şekil 4.2: Anten tasarımı.	31
Şekil 4.3: (a) Tekli anten ve (b) 4x1 MIMO anten S11 parametresi.	32
Şekil 4.4: Tekli antende yönelticilik (a) ve kazanç (b) ve 4x1 MIMO antende yönelticilik (c) ve kazanç (d) değerleri.	33
Şekil 4.5: (a), (c) Tekli antenin ve (b), (d) 4x1 MIMO antenin reel ve imajiner empedans değerleri.	35
Şekil 4.6: Tekli antenin (a) ve 4x1 antenin (b) VSWR değeri.	36
Şekil 4.7: (a) Anten geometrisi (b) Antenin tasarımı.	37
Şekil 4.8: Anten tasarımı.	38
Şekil 4.9: (a) Tekli anten ve (b) 4x1 MIMO anten S11 parametresi.	39
Şekil 4.10: Tekli antende yönelticilik (a) ve kazanç (b) ve 4x1 MIMO antende yönelticilik (c) ve kazanç (d) değerleri.	40
Şekil 4.11: (c), (d) Tekli antenin ve (a), (b) 4x1 MIMO antenin reel ve imajiner empedans değerleri.	42
Şekil 4.12: Tekli antenin (a) ve 4x1 antenin (b) VSWR değeri.	43
Şekil 4.13: Mikroşerit Anten Tasarımı.	45
Şekil 4.14: S11 parametresi.	45
Şekil 4.15: (a) ve (b) Antenin yönelticilik ve kazanç değerleri.	46
Şekil 4.16: (a) ve (b) Antenin reel ve imajiner empedans değerleri.	47
Şekil 4.17: Antenin VSWR değeri.	48
Şekil 4.18: 2x1 Mikroşerit Dizi Anten Tasarımı.	49
Şekil 4.19: 4x1 Mikroşerit Dizi Anten Tasarımı.	49
Şekil 4.20: (a) 2x1 anten ve (b) 4x1 anten S11 parametresi.	50
Şekil 4.21: 2x1 dizi antende yönelticilik (a) ve kazanç (b) ve 4x1 dizi antende yönelticilik (c) ve kazanç (d) değerleri.	51
Şekil 4.22: (a), (b) 2x1 dizi antenin ve (c), (d) 4x1 dizi antenin reel ve imajiner empedans değerleri.	54

Şekil 4.23: 2x1 dizi antenin (a) ve 4x1 dizi antenin (b) VSWR değeri.	55
Şekil 4.24: Anten Tasarımı.	56
Şekil 4.25: Antenin S11 parametresi.	57
Şekil 4.26: (a) ve (b) Antenin yönelticilik ve kazanç değerleri.	57
Şekil 4.27: (a) ve (b) Antenin reel ve imajiner empedans değerleri.	59
Şekil 4.28: Antenin VSWR parametresi.	59
Şekil 4.29: Anten Tasarımı.	60
Şekil 4.30: Antenin S11 parametresi.	61
Şekil 4.31: (a) ve (b) Antenin yönelticilik ve kazanç değerleri.	61
Şekil 4.32: (a) ve (b) Antenin reel ve imajiner empedans değerleri.	62
Şekil 4.33: Antenin VSWR parametresi.	63



5G UYGULAMALARI İÇİN DİZİ YAMA ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

ÖZET

5G teknolojisi son kullanıcıya yeni ve daha iyi servisler sunabilmek amacıyla sürekli gelişmektedir. Yeni servislerin yüksek video çözünürlüğü, sanal gerçeklik uygulamaları gibi yüksek bant genişliği gerektirmesi haberleşme alanında da yüksek kapasite ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Bu ihtiyaç kullanım alanlarına bağlı olarak değişiklik göstermekte, çoklu kullanımın desteklenmesi gereken uygulamalarda yüksek bant genişliği gerekirken, anlık aksiyonun önem taşıdığı uygulamalarda ise düşük gecikme sürelerini önemli hale getirmektedir. Bu nedenle 5. nesil kablosuz haberleşme teknolojisinde 4. nesil teknolojiye oranla hem data hacmi hem de data transfer hızında çok daha fazla kapasiteye ulaşılması amaçlanmaktadır.

5G teknolojisinde frekans aralığı olarak yüksek data transferini gerçekleştirebilmek amacıyla yüksek frekans bantları tercih edilmekte ve böylece kapasite artırımı sağlanmaktadır. Aynı zamanda alt frekans aralıklarının da 5G teknolojisi için kullanıma açık olmasıyla birlikte daha çok 24-66 GHz frekans spektrumu tercih edilmektedir.

Diğer haberleşme teknolojilerinde olduğu gibi 5. nesil teknolojide de sistemin en önemli entegrasyon elemanı antenlerdir. Yeni teknolojiyle birlikte hem veri hızındaki hem de veri hacmindeki artışı karşılayabilmek amacıyla yaşanan zorlukların üstesinden gelebilmek için kullanılan antenlerin tasarımında ulaşılan verimlilik, antenin ışıma özellikleri, kazancı ve üretim maliyeti gibi parametreler önem taşımaktadır. Yeni nesil haberleşme sistemlerinde yüksek kazanç ve verimlilik, düşük enerji tüketimi, yüksek yönlülük kullanılacak antenler için tercih edilen özellikler olmaktadır. Ayrıca kullanılacak anten boyutu ve ağırlığı gibi parametreler de antenin kullanım alanına göre değişiklik göstermekte özellikle 5G uygulamalarının kullanılacağı mobil cihazlar dikkate alındığında bu özellikler de ön plana çıkmaktadır. Anten boyutlarının olabildiğince küçük olması ve ağırlığının az olması amacıyla anten üretiminde kullanılacak maddeler de buna uygun şekilde seçilmelidir. Milimetre dalga boyundaki yapılan çalışmalarda antenin ışıma yaptığı frekans arttıkça anten boyutu da küçülmektedir. Anten boyutunun küçülmesiyle birlikte hem anten üretiminde hem anten parametre ve ışıma ölçümlerinde kullanılan araçların hassasiyeti, yüksek frekanslardaki elektromanyetik dalgaın çevresel etkilere maruz kalarak hızlı zayıflaması nedeniyle, günümüzde kullanılan cihazların hassasiyetine oranla daha yüksek olmalıdır.

5G teknolojisinde kullanılabilir anten tasarımları bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Bu kapsamda yapılan literatür taramalarıyla optimum frekans aralıkları ve anten çeşitleri incelenerek sıkça kullanılan frekans aralığında ve anten tiplerinde anten tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında diğer frekanslara oranla yol kaybını ve elektromanyetik dalga emiliminin az olması nedeniyle 28 GHz merkez frekansı antenin çalışma bandı

olarak belirlenmiştir. Bu çalışma frekansında mikroşerit yama anten, mikroşerit dizi anten, çoklu giriş çoklu çıkış anten ve kafes dizi anten tasarımları Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi (CST) ortamında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenlerde, anten yapısına bağlı olarak optimum kazanç, verimlilik ve bant genişliğini elde edebilmek amacıyla optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle 12 x 9.8 mm boyutlarındabirim hücre mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu anten kullanılarak yine aynı ışıma frekanslı 48 x 9.8 mm boyutlarında 4x1 MIMO anten formuna getirilmiştir. Mikroşerit yama anten için 6.16 dB yönelticilik ve 5.03 dBi anten kazancı elde edilirken MIMO anten formunda yönelticilik artarak 9.64 dB ve kazanç artarak 8.26 dBi değerine ulaşmıştır. Anten verimliliği ise -1.33 dB'den -1.384 dB'ye az miktarda düşüş göstermiştir. Her iki anten için de 2.2 GHz bant genişliği elde edilerek literaturdeki 1.8 GHz bant genişliğine göre iyileştirme sağlanmıştır.

16 mm x 16 mm boyutlarında farklı formda ikinci bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilerek işlemler tekrarlanmış ve bu anten tasarımı da aynı frekansta çalışan 65 mm x 16 mm boyutlarında 4x1 MIMO anten formuna getirilmiştir. Mikroşerit yama anten için 7.83 dB yönelticilik ve 7.35 dBi kazanç elde edilirken MIMO anten için 13.08 dB yönelticilik ve 13.01 dBi kazanç değeri elde edilmiştir.

Dizi anten tasarımı içinse öncelikle 5 x 5.9 mm boyutlarında birim hücre mikroşerit yama anten tasarımı yapılmış ve sonrasında 2x1 ve 4x1 dizi anten formuna dönüştürülmüştür. Mikroşerit yama antenin yönelticilik ve kazanç değerleri sırasıyla 6.61 dB ve 2.26 dBi olarak elde edilmiştir. Tasarlanan 2x1 ve 4x1 antenin ise yönelticilik ve kazanç değerleri ise sırasıyla 7.35 dB, 3.62 dBi, 9.15 dB ve 5.67 dBi'dir. Dizi anten tasarımında eleman sayısını artırdıkça kazanç ve yönelticilik değerlerinin arttığı görülmüş. Anten boyut sınırlamaları nedeniyle bu artış belirli oranda sağlanmıştır.

Son olarak 28 x 20.8 mm ve 36 x 35 mm boyutlarında sırasıyla 8 kafesli ve 16 kafesli kafes dizi anten tasarımı yapılmıştır. Her iki anten için de mobil cihazlara uyumluluk amacıyla anten boyutunun uygunluğu gözetilmiştir. Yönelticilik ve kazanç değerleri sırasıyla, 12.7 dB ve 12 dBi, 12.3 dB ve 12.1 dBi olarak ölçülmüştür. Kafes sayısının optimizasyonu ile anten bant genişliğinde verimliliğinde iyileşme sağlanmıştır.

Bu çalışmada genel olarak 5G teknolojisinde kullanılacak antenin kazanç, verimlilik gibi parametrelerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. İyileştirme amacıyla anten tipi, tasarımı ve boyutlarında değişiklikler gerçekleştirilmiştir.

PATCH GRID ANTENNA DESIGN AND OPTIMIZATION FOR 5G APPLICATIONS

SUMMARY

5G technology is developing day by day in order to provide a better experience to the user. The fact that new services require high bandwidth, such as high video resolution and virtual reality applications, also brings with it the need for high capacity in the field of communication. This need varies depending on the areas of usage, while high bandwidth is required in applications where multi-user should be supported, while in applications where instant action is important, it makes low latency important. Therefore, it is aimed to reach much more capacity in the 5th generation wireless communication technology compared to the 4th generation technology.

In order to realize high data transfer in 5G technology, high frequency bands are preferred and thus capacity increase is provided. At the same time, although the lower frequency ranges are available for 5G technology. High frequency bands can be preferred by service providers in areas where high data density is required, such as urban areas. However, low frequencies can be preferred in areas that do not have a direct view or in areas where more devices need to be serviced. Although it varies according to the needs, it has been seen in the literature that high frequency bands are used more often than low frequency bands. In the 24-66 GHz high frequency band range, lower bands in the high band range are more preferred in order to minimize attenuation and loss.

As with other communication technologies, the most important integration element of the system in 5th generation technology is antennas. With the new technology, antenna parameters such as the efficiency achieved in the design of the antennas, the radiation properties of the antenna, its gain and production cost are important in order to overcome the difficulties experienced in order to meet the increase in both data rate, accessibility and data volume.

In the new generation communication systems, high gain and efficiency, low energy consumption and high directionality are the preferred features for the antennas to be used. In addition, parameters such as antenna size and weight to be used vary according to the usage area of the antenna, especially when mobile devices that will use 5G applications are taken into consideration, these features come to the fore. When the most frequently recently used antennas in mobile and broadband communication technologies are examined, it is seen that array antennas and multiple input multiple output antennas are preferred in new generation applications where they are more important in terms of their advantages.

In order for the antenna sizes to be as small as possible and to have a low weight, the substances to be used in antenna production should be selected accordingly. In studies carried out in millimeter wavelength, as the frequency of the antenna increases, the antenna size decreases. As the antenna size decreases, the sensitivity of the vehicles used in both antenna production and antenna parameter and radiation measurements should be higher sensitivity than the sensitivity of the devices used today, due to the rapid weakening of the electromagnetic wave at high frequencies due to environmental effects.

Antenna designs usable in 5G technology form the basis of this study. With the literature scans carried out in this context, the optimum frequency ranges and antenna types were examined and antenna designs were made in the frequent frequency range and antenna types.

In the scope of the study, 28 GHz operating frequency was determined as the working band of the antenna due to the lower loss of path and electromagnetic wave absorption compared to other frequencies. Electromagnetic waves in higher bands are also absorbed more easily by gases in the air, trees, and nearby buildings. Therefore, high frequencies are advantageous in high data density transmission, but for long-distance transmission, they cause loss due to high attenuation. In this working frequency, microstrip patch antenna, microstrip array antenna, multiple input multiple output antenna and lattice array antenna design were realized. In the designed antennas, optimizations were carried out in order to obtain optimum gain, efficiency and bandwidth depending on the antenna structure.

First of all, a 12 x 9.8 mm unit cell microstrip patch antenna design was made and it was transformed into a 4x1 MIMO antenna with the same operating frequency and 48 x 9.8 mm dimensions. 6.16 dB directivity and 5.03 dBi antenna gain were achieved for the microstrip patch antenna, while the direction of MIMO antenna increased 9.64 dB and the gain increased to 8.26 dBi. Antenna efficiency has decreased slightly from -1.33 dB to -1.384 dB. 2.2 GHz bandwidth was obtained for both antennas, and an improvement was achieved according to the 1.8 GHz bandwidth in the literature.

A second microstrip antenna design in 16mm x 16mm dimensions was carried out and the processes were repeated, and this antenna design was converted into a 4x1 MIMO antenna with 65mm x 16mm dimensions operating at the same frequency. 7.83 dB directivity and 7.35 dBi gain were obtained for the microstrip patch antenna, while 13.08 dB directivity and 13.01 dBi gain value were obtained for the MIMO antenna.

For the array antenna design, first 5 x 5.9 mm unit cell microstrip patch antenna design was made and then it was converted into 2x1 and 4x1 array antenna form. The directivity and gain values of the microstrip patch antenna were 6.61 dB and 2.26 dBi, respectively. The directionality and gain values of the designed 2x1 and 4x1 antennas are 7.35 dB, 3.62 dBi, 9.15 dB and 5.67 dBi, respectively. As the number of elements increased in the array antenna design, it was observed that the gain and directivity values increased. Due to antenna size limitations, this increase has been achieved to a certain extent.

Finally, a series of 8 lattice and 16 lattice lattice array antennas were designed in the dimensions of 28 x 20.8 mm and 36 x 35 mm respectively. For both antennas, the compatibility of the antenna size was observed for compatibility with mobile devices. Directivity and gain values were measured as 12.7 dB and 12 dBi, 12.3 dB

and 12.1 dBi, respectively. With the optimization of the number of lattices, an improvement in antenna bandwidth efficiency was achieved.

In this study, it is aimed to improve the parameters of the antenna to be used in 5G technology such as gain and efficiency. For improvement, changes have been made to the antenna type, design and dimensions.





1. GİRİŞ

Günümüzde insan yaşamını rahat ve konforlu hale getiren bilim ve teknolojinin ilerlemesiyle dünya daha kompakt bir hale gelmektedir. Son yirmi yılda mobil iletişim teknolojilerinin Mobil Haberleşme için Global Sistemler'den (GSM) ve Uzun Süreli Gelişim (LTE) sistemlerine hızla geliştiği görülmektedir. Teknolojik alışkanlıkların değişmesiyle haberleşme sistemlerinin günümüzdeki önemi fazlasıyla artmıştır. Bulut teknolojileri, mobil uygulamalar, sosyal platformlar, yüksek kalitedeki görüntüler insanların rutin veri akışını arttırmıştır. Artan bu kullanımla beraber daha düşük gecikme süreleri, daha fazla bant genişliği, kablosuz erişim ve anahtarlama tekniklerine duyulan ihtiyaçlar artış göstermiştir. Yeni kablosuz iletişim teknolojilerinin geliştirilmesinde iletim performansı ve ağlarla uyumluluk, kanallar arası parazit, enerji verimliliği, bağlantı ve gecikme gibi parametreler büyük önem taşımaktadır [1]. Artan veri akışının getirdiği problemleri mevcut sistemlerin kapasitesi ve bant genişliği yeterli ölçüde karşılayamadığından beşinci nesil (5G) hücresel haberleşme sisteminin ortaya çıkması da kaçınılmaz olmuştur. 5G teknolojisi yüksek çözünürlük, çift yönlü bant genişliği ve daha yüksek veri hızları sunması nedeniyle özellikle mobil telefon kullanıcıları tarafından tercih edilen bir teknoloji haline gelecektir. Ayrıca kablosuz sensörler için eşzamanlı çok sayıda bağlantı kurabilme özelliği sayesinde 5. nesil teknolojilerin nesnelerin haberleşmesinde (IoT) de kullanılacak olmasının bu teknolojinin yaygınlaşmasını ve kullanımı olumlu yönde etkileyeceği tahmin edilmektedir. Beşinci nesil teknoloji, dünya çapında tek bir cihaz kullanarak ve neredeyse tüm canlı iletişim altyapısına katılarak erişilebilir tüm uygulamaları sağlayacak yeni bir teknoloji olacaktır. Tek bir fiziksel ağın farklı performans özelliklerine sahip bir dizi sanal ağı desteklemesini sağlayacak yeni ağ yönetimi olanakları sunar. Bu ağ bölümlenme, mobil veri hizmetlerini belirli kullanıcıların belirli özelliklerine göre uyarlama imkanı yaratır. Örneğin, yoğun bir IoT sensör ağı, bağlantı hızı üzerinden terminallerin düşük güç tüketimine öncelik verebilir ve aynı zamanda, aynı altyapı üzerindeki ayrı bir ağ dilimi yüksek hızlı mobil geniş bant sağlayabilir [2].

5G teknolojisi yüksek hız, düşük gecikme, gelişmiş güvenilirlik, düşük güç tüketimi de dahil olmak üzere 4G üzerinde bir dizi iyileştirmeler sağlamaktadır. Yerel alan ağında (LAN) 1 Gbps'nin üzerinde ve geniş alan ağında (WAN) 500 Mbps'nin üzerinde, 4G kablosuz ağlardan yaklaşık 40 kat daha fazla kablosuz indirme hızı sağlaması beklenmektedir [3].

5G teknolojisi küresel hareketliliği ve hizmet taşınabilirliğini kolaylaştıracak birleşik bir küresel standart sağlamayı hedeflemektedir. 5G'nin mobil ağların kapasitesinde bir adım değişikliğine yol açacağı ve IoT, bağlantılı araçlar ve artırılmış gerçeklik (AR) gibi yenilikçi hizmetler için olanaklar yaratacağı düşünülmektedir. 5G'nin benimsenme hızı, ağ altyapısında yapılan tamamlayıcı yatırımlara bağlı olacaktır.

5G ile, büyük bant genişliğinin mikrodalga spektrumuna göre yüksek kapasite sağlaması nedeniyle milimetre-dalga spektrumu üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. 5G mevcut LTE frekans aralığında (600 MHz-6 GHz) ve milimetre dalga bantlarında (24-86 GHz) spektrumu kullanacaktır. 5G teknolojileri Uluslararası Telekomünikasyon Birliği tarafından yayınlanan Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (IMT)-2020 gereksinimlerini karşılamalıdır [4]. Bu standartlardan bazıları Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1: IMT-2020 5G Standartları [5].

Özellik	Açıklama	5G gerekliliği
Veri indirme hızı	Minimum	20 Gbit/s
Veri yükleme hızı	desteklenmesi gereken veri indirme -yükleme hızı	10 Gbit/s
Gecikme	Paket transfer süresine network ağının etkisi	1 ms- 4 ms
Bağlantı yoğunluğu	Birim alan başına toplam cihaz sayısı	$10^6/\text{km}^2$
Mobilite	Hücreler arası geçiş için maksimum hız	500km/h

5G teknolojisiyle birlikte mobil iletişim sistemlerinin bileşen teknolojisi de bu yönde evrilecektir. Mobil cihazlarda ve baz istasyonlarında kullanılan haberleşme cihazlarının çalışma frekans aralıklarının 5G teknolojisi için belirlenen standartlara

uygun olması gerekmektedir. Geniş bant ve ultra geniş bant antenler yüksek veri kapasitesi özellikleri nedeniyle bu sistemlerde daha çok tercih edilmektedir.

Anten sistemleri üzerinde, anten kazancını ve performansını artırmak amacıyla çok sayıda analiz çalışmaları yapılmış ve sade tasarımlarla yüksek performans üzerine odaklanılmıştır. Sade, hafif ve üretimi kolay kompakt yapıdaki yama anten belirli ölçüde amaca hizmet ederken çeşitli kazanç ve performans artırma yöntemlerine başvurulmuş ve yapılan çalışmalar anten teknolojisinin gelişip olgunlaşmasına büyük katkı sağlamıştır. Günümüzde mobil ve geniş bant haberleşme teknolojisinde oldukça yaygın kullanılan ve çeşitli avantajlara sahip başta mikroşerit yama antenler olmak üzere dizi antenler ve çok girişli çok çıkışlı (MIMO) antenler 5G alanında da büyük avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında da 5G uygulamaları için 28 GHz çalışma frekansında mikroşerit yama anten, dizi anten ve MIMO anten simülasyonları CST (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi) ortamında gerçekleştirilmiş ve kazanç ve ışıma bakımından optimum sonuçlar elde edilmesi amacıyla optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Yüksek orandaki veri transferi 5G teknolojisini kaçınılmaz kılmıştır. Bu çalışma kapsamında 5G teknolojisinde kullanılmak üzere 28 GHz merkez frekansına sahip optimum niteliklere sahip anten tasarımı amaçlanmıştır. Bu kapsamda tek elemanlı yama antenler, bu antenlerin birleşimi ile elde edilen dizi antenler ve MIMO anten yapıları incelenmiştir. Tasarlanan antenler CST simülasyon programında test edilerek anten parametreleri ölçülmüş, elde edilen sonuçlar doğrultusunda antenler üzerinde optimizasyona gidilmiş ve tasarlanan geometrilerde optimum anten boyutu, kazancı, ışıması ve bant genişliği gibi anten parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

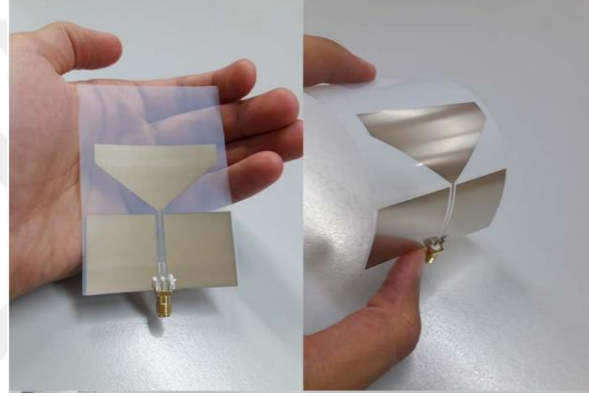
1.2 Literatür Araştırması

Literatürde 5G uygulamaları için farklı frekanslarda ve geometride çeşitli anten tasarımları yapılmıştır. Bu kapsamda literatürdeki tek girişli tek çıkışlı, çok girişli çok çıkışlı ve dizi anten tasarımları incelenmiştir.

5G bantlarının alt spektrumları 3.3-4.2 GHz ve 4.4-4.99 GHz frekans aralığında yer almaktadır. Yüksek frekans spektrumları ise 24.25-27.25 GHz, 26.5-27.5 GHz, 26.5–

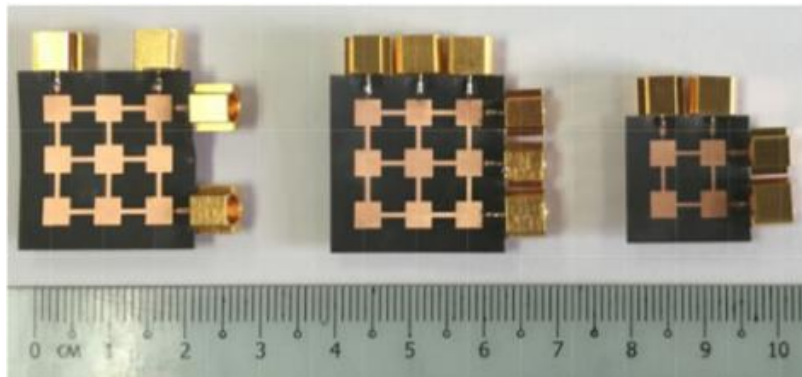
29.5 GHz, 27.5–28.28 GHz, 27.5–28.35 GHz, 37.0–40.0 GHz ve 37.0–43.5 GHz gibi frekansları kapsar. 60 GHz üzerindeki frekanslar 53.3-66.5 GHz, 55.4-66.6 GHz, 56.6-64.8 GHz, 57.0-64.0 GHz ve 57.0-65.0 GHz'tir [6]. 5G teknolojisinin farklı frekans aralıklarına imkan tanınması anten teknolojisinde de çeşitli anten tasarımlarının ortaya koyulmasına olanak sağlamıştır.

5G anten tasarımlarında alt tabaka olarak çeşitli dielektrik malzemeler kullanılmaktadır. Bu dielektrik malzemeye karar verirken, yüzey dalga üretim miktarı, geçirgenlik, anizotropi özelliği, ağırlığı, esneklik sabiti, mekanik mukavemeti, maliyeti gibi özellikler önem taşımaktadır. Tasarlanacak antenin yapısına ve kullanım alanı da malzeme seçiminde önemli bir etkidir.



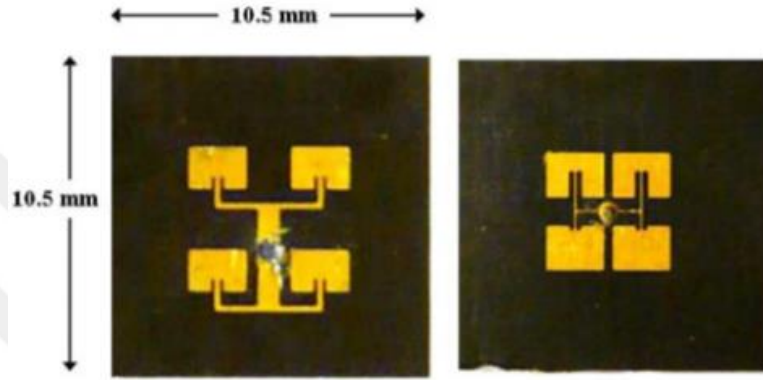
Şekil 1.1: 5G Esnek mikroşerit yama anten [7].

Şekil 1.1’de mikroşerit yama anten sunulmuştur. Bu antenin tasarımında alt tabaka olarak dielektrik sabiti 10 GHz’te 3.2, kayıp faktörü 0.002i yüzey direnci 10^{13}Ohm/cm^2 olan 0.125mm kalınlığında polietilen tereftalat (PET) kullanılmıştır. Anten boyutları $60 \times 75 \text{ mm}^2$ ’dir ve 7-13 GHz frekans bandında 5 dBi kazanca ve %38 verime sahiptir [7].



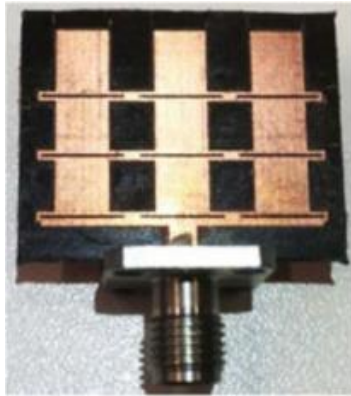
Şekil 1.2: 2x2 ve 3x3 seri beslemeli dizi anten [8].

Şekil 1.2’de 2x2 ve 3x3 seri beslemeli anten tasarımları verilmiştir. 0.25 mm kalınlığında Rogers/Duroid 5880 kullanılmıştır. Tasarlanan anten 28 GHz merkez frekansına sahiptir. Bu anten tasarımında yüksek empedanslı mikroşerit hatlar oluşturmak için antenin yama kısımları birbirine şeritler ile bağlanmıştır. İlk faz kaydırmalı tasarım olmak üzere iki farklı tasarım uygulanmıştır. Faz kaydırmalı tasarımda iyi empedans ve radyasyon özellikleri sağlanmıştır. İkinci tip uygulamada ise port sayısının artması sonuçları olumsuz yönde etkilemiştir. Anten kazancı 7.73 dBi’dir, %88 verime ve 29 dB üzerinde izolasyon seviyesine sahiptir [8].

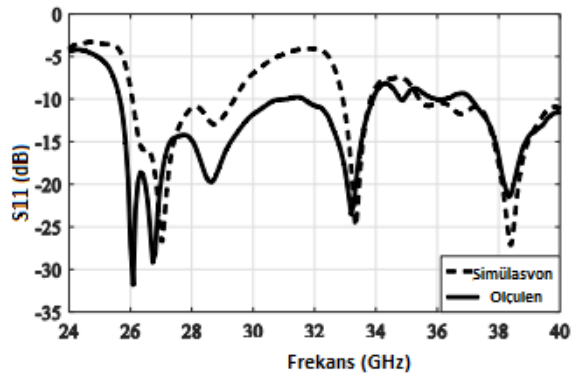


Şekil 1.3: 2x2 ve 60 GHz çalışma frekanslı dizi antenler [9].

Şekil 1.3’te görüldüğü üzere 2 tane 60 GHz çalışma frekansında düzlemsel antenler tasarlanmıştır. İlk ve ikinci antenin kazançları sırasıyla 13.2 dBi ve 10.3 dBi’dir. İlk anten noktadan noktaya iletimde maksimum kazanç elde etmekte, ikinci anten ise bir çok noktaya iletim yaparak maksimum ışın genişliğine ulaşmaktadır. Anten tasarımında Rogers /Duroid 5880 kullanılmıştır [9].



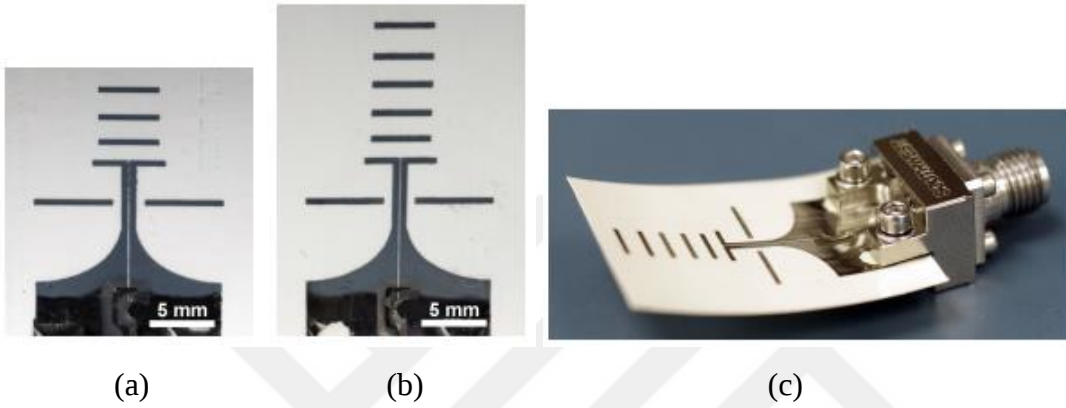
(a)



(b)

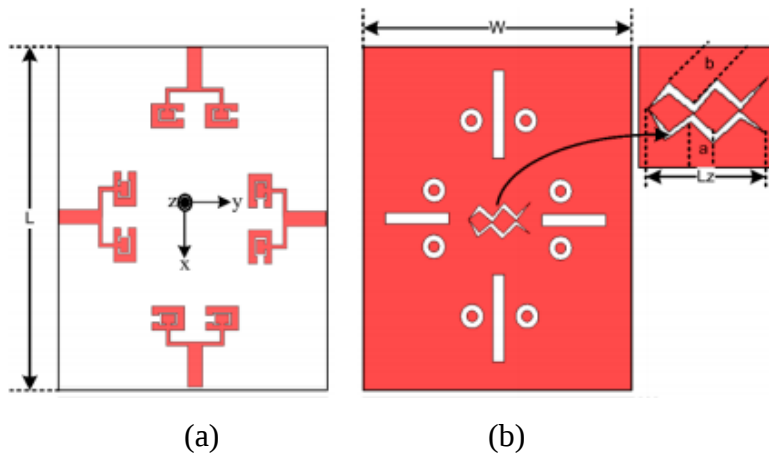
Şekil 1.4: Franklin dizi anten (a) Tasarımı (b) S11 grafiği [10].

Şekil 1.4'te verilen anten tasarımı Franklin dizi konsepti kullanılmıştır. Böylece birden fazla frekans bandında çalışabilen anten tasarımı amaçlanmıştır. Bu çalışmada standart yayılmayan saplamalar, rezonans frekansının saplamaların yayılma uzunluğu ile kontrol edildiği katlanmış dipol benzeri antenlere dönüştürülmüştür. Bu nedenle tasarlanan anten, her ikisi de farklı frekanslarda yayılan dikdörtgen yama ve bir saplamadan oluşmaktadır. Kazanç, 37-39 GHz frekans bandında %70.0 verimlilikle 13.5 dBi olarak ölçülmüştür [10].



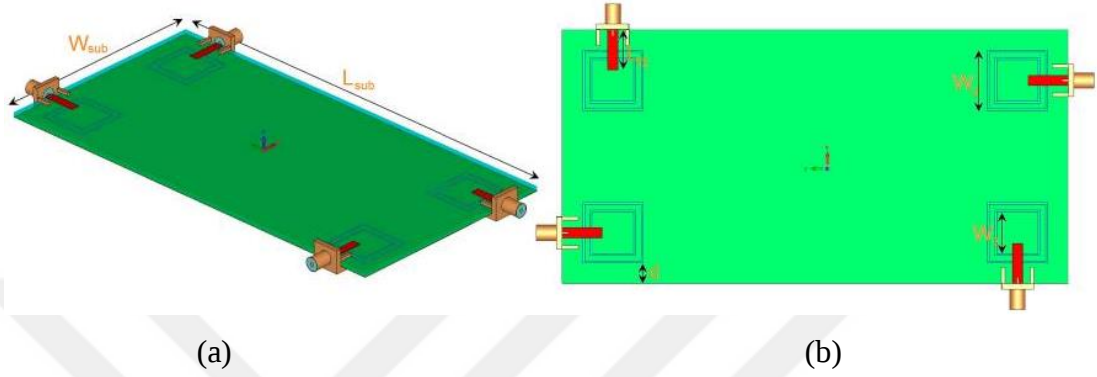
Şekil 1.5: Yagi-Uda Anten (a) 3 elementli (b) 5 elementli (c) esnek bükümlü alt tabaka [11].

Düşük maliyeti, ölçeklenebilirliği ve çevre dostu olması nedeniyle ivme kazanan yeni bir üretim tekniği mürekkep püskürtmeli baskıdır. Şekil 1.5'te mürekkep püskürtmeli baskı yöntemini kullanılarak 24.5 GHz frekans aralığında 8 dBi kazançlı bir Yagi-Uda antenin tasarımı yer almaktadır [11].



Şekil 1.6: 4 portlu MIMO anten tasarımı (a) üstten (b) alt tabaka görünümü [12].

Şekil 1.6’da 25.5-29.6 GHz frekans bant aralığında çalışan 4 portlu MIMO anten tasarımı görülmektedir. Anten alt tabakasında Rogers R04350B maddesi kullanılmıştır ve boyutları $30 \times 35 \times 0.76 \text{ mm}^3$ ‘tür. Anten performansını artırmak amacıyla alt tabakada yuvarlak, dikdörtgen ve zigzaglı oyuklar açılmıştır. Maksimum anten verimliliği %82’dir ve çalışma frekansında maksimum 8.3 dBi kazanç elde edilmiştir [12].



Şekil 1.7: Çok bantlı MIMO anten tasarımı (a) yandan (b) üstten görünümü [13].

Şekil 1.7’de 2.45-2.82 GHz, 3.35-4.00 GHz ve 4.93-5.73 GHz frekans aralıklarında çalışan, $75 \times 150 \text{ mm}^2$ boyutlarında 5G anten tasarımı verilmiştir. Anten tasarımında FR-4 kullanılmış ve 2 elementli kare döngü radyatörler 4 köşeye yerleştirilmiştir. Mikroşerit besleme hatları dört ayrı köşede kullanılarak yeterli bant genişliğinin sağlanması ve simetrik ışımanın sağlanması amaçlanmıştır. Anten maksimum %75 ışıma verimliliğine ve çalışma frekanslarında maksimum 6 dBi kazanca sahiptir [13].

Yapılan literatür araştırmasında 5G uygulamaları için dizi antenlerin ve MIMO antenlerin daha çok tercih edildiği görülmüştür. Genel olarak alt tabaka maddesi olarak Rogers /Duroid 5880 kullanılmıştır. 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında diğer yüksek frekanslara oranla yol kaybının ve dalga emiliminin az olması nedeniyle bu frekans aralıklarının daha çok tercih edildiği görülmüştür [14].

1.3 Tezin Literatüre Katkısı

5G uygulamaları için dizi ve MIMO anten tasarımlarının optimizasyonu ile anten verimliliği ile kazancının artırılması ve ışıma özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürden farklı yeni bir mikroşerit kafes dizi anten tasarımı gerçekleştirilerek optimum kazanç ve verimlilik elde etmek amacıyla anten üzerinde farklı geometriler tasarlanmıştır. 5G uygulamaları kapsamında sınırlı ölçüler içinde

gerçekleştirilen tasarımların parametre sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiş ve belirlenen ölçülerde en iyi kazanç verimlilik ve ışıma değerlerinin elde edilmesi için antenler üzerinde boyut ve geometrinin değiştirilmesi, kullanılan alt tabaka malzemesinin çeşitlendirilmesi gibi farklı optimizasyon yöntemleri uygulanmıştır. Yapılan optimizasyonla birlikte kazançta ve verimlilikte artış görülmüş ve ışıma diyagramındaki yan lobların azaldığı görülmüştür.



2. TELSİZ HABERLEŞME VE 5G TEKNOLOJİSİ

Haberleşme teknolojilerindeki gelişim ülkelerin sosyal ve ekonomik kalkınmalarında büyük rol oynar. Mobil teknolojilerin hızla yayılmaya başlamasıyla veri aktarımındaki hız ve kalite gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Bu sebeple hücresel teknolojilerin gelişmesi de kaçılmaz olmuştur.

1980'lerde ilk nesil mobil ağların (1G) piyasaya sürülmesinden bu yana, her on yılda bir haberleşme ağlarında yeni gelişmeler ortaya konulmuştur, her nesil bir önceki neslin problemlerini gidererek mobil şebeke kullanıcılarına yeni özellikler sunmuştur. Şekil 2.1'de haberleşme teknolojilerinde nesiller arası geçişte eklenen temel özellikler gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Mobil ağ teknolojisindeki kronolojik gelişim [15].

2.1 Haberleşme Teknolojilerindeki Gelişim

İlk nesil kablosuz telefon ses teknolojisi olan 1G, 1981'de öncelikle İskandinav ülkelerinde tanıtıldı. Başka bir standart olan Gelişmiş Cep Telefonu Sistemi (AMPS), Bell Labs tarafından geliştirilen ve ilk olarak 1983'te Kuzey Amerika'da tanıtılan 850

MHz hücresel bantta çalışan yalnızca ses için kullanılan bir analog cep telefonu sistemidir. Ses için Frekans Modülasyonu (FM) ve kontrol sinyali için Frekans Kaydırma Anahtarlama (FSK) kullanılmıştır [16]. Toplam ulaşılabilir hızı 2.4 Kbit/s'e kadar ulaşmaktadır. 1G sisteminin zayıf pil, büyük güç tüketimi, düşük ses kalitesi, taşınabilirlik açısından efektif olmayan büyük cihazların kullanılması ve güvenlikle ilgili dezavantajları vardır. Ayrıca ses kalitesinin düşük olması ve çağrı kesilmesinin sık yaşanması gibi dezavantajlar zamanla daha iyi bir teknolojinin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur [17].

1991 yılında Finlandiya'da ikinci nesil haberleşme sistemi kullanılmaya başlanmıştır ve 2G teknolojisinin 1G teknolojisinden en önemli farkı ses iletiminin analog sinyaller yerine dijital sinyaller üzerinden gerçekleşmesidir. Bir diğer fark ise 2G sisteminin SMS (Kısa Mesaj Hizmeti) metin, resim ve multimedya mesajlarını desteklemesidir. 2G'de teorik maksimum aktarım hızı 50 Kbit/s (uygulamada 40 Kbit/s) ve EDGE (GSM Evrimi İçin Geliştirilmiş Veri Hızları) ile teorik 1 Mbit/s (pratikte 500 Kbit /s) maksimum aktarım hızı vardır. 2G'nin, çoğu ülkede 2020 yılına kadar hizmetten çıkarılması planlanmasına rağmen, şu anda çoğu ülkede faaliyet göstermektedir. Video gibi yoğun veri transferi içeren uygulamalarda yetersiz kalmasından dolayı yeni nesil 3G teknolojisine yol açmıştır. Çizelge 2.1'de 1G ve 2G haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması verilmiştir [18].

Çizelge 2.1: 1G ve 2G teknolojilerinin karşılaştırılması.

Özellikler	1G	2G / 2.5G
Yaygınlaştırma Tarihi	1984	1999
Standartlar	MTS, AMTS, IMTS	GSM, GPRS, EDGE
Çoklu Erişim Teknikleri	FDMA	TDMA / CDMA
Veri Hızı	2.4 Kbit/s-14.4 Kbit/s	14.4 Kbit/s-40Kbit/s
Frekans Bandı	800 Mhz	900 Mhz – 1800 Mhz
Hizmetler	Ses hizmeti	Ses ve veri hizmeti
Sistem	Analog Haberleşme	Sayısal Haberleşme

3G teknolojisi genel olarak evrensel mobil haberleşme teknolojisi olarak bilinir. Bu teknoloji 2000 yılında tanıtıldı ve 2G teknolojisinden en önemli farkı hız 500 Kbit/s'tan 2Mbit/s'a yükseltildi. Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemleri (UMTS) ve Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA2000) 3G'nin ana standartları olarak

kabul edilir [19]. Bu haberleşme teknolojisiyle şebeke operatörleri verimli ağ kapasiteleri elde ederken kullanıcılarına görüntülü konuşma (VC), mobil televizyon ve GPS (Global Positioning System) gibi hizmetler sunmaktadır. 3G teknolojisinde 1.8 GHz ile 2.2 GHz arasında çoklu bant frekansları kullanılır [20]. 3G teknolojisiyle yüksek hızda paket erişimi gerektiren uygulamalara geçiş sağlanınca 3.5G teknolojisinin de temeli atılmış oldu. 3.5G teknolojisi 14.4 Mbp/s hızlarına ulaşarak 3G teknolojisinden yaklaşık 6 kat daha hızlı hale gelmiştir [20]. 3G ve 3.5G teknolojileri mobil veri kullanımının yaygınlaşmasını sağlamış ve kullanıcı alışkanlıklarını değiştirmiştir. Sesli iletişimin paket trafiği yerini görüntülü iletişimin veri trafiğine bırakmıştır ve bu durum da 4G teknolojisinin temelinin atılmıştır.

4G teknolojisi 2009 yılı sonunda tanıtıldı ve 2010 yılı içerisinde kullanılmaya başlandı. 3G teknolojisiyle kıyaslandığında yaklaşık olarak 10 kat daha yüksek transfer hızı sağlar [21]. Bu sayede mobil iletim hızları yerleşik modem hızlarıyla kıyaslanabilir hale geldi. Bu teknolojiyle bulut ve oyun sektörlerinde gelişim artmaya başladı. Bulut sistemler, akıllı ev sistemleri ve IoT teknolojisinin gelişmesi ile veri akışında dünya genelinde büyük artış gözlemlendi. Bu sebeple veri aktarımında yeni teknolojilerin doğması da kaçınılmaz oldu. Çizelge 2.2’de 3G ve 4G haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması verilmiştir [18].

Çizelge 2.2: 3G ve 4G teknolojilerinin karşılaştırılması.

Özellikler	3G	4G
Yaygınlaştırma Tarihi	2001	2009
Standartlar	WCDMA, UMTS, CMA20000	IPv6, LTE, WiMAX
Çoklu Erişim Teknikleri	CDMA, TDMA, FDMA	CDMA, OFDMA
Veri Hızı	3.1 Mbp/s	> 100 Mbp/s
Frekans Bandı	1800 Mhz- 2600 Mhz	2 Ghz- 8 Ghz
Hizmetler	Ses ve veri hizmeti	Ses, veri hizmeti ve gerçek zamanlı görüntü akışı
Sistem	Sayısal geniş bant haberleşme	IP tabanlı akıllı haberleşme

2.2 5. Nesil Telsiz Haberleşme Teknolojisi

İletişim teknolojisi son yirmi yılda kablosuz cihazların ve uygulamaların hızla artan talebine ayak uydurmak için olağanüstü bir ilerleme kaydetti. Doğal olarak 4G hücresel şebekelerinin bu kullanım artışını uzun vadede desteklemesi olası değil. 5G teknolojisi, mobil telekomünikasyon standartlarının bir sonraki seviyesini ifade etmekte ve gelecekteki kablosuz teknoloji ve uygulamalarda yenilikçi bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Daha fazla ağ kapasitesi, spektrumun verimli kullanımı, düşük gecikme süresi, daha fazla güvenilirlik ve daha hızlı veri iletimi 5G teknolojisi için önemli faktörlerdir. Ayrıca geleneksel mikrodalga bantlarındaki spektrum eksikliği nedeniyle, milimetre dalga bantları 5G hücresel ağlar için ek spektrum bandı olarak dikkat çekmektedir. Milimetre dalga bandı spektrumun 24-100 Ghz arasında uzanan kısma denk gelmektedir. Milimetre dalga bantları tarihsel olarak çoğunlukla savunma ve astronomi uygulamaları için kullanılmıştır. Bunun temel sebebi de bu frekans aralığında çalışan cihazların yüksek maliyetli olması ve bulunabilirliğinin az olmasıdır. Ancak milimetre dalga frekanslarında kayıpların düşük frekanslara göre daha az olması da önemli avantajlardan biridir.

5G teknolojisi geniş kapsama alanı sağlamak, tüm kullanım durumlarını ve önceki teknolojileri desteklemek için üç temel frekans aralığında çalışır. 1Ghz altı frekansların, özellikle yerleşim bölgelerindeki kapsama alanını desteklemesi ve IoT hizmetlerini desteklemeye yardımcı olacağı düşünülür. 1-6 Ghz frekans aralığının, yoğun kullanımların olduğu alanlardaki kapasite problemlerini çözeceği öngörülmektedir. 6Ghz üzerindeki frekanslar 5G için önerilen geniş bant hızların sağlanabileceği frekanslardır. Bu kısımda da asıl odak noktası 24Ghz üzerindeki bantlardır. 28Ghz bandında atmosferik kayıp ve yol kaybı az olduğundan daha iyi yayılma koşulları sağlanabilir. Bu sebeple de tez içerisinde referans alınan ve anten geliştirmesinin yapıldığı frekans 28Ghz'dir.

5G teknolojisi her biri farklı gereksinimi karşılayan 3 temel uygulama başlığı altında toplanabilir [22]. Geliştirilmiş Mobil Geniş Bant (eMBB), geniş kapsamda ve yüksek kapasitede veri iletimi sağlayan uygulamaları temsil eder. Kitlesel Makine Tipi Haberleşme (mMTC), nesnelerin interneti uygulamaları için kitlesel çoklu bağlantıyı eş zamanlı destekleyen uygulamaları temsil eder. Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli Haberleşme (uRLLC), veri iletiminde kaybın ve gecikmenin az olduğu

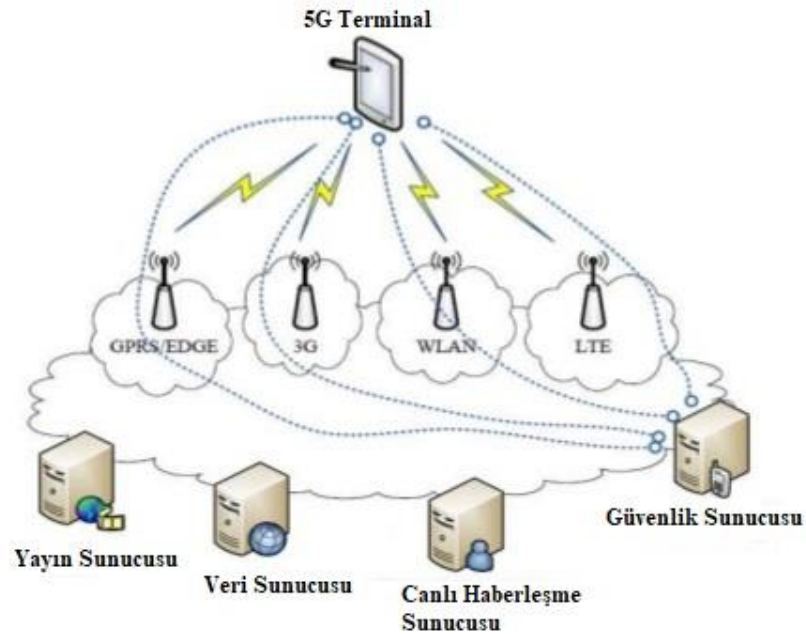
uygulamaları temsil eder. Bu uygulama türlerinin hepsinin aynı anda desteklenmesi 5G açısından önemlidir. Çizelge 2.3'te 4G ve 5G haberleşme teknolojilerinin performans karşılaştırması verilmiştir [23].

Çizelge 2.3: 4G ve 5G performans karşılaştırması.

Özellikler	4G	5G
Gecikme	10 ms	<1 ms
Veri Trafiği	7.2 Exabytes / ay	50 Exabyte / ay
En Yüksek Veri Hızı	1 Gb / s	20 Gb / s
Mevcut Spektrum	3 GHz	30 GHz
Bağlantı Yoğunluğu	100.000 bağlantı / km^2	1.000.000 bağlantı / km^2

2.3 5G Teknolojisinin Mimarisi

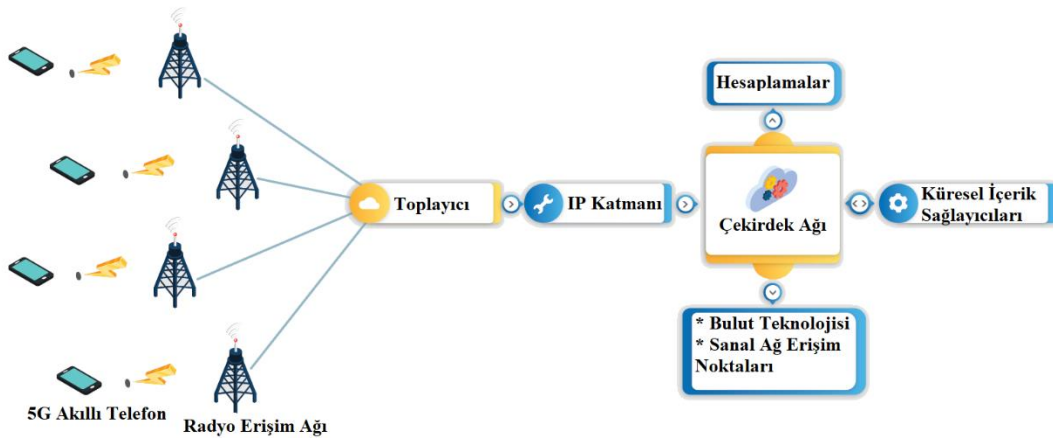
5G teknolojisiyle birlikte karşılaşılabilecek en büyük zorlukların başında işlem hacmi ve veri hızı gelmektedir. Bu zorluklar birçok teknoloji tarafından kontrol edilebilir olmakla beraber çözüme ulaşmak için asıl odaklanılması gereken nokta fiziksel katmandır. Çalışma frekansını belirlerken spektrumda az kullanılan bölgenin seçilmesi kapasiteyi ve verimliliği arttırmakta rol oynayan temel etkidir.



Şekil 2.2: 5G Teknolojisinin Temel Mimarisi [24].

Şekil 2.2’de 5G teknolojisinin IP tabanlı tasarlanmış temel mimari modeli gösterilmiştir. Sistem bir terminalden ve birbirinden bağımsız bir dizi radyo erişim teknolojilerinden oluşur. Birbirinden bağımsız tüm ağları tek bir platformda toplamak 5G teknolojisini önceki nesil haberleşme teknolojilerinden ayıran en büyük avantaj olarak görülebilir. Bu şekilde 60.000’den fazla bağlantıyı kolayca destekleyebilen bu teknoloji aynı zamanda diğer teknolojilerle kıyaslandığında maksimum sürede stabilizasyon sağlar [25].

5G teknolojisinin iki temel unsuru vardır Radyo Erişim Ağı (RAN) ve Çekirdek Ağ (CN) [26]. Radyo Erişim Ağı kablosuz cihazları terminale bağlamak amacıyla tasarlanmış sistemlerdir. Bu sistemde hücresel haberleşme modelindeki hücreler küçük parçalardan oluşan gruplara bölünmüştür ve milimetre dalga (mmWave) frekanslarında çalışan antenler kullanılır. Bu grupların terminalle haberleşmesinde aynı anda daha fazla veriyi gönderip almak amacıyla MIMO modelindeki antenler kullanılır. Bu sayede fazla sayıda kullanıcı aynı ağa bağlanarak bağlantı sürekliliğini sağlamış olur. Çekirdek Ağ, tüm mobil ses, veri ve internet bağlantılarını yöneten veri ağıdır [27]. 5G’yi önceki nesillerden ayıran teknolojik değişimlerin çoğu bu katmanda yönetilir. Bu katman kimlik doğrulama, güvenlik, oturum yönetimi ve cihazlardan gelen veri trafiğinin toplanması dahil tüm fonksiyonel işlemleri yürütür. 5G çekirdek katmanının 4G çekirdek katmanıyla en büyük farkı sanallaştırma ve bulut yazılım teknolojilerini yüksek seviyede kullanmasıdır. Şekil 2.3’te bu farkların da gösterildiği 5G haberleşmesi için katmanlı mimari gösterilmiştir.



Şekil 2.3: 5G Teknolojisi Katmanlı Mimari [28].

2.4 5G Uygulamaları ve Kullanım Alanları

2035 yılına kadar telekom operatörleri için kullanılan geniş bant donanım hizmet ve gelirlerinin %1 oranında artması planlanırken, 5G teknolojisinin mobil operatörler için yeni fırsatlar doğuracağı ve Telekom endüstrisinde %3 büyümeye sağlayacağı öngörülmektedir [29]. 5G teknolojisinin yeni iş fırsatlarıyla birlikte servis sağlayıcılarının gelirlerinin oldukça yüksek bir oranını oluşturması beklenmektedir.

5G teknolojisinin, veri tüketimindeki artışla birlikte telekomünikasyon endüstrisinin karşılaştığı teknik sorunlara çözüm olmaktadır.

Nesnelerin internetinin 5G ile desteklenmesiyle birlikte Endüstri 4.0 için de önemli ölçüde gelişme sağlanacaktır. Endüstri 4.0'daki gelişimle daha düşük maliyetle otonom sistemlerle birlikte uçtan uca üretim ve lojistik kolaylaşacaktır. Fabrikalarda kullanılan otonom makinelerdeki gecikme sürelerinin azalması, süreçlerin yüksek çözünürlüklü makinelerle kontrol edilmesi ve yüksek data kullanımı olan simülasyon programları ile üretimin uçtan uca tasarlanabilmesi 5G ile mümkün hale gelecektir.

5G saniyede 120 kare, kesintisiz, yüksek çözünürlüklü, dinamik video akışı sağlayabilir. 5G ile birlikte düşük gecikme süresi olan HD videolar yaygınlaşacak ve buna bağlı olarak artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamaları önem kazanıp yaygınlaşacaktır. HD sanal gerçeklik oyunları eğlence sektöründe popüler hale gelmekte ve birçok oyun şirketi VR tabanlı oyunlara yatırım yapmaktadır. Yüksek hızlı ve düşük gecikmeli 5G haberleşmesiyle birlikte daha iyi oyun deneyimi sunulabilecektir [30].

5G teknolojisi, halk otobüslerinden özel lojistik filolarına uzanan ulaşım endüstrisinde düşük gecikme süresi, yüksek kapasite ve güvenilirliği sayesinde, kontrol ve artırılmış görsellik sağlayarak ulaşım sektöründeki değişimlere yön verecektir. Şehirlerin günlük trafik akışlarının planlanmasında ve gerçek zamanlı olarak ulaşım kapasitesinin öngörülmesine olanak sağlayabilir. Ayrıca saha servis araçlarından lojistik araçlarına kadar aracın bulunduğu konum ve hızdan yakıt tüketimine kadar tutarlı veriler sağlanabilir, elde edilen veriler yorumlanarak taşımacılıkta optimizasyon güvenilir bir şekilde sağlanabilir. Sürücüler acil durumlarda gerçek zamanlı olarak yol durumu hakkında bilgi alabilir ve yön belirleyebilirler [31].

Otonom araçlarla birlikte araçtan araca haberleşmeyle iki araç arasında haberleşme sağlanabilir örnek olarak araçlar birbirinin sinyallerini algılayabilir. Araç ve altyapı sistemleri arasındaki haberleşmeyle birlikte araçların otomatik olarak trafik ışıkları gibi sistemleri sensörler yardımıyla algılaması sağlanabilir. Otonom araçlar yaygınlaştıkça otonom araç algoritmaları daha güvenli hale gelecektir. Otonom araçlardaki en önemli güvenlik unsurlarından biri de haberleşme sırasındaki gecikme süresinin oldukça kısa olmasıdır. Araçların veya sistemlerin haberleşmesi sırasında meydana gelebilecek en küçük aksaklık bile büyük kazalara sebep olabilmektedir. Bu nedenle haberleşme sırasında 5G teknolojisindeki gecikme süresinin mevcut teknolojilere oranla çok düşük olması ulaşım endüstrisinde 5G teknolojinin kullanımına olanak sağlamaktadır.

5G teknolojisi, hastanelerdeki geleneksel sağlık sistemlerini, hastalara uzaktan sağlık hizmetlerinin sağlanabildiği yeni teknoloji akıllı hastanelere dönüştürmeye yardımcı olacaktır. Daha yüksek ağ hızları, doktorların ağ kesintileri, bağlantı kesilmeleri, gecikme süresi endişesi olmadan hastalarla uzaktan etkileşime girmesini sağlayacaktır.

Hastalığın tanı ve tedavisi sırasında çekilen yüksek veri boyutlarındaki tıbbi görüntülerin transferi 5G teknolojisiyle birlikte hem daha hızlı hem de daha güvenilir olacaktır. Verilerin daha hızlı transfer edilebilmesi zamanında teşhis konulmasını sağlayarak, kontrol ve tedavi başlangıç sürelerinin azaltılmasını sağlayacaktır [32].

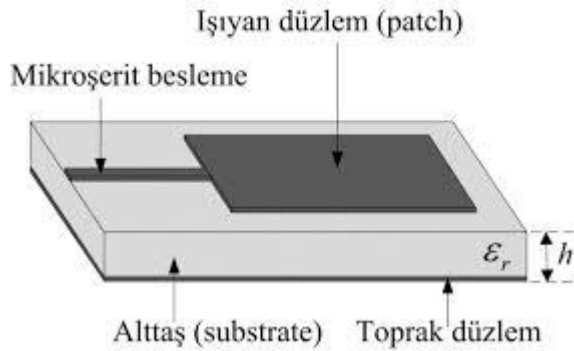
Sağlık sektöründe uzaktan izleme teknolojinin getirdiği birçok avantaja rağmen uygulamaların kullanımı ağın veri işleme kapasitesi ile sınırlı kalmaktadır. Güvenilmez bağlantılara sahip yavaş bir ağ, doktorların hastalarla sağlıklı bir iletişim kuramamasına ve özellikle acil bir durumda bunlar hakkında anlık verileri zamanında elde edememesine neden olabilir. Sağlık hizmeti sağlayıcıları 5G özellikli cihazlar sayesinde hastaları uzaktan izleyebilir ve kişiye özel sağlık hizmetleri için kullanılacak gerçek zamanlı veriler toplayarak doğru ve zamanında teşhis koyarak aksiyon alabilirler. Örneğin kalp krizi geçiren bir birey vücudunda bulunan 5G IoT sensörleri sayesinde ağ üzerinden en yakın hastaneye bir tehlike sinyali göndererek ve anlık hayati belirtilerini ileterek hızlı bir şekilde dönüş alabilir. Bu senaryolarda anlık veriler büyük önem taşıdığı için ağdaki herhangi bir gecikme büyük sorunlara neden olabilir [33].

5G teknolojisinin kullanımı ve yaygınlaşmasıyla birlikte sadece telekomünikasyon sektöründe mevcut gereksinimlerin karşılanması yanı sıra, eğlence, üretim, ulaşım, sağlık gibi birçok endüstride de önemli gelişmelerin sağlanması beklenmektedir.

3. 5G UYGULAMALARINDA KULLANILAN ANTEN ÇEŞİTLERİ

3.1 Mikroşerit Yama Anten

Mikroşerit antenler arada bir dielektrik malzeme ile iletken bir yamanın yalıtkan bir zemine monte edilmesiyle oluşan düşük profilli antenlerdir [34]. Bir tarafının yer düzlemi bir tarafının iletken olması sebebiyle devre sadece bir taraftan etkileşimden korunmak istenmektedir. Mikroşerit anten yapısının düzlemsel oluşu, imalatının kolay olması, düşük maliyetli olması ve küçük boyutları sebebiyle son yıllarda fazlasıyla tercih edilen bir anten türü olmuştur.

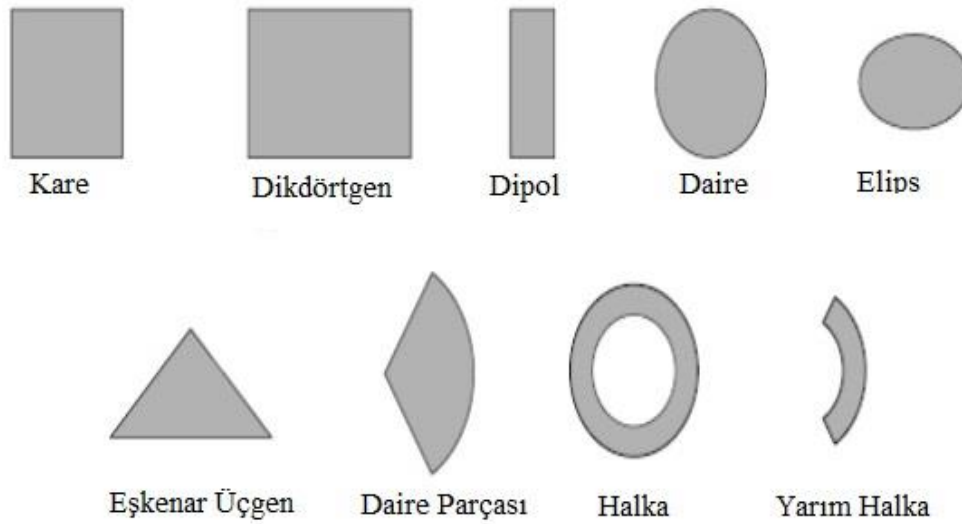


Şekil 3.1: Mikroşerit anten temel yapısı.

Mikroşerit antenlerin temel yapısı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Işıyan düzlem temel olarak dikdörtgen olmakla beraber farklı ışıma karakteristikleri elde etmek için farklı geometrik şekiller de kullanılabilir. Kullanılan her şeklin kendine özel ışıma frekansı ve karakteristiği bulunduğundan dolayı kullanılan geometri seçilirken ve optimizasyon yapılırken dikkat edilmelidir. Bir mikroşerit antenin diğer antenlerle kıyaslandığında genel özellikleri şunlardır; ince profil, geniş bant ve çok bantlı rezonans frekansına sahip olma ve şekil esnekliği. Temel bir yama anten 6-9 dBi

arasında yönlü kazanç sahibidir. Bu anten tipinde temel amaç küçük hacimlerde yüksek kazanç ve yüksek bant genişliği elde etmektir. Mikroşerit yama antende, iletkenin uyarılması ile yamanın kenarlarından yer düzlemine doğru bir elektromanyetik dalga hareketi olur. Yer düzleminden yansıyan dalgalar ise boşluğa yayılır. Anten ışıma yapması bu elektromanyetik dalga hareketlerine bağlıdır.

Şekil 3.2’de mikroşerit üzerinden kullanılan farklı geometrik şekillerdeki yama çeşitleri verilmiştir. Bunlardan analizi ve üretilmesi kolay olan dikdörtgen ve dipol en popüler olanlarıdır.



Şekil 3.2: Kullanılan farklı geometrideki yama şekilleri.

Dielektrik ara tabaka, alttaş, kullanılan malzemenin tipine göre 2.2 ile 12 arasında farklı geçirgenlik katsayılarına sahiptir. Bu tabakanın seçiminde temel faktörler; maliyet, dielektrik sabiti ve kalınlıktır. Bu tabakanın kalınlığı frekans bant genişliği ile doğru orantılıdır. Bu oran 3.1 eşitliğinde gösterilmiştir ve bu eşitsizlikteki λ_0 antenin boş uzaydaki dalga boyunu temsil eder. Çizelge 3.1’de çok kullanılan dielektrik tabakaların parametre değerleri gösterilmiştir.

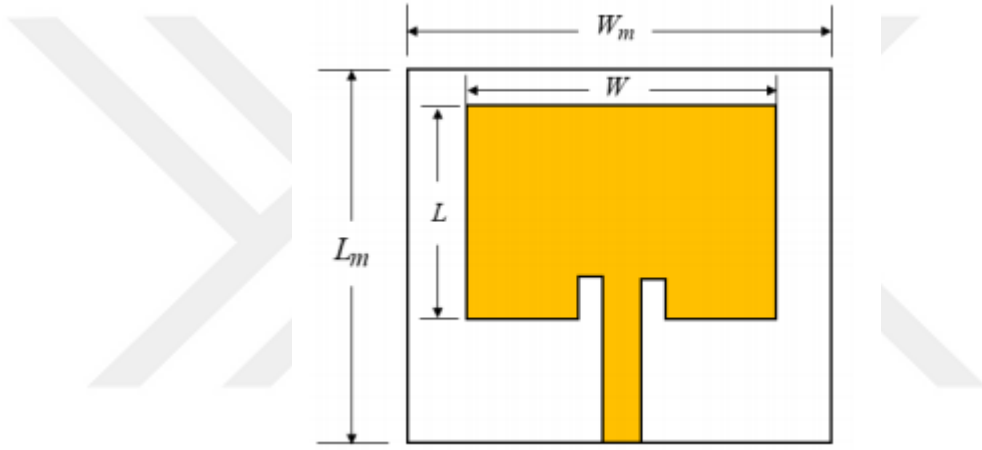
Çizelge 3.1: Çok kullanılan dielektrik özellikleri.

Özellikler	FR4	RT 5880 Duroid
Dielektrik Katsayısı, ϵ_r	4.4	2.2
Tanjant Kaybı, δ	0.02	0.0009

Çalışma Frekansı	< 6 GHz	8 Ghz – 40 Ghz
------------------	---------	----------------

$$0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0 \quad (3.1)$$

Toprak düzlem için kullanılan malzeme ile yamanın malzemesi benzerdir. Anten verimliliği, bu tabakanın büyütülmesiyle arttırılabilir ancak optimum seviyede sınırlandırılmalıdır. Temel mikroşerit yama anten için ışıma karakteristikleri hesaplanmış ve formülize edilmiştir. Anten boyutları çalışma frekansı ile ters orantılıdır. Geleneksel mikroşerit anten Şekil 3.3’de gösterilmiştir ve formüller bu şekil üzerinden anlatılmıştır.



Şekil 3.3: Geleneksel dikdörtgen mikroşerit anten.

Dikdörtgen mikroşerit anten yama genişliği W;

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{u_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.2)$$

denklemleriyle hesaplanabilir. Bu denklemde c ışık hızı, f_r rezonans frekansı, ϵ_0 boşluk dielektrik sabiti, u_0 boşluk manyetik geçirgenliğidir. Dikdörtgen mikroşerit anten yamanın uzunluğu L;

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (3.3)$$

denklemleriyle hesaplanabilir. Burada ϵ_{eff} efektif dielektrik sabitidir. ΔL denklem 3.4'te ve ϵ_{eff} denklem 3.5'te verilmiştir.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.4)$$

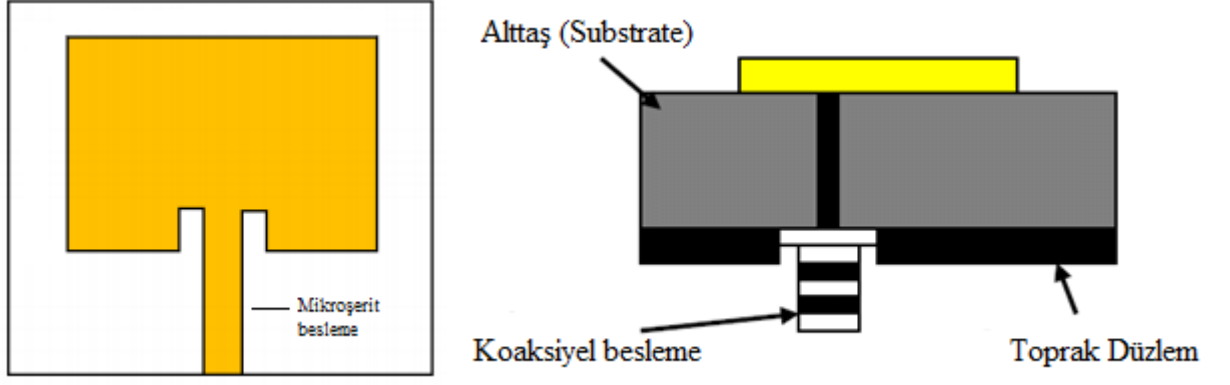
$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.5)$$

Denklem 3.6 ve 3.7'de de dielektrik malzemenin boyutları verilmiştir.

$$W_m = 6h + W \quad (3.6)$$

$$L_m = 6h + L \quad (3.7)$$

Mikroşerit antenleri beslemek için birçok farklı yöntem vardır ve bu yöntemlerin farklı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu yöntemler; koaksiyel besleme, mikroşerit besleme, yakınlık (elektromanyetik) bağlaşımlı mikroşerit besleme ve açıklık bağlaşımlı mikroşerit beslemedir. Bu yöntemler arasında en popüler olanları koaksiyel ve mikroşerit beslemedir. Koaksiyel beslemede konektör toprak düzlemin bulunduğu taraftan sabitlenir ve bir ucu yama bölgesine kadar ulaşır. Empedans uyumunu sağlayabilmek için 2 boyutlu eksenindeki pozisyon önemlidir. Mikroşerit beslemede besleme hattı ile mikroşerit hat yama ile aynı malzeme ve aynı kalınlıktadır. Bu da bu tekniğin en temel avantajıdır. Besleme şeridi antenin devamı durumundadır. Şekil 3.4'te iki besleme tekniği de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Mikroşerit ve koaksiyel besleme.

5.Nesil teknolojilerde mikroşerit anten kullanımında tercih edilen frekans 28 GHz'dir. Yeni nesil mobil iletişim sistemlerinde yüksek veri hızı elde etmek gerekir. Milimetre -dalga (mmWave) frekanslarındaki yüksek yol kaybı nedeniyle yüksek kazanç elde edilmelidir. Yüksek kazançlı anten, veri alışverişi için geniş bir kapsama alanı sağlar. Bu bağlamda, mikroşerit yama antenler iyi bir tercih olabilir. Bu durumda daha fazla kazanç elde edebilmek için mikroşerit antenlerden oluşan dizi antenler de tercih edilebilir.

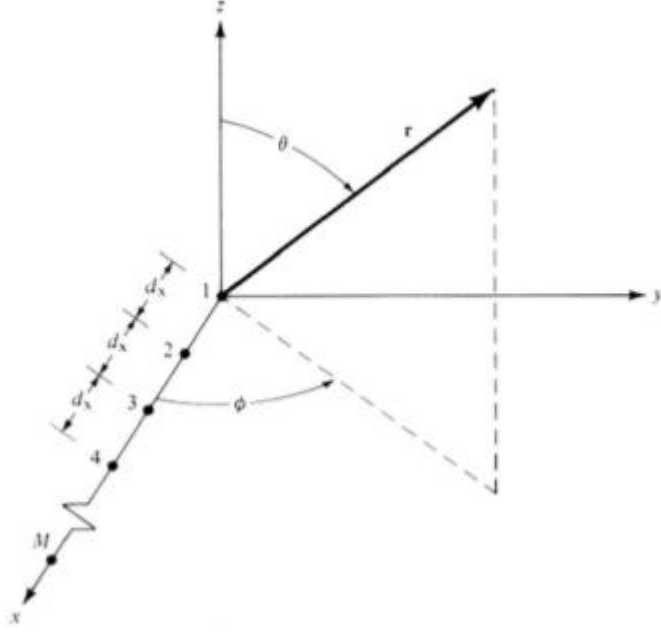
3.2 Dizi Anten

Mikroşerit antenler tek başlarına kullanılabildikleri gibi dizi anten olarak da tasarlanabilirler. Mikroşerit antenlerin temel sınırlamalarından biri dar frekans bant aralığında çalışmaları ve yüksek güce karşı dayanıksız olmalarıdır [35]. Bu sınırlamalar besleme yöntemleri, dielektrik malzemeler, toprak düzlem ve dizi konfigürasyonu yöntemleriyle en aza indirilebilir. Anten dizileri, bir anten sisteminin yönelticiliğini arttırmak, tek elemanlı antenle zor olacak diğer çeşitli işlevleri kazandırmak ve geliştirmek için kullanılabilir. Mikroşerit antenlerin radyasyon paterni genellikle çok geniştir ve yönlülükleri nispeten düşüktür. Bu problem, elemanın boyutunun büyütülmesi ve böylece yönlülüğün artırılması ile aşılabılır. Tek tek elemanların boyutunu değiştirmeden anteni büyütmenin başka bir yolu, yayılan elemanların dizi olarak bilinen geometrik bir konfigürasyonda birleştirilmesidir. Diziyi oluşturan elemanlar genellikle birbiriyle aydırlar ve herhangi bir biçimde olabilirler. Işıyan elemanların tasarımına, dizi geometrisine ve besleme ağına bağlı olarak dizi antenlerin ışıma karakteristikleri değişiklik gösterir.

Mikroşerit antenlerin en büyük avantajlarından birisi de dizi yapısının uygulanabilirliğinin basit olmasıdır. Dizi antenlerdeki önemli parametrelerden biri de besleme ağlarıdır. Besleme ağı her ne kadar iyi tasarlanmış olsa da mm dalga frekanslarındaki tasarımlarda bazı zorluklarla karşılaşmakta ve hat kayıpları yüksek frekanslarda artmaktadır. İletken, dielektrik ve radyasyon kayıpları, mm dalga mikroşerit anten dizilerindeki kayıpların ana bileşenleridir [34]. Yüksek verimli anten dizilerinin elde edilmesi için mikroşerit besleme ağındaki kayıpların en aza indirilmesi gerekir.

Bazı anten kaynakları izotropik elementler olarak görülebilir ve bu da her yöne eşit derecede yayıldıkları anlamına gelir [36]. Dizi antenler geometrik yapısına göre üç bölümde ele alınır; doğrusal dizi, düzlemsel dizi ve taralı dizi antenler. Doğrusal dizi antende anten elemanları tek boyutlu olarak dağıtılır ve düzgün bir ışıma karakteristiği için eşit uzaklıklarda konumlandırılır. Düzlemsel dizi antende bir kafes oluşturan iki boyuta yayılmış anten elemanlarından oluşur. Yayılan ışıma doğrusal dizi antende olduğu gibi her elemanın ışımını toplamıdır. Taralı dizi antenler iki ana gruba ayrılır; elektronik olarak taranan dizi (ESA) ve mekanik olarak taranan dizi (MSA). Elektronik taranan dizi anten de aktif (AESA) ve pasif (PESA) olmak üzere ikiye ayrılır.

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi doğrusal dizi anten, teorik olarak küresel bir koordinat sisteminde x eksenini boyunca d_x aralıklarıyla yerleştirilmiş anten elemanlarından oluşur. Diziyi oluşturan elemanları sayısı arttıkça ana hüzmeye daralır, yan lob seviyesi azalır ve tek periyot içerisindeki görünür lob sayısı artar [38].



Şekil 3.5: Doğrusal dizi anten geometrisi [37].

3.8 denkleminde iki elemanlı bir dizi antenin dizi faktörü verilmiştir. 3.9 denkleminde de dizi faktörünün normalize hali verilmiştir.

$$DF = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (3.8)$$

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

(3.9)

Diziyi oluşturan her bir elemanın elektrik alan ifadesi 3.10 denklemi ile verilmiştir.

$$\vec{E} = \hat{a}_\theta j n \frac{kl_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \cos(\theta), \quad kr \gg 1 \text{ (uzak alan)}$$

(3.10)

İki dizi elemanının arasında hiç kuplaj olmadığı düşünülürse, y-z ekseninde yayılan toplam elektrik alan 3.11 eşitliğinde verilmiştir. Eşitlikte η ortam özempedansını (120π), k faz sabitini ($2\pi/\lambda$), l_0 akım genliğini, l anten uzunluğunu ve β anten elemanları arasındaki akımın faz farkını ifade eder.

$$\vec{E}_t = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$\vec{E}_t = \hat{a}_\theta j n \frac{kl_0 l}{4\pi} \left(\frac{e^{-j(kr_1 - (\beta/2))}}{r_1} \cos \theta_1 + \frac{e^{-j(kr_1 + (\beta/2))}}{r_2} \cos \theta_2 \right)$$

(3.11)

3.11 eşitliği uzak alan için indirgendiğinde ve Şekil 3.4'teki gibi gösterilen bir yapıda 3.12'deki eşitlik elde edilir.

$$\vec{E}_t = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kl_0 l}{4\pi r} (\cos \theta) \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (3.12)$$

3.8, 3.10 ve 3.12 eşitlikleri birlikte düşünüldüğünde toplam elektriksel alan kısaca aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{E}_{toplama} = \vec{E}_{tek eleman} \times DF \quad (3.13)$$

Eğer dizi anten N elemandan oluşursa, A_n genlik olmak üzere dizinin dizi faktörü (DF);

$$DF = \sum_i^N A_n e^{j(n-1)\psi}, \psi = kd_n \cos \theta + \beta_n \quad (3.14)$$

Şeklinde hesaplanır. Faz değeri, antenler x ekseninde sıralanmış ise 3.15 denklemi ile, y ekseninde sıralanmış ise 3.16 denkleminde ile ve z ekseninde sıralanmış ise 3.17 denklemi ile hesaplanır [39].

$$\psi = kd \sin \theta \cos \phi \quad (3.15)$$

$$\psi = kd \sin \theta \sin \phi \quad (3.16)$$

$$\psi = kd \cos \theta \quad (3.17)$$

3.3 Çoklu Giriş – Çoklu Çıkış Anten

Çoklu giriş-çoklu çıkış anten teknolojisinden hem verici hem de alıcı modelinde birden fazla anten kullanılmaktadır. İletişim devresinin her iki ucundaki antenler hataları en aza indirmek ve veri hızını optimize etmek için birleştirilir. Dizi antende anten elemanları tek bir noktadan beslenirken çoklu giriş-çoklu çıkış anten teknolojisinde her bir anten elemanının beslemesi kendisine aittir. Bu durum da

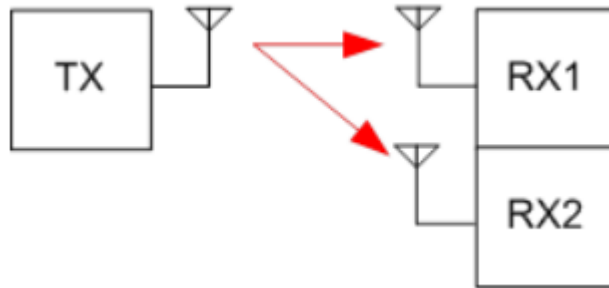
birden fazla sinyalin iletimini sağlayarak veri kaybını en aza indirir. Bu durum bazı avantajlar sağlar; zaman çeşitliliği kullanılarak yani sinyaller kanal kodlaması kullanılarak farklı zamanlarda iletilebilir, veri iletimi ortogonal frekans bölme (OFDM) gibi teknolojiler kullanılarak farklı frekanslarda sağlanabilir ve farklı konumlarda bulunan antenler kullanılarak mekan çeşitliliği sağlanabilir. Kullanılabilir yolların çeşitliliği, verici ve alıcı arasındaki doğrudan yolda parazit etki yaratacak nesnelerden kaçınılmasını sağlar.

Geniş bant sistemlerin bu sistemle entegrasyonu sistemin genel verimini arttıracaktır. Bu tür sistemlerde her anten çok daha geniş kanal bant genişliğine sahip olur ve sistemdeki birkaç antenin eşzamanlı çalışması verim arttırılabilir.

Genel olarak bir iletişim bağlantısının sağlamlığını ve bağlantının bilgi taşıma kapasitesini geliştirmek için alıcı-verici farklı permütasyonları vardır. Bunlar; tek giriş-tek çıkış (SISO), tek giriş-çok çıkış (SIMO), çok giriş-tek çıkış (MISO) ve MIMO olmak üzere 4 farklı varyasyondan oluşur.

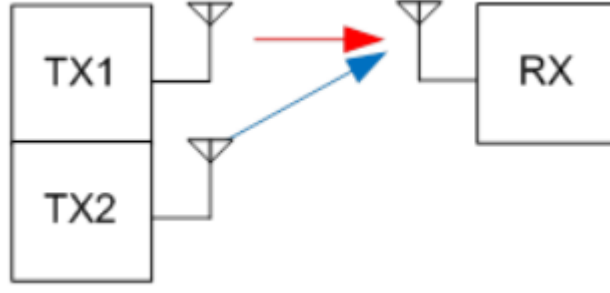


Şekil 3.6: Tek Girişli-Tek Çıkışlı Anten Konfigürasyonu.

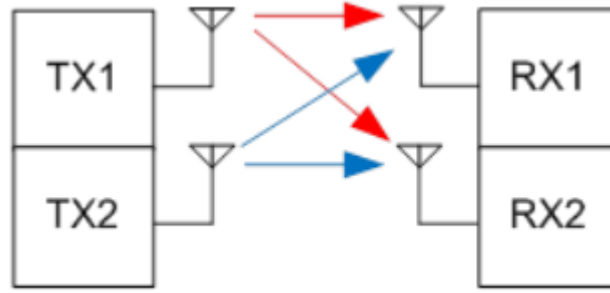


Şekil 3.7: Tek Girişli-Çok Çıkışlı Anten Konfigürasyonu.

Şekil 3.6’da gösterilen SISO sistemlerde herhangi bir sağlamlık veya kapasite iyileştirmesi sağlanamaz ve temel bir kablosuz iletişim bağlantısını temsil eder. Şekil 3.7’de gösterilen SIMO sistemlerde alıcı tarafında çeşitlilik ve ek sağlamlık sağlayan ancak kapasite iyileştirmesi olmayan yapılandırmalardır.



Şekil 3.8: Çok Girişli-Tek Çıkışlı Anten Konfigürasyonu.



Şekil 3.9: Çok Girişli-Çok Çıkışlı Anten Konfigürasyonu.

Şekil 3.8’de gösterilen çok girişli-tek çıkışlı sistemlerde alıcı anten için bağlantıların aynı sönümlenme özelliklerine sahip olmayacağı şekilde sinyalin farklı bir noktada kanala bağlanması için verici çeşitliliği sağlanır. Şekil 3.9’da sistemin temel mimarisi gösterilmektedir. Verici-Alıcı çifti saçılma açısından zengin bir ortamda çalıştığında, kanal matrisi tersine çevrilebilir hale gelir. Böylece alıcının çeşitli verici anten açıklıklarından iletilen tüm farklı sinyallerin kodunu çözerek çoğalma kazancı elde edebilir. Bir MIMO sistemin sağlayabileceği çeşitlilik ve çoğullama kazancı arasında bir denge vardır. Tipik bir MIMO verici / alıcı çifti, anlık kablosuz kanal koşullarına bağlı olarak çeşitlilik-çoğullama değişim eğrisi üzerinden otomatik olarak bir çalışma noktası bulur.

Kullanıcı sayısındaki artışla birlikte, sınırlı bant genişliği ve bu bant genişliğindeki kanal ayrımları yetersiz kalmaktadır. Aynı frekans bant genişliği içinde kullanıcı sayısı belirlenen sınırı aşamaz. Ayrıca ortak kanal girişimi, kullanıcı sayısındaki artışla doğru orantılı şekilde artar. Yüksek çözünürlüklü (HD) ve dörtlü yüksek çözünürlüklü (QHD) görüntülerin evriminden sonra, elde taşınır cihazların 3G ve 4G frekans kanallarında büyük hacimli görüntülerin taşınması oldukça zorlaştı. Bu nedenle yüksek bant genişliğine ve yüksek veri hızına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorunları aşmak için 5G teknolojisinde çoklu giriş-çok çıkış anten mimarisi

kullanılabilir [40]. Dizi antenlerin tek bir noktadan beslenmesi kapasite problemlerine yol açabilir. Bu nedenle frekans kanalı çoğu zaman dolu olabilir ve bu da veri aktarım hızında yavaşlığa sebep olabilir. MIMO teknolojisi ve milimetre-dalga frekanslarındaki iletişim 5G teknolojisi için önem faktörlerdir.



4. 5G UYGULAMALARI İÇİN ANTEN TASARIMI

Bu bölümde 5.Nesil haberleşme teknolojilerinde mobil ve baz istasyonları için kullanılabilecek farklı geometrilerde anten tasarımları yapılacaktır ve yapılan tasarımların CST anten simülasyon programı aracılığı ile anten parametreleri ölçülecektir. Literatürde dikkat edilen noktalara değinilip literatürdeki örnek değerlerle karşılaştırmalar yapıp anten geometrilerindeki iyileştirmelere yer verilecektir. Bu bölümde ele alınan antenler; çoklu giriş-çoklu çıkış, mikroşerit anten, mikroşerit dizi anten ve mikroşerit örgü dizi anten. Bu antenler üzerinde kazanç ve frekans bandı parametreleri temel olmak üzere farklı optimizasyonlar yapılmıştır ve grafiklerle birlikte tasarımları sunulmuştur. Çizelge 4.1’de 5.Nesil haberleşme teknolojilerinde kullanılan farklı anten geometrileri için anten parametrelerinin literatür karşılıkları verilmiştir [41].

Çizelge 4.1: Farklı anten geometrileri için tasarımlar kıyaslama.

Anten Geometrisi	Çalışma Frekansı (GHz)	Anten boyutları (mm^2)	Bant Genişliği (GHz)	Kazanç (dBi)
Örgü Dizi	28	15 x 15	2.2	12.66
Mikroşerit Dizi	28	55 x 70	-	< 17.1
Dikdörtgensel Mikroşerit	28	6 x 6	-	< 7.23
Yüzeyssel	28	-	-	< 8.2

Teoriden üretime kadar bir anten tasarımı üzerinde çalışmak için karmaşık adımlar mevcuttur. Anten geometrisine karar verirken dikkat edilmesi gereken temel unsurlar; ışıma karakteristiği, çalışma frekansı, bant genişliği ve kazancıdır. Ayrıca dikkat edilmesi gereken unsurlardan biri de besleme tekniğidir. Seçilen anten geometrisine uygun besleme tekniği belirlenmelidir. Bu parametreler belirlendikten sonra seçilen anten geometrisinde farklı optimizasyonlar yapılarak iyileştirmeler sağlanır. Çıkan sonuçlar literatürdeki anten performans kriterlerinden üstün değilse aynı aşamalar tekrarlanır.

4.1 Çoklu Giriş – Çoklu Çıkış (MIMO) Anten Tasarımı

Kablosuz cihazların artması, 3Ghz'in altındaki frekanslarda bant genişliğinde kısıtlamaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Haberleşme frekans spektrumu maksimum kullanım eşik sınırlarındadır. MIMO antenler, mevcut haberleşme sistemlerinde ek bant genişliği ve yüksek kapasite sorunlarını çözmek için uygun bir seçimdir. Geniş bant antenlerin MIMO sistemlere entegrasyonu sistemin genel verimini arttıracaktır. Bu tür sistemlerde her anten çok daha geniş bant genişliğinde ayrı ayrı hareket eder ve birkaç antenin eş zamanlı olarak çalışması sonunda yüksek verim sağlanır. Geniş bant mm-Dalga antenler yüksek kazançlı sade yapıda antenler olarak MIMO sistemlere entegrasyonu kolaydır.

Bu bölümde iki farklı anten geometrisi kullanılmıştır. İki geometri için de tekli yama anten tasarımları yapıldıktan sonra MIMO tasarıma getirilmiştir. Buradaki temel amaç antenin kazancını ve yönelticiliğini arttırmaktır. MIMO antenler 5.Nesil haberleşmede mobil baz istasyonlarında tercih edilmektedir. İki geometri için de anten parametrelerindeki değişimi göstermek amacıyla tekli tasarım dışında 4x1 tasarımın simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

İki farklı geometride de alt tabakada (substrate) dielektrik madde olarak Rogers RT 5880 kullanılmıştır. Seçilen dielektrik malzemenin parametreleri Çizelge 4.2'te gösterilmiştir [42].

Çizelge 4.2: Rogers RT 5880 Özellikleri.

Dielektrik katsayısı (ϵ_r)	Dağılma Katsayısı ($\tan\delta$)	Isıl Yayınma Katsayısı (ppm / C°)	Yoğunluk (gr / cm^3)	Manyetik Geçirgenlik Katsayısı (μ)
2.2	0.0009	-125	2.2	1

Dielektrik madde seçimi anten kazancı ve rezonans frekansı için önemli bir faktördür. Dielektrik katsayısının artması rezonans frekansını azaltır ve maksimum elektrik alanını sınırlandırır [43]. Böylece ışıma miktarı az olacağından kazanç da azalacaktır. Depolanan elektrik enerjisi arttığından bant genişliği de azalacaktır. Geleneksel mikroşerit anten tasarımlarında dielektrik malzeme olarak FR-4 kullanılırken, FR-4 özellikleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir, bahsedilen etmenlerden dolayı tasarımlarda Rogers RT 5880 kullanılmıştır.

Çizelge 4.3: FR-4 Özellikleri [44].

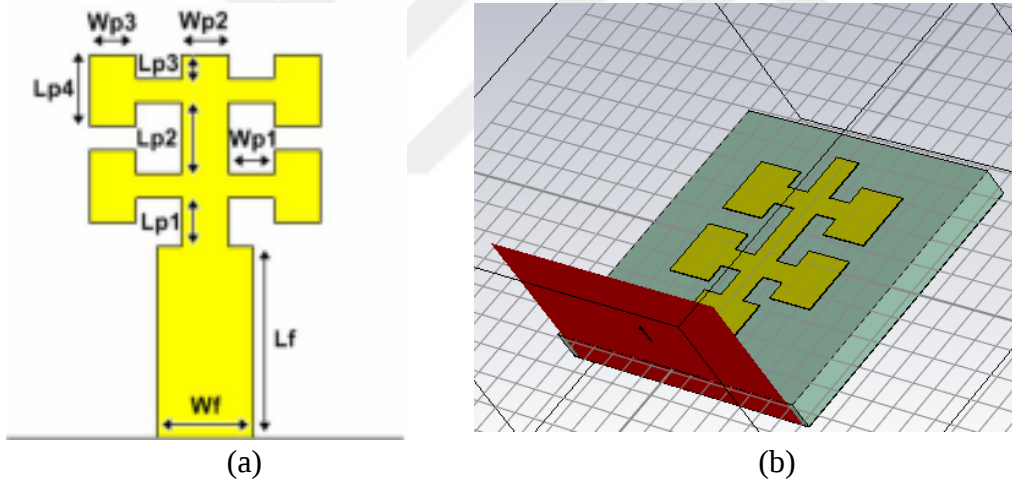
Dielektrik katsayısı (ϵ_r)	Dağılma Katsayısı ($\tan\delta$)	Isıl Yayınma Katsayısı (ppm / $^{\circ}C$)	Yoğunluk (gr / cm^3)	Manyetik Geçirgenlik Katsayısı (μ)
4.7	0.014	40-200	1.85	1

4.1.1 İlk Antenin Tasarımı

Tekli ve MIMO anten tasarımında ışıyan düzlemde verimli bir iletken olması sebebiyle bakır kullanılmıştır ve kalınlığı 0.035 mm olarak ayarlanmıştır. Alt tabakanın (substrate) kalınlığı 1 mm olarak ayarlanmıştır.

4.1.1.1 Tek Elemanlı Anten Tasarımı

İlk geometri için öncelikle 12 x 9.8 mm boyutlarında mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Işıma ve yüzeyi ve mikroşerit besleme hattından oluşmaktadır. Besleme yöntemi olarak dalga kılavuzu kullanılmıştır. 27-29 GHz frekans bandında alıcı ve verici olmak üzere MIMO anten elemanı olarak tasarlanmıştır.



Şekil 4.1: (a) Anten geometrisi (b) Antenin tasarımı.

Şekil 4.1’de antenin geometrisi ve tasarımı gösterilmiştir. Anten tasarımı CST simülasyon uygulaması kullanılmıştır. Işıma yüzeyi birbirine eşit dikdörtgensel yamaların birleştirilmesiyle oluşmuştur. Antenin geometrisi için boyutlar Çizelge 4.4’te verilmiştir.

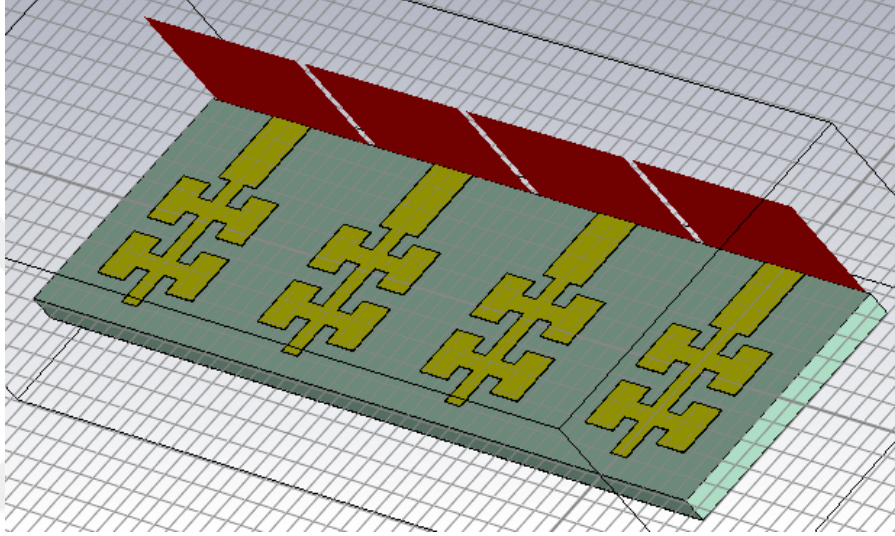
Tek elemanlı bu antenin tasarımı MIMO anten için temel oluşturmaktadır. Her iki antenin de simülasyon sonuçları 4.1.1.3’te karşılaştırmaları olarak yer almaktadır.

Çizelge 4.4: Anten Geometrisi (mm).

W_f	L_f	W_{p1}	l_{p1}	W_{p2}	L_{p2}	W_{p3}	L_{p3}	L_{p4}
2.8	3	1	1	1.06	2	2	1.5	2

4.1.1.2 4x1 Anten Tasarımı

Şekil 4.2’de 4 elemanlı MIMO anten tasarımını gösterilmektedir. MIMO anten tasarımında en büyük problem antenler arasındaki mesafenin belirlenmesidir. Bu mesafe optimizasyon çalışmaları sonucunda bulunmuştur ve 4.9 mm olarak ayarlanmıştır. Antenin alt tabakası (substrate) 48 x 9.8 mm olarak ayarlanmıştır.



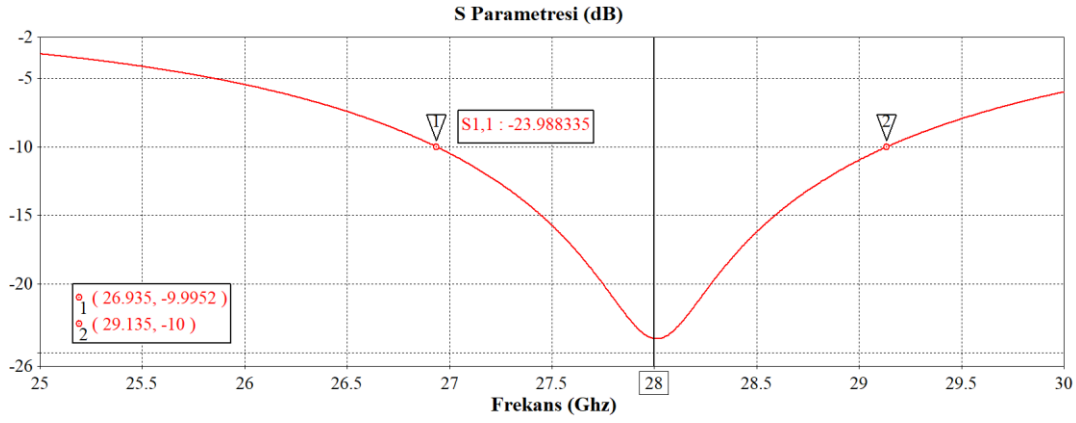
Şekil 4.2: Anten tasarımı.

4.1.1.3 Simülasyon Sonuçları

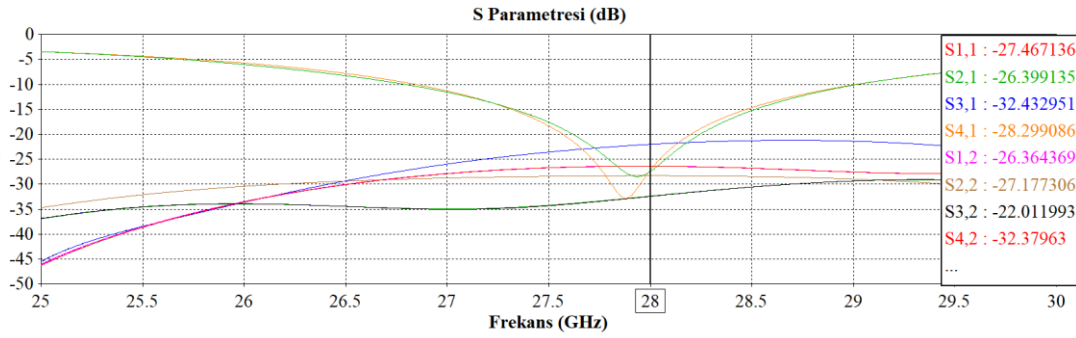
Bu bölümde ilgili anten geometrisine ilişkin tekli ve MIMO anten tasarımlarının karşılaştırmalı simülasyon sonuçları gösterilecektir. İncelenecek anten parametreleri; çalışma frekansı, yönelticilik ve kazanç, verimlilik, empedans ve VSWR değeri. Her anten parametresi için literatürdeki ortalama değerlerle de kıyaslama yapılmıştır.

Anten Çalışma Frekansı

Rezonans frekansı temel olarak antenin elektriksel boyutuna bağlıdır. Rezonans frekansını belirlemek için geri dönüş kaybı (S_{11}) dikkate alınır. Bant genişliği hesaplanırken ise S_{11} grafiğinde 10dB’den az geri dönüş kaybına sahip frekans aralıkları dikkate alınır.



(a)



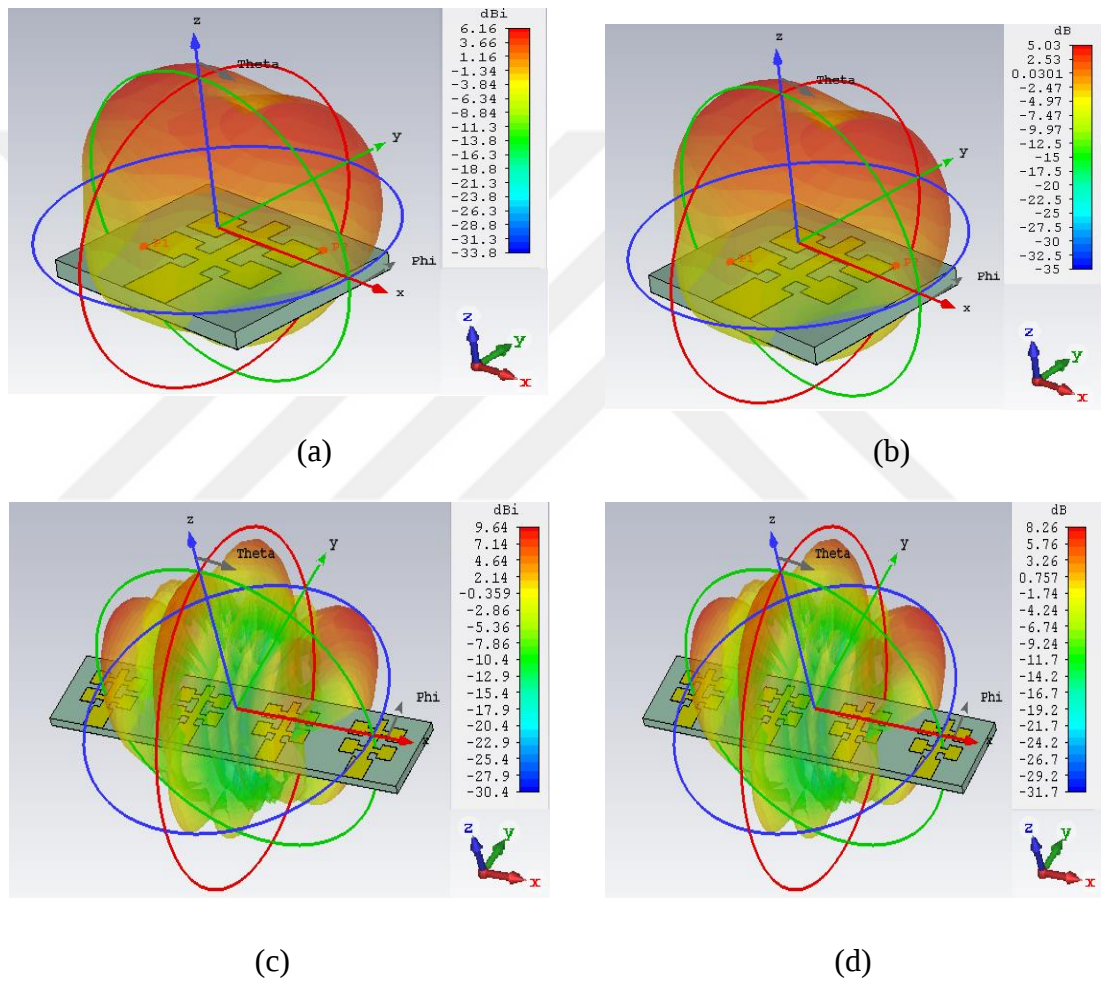
(b)

Şekil 4.3: (a) Tekli anten ve (b) 4x1 MIMO anten S_{11} parametresi.

Şekil 4.3'te tekli ve MIMO antenin S_{11} grafikleri verilmiştir. Tekli antenin 28 Ghz'teki geri dönüş kaybı -23.988 dB olarak ölçülmüştür. MIMO anten için geri dönüş kayıp grafiğinde antenler arasındaki mesafe optimize edildiğinden rezonans frekansında kayma olmadığı gözlenmiştir. Ancak geri dönüş kaybı kullanılan her anten elemanı için -27 dB civarlarında olup tekli antene göre artış göstermiştir. İlk grafikte de görüldüğü üzere tekli antenin bant genişliği 2.2 GHz civarındadır. Genel olarak MIMO anten grafiği incelendiğinde 4x1 tasarımdaki her anten için bant genişliğinde değişiklik gözlemlenmemiştir. MIMO anten S_{11} grafiğinde her antenin geri dönüş kaybının rezonans frekansında -20 dB altında olması antenler arasındaki mesafenin optimum seviyelerde olduğunu ispatlamaktadır. Literatürdeki 4x1 MIMO antenlerin bant genişliği 1.8 GHz civarında ve geri dönüş kaybı da -20 dB civarındadır. Kıyaslandığında bant genişliğindeki ortalama 500 MHz artış literatüre göre bu parametre için iyileştirme olarak kabul edilir.

Anten Yöneltiliği ve Kazancı

28 Ghz rezonans frekansına sahip K-Bant antenin dalgaboyu ortalama 10 mm'dir. Bu dalgaboyunda literatürdeki antenlerde ortalama kazanç 5dB'dan az olarak gözlemlenmiştir. MIMO özelinde ise ortalama kazanç port sayısına göre değişmekle birlikte 4x1 anten için 8.2 dBi ile 9.6 dBi arasında gözlemlendi. Şekil 4.4'te grafiklerde görüldüğü üzere tekli anten için elde edilen kazanç 5.03 dBi ve 4x1 MIMO anten için elde edilen kazanç 8.257 dBi. Literatürdeki antenlerle kıyaslandığında her iki anten tasarımı için de iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.4: Tekli antende yöneltililik (a) ve kazanç (b) ve 4x1 MIMO antende yöneltililik (c) ve kazanç (d) değerleri.

MIMO anten olarak 4x1 anten simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Tekli antenle arasındaki kazanç farkı yaklaşık 3.23 dBi çıkmıştır. Buradan yola çıkarak MIMO tasarımıdaki anten sayısı orantılı bir şekilde artırılarak daha yüksek kazançlar elde edilebilir. Mobil baz istasyonlarında bu MIMO anten geometrisinde boyut sınırlaması uygun olduğu sınırlamalarda anten sayısı artırılarak kullanılabilir.

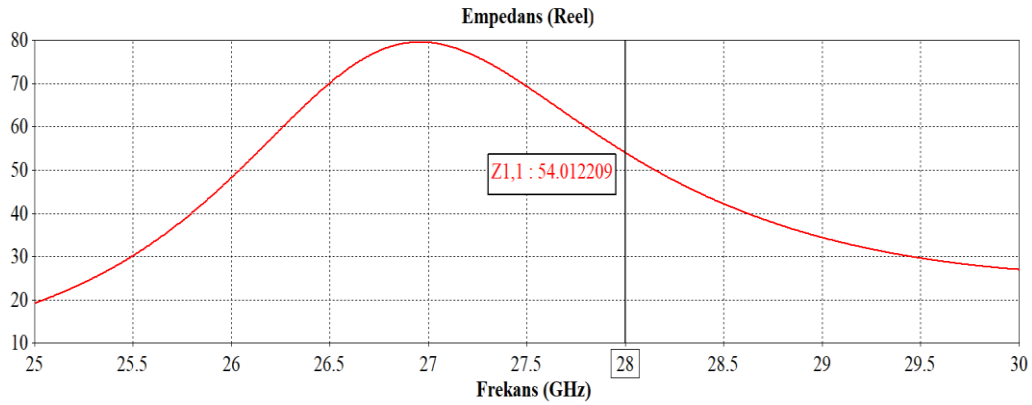
Anten Verimliliği

Anten yönelticilik değeri ve kazancı arasındaki fark anten verimliliğini ifade eder. Mikroşerit yama anten tasarımlarında verimliliğin yüksek olduğu görülmektedir. Tekli anten tasarımında antenin verimliliği $G(\text{dB}) = D(\text{dB}) + \eta(\text{dB})$ eşitliğinden -1.33 dB ve 4x1 MIMO antenin verimliliği de -1.384 dB olarak hesaplanabilir.

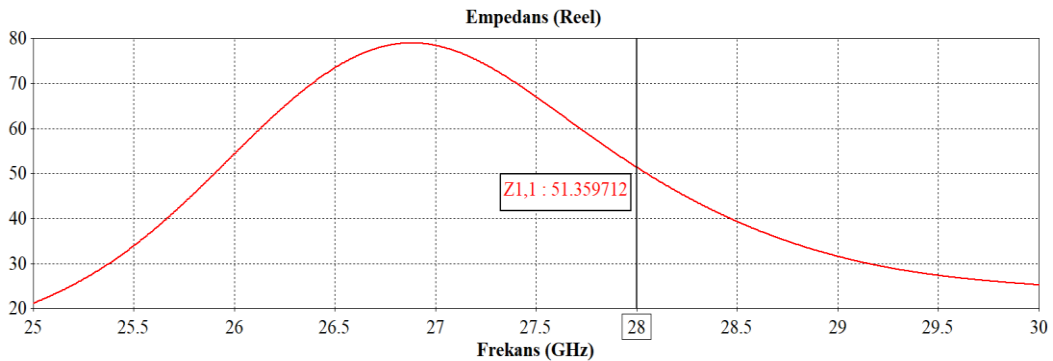
Anten verimliliği çalışma frekansı ile doğru orantılı ve bant genişliğiyle ters orantılıdır. Yani antenlerin bant genişliğini arttırmaya yönelik optimizasyonlar yapıldığında verimliliğin düştüğü gözlemlenmiştir. 5G anten tasarımlarında istenen yüksek bant genişliği için anten verimliliğinden az da olsa vazgeçilmek zorunda kalınmıştır.

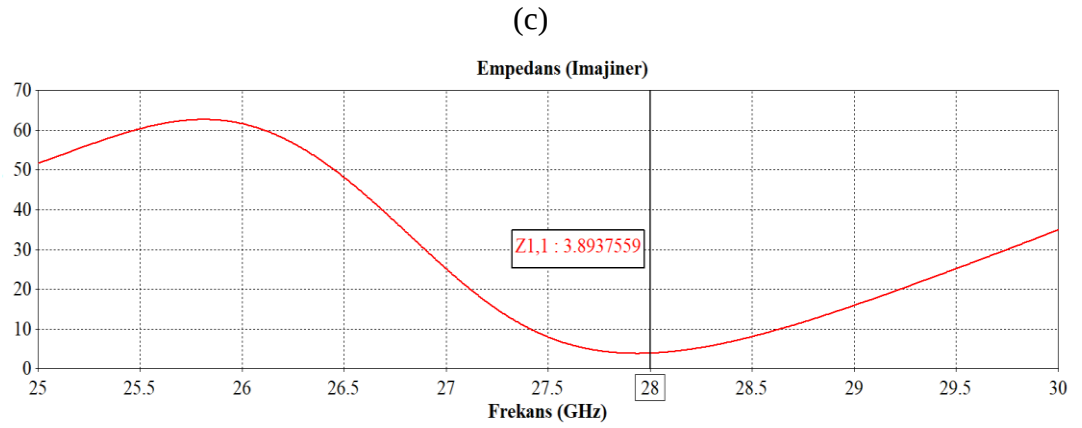
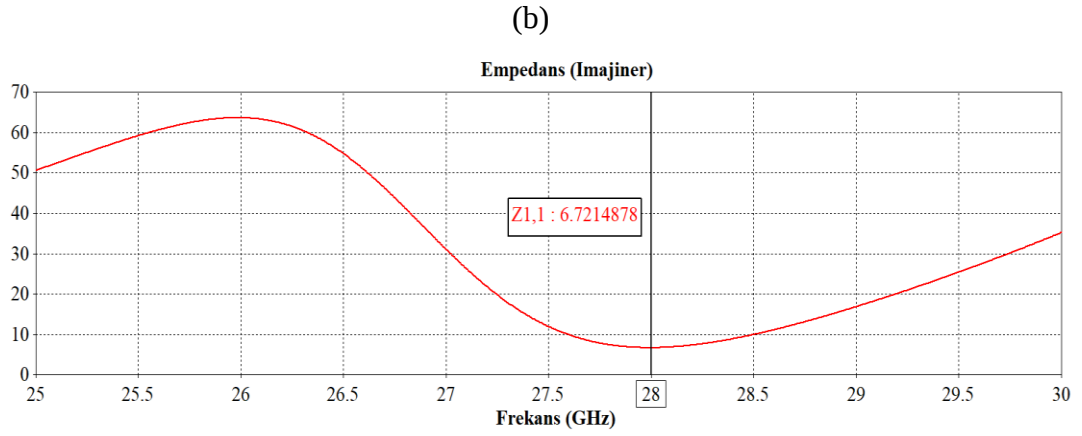
Anten Empedansı

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere antenlerin empedans ölçümlerinde tekli anten için reel kısım yaklaşık 54 Ω , imajiner kısım yaklaşık 7 Ω ve 4x1 anten için reel kısım yaklaşık 51 Ω ve imajiner kısım ise yaklaşık 3 Ω olarak elde edilmiştir. MIMO antene geçişte empedans uyumunda iyileşme gözlemlendiği belirlenmiştir.



(a)





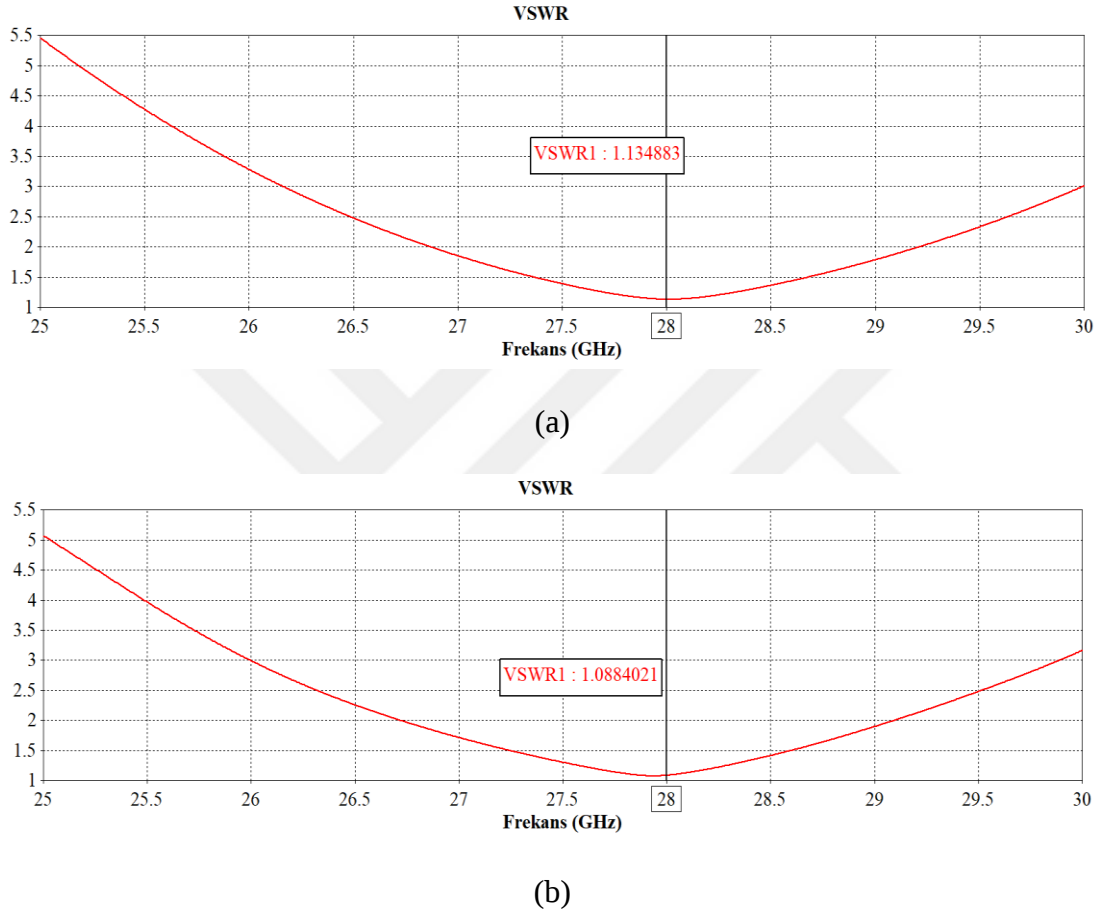
Şekil 4.5: (a), (c) Tekli antenin ve (b), (d) 4x1 MIMO antenin reel ve imajiner empedans değerleri.

Referans empedans değerinin reel kısmı 50Ω ve imajiner kısmı 0Ω olduğuna göre elde edilen simülasyon sonuçları uygun görülmektedir. Antenlerin gerçekleştirilmesi yapıldığında empedans değerleri sınırlamalar arasında kalmalıdır. Çıkan simülasyon sonuçları bu sınırlamaların içinde kabul edilir. Ayrıca tekli antenden MIMO antene geçişte empedans değerlerindeki iyileşme MIMO'daki eleman sayısı daha fazla arttırılırsa daha iyi sonuçlar elde edileceğini de göstermektedir.

Duran Dalga Voltaj Oranı (VSWR Değeri)

VSWR iletim hattı ile yük arasındaki empedans farkından doğan geri yansılardan kaynaklı oluşur. Antenden yansıyan güç sinyallerinin antenden ışıyan güç sinyalleriyle kesişmesi sonucunda duran dalga oluşur. Oluşan duran dalganın maksimum genliğinin minimum genliğine oranı VSWR olarak isimlendirilir. VSWR değeri her zaman 1'den eşit veya büyük bir değerdir. VSWR'ın 1'e eşit olması gerçekleştirilebilir bir sonuç olmamakla birlikte uyumsuzluk kaybının olmadığını

gösterir. Şekil 4.6’da görüldüğü üzere tekli antenin VSWR değeri 1.13 ve 4x1 antenin değeri de 1.08 olarak gözlemlenmiştir. Sonuçlardan belli olduğu üzere MIMO anten tasarımında VSWR oranında iyileşme görülmektedir. Aynı şekilde MIMO anten elemanı sayısı arttırıldıkça VSWR oranında orantılı bir iyileşme gözlemlenecektir. Bu değerlerin 1’e yakın olması iletim hattı uyumsuzluklarının düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.6: Tekli antenin (a) ve 4x1 antenin (b) VSWR değeri.

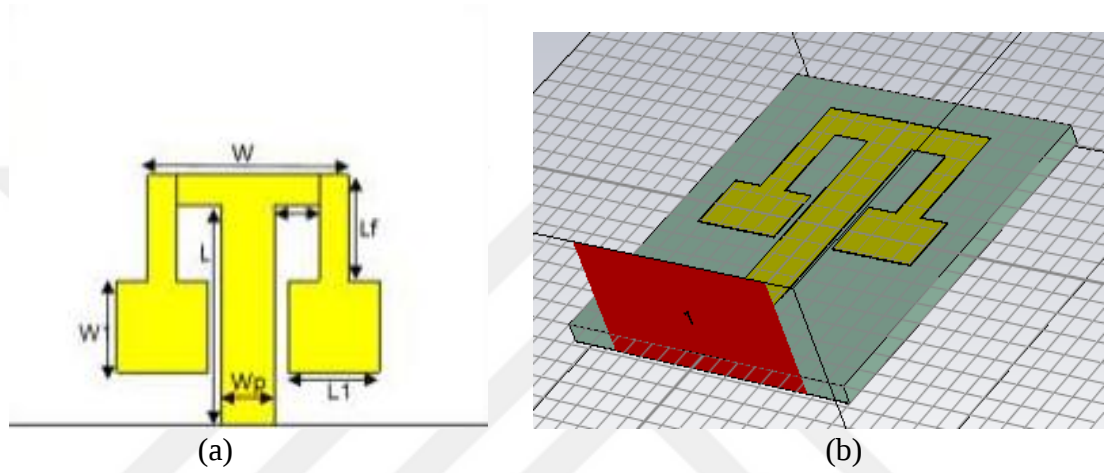
4.1.2 İkinci Antenin Tasarımı

Tekli ve MIMO anten tasarımda ışıyan düzlem için kullanılan malzeme, kalınlık ve alt tabakanın kalınlığı değişmemiştir. Sadece ışıyan düzlemin geometrisinde değişiklik yapılarak anten parametrelerinde iyileşme amaçlanmıştır. Her iki anten de MIMO anten tasarımı olup amacı mobil baz istasyonları için kullanılabilecek maksimum kazanç ve bant genişliği sağlayan geometriyi bulmaktır.

İkinci geometriye geçişte anten boyutları artarken daha yüksek kazanç sağlanması amaçlanmıştır. Bu sebeple yüksek kazanç elde etmek amacıyla teorik olarak bant genişliğinin daralması makul görülmüştür.

4.1.2.1 Tek Elemanlı Anten Tasarımı

Bu geometride 16 x 16 mm boyutlarında mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Anten için kullanılan elemanların tipleri ve besleme hattı ilk geometri ile aynı olup 27-29 GHz frekans bandında alıcı ve verici olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır.



Şekil 4.7: (a) Anten geometrisi (b) Antenin tasarımı.

Şekil 4.7’de antenin geometrisi ve tasarımı gösterilmiştir. Işıma yüzeyi iki eşit dikdörtgensel yamanın mikroşerit beslemeyle birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Antenin geometrisi için boyutlar Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5: Anten Geometrisi (mm).

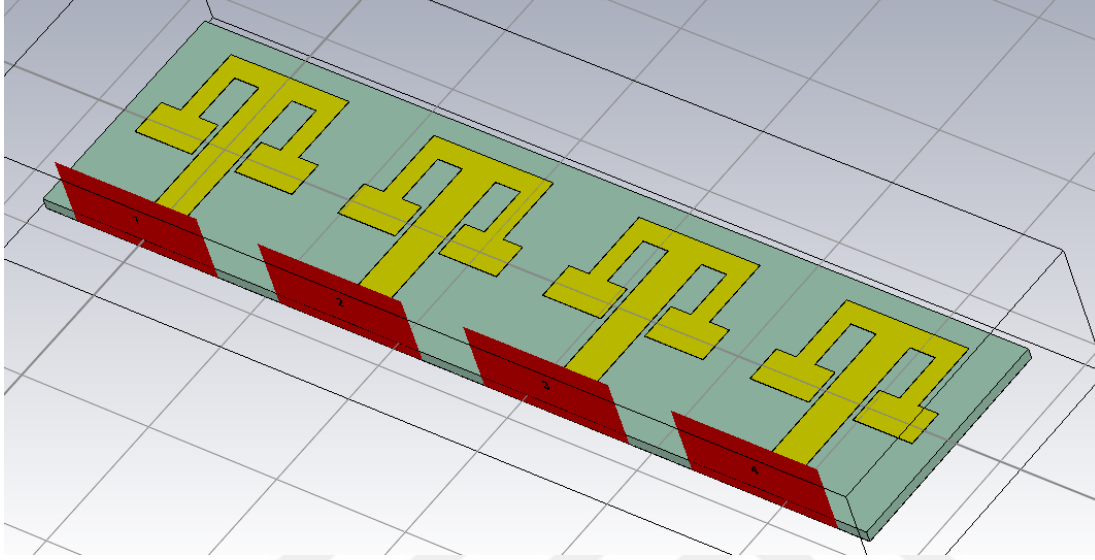
W	L	W _p	W _f	L _f	W ₁	L ₁
9.34	13	2.6	1.45	5	2.6	4.5

Tek elemanlı bu anten geometrisi MIMO anten için temel oluşturmaktadır. MIMO anten tasarımında kullanılan bu anten elemanları aralarında hesaplanmış boşluklar bırakılarak birleştirilecektir.

4.1.2.2 4x1 Anten Tasarımı

Şekil 4.8’de 4 elemanlı MIMO anten tasarımı gösterilmektedir. Antenler arası mesafe optimizasyon sonucunda 3.7 mm olarak ayarlanmıştır. Antenin alt tabakası (substrate) 65 x 16 mm olarak ayarlanmıştır. İlk anten (4.1.1.2) geometrisiyle

kıyaslandığında yüzey alanı yaklaşık 2.5 katına çıkmıştır. Bu durum antenlerin kullanım yerlerindeki sınırlandırmalarda göz ardı edilmemelidir. Tez kapsamında 5.Nesil anten teknolojilerinde farklı geometri ve farklı yaklaşımlardaki antenlerin kazanç iyileştirmelerine yer verildiğinden ve antenin boyutları büyük olmadığından dolayı bu fark göz ardı edilebilir.



Şekil 4.8: Anten tasarımı.

4.1.2.3 Simülasyon Sonuçları

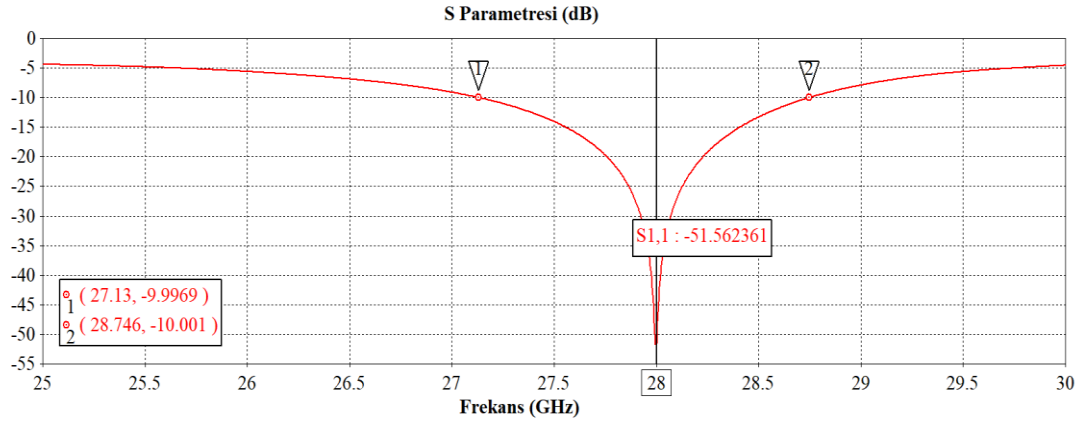
İlgili anten geometrisine ilişkin tekli ve MIMO tasarımların karşılaştırmalı simülasyon sonuçları bu bölümde gösterilmiştir. Sırasıyla incelenecek anten parametreleri; çalışma frekansı, yönelticilik ve kazanç, verimlilik, empedans ve VSWR değeri. Ayrıca her anten parametresi için de literatür kıyaslaması yapılmıştır. En son bölümde her iki geometri için de simülasyon sonuçlarına birlikte yer verileceğinden ve istenen amaca ne derece ulaşıldığı yer alacağından bu bölümde iki geometri kıyaslanmayacaktır.

Anten Çalışma Frekansı

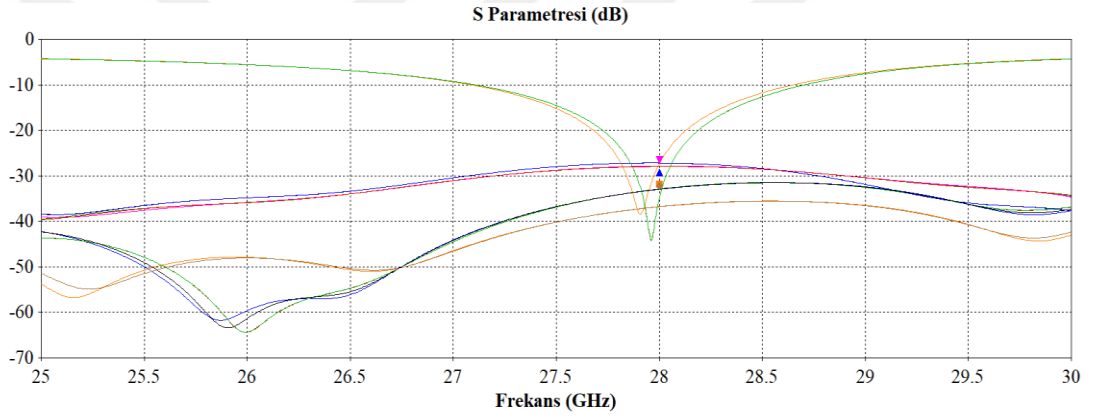
Şekil 4.9’da tekli ve MIMO antenin S_{11} grafikleri verilmiştir. Tekli antenin 28 Ghz’teki geri dönüş kaybı -51.56 dB olarak ölçülmüştür. MIMO anten için geri dönüş kaybı her anten elemanı için -45 dB civarındadır.

İlk grafikte görüldüğü üzere antenin bant genişliği 1.62 GHz civarındadır. İkinci grafikte MIMO anten için bant genişliğinin yine 1.62 GHz civarında olduğu ve

değişmediği gözlemlenmiştir. Literatürdeki antenlerin ortalama 1.8 GHz bant genişliğinde olduğu bir önceki anten tasarımında belirtilmişti.



(a)



(b)

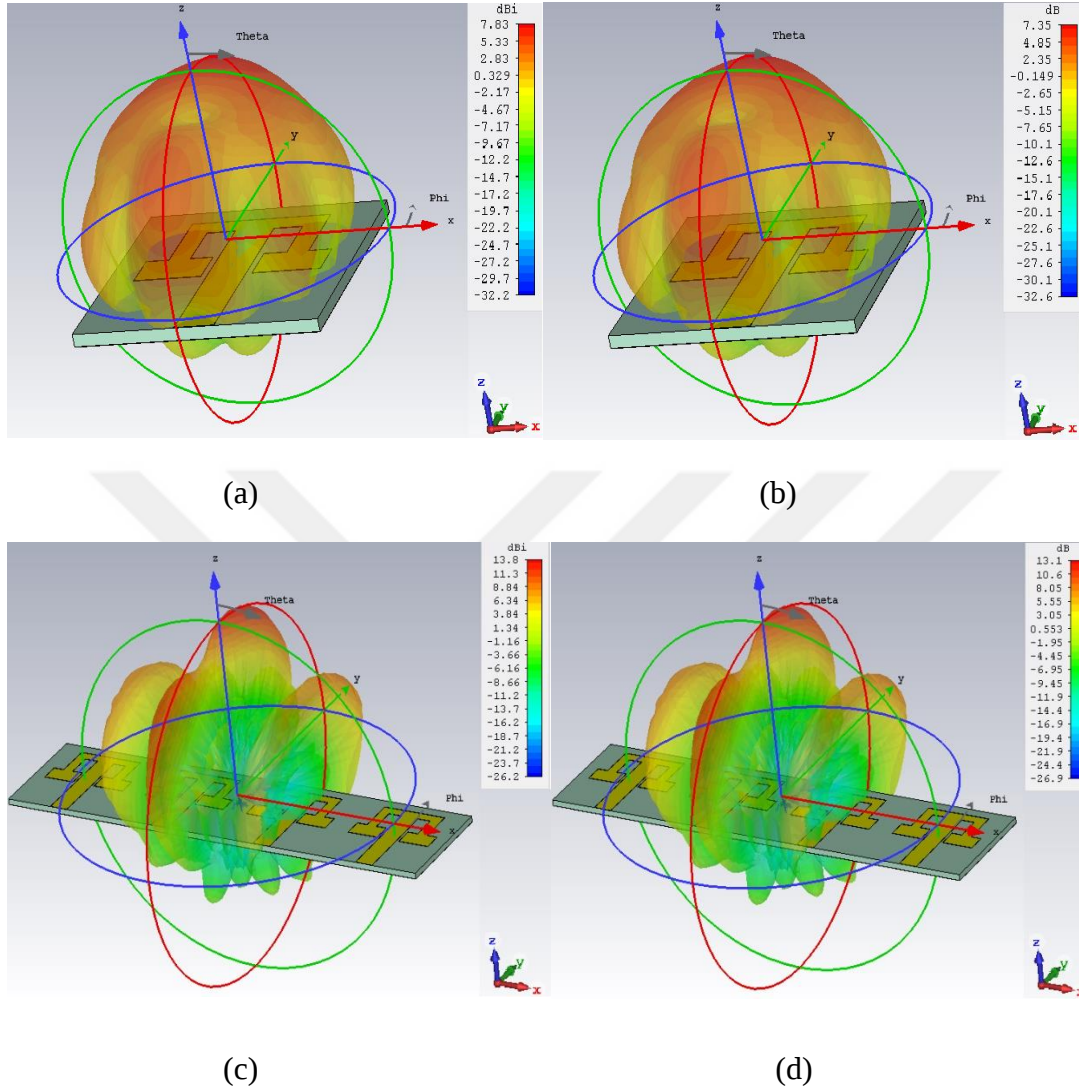
Şekil 4.9: (a) Tekli anten ve (b) 4x1 MIMO anten S11 parametresi.

Literatürle kıyaslandığında bant genişliğinde azalma görülmektedir. Bu geometride temel amaç kazancı arttırmak olduğundan ve bu artış da teorik olarak bant genişliğini azalttığından bu fark kabul edilebilir bir farktır. Ayrıca 4x1 MIMO anten için her anten elemanının geri dönüş kaybı -20 dB altında olduğundan antenler arasındaki mesafede de bir sorun görülmemektedir.

Anten Yöneltiliği ve Kazancı

Şekil 4.10'daki grafiklerde tekli anten için elde edilen kazancın 7.35 dB ve 4x1 MIMO anten için elde edilen kazancın 13.1 dB olduğu görülmektedir. Literatürdeki antenlerin kazanç ortalamaları bir önceki anten geometrisinde verilmiştir.

Literatürdeki ortalamalarla kıyaslandığında tekli anten için 2.35 dB ve 4x1 MIMO anten için yaklaşık 4 dB daha fazla kazanç sağlanmıştır.



Şekil 4.10: Tekli antende yönleticilik (a) ve kazanç (b) ve 4x1 MIMO antende yönleticilik (c) ve kazanç (d) değerleri.

Tekli antenden MIMO anten geçişte kazanç yaklaşık olarak 75% artış göstermiştir. Literatürdeki ortalamalara göre de ikinci geometride kazanç oldukça yüksektir. Tasarlanan ilk geometriden ikinci geometriye geçişte temel amaç kazanç arttırmak olduğundan simülasyon sonuçları baz alındığında varsayılan geometri fazlasıyla elverişlidir.

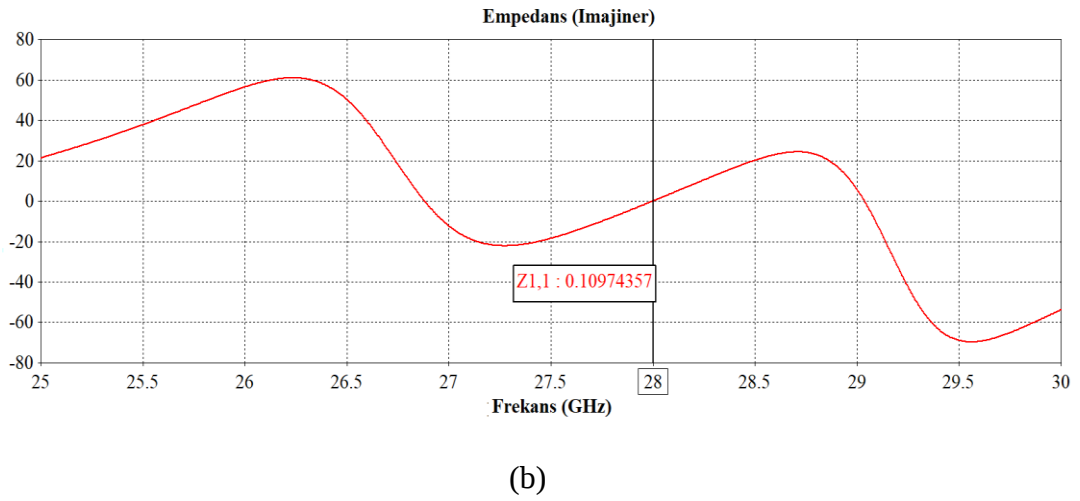
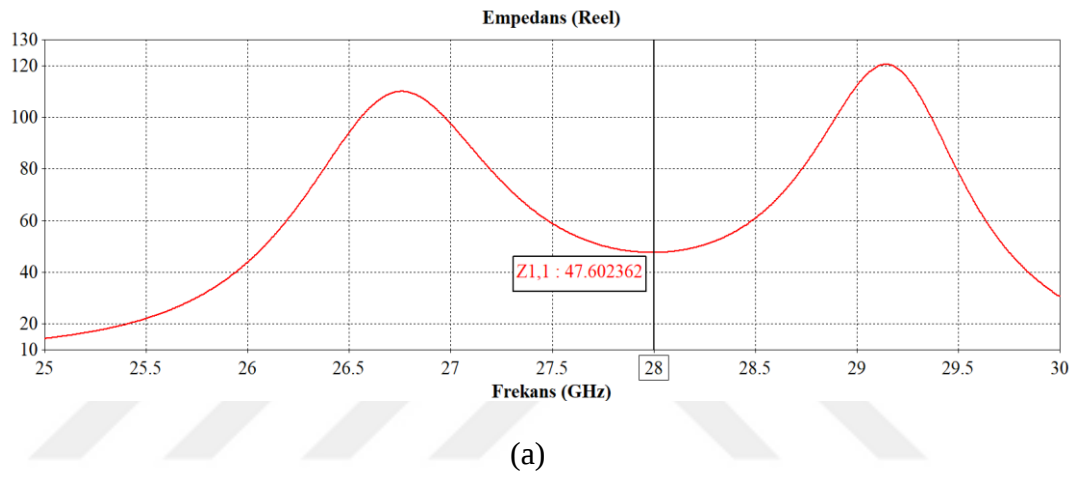
Anten Verimliliği

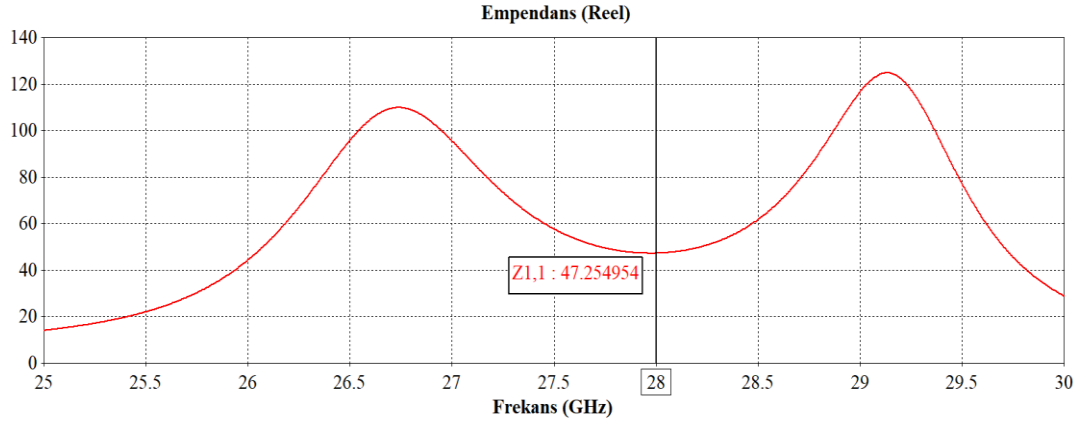
Tekli antenin verimliliği yönleticilik ve kazanç arasındaki farktan yaklaşık -0.48 ve 4x1 MIMO antenin verimliliği de yaklaşık -0.78 olarak hesaplanmıştır. MIMO

antene geçişte verimlilik anten geometrisi özelinde azalmış olarak gözükse de yönelticilik arttığından dolayı kazanç da artmıştır.

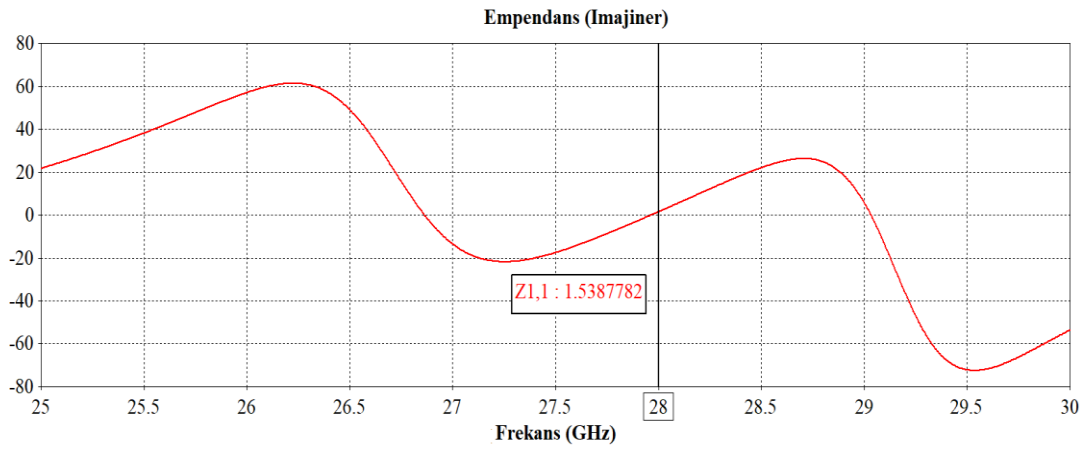
Anten Empedansı

şekil 4.11’de görüldüğü üzere antenlerin empedans ölçümlerinde tekli anten için reel kısım yaklaşık 47 Ω , imajiner kısım yaklaşık 1.5 Ω ve 4x1 anten için reel kısım yaklaşık 47 Ω ve imajiner kısım ise yaklaşık 0 Ω olarak elde edilmiştir. Her iki anten tasarımı için de empedans uyumu sağlanmıştır.





(c)



(d)

Şekil 4.11: (c), (d) Tekli antenin ve (a), (b) 4x1 MIMO antenin reel ve imajiner empedans değerleri.

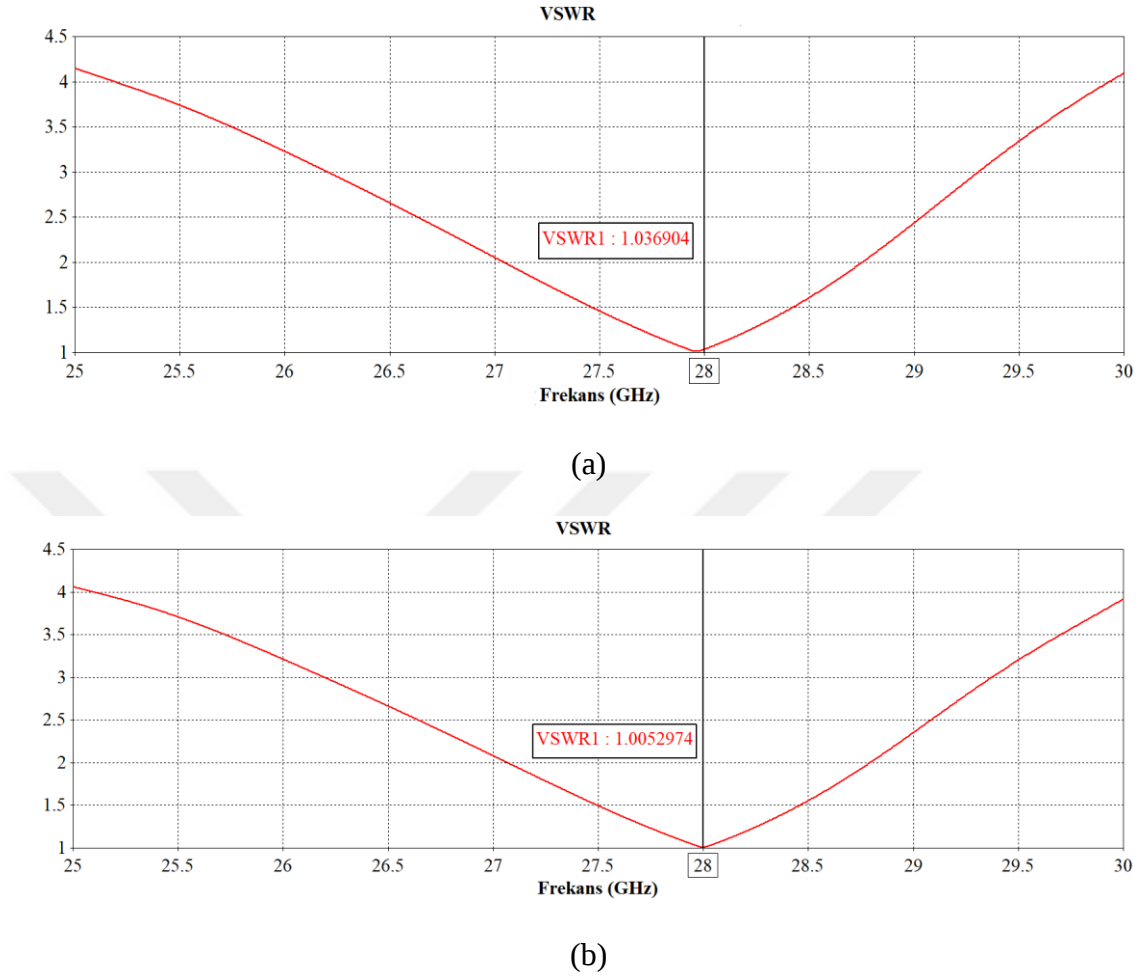
Referans empedansı reel 50Ω ve imajiner 0Ω olduğundan her iki anten de empedans sınırlamalarının içerisinde. Ayrıca MIMO anten geçişinde empedans uyumunda iyileşme sağlandığı görülmektedir.

Duran Dalga Voltaj Oranı (VSWR Değeri)

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere tekli antenin VSWR değeri 1.03 ve 4x1 antenin değeri de 1.005 olarak gözlemlenmiştir. Sonuçlardan belli olduğu üzere MIMO anten tasarımında VSWR oranında iyileşme görülmektedir. Ayrıca değerlerin 1’e yakın olması iletim hattı uyumsuzluklarının düşük olduğunu göstermektedir.

MIMO antenin VSWR oranı tekli anten ile kıyaslandığında daha iyidir. Tekli antenden MIMO geçişinde antenler arasındaki mesafenin optimum seviyeye

çekilmesi VSWR oranının değerinde direkt olarak etkili olduğu optimizasyon sırasında gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12: Tekli antenin (a) ve 4x1 antenin (b) VSWR değeri.

4.1.3 MIMO Antenlerin Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması

Tasarlanan iki farklı geometri için de simülasyon sonuçları gösterilen tüm anten parametrelerinde literatür değerlerine göre daha iyi çıkmıştır. Tez kapsamında 5.Nesil haberleşme sistemlerinde kullanılan anten tiplerinde MIMO anten için tasarlanan ilk anten giriş kapsamında olup ikinci anten daha fazla kazanç sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Her iki geometri için de öncelikli olarak tekli antenler tasarlandığından MIMO antenlerle tekli anten elemanları arasındaki parametre değerlerinin değişimi de gözlemlenmiş ve bu da farklı bir tecrübe sağlamıştır. Çizelge 4.6’da tasarlanan MIMO antenler için anten parametre değerleri toparlanmış olarak kıyaslamalı gösterilmektedir.

Çizelge 4.6: İki farklı MIMO anten geometrisi için anten parametre değerleri.

Anten Geometrisi	Anten boyutları (mm^2)	Geri Dönüş Kaybı (dB)	Bant Genişliği (GHz)	Kazanç (dBi)	Empedans (Ω)	VSWR
1.Anten Geometrisi	48 x 9.8	-27	1.8	8.257	51	1.088
2.Anten Geometrisi	65 x 16	-45	1.62	13.1	47	1.005

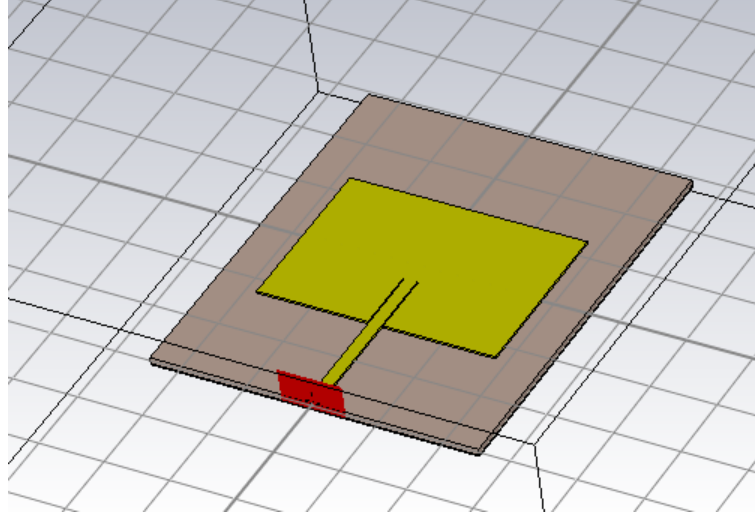
İkinci antenin tasarımındaki temel amaç kazancı arttırmaktı. Çizelge 4.5'teki değerlere bakıldığında anten boyutunun artması bir dezavantaj olarak görülebilir ancak anten kazancında yaklaşık %60 artış sağlanmıştır.

4.2 Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

5.Nesil haberleşme teknolojilerinde mikroşerit antenlerin tercih edilebilmesinin en önemli sebepleri; düşük maliyet ve düşük kayıpla yüksek verimlilik ve yüksek kazanç sağlanabilmesidir. Mikroşerit antenlerde en iyi performans FR4 maddesi için elde edildiğinden, bu maddenin özellikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir, anten tasarımında dielektrik madde olarak kullanılmıştır. Mikroşerit anten tasarımında öncelikli olarak tekli yama anten tasarlanmış daha sonra bu yama anten çeşitli optimizasyonlarla 2x1 ve 4x1 olarak dizi haline getirilmiştir. Bu yüzden 5G için mikroşerit anten tez dahilinde öncelikle tekli daha sonra da 2'li ve 4'lü dizi anten simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Uygulanan optimizasyonlar ve tasarımlar CST simülasyon programı yardımıyla yapılmıştır.

4.2.1 Tekli Mikroşerit Yama Anten Tasarımı ve Simülasyon Sonuçları

28Ghz çalışma frekansında ve FR4 dielektrik maddesi kullanıldığı göz önünde bulundurularak 3.2 eşitliğinden antenin eni (W) yaklaşık olarak 3.258 mm olarak hesaplanmıştır. Daha sonra 3.3, 3.4 ve 3.5 eşitliklerinden antenin boyu (L) 2.534 mm olarak hesaplanmıştır. 3.4 eşitliğinde dielektrik boyu 0.1 mm olarak alınmıştır. Daha sonra CST aracılığıyla simülasyon optimizasyonları yapılarak anten boyutları 3.65 x 2.533 x 0.035 (mm) bulunmuştur. Dielektrik boyutları da 3.6 ve 3.7 eşitliklerinden hesaplandıktan sonra optimizasyonlar sonucu 5 x 5.9 x 0.1 (mm) olarak bulunmuştur. Şekil 4.13'de antenin tasarımı gösterilmiştir.

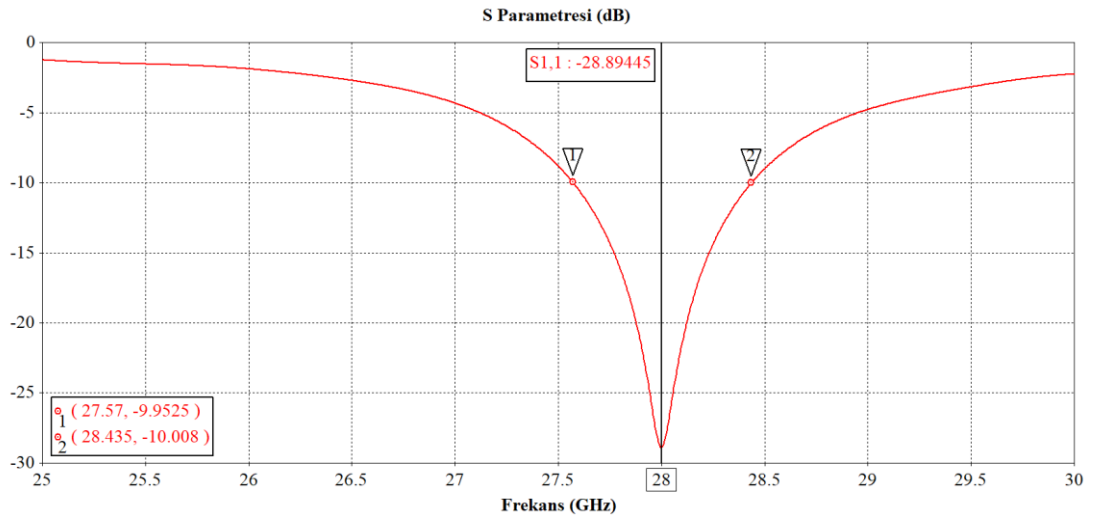


Şekil 4.13: Mikroşerit Anten Tasarımı.

Antenin besleme hattı kalınlığı 0.194 mm ve besleme boşluğu her iki taraftan 0.0174 mm olarak ayarlanmıştır. Ayrıca besleme hattının uzunluğu da 2.6335 mm olarak belirlenmiştir.

Anten Çalışma Frekansı

Şekil 4.14’de tasarımı verilen mikroşerit antenin S_{11} grafiği verilmiştir. Antenin 28 Ghz’teki geri dönüş kaybı -28.89 dB olarak ölçülmüştür.

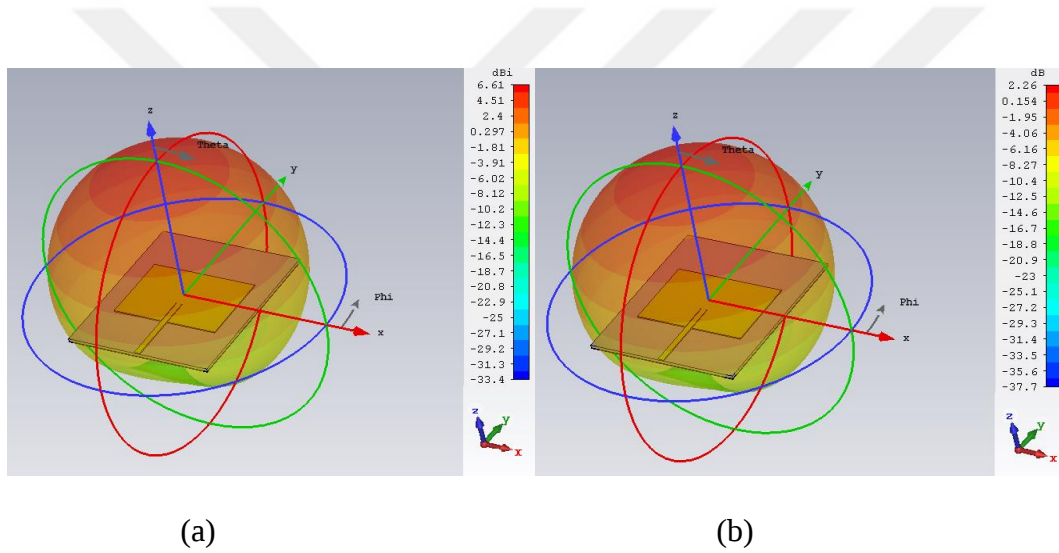


Şekil 4.14: S11 parametresi.

Şekil 4.14’de görüldüğü üzere antenin bant genişliği yaklaşık 0.87 Ghz olarak ölçülmüştür. Mikroşerit antenlerde öne çıkan unsur yüksek kazanç olduğundan kazancın yüksek olması bant genişliğini ters etkilendiğinden 0.87 Ghz bant genişliği literatür için uygun seviyelerdedir.

Anten Yöneltiliği ve Kazancı

Şekil 4.15'teki grafiklerde antenin yöneltiliğinin 6.61 dBi ve kazancının 2.26 dB olduğu görülmektedir. Antenin yöneltiliği bu çalışma frekansındaki antenler için oldukça iyi bir seviyededir. Yüksek frekanslara çıkıldığında anten boyutları küçüldüğünden dolayı bu durum optimizasyonu zorlaştırmaktadır. Elde edilen yöneltililik seviyesi iyi iken kazanç değeri daha yüksek olabilirdi. Bunun için de anten geometrisinde farklılara gidilerek ve yamada açılacak yarıklarla kayıp azaltılabilir. Ancak tekli mikroşerit yama için tez dahilinde dizi antenle arasındaki farkların elde edilmesi ve sonuçların literatür ortalamalarına yakın olması yeterli bir sonuçtur.



Şekil 4.15: (a) ve (b) Antenin yöneltililik ve kazanç değerleri.

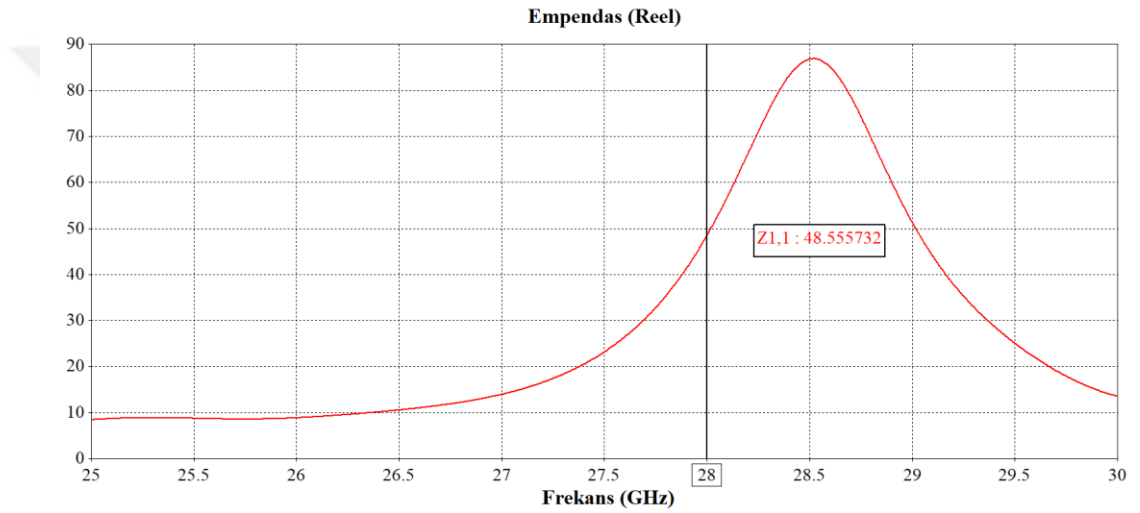
Anten Verimliliği

Tekli mikroşerit yama antenin verimliliği $G(\text{dB}) = D(\text{dB}) + \eta(\text{dB})$ eşitliğinden yaklaşık -4.35 dB olarak hesaplanmıştır ve maksimum kazanç değeri Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Anten verimliliği frekansla doğru orantılı ve bant genişliğiyle ters orantılıdır. 5G anten için uygun bant genişliği – kazanç ikilisi elde etmek için iki parametreden belli düzeylerde vazgeçilmektedir. Şekil 4.12'de gösterilen bant genişliği mikroşerit antenler için yüksek bir bant genişliğidir. Bu durum da verimliliği düşürmüştür. 5G teknolojisinde her iki parametre de oldukça önemlidir. Bu sebeple tekli mikroşerit anten tasarımı bu teknolojiye yeterli uygunluk göstermemektedir. Dizi mikroşerit anten tasarımlarıyla daha yüksek verimlilik ve

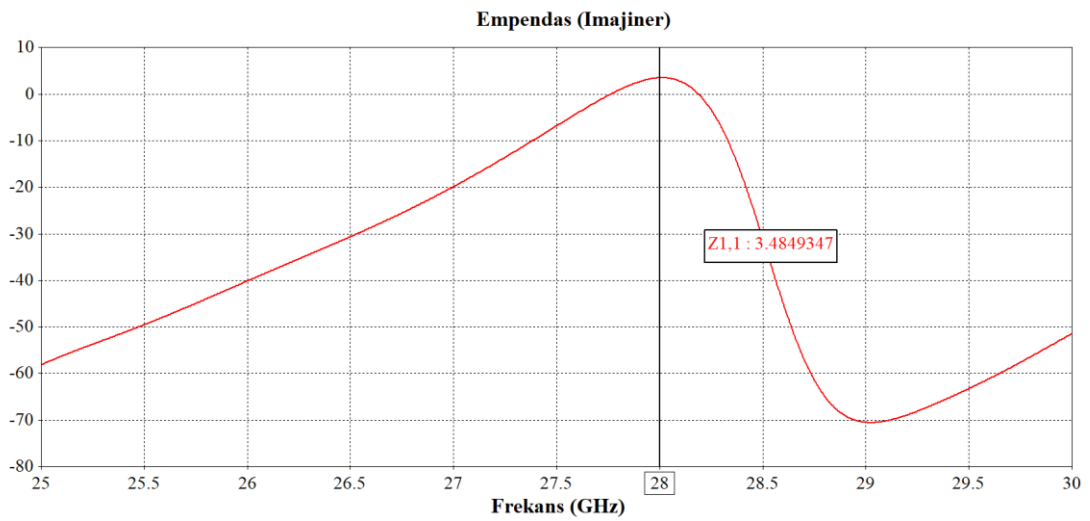
uygun bant genişliği elde edilebilir. Bu sebeple de 2x1 ve 4x1 mikroşerit anten tasarımları da tez kapsamında simüle edilip sonuçları karşılaştırılacaktır.

Anten Empedansı

Şekil 4.16’da görüldüğü üzere antenin empedans ölçümünde reel kısım yaklaşık 48 Ω , imajiner kısım yaklaşık 3.5 Ω olarak elde edilmiştir. Kaynak ile anten empedansının eşit olduğu durumda maksimum güç aktarımı gerçekleşir. Referans empedans değeri reel kısım için 50 Ω ve imajiner kısım için 0 Ω olan bir kaynak kullanıldığında elde edilen değerler ile kaynak arasında büyük bir empedans farkı oluşmamaktadır.



(a)

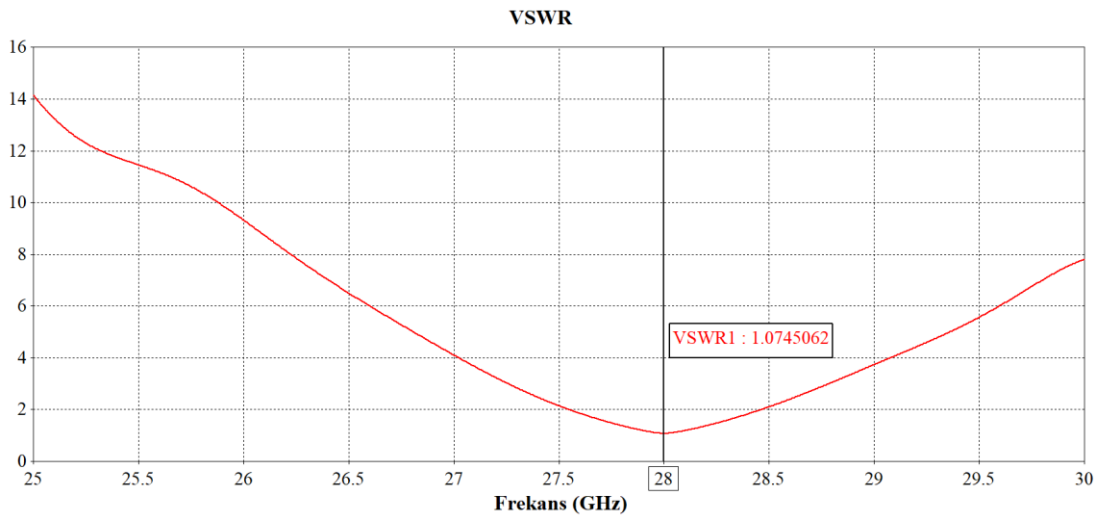


(b)

Şekil 4.16: (a) ve (b) Antenin reel ve imajiner empedans değerleri.

Duran Dalga Voltaj Oranı (VSWR Değeri)

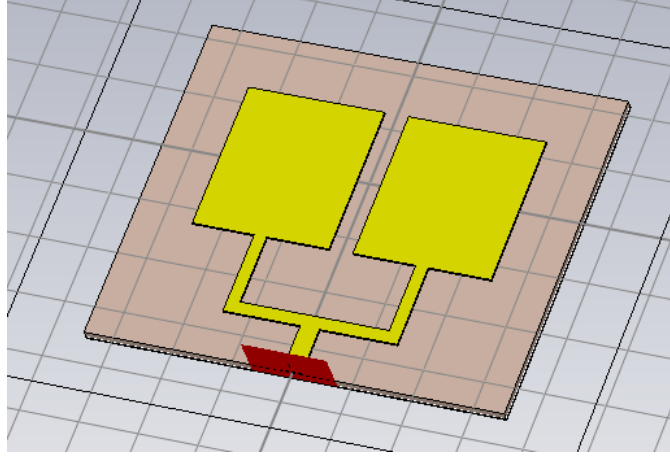
Şekil 4.17’de görüldüğü üzere antenin VSWR değeri yaklaşık 1.07 olarak gözlemlenmiştir. Duran dalganın tepe genliğinin, duran dalganın minimum genliğine oranı olarak ifade edilen VSWR değeri her zaman 1’den büyük veya 1’e eşit olan bir sayıdır. Simülasyon sonucunda elde edilen değer 1’e ne kadar yakınsa uyumsuzluk kaybı o kadar azdır. Bu sebeple de elde edilen değer anten tasarımında kabul edilebilir uygun bir değerdir.



Şekil 4.17: Antenin VSWR değeri.

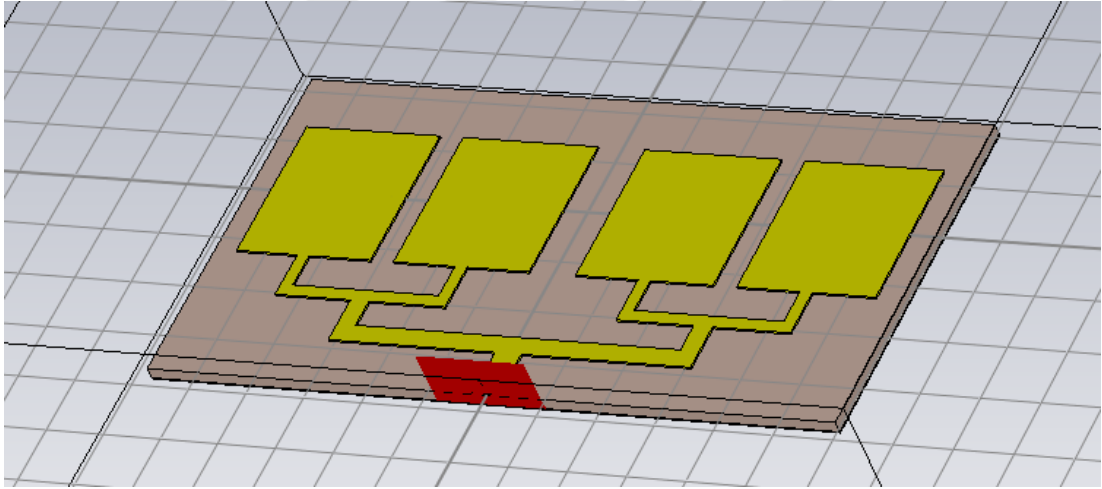
4.2.2 Mikroşerit Yama Dizi Anten Tasarımı ve Simülasyon Sonuçları

Tez kapsamında tekli mikroşerit tasarımında sonra 2x1 ve 4x1 mikroşerit yama anten dizileri tasarlanmıştır. Buradaki temel amaç anten parametrelerinde iyileşmeler elde etmektir ve iki tasarım için simülasyon sonuçları kıyaslamalı grafiklerle verilecektir. Aynı şekilde 28Ghz çalışma frekansına sahip olacak anten dizilerinde boyutlarda artış gözlenirken verimlilik ve kazançlarda iyileşmeler elde etmek amaçlanmıştır. Tekli mikroşerit antenden dizi antene geçişte özellikle besleme hattı dışarı çekilerek optimize edilmiştir. Şekil 4.18’de 2x1 dizi anten tasarımı ve Şekil 4.19’da 4x1 dizi anten tasarımı gösterilmiştir. Her iki anten dizisi için de simülasyon sonuçları sırasıyla çalışma frekansı, yönelticilik ve kazanç, verimlilik, empedans ve duran dalga voltaj oranı parametreleriyle incelenecektir. Dizi antenler arasındaki mesafe istenen ışıma karakteristiğini elde etmek için alınan optimize edilmiş değerlerdir.



Şekil 4.18: 2x1 Mikroşerit Dizi Anten Tasarımı.

Şekil 4.18’de verilen 2x1 dizi anten tasarımının anten boyutları $2.3 \times 2.533 \times 0.035$ mm olacak şekilde optimize edilmiştir. Dielektrik madde için de boyutlar da $7 \times 5.72 \times 0.16$ mm olarak ayarlanmıştır. Antenler arasındaki uzaklık 0.4 mm olarak optimize edilmiştir ve antenlerin besleme hatları 0.21×1.4 mm olarak ayarlanmıştır. Anten düzeneğinin besleme hattı da 0.32×0.8 mm olarak hesaplanmıştır.

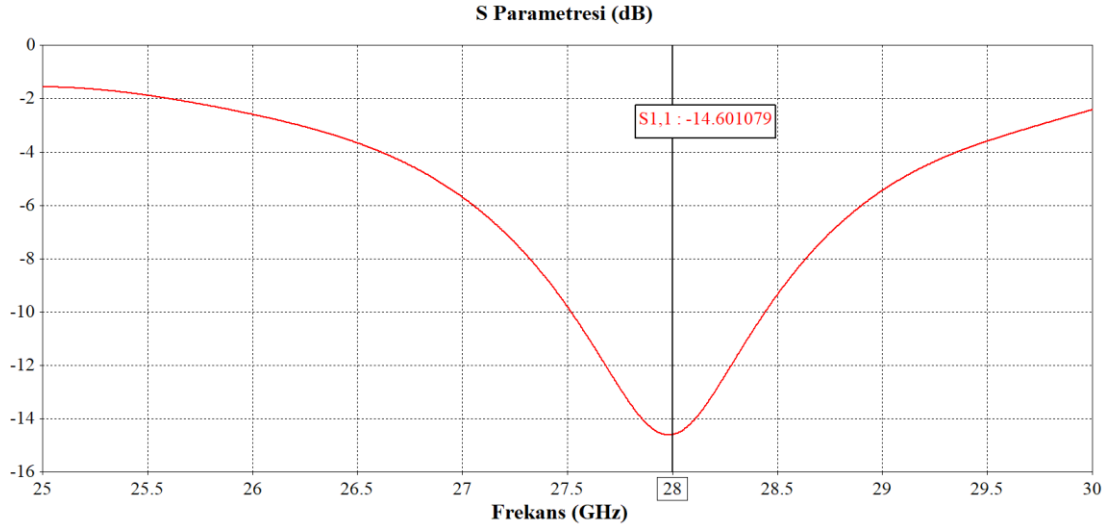


Şekil 4.19: 4x1 Mikroşerit Dizi Anten Tasarımı.

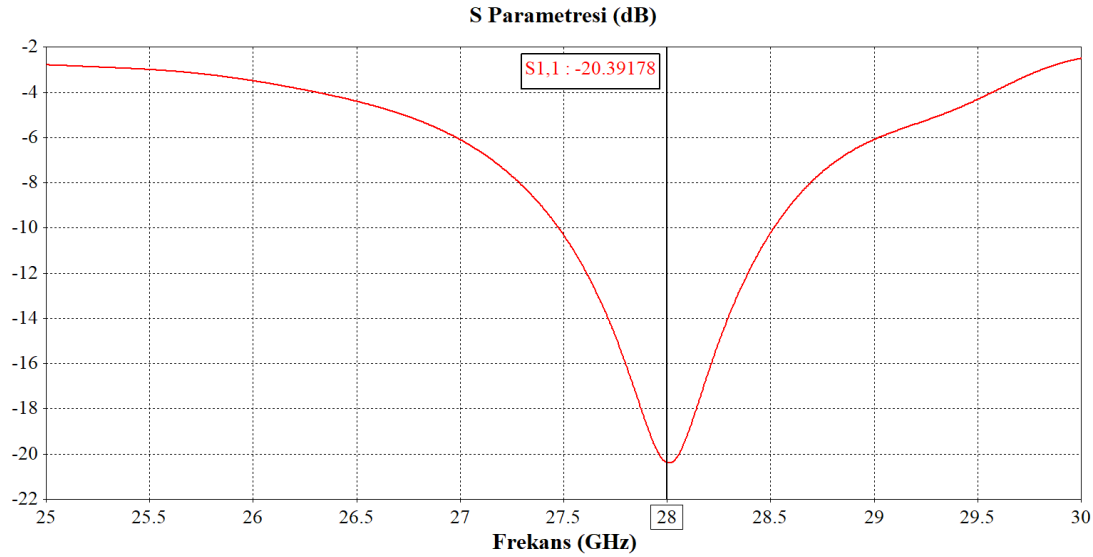
Şekil 4.19’da verilen 4x1 anten tasarımının dielektrik boyutları $11.78 \times 5.92 \times 0.198$ mm olarak ayarlanmıştır. Dizi antendeki her bir anten elemanın boyutları da $2.35 \times 2.533 \times 0.035$ mm olacak şekilde optimize edilmiştir. Tekli anten besleme hatları 0.32×0.8 mm ve ikili anten besleme hatları da 0.32×0.8 mm olarak ayarlanmıştır. Anten düzeneğinin besleme hattı boyutları da 0.45×0.8 mm olarak ayarlanmıştır.

Anten Çalışma Frekansı

Şekil 4.20’de 2x1 ve 4x1 dizi antenlerin S_{11} grafikleri verilmiştir. 2x1 dizi antenin 28 Ghz’teki geri dönüş kaybı -14.60 dB olarak ölçülmüştür. 4x1 dizi anten için geri dönüş kaybı -20.39 dB civarındadır. 2x1 anten için bant genişliği yaklaşık olarak 0.92 Ghz ve 4x1 anten için 1.05 Ghz olarak ölçülmüştür. Tekli mikroşerit yama antenin Şekil 4.12’deki sonuçlarını da hesaba kattığımızda mikroşerit anten dizisindeki anten elemanı sayısı arttıkça bant genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir.



(a)

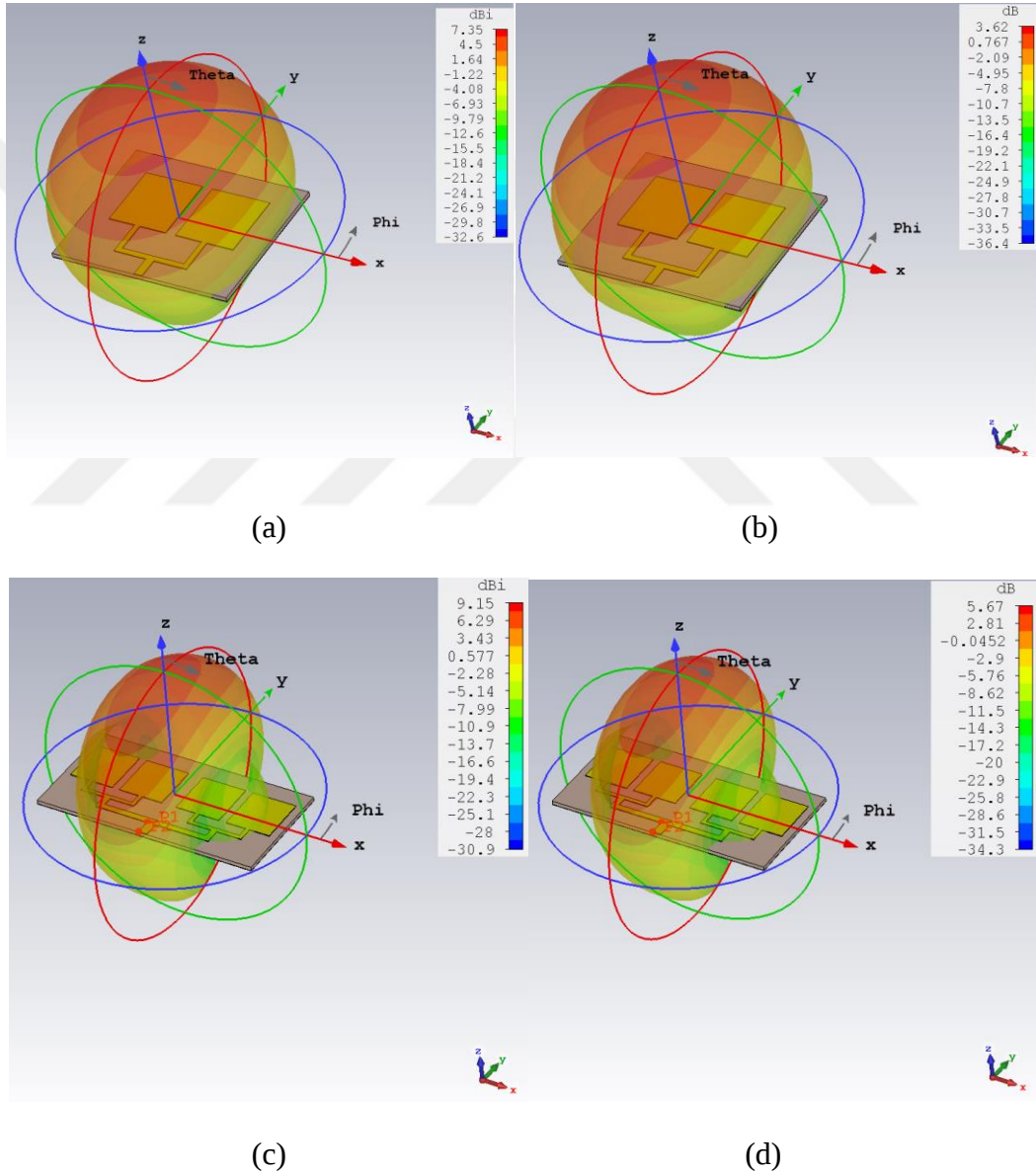


(b)

Şekil 4.20: (a) 2x1 anten ve (b) 4x1 anten S_{11} parametresi.

Anten Yöneltiliği ve Kazancı

Şekil 4.21'daki grafiklerde 2x1 dizi anten için elde edilen yönelticilik 7.35 dBi, kazanç 3.62 dB ve 4x1 dizi anten için elde edilen yönelticilik 9.15 dBi, kazanç 5.67 dB olduğu görülmektedir. Şekil 4.13'teki tekli mikroşerit yama anten kazanç ve yönelticilik değerleri de göz önünde bulundurulduğunda sistemdeki eleman sayısı arttıkça yönelticilik ve kazanç değerlerinde artış görülmektedir. 2x1 dizi antenden 4x1 dizi antene geçişte kazanç artışı yaklaşık 56% seviyelerindedir. Antendeki eleman sayısı arttıkça kazancın ve yönelticiliğin arttığı baz alınarak boyut sınırlamaları içerisinde istenen kazanç eleman sayısı arttırılarak elde edilebilir.



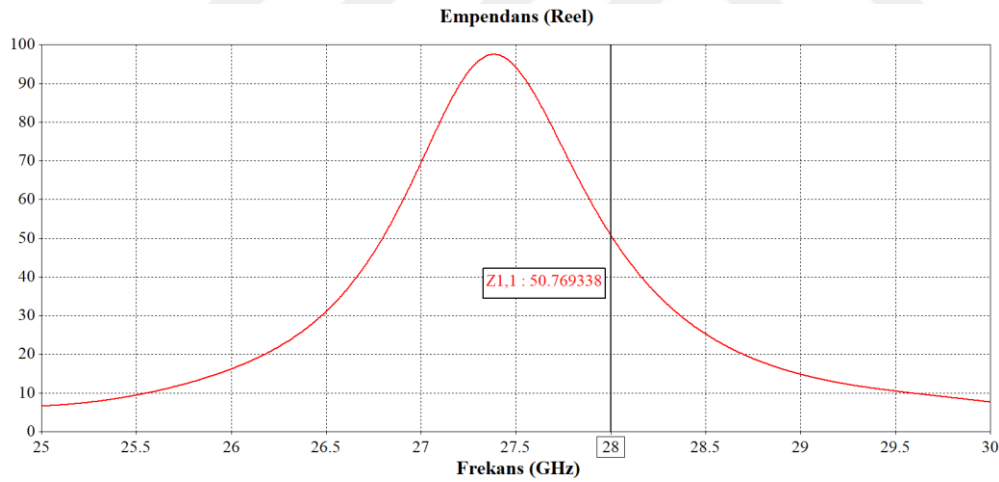
Şekil 4.21: 2x1 dizi antende yönelticilik (a) ve kazanç (b) ve 4x1 dizi antende yönelticilik (c) ve kazanç (d) değerleri.

Anten Verimliliği

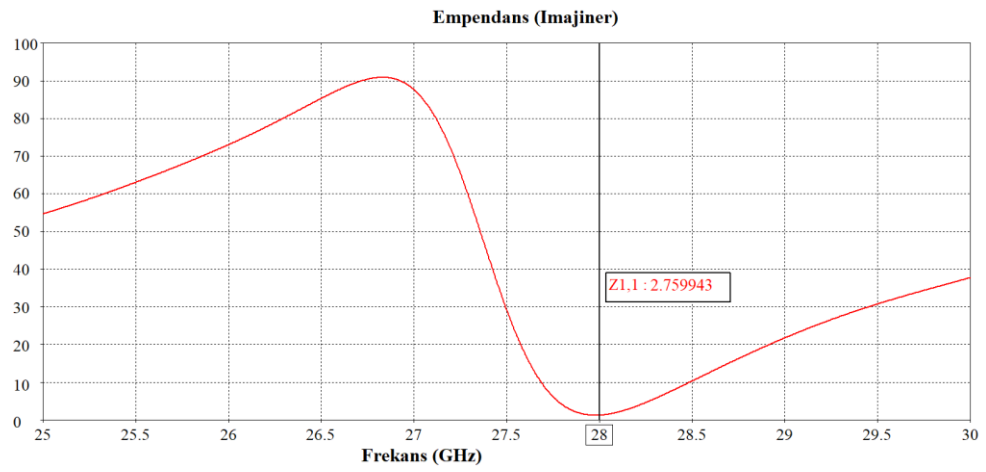
2x1 dizi antenin verimliliği yönelticilik ve kazanç arasındaki farktan yaklaşık -3.7 dB ve 4x1 dizi antenin verimliliği yaklaşık olarak -3.48 dB olarak hesaplanmıştır. Tekli mikroşerit antenin verimliliğini de göz önünde bulundurduğumuzda antenin verimliliği eleman sayısı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Dizi anten tasarlarken amaç anten sisteminin verimliliğini ve bant genişliğini arttırmaktır. Bu iki parametrede de dizi anten eleman sayısı arttıkça iyileşme olduğu görülmüştür. 4x1 dizi anten için elde edilen verimlilik literatüre bakıldığında yeterli seviyededir.

Anten Empedansı

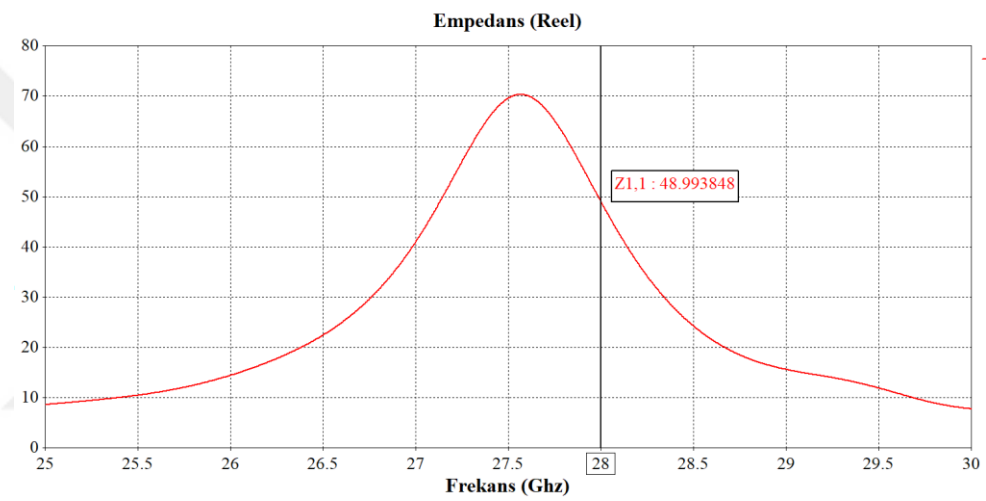
Şekil 4.22’de görüldüğü üzere 2x1 dizi antenin empedans ölçümlerinde reel kısım yaklaşık 50 Ω , imajiner kısım yaklaşık 3 Ω ve 4x1 dizi anten için reel kısım yaklaşık 49 Ω ve imajiner kısım ise yaklaşık 2 Ω olarak elde edilmiştir. Referans empedans reel değeri 50 Ω ve imajiner değeri 0 Ω olduğundan her iki anten de empedans sınırlamalarının içerisinde ve referans değerle arasında fazla fark olmadığından yaşanacak güç kaybı göz ardı edilebilir seviyededir. Empedans ölçümünde beklenen referans empedansa yakın olmasıdır.



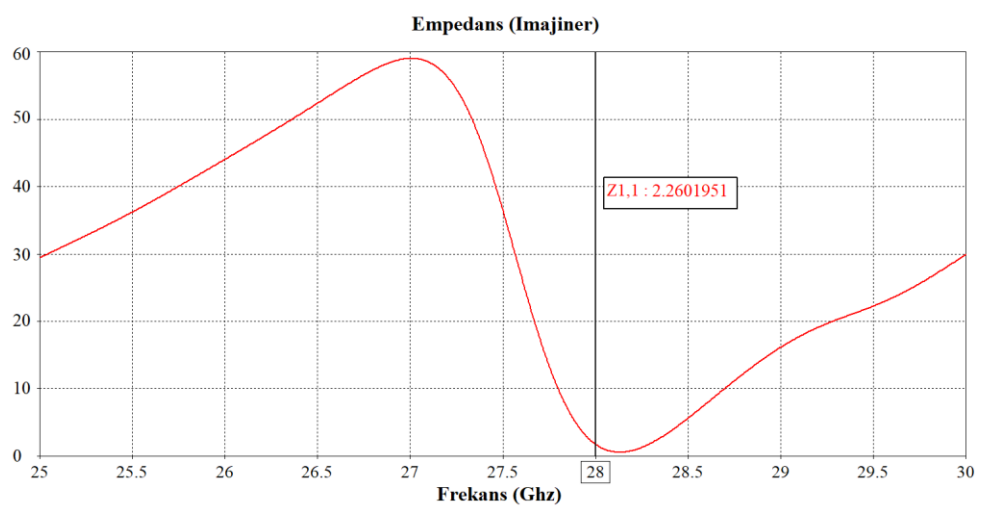
(a)



(b)



(c)



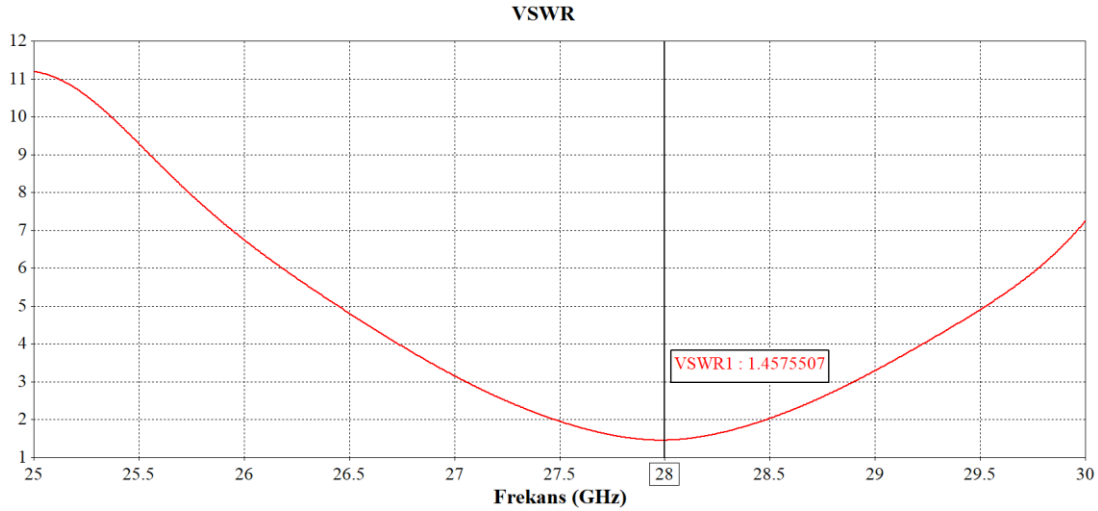
(d)

Şekil 4.22: (a), (b) 2x1 dizi antenin ve (c), (d) 4x1 dizi antenin reel ve imajiner empedans değerleri.

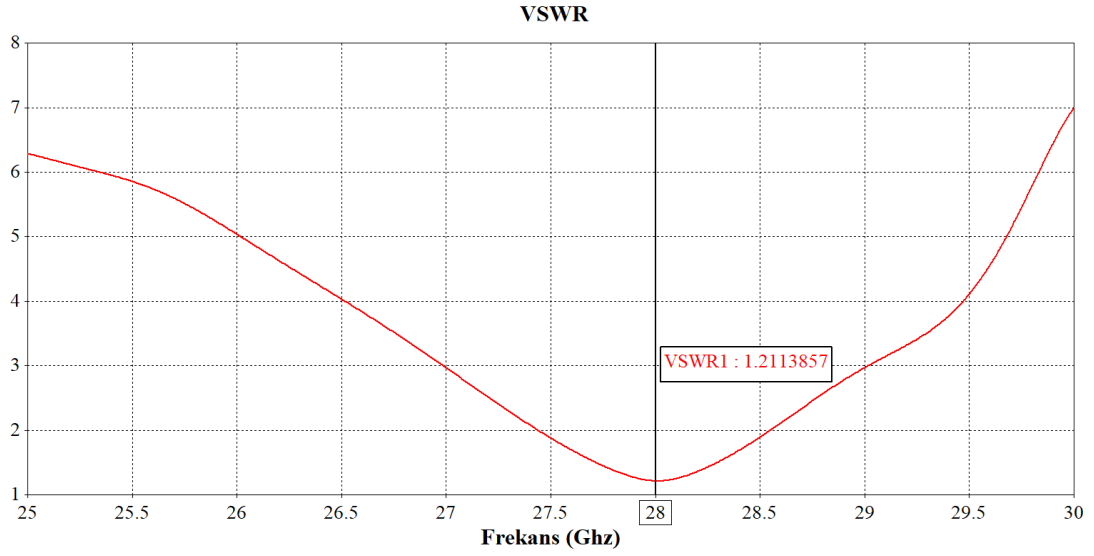
Dizi antendeki artan eleman sayısı bu durumu etkilememelidir. Empedans değerini antenler arasındaki mesafe büyük ölçüde etkilediğinden antenler arasındaki mesafe optimizasyonla ayarlanmıştır. Dizi antendeki eleman sayısı arttıkça da bu mesafe aynı şekilde optimize edilmelidir. Aksi takdirde empedans uyumsuzluğu doğacaktır. Bu durumda anten ve kaynak arasında güç kaybı ortaya çıkacaktır.

Duran Dalga Voltaj Oranı (VSWR Değeri)

Şekil 4.23'te görüldüğü üzere 2x1 dizi antenin VSWR değeri yaklaşık 1.45 ve 4x1 dizi antenin VSWR değeri yaklaşık olarak 1.21 seviyelerinde gözlemlenmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen değer 1'e yakın olduğundan uyumsuzluk kaybı göz ardı edilebilir düzeydedir. Bu sebeple de elde edilen değerler kabul edilebilir ölçüde uygun değerlerdir.



(a)



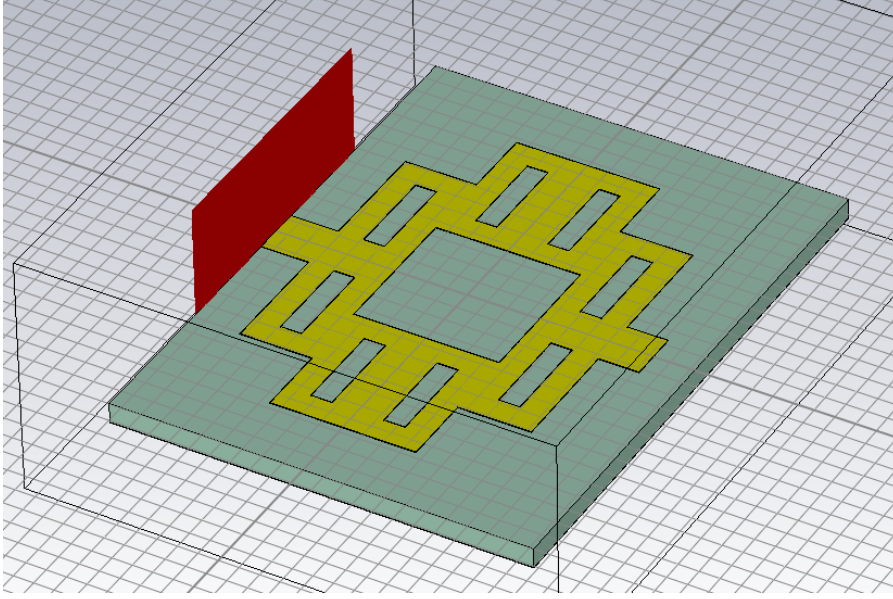
Şekil 4.23: 2x1 dizi antenin (a) ve 4x1 dizi antenin (b) VSWR değeri.

4.3 Mikroşerit Kafes Dizi Anten Tasarımı

Tez kapsamının iki farklı anten geometrisi için MIMO ve mikroşerit anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. 5G teknolojisinde kullanılmak üzere mümkün oldukça küçük boyutlarda yüksek kazançlı ve yüksek bant genişliğine sahip anten tasarlanmak istenmiştir. Daha yüksek verimlilik ve yüksek kazanç elde etmek için tasarlanan antenlerden sonra gelen noktada mikroşerit kafes dizi anten tasarlanmıştır. Anten geometrisine karar verildikten sonra tasarım ve optimizasyonlar CST simülasyon programı yardımıyla yapılmıştır.

4.3.1 Anten Tasarımı

Şekil 4.24'te anten tasarımı verilmiştir. Her bir kafesin uzun kenarı 7.12 mm ve kısa kenarı 3.6 mm olarak ayarlanmıştır. Kullanılan dielektrik madde Rogers RT 5880 olarak seçilmiştir ve boyutları 28 x 20.8 x 1 mm olarak belirlenmiştir. Dielektrik maddenin özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.24: Anten Tasarımı.

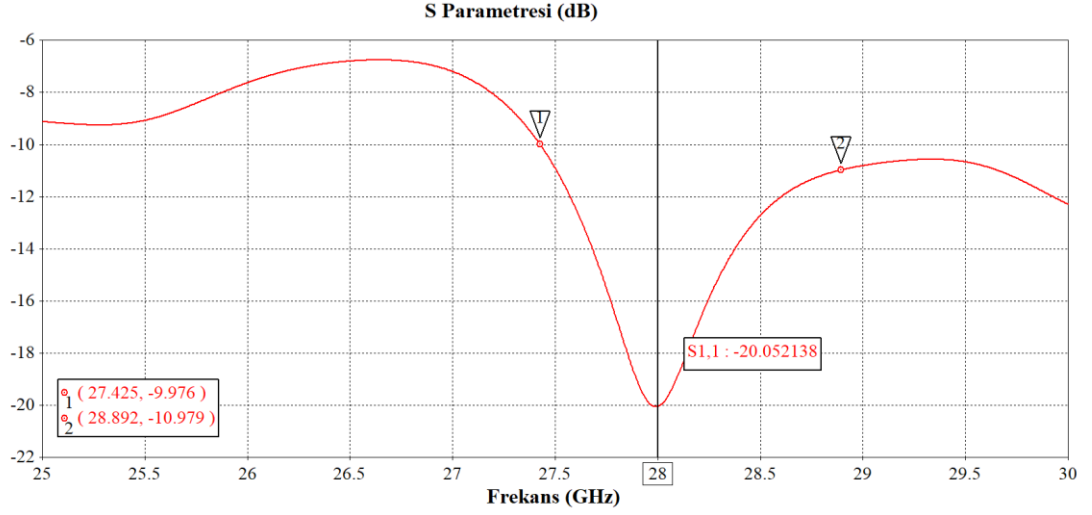
Antenin besleme hattı boyutları 2.56 x 2.4 mm olarak ayarlanmıştır. Dengeleyici yama boyutları da 2.56 x 2 mm olarak optimize edilmiştir.

4.3.2 Simülasyon Sonuçları

Şekil 4.24'te tasarımı gösterilen antenin simülasyon sonuçları çalışma frekansı, yönleticilik ve kazanç, verimlilik, empedans ve duran dalga voltaj oranı parametreleriyle ele alınacaktır.

Anten Çalışma Frekansı

Şekil 4.25'te antenin S_{11} parametresi ölçümü ve rezonans frekansı verilmiştir. Antenin 28 Ghz'teki geri dönüş kaybı yaklaşık olarak -20.05 dB olarak ölçülmüştür. Ayrıca bant genişliği yaklaşık olarak 1.47 Ghz olarak ölçülmüştür.

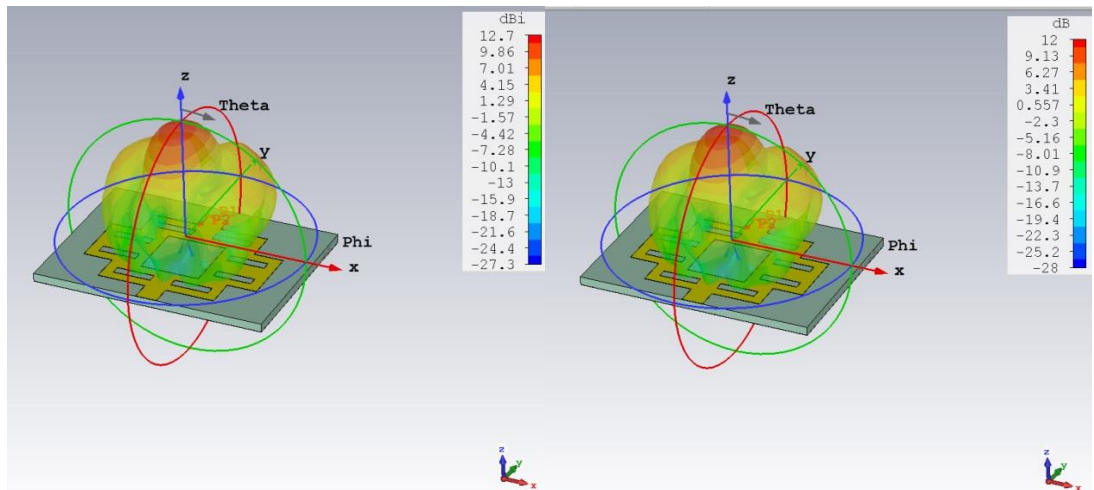


Şekil 4.25: Antenin S11 parametresi.

Şekil 4.20’de bant genişliğinin 1.05 Ghz olarak ölçülmüştü. Önceki anten tasarımıyla kıyaslandığında bant genişliğinde 28Ghz rezonans frekansında yaklaşık olarak 0.4 Ghz artış sağlandığı görülmüştür. 5.Nesil haberleşme teknolojisinde önemli rol oynayan bant genişliği parametresinde önemli ölçüde ilerleme sağlanmıştır.

Anten Yöneltiliği ve Kazancı

Şekil 4.26’daki grafiklerde antenin yöneltiliğinin 12.7 dBi ve kazancının 12 dB olduğu görülmektedir. Şekil 4.21’de anten kazancının 5.67 dB olduğu verilmiştir, kıyaslama yapıldığında kazançta yaklaşık olarak 6.33 dB artış olduğu görülmektedir. Önceki anten tasarımına göre yaklaşık 100%’lük kazanç artışı sağlanmıştır.



(a)

(b)

Şekil 4.26: (a) ve (b) Antenin yöneltilik ve kazanç değerleri.

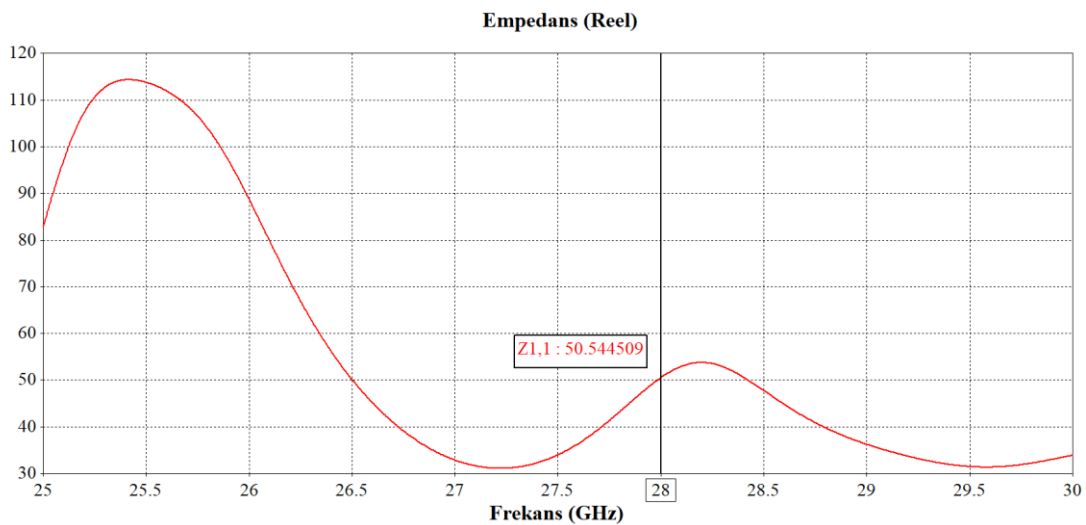
Buradan yola çıkarak geometrideki değişimin istenen doğrulukta olduğu söylenebilir. 5G için önemli olan kazanç parametresinde de bant genişliğinde olduğu gibi iyileşme elde edilmiştir. Mikroşerit kafes dizi anten sisteminde eleman sayısı artırılarak kazançta daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşüncesiyle anten üzerinde optimizasyonlar yapılacaktır ve bu durum anten optimizasyonu bölümünde anlatılacaktır.

Anten Verimliliği

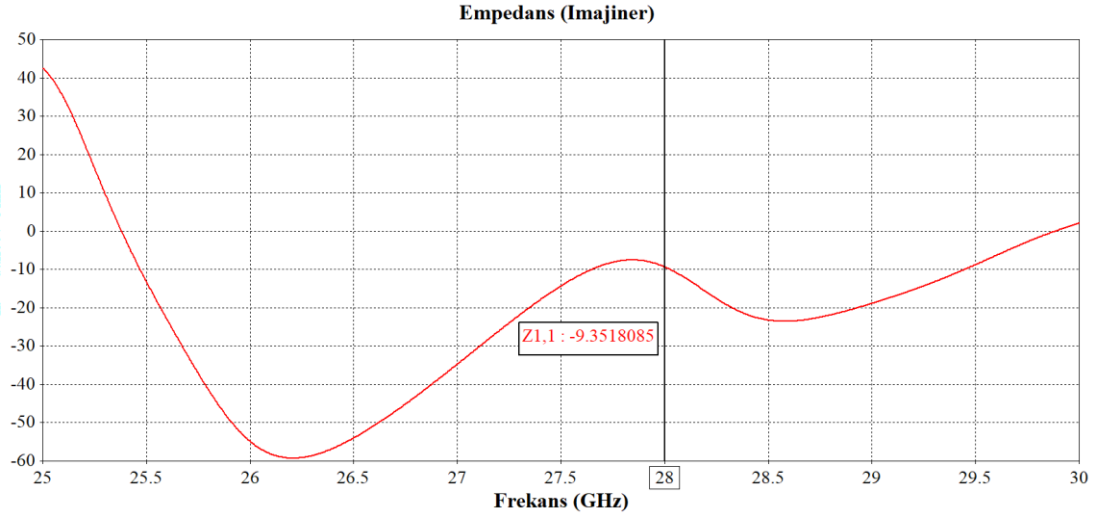
Mikroşerit kafes dizi antenin verimliliği yönelticilik ve kazanç arasındaki farktan yaklaşık olarak -0.7 dB olarak hesaplanmıştır. 4x1 mikroşerit dizi anten verimliliği ile kıyaslandığı verimlilik önemli ölçüde artmıştır. Yönelticilik ve kazanç arasındaki farkın bu derece düşük olması 5G teknolojisi için istenen bir özelliktir. Literatür ile kıyaslandığında da kabul gören bir verimlilik seviyesine sahip bir tasarım olmuştur.

Anten Empedansı

Şekil 4.27’de görüldüğü üzere antenin empedans ölçümlerinde reel kısım yaklaşık 50.5 Ω , imajiner kısım yaklaşık -9 Ω olarak elde edilmiştir. Tasarımı yapılan anten özelinde empedans optimizasyonu sonucu yeterli seviyelere inilmiştir. Referans empedans ile mutlak fark az olduğundan kabul edilebilir seviyededir. Anten tasarımında en çok zorlanan bölümlerden biri tasarlanan antende empedans uyumunu sağlamaktır. Besleme şekli, besleme yeri ve hat boyutlarını iyi belirlemek gerekir. Ayrıca dielektrik malzeme kalınlığı da anten empedansını etkilemektedir.



(a)

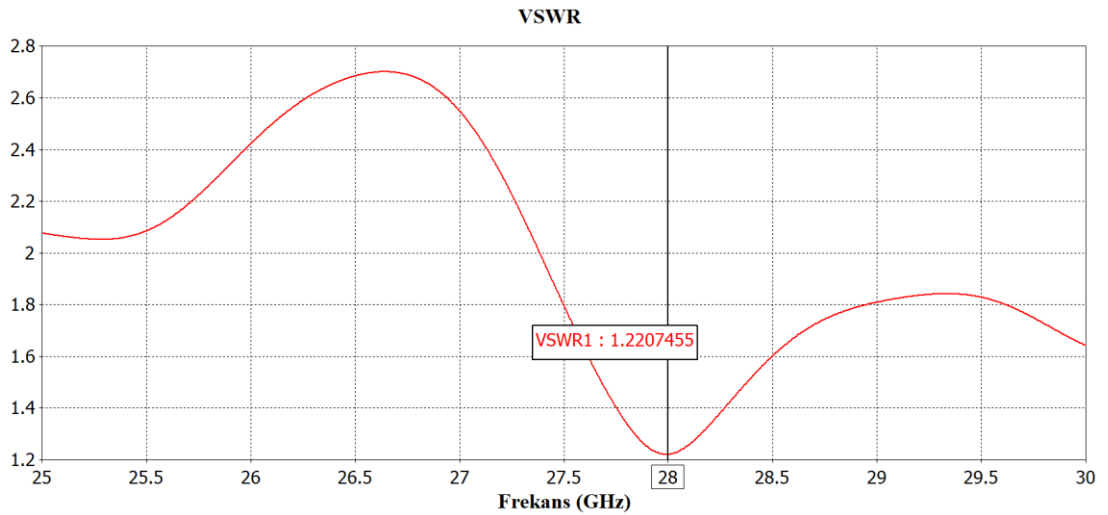


(b)

Şekil 4.27: (a) ve (b) Antenin reel ve imajiner empedans değerleri.

Duran Dalga Voltaj Oranı (VSWR Değeri)

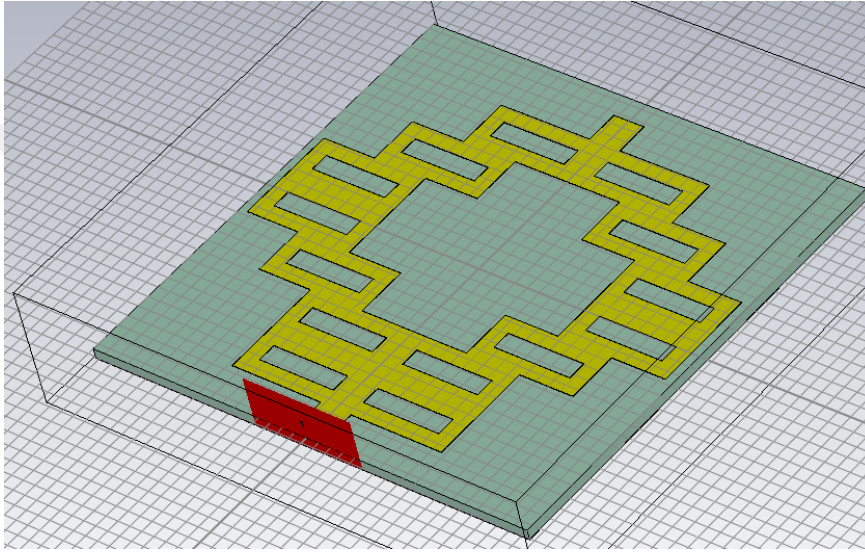
Şekil 4.28’de antenin duran dalga voltaj oranı parametre grafiği verilmiştir ve 28Ghz rezonans frekansında 1.22 olduğu görülmektedir. VSWR değeri anten içi uyumluluk için önemli bir parametredir. Duran dalga voltaj oranı antenin iletim hattına uyumluluğu olarak da nitelendirilebilir. Antenden yansıyan güç antenden ileri yönlü iletilen güç ile kesişir ve bu durum bir duran dalga yaratır. Oluşan duran dalganın tepe genliğinin minimum genliğe oranı da VSWR değerini verir.



Şekil 4.28: Antenin VSWR parametresi.

4.3.3 Mikroşerit Kafes Dizi Anten Optimizasyonu

Tasarlanan kafes dizi antenden daha iyi kazanç ve daha yüksek bant genişliği elde etmek amacıyla kafes sayısı arttırılmıştır. İlk antende 8 adet kafes bulunurken kafes sayısı 14'e çıkarılmıştır. Bu aşamada anten boyutlarını minimum ölçüde arttırarak maksimum kazanç elde etmek amaçlanmıştır. Tasarlanan yeni antenin geometrisi Şekil 4.29'da verilmiştir. Kafes boyutları değiştirilmemiştir ve 7.12 x 3.6 (mm) olarak kullanılmıştır. Anten dielektrik boyutu 36 x 35 x 0.82 (mm) olarak değişmiştir.

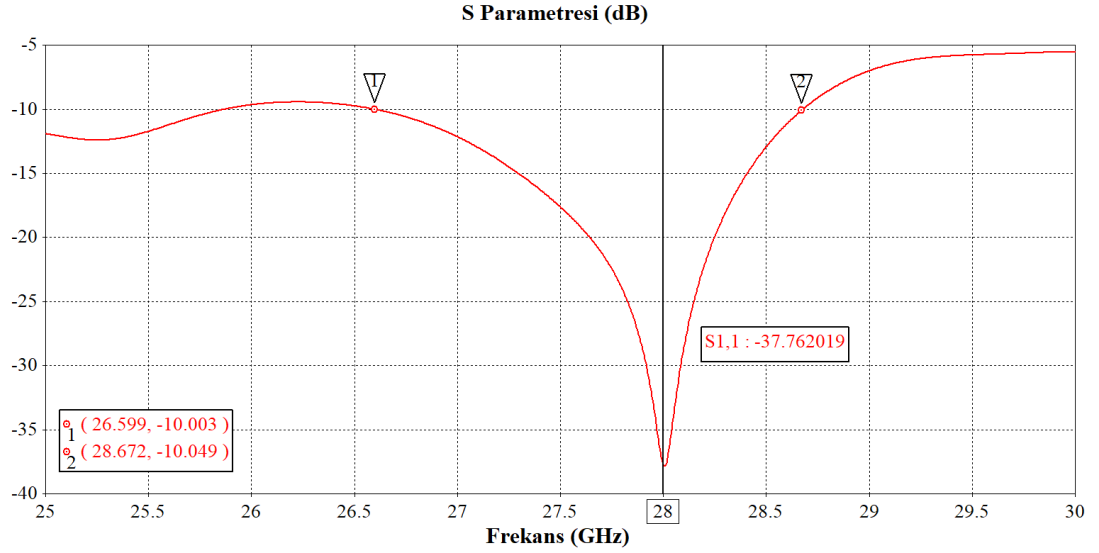


Şekil 4.29: Anten Tasarımı.

Şekil 4.24'te tasarlanan 8 kafesli anten geometrisiyle kıyaslandığında temel fark kafes sayısıdır. Tasarlanan antenin boyutları mobil cihazlara uyum gösterebilecek niteliktedir. Bu sebeple de 5G teknolojilerinde bir çok noktada kullanılabilir ölçüdedir.

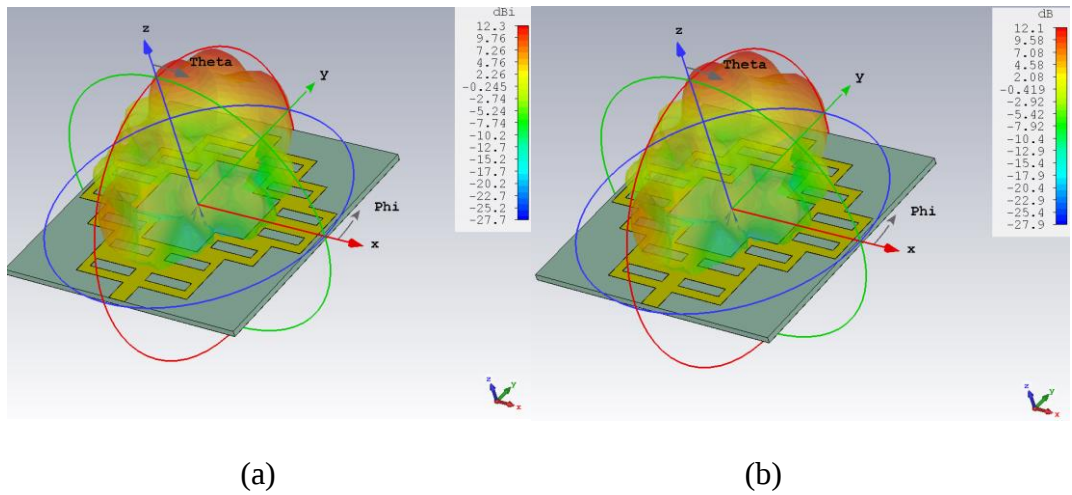
Şekil 4.30'da antenin rezonans frekansındaki S11 grafiği verilmiştir. 28Ghz çalışma frekansında S11 değeri yaklaşık -37 dB ölçülmüştür. Bant genişliği yaklaşık olarak 2.1 Ghz olarak ölçülmüştür. Şekil 4.25'te önceki antenin bant genişliği 1.45 Ghz olarak görülmektedir ve yaklaşık olarak 45%'lik bir bant genişliği artışı görülmektedir. Anten üzerinde belirli boyut sınırlamaları içerisinde ölçülen bant genişliği artışı istenilen düzeydedir.

Optimizasyondaki temel amaçlardan biri de antenin verimliliğini arttırmaktır. Şekil 4.31’de yönleticilik ve kazanç grafikleri verilmiştir. Yönleticilik değeri 12.3 dBi ve kazanç değeri 12.1 dB olarak ölçülmüştür.



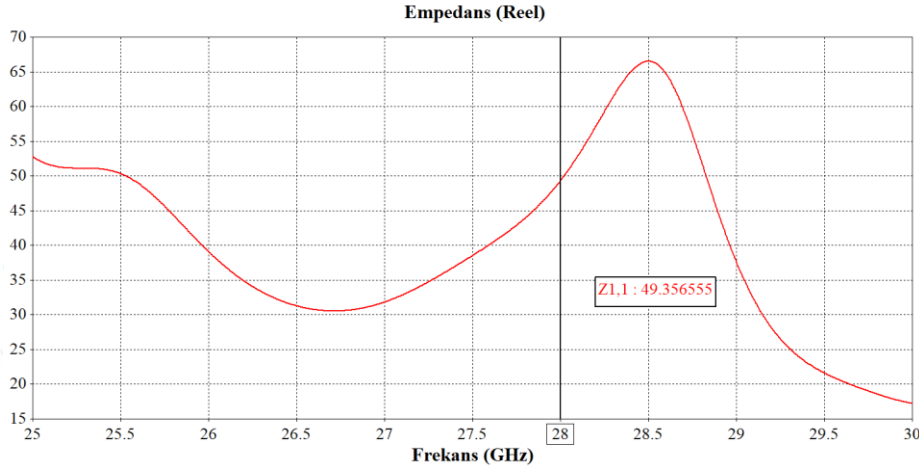
Şekil 4.30: Antenin S11 parametresi.

Antenin verimliliği yaklaşık -0.2 dB çıkmaktadır ve önceki antenle kıyaslandığında 71%’lik bir iyileşme görülmektedir. Kazanç değerinde de 0.1 dB artış görülmektedir. Önceki antenin ışıma karakteristiğiyle kıyaslandığında, ana lob daha baskınken yan loblarda belirli ölçüde azalma görülmektedir. Bu da anten yönlendiriciliğinin daha baskın olduğunu gösterir.

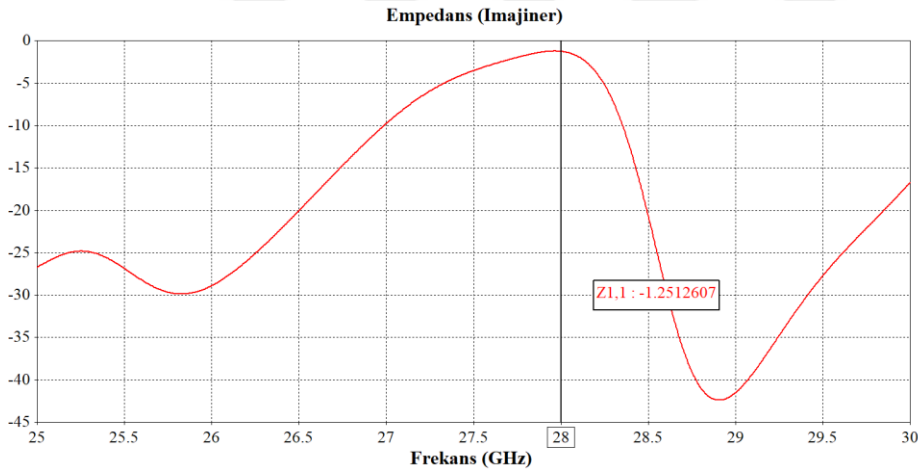


Şekil 4.31: (a) ve (b) Antenin yönleticilik ve kazanç değerleri.

Anten üzerinde bant genişliği ve verimlik parametreleri baz alınarak istenilen iyileşmeler sağlanmıştır. Temel anten parametreleri de Şekil 4.32 ve 4.33'te verilmiştir. Verilen parametreler anten karakteristiğini ve kendi içindeki tutarlılığını göstermektedir.



(a)

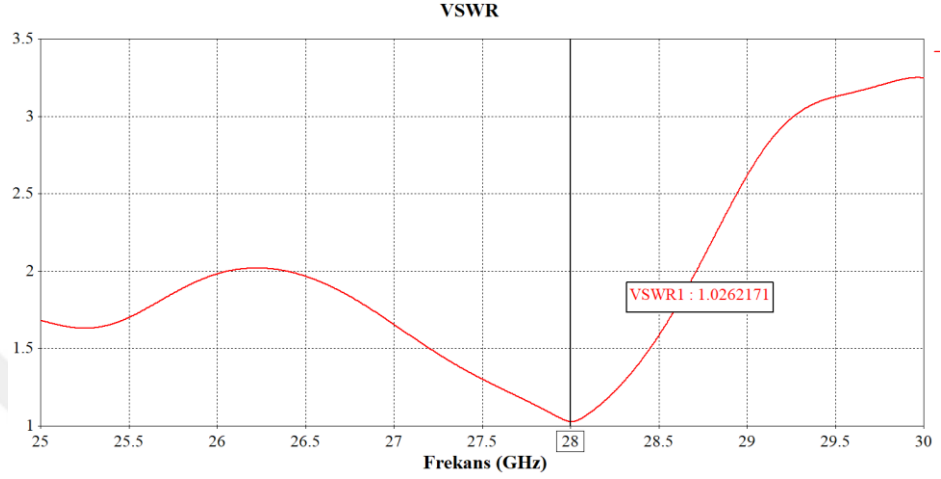


(b)

Şekil 4.32: (a) ve (b) Antenin reel ve imajiner empedans değerleri.

Şekil 4.32'de antenin reel ve imajiner empedans değerleri verilmiştir. Reel empedans değeri yaklaşık 49.36Ω ve imajiner değeri yaklaşık -1.25Ω olarak ölçülmüştür. Referans empedans değeri reel 50Ω ve imajiner 0Ω ile mutlak fark göz ardı edilebilecek seviyede olduğundan yaşanacak güç kaybı ihmal edilebilir. Empedans uyumu anten tasarımının tutarlılığını önemli ölçüde belirler. Referans empedans ile mutlak fark göz ardı edilebilir düzeyde olsa da önceki antenle kıyaslandığında yaşanacak güç kaybında azalma olacağı gözlenmiştir. Her iki antenin de reel kımı 50

Ω civarında olsa da imajiner kısmında 8 Ω 'luk bir iyileşme görülmektedir. Her iki anten için de elde edilen mutlak empedans farkı istenilen seviyededir ve yaşanabilecek güç kaybı göz ardı edilebilecek düzeydedir.



Şekil 4.33: Antenin VSWR parametresi.

Şekil 4.33’de antenin VSWR değerinin rezonans frekansında 1.02 olduğu gösterilmektedir. VSWR değeri 2’nin altında ve ideale yakın olarak elde edilmiştir. Önceki VSWR değeri ile kıyaslandığında 0.2’lik bir iyileşme sağlanmıştır. Her iki anten için de uyumsuzluk kaybı göz ardı edilebilecek seviyelerde olup iyileştirme sonrası uyumsuzluk kaybı daha da azaltılmıştır.

Kafes dizi anten üzerinde kafes boyutları sabit tutularak sayısının artırılmasıyla verimlilik ve bant genişliğinde istenen düzeylerde iyileşmeler sağlanmıştır. Ayrıca empedans uyumsuzluğu ve iletim hattı uyumsuzluğu her iki anten için de göz ardı edilebilecek düzeylerde olmasına rağmen azaltılmıştır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5G teknolojisinin gereklilikleri dikkate alınarak bu çalışma kapsamında çeşitli anten tasarımları incelenmiştir. MIMO, mikroşerit dizi anten ve kafes dizi anten tasarımları üzerine çalışılmıştır. İlk olarak ele alınan MIMO anten tasarımında öncelikle tek elementli mikroşerit anten tasarımı üzerine çalışılmış ve 28 GHz çalışma frekansına sahip anten tasarımı yapılmıştır. Bu anten, element sayısı belirli boyut sınırlamalarında artırılarak MIMO anten formuna getirilerek yine aynı frekansta ışıma yapacak şekilde optimize edilmiş ve kazanç, yönelticilik ve bant genişliği gibi parametrelerde artış sağlanmıştır. İkinci olarak 28 GHz merkez frekanslı ilkinden farklı bir mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Bu anten için de aynı yöntemler izlenerek anten MIMO formuna getirilmiş ve anten parametrelerindeki değişimler tek elementli mikroşerit anten ve çok elementli MIMO anten için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sonrasında 28 GHz çalışma frekansına sahip üçüncü bir mikroşerit anten tasarlanarak bu anten öncelikle 2x1 sonrasında 4x1 dizi anten formuna dönüştürülmüştür. Dizi antendeki eleman sayısını artırdıkça anten kazanç, yönelticilik ve verimlilik değerlerinin arttığı görülmüştür. Buradan yapılan çıkarımla son dönemlerde oldukça sık kullanılan MIMO ve dizi anten tasarımlarının anten parametrelerinde önemli ölçüde iyileşme sağladığı gözlenmiştir. Anten boyutlarının uygulama sınırlamaları nedeniyle belirli ölçüler arasında olması gerekliliği anten parametrelerindeki bu iyileşmeyi de sınırlı hale getirmiştir.

Yüksek kazanç ve verimlilik elde etmek için tasarlanan antenlerden sonra daha farklı bir yaklaşımla mikroşerit kafes dizi anten tasarımına gidilmiştir. Tasarlanan kafes dizi anten üzerinde anten şeklinde optimizasyonlar yapılarak antenin bant genişliği ve verimliliği artırılmıştır. Işıma diyagramında da yan loblarda azalma sağlanmış ve yönlendiriciliği artmıştır. Sonraki çalışmalarda kafes dizi antenin tasarımında ve anten yapımında kullanılan maddelerin çeşitlendirilmesi gibi farklı optimizasyonlarla daha küçük anten boyutlarında daha yüksek kazanç ve verimlilik elde edilmesi planlanmaktadır.



6. KAYNAKLAR

- [1] Mitra, R. N., & Agrawal, D. P. (2015). 5G mobile technology: A survey. *ICT Express*, 1(3), 132-137.
- [2] Study on Implications of 5G Deployment on Future Business Models. (2018). DotEcon Ltd & Axon Partners Group.
- [3] Dahiya, M. (2017). *Need and Advantages of 5G Wireless Communication Systems*. Dept. of Computer Science, Maharaja Surajmal Institute, Janakpuri, India.
- [4] Magotra, N., Qouneh, A., & Burke, J. (2019, August). Internet of Things (IoT) and Electrical and Computer Engineering Curriculums. In *2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)* (pp. 845-847). IEEE.
- [5] WP5D, I. T. U. R. (2017). Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface (s).
- [6] Gupta, P., Malviya, L., & Charhate, S. V. (2019). 5G multi-element/port antenna design for wireless applications: a review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 11(9), 918-938.
- [7] Tighezza, M., Rahim, S. K. A., & Islam, M. T. (2018). Flexible wideband antenna for 5G applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(1), 38-44.
- [8] Khalily, M., Tafazolli, R., Rahman, T. A., & Kamarudin, M. R. (2015). Design of phased arrays of series-fed patch antennas with reduced number of the controllers for 28-GHz mm-wave applications. *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 15, 1305-1308.
- [9] Biglarbegan, B., Fakharzadeh, M., Busuioc, D., Nezhad-Ahmadi, M. R., & Safavi-Naeini, S. (2011). Optimized microstrip antenna arrays for emerging millimeter-wave wireless applications. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 59(5), 1742-1747.
- [10] Jilani, S. F., & Alomainy, A. (2017). A multiband millimeter-wave 2-D array based on enhanced Franklin antenna for 5G wireless systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2983-2986.
- [11] Tehrani, B. K., Cook, B. S., & Tentzeris, M. M. (2015). Inkjet printing of multilayer millimeter-wave Yagi-Uda antennas on flexible substrates. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 143-146.

- [12] Khalid, M., Iffat Naqvi, S., Hussain, N., Rahman, M., Mirjavadi, S. S., Khan, M. J., & Amin, Y. (2020). 4-Port MIMO Antenna with Defected Ground Structure for 5G Millimeter Wave Applications. *Electronics*, 9(1), 71.
- [13] Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y. I., Ullah, A., Abd-Alhameed, R. A., & Noras, J. M. (2019). Multi-band MIMO antenna design with user-impact investigation for 4G and 5G mobile terminals. *Sensors*, 19(3), 456.
- [14] CENİKLİOĞLU, B., & DEVELİ, İ. 5G ve Ötesi Sistemler için Mm-Dalga İletişimi.
- [15] 5G ve Dikey Sektörler Raporu. (2018). Ankara: Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu.
- [16] Arshad, M. J., Farooq, A., & Shah, A. (2010). Evolution and development towards 4th generation (4G) mobile communication systems. *Journal of American Science*, 6(12), 63-68.
- [17] Chen, S., & Zhao, J. (2014). The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication. *IEEE communications magazine*, 52(5), 36-43.
- [18] Mukhopadhyay, S., Agarwal, V., Sharma, S., & Gupta, V. A Study On Wireless Communication Networks Based On Different Generations. *International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)*, e-ISSN, 2455-1392.
- [19] Vora, L. J. (2015). Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G. *International journal of modern trends in engineering and research*, 2(10), 281-290.
- [20] Basavarajappa, V. (2018). A proposal of antenna topologies for 5G communication systems.
- [21] Url-1 <<https://www.wired.com/2010/06/wired-explains-4g/>>, erişim tarihi 18.04.2020
- [22] 5G ve Ötesi Beyaz Kitap. (2018). Ankara: Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu.
- [23] Url-2 <<https://www.cablinginstall.com/home/article/16468526/the-role-of-fiber-in-5g-networks>>, erişim tarihi 28.04.2020
- [24] Ganatra, A. N. (2017). Developments of 5G Technology.
- [25] Kachhavay, M. G., & Thakare, A. P. (2014). 5G technology-evolution and revolution. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 3(3), 1080-1087.
- [26] 5G PPP Architecture Working Group. (2016). View on 5G architecture. *White Paper*, July.
- [27] Url-3 <<http://www.emfexplained.info/?ID=25916>>, erişim tarihi 22.04.2020
- [28] Url-4 <<https://simnovus.com/blog/5g-playground-network-emulation/>>, erişim tarihi 23.04.2020

- [29] Position Paper 5G Applications. (2019). Huawei. Erişim Adresi: https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/public-policy/position_paper_5g_applications.pdf
- [30] Url-5 <<https://letsthinkeasy.com/5g-technology-applications/>>, erişim tarihi 02.05.2020
- [31] Url-6 <<https://www.business.att.com/learn/tech-advice/how-5g-will-impact-the-transportation-industry.html#>>, erişim tarihi 02.05.2020
- [32] Latif, S., Qadir, J., Farooq, S., & Imran, M. A. (2017). How 5g wireless (and concomitant technologies) will revolutionize healthcare?. *Future Internet*, 9(4), 93.
- [33] Url-6 < <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/10/30/previewing-5gs-effect-health-care-industry>>, erişim tarihi 04.05.2020
- [34] Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons.
- [35] Hilbertsson, J., & Magnusson, J. (2009). Simulation and evaluation of an active electrically scanned array (AESA) in Simulink.
- [36] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons.
- [37] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons.
- [38] Orfanidis, S. J. (2002). *Electromagnetic waves and antennas*.
- [39] Mailloux, R., McIlvenna, J., & Kernweis, N. (1981). Microstrip array technology. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 29(1), 25-37.
- [40] Ningsih, Y. K., & Hadinegoro, R. (2014). Low Mutual Coupling Dualband MIMO Microstrip Antenna Parasitic with Air Gap. *Telkomnika*, 12(2).
- [41] Mohammed, A. S., Kamal, S., Ain, M. F., Ahmad, Z. A., Ullah, U., Othman, M., ... & Ab Rahman, M. F. (2019). A Review Of Microstrip Patch Antenna Design At 28 GHz For 5G Applications System. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 8(10).
- [42] RT/duroid 5870 /5880 High Frequency Laminates. (2017). U.S.A: Rogers Corporation.
- [43] Bahl, I. J. (1977). *A Designer's Guide to Microstrip Line*.
- [44] Url-7 <<https://www.farnell.com/datasheets/1644697.pdf>>, erişim tarihi 02.04.2020



ÖZGEÇMİŞ

Ad – Soyad : Alp Eren BAKIR
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.11.1993
E-posta : alperen.bakirr@gmail.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesini, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesini, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yazılım Mühendisi	AKBANK	01.2020 –
Yazılım Mühendisi	TOS Analytics	06.2019 – 01.2020
Yazılım Mühendisi	TRIODOR	04.2019 – 06.2019
Yazılım Mühendisi	VAKIFBANK	12.2018 – 04.2019
Yazılım Mühendisi	INTERTECH	11.2016 – 12.2018