
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

5. NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN MIMO ANTEN TASARIMI

Kutay CÜNERAY

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kutay CÜNERAY

23/06/2023

5. NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN MIMO ANTEN TASARIMI

(Doktora Tezi)

Kutay CÜNERAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Bu çalışmada yeni nesil haberleşme sistemi olan beşinci nesil (Fifth Generation - 5G) uygulamalarında kullanılmak üzere 4 elemanlı çift bantlı çoklu-giriş çoklu-çıkış (Multiple-In, Multiple-Out - MIMO) bir anten önerilmiştir. Önerilen Anten Rogers RT5880 laminantı kullanılarak 60 x 60 x 0,508 mm3 ($5.6\lambda_0$ x $5.6\lambda_0$ x $0.047\lambda_0$, λ_0 en büyük dalga boyudur) boyutlarında tasarlanmıştır. Anten elemanları Hilal desenine sahip olmasıyla birlikte yarık açma, iç besleme (inset fed), çıkıntı ve kusurlu zemin yapısı (Defected Ground Structure - DGS) yöntemleri kullanılarak MIMO anten performansı arttırılmıştır. Önerilen MIMO anten 27.54 - 30.54 GHz ve 37.73 - 38.93 GHz frekans bantlarında 5G iletişim aralıklarında iletişim gerçekleştirmekte olup 28 GHz frekans bandı için 3 GHz, 38 GHz frekans bandında 1.2 GHz 'lık bant genişliğine sahiptir. Önerilen 4 elemanlı MIMO Antenin, antenler arasında 30 dB'den büyük bir izolasyon ile 28 GHz'de %99,5 ve 38 GHz'de %71'lik bir verimlilik sunmaktadır. Ayrıca bu antenin 28 GHz, 33 GHz ve 38 GHz' deki maksimum kazançları sırasıyla 8.38 dB, 7.03 dB ve 8.69 dB olarak elde edilmiştir. Anten, önemli MIMO parametreleri olan çeşitlilik kazancı (Diversity Gain - DG), zarf korelasyon katsayısı (Envelope Correlation Coefficient - ECC), toplam aktif yansıma katsayısı (Total Active Reflection Coefficient - TARC), ortalama etkin kazanç (Average Effective Gain - MEG) ve kanal kapasite kaybı (Channel Capacity Loss - CCL) açısından da incelenmiştir. Önerilen MIMO antenin, DG değeri 9.982'den büyük, ECC değeri 0.0035'ten daha düşük, TARC değeri -15 dBi 'in üzerinde, -3 dB'den düşük MEG oranı ve 0.4 bit/s/Hz 'den çok daha düşük CCL değerlerine sahip olması ile özellikle 5G uygulamaları için uygun standartlara sahip olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu	:	90516
Anahtar Kelimeler	:	5G, Çoklu giriş Çoklu Çıkış, Anten, 28/38 GHz
Sayfa Adedi	:	86
Danışman	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM
İkinci Danışman	:	Dr. Tayfun OKAN

MIMO ANTENNA DESIGN FOR 5TH GENERATION COMMUNICATIONS

(Ph. D. Thesis)

Kutay CÜNERAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

In this study, a 4-element dual-band Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) antenna is proposed to be used in Fifth Generation (5G) applications, which is a new generation communication system. The proposed antenna is designed using Rogers RT5880 laminate with dimensions of 60 x 60 x 0.508 mm^3 ($5.6\lambda_0$ x $5.6\lambda_0$ x $0.047\lambda_0$, λ_0 is the highest wavelength) MIMO antenna performance is increased by using slots, inset fed, protrusion and Defected Ground Structure (DGS) methods. The proposed MIMO antenna communicates in the 27.54 - 30.54 GHz and 37.73 - 38.93 GHz frequency band 5G communication ranges and has a 3 GHz bandwidth for the 28 GHz frequency band and 1.2 GHz for the 38 GHz frequency band. The proposed 4 - element MIMO Antenna offers an efficiency of 99.5% at 28 GHz and 71% at 38 GHz, with greater than 30 dB isolation between antennas. Also, the maximum gains of this antenna at 28 GHz, 33 GHz and 38 GHz are presented as 8.38 dB, 7.03 dB and 8.69 dB, respectively. The antenna is also evaluated for Diversity Gain (DG), Envelope Correlation Coefficient (ECC), Total Active Reflection Coefficient (TARC), Average Effective Gain (MEG), and Channel Capacity Loss (CCL), which are important MIMO parameters. It has been determined that the MIMO antenna has suitable standards especially for 5G applications, DG greater than 9.982, ECC less than 0.0035, TARC above -15 dBi, MEG rate less than -3 dB, and CCL values much lower than 0.4 bit/s/Hz.

Science Code	:	90516
Key Words	:	5G, Multiple Input Multiple Output (MIMO), Antenna, 28/38 GHz
Page Number	:	86
Supervisor	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM
Co-Supervisor	:	Dr. Tayfun OKAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardımlarıyla bana destek olan, çalışmalarımda bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Nursel AKÇAM ve Dr. Tayfun OKAN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme çalışmalarım boyunca kıymetli bilgileriyle beni yönlendiren Sayın Prof. Dr. Murat Hüsnü SAZLI ve Doç. Dr. Özgür ERTUĞ hocalarıma teşekkür ederim. Zaman zaman fikirlerine başvurduğum ve bilgilerini benden hiç esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Suad BAŞBUĞ'a teşekkür ederim. Doktora süreci boyunca bana güç veren oğlum Alp Tuna CÜNERAY ve kıymetli eşim Rahime ŞEN CÜNERAY başta olmak üzere aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tez kapsamında yer alan tasarımların üretimi boyunca desteklerini esirgemeyen Sayın Dr. Galip Orkun ARICAN' a, ASELSAN A.Ş.' ye ve Tasarımın ölçümlerinde bana destek olan başta Prof. Dr. Özlem AYDIN ÇİVİ hocam olmak üzere ODTÜ Ayaslı Araştırma Merkezi çalışanlarına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER iv

ÇİZELGELERİN LİSTESİ vii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ viii

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. 5G HABERLEŞME SİSTEMLERİ 5

2.1. 5G Teknolojisinin Yenilikleri 12

2.1.1.Nesnelerin interneti 13

2.1.2.Makinelerin haberleşmesi 16

2.1.3.Küçük hücreler 18

2.1.4. Masif MIMO sistemler 19

2.1.5.Hüzmeleme 20

2.2. 5G Ağ Mimarisi 21

3. ANTENLER 23

3.1. Temel Anten Parametreleri 24

3.1.1. Işıma örüntüsü 25

3.1.2. Işıma şiddeti 27

3.1.3.Yönlülük 27

3.1.4.Yansıma Katsayısı ve Geri Dönüş Kaybı 28

3.1.5.Verimlilik 29

Sayfa

3.1.6.Kazanç 29
3.1.7. Bant Genişliği 30
3.2. Mikroşerit Anten 31
3.2.1.Mikroşerit antenin avantajları ve dezavantajları 33
3.3. Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri 34
3.3.1.Mikroşerit besleme 35
3.3.2.Koaksiyel besleme 36
3.3.3. CPW besleme 37
3.3.4.Açıklık kuplajlı besleme 38
3.3.5.Yakınlık kuplajlı besleme 38
4. ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ TEKNOLOJİSİ 41
4.1. MIMO Kanal Kapasitesi 43
4.2. MIMO Antenler 44
4.3. Ortak Etkileşim (Mutual Coupling) 45
4.3.1. Dikey yerleşim 46
4.3.2. Metamalzeme yapıları 46
5. 5G UYGULAMALARI İÇİN MİKROŞERİT MIMO ANTEN TASARIMI 49
5.1. Mikroşerit Yama Anten Tasarımı ve Benzetimi Sonuçları 49
5.2. MIMO Anten Tasarımı 55
5.3. Benzetim ve Ölçüm Sonuçları 58
5.3.1. S-parametreleri 59
5.3.2. Kazanç ve Verimlilik 61
5.3.3. Işıma örüntüsü 62
5.3.4. Yüzey akım dağılımı 66
5.4. MIMO Parametre Benzetim ve Ölçümleri 66

Sayfa

5.4.1. Zarf Kolerasyon Katsayısı 67
5.4.2. Çeşitlilik Kazancı 67
5.4.3. Toplam Aktif Yansıma Katsayısı 68
5.4.4. Ortalama Etkin Kazanç 69
5.4.5. Kanal Kapasite Kaybı 70
5.5. Özgül Soğurma Oranı Analizi 71
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 75
KAYNAKLAR 77
ÖZGEÇMİŞ 85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Kablosuz haberleşme sistem nesillerinin özellikleri..... 7

Çizelge 2.2. 5G teknolojisinin 24 GHz üzerinde bulunan frekans bantları 9

Çizelge 2.3. 5G teknolojisi kullanım senaryolarının özellikleri 12

Çizelge 2.4. IoT ağ protokol çeşitlerinin özellikleri 16

Çizelge 2.5. M2M ve IoT teknolojilerinin karşılaştırılması 17

Çizelge 2.6. Küçük hücre yapılarının performans özellikleri 19

Çizelge 3.1. Alttaş çeşitlerinin teknik özellikleri..... 32

Çizelge 3.2. Mikroşerit anten besleme tekniklerinin karşılaştırılması..... 34

Çizelge 5.1. Hilal desenli mikroşerit yama anten parametreleri..... 54

Çizelge 5.2. Önerilen MIMO antene ait parametreler 57

Çizelge 5.3. 28/38 GHz'de insan vücudunun doku özellikleri ve parametreleri..... 72

Çizelge 5.4. Önerilen çalışma ile literatürdeki ilgili çalışmaların karşılaştırılması..... 73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kablosuz haberleşme sistemlerinin evrimi 6
Şekil 2.2. 5G teknolojisinin özellikleri 8
Şekil 2.3. 5G teknolojisi kullanım senaryoları 10
Şekil 2.4. 5G teknolojisi kullanım senaryolarının kullanım amaçları ile eşleştirilmesi . 11
Şekil 2.5. 5G teknolojisinin uygulama alanları 13
Şekil 2.6. Nesnelerin interneti özelliğinin temel unsurla ilişkisi 14
Şekil 2.7. IoT teknolojisinin kullanım alanları 15
Şekil 2.8. IoT ağ protokol çeşitleri 15
Şekil 2.9. M2M uygulama alanları 17
Şekil 2.10. Küçük hücre yapıları 18
Şekil 2.11. Masif MIMO yapılı baz istasyonu 20
Şekil 2.12. Radyo erişim ağ çeşitleri [60] 21
Şekil 3.1. Basit bir kablosuz haberleşme sistemi 23
Şekil 3.2. Elektromanyetik sinyaller 24
Şekil 3.3. Anten çeşitleri 24
Şekil 3.4. 2 Boyutlu ışıma örüntüsü 26
Şekil 3.5. Yönlü bir antenin (a) 2B ışıma örüntüsü (b) 3B ışıma örüntüsü 26
Şekil 3.6. Kablosuz haberleşme sisteminde empedanslar 28
Şekil 3.7. Geri dönüş kaybı grafiği 30
Şekil 3.8. Mikroşerit anten yapısı 31
Şekil 3.9. Mikroşerit anten yaygın kullanılan ışıma desenleri 32
Şekil 3.10. Anten besleme yöntemleri 34
Şekil 3.11. Mikroşerit besleme 35
Şekil 3.12. İçine besleme 36
Şekil 3.13. Koaksiyel besleme 37

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.14. CPW besleme (a) Basit CPW (b) Topraklaştırılmış CPW 38

Şekil 3.15. Açıklık kuplajlı besleme 38

Şekil 3.16. Yakınlık kuplajlı besleme 39

Şekil 4.1. Çok yollu yayılım 41

Şekil 4.2. Noktadan noktaya MIMO Haberleşmesi 42

Şekil 4.3. Ortak etkileşim (a) Anten verici durumda (b) Anten alıcı durumda 45

Şekil 4.4. 2 elemanlı MIMO antende anten elemanlarının dikey yerleşimi 46

Şekil 4.5. DGS tekniği 47

Şekil 4.6. Basit bir EBG yapısı 48

Şekil 4.7. Geleneksel SRR yapıları (a) Dairesel SRR, (b) Dikdörtgen SRR 48

Şekil 5.1. Hilal desen geometrisinin oluşturulması 49

Şekil 5.2. Tek elemanlı antenin performans arttırma aşamaları (a) 1. Adım (A-Anteni), (b) 2. Adım (B-Anteni), (c) 3. Adım (C-Anteni) ve (d) 4. Adım (D-Anteni) 50

Şekil 5.3. A, B, C, D anten tasarımlarının yansıma katsayısı performansı..... 51

Şekil 5.4. Yarıkların ve DGS yapılarının anten performansına etkisi (a) yarık genişliği, (b) yarık uzunluğu, (c) DGS genişliği ve (d) DGS uzunluğu..... 52

Şekil 5.5. Hilal desenli mikroşerit yama antenin (a) Ön yüzeyi ve (b) Arka yüzeyi 53

Şekil 5.6. Hilal desenli mikroşerit yama antenin benzetim programındaki tasarımı 54

Şekil 5.7. Yama antenin yansıma katsayısı..... 55

Şekil 5.8. Yama antenin kazancı..... 55

Şekil 5.9. 4 Elemanlı MIMO Anten geometrisi (a) Ön Zemini (b) Toprak Zemini 56

Şekil 5.10. 4 elemanlı MIMO antenin çıkıntı parametreleri (a) boyu (b) kalınlığı 58

Şekil 5.11. MIMO yapılı antenin benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 60

Şekil 5.12. Üretilen MIMO antenin (a) Geri dönüş katsayıları ve (b) anten elemanları arasındaki izolasyon parametreleri..... 61

Şekil 5.13. Üretilen MIMO Antenin kazanç ve verimlilik grafiği..... 62

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.14. MIMO antenin 28 GHz frekansı phi = 0o'de ışıma örüntüsü (a) benzetim ve ölçüm sonucunun 2 boyutlu karşılaştırılması (b) 3 boyutlu benzetim sonucu..... 63

Şekil 5.15. MIMO antenin 38 GHz frekansı phi = 0o'de ışıma örüntüsü (a) benzetim ve ölçüm sonucunun 2 boyutlu karşılaştırılması (b) 3 boyutlu benzetim sonucu..... 64

Şekil 5.16. MIMO antenin 28 GHz frekansı phi = 90o'de ışıma örüntüsü (a) benzetim ve ölçüm sonucunun 2 boyutlu karşılaştırılması (b) 3 boyutlu benzetim sonucu..... 64

Şekil 5.17. MIMO antenin 38 GHz frekansı phi = 90o'de ışıma örüntüsü (a) benzetim ve ölçüm sonucunun 2 boyutlu karşılaştırılması (b) 3 boyutlu benzetim sonucu..... 65

Şekil 5.18. MIMO antenin ışıma örüntüsünün ön-arka oranı 65

Şekil 5.19. MIMO antenin çalışma frekanslarındaki yüzey akım yoğunluğu (a) 28 GHz (b) 38 GHz 66

Şekil 5.20. Önerilen MIMO antenin 1. elemanının zarf korelasyon katsayısı..... 67

Şekil 5.21. Önerilen MIMO antende 1. elemanının çeşitlilik kazancı..... 68

Şekil 5.22. Önerilen MIMO antenin TARC değerleri 69

Şekil 5.23. Önerilen MIMO antenin ortalama etkin kazancı..... 70

Şekil 5.24. Önerilen MIMO antenin kanal kapasite kaybı..... 71

Şekil 5.25. Önerilen MIMO yapılı antenin SAR analizi (a) 28 GHz (b) 38 GHz 72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Üretilen 4 elemanlı MIMO anten (a) Ön zemini (b) Arka zemini..... 56

Resim 5.2. Anten ölçümlerinde kullanılan RF konnektör 59

Resim 5.3. MIMO yapılı antenin ölçüm düzeneği..... 60

Resim 5.4. Üretilen MIMO antenin yankısız oda ışıma örüntüsü ölçüm düzeneği kurulumu..... 63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
dB	Desibel
dBi	Desibel izotropik
f	Frekans
G	Kazanç
GHz	Giga Hertz
Hz	Hertz
Kg	Kilogram
MHz	Mega Hertz
mm^3	Milimetre küp
ms	Milisaniye
tanδ	Kayıp tanjantı
W	Watt
λ	Dalgaboyu
Ɛ	Dielektrik katsayısı
$Ɛ_r$	Bağıl dielektrik katsayısı
Γ	Yansıma katsayısı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AR	Augmented Reality
BW	Band Width
CPW	Coplanar Waveguide
CCL	Channel Capasity Loss
DG	Diversity Gain
DGS	Defected Ground Structure
EBG	Elektromagnetic Band Gap
ECC	Envelope Correlation Coefficient

Kısaltmalar	Açıklamalar
eMBB	enhanced Mobile Broadband
FBR	Front-Back Ratio
FCC	Federal Communications Commission
HPBW	Half Power Beam Width
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
LOS	Line of Sight
MEG	Mean Effective Gain
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MTM	Metamaterial
M2M	Machine to machine communication
MŞA	Mikroşerit Antenler
mMTC	massive Machine Type Communications
NR	New Radio
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
SAR	Specific Absorption Rate
SNR	Signal Noise Ratio
SIW	Substrate-integrated waveguide
SRR	Split Ring Resonator
TARC	Total Active Reflection Coefficient
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
VR	Virtual Reality
XPR	Cross-Polar Ratio
1G	1. Generation
2G	2. Generation
3G	3. Generation
4G	4. Generation
5G	5. Generation

1. GİRİŞ

Yaşadığımız modern çağda mobil iletişim cihazlarının gelişmesiyle birlikte kablosuz haberleşme sistemleri insanoğlunun vazgeçilmezi haline gelmiştir. Her geçen gün artan kullanıcı sayısı ve mobil haberleşme trafiğindeki artış mevcut haberleşme teknolojisinin sınırlı kanal kapasitesi nedeniyle zorluklar ortaya çıkmaktadır. Artan haberleşme taleplerini karşılamak amacıyla 5. Nesil (5. Generation - 5G) teknolojisi ortaya çıkmıştır. 5G teknolojisi önceki nesil teknolojilerden daha farklı bir yapıya sahip olması nedeniyle önceki nesillerde olduğu gibi ufak birkaç değişiklik gerçekleştirilerek kullanılmaya başlanamamıştır. 5G teknolojisi, yüksek hız, yüksek kanal kapasitesi, düşük gecikme (< 1ms) ve düşük güç tüketimi gibi başlıca özellikler ile birlikte nesnelerin interneti (internet of things - IoT) teknolojisini desteklemektedir [1]. 5G teknolojisinin getirdiği bu yenilikler sayesinde bir bölgesinde yaşayan bir kişi uzak bir bölgesindeki insansız bir cihazı kullanmasına veya bir doktorun dünyanın öbür ucundaki hastasını fiziki olarak yan yana gelmeden rahatlıkla ameliyat edebilme imkânı sağlanmaktadır. Bu değişim insanoğlunun yaşantısında evrim niteliğinde yeniliklere olanak sağlama imkanına sahiptir.

5G teknolojisi fikriyle birlikte ortaya çıkan en önemli başlıklardan biri 5G teknolojisinde kullanılabilecek frekanslardır. Bu nedenle ilk etapta 5G'in frekanslarının belirlenmesi için Uluslararası Telekomünikasyon Birliğinin 2019 yılında gerçekleştirdiği Dünya Radyokomünikasyon Konferansında (WRC -19) 24,25-27,5 GHz, 37-43,5 GHz, 45,5-47 GHz, 47,2-48,2 ve 66-71 GHz bantları 5G için tanımlanmıştır [2]. Bununla birlikte 5G için milimetre dalga (mm-dalga) spektrumu (30-300 GHz) seçilmiştir. Bu seçimin en büyük nedeni Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, ISM ve mobil iletişim için spektrumun sadece alt tarafında çok düşük bir kısmının kullanılıyor geriye kalan kısımlarının frekans bantlarının 5G için elverişli olmasıdır [3]. Atmosferik ve yağmur emilimi, büyük yol kaybı ve engellerin etrafındaki düşük kırınım gibi dezavantajlar mm-dalga spektrumunun bugüne kadar kullanılmamasının başlıca ana nedenlerindendir [4].

4. nesil (4. Generation - 4G) teknolojisinde ortaya çıkan sınırlı kanal kapasitesi gibi birçok sorunu ortadan kaldırmak için araştırmacıların ilgisini çeken Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output - MIMO) teknolojisi 5G ile birlikte araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. MIMO teknolojisinin 5G ile birlikte ilgi odağı olmasının en önemli nedeni çoklu iletişim kanalına sahip olduğundan dolayı kanal kapasitesinin kolaylıkla

arttırılabilmesinin yanı sıra geniş bant, yüksek veri hızı, yüksek kazanç ve düşük enerji tüketimi gibi önemli özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır [5-7]. MIMO teknolojisinin bu özellikleri sayesinde mm-dalga spektrumunun ve 5G teknolojinin eksiklikleri ortadan kaldırılacak ve bu sayede kablosuz haberleşme ve internetin yanı sıra IoT ve Otonom teknolojisi gibi uygulamalarda desteklenmektedir. 5G teknolojisinde kullanılan mm-dalga spektrumuyla birlikte dalga boylarının oldukça düşük olması sebebiyle MIMO yapılarda MIMO elemanları arasındaki ortak etkileşim gibi bazı kritik kısıtlamalar ön plana çıkmıştır [8]. Bu kısıtlamaları ortadan kaldırmak ve anten performansını arttırmak amacıyla Elektromanyetik bant aralığı (Electromagnetic Band Gap - EBG), Kusurlu Zemin Yapısı (Defected Ground Structure - DGS), Alt Tabaka Entegre Dalga Kılavuzu (Substrate integrated waveguide - SIW), Bölünmüş Halka Rezonatörü (Split Ring Resonator - SRR) gibi popüler Metamateryal (MTM) yöntemleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir [9-12]. Bu çalışmalar içinde DGS [12,13] ön plana çıkmaktadır.

5G teknolojisinin anten yapılarında da geleneksel mikroşerit yama antenler basit yapı, kolay kullanım ve çok çeşitlilik gibi özelliklerinden dolayı en çok tercih edilen anten yapılarından biridir. Bu avantajlarına rağmen mikroşerit yama antenlerin kullanımındaki en önemli sorun yama antenlerin çalışma performanslarının (bant genişliği, kazanç v.b.) sınırlı olmasıdır. 5G ile birlikte mikroşerit yama antenlerin çalışma performanslarını arttırmak amacıyla MIMO yapıların kullanılması ön plandadır [6,12]. MIMO anten yapıları ile birlikte antenin bant genişliği, ışıma ve kazanç gibi önemli parametreleri iyileştirilebilmektedir. Ayrıca MIMO antenlerde DGS [9] gibi yöntemlerin yanı sıra anten elemanları üzerinde açılan yarıklar [13, 14] gibi yöntemlerde yama anten sınırlarını azaltmak ve anten performansını arttırmak için büyük bir ilgi görmektedir. DGS, özellikle yüksek frekans uygulamalarında anten elemanları arasındaki karşılıklı bağlantıyı en aza indirmek, çapraz polarizasyonu baskılamak ve anten kazancını arttırmak amacıyla kullanılan basit yapısından kaynaklı olarak popüler tekniklerden biridir [9,11,12]. Ayrıca yapılan literatür çalışmalarında anten performansını etkileyen faktörlerden birinin de anten besleme yöntemini olduğu anlaşılmaktadır [15]. Buna göre gerçekleştirilecek anten tasarımlarında, antenin kullanım amacına uygun olarak doğru besleme yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Mikroşerit ve Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu (Coplanar Waveguide - CPW) besleme yöntemleri kolay kullanımlarından kaynaklı olarak en çok tercih edilen besleme yöntemlerindendir.

Son yıllarda 5G uygulamaları için gerçekleştirilen yama anten çalışmaları literatürde belirtilmiştir [16-41]. 5G bantlarında yapılan araştırmalara göre frekans bantları temel olarak 6 GHz altı [16, 17] ve mm-dalga bantları [18-41] olmak üzere 2 kısma ayrılmaktadır. En çok ilgi çeken mm-dalga bantları 28 GHz ve 38 GHz bantlarıdır. [18-20]'deki çalışmalar 28 GHz frekans bandında, [21, 22]'deki çalışmalar 38 GHz frekans bandında çalışan tek yapılı antenlerdir. Bu çalışmaların en büyük eksiklikleri hem bir frekans bandında çalışmalarından ötürü frekans sınırının olması hem de bir anten elemanı ile çalışmalarından ötürü anten kazançlarının düşük olmasıdır. [23-26]'deki çalışmalar MIMO yapısına sahip olmasına rağmen tek bir frekans bandında çalıştıklarından dolayı sınırlı bir frekans spektrumuna sahip olmaları gibi bir dezavantaja sahiptirler. [27-41]'deki çalışmalar incelendiğinde bu çalışmaların 28/38 GHz frekans bantlarında iletişim gerçekleştiren çalışmalar olduğu belirtilmektedir. [27-29]'deki çalışmalar 28/38 GHz frekanslarında çift bantlı çalışan tek yapılı çalışmalardır. Bu çalışmaların dezavantajı tasarımlarında MIMO yapısının kullanılmamasından dolayı bant genişlikleri ve kazançlarının MIMO yapılı tasarımlara oranla düşük olmasıdır. Referans [30-41]'de 28/38 GHz frekanslarında çalışan çift bantlı MIMO yapılı antenler bildirilmiştir. [30-34]'deki çalışmalar 2 elemanlı düşük kazançlı MIMO antenlerdir. [35-41]'deki çalışmalar 28/38 GHz frekans bandında çalışan 4 elemana sahip MIMO antenlerdir. [35]'deki çalışmada 75 x 100 x 0,508 mm^3 boyutlarında 28 GHz'de 0,7 GHz bant genişliği 7,6 dB kazanca, 38 GHz'de 12 GHz'lik geniş bir bant genişliğine ve 8,11 dB'lik kazanca sahip yama üzerinde yarıklar oluşturularak tasarlanmış bir anten bildirilmiştir. Çalışma [36]'da 28 GHz'de 3,42 GHz bant genişliği, 38 GHz'de 1,45 GHz bant genişliğine ve iki frekansta da 9 dBi kazanca sahip bir Yagi-Uda anteni bildirilmiştir. 55 x 110 x 0,508 mm^3 boyutlarında 28 GHz'de 1,06 GHz bant genişliği ve 7,95 dB kazanca, 38 GHz'de 1,43 GHz bant genişliği ve 8,27 dB kazanca sahip toprak zeminde DGS yöntemi kullanılmış inset fed besleme uygulanarak üretilmiş anten çalışması [37]'de rapor edilmiştir. Referans [38]'de 28 GHz'de 1,2 GHz bant genişliği ve 7,9 dB kazanca, 37 GHz'de 2 GHz bant genişliği ve 13,7 dB kazanca sahip 4x2'lik bir dizi yapısına sahip anten bildirilmiştir. Inset fed beslemeli ve besleme yolu üzerinde çıkıntılara sahip kare desen yamalı sırasıyla 28 ve 38 GHz frekans bantlarında 1,39 GHz ve 3,33 GHz bant genişliğine sahip 5,5 dBi'lik düşük kazançlı anten çalışma [39]'da bildirilmiştir. Çalışma [40]'da inset fed beslemeli ve oluklu bir toprak zemine sahip eliptik bir mikroşerit yama anteninin 28/38GHz frekans bandında sırasıyla 3 – 3,2 GHz'lik bant genişliği, 6,8 - 5 dBi'lik düşük kazanca ve % 65 - % 49 gibi düşük verime sahip olduğu rapor edilmiştir. Referans [41]'de 50 x 50 mm^2 boyutlarında iki adet eşmerkezli dairesel yarık halka radyatöre sahip 28 GHz frekans

bandında 4 GHz bant genişliği ve 7,8 dBi kazanca, 38 GHz frekans bandında 3 GHz bant genişliği ve 4,4 dBi'lik düşük kazançlı anten rapor edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında mm-dalga 5G frekans bantlarında (28/38 GHz) MIMO özelliklerine sahip 4 elemanlı bir anten yapısı ve analizi sunulmuştur. Önerilen anten 60 x 60 x 0.508 mm^3 (5.6λ x 5.6λ x 0.047λ, λ dalga boyunda en düşük çalışma frekansını belirtmektedir) boyutlarında Rogers RT5880 alttaşı kullanarak inset besleme yöntemi kullanılarak tasarımı gerçekleşmiştir. Anten performansını arttırmak amacıyla yarık açma, çıkıntı ve DGS teknikleri kullanılmıştır. Bu tekniklerle birlikte literatürdeki çalışmaların sonuçlarına oranla daha iyi bir performansa sahip anten tasarımı elde edilerek bu tez çalışmasında önerilmektedir. Önerilen MIMO Antenin benzetim sonuçları CST Microwave Studio benzetim programı kullanılarak tasarımı gerçekleştirilmiştir.

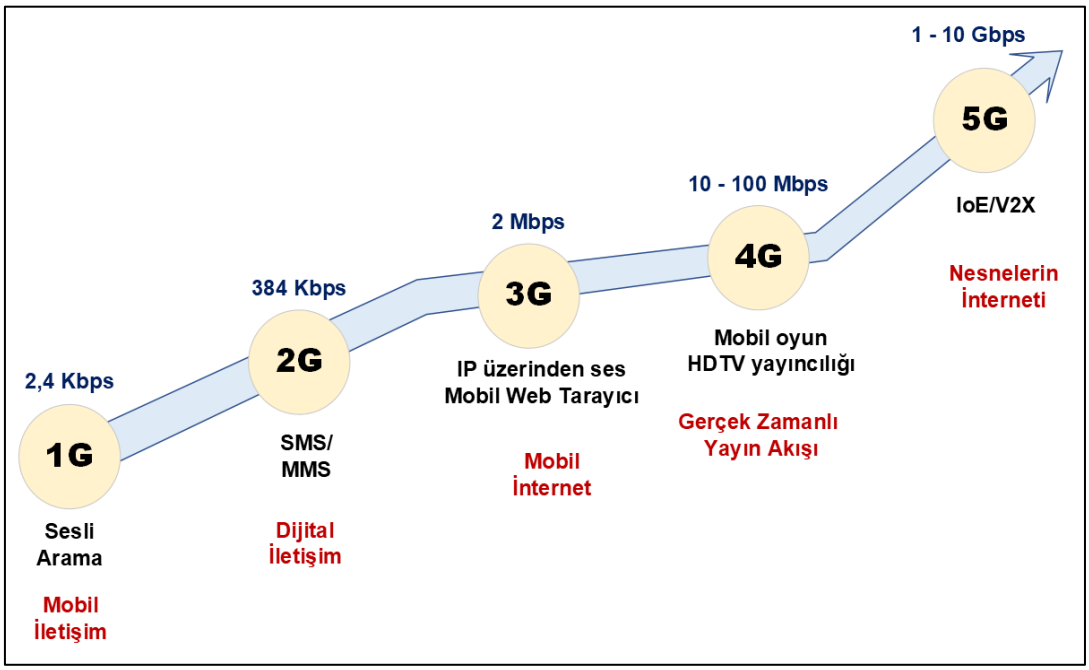
Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde tez içeriğinde yer alan konularla ilgili gerçekleştirilen literatür çalışmaları yer almaktadır. 2. bölümde 5G teknolojisi anlatılmaktadır. 5G teknolojisinin özellikleri, getirdiği yenilikler ile birlikte avantajları açıklanmıştır. 3. Anten çalışmaları hakkında bilgi verilmektedir. 4. Bölümde MIMO teknolojisi hakkında bilgi verilmektedir. 5. Bölümde 5G uygulamalarında kullanılmak üzere 28/38 GHz frekans bantlarında çalışan anten tasarımı anlatılmıştır. Son olarak 6. Bölümde de sonuç ve öneriler kısmı yer almaktadır.

2. 5G HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Haberleşme, insanoğlunun birlikte yaşamaya başladığı günden beri yaşamında çok önemli ve kritik bir rol üstlenmiştir. İlk olarak duvarlara çizimle başlayan haberleşme, ateşin icadıyla birlikte gelişerek duman ile uzaktan haberleşme imkânı gerçekleşmiştir. Uzaktan haberleşme, Mors Alfabesi ve sonrasında Alexander Graham Bell'in telefon icadıyla birlikte artık insanoğlunun vazgeçilmez bir iletişim aracı haline gelmiştir. O günden günümüze kadar haberleşme sistemleri gelişmeye devam etmektedir. Günümüzde haberleşme sistemlerinin gelişmesiyle birlikte kullanılan cihaz ve kullanıcı sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu gelişmenin doğal bir sonucu olarak haberleşme trafiği ve veri miktarı da hızlı bir şekilde artış göstermektedir. 2009 yılında yaklaşık 35 milyon mobil internet kullanıcısı bulunurken, 2022 yılında bu sayı yaklaşık 5,31 milyar kullanıcıya çıkmıştır [42]. Kullanıcı sayısının artmasıyla birlikte yalnızca Türkiye'de 2009 yılının 4. çeyreğinde mobil internet kullanım miktarı 1080 TByte iken, 2022 yılının 3. çeyreğinde mobil internet kullanım miktarı 3 143 336 TByte olarak belirlenmiştir [43].

Haberleşme sektöründe hızla artan kullanıcı sayısı ve kullanıcıların internet talebini karşılamada 4G yetersiz kalmıştır. Hızla artan bu talebi karşılamak amacıyla gerçekleştirilen araştırmaların bir sonucu olarak Federal İletişim Kurulu (Federal Communications Commission - FCC)'nin 2016 yılında yaptığı duyuruyla birlikte 5G haberleşme sistemleri ön plana çıkmıştır. 5G, önceki nesil haberleşme sistemlerine oranla çok daha fazla frekans kanalı ve bant genişliği sunmaktadır. Buna ek olarak 1 ms altında gecikme süresi ve IoT gibi özellikleri 5G'yi önceki nesillerden büyük ölçüde ayırmaktadır [1]. Şekil 2.1'de kablosuz haberleşme sistemlerinin evrimi gösterilmektedir. 1980'lerde başlayan 1. nesil kablosuz iletişim sistemi, 2020'de 5G kablosuz iletişim olarak hızlı bir şekilde gelişerek devam etmektedir. Çizelge 2.1'de kablosuz haberleşme sistem nesillerinin özellikleri bakımından karşılaştırılması verilmektedir. Çizelgeden anlaşılacağı üzere 5G teknoloji, mobil iletişim teknolojisindeki gelişmeleri tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu terim, kablosuz iletişim teknolojisinin gelişmesindeki dönüşümleri belirtmek için kullanılır. 1. nesil (1. Generation - 1G) teknolojisi analog ses sinyalleri taşırken, 2. nesil (2. Generation - 2G) teknolojisi dijital sinyaller taşımaya başlamıştır. 3. nesil (3. Generation-3G) teknolojisi, veri transfer hızlarını artırmış ve internet erişimini daha hızlı hale getirmiştir. 4G teknolojisi, daha yüksek hızlarla veri transferi sağlamak ve daha geniş bir kapsama alanı sunmak için tasarlanmıştır. 5G teknolojisi ise daha yüksek hızlar, daha düşük gecikme süreleri ve daha

fazla cihaz bağlantısını desteklemek için tasarlanmıştır. Bu teknoloji, akıllı şehirler, akıllı evler, akıllı arabalar, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik uygulamaları gibi birçok alanda kullanılabilir [44].



Şekil 2.1. Kablosuz haberleşme sistemlerinin evrimi

5G temelde, daha fazla kapasite sunmayı amaçlayan ve şu ana kadar mevcut olan enerjiyi daha verimli bir şekilde kullanıcıların veya bireylerin ihtiyaçlarına yüksek oranda cevap vermeyi amaçlayan yeni nesil mobil ve kablosuz haberleşme sistemidir. Tüm bunlar, kaç kullanıcının aynı anda bağlandığına ve bağlantıda veya hızda herhangi bir düşüş olmadan bağımsız olarak sağlanması hedeflenmiştir [45]. 5G sistemleri, önceki nesil sistemlerden önemli ölçüde daha iyi performans göstermelidir. Şekil 2.2'de 5G teknolojisinin temel özellikleri gösterilmektedir. 5G teknolojisinin sahip olması gereken özellikler aşağıdaki belirtilmektedir [46];

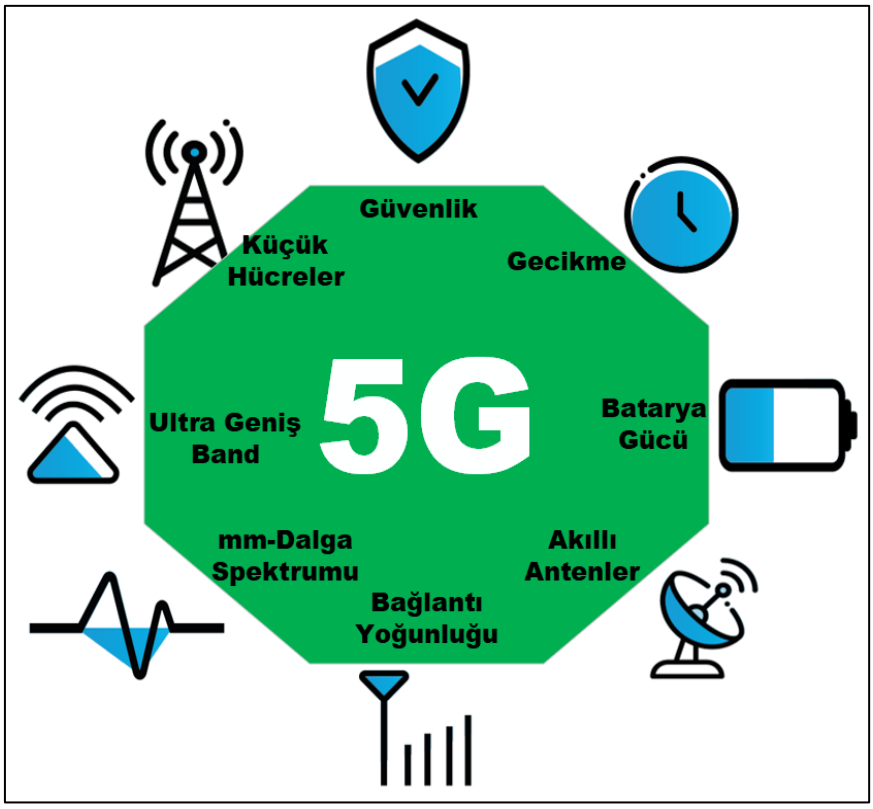
- Kullanıcı tarafından deneyimlenen veri hızı: 0.1–1 Gbps,
- Bağlantı yoğunluğu: kilometre kare başına bir milyon bağlantı,
- Uçtan uca gecikme: milisaniye düzeyinde,
- Trafik hacmi yoğunluğu: kilometre kare başına onlarca Gbps,
- Hareketlilik: saatte 500 km'den fazla,
- En yüksek veri hızı: onlarca Gb/sn,

- Güvenlik: Yüksek güvenlik.

Çizelge 2.1. Kablosuz haberleşme sistem nesillerinin özellikleri

	1G	2G	3G	4G	5G
Yıl	1980'ler	1991	1998	2008	2020
Sistem	Analog	Sayısal	Sayısal	Sayısal	Sayısal
Standartlar	MTS, AMTS, IMTS	GSM, GPRS, EDGE	WCDMA, UMPS, CDMA-2000	IPv6, LTE, WiMAX	NR (5G)
Çoğullama	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Uygulama	Analog Ses	Dijital Ses + SMS	Yüksek kaliteli Ses + SMS + İnternet	Yüksek kaliteli Ses + SMS + İnternet + Video	Yüksek kaliteli Ses + SMS + İnternet + UHD, 3D video + IoT
Hız	2.4 KB/sn	0.1 MB / sn	8 MB/sn	15 MB/sn	1-10 GB/sn
Gecikme	> 1000 ms	600 – 750 ms	40-50 ms	10 ms	< 1 ms
Bant Genişliği	< 30 kHz	< 200 kHz	< 20 MHz	< 100 MHz	500 MHz – 1 GHz
Özellikler	Kararsız, Zayıf Ses Kalitesi	Daha kaliteli ses, Daha çok kullanıcı, Daha güvenli	Çoklu ortam veri, internet, yer belirleme	IP çekirdek, video ve geniş bant veri	Ultra Az gecikme ve güvenlik, Ağ bölümleme, IoT, M2M

5G haberleşme sistemleri için gerçekleştirilen araştırmalar sonucu gelişen haberleşme teknolojisinde 6 GHz altındaki frekans bantlarında kıt bir kaynak olduğu için, 5G'nin mm-dalga frekans spektrumunda uygulanmasına karar verilmiştir [47]. Bunun en önemli nedenleri veri iletişiminde gerekli olan yüksek hız ve düşük gecikme süresidir. Mm-dalga spektrumunun önemli bir özelliği, kablosuz ağların kapasitesini artırmak için ideal olan geniş bant genişliklerini ve yüksek veri hızlarını destekleme potansiyelidir. Mm-dalga bantları 300 GHz'e kadar uzansa da, 5G uygulamaları için 24 GHz' den 100 GHz' e kadar olan bantların kullanılması bekleniyor. 100 GHz'e kadar 5G için düşünülen mm-dalga bantları, daha yüksek veri çıkışı için bantları bir araya getirmeye gerek kalmadan bazı durumlarda 500 MHz ve hatta 1 GHz boyutundaki kanal bant genişlikleriyle birlikte indirme hızının 20 Gbit/sn ve gecikme süresinin birkaç milisaniyenin altına düşürülmesi hedeflenmektedir [1, 46].



Şekil 2.2. 5G teknolojisinin özellikleri

2015 yılında Cenevre'de gerçekleştirilen Dünya Radyo Haberleşme Konferansı (World Radio Communications Conference –WRCC)'de 5G için mm-dalga frekans spektrumunun kullanılmasını ve kullanılacak olan frekans bantlarını 24,25 - 27,5 GHz, 37 - 43,5 GHz, 45,5 - 47 GHz, 47,2 - 48,2 GHz ve 66 - 71 GHz olarak belirlenmiştir [2]. Bunun Üzerine Bilgi ve Teknoloji Kurumu (BTK) ülkemizde 5G'ye tahsis edilmek üzere çalışma yapılacak frekans band aralıklarını; 24,25 – 27,5 GHz, 31,8 – 33,4 GHz, 37 - 40.5 GHz, 40,5 – 42,5 GHz, 42,5 – 43,5 GHz, 45,5 - 47 GHz, 47 – 47,2 GHz, 47,2 – 50,2 GHz, 50,4 – 52,6 GHz, 66 - 76 GHz ve 81 - 86 GHz olarak belirlemiştir [9]. 5G Yeni Radyo (New Radio - NR), mm-dalga spektrumunu kullanan ilk mobil teknoloji neslidir. 5G bantları genel olarak 6 GHz'e kadar (FR1) olan ve 24 GHz üzeri (FR2) olmak üzere iki ana bölüme ayrılır. FR2 bantları ve bantların genel özellikleri hakkında bilgiler Çizelge 2.2'de belirtilmektedir. Çizelgeden görüldüğü üzere N257, N258, N259, N260 ve N261 olmak üzere 5 adet frekans bandı mevcuttur. Frekans bantları farklı frekans bandı, yükleme/indirme frekansları ve bant genişliğine sahiptir.

Çizelge 2.2. 5G teknolojisinin 24 GHz üzerinde bulunan frekans bantları

FR2 Frekans Bantları	Frekans Bandı	Yükleme/İndirme Frekansları	Bant Genişliği	Çoklama Tipi
N257	28 GHz	26.5 - 29.5 GHz	3 GHz	TDD
N258	26 GHz	24.250 - 27.5 GHz	3.250 GHz	TDD
N259	-	39.5 - 43.5 GHz	4 GHz	TDD
N260	39 GHz	37 - 40 GHz	3 GHz	TDD
N261	28 GHz	27.5 - 28.35 GHz	850 MHz	TDD

5G frekans bantlarında kullanılacak olan mm – dalga spektrumu büyük bir potansiyel olsa da bazı dezavantajları bulunur. Mm – dalga bandının elverişli olabilmesi için aşağıdaki dezavantajlarının ortadan kaldırılması gerekir [48].

Yol kaybı

Friis yasası göz önüne alındığında taşıyıcı sinyalin frekansı arttıkça yol kaybı artar. Bu nedenle 3 GHz taşıyıcı sinyal frekanslarından 40 – 50 GHz taşıyıcı frekanslarına çıktıkça yol kaybı da artar.

Kırınım ve blokaj

Frekans arttıkça dalga boyu küçüleceğinden dolayı elektromanyetik dalgaların dalga boylarından daha yüksek fiziksel engellerde kırılma zorluğu yaşanır. Ayrıca mm-dalga bantları gölgelenme ve blokaj kayıplarından daha fazla etkilenir.

Yağmur zayıflaması

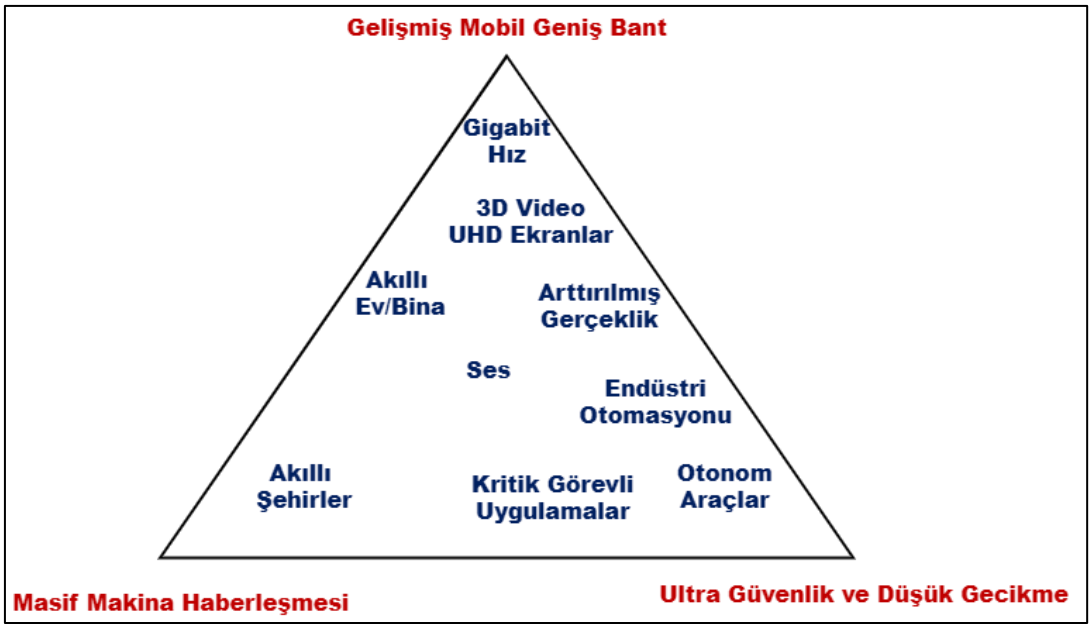
Mm-dalga spektrumundaki sinyaller yağmurdan daha fazla etkilenir ve yağmur kaybı daha yüksek olur.

Atmosferik emilim

Mm – dalga spektrumundaki sinyaller atmosferik emilimden daha yüksek oranda etkilenir.

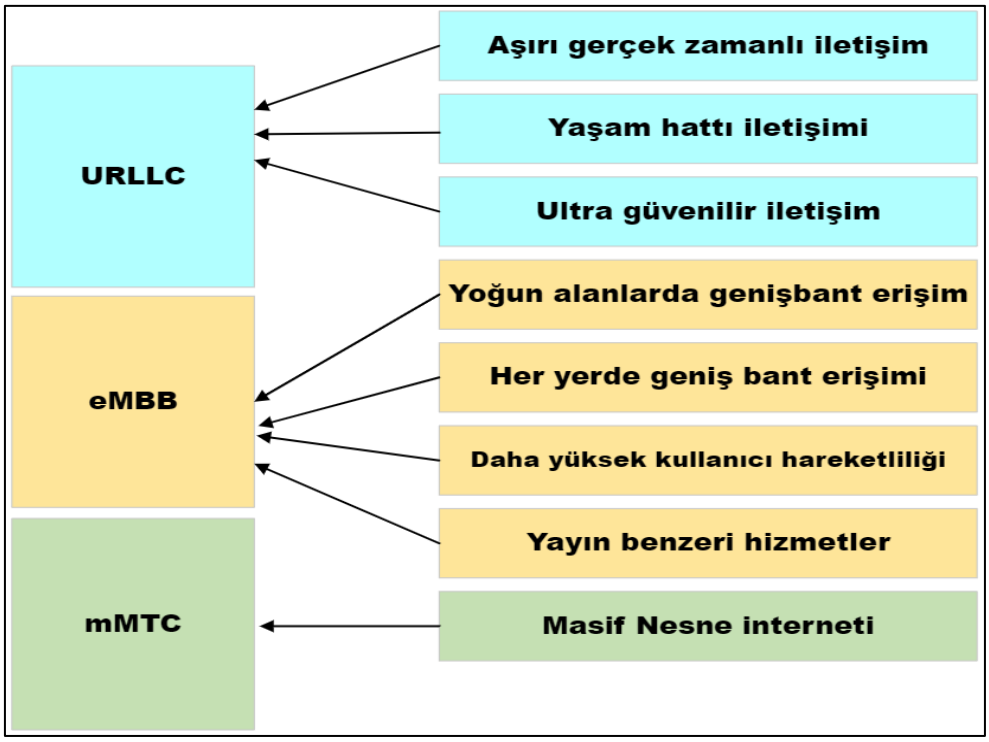
Yeşillik kaybı

Ağaçlık alanlardan meydana gelen bu kayıp taşıyıcı frekans 60 GHz seviyelerine çıktıkça 3 GHz seviyelerinden çok daha yüksek olur.



Şekil 2.3. 5G teknolojisi kullanım senaryoları

Mobil haberleşmedeki ihtiyaçlar göz önüne alındığında kullanım durumu özellikleri bakımında 5G teknolojisi üç farklı kullanım senaryosu başlığı altında gruplandırılmıştır [49, 50]. Bu senaryo başlıkları, gelişmiş mobil geniş bant (enhanced mobile broadband - eMBB), büyük makine tipi iletişim (large machine type communication - mMTC) ve ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (ultra-reliable and low-latency communication URLLC) olarak belirlenmiştir. Kullanım senaryolarının gereksinimlerini karşılamak için en yüksek veri hızı, gecikme süresi ve bağlantı yoğunluğu vb. dahil olmak üzere sekiz temel yetenek tanımlanmıştır [1]. Şekil 2.3'te Sekiz farklı kullanım senaryosu ailesinin kullanım senaryoları ile eşleştirilmesi verilmektedir. Kullanım senaryolarına bağlı olarak, ofis gibi iç mekân senaryoları için, stadyumlar ve/veya konser alanları gibi yoğun kentsel bölgeler, daha geniş alana yayılmış kırsal bölgeler ve hızlı trenler gibi yüksek hızların gerektiği farklı senaryolar olmak üzere birkaç tipik dağıtım senaryosu belirtilmiştir. Şekil 2.4'te 5G teknolojisi için belirlenen 3 temel senaryo ailesinin temel kullanım amaçları ile eşleşmesi gösterilmektedir. Çizelge 2.3'te belirlenen 3 senaryonun genel özellikleri açısından karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 2.4. 5G teknolojisi kullanım senaryolarının kullanım amaçları ile eşleştirilmesi

eMBB

Mobil geniş bant, çoklu ortam içeriğine, hizmetlere ve verilere erişim için insan merkezli kullanım durumlarını ele alır. Mobil geniş bant talebi artmaya devam edecek ve bu da gelişmiş mobil geniş bant ihtiyacına yol açar. Gelişmiş mobil geniş bant kullanım senaryosu, gelişmiş performans ve giderek daha sorunsuz bir kullanıcı deneyimi için mevcut mobil geniş bant uygulamalarına ek olarak yeni uygulama alanları ve gereksinimleri ile birlikte gelmektedir.

URLLC

Bu kullanım senaryosu, aktarım hızı, gecikme süresi ve kullanılabilirlik gibi özellikler için katı gereksinimlere sahiptir. Bazı örnekler arasında endüstriyel üretim veya üretim süreçlerinin kablosuz kontrolü, uzaktan tıbbi cerrahi, akıllı şebekede dağıtım otomasyonu, nakliye güvenliği vb. sayılabilir.

mMTC

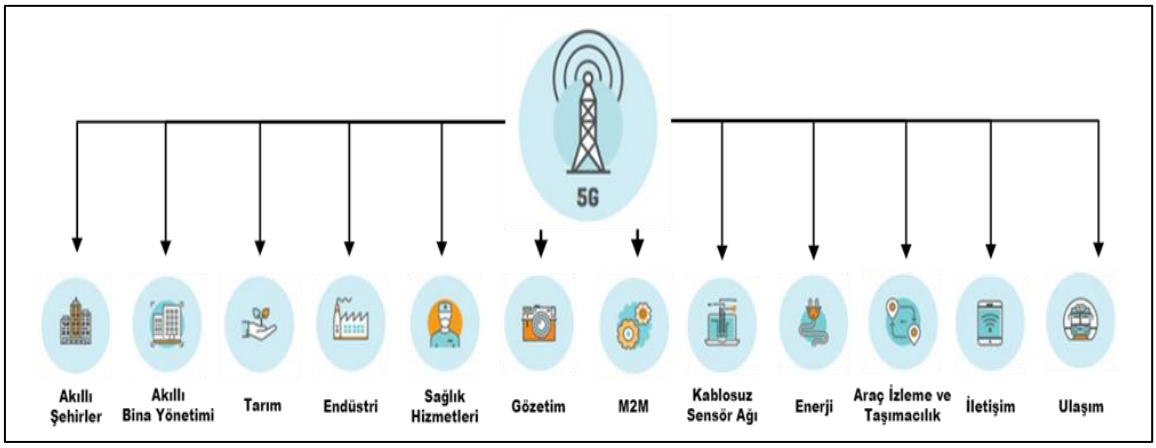
Bu kullanım durumu, tipik olarak nispeten düşük hacimli gecikmeye duyarlı olmayan veri ileten çok sayıda bağlı cihaz ile karakterize edilir. Cihazların düşük maliyetli olması ve çok uzun pil ömrüne sahip olması gerekir.

Çizelge 2.3. 5G teknolojisi kullanım senaryolarının özellikleri

	eMBB	mMTC	URLLC
Tepe veri hızı	Yüksek	Düşük	Düşük
Kullanıcı Deneyimli Veri Hızı	Yüksek	Düşük	Düşük
Spekturum Verimliliği	Yüksek	Düşük	Düşük
Hareketlilik	Yüksek	Düşük	Yüksek
Gecikme	Orta	Düşük	Yüksek
Bağlantı Yoğunluğu	Orta	Yüksek	Düşük
Ağ Enerji Verimliliği	Yüksek	Orta	Düşük
Alan Trafik Kapasitesi	Yüksek	Düşük	Düşük

2.1. 5G Teknolojisinin Yenilikleri

5G'nin en büyük yeniliği, multimedya, sanal gerçeklik (Virtual Reality - VR) ve artırılmış gerçeklik (Augmented Reality - AR), makineden makineye (Machine to machine - M2M) ve IoT, otomotiv uygulamaları gibi çeşitli sektörlere, alanlara ve uygulamalara hizmet eden birden çok ağın birbirine entegre edilmesidir [1]. Şekil 2.5'te 5G teknolojisinin uygulama alanları gösterilmektedir. 5G'yi etkinleştiren çeşitli yenilikler arasında, ana gereksinimlerden ve gerçekliklerden biri, ultra yüksek hızlı erişim ve ana taşıyıcı sistemler olarak hizmet etmek için ağ yoğunlaştırma ve masif MIMO ile birleştirilmiş mm-dalga spektrumunun kullanılmasıdır. Akıllı şehir, vb. 5G uygulamalarının çeşitliliği ve veri hızı, gecikme süresi, güvenilirlik ve diğer parametreler açısından bunlarla ilgili hizmet gereksinimleri, operatörlerin çeşitli 5G ağları seti sağlama zorunluluğuna yol açar [48].

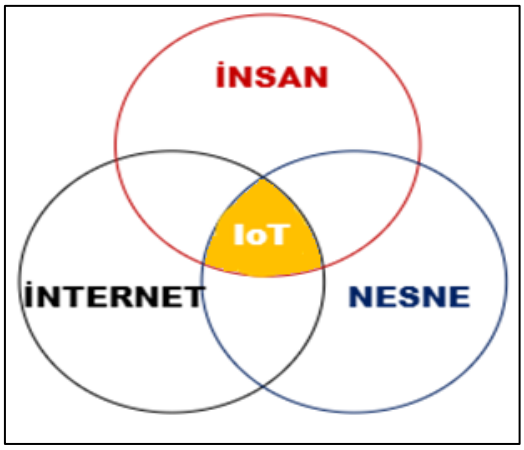


Şekil 2.5. 5G teknolojisinin uygulama alanları

5G Ağları, Mobil İnternet ve IoT için artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, uzaktan bilgi işlem, e-sağlık hizmetleri, otomotiv sürüşü vb. gibi çok sayıda kullanım durumu vardır. Hiç şüphesiz bu yenilikler içinde IoT ve M2M çok özel bir yeri bulunmaktadır.

2.1.1. Nesnelerin interneti

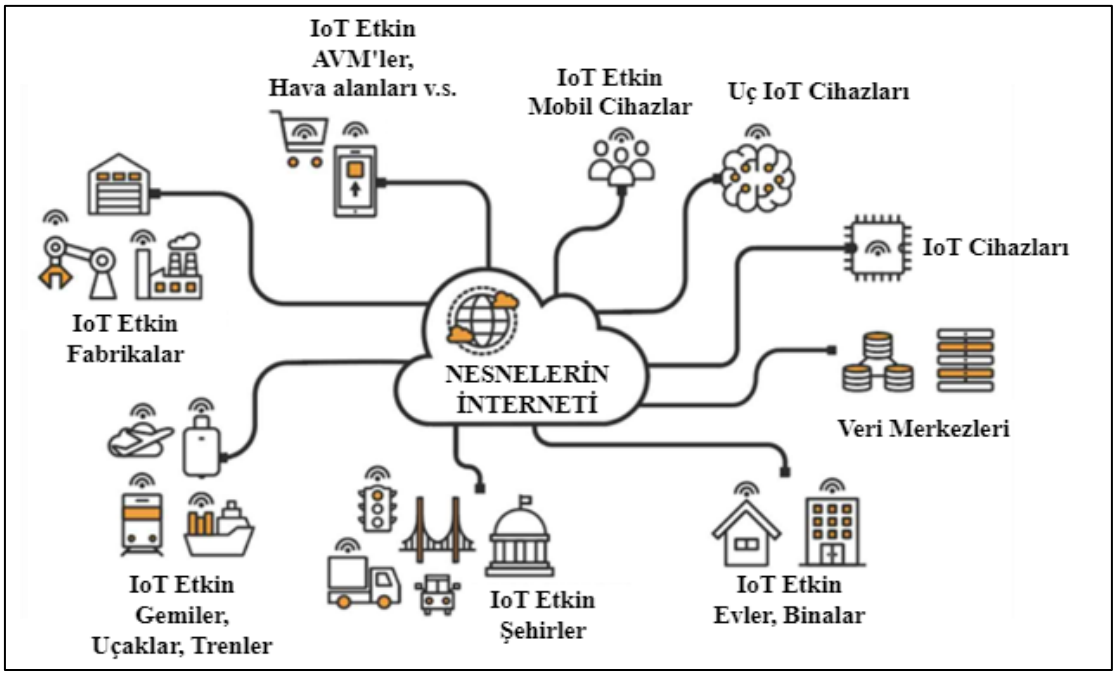
İnternetin yaygınlaşmasıyla birlikte cihazlara uzaktan erişim ve kontrol fikri ortaya çıkmış ve bilim insanları bu fikir üzerine çalışmalar yapmaktadırlar. Son yıllardaki haberleşme teknolojisinde; bulut bilişim, 5G teknolojisi v.b. büyük yenilikler görülmektedir. 5G teknolojisi ve bulut bilişim ile birlikte cihazların uzaktan kontrolü önemli bir konu haline dönüşmüştür. IoT, standart iletişim protokollerinin kullanılarak benzersiz bir şekilde adreslenebilen ve nesnelerin birbirlerine bağlanmasıyla oluşan dünya çapında bir ağ olarak ifade edilmektedir [51]. Bu ağın özelliği bulut bilişim sayesinde insanların nesnelere her zaman ve her yerde bağlanmasıdır. Şekil 2.6'da IoT fikrinin ilişkili olduğu üç temel unsur ilişkisi gösterilmektedir.



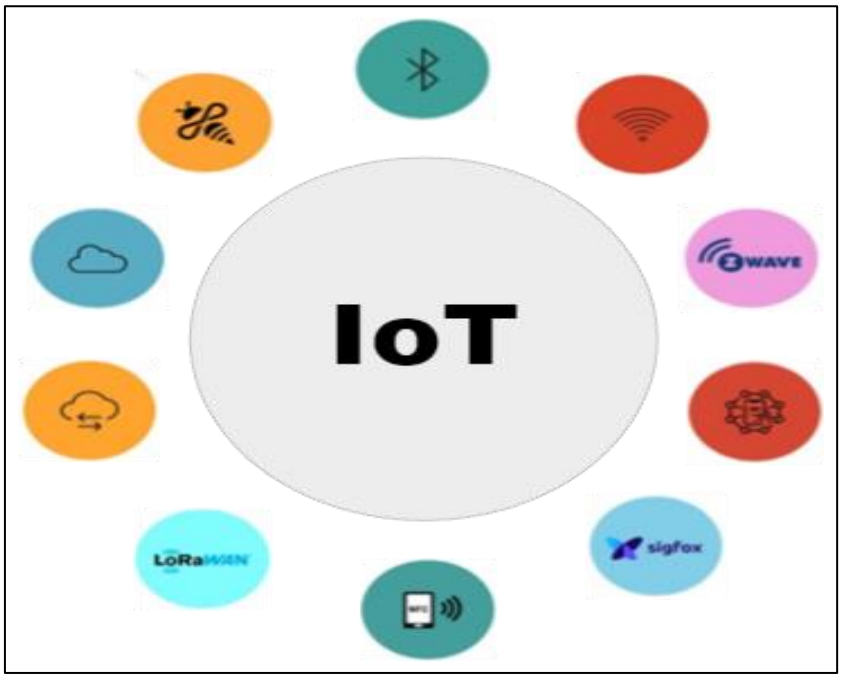
Şekil 2.6. Nesnelerin interneti özelliğinin temel unsurla ilişkisi

IoT teknolojisinin hayatımızda çok önemli değişiklikler yapacağı düşünülmektedir. Örneğin IoT teknoloji sayesinde akıllı evlerde yer alan bir nesneye uzaktan bağlanarak istenildiği gibi yönetebilme imkânı ya da akıllı araçlar ile iletişim kurularak kullanıcı binadan çıkarken otonom araçların bina çıkışına gelmesi sağlanabilmektedir. Bu yöntem ile nesneler artık birer otonom araçlar olarak kullanılmasının önü açılmıştır. Şekil 2.7'de IoT teknolojisinin fiziki olarak kullanım alanları gösterilmektedir. Şekilde gösterildiği gibi IoT teknoloji ile akıllı şehirler, akıllı tarım, endüstriyel kontrol, akıllı ulaşım, çevresel izleme, e-sağlık, sensör ağları, e-eğitim vb. gibi alanlarda uygulamaların kolaylıkla gerçekleştirilebilir olacaktır. Kısacası IoT teknolojisi yaşantımızın hemen hemen her alanında kullanılmaya başlanmaktadır.

IoT uygulamalarında cihazların veya kaynakların ürettiği verilerin internete iletilmesi zorunludur [52]. Bu nedenle verilerin iletilmesi ve işlenmesi IoT uygulamaları için hayati bir öneme sahiptir. Fakat IoT uygulamalarının ağı çok yoracağı da bilinmektedir. Bu nedenle genel ağ iletişiminin etkilenmemesi için farklı iletişim protokollerinin geliştirilmesi planlanmıştır [53]. Bu sayede hem genel iletişime bir etkisi olmayacak hem de genel ağ kullanılarak IoT uygulamaları gerçekleştirilebilir olmaktadır. Bu nedenle günümüzde IoT teknolojisi için IoT protokol çalışmaları büyük bir hızla devam etmektedir. Şekil 2.8.'de IoT Ağ protokol çeşitleri gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi çok çeşit IoT ağ protokolü bulunmaktadır. Her bir protokolün diğerlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur.



Şekil 2.7. IoT teknolojisinin kullanım alanları



Şekil 2.8. IoT ağ protokol çeşitleri

Bir IoT uygulamasının en kritik noktası kullanılacak nesne ve eyleme göre doğru protokolün seçilmesidir. Çizelge 2.4'te IoT ağ protokol çeşitlerinin özellikleri bakımından karşılaştırması yer almaktadır. IoT protokolü seçilirken aşağıda yer alan 5 madde göz önünde bulundurulmalı ve kullanılacak amaca göre en doğru ağ protokolü seçilmelidir.

- En önemlisi herkese ve her amaca uyan tek bir protokol yoktur. Bu nedenle standart tek bir protokol bulunmamaktadır.
- Nesnelerin İnterneti için amaca yönelik protokoller benimsenmesi gerekmektedir.
- Yazılım, IoT bağlantılarını yönetecek en kritik yapıdır.
- Bir protokol seçerken "güvenilirlik" ve "kullanım kolaylığı" en önemli kriterdir.
- IoT protokolleri için karar verme, çok paydaşlı ve kritik bir süreçtir. Bu nedenle bir protokol seçilirken en ince detaya kadar göz önünde bulundurulması gereklidir.

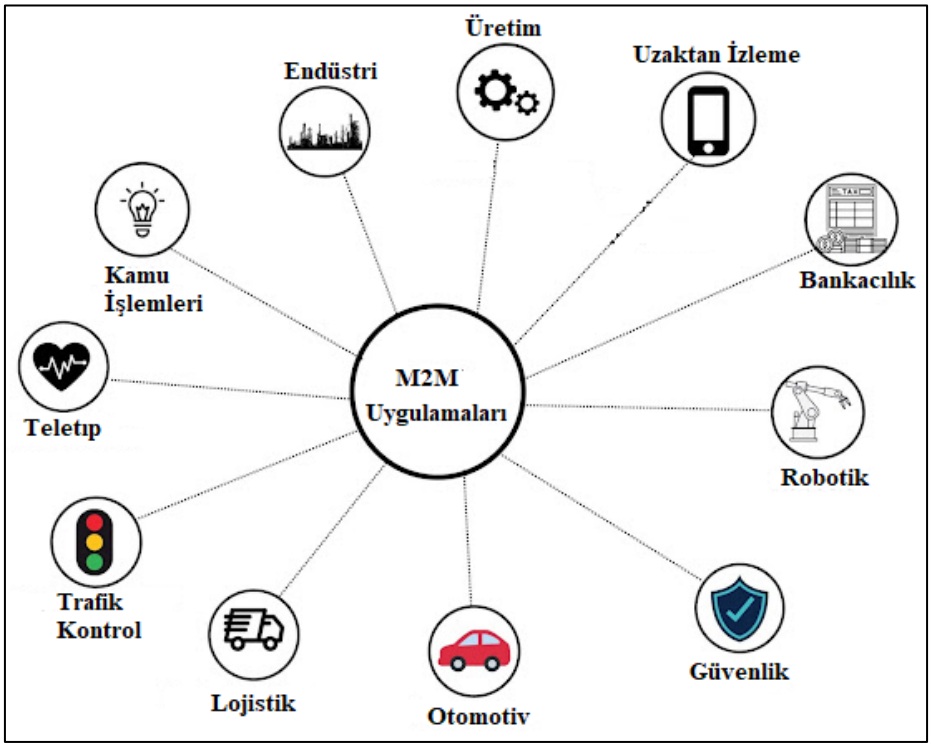
Çizelge 2.4. IoT ağ protokol çeşitlerinin özellikleri

Parametre	NFC	Wi-Fi	Zigbee	Z - Wave	Cellular	LoraMan	SigFox	Bluetooth
Tescilli Protokol	Sertifikalı	Sertifikalı	Sertifikalı	Sertifikalı	Sertifikalı	Sertifikalı	Sertifikalı	Sertifikalı
Etkin Radyo Mesafesi	4 cm	600 m	100 m	100 m	31 km	15 km	1000 km	300 – 500 m
Max. Veri Hızı	424 kbps	1 – 500 Mbps	250 kbps	100 kbps	300 Mbps	900 Mbps	100 bps	2 Mbps
Çalışma Frekans Bandı	13.56 MHz	2.4/5 GHz	2.4 GHz	800 – 900 MHz	2700 MHz	433 – 915 MHz	868/902 MHz	MHz

2.1.2. Makinelerin haberleşmesi

M2M ve IoT benzerdir, ancak tam olarak aynı işlevi yerine getirmezler. M2M ve IoT kavramları birbirinden farklı kavramlardır ve M2M, IoT'un atasıdır. M2M fikri IoT teknolojisinden çok daha önce ortaya çıkmıştır. M2M teknolojisi, SCADA ve uzaktan izleme gibi diğer teknolojilerin ekipmandan gelen verileri uzaktan yöneten ve kontrol eden bir ortamdır [54]. Şekil 2.9'da M2M teknolojisinin kullanım alanları gösterilmektedir. IoT, M2M'ye bağlıdır, ancak M2M, IoT'ne bağlı değildir. Her iki terim de cihaz iletişimini sağlar, ancak M2M'nin tek bir ağ ekipmanına bağlı olması gerekir ve öte yandan IoT, özel veya genel bir ağ üzerindeki daha büyük sistemleri birbirine bağlayarak M2M'yi başka bir düzeye taşır. Bölüm 2.1.1'de anlatıldığı üzere IoT nesnelerin komplike olarak birbirleriyle iletişime geçerken, M2M sensörler yardımıyla basit protokoller kullanılarak bazı spesifik işlemlerin gerçekleştirilmesi olarak açıklanabilir. IoT çok karmaşık bir yapı iken M2M daha basit bir yapıdır. Çizelge 2.5'te M2M ve IoT teknolojilerinin akıllılık, bağlantı yöntemi, iletişim

protokolleri, veri paylaşımı, internet ve kapsam özellikleri bakımından karşılaştırılması verilmektedir.



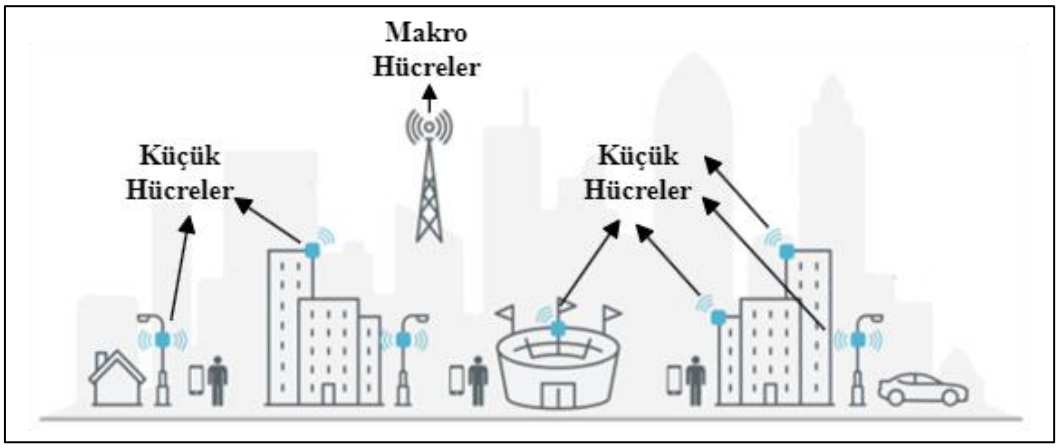
Şekil 2.9. M2M uygulama alanları

Çizelge 2.5. M2M ve IoT teknolojilerinin karşılaştırılması

	M2M	IoT
Akıllılık	Sadece bir dereceye kadar akıllı	Cihazlar, dış müdahale olmadan kişisel kararlar verebilen parçalar içerir
Bağlantı Yöntemi	Noktadan Noktaya	Cihazlar bir ağ ve diğer kablosuz iletişim yoluyla iletişim kurar
İletişim Protokolleri	Geleneksel ve daha az güvenli iletişim protokolleri kullanılır	HTTP, HTTPS, FTP ve Telnet gibi TCP/IP protokolleri
Veri Paylaşma	Veriler yalnızca izin verilen bağlantılar arasında paylaşılır	Kullanıcı deneyimini iyileştirmek için veriler uygulamalar arasında paylaşılır.
İnternet	Cihazlar internet gerektirmez	İnternet iletişiminin varlığı olmadan hiçbir şey değildir
Kapsam	Cihazlar için sınırlı kapsam	Milyarlarca cihazı bağlayabilir
Örnekler	Sensörler ve veri bilgileri	Akıllı giyilebilir cihazlar, akıllı şehirler, akıllı arabalar, akıllı evler vb.

2.1.3. Küçük hücreler

5G ile birlikte baz istasyonların yapılarının da değişmesi gereklidir. 5G teknolojisinin kapasite sınırı gibi dezavantajlarını ortadan kaldırmak ve gerekli mobil iletişimin kullanılabilmesi için bugüne kadar bilinen baz istasyonları yerine küçük hücreler olarak adlandırılan sistemlerin kullanılması önerilir. Küçük hücreler, klasik bir baz istasyonunun özelliklerine sahip iç ve dış mekanlarda kullanılabilen yüksek hızlı veri hızlarını işleme kapasiteli, düşük güçlü ve kısa mesafeli baz istasyonlarıdır [55]. Bu özelliklerinden dolayı küçük hücreler 5G iletişimlerinde yüksek hızlı, geniş bant ve düşük gecikmeli olarak verimli bir şekilde kullanılabilir. IoT teknolojisiyle beraber nesnelerin otonom araçlar olarak kullanılmasından dolayı küçük hücreler çok önemli bir rol üstlenmişlerdir. Şekil 2.10'da 5G teknolojisinde kullanılacak küçük hücre yapılarının kullanım noktalarına ait noktalar gösterilmektedir. Buna göre eski nesillerdeki gibi uzun mesafeleri kapsayan baz istasyonları yerine eskilerine göre daha küçük boyutlarda ve çok daha sık mesafelerle (=250 m) yerleştirilmiş küçük hücreler kullanılması gerekir.



Şekil 2.10. Küçük hücre yapıları

Küçük hücreler kapsama alanı ve destekleyebilecekleri kullanıcı sayısına göre Femtocell, Picocell ve Microcell olmak üzere üç ana hücre tipine ayrılırlar. Çizelge 2.6'da küçük hücre tipi olan üç hücrenin özellikleri ve uygulama alanları açısından karşılaştırılması verilmektedir. Buna göre bir stadyum ya da konser alanında mikro hücreler kullanılırken, okul v.b. alanlarda Piko hücrelerin kullanılması gerekir.

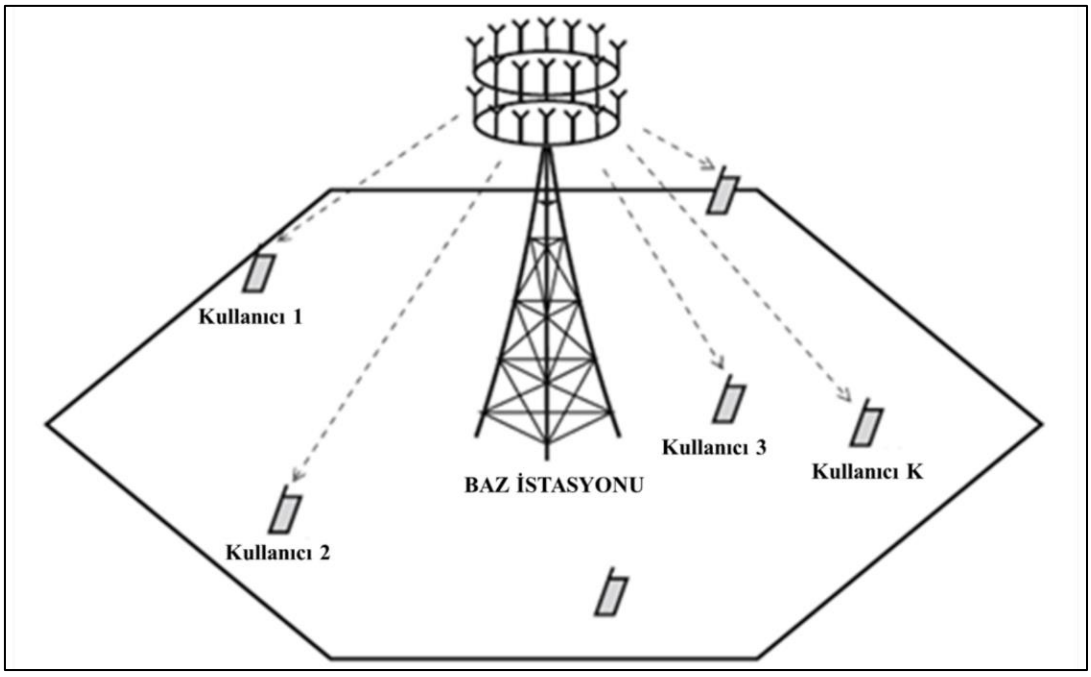
Çizelge 2.6. Küçük hücre yapılarının performans özellikleri

	Femtocell	Pickocell	Microcell
Uygulama Alanı	10 – 50 m	100 – 250 m	500m – 2,5 km
Güç	100 mW	250 mW	2 – 5 W
Kullanıcı Sayısı	8 – 16 kullanıcı	32 – 64 kullanıcı	>200 kullanıcı
Ana taşıyıcı	Kablolu, fiber bağlantı	Kablolu, fiber bağlantı	Kablolu, fiber bağlantı ve mikrodalga bağlantılı
Uygulama Alanı	Öncelikle iç mekan, dış mekan içinde kullanılabilir.	İç mekan (hastane, okul, avm'ler v.s.)	Dış mekan
Fiyat	Düşük maliyetli	Düşük maliyetli	Orta maliyetli

2.1.4. Masif MIMO sistemler

5G teknolojisinin yeniliklerinden olan IoT ile birlikte kullanıcı sayısının da çok hızlı bir şekilde artması beklenmektedir. Hızla artan kullanıcı sayısını karşılamak amacıyla MIMO sistemler kullanılması kararlaştırılmıştır. MIMO teknolojisi çok yapılı antenlere sahip nedeniyle aynı anda birden fazla iletişim gerçekleştirme imkanına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı 4G'de MIMO sistemler ön plana çıkış ve kullanılmaya başlanmıştır. Masif MIMO sistemler normal MIMO sistemlere göre aynı anda çok daha fazla kullanıcıyla iletişim kurma imkânı sunar. Masif MIMO teknolojisi, enerji verimliliği ile birçok kullanıcıya aynı anda basit sinyal işleme yöntemleriyle yüksek spektral verimlilik sunarak haberleşme trafiğinin yükünü azaltarak kullanıcılara kaliteli bir iletişim sağlayacak kapasiteye sahiptir. Bu nedenle Masif MIMO teknolojisi 5G sistemleri için temel teknolojilerin başında gelir. Ayrıca 5G ile birlikte inanılmaz bir şekilde artan kullanıcı sayısı göz önüne alındığında sağladığı enerji verimliliği, 5G teknolojisinde dikkate alınması gereken önemli bir konudur.

Masif MIMO teknolojisi, baz istasyonunda MIMO yapılı birçok antenin kullanılmasıyla zaman - frekans kaynağı üzerinden birçok kullanıcıyı uzamsal olarak çoğullayan bir sistemdir. Şekil 2.11'de görüldüğü üzere M antenle donatılmış bir baz istasyonunun aynı anda hücre içinde aynı frekans bandında dağıtılmış K adet tek antenli kullanıcıya hizmet verdiği tek hücreli büyük bir sistemdir.



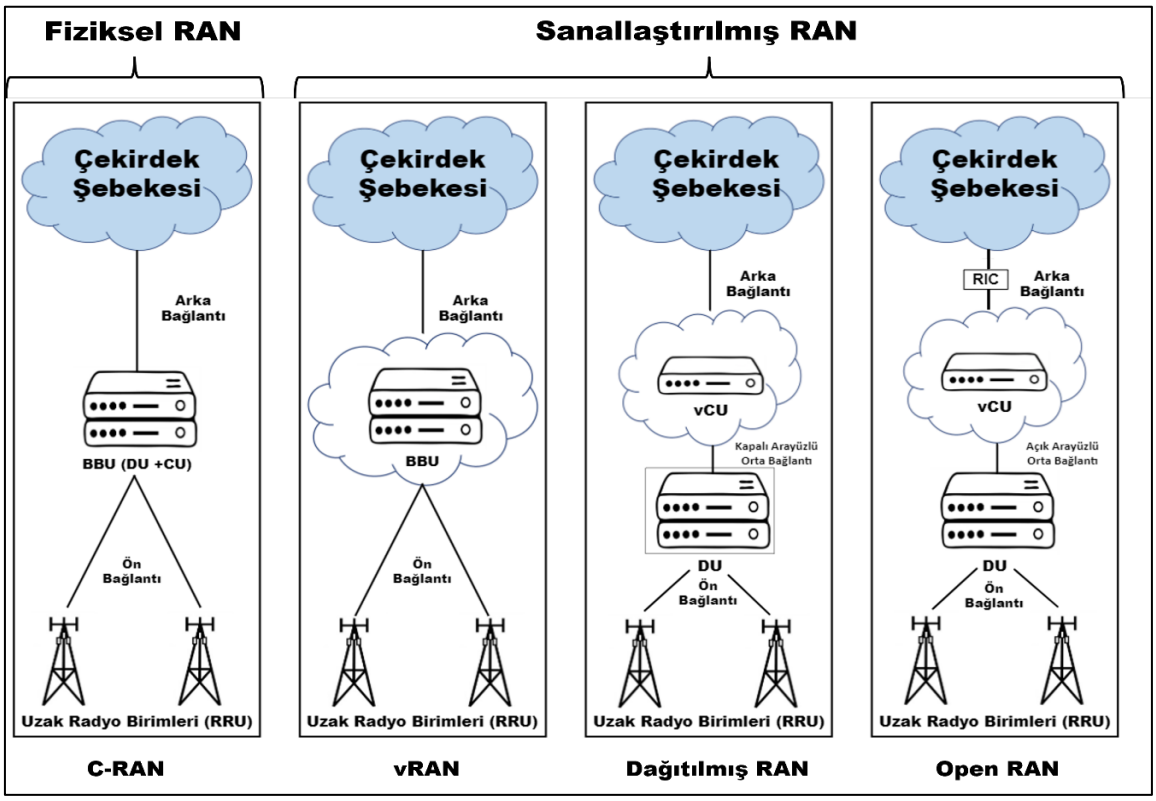
Şekil 2.11. Masif MIMO yapılı baz istasyonu

2.1.5. Hüzmeleme

5G'nin önemli bir parçası hiç şüphesiz hüzmeleme teknolojisidir. Hüzmeleme, mekansal seçiciliği sağlamak için antenin ana huzmesini istenen yöne yönlendirerek verici ve alıcıda istenmeyen kullanıcıları etkisiz hale getirme tekniğidir [56]. Hüzmeleme teknoloji sayesinde antenler bağlanmak isteyen cihazlara göre sinyal dağılımını değiştirme yetisine sahiptirler. Böylece kapsama alanı hareket kabiliyeti elde eder ve konuma göre şekil değiştirerek ağa bağlanan cihazların güçlü ve kaliteli (gürültüsüz) bir bağlantı kurması sağlanır. Bu sayede ağa bağlanan cihaz hareketli olsa da hüzmeleme teknolojisi sayesinde cihazın her zaman kaliteli bir iletişim gerçekleştirmesi sağlanabilir. Bunlara ek olarak hüzmeleme tekniği, Sinyal - Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio - SNR)'nın performansını geliştirerek yüksek dereceli modülasyon tekniklerinin kullanılmasıyla sınırlı gücün olduğu durumlarda daha iyi kapasite sağlayarak sistemin çok daha verimli çalışmasını sağlar [57]. Hüzmeleme teknikleri genel olarak analog, sayısal ve iki sistemin bir arada kullanıldığı hibrit sistemler olmak üzere 3 gruba ayrılır. Bu tekniklerinden hibrit hüzmeleme, düşük bit hata oranlarıyla daha yüksek veri hızları sağlama kabiliyeti nedeniyle 5G kablosuz ağlar için verimli, uygun maliyetli ve güvenilir bir teknik olarak ön plana çıkar [58].

2.2. 5G Ağ Mimarisi

5G ağ mimarisi, modüler servis tabanlı bir yapıya sahiptir. Modüler servis tabanlı bir ağ yapısına sahip olmasının en önemli avantajı ortak sistem olarak tanımlanan herhangi bir ağ ile doğrudan iletişim kurulmasına olanak sağlamasıdır [59]. 5G'nin diğer nesillerden farkı yalnızca mm-dalga frekans bandının kullanılması değil, bununla birlikte sanallaştırılmış Radyo Erişim Ağları (Radio Access Network - RAN)'nın yoğunlukla kullanılmasıdır. Şekil 2.12'de Fiziksel RAN ve Sanallaştırılmış RAN'ın bağlantı çeşitleri gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Radyo erişim ağ çeşitleri [60]

5G Ağ mimarisi

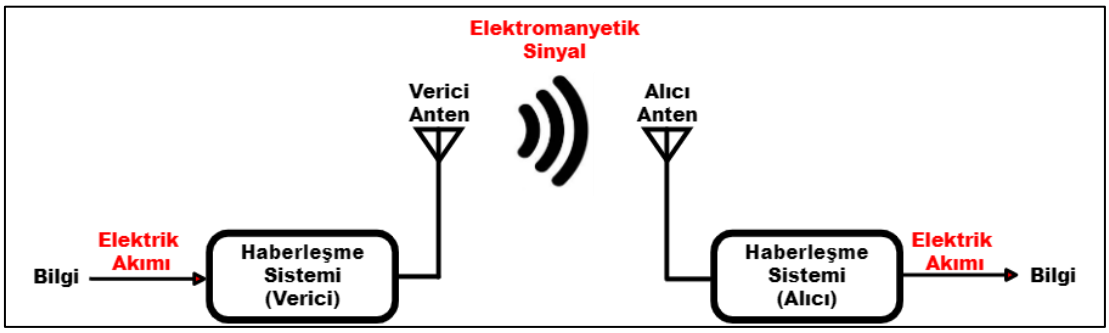
- Kontrol ve veri düzlemlerinin ayrıştırılarak birbirinden bağımsız olarak ölçeklendirilmesi,
- Modüler, servis tabanlı mimari,
- Metot ve yöntemlerin servis olarak sunularak tekrar kullanımın sağlandığı yapı,

- Bütün ağ fonksiyonlarının birbirleriyle doğrudan iletişim kurabileceği mesajlaşma alt yapısı,
- Fiziksel ağ ile çekirdek ağ arasındaki bağımlılıkların en aza indirilmesi ve 3GPP olmayan bağlantıların da çekirdek ağ tarafından doğrudan desteklenebilir hale getirilmesi,
- Kimlik doğrulama altyapısının birleştirilmesi,
- Depolama ve hesaplama bileşenlerinin ayrıştırıldığı durum bilgisi taşımayan ağ fonksiyonları,
- Ağ yeteneklerinin ağ dışına bildirilmesi ve ağ dışından kullanılabilmesi için gerekli olan "yeterlilik maruziyeti" yeteneğinin desteklenmesi,
- Lokal ve merkezi servislerin eş zamanlı desteklenmesi ve bu amaçla veri düzleminin fiziksel ağa yaklaştırılması

Olmak üzere özelliklere sahiptir.

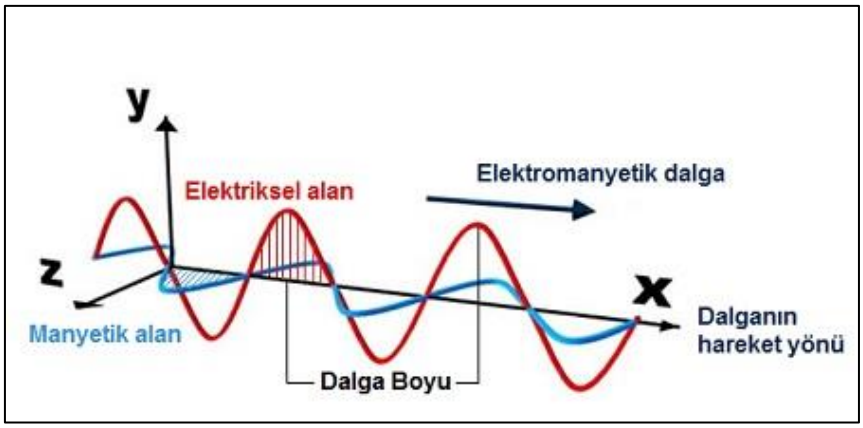
3. ANTENLER

Kablosuz haberleşme sistemlerinin en vazgeçilmez yapılarından biri de hiç şüphesiz antenlerdir. Antenler haberleşme sistemlerinin en uç bölümüdür. Kablosuz haberleşme sistemlerinde bilgilerin gönderildiği ve yayıldığı kısım antenlerdir. Bilginin elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla gönderilmesi ve/veya alınmasını sağlayan metal yapılara anten denir. Antenler radyo dalgalarını her yöne veya belirli bir yöne yaymak için kullanılırlar. Bu nedenle, antenler uydu haberleşme sistemleri, radar teknolojisi, mobil haberleşme sistemleri gibi kablosuz sistemlerde yoğun olarak kullanılırlar.



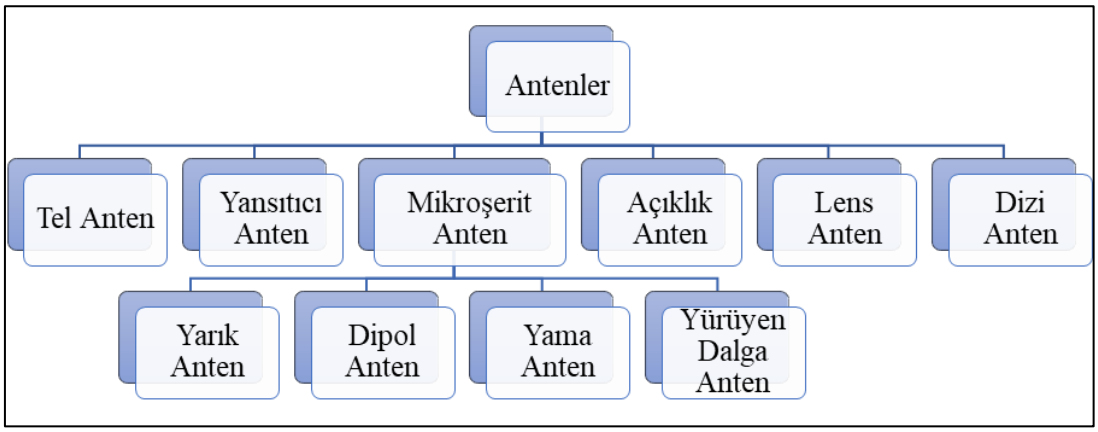
Şekil 3.1. Basit bir kablosuz haberleşme sistemi

Şekil 3.1'de bir kablosuz haberleşme sistemi yapısı basit olarak gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kablosuz haberleşme sistemleri alıcı ve verici yapı olmak üzere 2 bölümden oluşur. Gönderici yapının en son elemanı antenler iken, alıcı yapının ilk elemanı antenlerdir. Antenler verici ve/veya alıcı sitemlere mikroşerit iletim hatları kullanarak bu hatlar üzerinden bağlanır. Antenler, elektrik akımı olarak gönderilen bilginin haberleşme sistemleri tarafından elektromanyetik sinyallere dönüştürülerek yayıldığı veya gönderilen elektromanyetik sinyalleri alarak alıcı haberleşme sistemine gönderen yapılardır. Elektromanyetik dalgalar yapısında hem elektrik alan hem de manyetik alan içeren sinyallerdir. Elektromanyetik bir dalganın yapısı şekil 3.2'de gösterilmektedir. Gönderilen elektromanyetik sinyaller dalga boylarından dolayı mikro dalga sinyalleri olaraktan isimlendirilir.



Şekil 3.2. Elektromanyetik sinyaller

Antenler frekanslarına, yönlülüklerine ve kullanım amaçlarına bağlı olarak çeşitlenirler. Bu nedenle günümüzde değişik yapıda birçok çeşit anten bulunmaktadır. İzotropik, Dipol, Marconi, Yagi – Uda, Mikroşerit, Açıklık, Çanak, Vivaldi, v.d. olmak üzere birçok anten çeşidi mevcuttur. Bu antenlerde kendi içlerinde yönlülük ve kullanılan mikro dalga frekansları gibi özelliklerinden dolayı çeşitlenir. Şekil 3.3'te temel anten çeşitleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Anten çeşitleri

2.3. Temel Anten Parametreleri

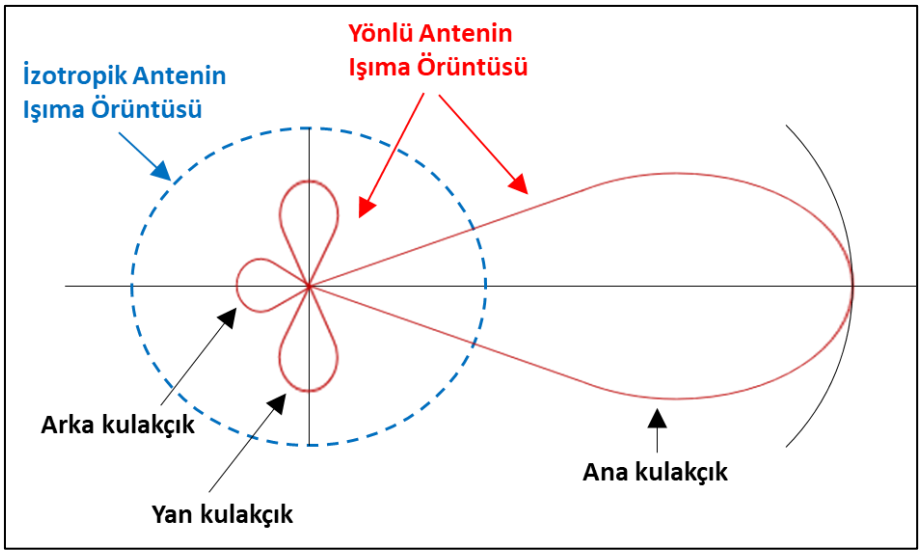
Kablosuz haberleşme sistemlerinin uç kısımları olan antenlerin daha iyi anlaşılabilmesi için temel anten parametrelerinin bilinmesi gerekir. Gerçekleştirilen anten tasarımlarının performansları hakkında bilgiye bu temel anten parametreleri kullanılarak ulaşılabilinir.

Temel anten parametreleri; ışıma örüntüsü, ışıma şiddeti, yönlülük, yansıma katsayısı, verimlilik, kazanç ve bant genişliği olmak üzere genelde 7 başlık altında incelenir.

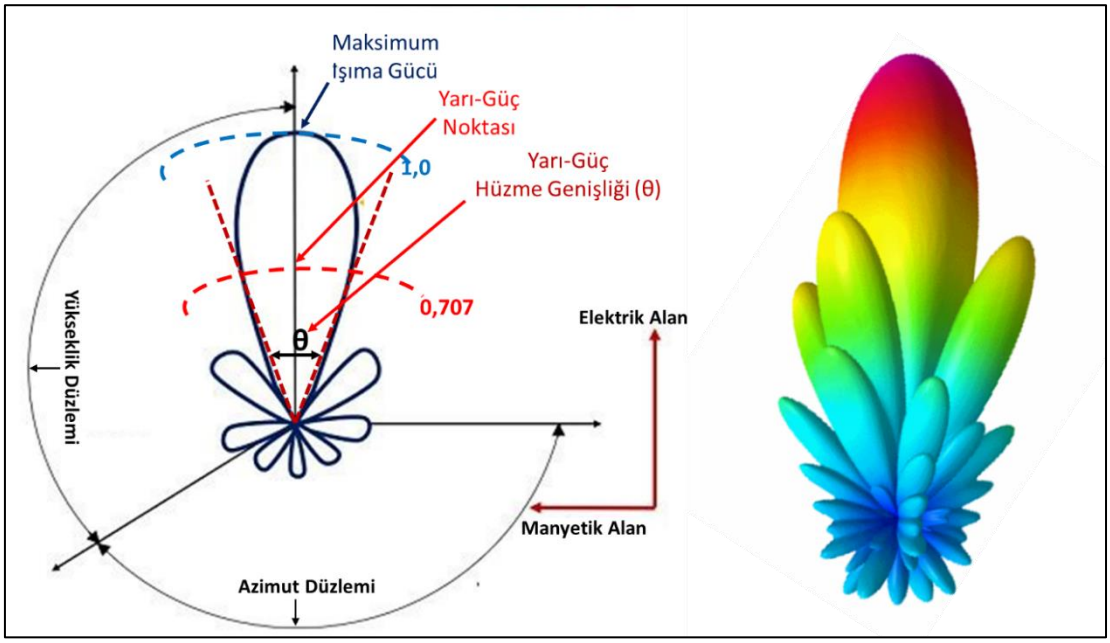
3.1.1. Işıma örüntüsü

Işıma örüntüsü, antenin uzay düzleminde ışıma özelliklerinin ifade edilmesi olarak tanımlanır. Elektromanyetik dalgalar elektrik ve manyetik dalgalardan oluşur. Bu nedenle antenin ışıma örüntüsü elektrik ve manyetik kuvvet genliklerinin açıya bağlı olarak matematiksel olarak ifade edilir [61]. Işıma örüntüsü desibel (dB) cinsinden ifade edilir. Şekil 3.4'te 2 boyutlu bir ışıma örüntüsünün görüntüsü verilmektedir. Şekil 3.4'te mavi kesikli çizgi ile gösterilen kısım izotropik bir antene ait ışıma örüntüsüyken, kırmızı ile gösterilen kısım yönlü bir antene ait ışıma örüntüsünü belirtmektedir. Işıma örüntüsünde kulakçıklar önemlidir. Ana kulakçık, θ = 0o'de en yüksek ışımanın olduğu yönde bulunan kulakçıktır. İkincil kulakçıklar, ana kulakçık haricindeki diğer kulakçıklardır. Yan kulakçık, istenen kulakçık bitişiğindeki doğrultuda bulunan kulakçıktır. Arka kulakçık, birincil kulakçığın zıt yönünde olan ikincil kulakçık olarak tanımlanır. İkincil kulakçıklar küçültülmelidir.

Işıma örüntüsü önemli bir anten parametresidir. Bunun en büyük nedenlerinden biri antenin güç akı yoğunluğu, ışıma şiddeti, alan kuvveti, yönlülük, faz veya kutuplaşma hakkındaki bilgileri içermesinden kaynaklanır. Şekil 3.5'te yönlü bir antenin iki boyutlu (2B) ve 3B ışıma örüntüsü gösterilmektedir. Yönlü antenin ışıma örüntüsü grafiği ile yaptığı ışımanın polarizasyonu, yarı güç hüzme genişliği (Half Power Bandwidth - HPBW), Maksimum ışıma gücü, Azimut ve yükseklik açıları, vb. bilgilerini hakkında antenin önemli parametre bilgilerini içerir.



Şekil 3.4. 2 Boyutlu ışıma örüntüsü



(a) (b)

Şekil 3.5. Yönlü bir antenin (a) 2B ışıma örüntüsü (b) 3B ışıma örüntüsü

Hüzme genişliği

IEEE tarafından "hüzme; en büyük yönünü içeren düzlemde ışıma şiddetinin yarıya düştüğü iki yön arasındaki açı" olarak tanımlanmıştır. Örüntüde en büyük değerin yarıya düşmesi durumu; alan örüntüsünün doğrusal ölçek gösteriminde 0,707 katına, güç örüntüsü doğrusal

ölçek gösteriminde 0,5 katına ve güç örüntüsü dB gösteriminde -3dB'ye düştüğü noktalar kastedilir [62, 63].

3.1.2. Işıma şiddeti

Antenin ışıma şiddeti, bir antenin belli bir yönde birim katı açı başına düşen ışıyan güç olarak tanımlanır. Işıma şiddeti ışıma yoğunluğu hesaplanarak elde edilir. Bu nedenle ışıma yoğunluğu Poynting vektörü ile ifade edilir. Eş 3.1'de elektromanyetik dalgalarda ışıma yoğunluğunun matematiksel hesaplanması ve Eş. 3.2'de antenin ışıma şiddetinin matematiksel hesaplanması verilmektedir [63].

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \tag{3.1}$$

$$U = r^2 W_{rad} \tag{3.2}$$

Bu eşitlikte $\vec{W}$; anlık poynting vektörü [W/m2], $\vec{E}$; anlık elektrik alan şiddeti [V/m] ve $\vec{H}$; anlık manyetik alan şiddeti [A/ m], U; ışıma şiddeti [W/birim katı açı], Wrad; ışıma güç yoğunluğu [W/m2] ve r; antene olan uzaklık [m]'tır.

3.1.3. Yönlülük

Bir antenin belirli bir yönde yaptığı ışıma şiddetinin tüm yönlere yaptığı ortalama ışıma şiddetine oranı anten yönlülüğü olarak tanımlanır. Kısaca yönlülük, elektromanyetik dalganın bir anten tarafından hangi yöne gönderildiği veya hangi yönden alındığını belirler. Ortalama ışıma şiddeti antenden ışıyan toplam gücün 4π'ye oranıdır. Antenin yönü olarak Şekil 3.4'te gösterilen ana kulakçığın yönü kullanılır. Bir antenin yönlülük hesabı Eş 3.3 ve Eş 3.4'te verilmektedir [62].

$$D = \frac{S}{S_i} \tag{3.3}$$

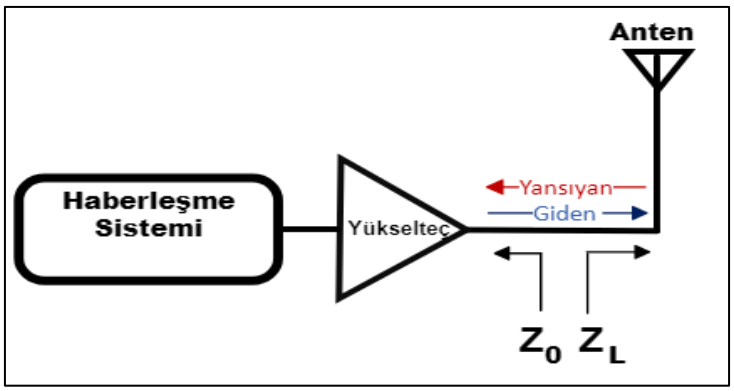
$$D(\theta,\phi) = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{rad}} \tag{3.4}$$

$$P_{rad} = \oiint U d\Omega = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} U \sin\theta d\theta d\phi \tag{3.5}$$

Burada D; antenin yönlülüğünü, S; gerçek antenin güç yoğunluğu, Si; izotropik antenin güç yoğunluğu, D(θ,ϕ); ϕ ve θ düzlemlerindeki yönlülüğü, Prad; antenden ışınlanan gerçek gücü, dΩ uzay katı açıyı ifade etmektedir.

3.1.4. Yansıma katsayısı ve geri dönüş kaybı

Radyo Frekans (RF) işaretleri bir ortamdan diğerine geçerken iletim hattı üzerindeki empedans uyumsuzluğu nedeniyle bir miktar RF işareti yansıyarak geri döner. Bu nedenle yansıma katsayısı, yansıyan işaretin genliğinin gönderilen işaretin genliğine oranı olarak ifade edilir. Şekil 3.6'da bir haberleşme sistemine bağlanan anten sisteminin üzerindeki empedanslarla birlikte giden ve yansıyan sinyaller gösterilmektedir. Eş 3.6'da yansıma katsayısının matematiksel ifadesi gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Kablosuz haberleşme sisteminde empedanslar

$$\Gamma = \frac{V_{yansıans}}{V_{gönderilen}} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \tag{3.6}$$

Burada Γ; anten giriş terminalindeki gerilim yansıma katsayısını, ZL; anten giriş empedansı ve Zo iletim hattının karakterisik empedansını ifade etmektedir.

Geri dönüş kaybı, antene gönderilen sinyalin ne kadarının döndüğünü temsil eder ve dB cinsinden ifade edilir. İdeal bir anten için geri dönüş kaybının 10 dB ‘den yüksek olması istenir. Anten tasarımlarında saçılma parametreleri (S-parametreleri) ile ifade edilirler. Geri dönüş kaybının matematiksel ifadesi Eş 3.7’de gösterilmektedir.

$$Geri \quad dönüş \quad kaybı(db) = 20\log|\Gamma| \tag{3.7}$$

3.1.5. Verimlilik

Verimlilik ışıma verimliliği olarak da isimlendirilir. Verimlilik, bir antenin gerçekleştirdiği ışıma gücünün o antene uygulanan elektrik gücüne oranı olarak ifade edilir. İdealde antene uygulanan elektriksel gücün herhangi bir kayba uğramadan anten tarafından ışıması gerekir, ancak pratikte hiçbir sistem kayıpsız değildir. Bu nedenle antene uygulanan elektriksel gücün bir kısmı anten üzerinde iletim hattından kaynaklanan yansımalar veya iletim ve dielektrik kayıplarından kaynaklı olarak bir kayba uğrar. Eş 3.8, Eş 3.9, ve Eş 3.10’da verimliliğin matematiksel ifadeleri verilmektedir.

$$e_o = e_r e_{cd} \tag{3.8}$$

$$e_r = 1 - |\Gamma^2| \tag{3.9}$$

$$e_{cd} = \frac{P_{rad}}{P_{giriş}} \tag{3.10}$$

Burada er; yansıma verimliliği ve ecd; ışıma verimliliğini ifade etmektedir.

3.1.6. Kazanç

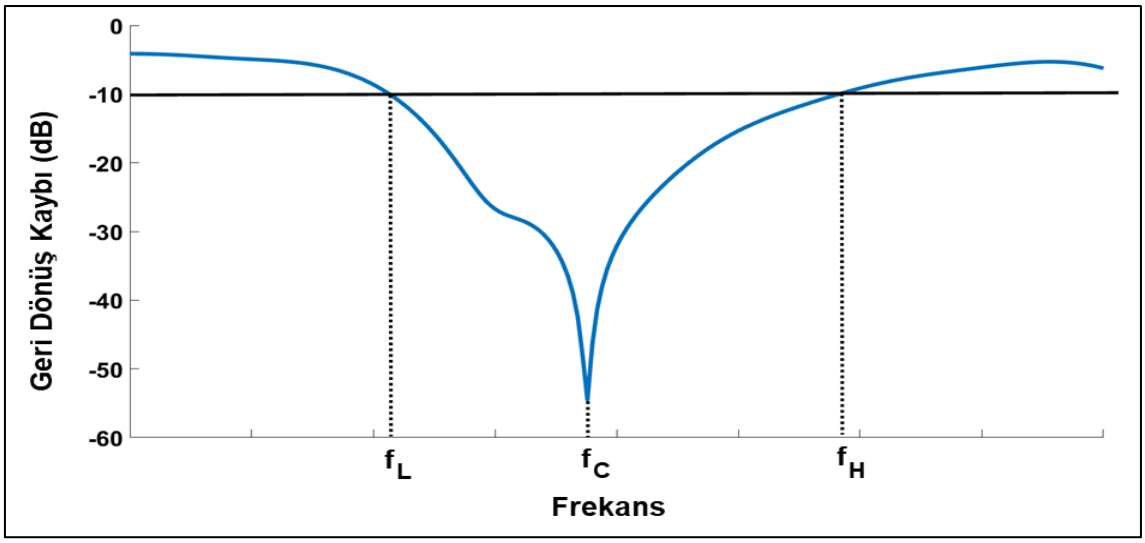
Bir antenin kazancı belirli bir yönde ışıma yaptığı gücün aynı besleme ile beslenen referans bir antenin ışıma yaptığı güce oranı olarak ifade edilir. Referans anten bir dipol, horn veya kazancı hesaplanabilen veya bilinen herhangi bir başka anten olabilir, ancak genellikle izotropik bir anten olarak seçilir. Kazanç G ile sembolize edilir ve birimi dBi olarak ifade

edilir. Eş. 3.11'de bir anten kazancının matematiksel ifadesi verilmektedir. Eşitlikte ecd anten verimliliğini ifade etmektedir. Eşitlikten görüldüğü üzere bir antenin kazancı anten yönlülüğüne ve verimine bağlıdır.

$$G(\theta,\phi) = e_{cd} D(\theta,\phi) = e_{cd} \frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{rad}} \tag{3.11}$$

3.1.7. Bant genişliği

Antenin önemli parametrelerinden olan bant genişliği antenin çalışma frekansı aralığı olarak tanımlanır. Bant genişliği (Band Width – BW) çalışma frekansının en düşük frekans değeri (fL) ile en yüksek frekans (fH) değeri arasındaki fark olarak hesaplanır. Şekil 3.7'de bir antene ait geri dönüş kaybı grafiği gösterilmektedir. Antenin çalışma frekansı ve bant genişliği performansları bu şekil üzerinden anlaşılmaktadır. Bu şekilde fr antenin rezonans frekansını belirtmektedir. Bant genişliğinin matematiksel ifadesi Eş 3.12 ve Eş 3.13'te gösterilmektedir. Eş 3.13 yardımıyla antenin geniş bantlı ya da dar bantlı olduğu anlaşılmaktadır. Antenin bant genişliği %20'nin altındaysa dar bantlı, %20'nin üzerindeyse geniş bantlı olarak ifade edilir.



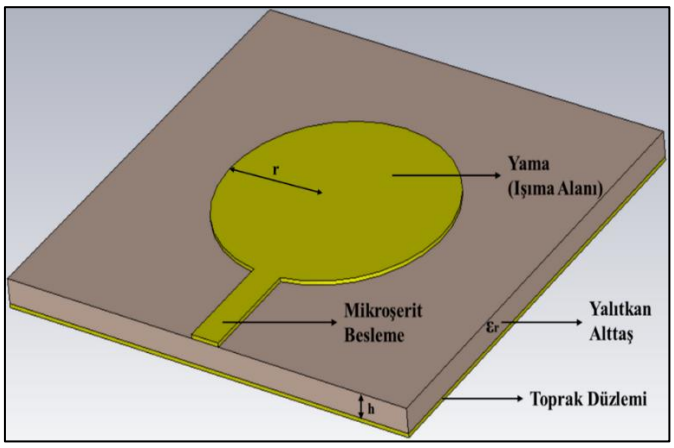
Şekil 3.7. Geri dönüş kaybı grafiği

$$BW = f_H - f_L \tag{3.12}$$

$$BW(\%) = 100\frac{f_H - f_L}{f_r} \tag{3.13}$$

2.4. Mikroşerit Anten

Mikroşerit anten, baskı devre kartı teknolojisinin kullanıldığı basit yapılı bir anten çeşididir. 1953 yılında Deschamps tarafından ilk mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Alttaş teknolojisinin geliştirilmesiyle birlikte mikroşerit antenler 1980'lerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 3.8'de mikroşerit antenin temel yapısı gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere yalıtkan alttaşın alt ve üst düzlemine iletken yüzeylerin yerleştirilmesi ile oluşur. Yalıtkan alttaşın alt tarafındaki yüzey toprak düzlemi, üst tarafındaysa yama olarak isimlendirilen ışıma alanının ve besleme hattının yer aldığı iletken yüzey yer alır. İletken yüzeyler yaygın olarak bakırdan imal edilmesine karşın farklı metal yapılarında imal edilen türleri de bulunmaktadır. Son yıllarda basit yapısı, düşük maliyet ve kolay üretim gibi nedenlerden dolayı mikroşerit antenler ön plana çıkmıştır. Bu nedenle günümüzde yapılan çalışmaların çok önemli bir kısmında mikroşerit antenler kullanılmaktadır.



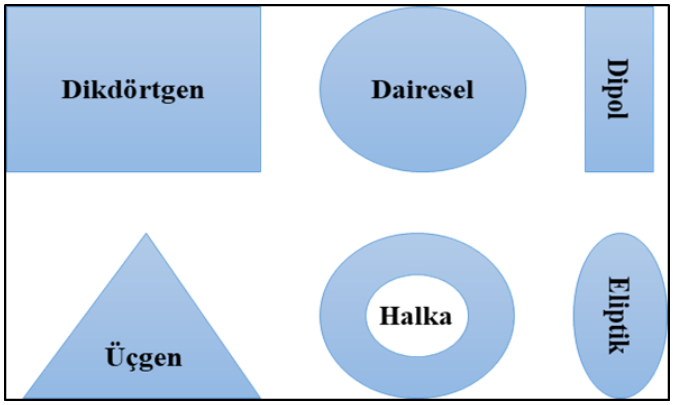
Şekil 3.8. Mikroşerit anten yapısı

Mikroşerit antenlerin ışıma desenleri değişik geometrik şekillerde olabilmektedir. En yaygın kullanılan ışıma desenleri Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Mikroşerit antenlerin ışıma desenleri farklı yayılma performansıyla birlikte yüksek yayılma verimliliği, yüksek kazanç ve izolasyonun elde edilmesini sağlar. Bununla beraber yalıtkan alttaş malzemesinin de antenin performansı açısından çok önemli bir rolü bulunr. Günümüzde piyasada epoksi,

politetrafloroetilen (PTFE) dolgulu cam kompozit, dokuma fiberglass, fiberglas takviyeli PTFE bazlı kompozit ve hidrokarbon seramik gibi çok çeşitli yalıtkan alttaş yapıları bulunmaktadır [64]. Çizelge 3.1'de farklı tür malzemeden üretilen birkaç çeşit alttaşların önemli teknik özellikleri açısından karşılaştırılması verilmektedir.

Çizelge 3.1. Alttaş çeşitlerinin teknik özellikleri

	FR4	RT/duroid 5880	ULTRALAM 3850	RO3003™	RO4350B™
Dielektrik malzeme	Cam Epoksi	Teflon Cam Elyaf	Likit Kristal Polimer	Teflon Seramik	Hidrokarbon Seramik
Dielektrik Katsayısı (ε_r)	4-4,7	2,2	2,9	3	3,48
Kayıp Tanjant (tanδ)	0,019	0,0009	0,0025	0,0013	0,0037
Hacim Özdirenci (MΩ/cm)	2 x 10^9	2 x 10^7	1 x 10^{10}	1 x 10^{12}	1,2 x 10^9
Yüzey Özdirenci (MΩ)	4 x 10^6	3 x 10^7	1 x 10^{12}	1 x 10^{11}	5,7 x 10^9
Termal İletkenlik (W/m/°K)	0,24	0,20	0,2	0,5	0,69
Yoğunluk (g/cm^3)	1,85	2,2	1,4	2,1	1,8



Şekil 3.9. Mikroşerit anten yaygın kullanılan ışıma desenleri

$$a = \frac{F}{\left\{1+\frac{2h}{\pi\varepsilon_r F}\left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right)+1{,}7726\right]\right\}^{1/2}} \tag{3.14}$$

$$a_e = a\left\{1+\frac{2h}{\pi a\varepsilon_r}\left[\ln\left(\frac{\pi a}{2h}\right)+1{,}7726\right]\right\}^{1/2} \tag{3.15}$$

$$F = \frac{8{,}791\times 10^9}{f_r\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3.16}$$

Burada; a dairesel yama antenin yarıçapını, ae etkin yarıçapı, εr yalıtkan alttaşın dielektrik katsayısını, h yalıtkan alttaşın kalınlığını, fr rezonans frekansını ifade etmektedir.

Dairesel bir mikroşerit antenin boyutlarının matematiksel hesabı Eş 3.14, Eş 3.15 ve Eş 3.16'da gösterilmektedir. Buna göre anten tasarımlarında anten boyutlarının kullanılan yalıtkan alttaşın cinsine, kalınlığına ve kullanılacak frekansa bağlı olduğu görülmektedir. Mikroşerit anten tasarımlarında en önemli kriter alttaş seçimidir. Yüksek performanslı bir mikroşerit anten tasarımı için dielektrik katsayısı (εr)'nin 2,5 altında olan bir alttaşın kullanılması istenir.

3.1.8. Mikroşerit antenin avantajları ve dezavantajları

Mikroşerit antenlerin popüler olmasının en büyük nedeni tasarımcıya ve kullanıcıya sağladığı faydalardan kaynaklanır. Gelişen teknoloji ile birlikte maliyet, performans, tasarım kolaylığı ve üretim basitliği gibi üstünlükleri sayesinde aerodinamik yapının kısıtlamalar getirdiği yüksek performanslı uçak, uzay aracı, uydu ve füze gibi çeşitli kablosuz haberleşme uygulamalarında yoğun olarak tercih edilmektedirler. Mikroşerit antenlerin üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [65];

- Gelişen malzeme teknoloji sayesinde küçük hacimli ve hafif bir yapıya sahip olması,
- Üretim maliyetlilerinin düşüklüğü,
- Çok küçük boyutlarda tasarımının ve üretiminin gerçekleştirilebilmesinden dolayı uçak, drone, uzay araçları ve füze vb. gibi aerodinamik yapıların hassas olduğu uygulamalarda kolay kullanım,
- Düşük saçılma ara kesitine sahip olması,
- Çoklu bantlı ve MIMO yapılı antenlerin kolay tasarımı,
- Mikroşerit antenlere bileşik olarak filtre, osilatör vb. gibi yapıların üretilebilmesidir.

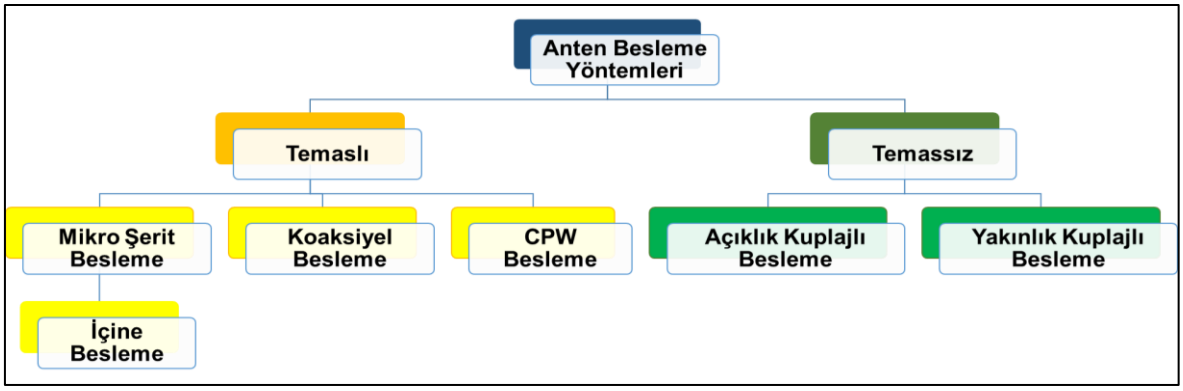
Mikroşerit antenlerin avantajları yanı sıra önemli bazı dezavantajları da bulunmaktadır [65].

- Düşük kazançlı bir yapıya sahip olmaları,
- Dar bant genişliğine sahip olmaları,
- Besleme ile ışıma elemanı arasında zayıf yalıtım olması,
- Çok güçlü anten tasarımlarının gerçekleştirebilmesinin zor olmasıdır.

Mikroşerit anten tasarımlarında yukarıda belirtilen dezavantajları göz önüne alınarak bu dezavantajların en iyi şekilde kısıtlanması gerekir. Bu sayede mikroşerit antenlerin performansları arttırılabilir.

2.5. Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri

Yapılan çalışmalarda anten performansını etkileyen diğer bir önemli faktörün besleme tekniğidir [15]. Şekil 3.10'da anten beslemesinin yöntemleri gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere mikroşerit, koaksiyel, düzlemsel dalga kılavuzlu (Coplanar Waveguide - CPW), açıklık kuplajlı ve yakınlık kuplajlı olmak üzere farklı yöntemleri kullanılır. Çizelge 3.2'de anten besleme tekniklerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Şekilde mikroşerit anten besleme çeşitlerinin teknikleri alt başlıklarda detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Buna göre mikroşerit anten tasarımlarında kullanılacak amaca uygun olarak doğru besleme yönteminin seçilmesi antenin performansı için büyük bir önem arz etmektedir.



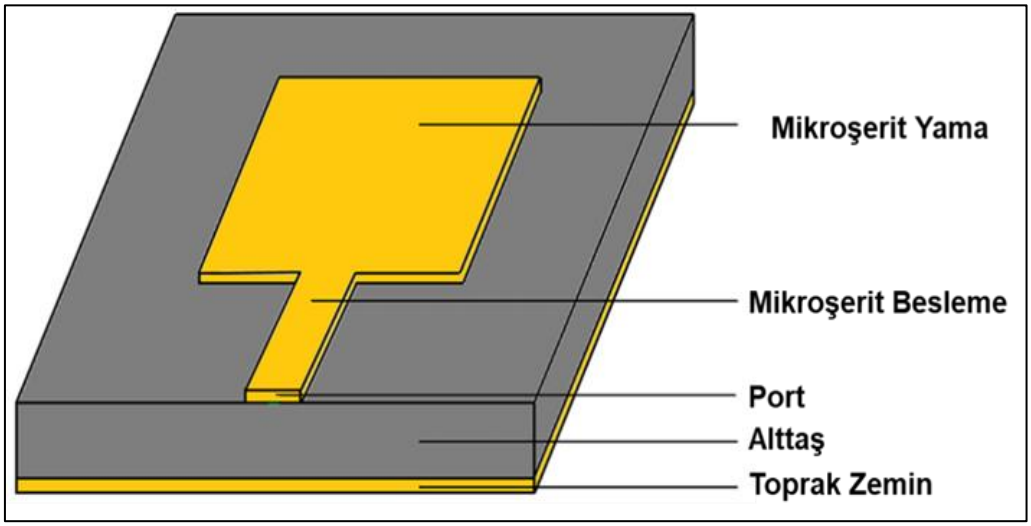
Şekil 3.10. Anten besleme yöntemleri

Çizelge 3.2. Mikroşerit anten besleme tekniklerinin karşılaştırılması

	Mikroşerit Besleme	Koaksiyel Besleme	CPW Besleme	Açıklık Kuplajlı Besleme	Yakınlık Kuplajlı Besleme
Üretim	Çok kolay	Zor	Kolay	Orta	Orta
Güvenilirlik	Çok iyi	Zayıf	İyi	İyi	İyi
Empedans Uyumlama	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Band Genişliği	% 2-5	% 2-5	% 3	% 21	% 13
Sahte Işıma	Fazla	Fazla	Az	Az	Çok Az

3.1.9. Mikroşerit besleme

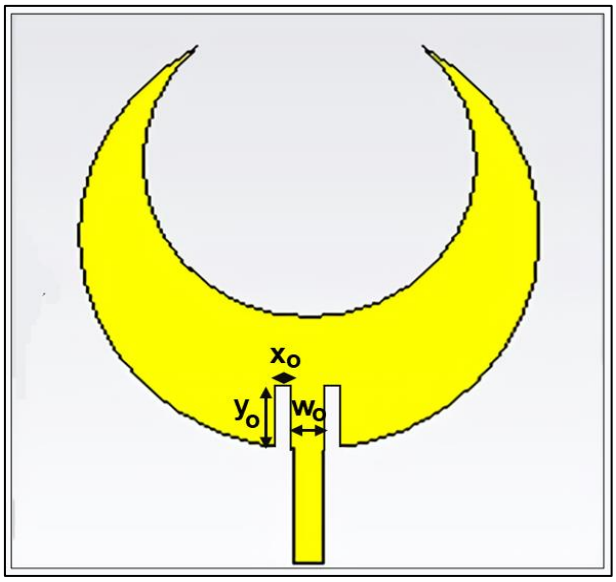
Mikroşerit besleme, ışıma yapan yama ile aynı yüzeyde bulunan iletken bir şeridin yama ile birleştirilmesi ile gerçekleştirilir. İletken besleme hattın empedansı genellikle 50Ω olarak belirlenir ve bu nedenle yamaya kıyasla daha ince olarak gerçekleştirilir. Besleme hattı ve yama üzerinde meydana gelen bir empedans farkını çeyrek dalga empedans dönüştürücü yardımıyla kolaylıkla giderir. Bunun yanında basit ve kolay tasarımı gibi avantajları nedeniyle en çok tercih edilen besleme yöntemlerinden birisidir. Alttaş kalınlığının artmasıyla beraber yüzey dalgalar ve istenmeyen besleme ışınlarının artması en büyük dezavantajıdır. Bu besleme çeşidinin kullanıldığı antenlerde bant genişliğini sınırlayan bir etkiye sahiptir [66]. Şekil 3.11'de mikroşerit besleme tekniği gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Mikroşerit besleme

İçine Besleme

Mikroşerit beslemenin geliştirilmiş bir halidir. Mikroşerit besleme de yama ile besleme hattının birleştiği noktada besleme hattının her iki kenarından birer oyuk açılarak gerçekleştirilir. Oyuğun kalınlık ve uzunluğunun hesaplanmasına ait eşitlikler Eş 3.17 ve Eş 3.18'de verilmektedir [67]. Şekil 3.12'de içine besleme tekniği gösterilmektedir.



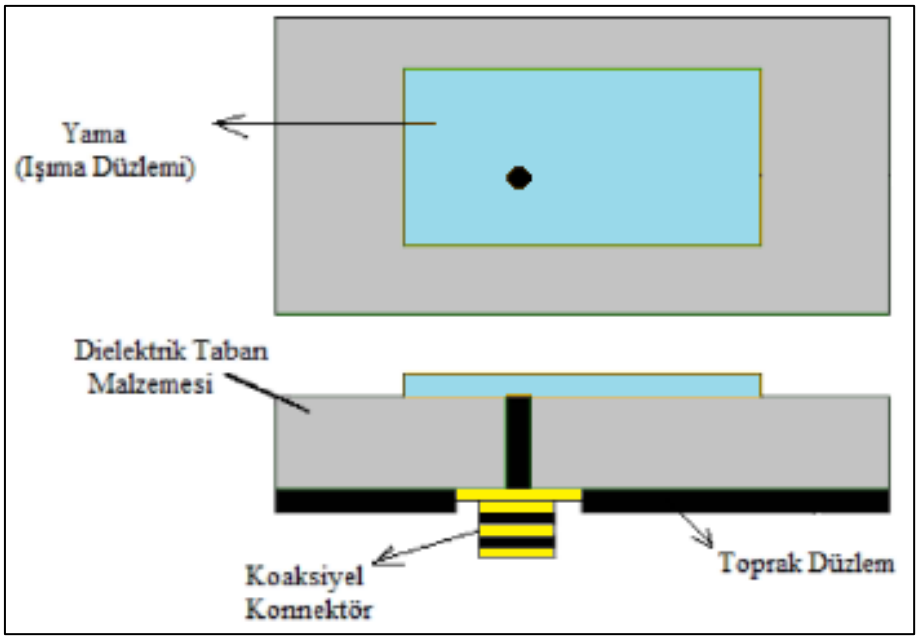
Şekil 3.12. İçine besleme

$$x_0 = \frac{c}{\sqrt{2}\varepsilon_{eff}} \frac{4{,}65\ x\ 10^{-12}}{f_r} \tag{3.17}$$

$$y_0 = \frac{\cos^{-1}(\frac{Z_0}{R_{in}})}{\frac{\pi}{L}} \tag{3.18}$$

3.1.10. Koaksiyel besleme

Koaksiyel besleme, prob veya eş eksenli besleme olarak da isimlendirilir. Besleme yöntemlerinde kullanılan popüler besleme yöntemlerinden biridir. Alttaşın toprak düzleminde herhangi bir noktasından delik açılarak RF konnektörün en iç kısımda yer alan iletken ucu yama yüzeyine, RF konnektörün topraklama kısmı olan en dışındaki metal ise antenin toprak düzlemine bağlanarak gerçekleştirilir. Bu besleme yönteminin en önemli avantajı mikroşerit beslemeye göre alan tasarrufu sağlamak, parazit ışımasının çok düşük olması ve beslemenin giriş empedansına kolay bir şekilde uyumlandırılması için yama yüzeyinde herhangi bir noktaya yerleştirilebilmesidir. Fakat dar bant genişliği etkisi ve bir deliğin bulunması üretilmesini zorlaştırması gibi dezavantajlara sahiptir [68]. Şekil 3.13'te koaksiyel besleme yöntemi gösterilmektedir. Eş. 3.19 ve Eş. 3.20'de verilen eşitliklerde beslemenin yama üzerindeki konumu yaklaşık olarak hesaplanmaktadır [69].



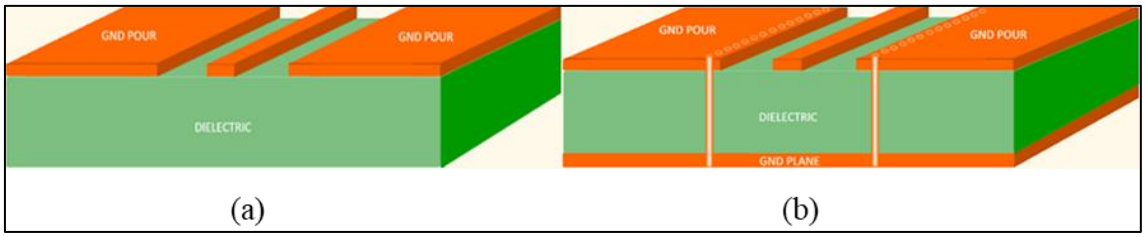
Şekil 3.13. Koaksiyel besleme

$$X_f = \frac{L}{\sqrt{\varepsilon_{r_{eff}}}} \tag{3.19}$$

$$Y_f = \frac{W}{2} \tag{3.20}$$

3.1.11. CPW besleme

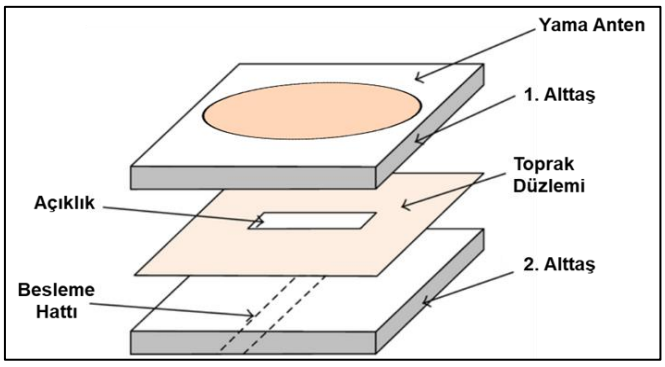
CPW yapısı, aynı yüzey üzerinde şeride bitişik ve paralel uzanan iki dar yarık toprak elektroduna sahip elektrik alt tabaka levhasının yüzeyine yerleştirilmiş bir medyan metalik şeritten oluşur. İletim hattı imalatta tek düzlemlidir, bu da tüm iletkenlerin alt tabakanın aynı düzleminde/tarafında olduğunu gösterir. Daha az dağılım, düşük radyasyon kaybı, basit tasarım ve tek metalik katman aracılığıyla basit entegre devreler gibi sayısız özelliğe sahiptir. Şekil 3.14'te CPW besleme teknikleri gösterilmektedir. Şekil 3.14 (a)'da basit CPW yapısı gösterilirken, Şekil 3.14 (b)'de alt yüzeydeki toprak düzlem ile üst taraftaki toprak düzlemin birleştirilmesi ile oluşan topraklaştırılmış CPW yöntemi gösterilmektedir. CPW beslemeli antenler, iyi empedans, daha az kayıp, daha geniş bant genişliği, eşleştirme ve yekpare mikrodalga tümleşik devreler veya aktif cihazlarla daha kolay entegrasyon gibi tasarım gibi avantajları nedeniyle ön plana çıkmaktadır.



Şekil 3.14. CPW besleme (a) Basit CPW (b) Topraklaştırılmış CPW

3.1.12. Açıklık kuplajlı besleme

Açıklık kuplajlı beslemede iki farklı alttaş malzemesinin toprak düzlem ile ayrılması ile oluşturulur. Yama ve besleme hattı arasındaki bağlantı, zemin düzlemindeki bir yarıktan yapılır. Bağlantı açıklığı genellikle yamanın altında ortalanır, bu da konfigürasyonun simetrisinden dolayı daha düşük çapraz polarizasyona yol açar. Besleme hattından yamaya bağlanma miktarı, açıklığın şekli, boyutu ve konumu ile belirlenir. Zemin düzlemi yamayı ve besleme hattını ayırdığından, sahte radyasyon en aza indirilir. Şekil 15'te açıklık kuplajlı besleme tekniği gösterilmektedir. Genel olarak, yamadan gelen radyasyonu optimize etmek için alt tabaka için yüksek bir dielektrik malzeme kullanılır ve üst tabaka için kalın, düşük dielektrik sabit bir malzeme kullanılır. Bu besleme tekniğinin en büyük dezavantajı, anten kalınlığını da artıran çoklu katmanlar nedeniyle imal edilmesinin zor olmasıdır.

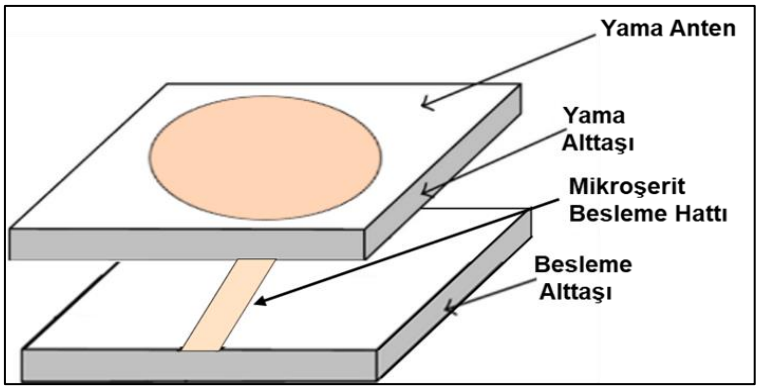


Şekil 3.15. Açıklık kuplajlı besleme

3.1.13. Yakınlık kuplajlı besleme

Bu tür beslemede, besleme hattı iki alt tabaka arasında olacak şekilde iki dielektrik alt tabaka kullanılır. Şekil 3.16'da yakınlık kuplajlı besleme yöntemi gösterilmektedir. Işıma gerçekleştiren yama, üst alttaşın üzerinde, mikro şerit besleme hattıysa alttaki alttaşın

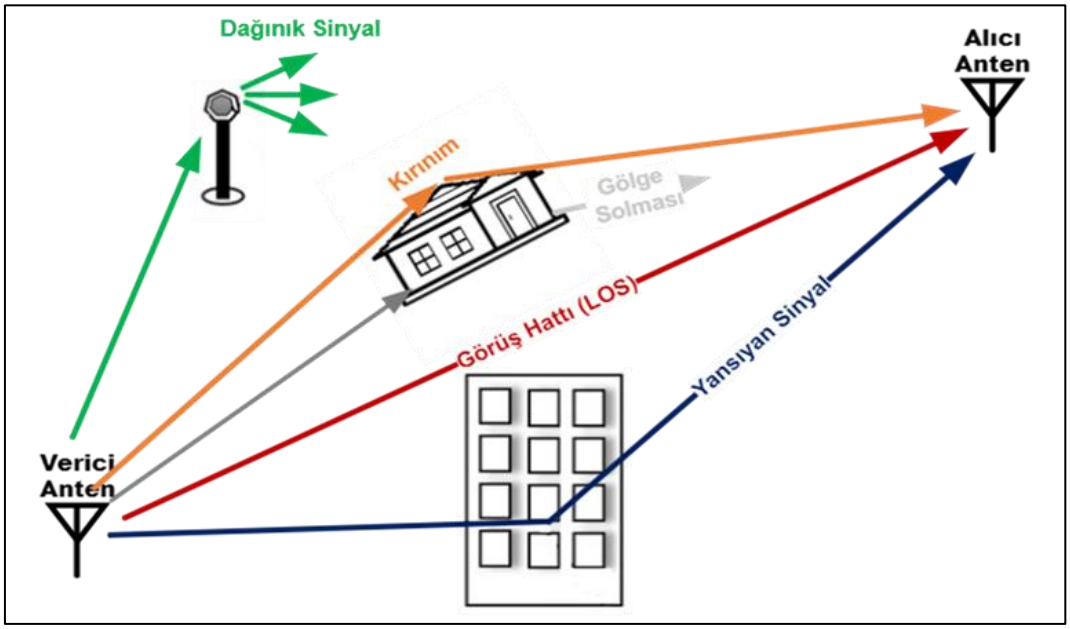
üzerinde ve toprak zemin alttaki alttaşın alt tarafına konumlandırılmıştır. Bu besleme tekniğinin ana avantajı çok yüksek bant genişliği sağlamasıdır. Bu şema ayrıca, bireysel performansları optimize etmek için biri yama için ve diğeri besleme hattı için olmak üzere iki farklı dielektrik ortam arasında seçimler sağlar.



Şekil 3.16. Yakınlık kuplajlı besleme

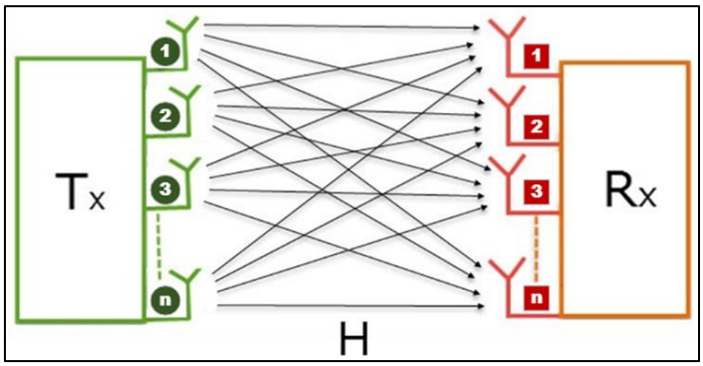
4. ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ TEKNOLOJİSİ

Kablosuz bir haberleşme sisteminde iletişim sinyal yayılımı ile gerçekleşir. Bu yayılım, işaretin sönümlenmesine ve iletilen sinyalin dağılıp zamanda yayılmasına neden olur. Basit bir şekilde çok yollu yayılım, bir haberleşme kanalına gönderilen bilgi işaretinin alıcıda ilk ve son görünümü arasındaki farka denir. Şekil 4.1'de çok yollu yayılım gösterilmektedir. Çok yollu yayılımda istenilen iletişim görüş hattı (Light of Sight - LOS), yansıyan sinyaller, kırınım ve dağınık sinyaller ile gerçekleştirilir. Çok yollu iletişimde istenilen bağlantı türü LOS bağlantısıdır. Kablosuz haberleşmede işaret çok yollu yayılımdan kaynaklanan sönümlemelere ve bozuculara maruz kalır. Bu nedenle kablosuz bir haberleşmeyi en çok bozan etkenlerin başında yol kaybı, gölgeleme ve çok yollu sönümleme gelir. İletilen dalganın dalga boyundan daha büyük bir yüzeye çarparak oluşturduğu yola yansıma denir. Yansıyan sinyalin miktarı, malzemenin özelliklerine, dalganın geliş açısına ve yönlülüğüne bağlı olarak değişir [70]. Keskin kenarlara sahip yapılara çarpan iletilen sinyalin keskin yüzeydeki çarpma sonucu ikincil dalgaların oluşması kırınım olarak ifade edilir. Buna ek olarak vericiden gönderilen işaret genellikle küçük boyutlu cisimlere çarparak saçılıma uğrayarak dağınık sinyalleri meydana getirir.



Şekil 4.1. Çok yollu yayılım

MIMO haberleşme sistemleri son yıllarda artan kullanıcı sayısı ve veri iletişim trafiği nedeniyle bir kurtarıcı vazifesi görmektedir. MIMO teknolojisinin en önemli özelliği ek bir güç ya da bant genişliği ihtiyacına gereksinim duymadan kanal kapasitesi ve güvenilirliği arttırabilmesidir [6]. Bu özelliğinden dolayı 4G haberleşmesiyle birlikte haberleşme sistemleri için büyük ve kritik bir rol üstlenmiştir. MIMO sistemler hem verici kısımda hem de alıcı kısımda birden fazla kanal kullanılması esasına dayanır. Bu sayede sınırlı olan bir kapasiteyi çoklu kanal kullanarak arttırmak mümkün olur. Ek olarak hem vericide hem de alıcıda kullanılan birden fazla anten sayesinde çeşitlik kazancı sağlanır. MIMO sistemlerde çeşitlilik yöntemleri sayesinde alıcı ve verici antenleri kullanarak sinyal zayıflamasının üstesinden gelinir [71]. MIMO sistemler çeşitlilik yöntemleri ve uzamsal çoğullama ile haberleşme sistemlerini iki farklı şekilde geliştirirler. MIMO sistemlerindeki kanal kapasitesinin büyük bir bölümünü azaltılmış donanım maliyetleri ve hesaplama karmaşıklığıyla yakalamanın umut verici bir yolu, mevcut daha büyük anten setinden en uygun şekilde az sayıda "en iyi" anteni seçmektir [72]. Bununla birlikte, bu tür bir optimal seçim için gereken hesaplamaların sayısı, mevcut toplam anten sayısıyla katlanarak artar.



Şekil 4.2. Noktadan noktaya MIMO Haberleşmesi

N sayıda verici ve alıcı antene sahip bir MIMO sistemi Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Bu yöntemin temel düşüncesi, ekstra güç olmadan aynı taşıyıcı frekansında birden çok anten kullanarak çeşitli veri bilgi akışlarını göndermektir. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere n elemanlı bir MIMO haberleşme sisteminde n x n adet kanal oluşur. MIMO haberleşmesinde gerçekleşen iletişim Eş. (4.1), Eş. 4.2), Eş. (4.3), Eş. (4.4) ve Eş. (4.5) eşitlikleri kullanılarak matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$Y = Hs + n \tag{4.1}$$

Burada s iletilen işaret vektörü, H kanal matrisi yani n x n'lik matrisli kanalın cevabıdır, y alıcıda alınan işaret vektörü ve n kanalın gürültü vektörüdür.

$$s\,(t) = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ s_3(t) \\ \vdots \\ s_n(t) \end{pmatrix} \tag{4.2}$$

$$y\,(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ \vdots \\ y_n(t) \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

$$H\,(\tau,t) = \begin{pmatrix} h_{11}(\tau,t) & h_{12}(\tau,t) & \dots & h_{1n}(\tau,t) \\ h_{21}(\tau,t) & h_{22}(\tau,t) & \dots & h_{2n}(\tau,t) \\ h_{31}(\tau,t) & h_{32}(\tau,t) & \dots & h_{3n}(\tau,t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1}(\tau,t) & h_{n2}(\tau,t) & \dots & h_{nn}(\tau,t) \end{pmatrix} \tag{4.4}$$

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{N} h_{i,j}(\tau,t) * s_j(t) + n_i(t) \tag{4.5}$$

Burada Sj (t) antenden gönderilen işareti, yi (t) antenden alınan işareti, hi,j (τ,t)*sj (t) verici anten ile i. alıcı anten arasındaki kanalın impuls cevabını ve H (τ,t) nxn'lik kanalın cevabını ifade etmektedir.

2.6. MIMO Kanal Kapasitesi

MIMO sistemler çoklu giriş çoklu çıkış yapılarından kaynaklı olarak geleneksel zaman ve frekans boyutlarına ek olarak uzaysal boyuttan da etkin bir biçimde faydalanırlar [73]. Bu etkilerinden dolayı geleneksel anten tekniklerine oranla devasa büyük bir kanal kapasitesi sağlanır. Kanal kapasitesi, seçilen bir kanalın kullanım süresince bu kanal üzerinden gönderilebilecek olan maksimum bilgi miktarı olarak ifade edilir. MIMO haberleşme sistemlerinde kanal kapasitesi sadece işaret gürültü oranına (Signal to Noise Ratio - SNR) değil, aynı zamanda anten elemanları arasındaki uzaysal korelasyon yönteminin etkisine de bağlıdır [74]. MIMO antenli sistemlerde alt kanalların ideal olarak birbirinden bağımsız

olduğu varsayılır ve toplam kanal kapasitesi kullanılan anten sayısıyla doğrusal olarak arttar [75].

Zamanla değişmeyen beyaz Gauss gürültülü MIMO kanal için, iletim gücü verici anten elemanları arasında eşit bir şekilde dağıldığında, kanal kapasitesi Eş 4.6'dan faydalanılarak hesaplanır. Kanal kapasitesi, C harf ile gösterilir ve birimi bit/saniye/Hz olarak ifade edilir.

$$C = \log_2 \det\left(I_{n_g} + \frac{\rho}{n_T} HH^*\right) \quad (4.6)$$

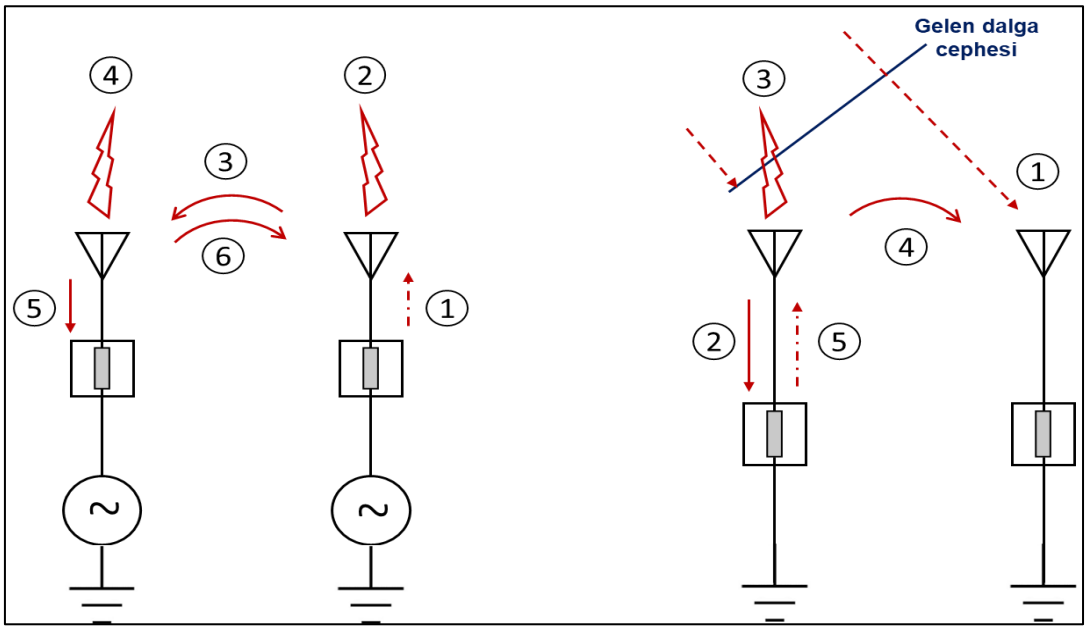
Burada ; n_T verici anten eleman sayısı, n_R alıcı anten eleman sayısını, H kanal matrisini, H*, H'nın transpozunun karmaşık eşleniğini, ρ ortalama SNR değerini, I birim matrisi ve det(.) matrisin determinantını ifade etmektedir.

2.7. MIMO Antenler

5G haberleşme sistemlerinde kullanılan mm-Dalga bandı, halihazırda ticari kablosuz sistemlerde kullanılanlara kıyasla daha yüksek bant genişliğine sahip iletişim kanalları sunmaktadır. 5G'nin bu özelliği nedeniyle MIMO yapılı antenler 5G uygulamaları için vazgeçilmezdir. MIMO haberleşme sistemlerinin çok kanallı özellikleri sayesinde 5G'nin kullanılmasının önüne geçen bant genişliği ve kanal kapasitesi gibi sınırlar kaldırılarak 5G'nin kullanımı için bir anahtar olmuştur. MIMO Antenler alıcı ve verici tarafta birçok anten elemanının kullanılmasıyla elde edilirler. 2x2, 4x4 vb. şekilde ifade edilirler.

MIMO antenlerde alıcı ve verici tarafında birçok anten kullanılması ile anten çeşitlenmesi sağlanır ve bu sayede kanal kapasitesinin arttırılması ile birlikte iletişim esnasında hız ve hata olasılığı gibi önemli parametreler iyileştirilir. Alıcı ve verici kısımlarda çoklu anten kullanımının yanı sıra çeşitli hüzme şekillendirme yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla anten çeşitlenmesi sağlanır.

2.8. Ortak Etkileşim (Mutual Coupling)

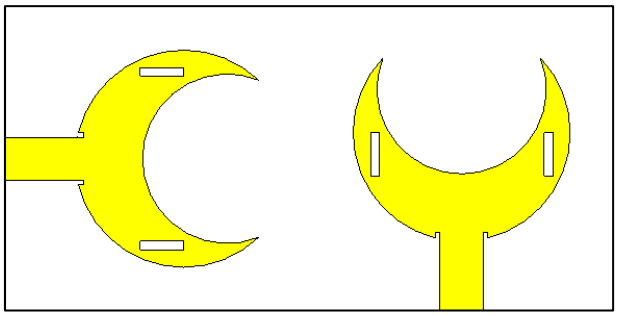


Şekil 4.3. Ortak etkileşim (a) Anten verici durumda (b) Anten alıcı durumda

MIMO yapılı antenlerde anten elemanları arasındaki etkileşim anten performansında önemli bir rol oynar. Ortak etkileşim, bir anten elemanı ışıma gerçekleştirirken bu enerjinin diğer anten tarafından emilmesi olarak ifade edilir. MIMO ve dizi antenlerde anten elemanlarının birbirine etki MIMO etmelerini engellemek gerekir. Bu nedenle ortak etkileşim çok elemanlı MIMO antenlerde en dikkat edilmesi gereken kriter olarak karşımıza çıkar. 5G teknolojisinde mm-dalga frekans spektrumun kullanılmaya başlamasıyla beraber dalga boyları milimetre boyutlarına düşmüştür. Bununla birlikte anten elemanlarının boyutları ve aralarındaki mesafelerde çok küçülmüştür. Bundan kaynaklı olarak 5G teknolojisinde MIMO antenlerin kullanılması ile ortak etkileşim en önemli etkenlerden biri haline gelmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi anten elemanları arasındaki ortak etkileşim anten performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Genel olarak anten verimliliği ve radyasyon örüntüsüne etkisi çok güçlüdür. Öyle ki anten ışıma örüntüsünü değiştirebilir. Ortak etkileşimin etkileri anten elemanları arasındaki izolasyon ile ölçülür. Bu nedenle ortak etkileşimi bastırarak anten elemanları arasındaki izolasyonu arttırmak ve anten performansını arttırmak amacıyla genel olarak 2 yöntem kullanılır. Bu yöntemler sırasıyla; anten elemanlarının birbirlerine dikey olarak yerleştirilmesi ve anten elemanları üzerinde MTM yapılarının kullanılmasıdır.

4.1.1. Dikey yerleşim

Işıma radyasyonu antenler için önemli parametrelerinden biridir. Yönlü antenler belirli bir yöne ışıma yapan antenler olarak tanımlanırlar. MIMO yapılı antenlerde aynı yönlülüğe sahip anten elemanlarının birbirlerine dikey olarak yerleştirilmesi ile anten elemanlarının ışıma doğrultusu değiştirilerek ışıma esnasında birbirlerine olan etkileri en aza indirilerek aralarındaki izolasyon arttırılır. Şekil 4.4'te 2x2'lik bir MIMO antene ait anten elemanlarının birbirlerine dikey olarak yerleşimi gösterilmektedir. MIMO anten tasarımlarında anten elemanlarının dikey olarak yerleştirilmesi tasarım kolaylığından kaynaklı olarak literatürde oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir.



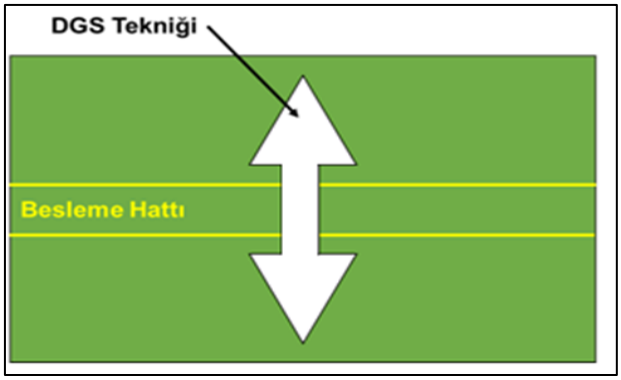
Şekil 4.4. 2 elemanlı MIMO antende anten elemanlarının dikey yerleşimi

4.1.2. Metamalzeme yapıları

Genel olarak, MTM'ler, çapı yayılan ışığın dalga boyundan daha küçük olan birim hücrelerin periyodik veya periyodik olmayan yapılarından oluşan tasarlanmış yapay malzemeler olarak tanımlanır [76]. MTM yapıları antende birer elektromanyetik bir filtre görevi görerek anten performansını önemli ölçüde etkilerler. Bu nedenle en büyük avantajları antenlerin kazanç, bant genişliği ve verimlilik gibi önemli performanslarını arttırmanın yanı sıra, anten boyutlarının minimize edilmesi ve MIMO anten gibi çok elemanlı yapılarda anten elemanları arasındaki izolasyonu arttırmasıdır. Bu nedenle anten tasarımlarında oldukça ilgi çekicilerdir. Literatürde birçok çeşit MTM yapıları mevcuttur. En çok kullanılan MTM yapıları DGS, EBG, SRR ve frekans seçici yüzeyler (Frequency Selective Surface - FSS gibi yapılarıdır.

Kusurlu toprak yapısı

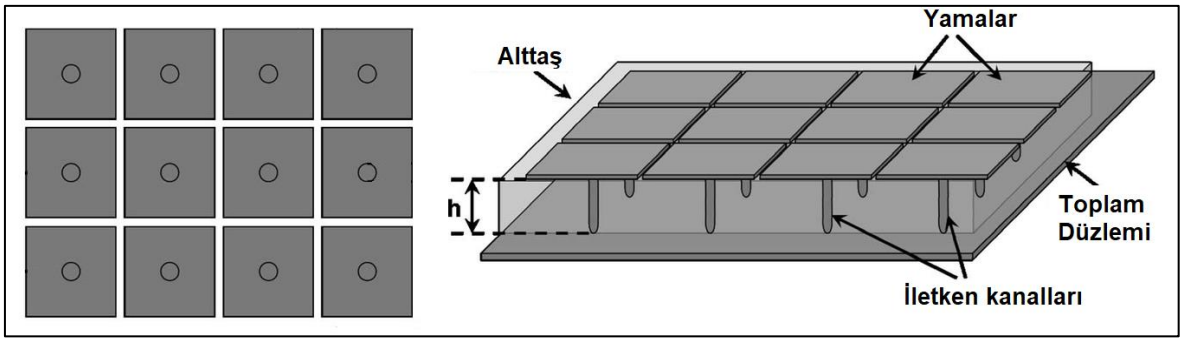
Mikroşerit, koaksiyel ve CPW gibi düzlemsel iletim hatlarının toprak düzleminde periyodik ya da periyodik olmayan bir şekilde kusur oluşturulmasıdır [77]. Bir iletim hattının hat kapasitansı ve endüktansı gibi özellikleri oluşturulan kusur ile değiştirilerek toprak düzlem üzerindeki akım dağılımı bozulur. Bununla birlikte anten tasarımlarının izolasyon, kazanç, bant genişliği vb. parametreleri iyileştirilmiş olur. Literatürde birçok farklı geometrik yapılarda DGS mevcuttur. Oluşturulan DGS geometrisine göre anten etkileri değişir. Şekil 4.5'te bir DGS tekniğinin yapısal bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 4.5. DGS tekniği

Elektromanyetik bant boşluğu

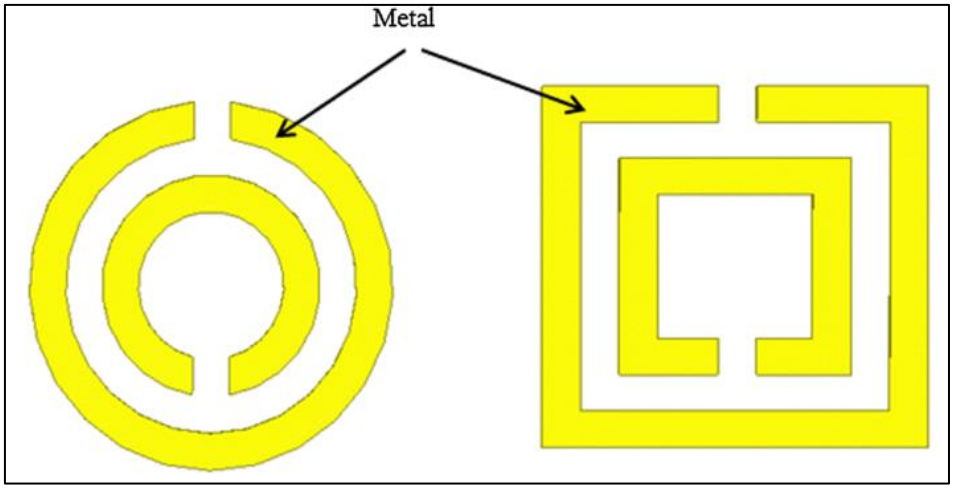
Genel olarak EBG yapıları, elektromanyetik dalgaların tüm açılar ve tüm polarizasyon durumları için belirli bir frekans bandında yayılmasını engelleyen 3 boyutlu periyodik nesneler olarak ifade edilirler. Pratikte antenlerde geniş bant aralıkları gerçekleştirmek zordur, bu nedenle genelde kısmi bant aralıkları oluşturulur [78]. EBG yapısı, dielektrik yüzeyler üzerinde yer alan metal yamaların ince, periyodik bir modelini oluşturarak belirli frekans bantlarındaki elektromanyetik dalgaları engellemek için bir durdurma bandı oluşturmasının yanı sıra algıladığı frekans bantlarının küçük elektromanyetik dalgalarını yansıtarak elektromanyetik yapıların hassasiyetini ve çözünürlüğünü arttıran yapılardır. Şekil 4.6'da basit bir EBG yapısı gösterilmektedir. EBG yapıları literatürde minyatür anten tasarımı, polarizasyon koruması, yönlülük ve kazanç arttırma ve hüzme oluşturma gibi amaçlar içinde sıklıkla kullanılmaktadır [79].



Şekil 4.6. Basit bir EBG yapısı

Bölünmüş rezanatör halkası (Split Rezonator Ring, SRR)

SRR, içlerinde zıt uçlarda bölmeler bulunan bir çift kapalı döngüye sahiptir. Döngüler, bakır gibi manyetik olmayan metalden yapılmıştır ve aralarında küçük bir boşluk vardır. Döngüler eş merkezli veya kare olabilir ve gerektiğinde boşluk bırakılabilir. Metal halkalara nüfuz eden bir manyetik akı, halkalarda dönen akımları indükler; bu akımlar, olay alanını güçlendirmek veya karşı koymak için kendi akılarını üretirler. Halkalar arasındaki küçük boşluklar, rezonans frekansını düşüren büyük kapasitans değerleri üretir. Dolayısıyla yapının boyutları, rezonans dalga boyuna kıyasla küçüktür. Bu nedenle SRR yapılar düşük radyasyon kayıpları ve çok yüksek kalite faktörleri elde edebilirler. Şekil 4.7'de Geleneksel SRR yapıları gösterilmektedir. Şekil 4.7. (a)'da Dairesel SRR (Circular SRR - CSRR) ve Şekil 4.7. (b)'de Dikdörtgensel SRR yapısı belirtilmektedir.



(a) (b)

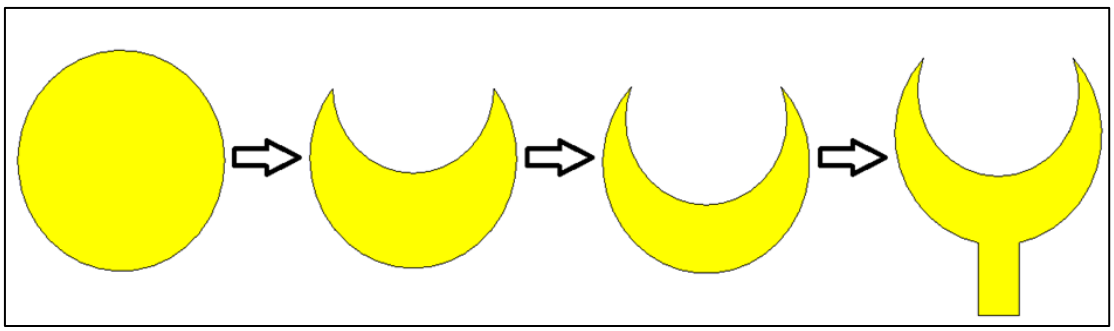
Şekil 4.7. Geleneksel SRR yapıları (a) Dairesel SRR, (b) Dikdörtgen SRR

5. 5G UYGULAMALARI İÇİN MİKROŞERİT MIMO ANTEN TASARIMI

Tez çalışmasında 4 elemanlı MIMO Anten tasarımı gerçekleştirilmiş ve incelenmiştir. Önerilen MIMO Anten tasarımı ilk olarak yama anten olarak tasarlanmış ve incelenmiştir. Yama anten tasarımında her iki yüzeyinde bakır olan Rogers RT5880 alttaşı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. RT5880 Alttaşı 2,2'lik dielektrik katsayısına (Ɛr) ve 0,0009'luk kayıp tanjanta (tanδ) ve 0,508 mm kalınlığa sahiptir. Alttaşın her iki yüzeyinde yer alan bakırın kalınlığı 35µm'dir. Tekli yama antende istenilen benzetim sonuçları elde edildikten sonra MIMO Anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu bölüm Yama Anten Tasarımı ve MIMO Anten Tasarımı olarak iki kısım olarak gerçekleştirilmiştir. Anten benzetimleri CST Studio Suite ve HFSS programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.9. Mikroşerit Yama Anten Tasarımı ve Benzetimi Sonuçları

Tez çalışmasında ilk olarak 28 GHz ve 38 GHz frekans bantlarında çalışan Hilal desenli mikroşerit yama anteni tasarımı gerçekleştirilmiş ve incelenmiştir. Hilal deseni dairesel geometri biçiminden elde edilmiş olup Şekil 5.1'de Hilal deseninin oluşum evreleri gösterilmektedir. Hilal şekli kullanılarak Hilal desenli yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Hilal deseninin temelini oluşturan Dairesel biçim Eş. 5.1 ve Eş. 5.2 denklemlerinden faydalanılarak elde edilmiştir.

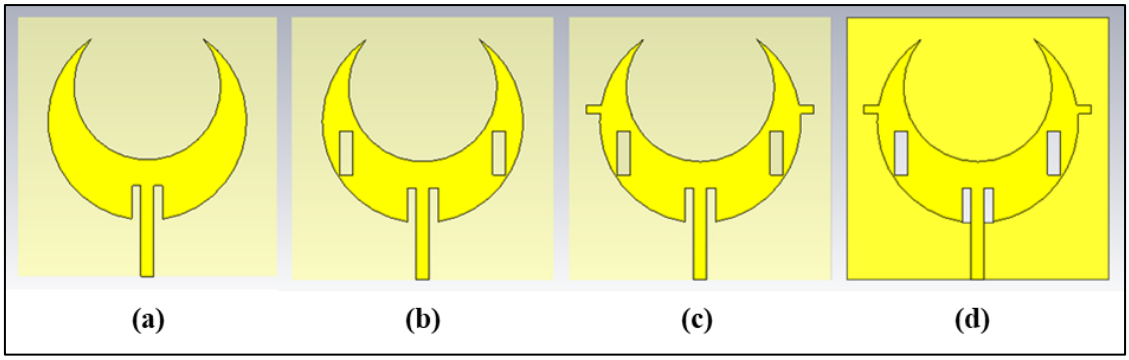


Şekil 5.1. Hilal desen geometrisinin oluşturulması

$$(fr)_{mn0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \cdot \left(\frac{x'_{mn}}{a}\right) \tag{5.1}$$

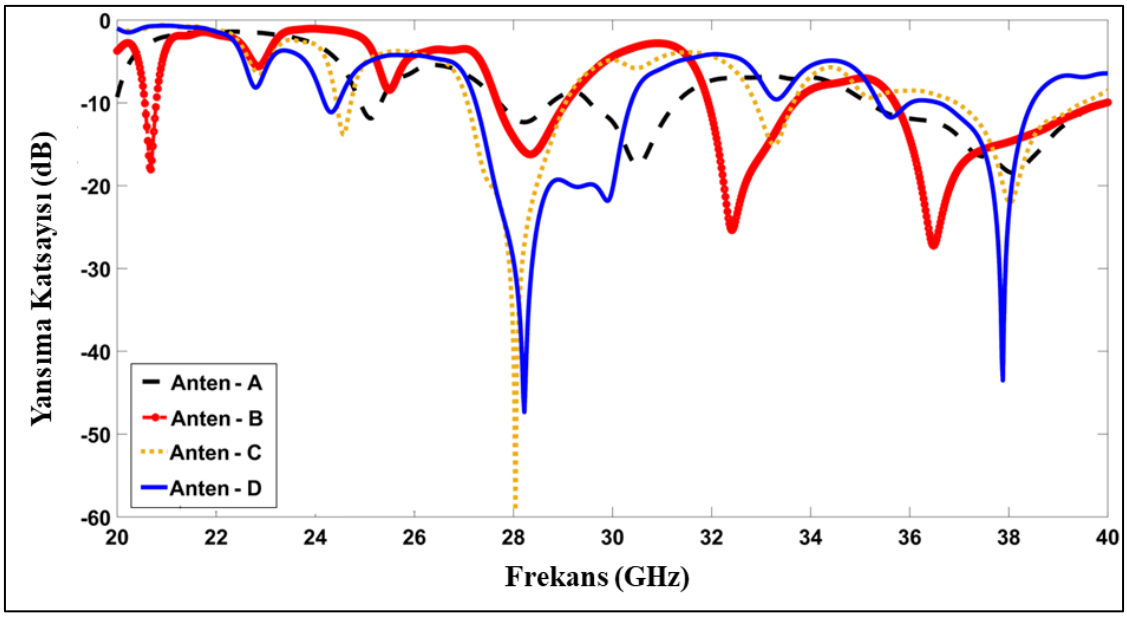
$$a_e = a\left\{1 + \frac{2h}{\pi a \varepsilon_r}\left[\ln\left(\frac{\pi a}{2h}\right) + 1.7726\right]\right\}^{1/2} \quad (5.2)$$

Burada m, n TM modu tamsayılarıdır ve x'_{mn}, Bessel fonksiyonu Jm(x)'in türevinin sıfırlarını temsil eder ve rezonans frekanslarının sırasını belirler.



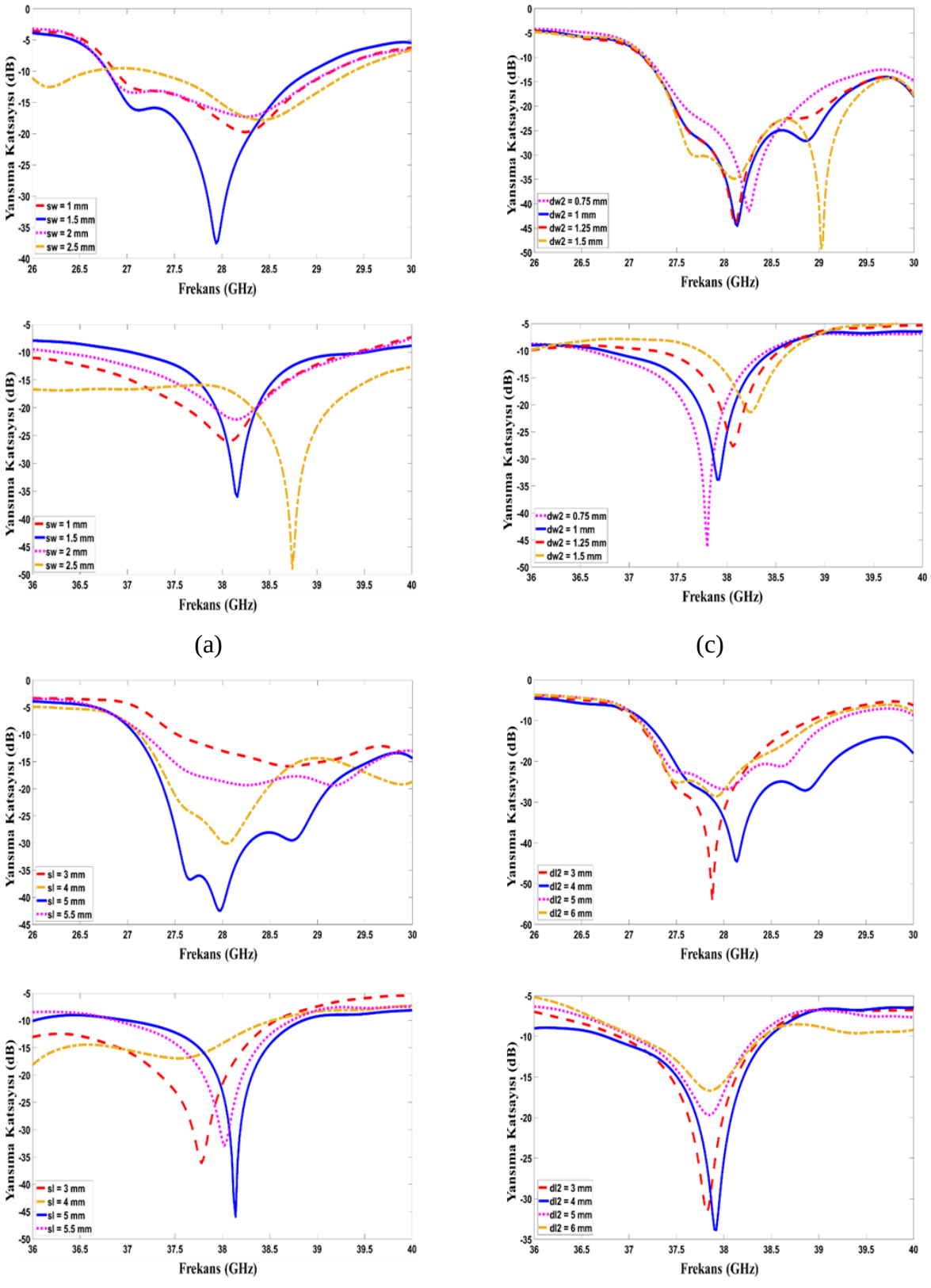
Şekil 5.2. Tek elemanlı antenin performans arttırma aşamaları (a) 1. Adım (A-Anteni), (b) 2. Adım (B-Anteni), (c) 3. Adım (C-Anteni) ve (d) 4. Adım (D-Anteni)

Daha sonra tasarımı gerçekleştirilen Hilal desenli yama antenin en iyi performansını elde etmek için bazı teknikler uygulanmıştır. Şekil 5.2'de tek elemanlı yama antenin performansı arttırma aşamalarında kullanılan tekniklerin uygulandığı anten tasarımları gösterilmektedir. Şekil 5.2 (a)'da inset fed tekniğinin kullanıldığı Hilal şekline sahip A - anteni, Şekil 5.2 (b)'de A - anteni üzerine yarık açma yöntemiyle kullanılarak oluşturulan B - anteni, Şekil 5.2 (c)'de B - anteni üzerine çıkıntı eklenmesiyle oluşan C - anteni ve Şekil 5.2 (d)'de C anteninin toprak zemini üzerinde DGS yapılarının eklenmesiyle oluşturulan D - anteninin yapısı belirtilmektedir. Şekil 5.3'te A, B, C ve D antenlerinin -10 dB referansında yansıma katsayısı (S11) performansları gösterilmektedir. Buradan A - anteninin 30 GHz ve 38 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla 1.5 GHz ve 4.7 GHz'lik band genişliğine sahip yaklaşık -17.5 dB ve -18.5 dB'lik yansıma katsayısına sahip olduğu, B - Anteninin 28 GHz ve 38 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla 2.75 GHz ve 3 GHz'lik band genişliğine sahip yaklaşık -26.5 dB ve -41 dB'lik yansıma katsayısına sahip olduğu, C - Anteninin 28 GHz ve 38 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla 2 GHz ve 2.55 GHz'lik band genişliğine sahip yaklaşık -59 dB ve -22 dB'lik yansıma katsayısına sahip olduğu ve D - Anteninin 28 GHz ve 38 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla 3.15 GHz ve 1.81 GHz'lik band genişliğine sahip yaklaşık -47.5 dB ve -43.5 dB'lik yansıma katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak D - Anteni nihai Hilal desenli yama anten tasarımı olarak kararlaştırılmıştır.



Şekil 5.3. A, B, C, D anten tasarımlarının yansıma katsayısı performansı

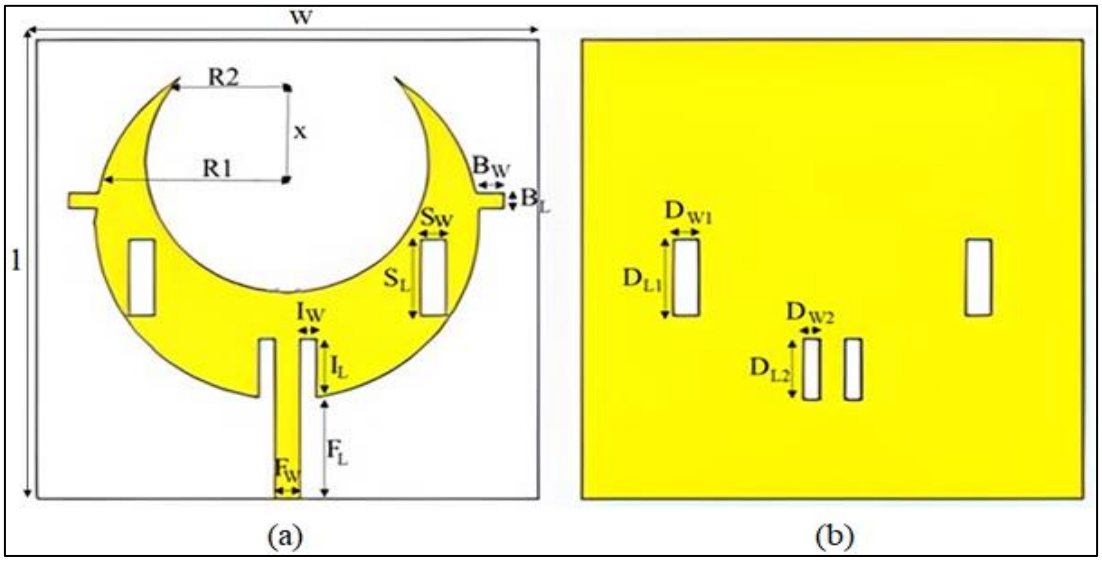
Hilal desenli tekli yama antende Hilal deseni üzerindeki yarıkların ve antenin toprak zemini üzerindeki DGS yapılarının anten performansına etkisi CST benzetim programında parametrik tarama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te Hilal desenli tekli yama antenin parametrik tarama sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.4 (a)'da yarık genişliğinin yansıma katsayısına olan etkisi, Şekil 4.4 (b)'de yarık uzunluklarının yansıma katsayısına olan etkisi, Şekil 4.4 (c)'de DGS yapısının genişliğinin yansıma katsayına olan etkisi ve Şekil 4.4 (d)'de DGS yapısının uzunluğunun yansıma katsayısına etkisi verilmektedir. Şekil 4.4'den görüldüğü üzere yarıkların ve DGS yapılarının konumları ve boyutları antenin 28 GHz ve 38 GHz çalışma frekanslarında yansıma katsayısı gibi parametre performanslarını önemli ölçüde etkilemektedir.



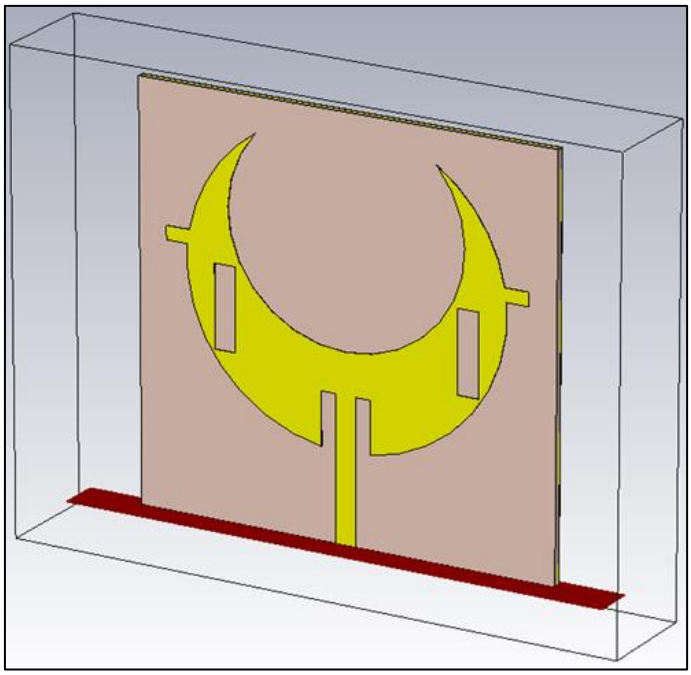
Şekil 5.4. Yarıkların ve DGS yapılarının anten performansına etkisi (a) yarık genişliği, (b) yarık uzunluğu, (c) DGS genişliği ve (d) DGS uzunluğu

Şekil 5.5 nihai tasarımımız olan tek elemanlı Hilal desenli mikroşerit yama antenin ön ve arka yüzey geometrilerinin görüntüsü gösterilmektedir. Şekil 5.5 (a)'da yama antenin tasarımının ön (yama) yüzeyi ve Şekil 5.5 (b)'da arka (toprak) yüzeyinin görüntüsü gösterilmektedir. Şekil 5.6'da yama antenin tasarımının CST Studio Suite benzetim programındaki 3 boyutlu tasarımının görüntüsü verilmektedir. Tablo 5.1'de tasarımı gerçekleştirilen Hilal desenli mikroşerit yama antenin parametreleri verilmektedir. Tekli mikroşerit yama anten 30 x 30 x 0,508 mm3 (3.26λ x 3.26λ x 0,148λ) boyutundadır. Anten performansını arttırmak için 50Ω gömme beslemeli (inset fed) besleme tekniğiyle birlikte yarık açma ve DGS teknikleri kullanılmıştır.

Tek elemanlı Hilal desenli yama antenin yansıma katsayısı Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Buna göre yama anten 28 GHz frekans bandında 27,23 – 30,37 GHz frekans aralığında çalışmakta 3,14 GHz bant genişliği ve -47,327 dB'lik maksimum yansıma katsayısı elde edilirken, 38 GHz frekans bandında 36,58 – 38,47 GHZ frekans aralığında çalışmakta olup 1,89 GHz bant genişliği ve yaklaşık -43,50 dB'lik maksimum yansıma katsayısı elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.8'de yama antenin kazanç grafiği verilmektedir. Buna göre 28 GHz frekansında 10,059 dB kazanca ve 38 GHz frekansında 7,3175 dB kazanca sahip olduğu görülmektedir.



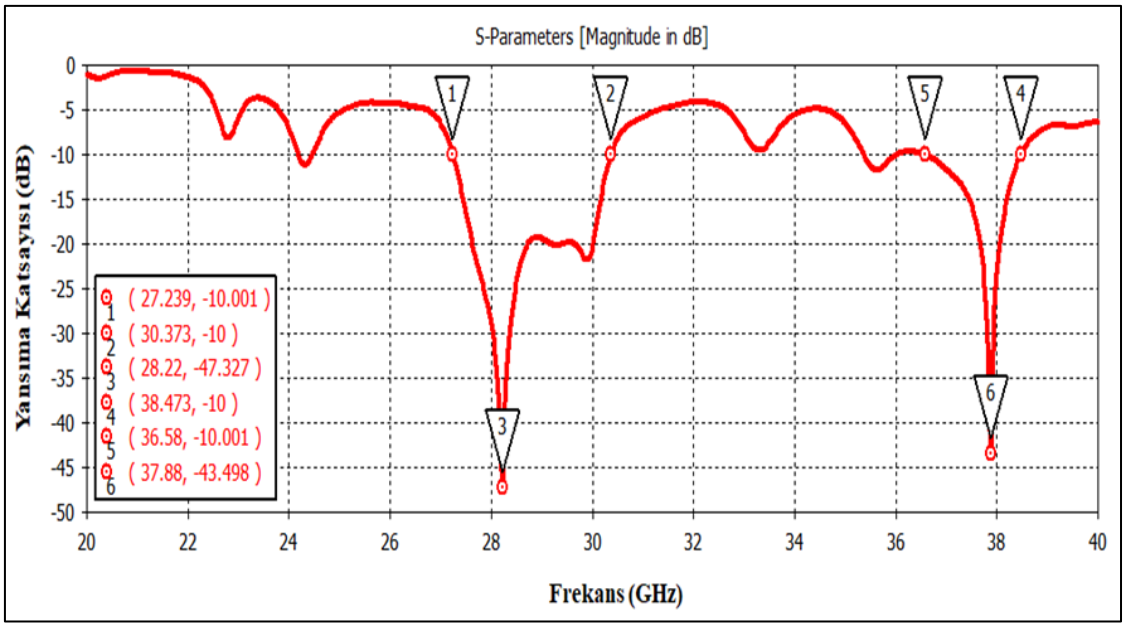
Şekil 5.5. Hilal desenli mikroşerit yama antenin (a) Ön yüzeyi ve (b) Arka yüzeyi



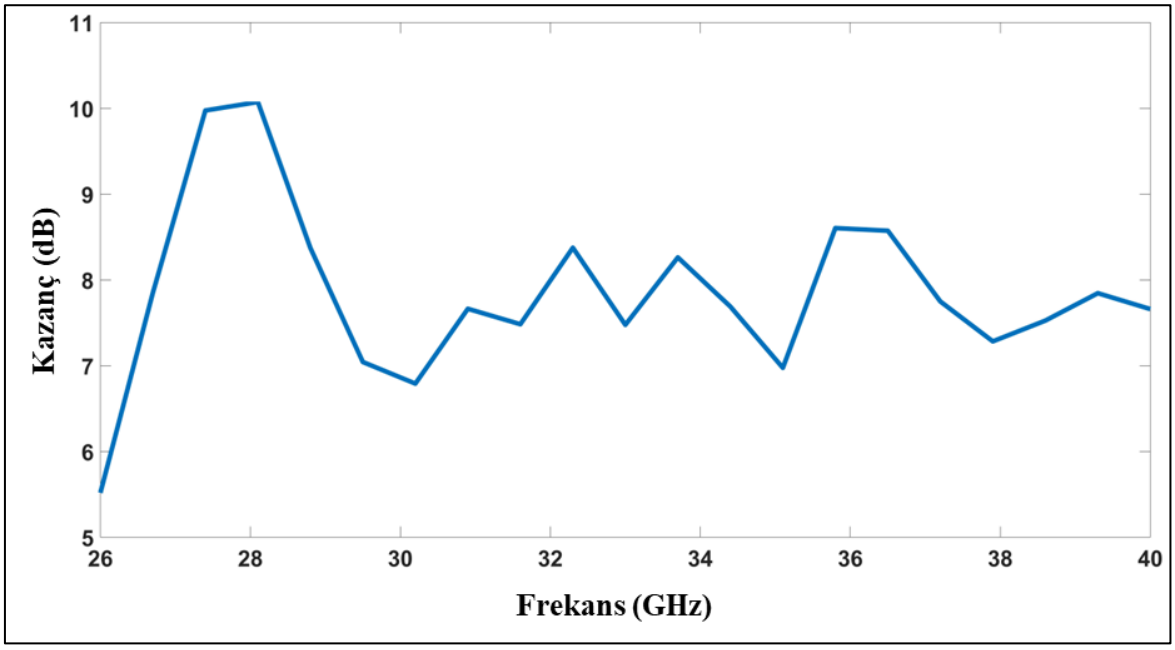
Şekil 5.6. Hilal desenli mikroşerit yama antenin benzetim programındaki tasarımı

Çizelge 5.1. Hilal desenli mikroşerit yama anten parametreleri

Sembol	Parametre	Boyut (mm)	Sembol	Parametre	Boyut (mm)
w	Substrate Uzunluğu	30	SW	Yama üzerindeki yarık genişliği	1,5
l	Substrate Genişliği	30	SL	Yama üzerindeki yarık uzunluğu	5
R1	İlk dairenin yarıçapı	11,5	DW1	İlk DGS yapısının genişliği	1,5
R2	İkinci dairenin yarıçapı	8,3	DL1	İlk DGS yapısının uzunluğu	5
FW	Besleme Genişliği	1,5	DW2	İkinci DGS yapısının genişliği	1
FL	Besleme Uzunluğu	6,75	DL2	İkinci DGS yapısının uzunluğı	4
İW	inset fed genişliği	1	BW	Yama üzerindeki çıkıntı genişliği	1,75
İL	inset fed uzunluğu	4	BL	Yama üzerindeki çıkıntı uzunluğu	1



Şekil 5.7. Yama antenin yansıma katsayısı

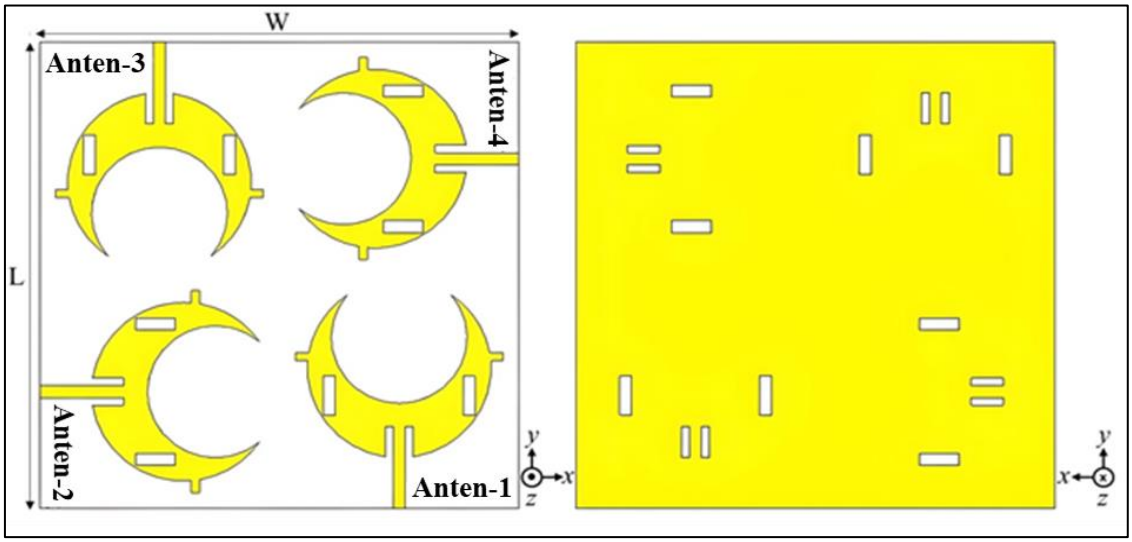


Şekil 5.8. Yama antenin kazancı

2.10. MIMO Anten Tasarımı

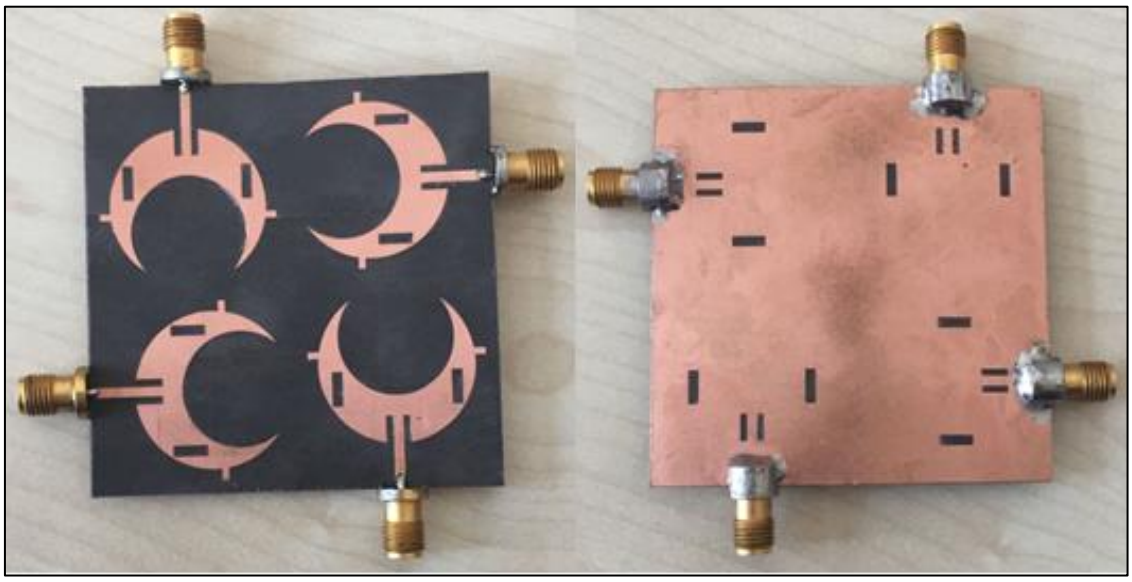
Bu bölümde tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen 4 elemanlı MIMO anteni yapısı verilmektedir. Şekil 5.9'da tasarımı gerçekleştirilen 4 elemanlı MIMO antenin geometrisinin ön ve arka yüzeyleri gösterilmektedir. Önerilen MIMO anteni 60 x 60 x 0,508 mm3 (5,6 λ0

x 5,6 λ0 x 0,047 λ0) boyutundadır. Üretilen 4 elemanlı Hilal desenli MIMO anten Resim 5.1'de gösterilmektedir. Resim 5.1 (a)'da antenin ön yüzeyi, Resim 5.1 (b)'de antenin arka yüzeyi görülmektedir. MIMO antenlerde en dikkat edilmesi gereken konuların başında antenler arasındaki izolasyonun sağlanmasıdır. Önerilen MIMO antende anten elemanları arasındaki izolasyonu sağlayabilmek için anten elemanları birbirlerine ortogonal olarak yerleştirilmiştir. Bu sayede antenler arasında yaklaşık 30 dB'den daha büyük izolasyon sağlanmıştır. Çizelge 5.2'de önerilen MIMO antenin parametreleri verilmektedir.



(a) (b)

Şekil 5.9. 4 Elemanlı MIMO Anten geometrisi (a) Ön Zemini (b) Toprak Zemini



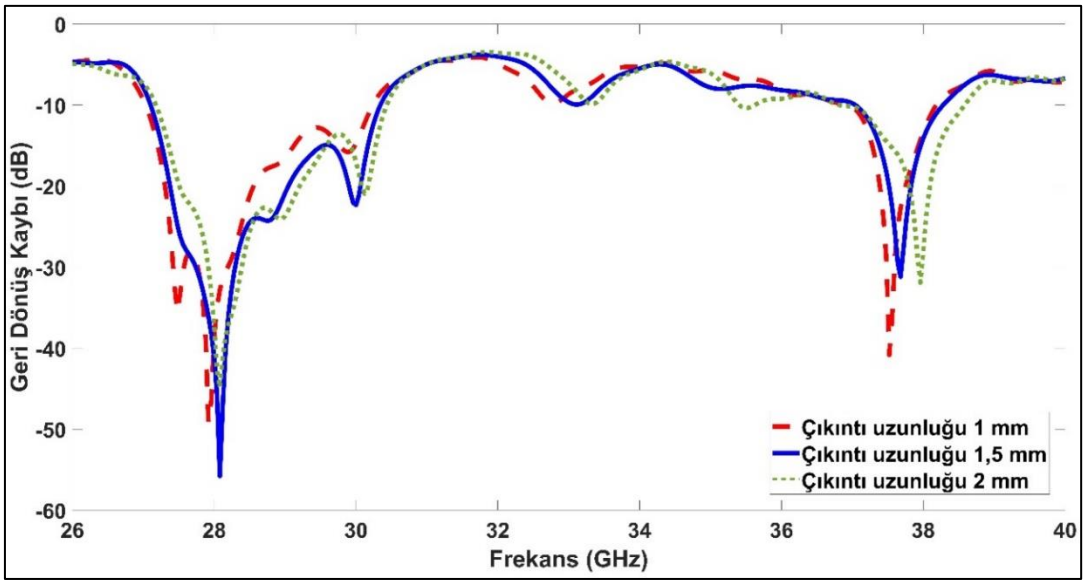
(a) (b)

Resim 5.1. Üretilen 4 elemanlı MIMO anten (a) Ön zemini (b) Arka zemini

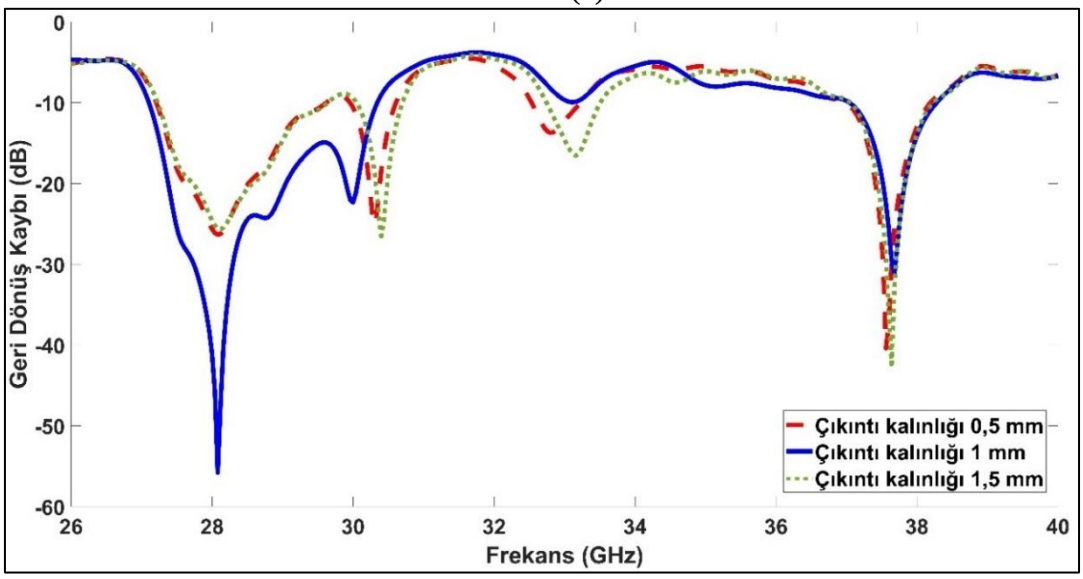
Şekil 5.10'da anten elemanları üzerinde oluşturulan çıkıntıların uzunluğu ve kalınlığı anten performansına etkisi gösterilmektedir. CST Studio Suite programında parametrik tarama (parametric sweep) özelliği kullanılarak en ideal çıkıntı uzunluğu ve kalınlığı belirlenmiştir. Şekil 5.10 (a)'da çıkıntı uzunluklarının, Şekil 5.10 (b)'de çıkıntı kalınlığının anten performansı üzerine etkisi gösterilmektedir. Buna göre anten elemanları üzerine yerleştirilen çıkıntıların sadece uzunluklarının değil aynı zamanda da konumlarının (kalınlıklarının) anten performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Buna göre 4 elemanlı MIMO antenin en ideal çıkıntı parametresi için çıkıntı uzunluğu değerlerinin PL1 = 26.5 mm ve PL2 = 28 mm değerlerinde ve en ideal çıkıntı kalınlığı değerlerinin PW1 = -9 mm PW2 = -10 mm konumlarında elde edilmektedir.

Çizelge 5.2. Önerilen MIMO antene ait parametreler

Sembol	Parametre	Boyut (mm)	Sembol	Parametre	Boyut (mm)
W	Substrate Uzunluğu	60	İL	İnset fed uzunluğu	4
L	Substrate Genişliği	60	SW	Yama üzerindeki yarık genişliği	1,5
R1	İlk dairenin yarıçapı	11,5	SL	Yama üzerindeki yarık uzunluğu	5
R2	İkinci dairenin yarıçapı	8,3	DW1	İlk DGS yapısının genişliği	1,5
x	Daireler arasındaki mesafe	4	DL1	İlk DGS yapısının uzunluğu	5
FW	Besleme Genişliği	1,5	DW2	İkinci DGS yapısının genişliği	1
FL	Besleme Uzunluğu	6,75	DL2	İkinci DGS yapısının uzunluğı	4
İW	İnset fed genişliği	1	BW	Yama üzerindeki çıkıntı genişliği	1,75
İL	İnset fed uzunluğu	4	BL	Yama üzerindeki çıkıntı uzunluğu	1



(a)



(b)

Şekil 5.10. 4 elemanlı MIMO antenin çıkıntı parametreleri (a) boyu (b) kalınlığı

2.11. Benzetim ve Ölçüm Sonuçları

4 elemanlı Hilal desenli MIMO Anten tasarımı gerçekleştirildikten sonra CST Studio Suite ve HFSS benzetim programları ile benzetimleri gerçekleştirilmiştir. İstenilen benzetim sonuçları elde edildikten sonra gerekli anten ölçümleri Keyshigt firmasının 10 MHz-50 GHz frekansları arasında çalışan 4 kanallı PNA-X modeli Network Analyzer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede MIMO Anten benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması gerçekleştirilerek antenin çalışma performansı hakkında bilgiler elde

edilmiştir. Resim 5.2'de Anten ölçümlerinde kullanılan 50Ω'luk SV Microwave firmasına ait DC 40 GHz frekansına kadar çalışan 2.92 mm'lik RF konnektör gösterilmektedir.



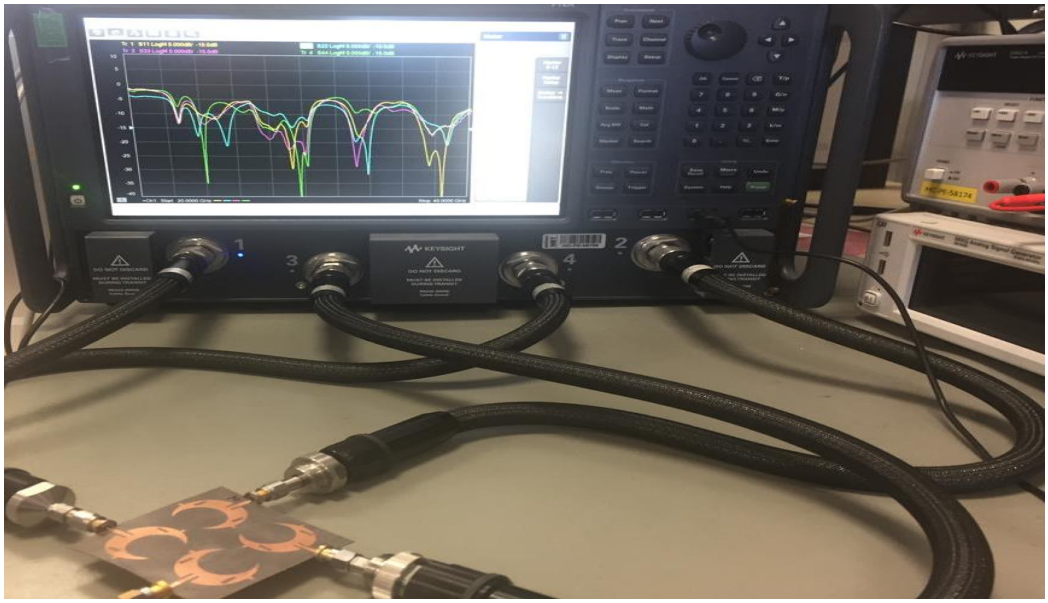
Resim 5.5.2. Anten ölçümlerinde kullanılan RF konnektör

5.1.1. S-parametreleri

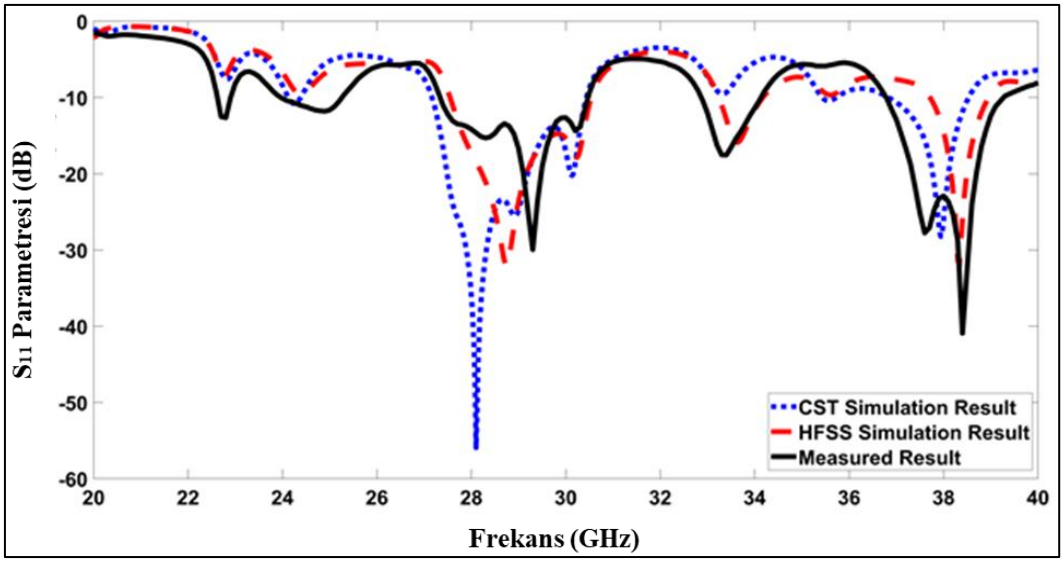
Diğer bir adı Saçılma parametreleri olan bu parametreler antenin geri dönüş kaybı, çalışma frekansı ve anten elemanları arasındaki izolasyon vb. gibi önemli bilgiler içerir. Bu parametreler sayesinde tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen antenin genel çalışması hakkında bilgiye ulaşılmaktadır. Yama antenlerde tek bir S11 (Yansıma katsayısı) parametresi bulunurken, MIMO Antenlerde birden fazla S parametresi bulunur. Çalışmamızda tasarımını ve üretimini gerçekleştirdiğimiz MIMO Anten 4 elemanlı olduğundan S11, S12, S13, S14 … S41, S42, S43 ve S44 olmak üzere 16 adet S – parametresi bulunmuştur. Sxx değeri x anten elemanının yansıma katsayısını, Sxy değeri ise anten elemanları arasındaki karşılıklı etkileşim hakkında bilgi vermektedir. MIMO yapılı antenlerin çok elemanlı olmaları sebebiyle anten elemanları arasındaki izolasyon büyük bir önem arz eder. Çünkü bir anten elemanı yayılım yaparken diğer anten elemanlarında herhangi bir etkileşim olmaması gerekir. Anten elemanları arasındaki izolasyonunun iyi olup olmadığı S-parametrelerinin ölçülmesiyle anlaşılabilir. İyi bir iletişim için Sxx parametresinin -10 dB oldukça altında, Sxy değerinin ise -30 dB altında olması istenir.

Resim 5.3'de 4 elemanlı MIMO yapılı antenin ölçüm düzeneğiyle S-parametrelerinin ölçümü gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 5.11'de MIMO antenin S11 parametresinin benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 5.11'de görüldüğü üzere çalışmada üretimi gerçekleştirilen MIMO yapılı antenin yansıma katsayısı grafiği incelendiğinde benzetim ve ölçüm sonuçlarının birbirleri ile örtüştüğü görülmektedir. Buna ek olarak Şekil 5.11'de HFSS programının benzetim sonucu ile MIMO Antenin ölçüm

sonucunun çok daha benzer olduğu görülmektedir. Bu grafiğe göre üretilen 4 elemanlı MIMO antenin 28, 33 ve 38 GHz frekans bantlarında yayılım yapmasına rağmen MIMO anten performansının 33 GHz'de istenilen değerlere ulaşmadığı için 33 GHz frekans bandı ihmal edilmiştir. Buna göre üretilen 4 elemanlı MIMO anten 28 GHz frekans bandında 27,35 – 30,40 GHz frekans aralığında yayılım gerçekleştirmekte iken 3,05 GHz (%10,89) bant genişliğine sahiptir. Aynı anten, 38 GHz bandında 36,98 – 39,398 GHz frekans aralığında yayılım gerçekleştirirken 2,41 GHz (%6,36) bant genişliğine sahip olmaktadır.

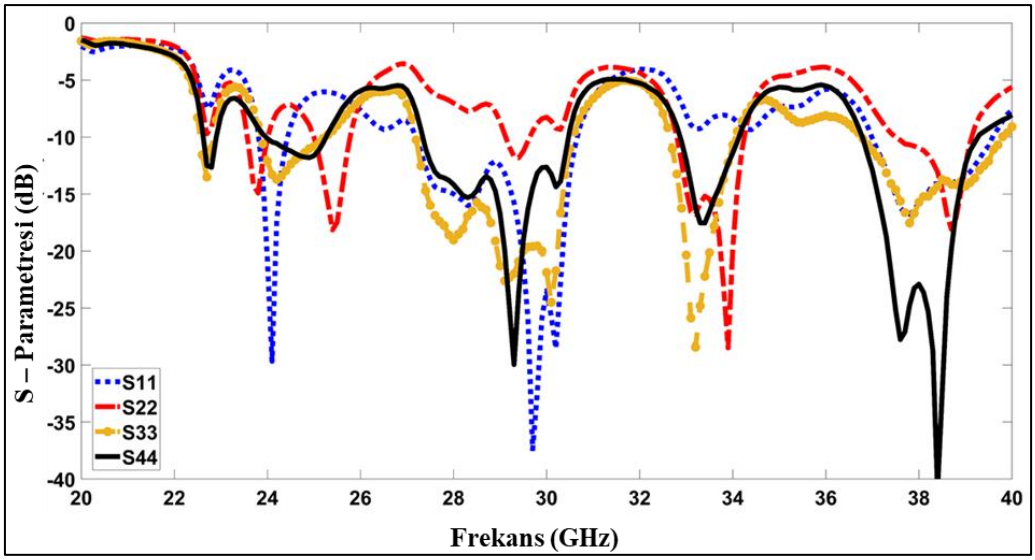


Resim 5.3. MIMO yapılı antenin ölçüm düzeneği

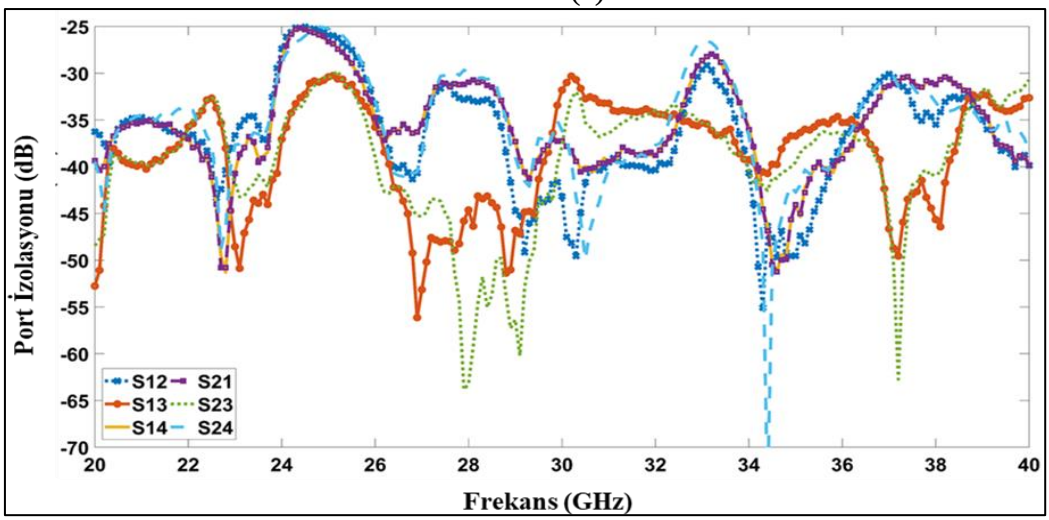


Şekil 5.11. MIMO yapılı antenin benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5.12'de üretilen 4 elemanlı Hilal desenli MIMO antenin S-parametreleri ölçüm grafikleri gösterilmektedir. Şekil 5.12 (a)'da MIMO Anten elemanlarının yansıma katsayıları, Şekil 5.12 (b)'de MIMO anten elemanları arasındaki karşılıklı etkileşim ölçüm değerleri verilmektedir. MIMO Anten elemanları arasındaki izolasyonun iyi seviyelerde olduğu anten elemanlarının birbirlerine bir etkileşimi olmadığı görülmektedir.



(a)



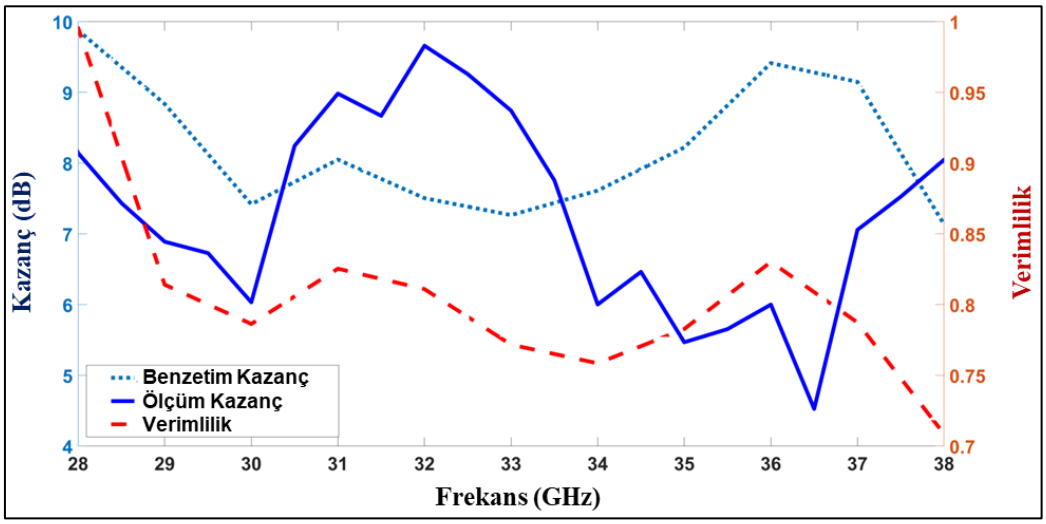
(b)

Şekil 5.12. Üretilen MIMO antenin (a) Geri dönüş katsayıları ve (b) anten elemanları arasındaki izolasyon parametreleri

5.1.2. Kazanç ve Verimlilik

Anten kazancı ve anten verimliliği antenin performansı ile ilgili önemli kriterlerden biridir. Anten kazancı, yayın yaptığı yönde referans izotropik antene olan kazanç olarak ifade

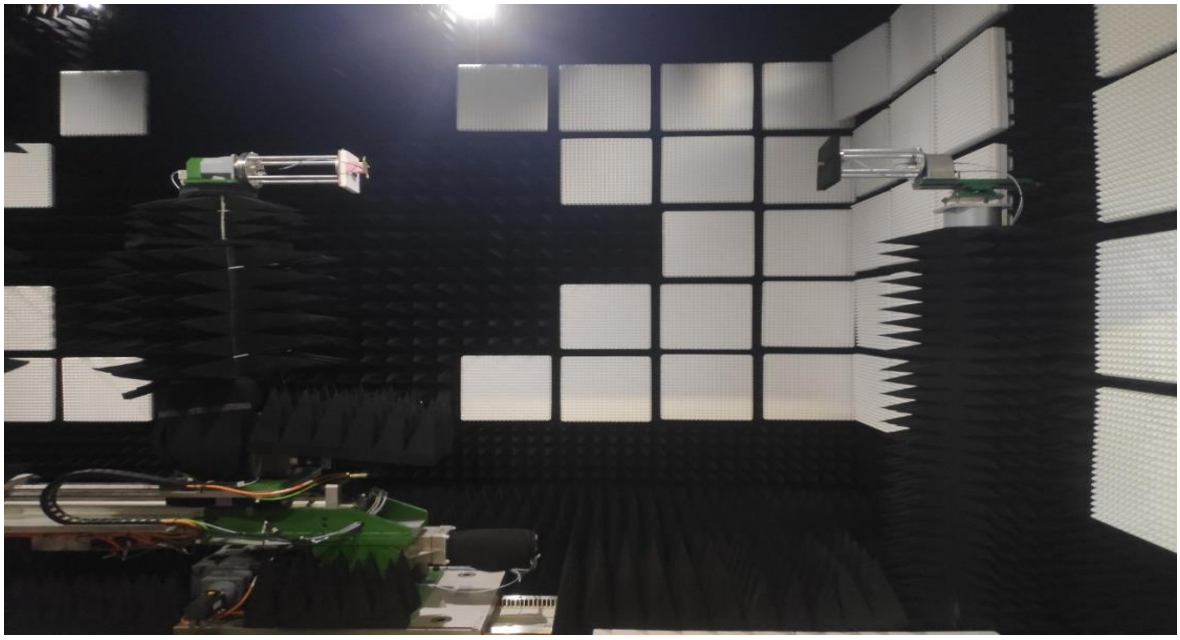
edilmektedir. Anten verimliliğiyse antene verilen elektriksel gücün ne kadarının yayıldığı oranıdır. Şekil 5.13'te mavi ile gösterilen ve sol tarafında ifade edilen kısım kazanç değerlerini, kırmızı ile gösterilen ve sağ tarafta ifade edilen kısım verimlilik değerini göstermektedir. Buna göre üretilen 4 elemanlı MIMO Anten 28 GHz'de 8,04 dB'lik kazanca, 38 GHz'de 8,02 dB'lik kazanca sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, 28 GHz'de %99 'luk kazanca, 38 GHz'de %72'lik verimliliğe sahip olduğu görülmektedir.



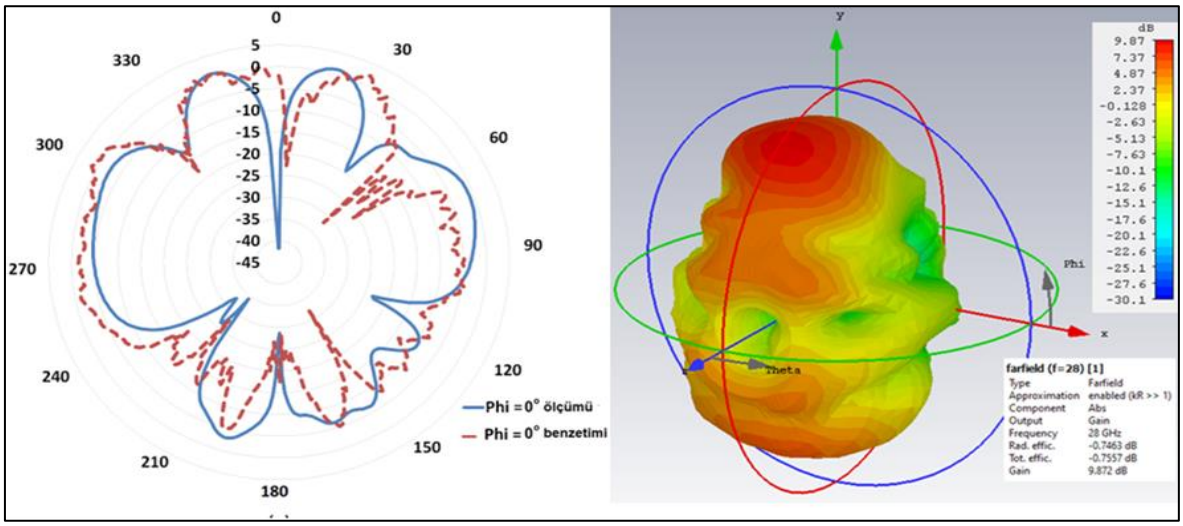
Şekil 5.13. Üretilen MIMO Antenin kazanç ve verimlilik grafiği

5.1.3. Işıma örüntüsü

Işıma karakteristiği antenin gerçekleştirdiği bilgiyi yayma işleminin bir fonksiyonudur. Işıma örüntüsü, uzay koordinatlarının kullanılarak anten gücü ve bu gücün nasıl yönlendirildiği hakkında bilgi veren grafiksel görsellerdir. Işıma örüntüsünde antenin ışıma anında gücü izotropik veya yönlü bir şekilde aktardığı da görülür. Resim 5.4'te üretilen 4 elemanlı MIMO antenin ODTÜ Ayaşlı Araştırma Merkezinde bulunan yankısız odada ışıma örüntüsünün ölçümü için gerçekleştirilen ölçüm düzeneği görülmektedir. Şekil 5.14'te üretilen ve ölçümü gerçekleştirilen antenin 28 GHz frekansında phi açısının 0o'deki ışıma örüntüsü verilmektedir. Şekil 5.15'te üretilen ve ölçümü gerçekleştirilen antenin 38 GHz frekansında phi açısının 0o'deki ışıma örüntüsü verilmektedir. Şekil 5.16'da üretilen ve ölçümü gerçekleştirilen antenin 28 GHz frekansında phi açısının 90o'deki ışıma örüntüsü verilmektedir. Şekil 5.17'de üretilen ve ölçümü gerçekleştirilen antenin 38 GHz frekansında phi açısının 90o'deki ışıma örüntüsü verilmektedir. Buradaki ışıma örüntüsü grafiklerinden benzetim ve ölçüm sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

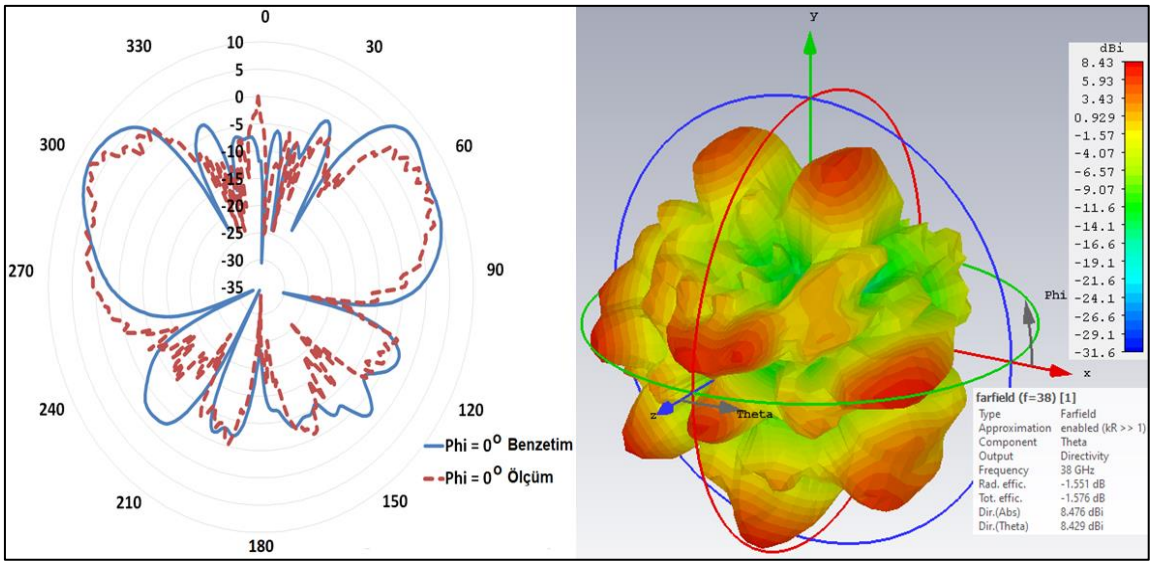


Resim 5.5.4. Üretilen MIMO antenin yankısız oda ışıma örüntüsü ölçüm düzeneği kurulumu



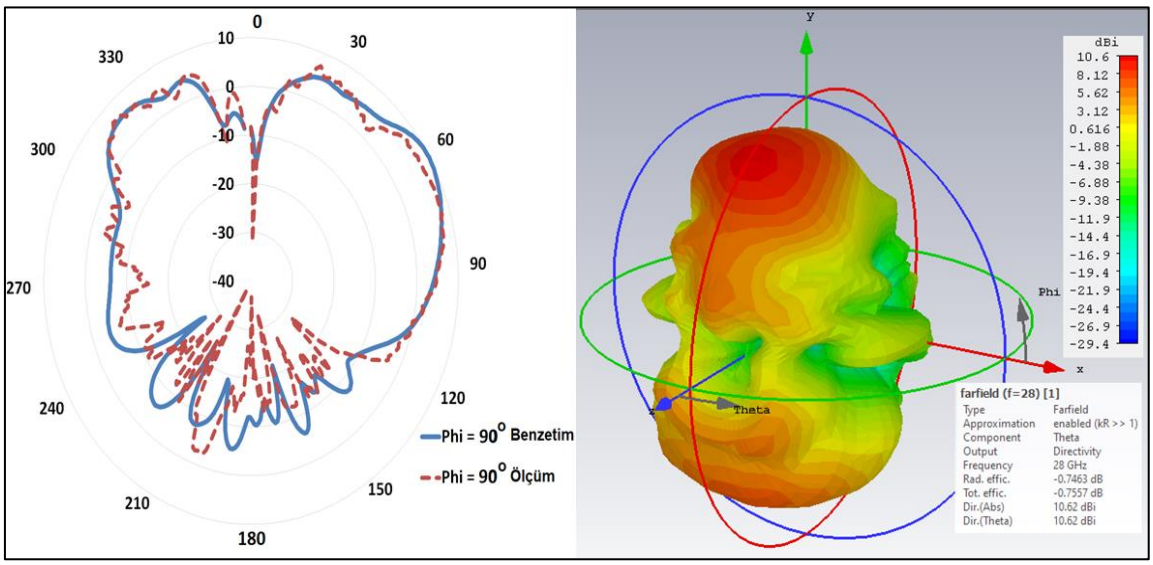
(a) (b)

Şekil 5.14. MIMO antenin 28 GHz frekansı phi = 0o'de ışıma örüntüsü (a) benzetim ve ölçüm sonucunun 2 boyutlu karşılaştırılması (b) 3 boyutlu benzetim sonucu



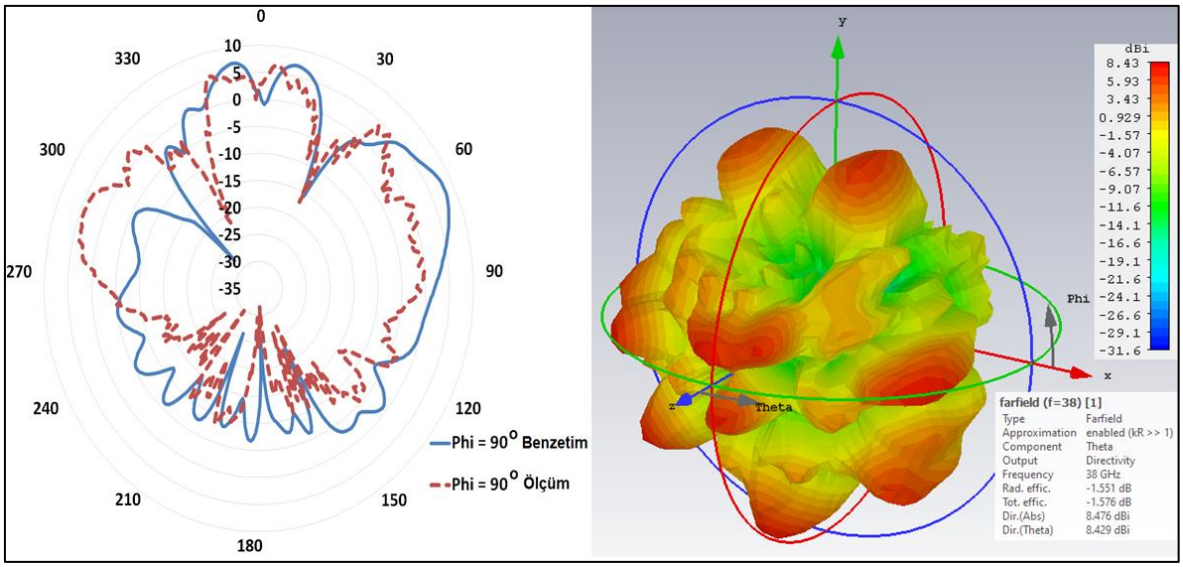
(a) (b)

Şekil 5.15. MIMO antenin 38 GHz frekansı phi = 0o'de ışıma örüntüsü (a) benzetim ve ölçüm sonucunun 2 boyutlu karşılaştırılması (b) 3 boyutlu benzetim sonucu



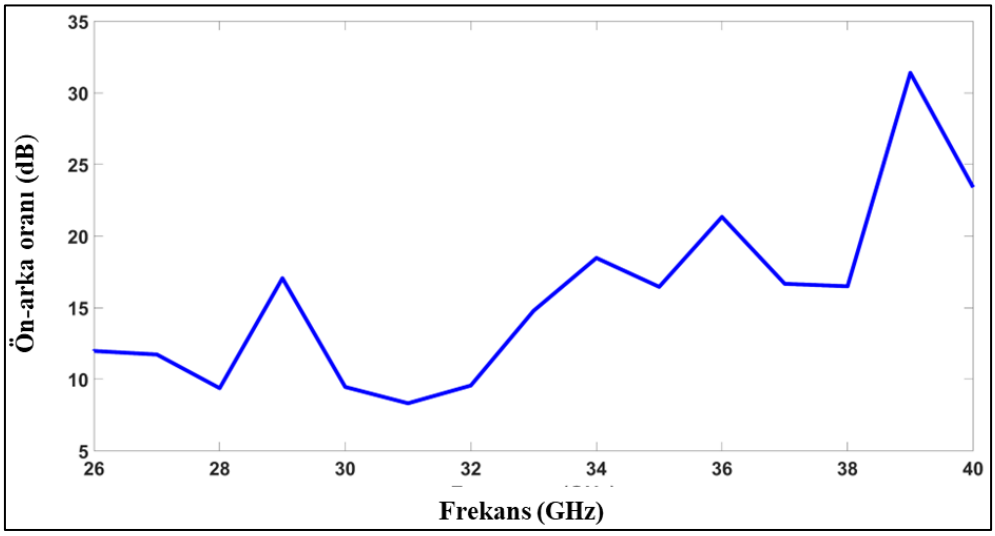
(a) (b)

Şekil 5.16. MIMO antenin 28 GHz frekansı phi = 90o'de ışıma örüntüsü (a) benzetim ve ölçüm sonucunun 2 boyutlu karşılaştırılması (b) 3 boyutlu benzetim sonucu



(a) (b)

Şekil 5.17. MIMO antenin 38 GHz frekansı phi = 90o'de ışıma örüntüsü (a) benzetim ve ölçüm sonucunun 2 boyutlu karşılaştırılması (b) 3 boyutlu benzetim sonucu

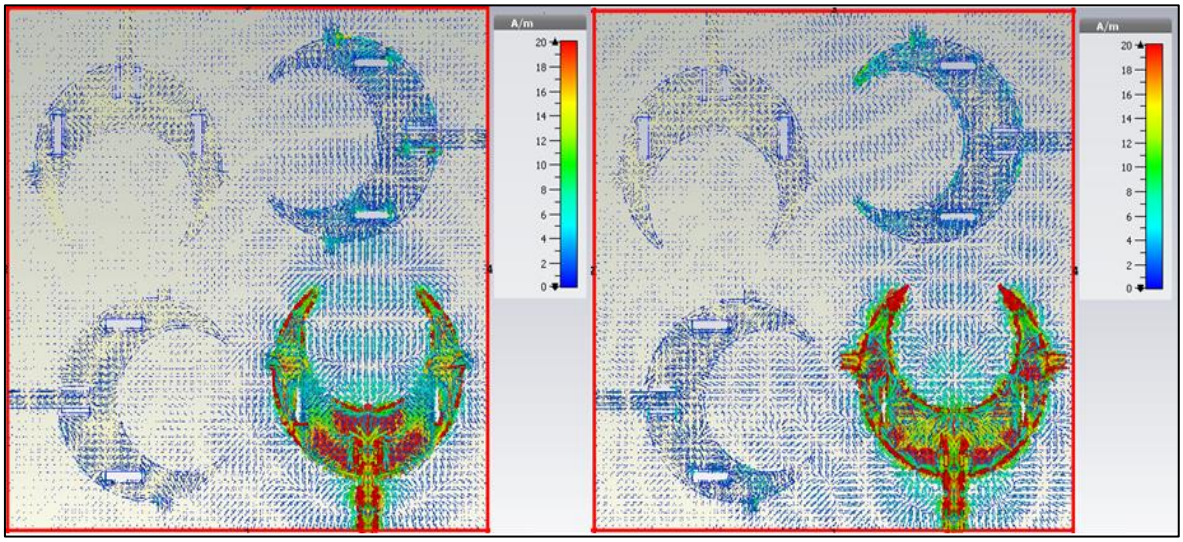


Şekil 5.18. MIMO antenin ışıma örüntüsünün ön-arka oranı

Şekil 5.18'de ışıma örüntüsünün önden arkaya oranı (F/B Ratio - FBR) gösterilmektedir. Bu oran antenin ön kısmı ile arka kısmı arasındaki yayılan gücün birbirine oranı olarak ifade edilmektedir ve iyi bir yönlü bir anten için bu oranın 15 dBi ve üzerinde olması istenir. Buna göre önerilen MIMO yapılı antenin önden arkaya oranı 28 GHz frekans bandında yaklaşık olarak 10 dB seviyelerindeyken 38 GHz frekans bandında 15 dB'in üzerinde olduğu anlaşılmaktadır.

5.1.4. Yüzey akım dağılımı

4 elemanlı MIMO antenin yüzey akım grafiği Şekil 5.18'de verilmektedir. Şekil 5.18 (a)'da MIMO antenin 28 GHz 'deki yüzey akım grafiği, Şekil 5.18 (b)'de MIMO antenin 38 GHz 'deki yüzey akım grafiği verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere 28 GHz frekansında yüzey akımı anten besleme noktası etrafında ve Hilal deseninin orta noktasında yoğun bir şekilde görülürken, 38 GHz frekansında ise yüzey akımının Hilal deseni etrafında ve Hilal deseninin sivri uç noktalarında yoğun bir şekilde olduğu görülmektedir. Yani düşük rezonans frekansı esnasında antenin geometrisinin orta noktalarında yoğunken frekans arttıkça yüzey akım dağılımının anten geometrisinin çevresinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır.



(a) (b)

Şekil 5.19. MIMO antenin çalışma frekanslarındaki yüzey akım yoğunluğu (a) 28 GHz (b) 38 GHz

2.12. MIMO Parametre Benzetim ve Ölçümleri

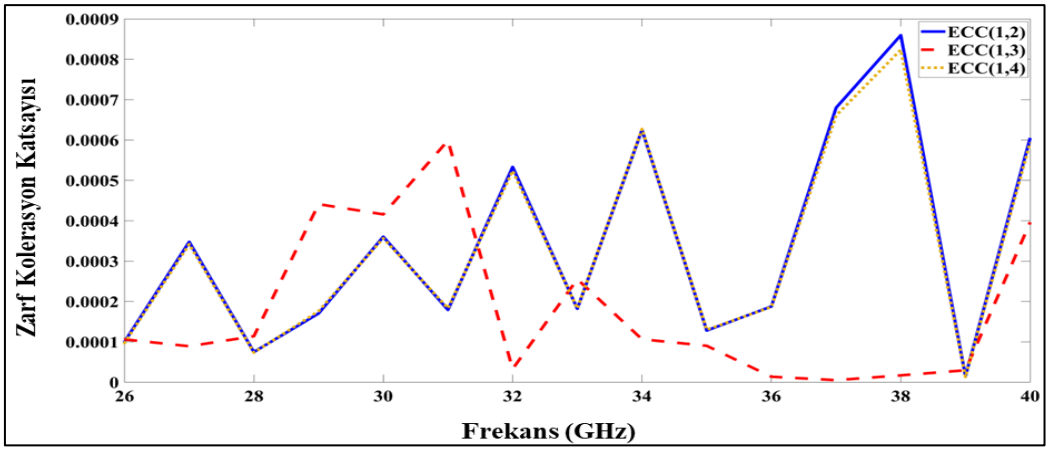
Saçılma parametreleri (S-parametreleri) anten performansı hakkında bilgi veren en önemli anten parametresi olmasına rağmen özellikle MIMO antenlerin bazı özelliklerini analiz etmekte yetersiz kalır. Bu nedenle MIMO yapılı antenlerde; ECC, DG, TARC, MEG ve CCL gibi parametreler bu antenlerin performansları hakkında bilgi verir. Bu bölümde önerilen MIMO antenin MIMO parametreleri üzerine gerçekleştirilen benzetim ve ölçüm sonuçları yer almaktadır.

5.1.5. Zarf kolerasyon katsayısı

MIMO yapılı antenlerin en önemli parametrelerinden bir tanesidir. ECC değeri ile birlikte karşılıklı olarak yerleştirilen anten elemanlarının birbirlerine herhangi bir etkileşimde bulunup bulunmadığı hakkında bilgi verir. Önerilen MIMO antenin ECC değeri Eş. 5.3'ten faydalanılarak hesaplanmıştır [13]. Pratikte MIMO yapılı antenlerde zarf korelasyon katsayısının 0,5'ten az olması istenmektedir. Şekil 4.20'den önerilen MIMO yapılı antenin 1. elemanının zarf korelasyon katsayısı grafiği gösterilmektedir. Buradan anlaşıldığı üzere önerilen MIMO antenin zarf korelasyon katsayısı 0,5'ten çok daha düşük olduğu görülmektedir. Buda anten elemanlarının birbirleri üzerine herhangi bir etkileşimi olmadığını göstermektedir.

$$ECC = \frac{\left|\iint_{4\pi} \overrightarrow{E_1}(\theta,\emptyset).\overrightarrow{E_2}(\theta,\emptyset)\, d\Omega\right|^2}{\iint_{4\pi}\left|\overrightarrow{E_1}(\theta,\emptyset)\right|^2 d\Omega . \iint_{4\pi}\left|\vec{E}_2(\theta,\emptyset)\right|^2 d\Omega} \tag{5.3}$$

Burada Ei(θ, ϕ), i anten elemanı tarafından yayılan elektrik alanı ifade eder. Diğer anten elemanlarının 50 Ω yük sonlandırılmıştır ve dΩ = sinθdθdϕ katı açıyı ifade eder.

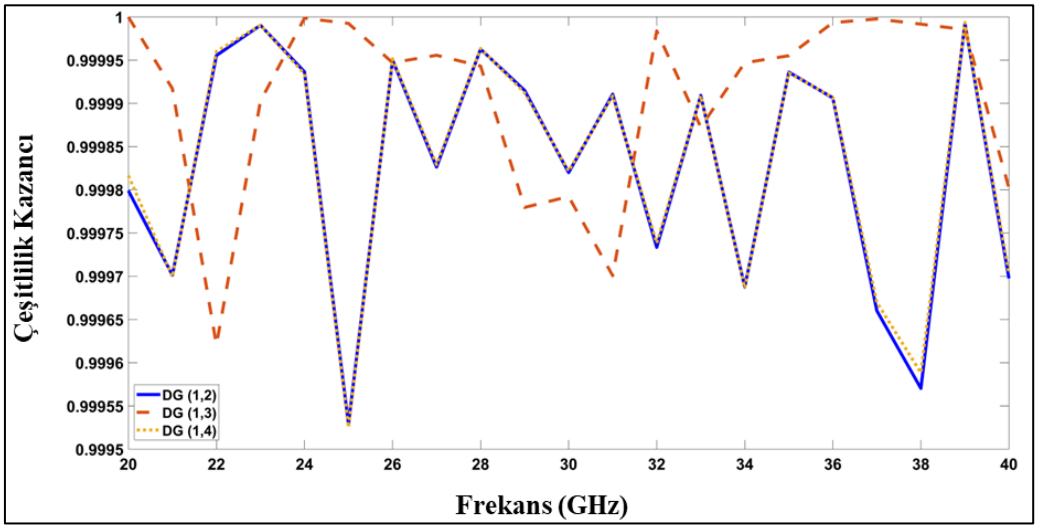


Şekil 5.20. Önerilen MIMO antenin 1. elemanının zarf korelasyon katsayısı

5.1.6. Çeşitlilik Kazancı

DG, MIMO yapılandırması için çeşitlilik şemaları sunulduğunda, performans kaybı olmadan iletim gücü kaybını gösterir. Eş. 5.4'te belirtilen DG değerinin, Eş. 5.3 kullanılarak hesaplanan ECC değeri üzerinden hesaplanması gösterilmektedir.

$$DG = 10\sqrt{1 - |ECC|} \tag{5.4}$$



Şekil 5.21. Önerilen MIMO antende 1. elemanının çeşitlilik kazancı

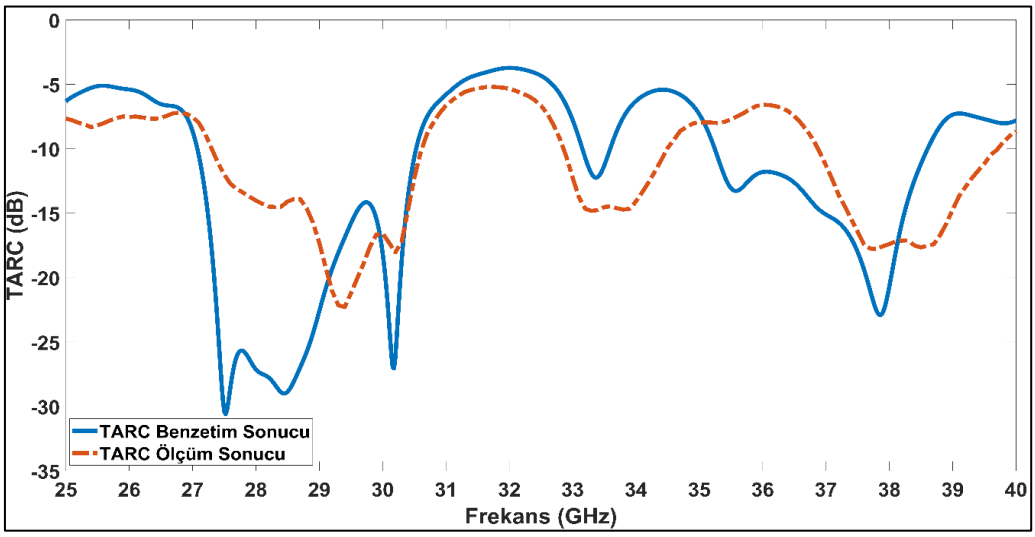
5.1.7. Toplam aktif yansıma katsayısı

TARC, MIMO anten sistemini karakterize eden önemli bir MIMO performans parametresidir. TARC, bir N elemanlı bir MIMO antenin portlarındaki portlardaki tüm giden güçlerin toplamının tüm gelen güçlerin toplamına bölümünün kareköküdür. Kısacası toplam yansıyan gücün toplam gelen güce oranıyla ifade edilir. TARC, frekansın bir fonksiyonu olmakla birlikte antenin bant genişliği ve radyasyon performansını karakterize eder. Γ ile sembolize edilir ve birimi dB'dir. TARC değerinin -10 dB 'in altında olması istenir. TARC değerinin sıfıra eşit olduğunda, iletilen gücün tamamı anten tarafından kabul edilir ve bire eşit olduğunda, iletilen gücün tümü giden güç olarak geri gelir. MIMO antenlerde TARC değeri Eş 5.6 eşitliği yardımıyla hesaplanır [80]. Şekil 5.22'de önerilen MIMO antenin TARC değeri benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekilden anlaşıldığı üzere TARC değeri benzerim ve ölçüm sonuçları birbiriyle uyumludur. Benzetim ve ölçüm sonuçları arasındaki farklar üretim aşamasında meydana gelen kayıplardan kaynaklanmaktadır.

$$TARC = \sqrt{\frac{Toplam\ Yansıyan\ Güç}{Toplam\ Gelen\ Güç}} \tag{5.5}$$

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\sum_1^4 \left| S_{i1} + S_{i2} e^{j\theta} + S_{i3} e^{j\theta'} + S_{i4} e^{j\theta''} \right|^2}}{2} \quad (5.6)$$

Burada b ve a sırasıyla yansıyan ve gelen sinyalleri temsil eder. Bu parametreler saçılma parametreleri yardımıyla hesaplanır.



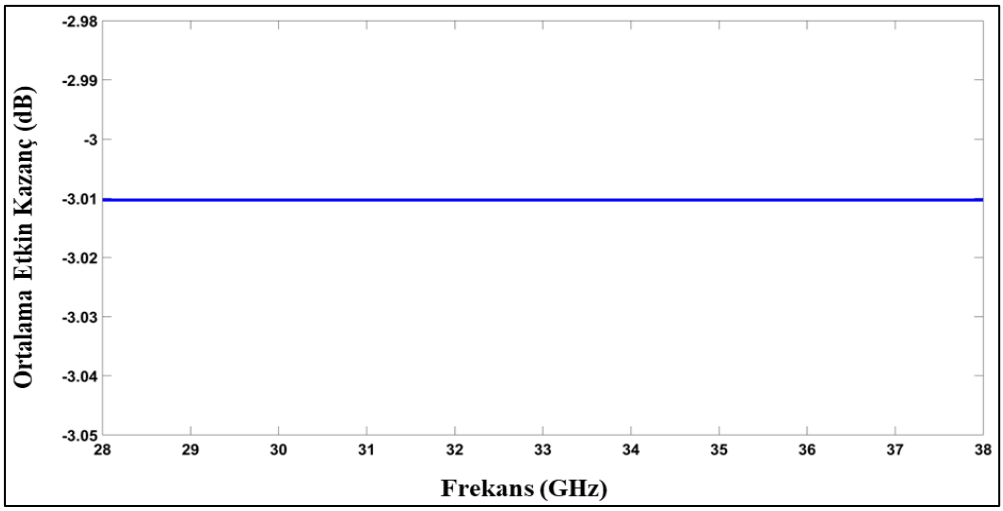
Şekil 5.22. Önerilen MIMO antenin TARC değerleri

5.1.8. Ortalama etkin kazanç

MEG, çok yollu bir ortamda izotropik bir antene kıyasla MIMO anten elemanları tarafından alınan güç miktarını ölçen önemli MIMO parametrelerinden biridir. Ortalama etkin kazanç değeri Eş 5.7'de belirtilen eşitlik yardımıyla hesaplanır [13]. Pratikte MEG değerinin -3 dB'in altında olması istenmektedir. Şekil 5.23'te önerilen MIMO antenin MEG grafiği gösterilmektedir.

$$MEG = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left[\frac{XPR}{1+XPR} G_\theta(\theta, \emptyset) P_\theta(\theta, \emptyset) + \frac{XPR}{1+XPR} G_\emptyset(\theta, \emptyset) P_\emptyset(\theta, \emptyset) \right] \sin\theta d\theta d\emptyset \quad (5.7)$$

Burada XPR, gelen alanın çapraz polarizasyon oranıdır ve θ, ∅ katı açıdır. Pθ ve P∅ olasılık dağılım fonksiyonlarını temsil eder; Gθ ve G∅ sırasıyla θ ve ∅ bileşenleri için MIMO anten elemanlarının güç kazancı değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 5.23. Önerilen MIMO antenin ortalama etkin kazancı

5.1.9. Kanal kapasite kaybı

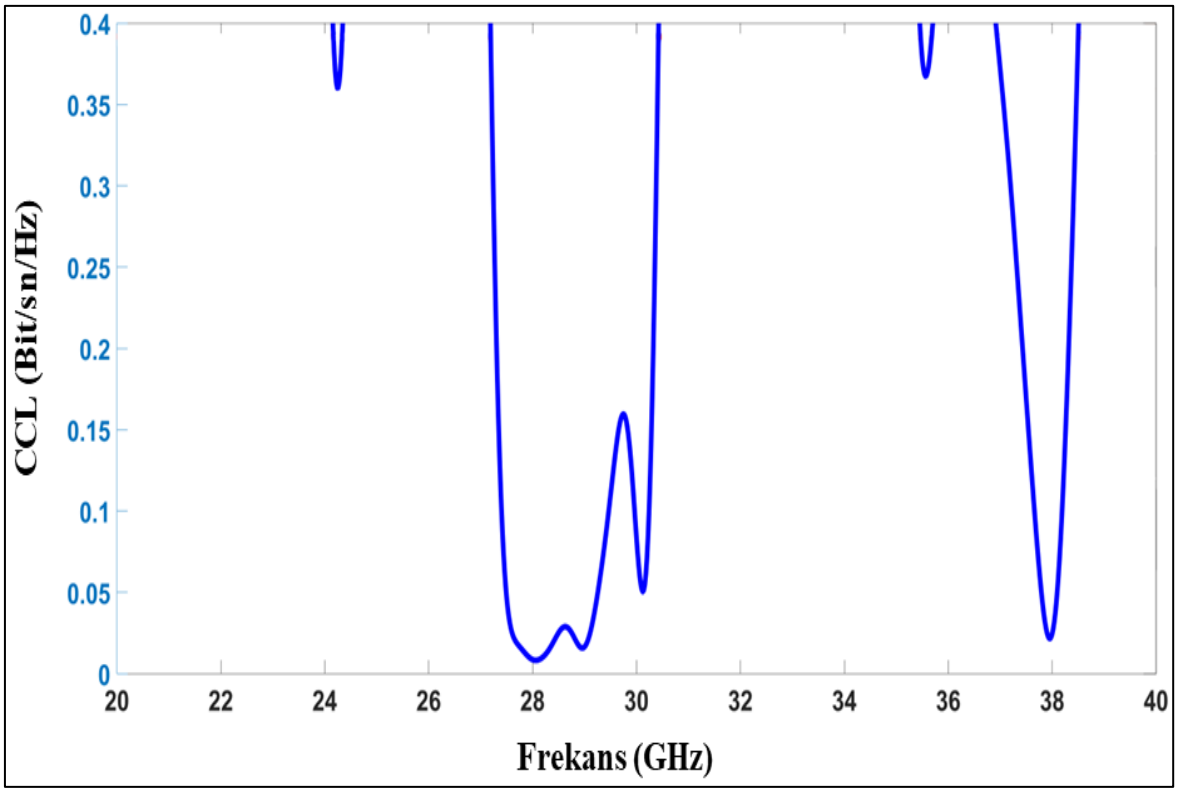
CCL, korelasyon etkisi sırasında çalışma frekans aralığında 0,4 bit/sn/Hz'den daha az bir kayıpla iletişim kanalı üzerinden sürekli olarak iletilebilen sinyalin ulaşılabilir maksimum mesaj iletim hızı sınırını belirlemektedir. CCL, Eş. 5.8, Eş. 5.9, Eş. 5.10 ve Eş. 5.11 eşitlikleri yardımıyla hesaplanmaktadır [81]. Şekil 5.24'te önerilen MIMO yapılı antenin CCL değeri gösterilmektedir. Buna göre antenin çalışma frekans bantları olan 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında MIMO antenin kanal kapasite kaybı değeri 0,4 bit/sn/Hz değerinin çok çok altında olduğu görülmektedir.

$$C_{loss} = -\log * \det(a^R) \tag{5.8}$$

$$a^R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \tag{5.9}$$

$$a_{ii} = 1 - \left(\sum_{j=1}^{N} \left|S_{ij}\right|^2\right) \tag{5.10}$$

$$a_{ij} = \left(S_{ii}{}^* S_{ij} + S_{ji}{}^* S_{ij}\right) \tag{5.11}$$



Şekil 5.24. Önerilen MIMO antenin kanal kapasite kaybı

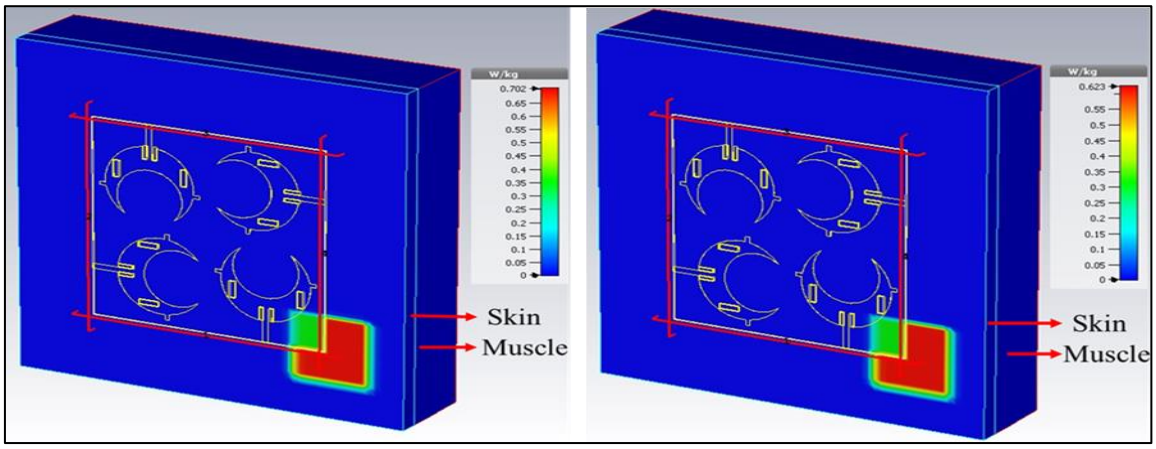
2.13. Özgül Soğurma Oranı Analizi

Kablosuz iletişim sistemlerinin doğası gereği oluşturulan elektromanyetik dalgalar insan vücudunu etkiler. Bu etki özgül soğurma oranı (Specific Absorption Rate - SAR) analizi ile ölçülür ve elde edilen değerin olabildiğince düşük olması istenir. Tasarlanan antenin kullanımı sırasında üretilen RF enerjisinin insan vücudunda soğurulma miktarı bu analiz ile değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen SAR değeri [82]'de bildirilen Federal İletişim Komisyonu (FCC) standartlarına göre 1,6 W/kg değerini geçmemelidir. Bu amaçla MIMO yapısının arkasına 5 mm kalınlığında deri dokusu ve 20 mm kalınlığında kas dokusu boşluk bırakılmadan yerleştirilir. Kullanılan simülasyon düzeneği Şekil 5.24'te görülmektedir. Analiz için kullanılan dokuların özellikleri frekansa bağlı olarak değiştiğinden, İtalyan ulusal araştırma konseyi'nde raporlanan 28 GHz ve 38 GHz 'de kullanılan doku özellikleri ve simülasyon parametreleri Çizelge 5.3'te verilmiştir [83]. Sunulan antenin SAR ölçümü, her bir rezonans frekansında 1 mW giriş gücü için IEEE C95.3 yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.25 (a)'da 28 GHz rezonans frekansındaki SAR değeri, Şekil 5.25 (b)'de 38 GHz rezonans frekansındaki SAR değeri verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, 28 GHz ve 38 GHz rezonans frekansları için sırasıyla 0,702 W/kg ve 0,622

W/kg maksimum SAR değerleri elde edilmiştir. SAR değerleri incelendiğinde önerilen MIMO anteninin insan sağlığına olumsuz bir etkisinin olmadığı ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda önerilen MIMO antenin 5G uygulamalarında insan sağlığına bir olumsuz bir etki oluşturmadan kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Çizelge 5.3. 28/38 GHz'de insan vücudunun doku özellikleri ve parametreleri

Tissue Type	Frequency	Dielectric Constant	Conductivity (S/m)	Density (kg/m3)	Thickness (mm)
Skin layer	28 GHz	16.552	25.824	1010	5
Muscle layer		24.44	33.609	1040	20
Skin layer	38 GHz	12.297	31.043	1010	5
Muscle layer		19.056	41.823	1040	20



(a) (b)

Şekil 5.25. Önerilen MIMO yapılı antenin SAR analizi (a) 28 GHz (b) 38 GHz

Önerilen 28/38 GHz çift bantlı MIMO anteninin literatürde bulunan diğer ilgili çalışmalarla gerçekleştirilen performans karşılaştırması Çizelge 5.4'te sunulmaktadır. Önerilen anten, [36]'de bildirilen çalışma dışında en yüksek kazanç değerine sahiptir. Öte yandan, önerilen antenin [35,37]'de bildirilene kıyasla boyut olarak kompakttır. Ayrıca [31,33,35-39]'de bildirilen antenlerden daha geniş bir genel bant genişliği sağlamaktadır. Özetlemek gerekirse, önerilen MIMO anteni, boyut, bant genişliği, izolasyon ve kazanç açısından diğer son teknoloji ile karşılaştırıldığında optimum radyasyon performansı sağladığı görülmüştür. Önerilen antenin insan vücudunun yakınında kullanılabilirliği, (literatürdeki diğer 5G anten çalışmalarının çoğundan farklı olarak) bu çalışmada SAR analizi de yapılmıştır. Önerilen

anten kompakt bir boyuta sahip olmasına rağmen, MIMO tasarımının ortogonal yerleşimi nedeniyle en iyi izolasyon sonuçlarından birini sağlar.

Çizelge 5.4. Önerilen çalışma ile literatürdeki ilgili çalışmaların karşılaştırılması

Referans	Çalışma Frekansı (GHz)	Boyut (mm2)	Port Sayısı	Bant Genişliği (GHz)	Verimlilik (%)	İzolasyon (dB)	Kazanç (dB)	SAR
[31]	28&38	7,5×8,8	2	1,23&1,06	98&98	>27,3	6,6&5,86	×
[32]	27&39	26×11	2	4&5	99,5&98,6	>25	5&5,7	×
[33]	28&38	26×14	2	2,55&2,1	78&76	>20	1,27&1,8	×
[34]	28&38	27,5×13,5	2	4&2	NA	>20	NA	×
[35]	28&38	75×100	4	0,7&12	96,7&96,4	>36	7,6&8,11	×
[36]	28&38	9,7×18,2	4	3,42&1,45	N.A.	>30	9&9	×
[37]	28&38	55×110	4	1,06&1,43	89,8&88,2	>28	7,95&8,27	×
[38]	28&38	43,6×43,6	4	1,2 & 2	98 & 91,7	>20	7,9 & 13,7	×
[39]	28&38	41,5×8	4	1,39 & 3,33	88&88	>25	5,59 & 5,7	×
[40]	28&38	14x14	4	3&3,2	>98	>30	6,8&5	×
[41]	3.5&26 & 38	50×50	4	0,34&4&3	85&65&49	>20	2.4&7,8& 4,4	×
Bu çalışma	28&38	60×60	4	3,05&2,41	99,5&70	>30	8,14&8,04	✓

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

5G teknolojisi haberleşme alanında büyük bir devrim gerçekleştirmektedir. Son günlerde 5G ile birlikte kablosuz haberleşme teknolojisi alanında büyük yenilikler ve fırsatlar ortaya çıkmaktadır. Özellikle otonom araçlar ve IoT gibi teknolojiler insanoğlunun yaşamına büyük etkileri olacak yeniliklerdir. Bu teknolojiler sayesinde artık her nesne birer akıllı birer iletişim aracına dönüşerek kullanıcı ve/veya kendi aralarında haberleşme gerçekleştirebileceklerdir. Bu gibi yenilikler ile birlikte haberleşme trafiğindeki artış göz önüne alındığında 5G teknolojisinde birden fazla bantta iletişim gerçekleştirilmesi büyük bir öneme sahip olacaktır.

Bu tez çalışmasında, 5G uygulamalarında kullanılmak üzere hem 28 GHz hem de 38 GHz frekans bantlarında çalışan yeni bir 4 elemanlı Hilal desenli bir geometriye sahip çift bantlı MIMO anteni tasarımı yapılmıştır. Anten benzetimlerine ek olarak 28/38 GHz çift bantlı MIMO anten prototipi de üretilmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. Deneysel ve benzetim sonuçları arasında iyi bir tutarlılık sağlandığı görülmüştür. Önerilen MIMO anteni 28 GHz'de 3,05 GHz (%10,89) bant genişliğine ve 38 GHz frekansında 2,41 GHz (%6.36) bant genişliğine sahiptir. Bu tez çalışmasında önerilen MIMO konfigürasyonunun her bir ışıyan elemanı, -30 dB'den daha fazla izolasyon elde etmeye yardımcı olan Hilal desenli olup dik (ortogonal) olarak yerleştirilmiştir. Ayrıca, önerilen MIMO anteninin ölçülen kazancı sırasıyla 28 GHz ve 38 GHz ‘de 8,14 dB ve 8,04 dB'dir. Buna ek olarak anten ışıması ile ilgili olarak FBR değeri 28 GHz frekans bandında 15 dBi seviyelerinde ve 38 GHz frekans bandında ise 15 dBi ’nin üzerindedir. Önerilen MIMO anten parametreleri sırasıyla ECC değeri 0,0035 ’den küçük, DG değeri 9,982 dB, TARC değeri iletişim gerçekleştirilen frekans bantlarında -10 dB’in altında, MEG değeri -3 dB’den küçük ve CCL değeri her iki frekans bandında da 0,4 bit/saniye/Hz ’den düşük olarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın literatüre en önemli katkısı, bu çalışmanın optimum kazanç-bant genişliği çifti performansına sahip bir anten sunmasıdır. Ayrıca, önerilen antenin düşük SAR değeri sonuçları sayesinde kullanılabilir olduğu kanıtlanmıştır. Tüm bu anten parametreleri ve radyasyon özellikleri, önerilen MIMO anteninin, 5G kablosuz iletişim uygulamaları için kullanılmaya mükemmel bir aday olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. Jiang, D. and Liu, G. (2017). An Overview of 5G Requirements. *5G Mobile Communications*, Switzerland: Springer, 3–26.

2. Marcus, M. J. (2019). ITU WRC-19 spectrum policy results. *IEEE Wireless Communications*, 26(6), 4-5.

3. Wu, W., Staszewski, R. B., and Long, J. R. (2015). Millimeter-Wave Frequency Synthesizers, *Millimeter-wave digitally intensive frequency generation in CMOS*. Amsterdam: Elsevier, 17-33.

4. Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C., and Zhang, J. C. (2014). What will 5G be?. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 32(6), 1065-1082.

5. Saad, A. A. R., and Mohamed, H. A. (2019). Printed millimeter-wave MIMO-based slot antenna arrays for 5G networks. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 99, 59-69.

6. Bliss, D. W., Forsythe, K. W., and Chan, A. M. (2005). MIMO wireless communication. *Lincoln Laboratory Journal*, 15(1), 97-126.

7. Abdullah, M., Kiani, S. H., and Iqbal, A. (2019). Eight element multiple-input multiple-output (MIMO) antenna for 5G mobile applications. *IEEE Access*, 7, 134488-134495.

8. Chen, X., Zhang, S., & Li, Q. (2018). A review of mutual coupling in MIMO systems. *IEEE Access*, 6, 24706-24719.

9. Nadeem, I., and Choi, D. Y. (2018). Study on mutual coupling reduction technique for MIMO antennas. *IEEE Access*, 7, 563-586.

10. Jiang, H., Si, L. M., Hu, W., and Lv, X. (2019). A symmetrical dual-beam bowtie antenna with gain enhancement using metamaterial for 5G MIMO applications. *IEEE Photonics Journal*, 11(1), 1-9.

11. Kumar, S., Dixit, A. S., Malekar, R. R., Raut, H. D., and Shevada, L. K. (2020). Fifth generation antennas: A comprehensive review of design and performance enhancement techniques. *IEEE Access*, 8, 163568-163593.

12. Khandelwal, M. K., Kanaujia, B. K., and Kumar, S. (2017). Defected ground structure: fundamentals, analysis, and applications in modern wireless trends. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 1-22.

13. Kumar, A., Ansari, A. Q., Kanaujia, B. K., Kishor, J., and Matekovits, L. (2021). A review on different techniques of mutual coupling reduction between elements of any MIMO antenna. Part 1: DGSs and parasitic structures. *Radio Science*, 56(3), 1-25.

14. Ahmad, I., Tan, W., Ali, Q., and Sun, H. (2022). Latest performance improvement strategies and techniques used in 5G antenna designing technology, a comprehensive study. *Micromachines*, 13(5), 717.

15. Kütük, H., Teşneli, A. Y., and Teşneli, N. B. (2000). 3.3 GHz mikroşerit anten tasarımı ve farklı besleme yöntemleri için analizi. *Sakarya University Journal of Science*, 17(1), 119-124.

16. Sanghmitra, Rajput, A., Mukherjee, B., and Patel, P. (2022). Y-shaped dielectric resonator MIMO antenna for omnidirection radiation pattern. *Electromagnetics*, 42(3), 157-167.

17. Wang, W., Wu, Y., Wang, W., and Yang, Y. (2020). Isolation enhancement in dual-band monopole antenna for 5G applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(6), 1867-1871.

18. Przesmycki, R., Bugaj, M., and Nowosielski, L. (2020). Broadband microstrip antenna for 5G wireless systems operating at 28 GHz. *Electronics*, 10(1), 1.

19. Merlin Teresa, P., and Umamaheswari, G. (2022). Compact slotted microstrip antenna for 5G applications operating at 28 GHz. *IETE Journal of Research*, 68(5), 3778-3785.

20. AboEl-Hassan, M., Farahat, A. E., and Hussein, K. F. (2021). Compact-size quad-band patch antenna for 5G mobile communications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 63(12), 3067-3071.

21. Şeker, C., and Güneşer, M. T. (2020). A single band antenna design for future millimeter wave wireless communication at 38 GHz. *European Journal of Engineering and Formal Sciences*, 3(1), 65-70.

22. Komuraiah, B., Raju, V., Meghana Florence, L., and Anuradha, M. S. (2021). A Microstrip Patch Antenna Design with Two Ground Slots for 5G Mobile Applications. In *Data Engineering and Communication Technology: Proceedings of ICDECT 2020*, Singapore: Springer, 93-100.

23. Sehrai, D. A., Abdullah, M., Altaf, A., Kiani, S. H., Muhammad, F., Tufail, M., and Rahman, S. (2020). A novel high gain wideband MIMO antenna for 5G millimeter wave applications. *Electronics*, 9(6), 1031.

24. Malviya, L., Parmar, A., Solanki, D., Gupta, P., and Malviya, P. (2020). Highly isolated inset-feed 28 GHz MIMO-antenna array for 5G wireless application. *Procedia Computer Science*, 171, 1286-1292.

25. Wen, L., Yu, Z., Zhu, L., and Zhou, J. (2021). High-gain dual-band resonant cavity antenna for 5G millimeter-wave communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(10), 1878-1882.

26. Madhav, B. T. P., Devi, G. J., Lakshman, P., and Anilkumar, T. (2018). A CPW-fed sigma-shaped MIMO antenna for Ka band and 5G communication applications. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, (4), 97-106.

27. Rahayu, Y., and Hidayat, M. I. (2018). Design of 28/38 GHz dual-band triangular-shaped slot microstrip antenna array for 5G applications. In 2018 2nd international conference on telematics and future generation networks (TAFGEN), Kuching, Malaysia.

28. Deckmyn, T., Cauwe, M., Ginste, D. V., Rogier, H., and Agneessens, S. (2019). Dual-band (28, 38) GHz coupled quarter-mode substrate-integrated waveguide antenna array for next-generation wireless systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(4), 2405-2412.

29. Farahat, A. E., and Hussein, K. F. A. (2020). 28/38 GHz dual-band Yagi-Uda antenna with corrugated radiator and enhanced reflectors for 5G MIMO antenna systems. *Progress In Electromagnetics Research C*, 101, 159-172.

30. Okan, T. (2020). Design and analysis of a quad-band substrate-integrated-waveguide cavity backed slot antenna for 5G applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(7), e22236.

31. Farahat, A. E., and Hussein, K. F. (2022). Dual-band (28/38 GHz) wideband MIMO antenna for 5G mobile applications. *IEEE Access*, 10, 32213-32223.

32. Ali, W., Das, S., Medkour, H., and Lakrit, S. (2021). Planar dual-band 27/39 GHz millimeter-wave MIMO antenna for 5G applications. *Microsystem Technologies*, 27, 283-292.

33. Hasan, M. N., Bashir, S., and Chu, S. (2019). Dual band omnidirectional millimeter wave antenna for 5G communications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 33(12), 1581-1590.

34. Omar, A., Hussein, M., Rajmohan, I. J., & Bathich, K. (2021). Dual-band MIMO coplanar waveguide-fed-slot antenna for 5G communications. *Heliyon*, 7(4), e06779.

35. Alnemr, F., Ahmed, M. F. A., and Shaalan, A. A. (2021). A compact 28/38 GHz MIMO circularly polarized antenna for 5 G applications. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 42, 338-355.

36. Farahat, A. E., and Hussein, K. F. (2021). Dual-band (28/38 GHz) MIMO antenna system for 5G mobile communications with efficient DoA estimation algorithm in noisy channels. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 282-294.

37. Marzouk, H. M., Ahmed, M. I., and Shaalan, A. H. A. (2019). Novel dual-band 28/38 GHz MIMO antennas for 5G mobile applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 93, 103-117.

38. Aghoutane, B., Das, S., Ghzaoui, M. E., Madhav, B. T. P., and El Faylali, H. (2022). A novel dual band high gain 4-port millimeter wave MIMO antenna array for 28/37 GHz 5G applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 145, 154071.

39. Rafique, U., Agarwal, S., Nauman, N., Khalil, H., and Ullah, K. (2021). Inset-fed planar antenna array for dual-band 5G MIMO applications. *Progress Electromagnetics Res. C*, 112, 83-98.

40. Khabba, A., Amadid, J., Ibnyaich, S., and Zeroual, A. (2022). Pretty-small four-port dual-wideband 28/38 GHz MIMO antenna with robust isolation and high diversity performance for millimeter-wave 5G wireless systems. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 112(1), 83-102.

41. Kumar, A., Mahto, S. K., Sinha, R., and Choubey, A. (2021). Dual circular slot ring triple-band MIMO antenna for 5G applications. Frequenz, 75(3-4), 91-100.

42. İnternet: Social, W. A. (2022) Digital 2022: Another year of bumper growth, Erişim adresi: https://wearesocial.com/uk/blog/2022/01/digital-2022-another-year-of-bumper-growth-2, Son Erişim Tarihi: 18.12.2022.

43. İnternet: BTK. (2022) Türkiye Elektronik Haberleşme Sektörü Üç Aylık Pazar Verileri Raporu, 2022. URL: https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/pazar-verileri/2022-q3.pdf, Son Erişim Tarihi: 05.06.2022.

44. İnternet: BTK. (2018) 5G ve Dikey Sektörler Raporu. URL: https://www.btk.gov.tr/uploads/announcements/5g-ve-dikey-sektorler-raporu-yayimlandi/20180308-5gvedikeysektorlerraporu.pdf, Son Erişim Tarihi: 15/03/2023.

45. Slalmi, A., Chaibi, H., Chehri, A., Saadane, R., Jeon, G., and Hakem, N. (2020). On the ultra-reliable and low-latency communications for tactile internet in 5G era. *Procedia Computer Science*, 176, 3853-3862.

46. Lin, X., and Lee, N. (2021). 5G and Beyond Fundamentals and Standarts. Cham, Switzerland: Springer Nature.

47. Javaid, N., Sher, A., Nasir, H., and Guizani, N. (2018). Intelligence in IoT-based 5G networks: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 56(10), 94-100.

48. Ceniklioğlu, B., and Develi, İ. (2019). 5G ve Ötesi Sistemler için Mm-dalga İletişimi. *In International Conference on Human Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications*, Nevsehir, Türkiye.

49. Yu, H., Lee, H., and Jeon, H. (2017). What is 5G? Emerging 5G mobile services and network requirements. *Sustainability*, 9(10), 1848.

50. Bogale, T. E., Wang, X., and Le, L. B. (2017). mmWave communication enabling techniques for 5G wireless systems: A link level perspective. *In MmWave Massive MIMO*. Amsterdam: Elsevier, 195-225.

51. Khanna, A., and Kaur, S. (2020). Internet of things (IoT), applications and challenges: a comprehensive review. *Wireless Personal Communications*, 114, 1687-1762.

52. Lee, I., and Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440.

53. Elhadi, S., Marzak, A., Sael, N., and Merzouk, S. (2018). Comparative study of IoT protocols. *Smart Application and Data Analysis for Smart Cities* (SADASC'18). Casablanca Morocco.

54. Mehmood, Y., Haider, N., Imran, M., Timm-Giel, A.,and Guizani, M. (2017). M2M communications in 5G: state-of-the-art architecture, recent advances, and research challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 194-201.

55. Mogensen, P., Pajukoski, K., Tiirola, E., Lähetkangas, E., Vihriälä, J., Vesterinen, S., and Cattoni, A. F. (2013). 5G small cell optimized radio design. *In 2013 IEEE Globecom Workshops* , IEEE, 111-116.

56. Muirhead, D., Imran, M. A., and Arshad, K. (2016). A survey of the challenges, opportunities and use of multiple antennas in current and future 5G small cell base stations. *IEEE Access*, 4, 2952-2964.

57. Vook, F. W., Ghosh, A., and Thomas, T. A. (2014). MIMO and beamforming solutions for 5G technology. *In 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium* (IMS2014), Tampa, FL, USA.

58. Ahmed, I., Khammari, H., Shahid, A., Musa, A., Kim, K. S., De Poorter, E., and Moerman, I. (2018). A survey on hybrid beamforming techniques in 5G: Architecture and system model perspectives. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 3060-3097.

59. Foukas, X., Patounas, G., Elmokashfi, A., and Marina, M. K. (2017). Network slicing in 5G: Survey and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(5), 94-100.

60. Yıldırım, A., and Tunalı, A. İ. (2022). 5G Nedir? *Aselsan Dergi,* 111, 26-33.

61. Armağan, O., and KAHRİMAN, M. (2023). ISM 2450MHZ Civarında Dairesel Mikroşerit Antenlerde Eş Düzlemsel Çerçeve Yapının Yansıma Katsayısı, En Büyük Kazanç, Bant Genişliği Ve Hüzme Genişliği Üzerıne Etkisi. *Yalvaç Akademi Dergisi*, 8(1), 145-165.

62. Cheng, D. K. (2003). Dalga ve Alan Elektromanyetizması. Ankara: 3D Yayınevi.

63. Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: analysis and design. New Jersey: John wiley & sons.

64. İnternet: Rogers Corp. (2023). URL: https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions, Son Erişim Tarihi: 21.03.2023.

65. Yazgan, E. (1987). Mikroşerit Antenler. *Department of Electrical and Electronics, Hacettepe University*, 1-7.

66. Agarwal, K., Rao, G. P., Kartikeyan, M. V., and Thumm, M. K. (2006). A proximity fed circularly polarized microstrip patch antenna with a cross slot in the ground plane. *German Microwave Conference* (GeMIC2006), Karlsruhe (TH), Germany.

67. Rahman, M. Z., Nath, K. C. D., and Mynuddin, M. (2020). Performance analysis of an inset-fed circular microstrip patch antenna using different substrates by varying notch width for wireless communications. *International Journal of Electromagnetics and Applications*, 10(1), 19-29.

68. Varshney, H. K., Kumar, M., Jaiswal, A. K., Saxena, R., & Jaiswal, K. (2014). A survey on different feeding techniques of rectangular microstrip patch antenna. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4(3), 1418-1423.

69. Majumder, A. (2013). Rectangular microstrip patch antenna using coaxial probe feeding technique to operate in S-band. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 4(4), 1206-1210.

70. Wang, C. X., Bian, J., Sun, J., Zhang, W., and Zhang, M. (2018). A survey of 5G channel measurements and models. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(4), 3142-3168.

71. Taş, M. T. (2009). Çoklu giriş çoklu çıkış sistemlerinin incelenmesi ve iletim çeşitleme yöntemlerinin bilgisayarlı başarım analizi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2009

72. Gharavi-Alkhansari, M., and Gershman, A. B. (2004). Fast antenna subset selection in MIMO systems. IEEE transactions on signal processing, 52(2), 339-347.

73. Loyka, S. L. (2001). Channel capacity of MIMO architecture using the exponential correlation matrix. *IEEE Communications Letters*, 5(9), 369-371.

74. Büyükçorak, S., and Kurt, G. K. (2012). Mimo channel capacity measurements. *In 2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference* (SIU), Mugla, Turkey.

75. Loyka, S. L. (1999). Channel capacity of two-antenna BLAST architecture. *Electronics Letters*, 35(17), 1421-1422.

76. Kumar, P., Ali, T., and Pai, M. M. (2021). Electromagnetic metamaterials: A new paradigm of antenna design. *IEEE Access*, 9, 18722-18751.

77. Weng, L. H., Guo, Y. C., Shi, X. W., and Chen, X. Q. (2008). An overview on defected ground structure. *Progress İn Electromagnetics Research B*, 7, 173-189.

78. Rahmat-Samii, Y., and Mosallaei, H. (2001). Electromagnetic band-gap structures: classification, characterization, and applications. *11th International Conference on Antennas and Propagation* (ICAP 2001), Manchester, UK.

79. Ullah, S. (2016). Design of Electromagnetic Bandgap (EBG) Structures for polarization sensitive wireless communications. *In 2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology* (IBCAST), Islamabad, Pakistan.

80. ho Chae, S., il Kawk, W., Park, S. O., and Lee, K. (2006). Analysis of mutual coupling in MIMO antenna array by TARC calculation. *In 2006 Asia-Pacific microwave conference*, Yokohama, Japan.

81. Sultan, K. S., and Abdullah, H. H. (2019). Planar UWB MIMO-diversity antenna with dual notch characteristics. *Progress In Electromagnetics Research C*, 93, 119-129.

82. Okan, T. (2021). A wideband conductor backed coplanar waveguide fed implantable antenna operable in different tissues for biotelemetry applications. *Radioengineering*, 30(2).

83. Carrara, N. (2015). Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz-100 GHz. *Institute for Applied Physics*, Italian National Research Council: Rome, Italy.



Gazili olmak ayrıcalıktır