



**İSKENDERUN TEKNİK**  
ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**İŞİMA ÖRÜNTÜSÜ VE  
FREKANS YENİDEN  
YAPILANDIRILABİLİR ANTEN  
TASARIMLARI**

**Halil PAŞALIOĞLU**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**ŞUBAT 2022**



**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**



**İŞİMA ÖRÜNTÜSÜ VE FREKANS YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR  
ANTEN TASARIMLARI**

**Halil PAŞALIOĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2022**

Halil PAŞALIOĞLU tarafından hazırlanan “İŞİMA ÖRÜNTÜSÜ VE FREKANS YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN TASARIMLARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

**Başkan:** Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Prof. Dr. Kemal DELİHACIOĞLU

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kilis 7 Aralık Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

Tez Savunma Tarihi: 16/02/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
  - 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 çalışmada 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.

İmza

Halil PAŞALIOĞLU

16/02/2022

# IŞIMA ÖRÜNTÜSÜ VE FREKANS YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR

## ANTEN TASARIMLARI

(Yüksek Lisans Tezi)

Halil PAŞALIOĞLU

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Şubat 2022

### ÖZET

6 GHz altı spektrumdaki sınırlı bant genişlikleri ve ortaya çıkan tıkanıklık sorunları, yeni nesil iletişim sistemlerinde yüksek frekansların kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmektedir. Milimetre dalga spektrumundaki kullanılmayan bant genişlikleri, sistem kapasitesini arttırmak ve daha yüksek veri iletim hızları elde etmek için kullanılabilir. İletişim sistemlerinde kullanılacak antenlerin, yüksek veri iletim hızları sunması için, yüksek bant genişliği, oluşabilecek zayıflamaların üstesinden gelebilmesi için de yüksek kazanç sağlayabilmesi gerekmektedir. Bunun yanında antenlerin kompakt, karmaşıklıktan uzak, seri üretim için elverişli ve uygun maliyetli olması beklenmektedir.

Bu çalışmada, iletişim ve haberleşme otoritelerinin yeni nesil iletişim sistemler için önerdikleri MMW bandında (26,5 GHz – 40 GHz) çalışan birkaç anten tasarımı sunulmuştur. Çalışmada on beş farklı ışına deseni sağlayan bir ışına deseni yeniden yapılandırılabilir anten ile, altı adet frekansı yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Sunulan bu antenlerin yeniden yapılandırılma özellikleri kullanılarak K-bandı radar uygulamaları için de kullanılması amaçlanmıştır. Ayrıca çok kanallı iletişim için frekans yeniden yapılandırılabilir anten yapısı çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) topolojisinde konuşlandırılarak uzamsal çeşitlilik de iyileştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : K-Band, 5G, Yeniden Yapılandırılabilir Anten, MMW

Sayfa Adedi : 86

Danışman : Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

# RADIATION PATTERN AND FREQUENCY RECONFIGURABLE

## ANTENNA DESIGNS

(M. Sc. Thesis)

Halil PAŞALIOĞLU

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

February 2022

### ABSTRACT

Limited bandwidths in the sub-6 GHz spectrum and emerging congestion problems make it inevitable to use high frequencies in new generation communication systems. Unused bandwidths in the millimeterwave spectrum can be used to increase system capacity and achieve higher data transmission rates. Antennas to be used in communication systems must have high bandwidth to offer high data transmission rates, and high gain to overcome the attenuation that may occur. In addition, antennas are expected to be compact, uncomplicated, convenient for mass production and cost-effective.

This study presents several antenna designs operating in MMW band (26.5 GHz - 40 GHz) recommended by communication authorities for new generation communication systems. Accordingly, six frequency reconfigurable antenna designs with a radiation pattern reconfigurable antenna providing fifteen different radiation patterns are presented in this study. These antennas are also intended to be used for K-band radar applications based on their reconfiguration properties. Results showed that spatial diversity was improved by deploying the frequency in a reconfigurable antenna structure multiple-input multiple-output (MIMO) topology.

Keywords : K-Band, 5G, Reconfigurable Antenna, MMW

Page Number : 86

Supervisor : Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

## TEŞEKKÜR

Öncelikle danışmanım Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN'a bu araştırma boyunca gösterdiği rehberlik, sabır, nezaket ve teşvik için teşekkür ederim. Ayrıca Dr. Öğr. Üyesi Volkan AKDOĞAN, Arş. Gör. Olcay ALTINTAŞ, Arş. Gör. Fatih Özkan ALKURT ve tez komitemin geri kalanına, tezime katkı sağlayan anlayışlı yorumları için de teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatım boyunca her zaman desteğini esirgemeyen sevgili aileme en derin şükranlarımı sunarım. Bu başarı onlar olmadan mümkün olmazdı. Teşekkürler.





## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	5
2. 5G ve K-BAND RADAR ANTEN ÇÖZÜMLERİ İÇİN LİTERATÜR TARAMASI.....	9
2.1. Giriş.....	9
2.2. Yeni Nesil İletişim Sistemleri için Milimetre Dalga Spektrumu .....	10
2.3. Yeni Nesil İletişim Sistemleri için Performans Gereklilikleri.....	11
2.4. Yeni Nesil İletişim Sistemleri için Anten Gereklilikleri .....	14
2.5. K-Band Radar Uygulamaları.....	15
2.6. 5G ve K-Band Radar Anten Tasarım Teknikleri.....	17
3. DESEN YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN .....	24
3.1. Giriş.....	24
3.2. 19,6 - 28 GHz Desen Yeniden Yapılandırılabilir Anten .....	27
3.2.1. Anten tasarımı ve üretimi .....	27
3.2.2. Sonuçlar ve tartışma .....	29
4. FREKANS YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN .....	37
4.1. Giriş.....	37
4.2. 18 GHz ve 28/38 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Anten .....	38

	<b>Sayfa</b>
4.2.1. Anten tasarımı ve üretimi .....	38
4.2.2. Sonuçlar ve tartışma .....	40
4.3. 18 GHz ve 28/38 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir MIMO Anten .....	44
4.3.1. Anten tasarımı ve üretimi .....	44
4.3.2. Sonuçlar ve tartışma .....	46
4.4. 18 GHz ve 28/38 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Dizi Anten .....	49
4.4.1. Anten tasarımı ve üretimi .....	49
4.4.2. Sonuçlar ve tartışma .....	51
4.5. 28 GHz ve 38 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Anten.....	55
4.5.1. Anten tasarımı.....	55
4.5.2. Sonuçlar ve tartışma .....	58
4.6. 25 GHz - 29 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Anten .....	59
4.6.1. Anten tasarımı.....	59
4.6.2. Sonuçlar ve tartışma .....	62
4.7. 15,5 GHz – 30 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Anten.....	64
4.7.1. Anten tasarımı.....	64
4.7.2. Sonuçlar ve tartışma .....	67
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	72
KAYNAKLAR.....	75
DİZİN .....	86

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. IMT-2020 hedefleri ve IMT-A ile karşılaştırılması.....	12
Çizelge 3.1. Desen yeniden yapılandırılabilir anten parametreleri.....	28
Çizelge 3.2. Çalışma modları ve bazı keyfi anahtar kombinasyonlarındaki kazançlar .....	31
Çizelge 4.1. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten parametreleri .....	44
Çizelge 4.2. 28 GHz ve 38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarım parametreleri .....	57
Çizelge 4.3. 25 GHz – 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarım parametreleri .....	62
Çizelge 4.4. 25 GHz – 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten kazanç değerleri.....	63
Çizelge 4.5. 15,5 GHz – 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarım parametreleri .....	67

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 200 m yarıçaplık bir alandaki yayılma modelinin yağmur ve atmosferik absorpsiyon istatistikleri, (a) Çeşitli yağış miktarlarının frekansa göre dB/km cinsinden zayıflaması, (b) dB/km cinsinden frekanslara karşı atmosferik absorpsiyon.....	13
Şekil 2.2. Önerilen kompakt MMW MIMO anteni: (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüş; (c) S parametreleri .....	19
Şekil 2.3. Deseni yeniden yapılandırılabilir anten farklı ışınma desenleri.....	22
Şekil 3.1. Desen yeniden yapılandırılabilir anten tasarım aşamaları (a) Model-a, (b) Model-b, (c) Model-c.....	28
Şekil 3.2. Desen yeniden yapılandırılabilir anten Mod 1 çalışma durumu S11 parametresi.....	29
Şekil 3.3. Desen yeniden yapılandırılabilir anten Mod 2, Mod 3, Mod 4 çalışma durumları S11 parametreleri.....	30
Şekil 3.4. Desen yeniden yapılandırılabilir anten yapına ait (a) Elektrik alan dağılımı, (b) Yüzey akım dağılımı .....	30
Şekil 3.5. Mod 1 çalışma durumundaki 3D ışınma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Kapalı, SW3: Kapalı, SW4: Açık (b) SW1: Kapalı, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Kapalı (c) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Kapalı (d) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Kapalı, SW4: Kapalı.....	32
Şekil 3.6. Mod 2 çalışma durumundaki 3D ışınma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Açık (b) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Kapalı (c) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Kapalı (d) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Kapalı.....	33
Şekil 3.7. Mod 3 ve Mod 4 çalışma durumundaki 3D ışınma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Açık (b) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Açık (c) SW1: Açık, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Açık (d) Tüm anahtarlar Açık.....	34

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.8. Mod 1 çalışma durumundaki 1D ışına desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Kapalı, SW3: Kapalı, SW4: Açık (b) SW1: Kapalı, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Kapalı (c) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Kapalı (d) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Kapalı, SW4: Kapalı.....	35
Şekil 3.9. Mod 2 çalışma durumundaki 1D ışına desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Açık (b) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Kapalı (c) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Kapalı (d) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Kapalı.....	35
Şekil 3.10. Mod 3 ve Mod 4 çalışma durumundaki 3D ışına desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Açık (b) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Açık (c) SW1: Açık, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Açık (d) Tüm anahtarlar Açık.....	36
Şekil 4.1. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten: (a) Simüle edilmiş anten geometrisi; (b) Üretilen anten prototipi.....	39
Şekil 4.2. Önerilen antenin tasarım aşamaları; (a) Model-a, (b) Model-b, (c) Model-c, (d) Model-d .....	39
Şekil 4.3. Tasarım aşamasında ele alınan modellerin $S_{11}$ karakteristikleri.....	40
Şekil 4.4. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten $S_{11}$ parametresi .....	41
Şekil 4.5. Frekans yeniden yapılandırılabilir anten yapına ait (a) 18 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 18 GHz Yüzey akım dağılımı, (c) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (d) 28 GHz Yüzey akım dağılımı, (d) 38 GHz Elektrik alan dağılımı, (e) 38 GHz Yüzey akım dağılımı .....	42
Şekil 4.6. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten 3D ışına örüntüsü (a) 18 GHz; (b) 28 GHz; (c) 38 GHz .....	43
Şekil 4.7. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten geometrisi.....	45
Şekil 4.8. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten prototipi.....	45

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.9. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten $S_{11}$ parametresi .....	46
Şekil 4.10. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten PIN kapalı durum için antenler arasındaki iletim katsayıları .....	47
Şekil 4.11. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten PIN açık durum için antenler arasındaki iletim katsayıları .....	47
Şekil 4.12. Frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten yapısına ait (a) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 28 GHz Yüzey akım dağılımı .....	48
Şekil 4.13. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten 3 boyutlu ışınma örüntüsü (a) 18 GHz; (b) 28 GHz; (c) 38 GHz.....	49
Şekil 4.14. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir dizi anten geometrisi.....	50
Şekil 4.15. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir dizi anten prototipi.....	51
Şekil 4.16. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir dizi anten $S_{11}$ parametresi .....	52
Şekil 4.17. Frekans yeniden yapılandırılabilir dizi anten yapısına ait (a) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 28 GHz Yüzey akım dağılımı .....	53
Şekil 4.18. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten 3D ışınma örüntüsü; (a) 28 GHz, PIN Kapalı (b) 38 GHz, PIN Kapalı (c) 18 GHz, PIN Açık .....	54
Şekil 4.19. Önerilen antenin tasarım aşamaları; (a) Model-a, (b) Model-b, (c) Model-c.....	55
Şekil 4.20. Tasarım aşamasında ele alınan modellerin $S_{11}$ karakteristikleri.....	56
Şekil 4.21. 28 GHz ve 38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten geometrisi ve PIN diyot eşdeğer devresi .....	56
Şekil 4.22. Besleme bağlantı hattı uzunluğu değişimine göre geri dönüş kaybı karakteristikleri.....	57
Şekil 4.23. 28 GHz ve 38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten $S_{11}$ parametresi.....	58
Şekil 4.24. 28 GHz ve 38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten 3 boyutlu ışınma örüntüsü (a) 28 GHz; (b) 38 GHz .....	59

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.25. 25 GHz - 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten geometrisi.....	60
Şekil 4.26. Anten parametreleri değişimine göre geri dönüş kaybı karakteristikleri; (a) ML, (b) MW .....	61
Şekil 4.27. FR-4 katmanın uzaklığına göre geri dönüş kaybı karakteristikleri .....	61
Şekil 4.28. 25 GHz ve 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten $S_{11}$ parametresi .....	62
Şekil 4.29. 25 GHz ve 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten 3 boyutlu ışınma örüntüsü; (a) 26 GHz, (b) 28 GHz .....	63
Şekil 4.30. Frekans yeniden yapılandırılabilir anten yapısına ait (a) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 28 GHz Yüzey akım dağılımı .....	64
Şekil 4.31. Önerilen antenin tasarım aşamaları; (a) Model-a, (b) Model-b, (c) Model-c, (d) Model-d .....	65
Şekil 4.32. Tasarım aşamasında ele alınan modellerin $S_{11}$ karakteristikleri .....	66
Şekil 4.33. 15,5 GHz - 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten geometrisi...	66
Şekil 4.34. 15,5 GHz ve 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten $S_{11}$ parametresi .....	67
Şekil 4.35. Kavisli yüzey boyunca bükülmüş anten yapısı; (a) $r=10$ mm, (b) $r=5$ mm, (c) $r=2$ mm.....	68
Şekil 4.36. 15,5 GHz ve 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten 3 boyutlu ışınma örüntüsü (a) 16 GHz, (b) 18 GHz, (c) 23 GHz, (d) 24 GHz, (e) 28 GHz, (f) 30 GHz.....	69
Şekil 4.37. Frekans yeniden yapılandırılabilir anten yapısına ait (a) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 28 GHz Yüzey akım dağılımı .....	70
Şekil 4.38. 15,5 GHz ve 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten kazanç grafiği .....	71

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

$\lambda$	Dalga Boyu
$\epsilon_r$	Dielektrik Sabiti
<b>dB</b>	Desibel
<b>dB<sub>i</sub></b>	Desibel İzotropik
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>Hz</b>	Hertz
<b>mm<sup>2</sup></b>	MiliMetrekare
<b>mm<sup>3</sup></b>	MiliMetreküp

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>3D</b>	Üç Boyutlu (Three-Dimensional)
<b>4G</b>	4. Nesil (Fourth-Generation)
<b>4G LTE</b>	Fourth-Generation Long Term Evolution
<b>5G</b>	5. Nesil (Fifth-Generation)
<b>BİT</b>	Bilgi ve İletişim Teknolojisi
<b>CP</b>	Dairesel Polarizasyon (Circular Polarisation)
<b>CST</b>	Computer System Technology
<b>CWP</b>	Eş düzlemlı dalga kılavuzu
<b>DBDSA</b>	Çift Bandlı Dolly Şekilli Anten
<b>DC</b>	Direct Current
<b>DEM</b>	Sayısal Yükseklik Modellemesi
<b>EBG</b>	Elektromanyetik Band Aralığı
<b>EM</b>	Elektromanyetik
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission
<b>FET</b>	Field-Effect Transistor



**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>FIT</b>	Sonlu İntegrasyon
<b>FMCW</b>	Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga
<b>FR4</b>	Flame Retardant 4
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IMT</b>	International Mobile Telecommunications
<b>ITU</b>	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
<b>İHA</b>	İnsansız Hava Araçlarına
<b>LEO</b>	Düşük Dünya Yörüngesi
<b>LH</b>	Sol-El (Left Hand)
<b>LOS</b>	Görüş Hattı Bağlantısı
<b>MEMS</b>	Mikro Elektro-Mekanik Sistemler
<b>MIMO</b>	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
<b>MMW</b>	Milimetre Dalga
<b>NLOS</b>	Ufuk Ötesi Bağlantısı
<b>Ofcom</b>	Office of Communications
<b>PCB</b>	Baskılı devre kartı (Printed Circuit Board)
<b>PIFA</b>	Düzlemsel Ters çevrilmiş F anten
<b>PIN</b>	Positive-Intrinsic-Negative
<b>Radar</b>	Radio Detection and Ranging
<b>RF</b>	Radyo frekansı
<b>RH</b>	Sağ El (Right Hand)
<b>Rx</b>	Receiver
<b>SAR</b>	Synthetic Aperture Radar
<b>SAR</b>	Specific Absorption Rate
<b>SIW</b>	Substrate Integrated Waveguides
<b>Tx</b>	Transmitter
<b>WiMAX</b>	Mikrodalga Erişim Bandı

## 1. GİRİŞ

Bilgi ve iletişim teknolojisindeki (BİT) büyük gelişmeler ve sürekli artan sayıda kablosuz kullanıcılar, yüksek veri hızları ve kanal kapasitesi talebinde düzensiz bir artışa sebep olmaktadır. Günümüzde hücresel iletişim, 6 GHz altı bantta yaygın olarak kullanılmaktadır ve özellikle 3 GHz spektrumunun altındaki frekanslar, tıkanıklıktan ciddi şekilde etkilenmektedir. Beşinci nesil (5G) ağlar için bir frekans aralığı seçilirken, milimetre dalga (MMW) frekanslarının, kompaktlık, minyatür boyut ve daha fazla kullanılabilir bant genişliği sunma avantajları etkili olmuştur. Bununla birlikte, milimetre dalga (MMW) frekanslarının daha yüksek atmosferik absorpsiyonlar, zayıf kırınım ve saçılma sorunları dahil olmak üzere yayılma etkileri çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Daha yüksek frekanslarda, atmosfer daha emici hale gelir ve bu da alıcı (Rx) ucundaki sinyal gücünün yüksek oranda zayıflamasına neden olmaktadır. Sinyal zayıflaması esas olarak çalışma frekansına, yayılma mesafesine ve sis, yağmur vb. hava koşullarına bağlıdır. 5G mimarisinin 200 m'den daha kısa menzilli hücrelerden oluşması ve atmosferik zayıflamaların şiddetli durumlar dışında belirgin olmaması beklenmektedir (Andrews, ve diğerleri, 2014; Rangan, Rappaport, ve Erkip, 2014). Çok sayıda kullanıcı iç mekânda bulunmaktadır ve geleneksel dış mekân kapsama alanına sahip baz istasyonlarının, pencereler, duvarlar ve çeşitli kaplamaların yüksek frekanslardaki yüksek penetrasyon kayıpları nedeniyle 5G sistemlerinde oldukça zorlanması beklenmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için oluşturulacak çoklu erişim noktalarının konuşlandırılmasıyla kısa menzilli hücresel iletişimin gerçekleştirilmesi, altyapının genel maliyetini artıracaktır.

Yüksek frekans spektrumunun yarattığı zorluklar, anten tasarımcılarını verimli bir sinyal iletimi ve alımını sağlamak için çok yönlü antenler bulmaya teşvik etmiştir. 5G mimarisinde antenin rolü son derece önemlidir ve değişen koşullarda iyi performans gösterebilen uyarlanabilir antenlere ihtiyaç vardır (Zhang, Zhao, Shang, Liu, ve Han, 2017).

Frekans seçimi, bilişsel bir yaklaşım kullanan ve antenin çalışma frekansının seçilmesini sağlayan temel gereksinimlerden biridir. Frekans yeniden yapılandırması, mevcut hücresel sistemlerde büyük ölçüde kullanılmaktadır (Ying, 2012). Kanal kapasitesini arttırmaya yönelik başka bir yaklaşım, çoklu giriş-çoklu çıkış (MIMO) anten dizileridir. MIMO sistemleri, her bir anten elemanının ayrı ayrı çalıştığı birden fazla kanalı aynı anda destekleyebilmektedir.

3 GHz'in altındaki frekanslarda, anten boyutları nispeten büyüktür. Bu durum, hücresele uygulamalar için büyük MIMO düzeneğinde çok sayıda antenin entegrasyonunu sınırlamaktadır. Yüksek frekanslarda, daha küçük bir anten boyutu, çok kanallı iletim üzerinde uyarlmalı bir kontrol sağlamak için hem azimut hem de yükseklik düzlemlerinde dağıtılan MIMO anten sistemlerinin uygulanmasını kolaylaştırmıştır (Larsson, Edfors, Tufvesson, ve Marzetta, 2014). Öte yandan, MMW antenlerinin daha küçük boyutları, zayıflamaların üstesinden gelmek için yüksek kazanç sağlamak amacıyla büyük ölçekli anten dizilerinin gerçekleştirilmesine de olanak sağlamaktadır. Bir baz istasyonuna 1024 adet MMW anten kolayca entegre edilebilmektedir (Walther, 2021).

Günümüzde, ticari kablosuz noktadan noktaya mikrodalga iletişim sistemleri 18-30 GHz (K bandı ve Ka bandı) frekanslarında çalışmaktadır (Federici, Moeller, ve Su, 2013). K- bandı mikrodalga spektrumunda 18 GHz ile 26,5 GHz frekansları arasında ifade etmektedir. 22,2 GHz'de (su buharı rezonans frekansı) bu aralık içerisinde yer almaktadır. Bu durum çok fazla atmosferik absorpsiyona neden olmaktadır. K-bandı çarpışma önleyici sistemlerde, otonom sistemlerde, tıbbi ve güvenlik sistemlerinde yüksek çözünürlük sunmaktadır. Buna karşılık çevresel faktörlerden çok fazla etkilenmesi sebebiyle daha çok kısa menzilli uygulamalarda tercih edilmektedir.

Yama antenlerinin geleneksel geometrileri, sınırlı kazanç ve bant genişliği performansı sunmaktadır. Anten dizilerinin kullanılmasıyla yüksek kazanç profilleri elde edilebilir, ancak anten dizileri özellikle bant genişliği iyileştirmesinde çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. 5G sistemleri, çok sayıda kullanıcıya ulaşmak ve birden fazla uygulamayı çalıştırmak üzere büyük kanal kapasitesine ihtiyaç duyarlar. İletim kayıplarıyla başa çıkmak ve yüksek kazanç elde edebilmek için, MMW tabanlı yeniden yapılandırılabilir antenler, MIMO diziler ve çok bantlı, geniş bantlı dizileri kullanılmaktadır. Ayrıca K bandındaki farklı uygulama ve noktadan noktaya iletişim sistemleri içinde yeniden yapılandırılabilir anten sistemleri büyük önem arz etmektedir. Bir antenin yeniden yapılandırılabilirliği, yayın yapan elemanın frekansı, ışın deseni veya polarizasyon gibi özelliklerini ayarlayabilme yeteneğini ifade etmektedir (Balanis C. A., 2016; Bernhard, 2005). Frekans yeniden yapılandırılabilir antenler, farklı frekanslardaki sinyallerin iletimi veya alımı için farklı anten dizileri kullanmak yerine tercih edilmekte ve bu yöntem tartışmasız en pratik yöntem olarak kabul görmektedir (Musavand, Zehforoosh, Ojaroudi, ve Ojaroudi, 2016). Işın deseni yeniden yapılandırılabilir antenler, aynı çalışma frekansında fakat farklı yönlülükte birden fazla ışın modeli üretebildikleri için özellikle gözlem ve izleme uygulamalarında oldukça

verimlidir (Lu, Yang, ve Tan, 2017; Parchin, Abd-Alhameed, ve Shen, 2019). Bu araştırmada, 5G ve K bandı uygulamaları için anten çözümleri önerirken yukarıda belirtilen yaklaşımlara büyük önem verilmiştir.

Bu çalışmanın asıl ilham kaynağı, yeni bir iletişim çağını başlatacak olan kablosuz teknolojinin bu muazzam gelişimine katkı sağlamaktır. Bu araştırmayı motive eden ve verimli, kompakt, uygun maliyetli anten tasarımları önerme gerekliliğine vurgu yapan zorluklar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 5G sistemleri için anten gereksinimleri hala net olarak tanımlanmamıştır. Mevcut kablosuz ağlara dayanarak, çalışma frekansını seçme ve çalışma durumlarını çevresel değişikliklere uyum sağlamak için yeniden yapılandırma kontrolü ile sağlanan antenlerin 5G için oldukça umut verici olacağı tahmin edilmektedir.
- Hücresel ağlar için yeniden yapılandırılabilir antenlerin çoğu, 6 GHz'in altındaki frekanslar için gösterilmiştir. MMW spektrumunun kapsamlı bir şekilde kullanılmasına ve yeniden yapılandırılabilir antenlerin yeni tasarımlarının sunulmasına ihtiyaç vardır. Bu araştırmaların ilerlemesi, MMW hücresel antenlerinin istenen performansını sağlayacaktır.
- Literatürde bulunan yeniden yapılandırılabilir anten tasarımlarının büyük bir kısmı hantal ve oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu çalışmada amaç, nispeten daha az tasarım karmaşıklığı ve daha iyi verimlilik ile düzlemsel anten geometrileri geliştirmektir.
- MIMO antenlerinin 4G sistemlerindeki başarısından sonra, 5G'nin sadece MIMO sistemlerine dayalı olacağı öngörülmektedir. Gelecekteki ağlar için MIMO antenlerinin özelliklerini önermek üzere kayda değer çalışmalar yapılmıştır, ancak hücresel cihazlara verimli bir şekilde dahil edilmek üzere istenen olgunluk düzeyine ulaşmak için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır. MMW MIMO anten sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmak ve yeniden yapılandırılabilir anten mimarisinin MIMO sistemlerinde kullanılabilmesi için literatüre katkıda bulunmaktır.
- Literatürde ve uygulamada çok farklı uygulama alanları için K band radar çalışmaları mevcuttur. Gerektiğinde bu uygulamalar arasında geçiş yapabilmek ve çevresel şartlar da dahil olmak üzere sistem verimliliğini arttırma ihtiyacı doğduğunda yeniden yapılandırma ihtiyacına cevap veren sistemler geliştirmektir.

- Anten boyutu yüksek frekanslarda büyük ölçüde küçülmektedir ve bu durum kompakt kablosuz cihazların yaygınlaşmasına olanak sağlamaktadır. Bu aynı zamanda, anten boyutlarındaki küçük farklılıkların, performansı ciddi biçimde etkileyebileceğinden, imalat sürecinde yüksek doğruluk ve hassasiyet gerektirmektedir. İstenen sonuçları elde edebilmek için kesin ve doğru üretim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, kısa menzilli hücrelerin sorunsuz ve kesintisiz çalışması için cihaz sayısında da artış gerekli olacak ve bu da sistemin maliyetini artıracaktır. Bu çalışmada uygun maliyetli, kolay ulaşılabilir malzeme kullanılarak seri üretim sürecinde verimli teknikleri belirleme amaçlanmıştır.

Bölümlerin içerikleri ve bu araştırmada kaydedilen ilerleme açısından tez organizasyonuna genel bir bakış aşağıda sunmaktadır. Bölüm 1, 5G'nin ve K-bandı'nın tanıtımı ile gelecekteki kablosuz ağlar için MMW spektrumunun uygunluğuna bir bakış sunar. Ayrıca araştırma hedeflerini, içerebileceği olası zorlukları, bu çalışmanın arkasındaki motivasyonu ve önemli katkıları vurgular. Gelecek tez bölümleri aşağıda özetlenmiştir:

Bölüm 2'de, yeni nesil iletişim sistemleri için milimetre dalga spektrumunun sunmuş olduğu avantajlar ve zorluklar incelenmiştir. Bunlara ek olarak yeni nesil iletişim sistemleri için performans ve anten gereklilikleri hakkında kapsamlı bir literatür çalışması yapılmıştır. K-bandı radar uygulamaları, 5G ve K-band radar anten tasarım teknikleri de yine bu bölümde incelenmiştir.

Bölüm 3'te deseni yeniden yapılandırılabilir antenler üzerine literatür çalışması yapılmıştır. Ardından yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri ve radar uygulamaları için yeni bir ışınma deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur.

Bölüm 4'te frekans yeniden yapılandırılabilir antenler hakkında yapılan literatür çalışması sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde 6 adet frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmaktadır. Sunulan tasarımlarda yeniden yapılandırılma yeteneği, PIN diyotlar, ayarlanabilir dirençler ve mekanik düzeneklerle kazandırılmıştır.

Bölüm 5'te ise bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmekle beraber, araştırmanın gelecekteki olası sonuçları da sunulmuştur.

## 2. 5G ve K-BAND RADAR ANTEN ÇÖZÜMLERİ İÇİN LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Giriş

İletişim teknolojileri, özellikle son yirmi yılda hızlı bir şekilde artan kablosuz cihaz ve uygulama talebini karşılamak üzere olağanüstü ilerleme kaydetmiştir. 5G, mobil telekomünikasyon standartlarının bir sonraki seviyesini ifade etmektedir ve bu teknolojinin kablosuz iletişim uygulamalarına yeni bir soluk getirmesi beklenmektedir. 5G'nin düşük gecikme süresi, ultra hızlı ve ultra esnek iletişim sağlaması için farklı ağ türleri arasında bileşik bir yapıya sahip olması beklenmektedir. 4G LTE standartlarının dağıtımıyla çeşitli heterojen sistemler ve ağlar belirli bir ölçekte birbirine bağlanmış ve kullanıcılar için nispeten daha hızlı ve daha verimli bir deneyim sunulmuştur.

Mevcut kablosuz hücrel spektrum, 300 MHz'den 3 GHz'e kadar bant genişliğinden oluşmaktadır (Samimi ve Rappaport, 2016). Hücrel ağlar için frekans bandı seçimi yapılırken, engellere nüfuz etme kabiliyeti, atmosferik zayıflamalar, hava koşullarına karşı hassasiyet ve bir mobil ahiyeye sığacak uyumlu anten boyutu göze alınarak belirlenir. Mevcut sistemlerde, frekans spektrumunun kapasitesini genişletmek, bant genişliği kaynaklarından en iyi şekilde yararlanmak ve verimi en üst düzeye çıkarmak için karmaşık sıkıştırma teknikleri kullanılmaktadır. Ek olarak, kablosuz cihazlar arasında daha hızlı iletişim bağlantıları kurmak üzere kısa menzilli kapsama hücreleri için MIMO antenler, yeniden yapılandırılabilir antenler ve faz dizileri gibi diğer uyarlanabilir teknikler de önerilmektedir.

Mevcut hücrel spektrum, çok sayıda uygulama nedeniyle teorik olarak maksimum sistem kullanımına ulaşmıştır ve 4G LTE'nin ötesinde daha fazla yükseltme için yeterli alan kalmamıştır (Gupta ve Jha, 2015; Nandi ve Maitra, 2018). Yeni nesil iletişim sistemleri, daha yoğun ancak daha küçük hücre boyutunda ve çok sayıda hizmetin aynı anda çalışmasına olanak sağlayan büyük band genişliğine sahip yüksek frekanslar kullanarak, iletişim sistemini çeşitlendirmektedir. Bu yeni nesil iletişim sistemleri tasarlanırken sağlamış olduğu avantajlarla beraber alt yapı kurulum maliyetleri de değerlendirmeye alınmalıdır. 5G sistemleri için farklı iletişim otoriteleri farklı frekanslar üzerinde dururken

genel olarak hepsi 24 GHz üzeri bandların kullanılmasını kabul etmiştir (Federal Communications Commission [FCC], 2016; Ofcom, 2017).

Yüksek frekanslı görüntüleme sistemleri, gizli nesnelere tespit etmek üzere güvenlik uygulamalarında gün geçtikçe daha cazip hale gelmektedir (Johnson, Weller, ve Gong, 2013). Genellikle yüksek çözünürlükte görüntüler elde etmek için mikrodalga spektrumundan faydalanılmaktadır ve bu şekilde tasarlanan sistemler istenmeyen nesnelere yüksek doğrulukta algılanmasını sağlamaktadır. K-bandı atmosferik olaylardan çok fazla etkilenmekte ve sinyal zayıflamalarına uğramaktadır. Ancak, K-Bandı radarlar kısa menzilde içerisinde, yüksek çözünürlük, yüksek doğruluk ve yüksek verim sağlamaktadır. K-bandının sağladığı bu avantaj sayesinde birçok askeri ve sivil kullanımda tercih edilmektedir.

## **2.2. Yeni Nesil İletişim Sistemleri için Milimetre Dalga Spektrumu**

Kullanılmayan MMW bantları, kablosuz ağlardaki bant genişliği kıtlığı sorunlarıyla başa çıkmak için umut verici bir hal almıştır. Spektrumun daha rahat olduğu 28 GHz ve üzeri frekanslar, 5G sistemleri için iyi bir alternatif sunmaktadır. (Dahlman, ve diğerleri, 2014). Amerika Birleşik Devletleri, Güney Kore, Japonya ve Çin gibi ülkeler MMW spektrumunda dağıtım yapan sistemler için ihalelerin bir kısmını tamamlamıştır.

MMW'lerin yayılma özellikleri, düşük ve orta frekanslarındakinden farklıdır ve MMW baz istasyonlarının dağıtım senaryosu da kendine has özelliklere sahiptir (Marcus ve Pattan, 2005; Huang, Wang, Liu, Sun, ve Zhang, 2018). 6 GHz altı bantlarla karşılaştırıldığında, MMW spektrumunda çözülmesi gereken bazı kritik sınırlamalar bulunmaktadır. Atmosferik zayıflamalar ve yağmur, sis gibi hava olaylarında yaşanan kayıplar bu sınırlamalara örnek olarak gösterilebilir. MMW spektrumu üzerinden yapılan iletişim, şiddetli hava koşullarından çok fazla miktarda etkilenmektedir ve bu etkilenmeler ile menzilde ters orantı bulunmaktadır. MMW spektrumu binalar tarafından kolayca engellenir, beton duvarlar ve kızılötesi yansıtıcı cam gibi malzemelere nüfuz edemez. Ayrıca, MMW antenleri, mevcut kullanımdaki hücreli antenlere kıyasla çok daha küçüktür ve çift taraflı iletişimin yapılması için, fazla güç gerektirmektedir.

Buna karşılık MMW spektrumu kompakt anten tasarımına izin veren daha kısa dalga boylarına sahiptir ve kısa mesafeli iletişim için güvenli bant genişliği sunmaktadır (Rappaport, Murdock, ve Gutierrez, 2011). Yüksek frekans bandlarına geçildiğinde, 28

GHz'de 1 GHz spektrum, 39 GHz'de 1,5 GHz spektrum ve 60 GHz'de 7 GHz'e kadar spektrum tahsisi beklenmektedir (Li, Niu, Papathanassiou, ve Wu, 2014). Özellikle büyük stadyumlar, hava alanları, ofis binaları, işlek cadde ve meydanlar olmak üzere, yüksek kullanıcı yoğunluğu ve büyük trafik talebi olan noktalarda kısa menzilli MMW baz istasyonlarının konuşlandırılması bu talebi karşılayabilir. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar, 5G MMW spektrumu ile yüksek verim elde edilebileceğini deneysel olarak doğrulamışlardır (Zheng, Wang, Han, Zhao, ve Wang, 2020). Kısa mesafeli hücreli iletişime doğru yönelirken, çok miktarda antenin yoğun bir şekilde konumlandırılması gerekecektir. Bu durum hassas üretim stratejileri ve planlama gerektirdiğinden nihayetinde donanım maliyeti artış gösterecektir.

MMW spektrumunda çalışan bileşenlerin uygun maliyetli bir hal alması için verimli üretim süreçlerinin kullanılması gerekmektedir. Kısa mesafeli kapsama alanının yarattığı sorun, sinyal zayıflamalarının çok fazla belirgin olmadığı optimum mesafenin ayarlanmasıyla çözülebilir. Oluşabilecek yol kayıplarını en aza indirmek ve daha az maliyetle veri iletimi sağlamak için Görüş Hattı Bağlantısı (LOS) kurulmalıdır. MMW spektrumu yüksek güç tüketimi ve düşük menzile sahip olmasına rağmen ortak kanal girişim ihtimalini azaltacağından daha güvenli bir iletişim sağlayacaktır (Rappaport, Murdock, ve Gutierrez, 2011). Yapılan çalışmalarda, MMW spektrumunun 5G ağları için potansiyel taşıdığı kaydedilmiştir (Baykas, ve diğerleri, 2011). İletişim otoriteleri tarafından yenilikçi süreçleri hızlandırmak için bazı kurallar ve standartlar getirilmiştir. Getirilen bu standartlar sabit ve mobil platformlarda kullanılmak üzere yaklaşık 11 GHz spektrumun ayılmasını tavsiye etmektedir. Genel olarak kabul gören band genişlikleri, 28 GHz, 37 GHz ve 39 GHz bandlarından oluşan lisanslı spektrumlar için 3,85 GHz ve lisanssız spektrumlar için 64-71 GHz aralığında ek 7 GHz'dir (Federal Communications Commission [FCC], 2016).

### **2.3. Yeni Nesil İletişim Sistemleri için Performans Gereklilikleri**

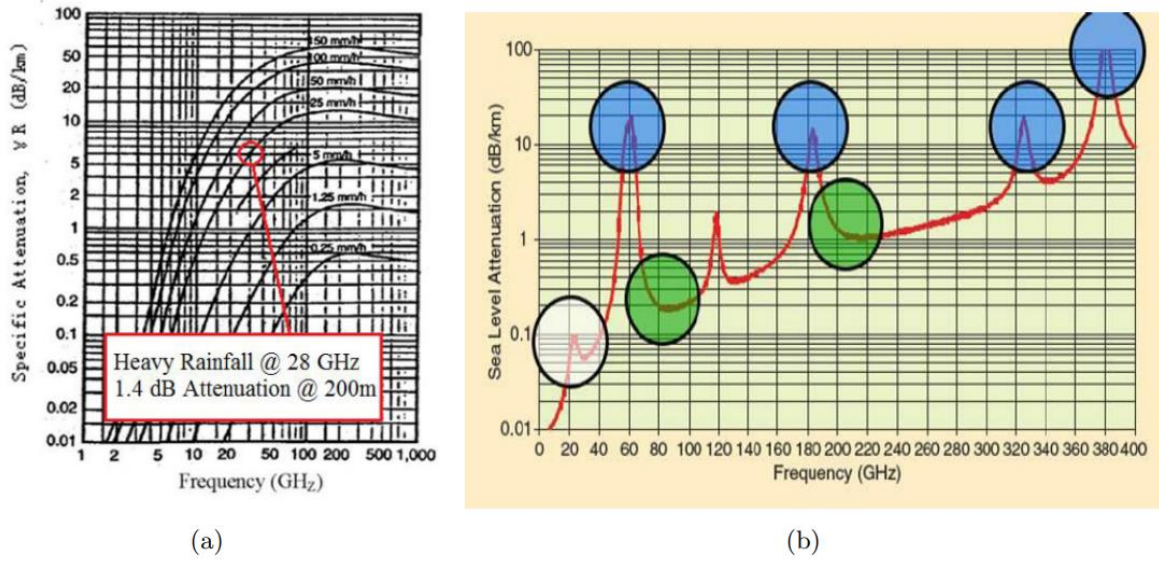
Yeni nesil iletişim standartlarının, kapasite sorunlarına, minimum zayıflama ve yol kaybıyla kısa mesafeli iletişim sorunlarına çözüm ararken birden çok kullanıcıya düşük gecikmeli bağlantı sağlaması beklenmektedir. Yeni nesil iletişim sistemlerinin gelecek hedefleri Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin (ITU) "2020 ve sonrası için IMT" vizyonunda küresel olarak konsolide edilmiştir (International Telecommunication Union, 2015). Bu vizyon çerçevesinde kararlaştırılan hedefler Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.



Çizelge 2.1. IMT-2020 hedefleri ve IMT-A ile karşılaştırılması

Sistem Parametreleri	IMT-A	IMT-2020	RF tasarımına etkisi
Maksimum Veri Hızı (Gbps)	1	20	Bant genişliği, taşıyıcı frekansı, EVM
Kullanıcı Deneyimli Veri Hızı (Mbps)	10	1000	Menzil, gürültü, spektrum paylaşımı, EVM
Spektrum Verimliliği	1x	2x – 5x	EVM, doğrusallık, gürültü, uzaysal/spektral filtreleme
Mobilite (km/h)	350	500	Zamanlama
Gecikme (ms)	10	1	Dijital sinyal işleme, protokoller
Bağlantı Yoğunluğu (x/km <sup>2</sup> )	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	Girişim
Ağ Enerji Verimliliği	1x	100x	RF devre/Sistem bileşenleri
Alan Trafik Kapasitesi (Mbps/m <sup>2</sup> )	0.1	10	Girişim

Yapılan çalışmalarda MMW spektrumunun, havadaki yağmur damlaları, nem hatta oksijen yoğunlukları gibi etkenler sebebiyle kayıplar yaşadığı ve absorpsiyona uğradığı kaydedilmiştir. Şekil 2.1 (a)'de yağış miktarının MMW spektrumu üzerindeki kayıpları istatistiksel olarak gösterilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere 25 mm/saat seviyesindeki sağanak yağış 28 GHz'de 7 dB/km seviyesinde bir zayıflamaya neden olmaktadır. Ayrıca kapsama alanının 200 m yarıçaplık bir alanda sınırlandırıldığı durumda yağmurun neden olduğu zayıflamanın yaklaşık 1.5 dB olduğu görülmektedir. Şekil 2.1 (b)'de 200 m yarıçaplık bir alandaki hava olayları kaynaklı zayıflamalar gösterilmektedir. Yapılan incelemelerde 200 m'lik bir yarıçap için 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında atmosferik absorpsiyonun sırasıyla 0,012 ve 0,016 dB olduğu görülmektedir (Rappaport, ve diğerleri, 2013; Zhao ve Li, 2016).



Şekil 2.1. 200 m yarıçaplık bir alandaki yayılma modelinin yağmur ve atmosferik absorpsiyon istatistikleri, (a) Çeşitli yağış miktarlarının frekansa göre dB/km cinsinden zayıflaması (Zhao ve Li, 2016), (b) dB/km cinsinden frekanslara karşı atmosferik absorpsiyon (Rappaport, Murdock, ve Gutierrez, 2011; Rappaport, ve diğerleri, 2013).

Yapılan bu araştırmalara dayanarak çevresel faktörlerden kaynaklı zayıflamaları en aza indirmek için kapsama alanının azaltılması gerektiği çıkartılabilir. Birçok coğrafyada ani ve uzun süreli sağanak yağışlar yaşanmaktadır ve bu özellikle bu coğrafyalardaki zayıflamaları en aza indirmek için çeşitli radyo link bağlantıları kurulmalıdır (Wells, 2009). Bu yeni nesil iletişim mimarisinde yüksek yoğunluklu picocell kavramı benimsenmiştir. Ayrıca görüş hattı bağlantısı (LOS) ve ufuk ötesi (NLOS) bağlantılarında olumsuz hava olaylarının neden olduğu zayıflamaları aşmak için yüksek kazançlı dizi antenler kullanılmalıdır. LOS iletişim sistemleri düşük gecikme sağlarken, güvenli, verimli ve hızlı bir iletişim sağlamaktadır. Bu ve benzeri düzenlemelerle, yaşanabilecek zorlukların üstesinden MMW antenleri ve sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Veri gecikmesi iletişim sistemleri için önemli olmakla beraber sinyal iletimi sırasındaki geçen sürenin bir göstergesidir. Nesnelerin interneti, otonom sistemler, oyun, video gibi multimedya uygulamaları, çeşitli sağlık uygulamaları gibi etkileşimli sistemler için gecikmeler ciddi performans kayıplarına neden olabilmektedir. Yüksek performanslı çeşitli kodlama sistemlerinin eklenmesiyle oluşabilecek gecikme süreleri azaltılmış ve sistem performansı iyileştirilmiştir (Mehran ve Rahimian, 2012; Rahimian ve Mehran, 2011). Artan teknolojiyle birlikte etkileşimli uygulamalar daha çok hayatımıza girecektir. Dolayısıyla oluşabilecek düşük gecikmeli iletişim sistemleri ihtiyacının 5G ile karşılanması

beklenmektedir. MMW spektrumunda hücre boyutu nispeten daha küçük olacağından, hücre kapsama alanı içerisinde iletilen güç mevcut baz istasyonlarındaki güç tüketiminden daha az olacaktır. 5G ile birlikte yeni nesil iletişim sistemlerinde algılama için taşıyıcıya sürekli iletilimler olmayacaktır ve bu da enerji verimi sağlayacaktır (Bouras ve Diles, 2017). Ayrıca kısa mesafeli LOS bağlantıları kapalı alanlara da konuşlandırılabilirdiğinden, iç mekanlarda yüksek hızlı MMW iletişimi daha verimli olacaktır (Zhang, Ge, Li, ve Guizani, 2017).

#### **2.4. Yeni Nesil İletişim Sistemleri için Anten Gereklilikleri**

Anten, tüm iletişim ağlarının merkezinde yer almaktadır ve 5G gibi yeni nesil iletişim sistemlerinin ilerlemesi, baz istasyonları ve mobil platformlar dahil ağı entegre edilen anten performansına bağlıdır.

MMW spektrumunda bir iletişim ağının tasarlanması ve kurulması dalga boyunun küçük olması sebebiyle oldukça zordur. FCC ve Ofcom gibi bazı otoriteler tarafından bu yeni iletişim sistemi için gerekli frekans bantları bildirilmiştir. FCC lisanslı erişim için 3,25 GHz band genişliği belirlemiş ve 5G için 27,5-28,35 GHz, 37,6-38,6 GHz, 38,6-40,0 GHz frekanslarını ayırmıştır. Ayrıca lisanslı erişimine ek olarak, 37,0-37,6 GHz ve 64,0-71,0 GHz frekanslarında 7,6 GHz genişliğinde lisanssız erişim band aralığı da önermiştir (Federal Communications Commission [FCC], 2016).

Yeni nesil iletişim sistemleri için geliştirilen anten K-bandında 5G lisanslı erişim için ayrılan birden fazla frekansta çalışabiliyor olması beklenmektedir. Çok bandlı, geniş bandlı veya yeniden yapılandırılabilir antenler birden fazla frekans aralığında çalışarak bu ihtiyacı karşılayabilir. Mevcut kullanımdaki 6 GHz altı antenlerle kıyaslandığında, MMW spektrumunda yayın yapan antenler, üst frekans limitleri, çözünürlük, karmaşıklık, kayıp performansı, tarama süresi ve maliyet gibi faktörler tarafından sınırlandırılmaktadır. Işın taraması için kullanılan geleneksel aşamalı dizi teknikleri, yüksek frekanslara çıkıldığında faz kaydırıcıların düşük performansları sebebiyle belirli dalga boylarında uygulanabilir.

MMW spektrumunda anten modeli ve dolayısıyla sistem düzeyinde modelleme, 6 GHz altı sistemlere göre önemli önemli ölçüde farklıdır. Yüksek frekanslara çıkıldığında, istenilen frekans aralığında, yayılan elemanın azaltılmış açıklığı sebebiyle, yayılma kaybını telafi etmek üzere iyileştirilmiş anten kazancı gerekmektedir.

Mekânsal filtreleme, özellikle yoğun ağlarda veri paketlerini ayırmak için önemli bir mekanizma niteliği taşımaktadır. Bu sebeple, özellikle yüksek frekanslarda çok dar hüzme ışınlarına imkân veren yatay (veya dikey) yönlerde daha fazla sayıda elemana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hem ışın izleme hassasiyeti hem de ışın arama sonuçlarına dayalı çoklu sinyaller için optimize edilmiş ışın modellerinin elde edilmesini sağlamaktadır (Huang, Chi, Wang, Li, ve Wang, 2018).

## 2.5. K-Band Radar Uygulamaları

Radar (Radio Detection and Ranging), elektromanyetik dalgalar kullanan bir konum ve hız sensörüdür. Askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılan radarlar, son yıllardaki entegre devre ve anten teknolojilerindeki gelişme ile otonom araç (Zhou, Cao, ve Chen, 2016; Yi, ve diğerleri, 2019), akıllı güvenlik sistemleri (Hyun, Jin, ve Lee, 2017), sağlık uygulamaları (Fioranelli, Kerneç, ve Shah, 2019), endüstriyel uygulamalar (Zanki, Schuster, Feger, ve Stelzer, 2017), iç ve dış mekân izleme (Shoykhetbrod, Hommes, ve Pohl, 2014) gibi alanlarda sıkça tercih edilmeye başlanmıştır. Radar antenleri uygulama senaryolarına bağlı olarak farklı tasarım özelliklerine sahiptirler. Daha uzun mesafe ve daha hassas hız tespiti için dar hüzme genişliğine sahip, yüksek kazançlı anten dizisi tercih edilmektedir. Nesne tespiti için geniş açılı tarama yapan sistemlerde, geniş hüzme aralığına sahip anten dizisi kullanılmaktadır. Buna ek olarak, tarama kabiliyetini arttırmak için radarlar dijital devreler yardımıyla açıdan açığa tarama yapacak şekilde tasarlanmaktadır.

Geniş huzmeli tarama karakteristikleri, geniş huzmeli antenler (Alizadeh, Shaker, De Almeida, Morita, ve Safavi-Naeini, 2019; Wang, Wang, Ding, ve Yang, 2015; Yang, Li, Zhou, ve Qi, 2017; Yu, ve diğerleri, 2019) ve deseni yeniden yapılandırılabilir anten (PRA) (Bai, Xiao, Tang, Ding, ve Wang, 2011; Zhuang, ve diğerleri, 2019; Li ve Zhao, 2016; Ding, Cheng, Shao, ve Wang, 2017) gibi farklı birçok yöntemle elde edilmektedir. Geniş açılı tarama antenleri, boyutları ve/veya üretim karmaşıklığı nedeniyle K-bandı radar uygulamaları için uygun değildir. Patch antenler düşük bir profile sahip olmakla beraber dar hüzme genişliğine sahip olduklarından geniş açı taraması yapmakta zorlanmaktadırlar (Harter, Chaudhury, Zirotti, ve Zwick, 2011; Chang, Jiao, Zhang, Chen, ve Qiu, 2017). Bu nedenle, iyi performans gösteren K-Band radarların tasarlanması için yeni anten çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

IEEE orijinal K-bandını, Ku, K ve Ka-bandı olmak üzere üçe ayrılmıştır. Burada, K-Band 18-27 GHz frekans (11,3 mm – 16,7 mm) aralığını tanımlamaktadır. Frekans yükseldiğinde atmosferik olaylardan etkilenme olasılığı artmaktadır. Dalga boyu frekansla ters orantılı olarak azalmakta ve özellikle 11 GHz üzeri frekanslarda atmosferik zayıflama artmaktadır. Tüm bu kriterler göz önüne alındığında K-bandı uzun menzilli uygulamalar için tercih edilmemektedir. Ancak, K-Bandı radarlar kısa menzil içerisinde, yüksek çözünürlük ve yüksek verim sağlamaktadır. Son yıllarda, K-Bandı, İnsansız Hava Araçlarına (İHA) yerleştirilen sensörler ayrıca konvansiyonel geniş alan ve interferometri uygulamalarında önerilmekle beraber bunlarla sınırlı değildir.

İnterferometrik radar, Sayısal Yükseklik Modellemelerinin (DEM) oluşturulmasında (Krieger, ve diğerleri, 2009), haritacılık uygulamalarında, deprem, sel, gibi doğal afetlerin izlenmesinde, (Mapelli, Giudici, ve Monti Guarnieri, 2011) endüstriyel kazalarda ve sivil güvenlik uygulamalarında (Gong, Li, Huang, Sun, ve Wang, 2011) oldukça verimli sonuçlar sağlamıştır. Öte yandan, artan trafik yoğunluğu ve trafik kazaları sonrasında konfor ve güvenliği arttırmak için yeni teknolojik gelişmelere özellikle otomotiv radarlarına ilgi artmıştır. Sürücü destek sistemlerinin bir parçası olan radarlar temel olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar: park asistanı, engel veya yaya tespiti amacıyla kullanılan kısa menzilli (20 m'ye kadar), kör nokta uyarı sistemi, şerit takip ve şerit değiştirme asistan sistemlerinde kullanılan orta menzilli (40 m ile 100 m arası) son olarak, adaptif hız sabitleyici (Adaptive Cruise Control) için uzun menzilli (250 m'ye kadar) radardır (Gupta M. S., 2007; Rajan ve Vivek, 2019; Gamba, 2019). 2019 yılında yapılan bir çalışmada, adaptif hız sabitleyici ve otomatik acil frenleme sistemleri için MIMO anten tasarımı sunulmuştur (Burov, ve diğerleri, 2019). 24 GHz bandında çalışan bu tasarımda, uzak bölgede (250 m'ye kadar)  $\pm 6^\circ$  sektörde yakın bölgede (60 m'ye kadar) ise,  $\pm 60^\circ$  sektörde hedef tespiti yapmıştır. Gromek, Stasiak, Samczynski ve Radecki (2021) yaptıkları çalışmada otomotiv uygulamaları için K-band Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), görüntülemenin konseptini ve ön sonuçlarını sunmaktadır.

Dronlar, özellikle de nano ve piko dron diye tabir edilen küçük boyuttaki dronlar, kapalı yerlerde, binalarda ve tesislerde gizli gözetleme yapmak, istihbarat toplamak ve/veya çeşitli saldırılarda bulunmak için potansiyel taşımaktadır. Literatürde dronların tespiti ve sınıflandırılmasını araştıran mevcut radar uygulamalarının çoğu, daha büyük dronlarla ilgili olduğundan geleneksel drone karşıtı radar sistemleri, uzun menzil ve büyük hedefleri tespit etmek üzere tasarlanmıştır. Ancak mini, mikro ve nano dronların mikro-Doppler imzalarını

tespit etmek ve toplamak K-band FMCW radarları tasarlanmış ve prototiplenmiştir (Zulkifli ve Balleri, 2020; Balleri, 2021). Ek olarak K-bandı uygulamaları, dronların aviyonik ve navigasyon sistemlerinde de kullanılmaktadır. K-bandının sunduğu kısa menzil içerisindeki yüksek hassasiyet ve çözünürlük sivil ve askeri alanlarda örneğin; otonom dağıtım sistemleri, kendi kendine iniş ve kalkış yeteneği, askeri keşif, güdüm sistemleri gibi, geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır.

Düşük frekanslı spektrumlarda yaşanan kaynak kıtlığı ve yüksek verim talebi dikkate alındığında, Düşük Dünya Yörüngesi (LEO) uydu iletişimi uygulamaları geniş band ve MMW spektrumu yönünde gelişmektedir. Düşük dünya yörüngesi uydu iletişimi downlink'in K-bandında ve uplink'in Ka-bandında çalışması öngörülmektedir (Meredith, 2019). 2021 yılında bir çalışmada düşük dünya yörüngesi uydu iletişimi için K/Ka-bandlı düzlemsel çift band paylaşımlı açıkli anten dizisi sunulmuştur (Guo, Hao, Yin, Sun, ve Luo, 2021).

Tarımsal süreçlerde kullanılan yüksek verime sahip uzaktan algılama sistemleri, özellikle görünür/IR dalga boylarına ve P-Band radar uygulamasına dayanmakla birlikte akıllı tarım algılama yöntemlerine daha uzun dalga boyları da dahil edilebilir. Peterson (2021) yapmış olduğu çalışmada minyatür K-Bandı radarı (12,5 cm bandı) ile tarımsal uzaktan algılama yöntemi üzerinde çalışmıştır. Çeşitli mahsuller üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, mahsul yüksekliğini ve yapısını yüksek uzamsal çözünürlükte doğrulamıştır.

## **2.6. 5G ve K-Band Radar Anten Tasarım Teknikleri**

Yeni nesil iletişim sistemlerinin gereksinimlerini karşılama ve radar uygulamalarında kullanılmak üzere çok çeşitli gelecek vadede çalışmalar bulunmaktadır. Literatürde düzlemsel geniş band MMW antenleri (Dadgarpour, Sorkherizi, ve Kishk, 2016), MIMO topolojileri (Ren, Zhao, ve Wu, 2019), düzlemsel faz dizileri (Lü, Quing, Yu, ve Zhang, 2019), Substrate Integrated Waveguides (SIW) antenleri (Al-Amoodi, ve diğerleri, 2020), yeniden yapılandırılabilir antenler (Jilani, Abbas, Esselle, ve Alomainy, 2015) gibi birçok anten konfigürasyonları mevcuttur. Bu çalışmalarda MMW antenlerin kapsama alanları, anten kazancı, donanım uygulamaları, maliyet gibi kritik tasarım yönleri ele alınmaktadır.

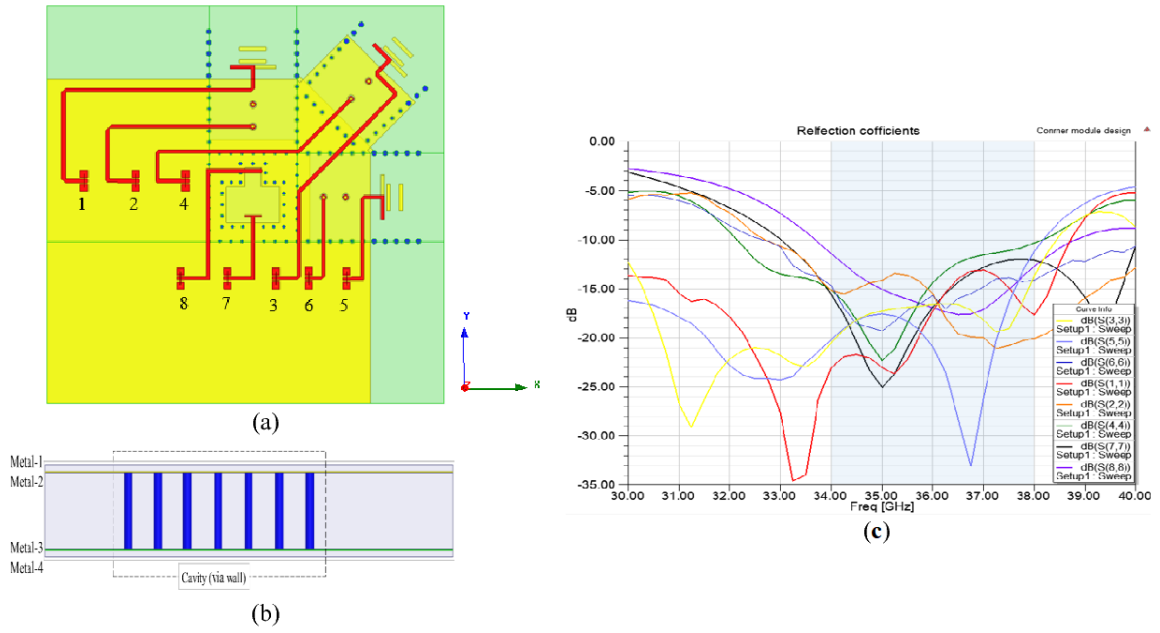
Yüksek veri hızları ve kapasite ihtiyaçlarını karşılamak ayrıca daha fazla frekanslarda tarama yapabilmek için geniş band antenler tercih edilmektedir. Ek olarak, geniş band anten

topolojilerinin MIMO teknolojisine entegre edilmesiyle kapasite ve iletim kalitesinin daha da artırılması mümkündür. MMW spektrumunda çalışan antenlerin küçük boyutları MIMO dağıtımını kolaylaştırmakta ve 5G iletişim sistemlerinde önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir (Jehangir ve Sharawi, 2017).

2017'de yapılan bir çalışmada, 5G iletişim sistemleri için 28 GHz'de çalışmak üzere bir MIMO anten tasarımı sunulmuştur. Bu tasarım aynı zamanda 4G standartları için 1870 ila 2530 MHz frekans bandlarını kapsamaktadır. İki reaktif yükü monopol antenden oluşan bu anten, 28 GHz'de 1,7 GHz bant genişliği, 3,86 dBi tepe kazancı ve %83 verimlilik sağlamaktadır (Hussain R. , Alreshaid, Podilchak, ve Sharawi, 2017). 2016 yılındaki bir başka çalışmada ise 5G sistemleri için 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında çalışan çift bantlı MIMO anten tasarımı sunulmuştur. Sunulan bu tasarımda ise, 28 GHz ve 38 GHz'de sırasıyla 12,07 dB ve 13,46 dB anten kazancı kaydedilmiştir (Ali ve Sebak, 2016).

Hsu, Huang, Lin ve Lin (2017) yaptıkları çalışmada, Yarı Yagi-Uda antenlerin çift polarize konfigürasyonu önerilmiştir. Önerilen çift bağlantı noktalı çift polarize bu antenler 11 dB kazanç ve %80 verim sağlamaktadır. Ayrıca bu tasarım aşamalı tarama yapabilmesi için 1x4 dizi olacak şekilde genişletilebilmektedir. 2017'de yapılan bir başka çalışmada ise 3 GHz'den 30 GHz'e kadar ultra geniş band anten tasarımı sunulmuştur. İki elemanlı MIMO dizisi, minyatür 5G cihazları için tasarlanmıştır. Tasarımda yama geometrisine oluklu yapıların eklenmesiyle yüksek band genişliği elde edilirken, antenin arkasına eklenen yapılar sayesinde de arka loblar azaltılmıştır.

Ta, Choo ve Park (2017) tarafından yapılan bir çalışmada beşinci nesil kablosuz hücrel ağlar için geniş band baskılı dipol anten ve dizileri önerilmiştir. Geniş bir frekans aralığında çalışması hedeflenen tasarım, katlanmış bir mikro şerit hattı ve dikdörtgen bir yuvadan oluşan entegre bir balun tarafından beslenmektedir. Sunulan tasarım 26,5 GHz – 38,2 GHz frekans aralığında 4,5 – 5,8 dBi kazanç sağlamaktadır. Ayrıca bu tasarımın 8 elemanlı lineer dizi oluşturarak bir yayıcı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. 2017'de yapılan bir diğer çalışmada MMW spektrumunda çalışan, model ve polarizasyon çeşitliliği sunan kompakt bir MIMO anten tasarımı önerilmektedir (Lin ve Lin, 2017). Şekil 2.2'de de görüleceği üzere, 4 anten ve 4 direktif desenle birlikte, 8 polarize porttan oluşan bu tasarım bir uçbirim cihazının köşesine konumlandırılacak şekilde tasarlanmıştır. Çok katmanlı PCB üzerinde inşa edilen bu tasarımda her eleman iyi bir izolasyona sahiptir.



Şekil 2.2. Önerilen kompakt MMW MIMO anteni: (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüş; (c) S parametreleri (Lin ve Lin, 2017)

Ahmed ve Khan (2017) yaptıkları çalışmada 28 GHz ve 38 GHz’de çalışan düşük maliyetli dual band anten tasarımı sunmuştur. Önerilen dual band PIFA anteni, kısa devreli bir yama ve modifiye edilmiş bir U-şekilli yuvadan oluşmaktadır. Sunulan bu tasarım 28 ve 38 GHz’de sırasıyla 3,75 dBi ve 5,06 dBi kazanç sunarken, 3,34 GHz ve 1,39 GHz band genişliği sağlamaktadır. Wani, Abegaonkar ve Koul (2018) dört bağlantı noktalı bir MIMO anten önermiştir. Önerilen bu antenin ışınma desenleri, azimut düzleminde desen çeşitliliği göstermektedir ve her bir anten bir dizi metamateryal hücreleri kullanılarak yaklaşık 10 dBi’lik bir kazanç sunmaktadır.

Yüksek verimliliğe sahip bilişsel radyo sistemlerine ve çeşitli radar uygulamalarına yönelik talebin hızla artmasıyla çok işlevli veya yeniden yapılandırılabilir antenlerin uygulanması teşvik edilmektedir. Çoklu erişime sahip iletişim sistemleri genelde aynı kanalları kullandığı için bu sistemler yüksek derecede karışma ve girişim riski ile karşı karşıyadır. Bu gibi durumlarda anten performansını, yeniden yapılandırma teknolojisi ile daha da geliştirmek mümkündür. Antenlerin değişen koşullara kontrollü ve tekrar edilebilir şekilde uyum sağlaması polarizasyon, ışınma deseni ve frekans özelliklerini değiştirmesini sağlar (Balanis, 2008; Yuan ve Chang-Ying, 2016).

2012’de yapılan çalışmada, 20 GHz ile 40 GHz arasında çalışan geniş bantlı, ayrıca 28 GHz ve 38 GHz’i kapsayan çift bantlı çalışma moduna sahip bir MMW anteni önerilmektedir



(Ye, ve diğerleri, 2012). Önerilen tasarım entegre dizi sayesinde yüksek kazanç ve verim sunmaktadır. Anten geniş band modunda 4 dBi kazanç sağlarken çift band modunda 28 GHz ve 38 GHz için sırasıyla 3,5 dBi ve 4,5 dBi kazanç sağlamaktadır. 2013'te 23,86 GHz ile 31,02 GHz frekansları arasında çalışan ve FR4 malzeme üzerine inşa edilen bir tasarım sunulmuştur (Chen ve Zhang, 2013). Bu tasarım mikro ızgara dizisi şeklinde olmakta ve 12,66 dBi kazanç sağlamaktadır. Bu çalışmada yeni nesil iletişim sistemleri için anten çözümü aranırken üretim maliyetlerini de düşürmek amaçlanmıştır. 2015'te yapılan bir başka çalışmada ise, substrate integrated waveguide (SIW) yapısına dayanan 4 elemanlı bir anten dizisi sunulmuştur. Bu yapı 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında çalışmakta ayrıca sırasıyla 11,9 dBi ve 11,2 dBi kazanç sağlamaktadır. Byun, Jung, Dzagbletey ve Kim (2017) tarafından yapılan çalışmada, parazitik yamaların yığılmış bir düzenlemesiyle tasarlanmış 7 elemanlı anten dizisi önerilmektedir. Bu yapıda 28 GHz frekansında 14,71 dBi'lik bir kazanç ve 18,81 dB yan lob seviyesi elde edilmektedir.

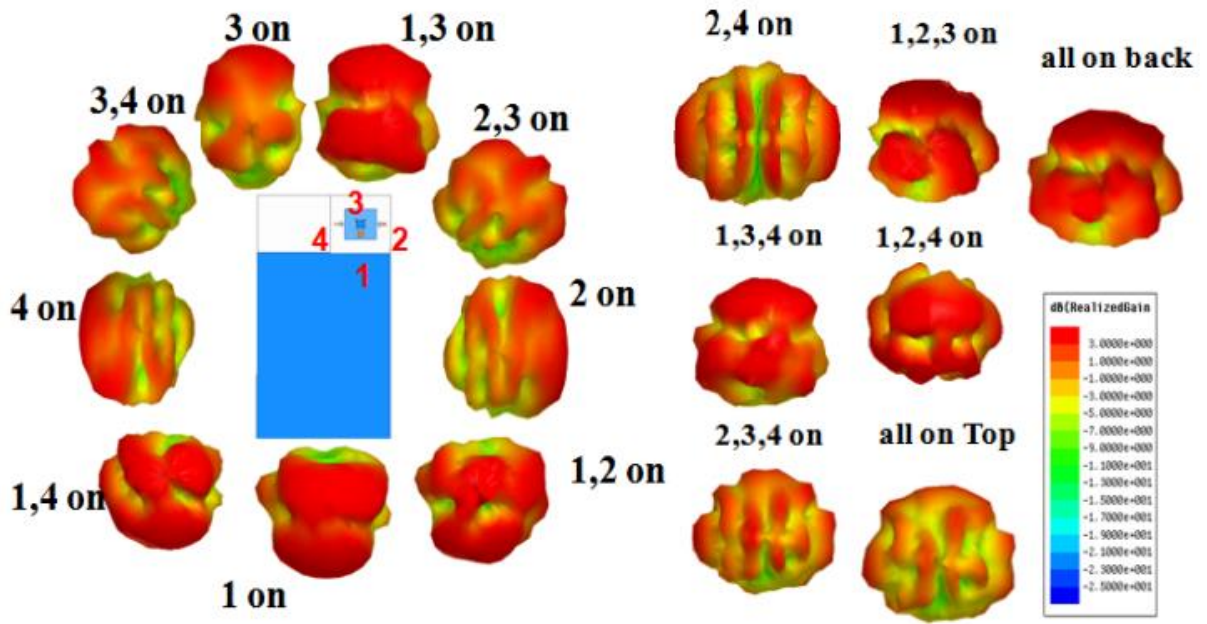
Marzouk, Ahmed ve Shaalan (2019) tarafından yapılan çalışmada, yeni nesil iletişim sistemleri için 28 GHz ve 38 GHz'de rezonansa giren mikroşerit hat beslemeli çift bantlı MIMO anten tasarımı sunulmaktadır (Marzouk, Ahmed, ve Shaalan, 2019). Çalışmada sunulan tasarımlardan ilki, 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında çalışan iç beslemeli ve iki elemandan oluşan dikdörtgen yama antendir. Sunulan diğer tasarım ise, mikroşerit hatlar aracılığıyla oluşturulan simetrik çift bantlı oluklu yama anten şeklindedir. Çift band etkisi ana yama yapıların üzerinde yerleştirilen ters I şekilli yuvalar ile elde edilmektedir. Sunulan tasarımların kompakt yapısı onlara mobil cihazlarda kullanılma yeteneği kazandırmaktadır. 2019 yılında literatüre kazandırılan başka bir çalışmada, MMW spektrumunda çalışan ve 5G ağlarında kullanılmak üzere eliptik bir yuvaya sahip çift bantlı dairesel mikroşerit yama antendir. Sunulan anten 28 GHz ve 45 GHz frekanslarında sırasıyla 1,3 GHz ve 1 GHz band genişliğine sahipken, anten verimliliği de %85,6 ve %95,3'tür. Tasarımın dizi konfigürasyonu maksimum 13,5 dB kazanç sağlarken %98,75 verim sağlamaktadır.

Sharaf, Zaki, Hamad ve Omar (2020) çift bantlı çalışma yeteneği için karmaşık ışıma modellerini birleştirerek yeni bir model ortaya koymuşlardır. 38 GHz ve 60 GHz frekanslarında çalışan bu tasarım iki parçadan oluşmaktadır. İlk parça doğrudan mikroşerit hat tarafından beslenirken ikinci parça, kapasitif ve endüktif kuplaj yolla beslenmektedir. Yapılan sayısal ve deneysel sonuçlarda 38 GHz ve 60 GHz frekanslarında sırasıyla 2 GHz ve 3,2 GHz band genişliği sağladığı görülmüştür. 2020 yılında yapılan çalışmada ağaç şeklinde düzlemsel dört elemandan oluşan bir MIMO anten tasarımı sunulmuştur (Sehrai,

ve diğ erleri, 2020). Sunulan tasarımda geniş band tepkisi elde edebilmek için dört farklı yay biçimi bir araya getirilmiştir. Önerilen bu tasarım 23 GHz ile 40 GHz frekanslarında çalışmaktadır. MIMO anten 28 GHz, 33 GHz ve 38 GHz’de sırasıyla 10,58 dB, 8,87 dB ve 11,45 dB kazanç sağlamaktadır. Ayrıca önerilen MIMO anten için toplam verim MMW spektrumu için %70’in üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.

MMW spektrumu iletişim sistemleri haricinde birçok alanda yüksek çözünürlüğü sebebiyle tercih edilmektedir. Awais, Riaz ve Khan (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, otomotiv radarları ve 5G uygulamaları için ultra geniş band MMW anten tasarımı sunulmuştur. Bu çalışmada endfire anten tasarımı sunulmuş ve yayın yapan elemanı beslemek için ultra geniş bandlı bir iletim hattı tasarlanmıştır. Önerilen anten 16 GHz ile 40 GHz frekansları arasında maksimum 5,5 dBi kazanç sağlarken %85’lik bir verim sunmaktadır. 2019 yılındaki bir başka çalışmada MMW radar sistemleri için geniş alan uygulamalarında kullanılmak üzere ve dar hüzmeye genişliğine sahip bir mikroşerit anten dizisi sunulmaktadır (Jia, Liu, ve Zhang, 2019). Bu çalışmada, 12 x 8 şeklinde oluşturulan anten dizisi otomotiv radarı ve çevre güvenlik radarı uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabilmesi kanıtlanmıştır. El-Sayed, Gad, El-Asser ve Yahya (2020) yılında radar ve 5G uygulamaları için yeni bir oluklu dikdörtgen yama anten tasarımı sunuştur. Bu tasarım, ön tarafta bir mikroşerit hat ve arka tarafta toprak ile beslenen yama antenden oluşmaktadır. 17,07 GHz ile 26,82 GHz frekansları arasında çalışan anten maksimum 7,65 dB kazanç sağlamaktadır. Bamy, Mbango, Konditi ve Mpele (2021) otomotiv radarı, endüstriyel uygulamalar, 5G, bilimsel ve tıbbi uygulamalarda kullanılmak üzere bir MMW anten tasarımı sunmuştur. Bu tasarımda, 23.52 GHz ve 28.39 GHz frekanslarında çalışan çift bandlı Dolly şekilli anten (DBDSA) önerilmiştir. Ayrıca istenilen elektromanyetik performansı elde edebilmek için iki adet F-şekilli parazitik eleman ve bir dikdörtgen yapı kullanılan anten, %80 seviyesinde bir verimliliğe ulaşmıştır.

Literatürde farklı anahtar konfigürasyonları ve ayarlama teknikleri ile çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. 2016’da yayınlanan bir çalışmada 36 GHz ve 40 GHz frekans aralığında çalışan ve ışınma deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur (Chang, ve diğ erleri, 2016). Bu tasarım yöneltilen komutlarla bir ya da daha fazla anteni aktif hale getiren yeniden yapılandırılabilir bir güç bölücü sistemi içermektedir. Şekil 2.3’de de görüleceği üzere dört farklı anten ile on beş farklı ışınma deseni elde edilmiştir.



Şekil 2.3. Deseni yeniden yapılandırılabilir anten farklı ışınma desenleri (Chang, ve diğerleri, 2016)

Wang, Asmak, Xiang ve Lai (2016) tarafından yapılan çalışmada döndürülebilir bir 3D baskılı silindirik polarizör kullanarak polarizasyonu yeniden yapılandırılabilir MMW anteni sunulmaktadır. Birkaç hava ve dielektrik levhadan oluşan silindirik polarizör döndürülerek antenin sol-el (LH) dairesel polarizasyon, sağ-el (RH) dairesel polarizasyon veya lineer polarizasyonda çalışması sağlanmıştır. Sunulan bu tasarım MMW spektrumu için yeniden yapılandırılabilir polarizasyon, geniş band, düşük maliyet ve yüksek kazanç gibi avantajlar sunmaktadır. 2016'da yapılan bir başka çalışmada 28 GHz'de ışın yönlendirme özelliğine sahip pratik bir yaklaşım sunulmuştur (Xia, Lei, Meng, ve Yang, 2016). Aşamalı dizi şeklinde dört özdeş yarı Yagi antenlerden oluşan bu tasarım cep telefonu kenar bölgeleri boyunca yerleştirilebilmektedir. İstenilen kapsama yönü beslemeyi sağlayan alt dizilerin kontrol edilmesiyle değiştirilmektedir. 28 GHz'de %12,8'lik band genişliğine sahip bu tasarımda 10 dBi kazanç elde edilmiştir.

Samiullah, Thakur ve Ali (2018) yaptıkları çalışmada 5G bandı için oldukça kompakt, frekansı yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunmuşlardır. Bu tasarımda metalik bir anahtar yardımıyla antenin 25,4 – 34,2 GHz ve 29,5 – 36,3 GHz frekanslarında geçiş yapacak şekilde çalışması planlanmıştır. 2018 yılındaki bir başka çalışmada ise, sekiz adet ayrı beslemeli yuva anteni kullanılarak frekans yeniden yapılandırılabilen bir tasarım sunulmuştur (Ojaroudi, ve diğerleri, 2018). Sunulan bu tasarımda yeniden

yapılandırılabilirlik işlevi, her bir T-şekilli yarı anten elemanı boyunca bir çift diyotun kutuplanmasıyla elde edilmiştir. 3D kapsama alanı sağlayan bu tasarım 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır.



### 3. DESEN YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN

#### 3.1. Giriş

Anten yeniden yapılandırılabilirliği, son zamanlarda araştırmacılar tarafından oldukça ilgi görmüştür. Yeniden yapılandırılabilir antenler üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar; frekans yeniden yapılandırılabilir antenler, model yeniden yapılandırılabilir antenler ve polarizasyon yeniden yapılandırılabilir antenlerdir. Her üç tür anteninde ticari ve askeri kullanım için birçok uygulaması bulunmaktadır. Bu bölümde radar ve kablosuz iletişim sistemleri için büyük önem arz eden ışına deseni yeniden yapılandırılabilir antenlere odaklanılmaktadır.

Işıma deseni yeniden yapılandırılabilir antenler, kablosuz iletişim sistemlerinin farklı yayılma koşulları altında kendini uyarlamasına olanak sağlarken, daha iyi iletim, daha yüksek yayılma verimliliği ve daha düşük parazit elde edilmesini sağlamaktadır. Faz dizi antenler ve yansıyan dizi anten sistemleri oldukça yüksek model yönlendirmesi sağlamanın yanında, nispeten büyük hacimli ve yüksek maliyetli bileşenler gerektirmektedir. Bu sebeple daha çok dar hüzmeye genişliği ve yüksek menzil gerektiren askeri uygulamalarda tercih edilmektedir. Düşük maliyet, düşük hassasiyet ve düşük profil gerektiren uygulamalarda ise deseni yeniden yapılandırılabilir antenler tercih edilebilir.

Bir anten yapısı üzerindeki manyetik ve elektrik akımlarının kontrol edilmesi, yayılan radyasyonun uzaysal dağılımını doğrudan etkilemektedir. Besleme akımları ve ışına deseni arasındaki bu ilişki, istenilen çalışma frekansı içerisinde modeli yeniden yapılandırmayı mümkün kılmaktadır. Literatürde önerilmiş olan birçok deseni yeniden yapılandırılabilir anten ve anten dizileri bulunmaktadır. Bu antenler göz önüne alındığında PIN diyot, varaktör, RF-MEMS gibi anahtarlama sistemleri kullanılarak ışına deseni kontrol edilmektedir. Dağınık bir iletişim sisteminde, izleme veya tarama yapılması istenilen ortamlarda, ana ışın hüzmelerinin artan anten kazancıyla istenilen yöne doğru yönlendiren ve diğer istenmeyen yönlerdeki ışın hüzmelerini bastıran antenler gerekmektedir. Bu tarz anten sistemleri, çok yönlü girişimi azaltmakla kalmayıp spektral verimliliği de arttırmaktadır. Ek olarak deseni yeniden yapılandırılabilir antenler sundukları uyarlanabilir özellikleri ile iletişim bağlantı performansını artırır ve daha yüksek veri iletim hızları sağlayabilir (Chen, Row, ve Wong, 2007; Qin, Guo, Weily, ve Liang, 2012).

Birçok deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı, çeşitli kombinasyonlarda besleme ağı ve parazitik yapı kullanılmaktadır. Zhu, Cheung ve Yuk (2015) yapmış oldukları çalışmada, metayüzey kullanarak tasarlanmış bir deseni yeniden yapılandırılabilir anten önermişlerdir. Bu tasarım, 70 mm çapında düzlemsel bir dairesel yama antenin üzerine yerleştirilmiş düzlemsel yarı dairesel bir metayüzeyden oluşmaktadır. Metayüzeyin anten merkezi etrafında döndürülmesiyle ışın sürekli olarak yönlendirilmektedir. Yapılan ölçümlerde antenin 5,4 – 5,6 GHz band genişliğinde 7,2 dBi'lik kazançta sahip olduğu kaydedilmiştir. Bir başka çalışmada ise mikrodalga erişim bandı (WiMAX) için deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı önerilmiştir. Bu tasarımda dört adet PIN diyot kullanılmıştır. Bu dört PIN diyotun durumları kontrol edilerek ışın deseni yeniden yapılandırılmış ve azimut düzlemlerinde  $90^\circ$ , yükseklik düzleminde  $30^\circ$  sapma sağlanmıştır. Ayrıca önerilen tasarım kompakt bir yapıya sahip olmakla birlikte, 8 dBi değerinde kazanç sağlamaktadır (Shi ve Ding, 2015).

2016 yılında geniş band milimetre dalga mobil iletişim uygulamaları için yüksek kazançlı deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Bu çalışmada, altı elementten oluşan dört geniş kenarlı mikroşerit anten dizisine dayanan iki kompakt yapı sunulmuştur. Sunulan tasarımlardan ilki 20 dBi kazanç sağlarken, ikinci tasarım ise 15 dBi kazanç sağlamaktadır (Santos, Penchel, Bontempo, ve Cerqueira, 2016). Bir başka çalışmada ise iç mekân uygulamaları ve bazı dış mekân senaryoları için milimetre dalga ışın deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Bu çalışmada, iki yeni konsept sunulmaktadır. Bunlardan ilki; uygun maliyet geniş band aralığı ve yüksek kazançlı uyarlanabilir anten dizisi oluşturmak için modüler anten dizisine dayanmaktadır. Diğer tasarım ise, lens dizi anten teknolojisini kullanmaktadır (Maltsev, Sadri, Pudeyev, ve Bolotin, 2016).

2017 yılında milimetre dalga MIMO sistemleri için deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımda lens tabanlı antenler kullanılarak bir dizi oluşturulmuş ve ışın seçim ağı ile her bir anten ışını istenilen yönde yöneltmiştir (Almasi, Mehrpouyan, Vakilian, Behdad, ve Jafarkhani, 2017). Chen ve Wong (2017) yaptıkları çalışmada ışın deseni yeniden yapılandırma yeteneği elde etmek üzere mod yeniden yapılandırılabilir dielektrik rezonatör anten (DRA) tasarımı sunmuşlardır. Sunulan tasarım iki bölgeden oluşmaktadır. İlk bölge K9 camdam üretilmiş katı bir silindirdir, ikinci bölge ise dielektrik sıvı ile doldurulmuştur. Dielektrik sıvının kontrol edilmesiyle ışın hüzmesi yeniden yapılandırılmaktadır.

2018 yılında beşinci nesil hücresel ağlar için frekans ve desen yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımda yeniden yapılandırılabilir anten yapısı MIMO mimarisine entegre edilmiştir. Sunulan tasarımda RF zinciri kullanılarak aynı anda birden fazla radyasyon modeli desteklenmektedir (Mehrpooyan, Almasi, Vakilian, Behdad, ve Jafarkhani, 2018). 2018 yılındaki bir başka çalışmada ise bir yönlü iki elemanlı mm dalga dipol anten dizisi ile ışınma deseni yeniden yapılandırılabilir anten yapısı sunulmaktadır. Bu çalışmada yeniden yapılandırılma yeteneği  $90^\circ$  entegre dalga kılavuzu (SIW) kuplörü kullanılarak elde edilmektedir. Birbirine paralel iki dipol anten,  $90^\circ$  kuplörün iki girişinden sırasıyla uyarıldığında birbirine zıt iki desen elde edilmektedir. 45,5 – 49,5 GHz frekans bandında çalışan bu tasarımda 0,7 – 1,2 dBi arasında kazanç elde edilmiştir (Gan, Tu, ve Xie, 2018).

2019 yılındaki başka bir çalışmada, ışınma modeli yeniden yapılandırılabilir bir dielektrik rezonatör anten tasarımı literatüre kazandırılmıştır. Bu tasarımda azimut düzleminde yeniden yapılandırma özelliği anten elemanı çevresine yerleştirilen simetrik elektromanyetik band aralığı (EBG) sektörü ile sağlanmaktadır. Her sektör 26 adet mantar benzeri dairesel hücreden oluşmaktadır. Her bir EBG sektöründeki yollar gruplandırılmış ve mümkün oldukça az sayıda PIN diyot kullanılmak istenmiştir. Sonuçta oluşturulan tasarım ile  $360^\circ$  ışınma deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı elde edilmiştir (Mabrouk, Al-Hasan, Nedil, Denidni, ve Sebak, 2019).

Shereen, Khattak ve Al-Hasan (2020) yaptıkları çalışmada beşinci nesil iletişim sistemleri için birbirini etkilemeden frekansı ve ışınma deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunmuşlardır. Bu tasarım 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında çalışan iki yama antenden oluşmaktadır. 18 adet PIN diyot kullanılan tasarımda frekans yapılandırması iki adet PIN diyot ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada ışın huzmesi  $45^\circ$  kayma açısı ile  $0^\circ$ 'den  $180^\circ$ 'ye değiştirilmektedir. 2020 yılında gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise, dikdörtgen bir yama anten, dikdörtgen bir yapı ile çevrelenmiştir. Yama anten onu çevreleyen yapıya iki PIN diyot ile bağlanmıştır. PIN diyotların "Açık/Kapalı" durumlarına bağlı olarak üç çeşit ışınma deseni elde edilmiştir. 38 GHz frekans bandında rezonansa giren anten tasarımı 5,4 ile 6,4 dBi arasında kazanç sağlamaktadır (Iqbal ve Shereen, 2020).

2021 yılında beşinci nesil iletişimi ve nesnelerin interneti uygulamaları için ucuz ve verimli bir anten tasarımı sunulmuştur. Bu tasarım bir dielektrik malzemenin her iki yüzeyine basılmış balun yapısı ve dipol antenin önüne yerleştirilmiş parazitik yapıdan oluşmaktadır.

Tasarımda parazitik yapı üzerindeki bağlantıları değiştiren iki diyot kontrol edilerek azimut düzleminde ışın yönlendirilmesi yapılmaktadır. 26 – 30 GHz frekans aralığında 7,96 dBi kazanç sağlayan antende diyotların yerleri genetik algoritma kullanılarak belirlenmiştir (Tang, Zhang, Han, Chiu, ve Murch, 2021). Bir başka çalışmada ise PIN diyot eşdeğer devrelerin milimetre dalga sistemleri için doğru bir şekilde çıkarılmasına dayalı bir Ka-band mikroşerit anten tasarımı rapor edilmiştir. Bu tasarım iki adet PIN diyot, iki adet interdigital kapasitör, L şekilli bir yuva ve öngerilim ağlarından oluşmaktadır. Sonuç olarak 30 GHz civarında yüksek performans ve  $-60^\circ$  ile  $60^\circ$  arasında ışın yönlendirmesi sağlanırken, 5 dBi kazanç elde edilmiştir.

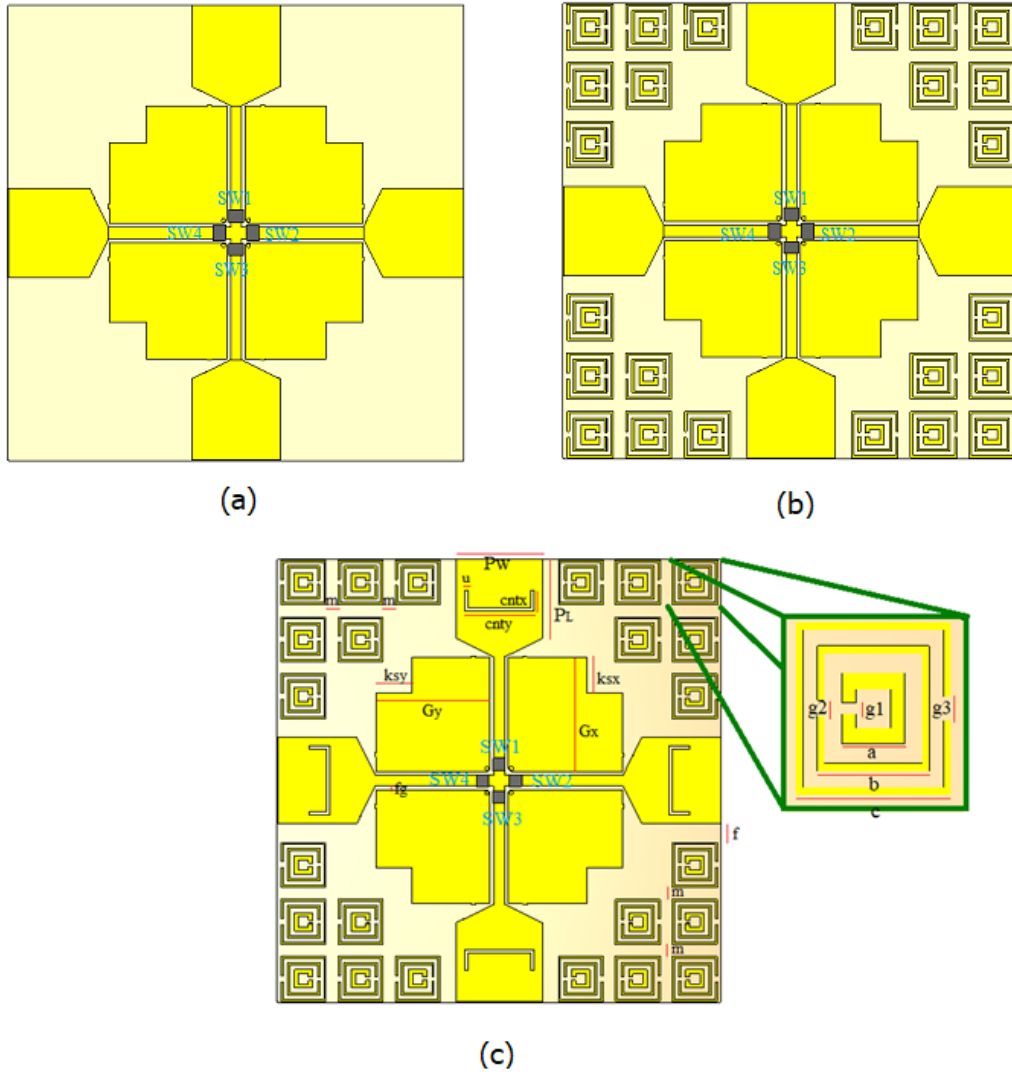
### **3.2. 19,6 - 28 GHz Desen Yeniden Yapılandırılabilir Anten**

#### **3.2.1. Anten tasarımı ve üretimi**

Bu bölümde kompakt, 5G frekanslarında çalışabilen yüksek kazançlı ve düşük maliyetli ışına deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmaktadır. Bu amaçlara dayanarak önerilen anten modeli dielektrik geçirgenliği 4,3, tanjant kaybı 0,025 olan bir FR-4 malzeme üzerine inşa edilmiştir. Önerilen anten temelde dört özdeş U çentikli monopollü antenden ve tüm yapıyı çevreleyen metamalzemedен oluşmaktadır. Tasarım merkezinde bulunan dört PIN diyotun anahtarlanması ile ışına modelinde çeşitlilik elde edilmektedir. Tasarım sürecinde, istenilen çalışma frekanslarının, anten kazancının ve yönlendirmenin elde edilmesi için nihai yeniden yapılandırılabilir anten üç aşamada tasarlanmıştır. Bu tasarım evreleri “Model - a”, “Model – b” ve “Model – c” Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Model-b’de metamalzemelerin etkisi incelenirken Model-c’de ise U slotun etkisi incelenmiştir. Nihai tasarımın tamamı  $10,87 \times 10,87 \times 0,8$  mm<sup>3</sup> boyutlarındadır. Çizelge 3.1’de anten parametreleri detaylı olarak gösterilmektedir.

Her bir besleme hattı üzerinde bulunan PIN diyotların keyfi kombinasyonlarla anahtarlanması sonucu model çeşitliliği elde edilmektedir. İlgili anahtar kapalıyken besleme hattı girişi açık devre olur ve empedans eşleşmesi üzerindeki etkisi azaltılır. Dört antenin her biri farklı yönlerde (+x, -x, +y, -y eksenleri boyunca) yönlendirilmiştir. Monopollü yapıların etrafında bulunan metamalzeme yapıları sahip oldukları elektromanyetik özellikler sayesinde sistemde kazancın artmasına neden olmaktadır.





Şekil 3.1. Desen yeniden yapılandırılabilir anten tasarım aşamaları (a) Model-a, (b) Model-b, (c) Model-c

Çizelge 3.1. Desen yeniden yapılandırılabilir anten parametreleri

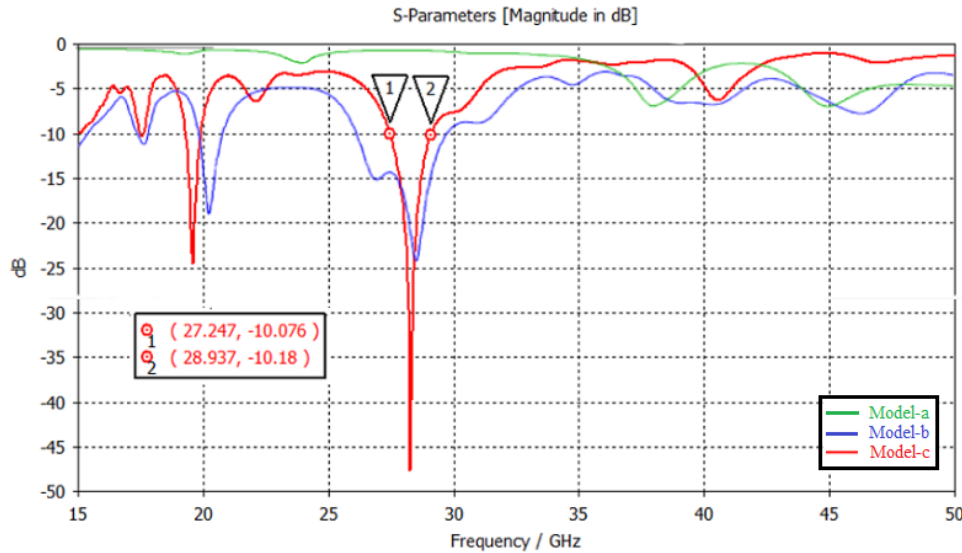
Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
<b>Pw</b>	2,13	<b>PL</b>	1,95	<b>ksx</b>	0,88
<b>Gy</b>	2,78	<b>Gx</b>	2,78	<b>ksy</b>	0,88
<b>u</b>	0,1	<b>cntx</b>	0,51	<b>cnty</b>	1,71
<b>f</b>	0,47	<b>m</b>	0,3	<b>fg</b>	0,1
<b>g1</b>	0,1	<b>g2</b>	0,1	<b>g3</b>	0,15
<b>a</b>	0,45	<b>b</b>	0,8	<b>c</b>	1,1

Sunulan tasarımdaki dörtlü sistemi, dört farklı modda çalıştırılabilmektedir. Mod 1’de sadece bir anten uyarılmaktadır. Bu sebeple ışınma deseni bireysel anten yapıları tarafından oluşturulmaktadır. Mod 2’de iki anten aynı anda uyarılmaktadır ve altı olası kombinasyonu

bulunmaktadır. Mod 3'te dört antenden üçü seçilir ve son olarak Mod 4'te dört antenin tümü kullanılmaktadır. Mod 3 ve Mod 4 ortaya çıkan desenler açısından daha az yönlendiricidir.

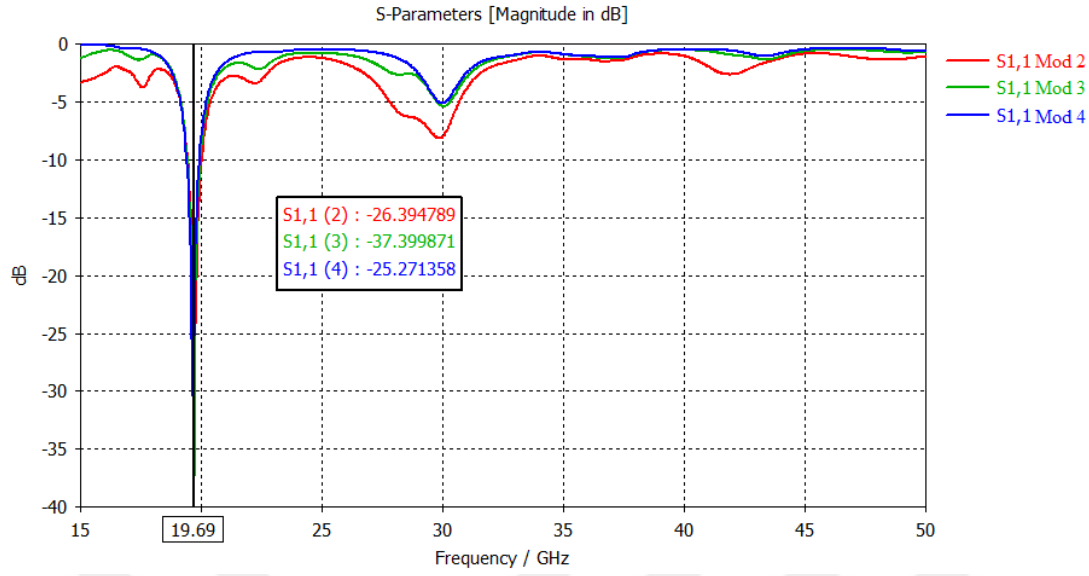
### 3.2.2. Sonuçlar ve tartışma

CWP besleme hatları arasındaki boşluk ve monopul antenin GND ile arasındaki açı gibi parametreler  $S_{11}$  profilini optimize etmek için oldukça önemlidir. Önerilen antenin Mod 1'deki çalışması, başka bir deyişle monopul antenin bireysel olarak uyarılması sonucu elde edilen  $S_{11}$  parametresi üç tasarım modeli için Şekil 3.2'de karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. Buna göre yeniden yapılandırılabilir Model - c antenin Mod 1'deki  $S_{11}$  parametresi 28 GHz'de -47,66 dB'dir.



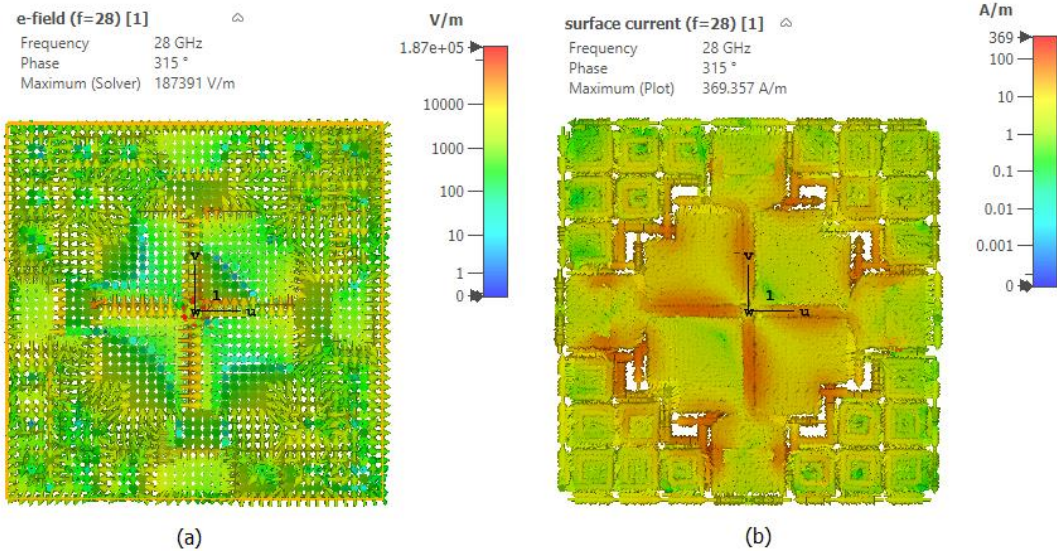
Şekil 3.2. Desen yeniden yapılandırılabilir anten Mod 1 çalışma durumu  $S_{11}$  parametresi

Mod 2, Mod 3 ve Mod 4 çalışma durumlarına ait  $S_{11}$  parametreleri ise Şekil 3.3 gösterilmiştir. Mod 2, Mod 3 ve Mod 4'te birden fazla anten aynı anda beslenmekte ve rezonansa girmektedir. Bu anten elemanlarının aynı anda devreye alınması genel geometriyi değiştirmekte ve yüzey akımlarını etkilemektedir. Bu sebeple, antenin çalışma frekansında bir kayma yaşanmıştır. Mod 1 hariç tüm çalışma modlarında merkez frekans 28 GHz'den 19,7 GHz'ye kaymıştır. Bu durum, sunulan tasarım 5G iletişim sistemlerinin yanı sıra K-Bandı uygulamaları için ışınma deseni ve frekansı yeniden yapılandırılabilir anten özelliği taşımaktadır.



Şekil 3.3. Desen yeniden yapılandırılabilir anten Mod 2, Mod 3, Mod 4 çalışma durumları  $S_{11}$  parametreleri

Şekil 3.4 (a)'da elektrik alan dağılımı gösterilirken Şekil 3.4 (b)'de ise yüzey akımları dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılımlar Mod1 çalışma durumunda 28 GHz rezonans frekansında elde edilmiştir. Elektrik alan dağılımları 0-187391 V/m aralığında ayarlanmıştır. Yüzey akım dağılımı ise 0-369,35 A/m aralığında elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Desen yeniden yapılandırılabilir anten yapına ait (a) Elektrik alan dağılımı, (b) Yüzey akım dağılımı

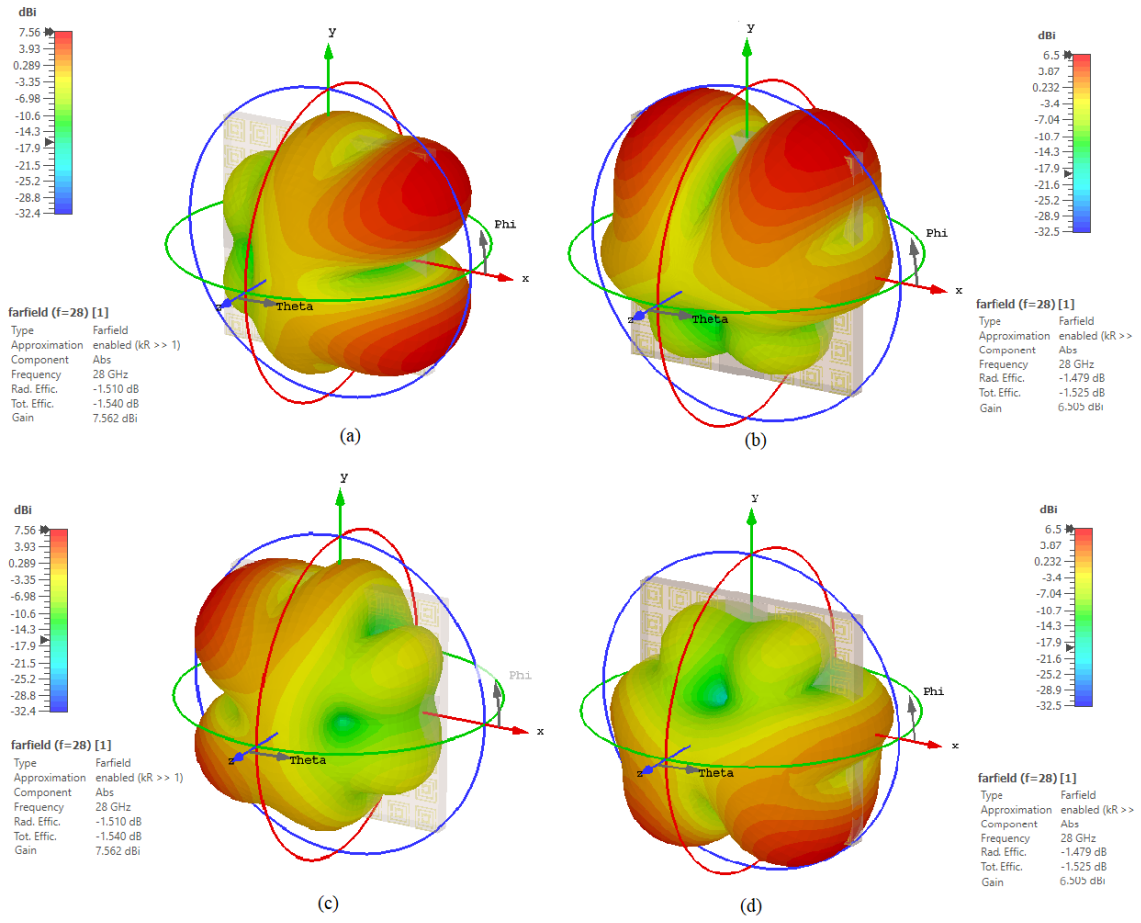
Tüm çalışma modları için anten kazançları incelenmiştir. Çizelge 3.2'de çalışma modları ve bazı keyfi anahtar kombinasyonlarındaki kazançlar gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Çalışma modları ve bazı keyfi anahtar kombinasyonlarındaki kazançlar

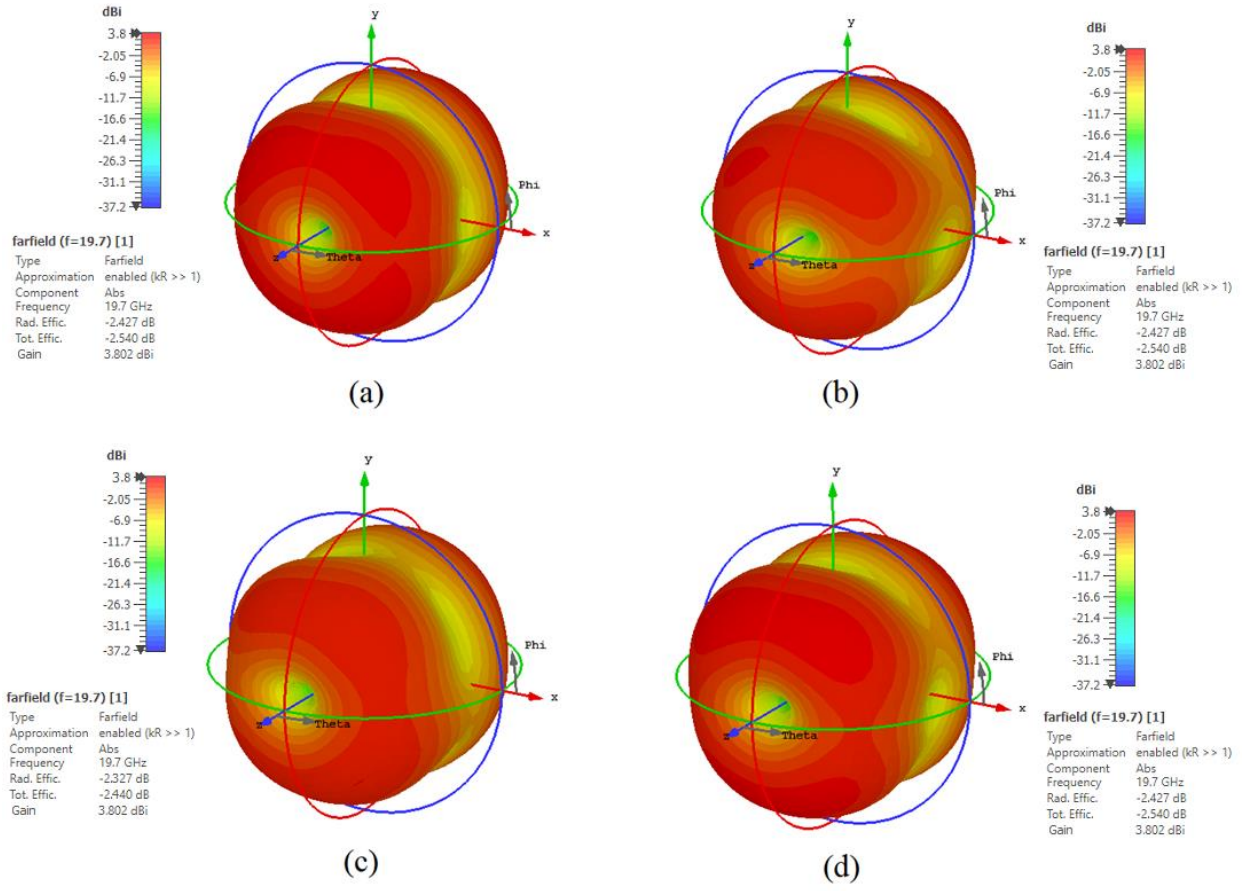
Çalışma Modu	Anahtar				Frekans (GHz)	Kazanç (dB)
	SW1	SW2	SW3	SW4		
Mod 1	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	28	6,50
	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	28	7,56
	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	28	6,50
	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	28	7,56
Mod 2	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	19,7	3,80
	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	19,7	3,80
	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	19,7	3,80
	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	19,7	3,80
Mod 3	Açık	Kapalı	Açık	Açık	19,7	3,30
	Kapalı	Açık	Açık	Açık	19,7	3,30
	Açık	Açık	Kapalı	Açık	19,7	4,02
Mod 4	Açık	Açık	Açık	Açık	19,7	3,77

Mod 1 çalışma durumunda anahtarlar sırayla uyarıldığında aynı frekansında rezonansa girmektedir. Buna karşılık y eksenini üzerindeki anahtarlar uyarıldığında daha fazla kazanç elde edilmiştir. Mod 2 çalışma durumunda tüm kombinasyonlarda anten aynı frekansta rezonansa girmektedir ve aynı kazanç elde edilmiştir. Mod 3 çalışma durumunda tüm kombinasyonlarda anten aynı frekansta rezonansa girmesine karşın anten kazancında farklılıklar görülmüştür. Sonuç olarak antenin Mod 1’de çalıştırılması daha yüksek kazanç sağlamaktadır.

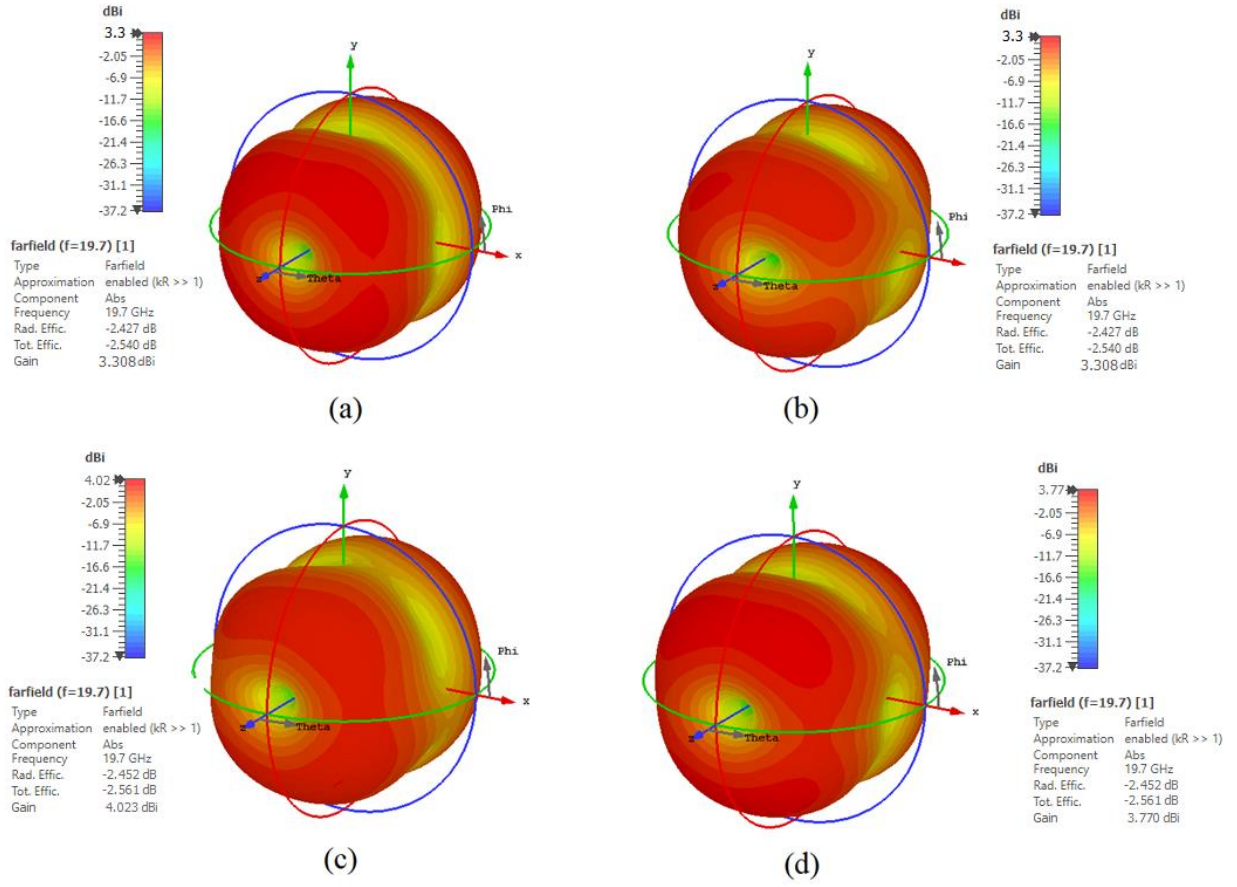
Işıma deseni bir anten için önemli parametrelerden bir tanesidir. Bu çalışmada sunulan yeniden yapılandırılabilir anten tasarımının Mod 1 çalışma durumundaki 3D ışımada desenleri Şekil 3.4’de, Mod 2 çalışma durumundaki 3D ışımada desenleri Şekil 3.5’de son olarak Mod 3 ve Mod 4 çalışma durumundaki 3D ışımada desenleri Şekil 3.6’de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.7’de, Şekil 3.8’de ve Şekil 3.9’da da tasarıma ait farklı çalışma modlarındaki 1D ışımada desenleri gösterilmektedir. Bu sistem gelecekte milimetre dalga 5G iletişim sistemlerinde ve K-Band radar sistemlerinde küçük hücreli çoklu çalışma için çok ışınlı bir anten dizisinde yer alabilir.



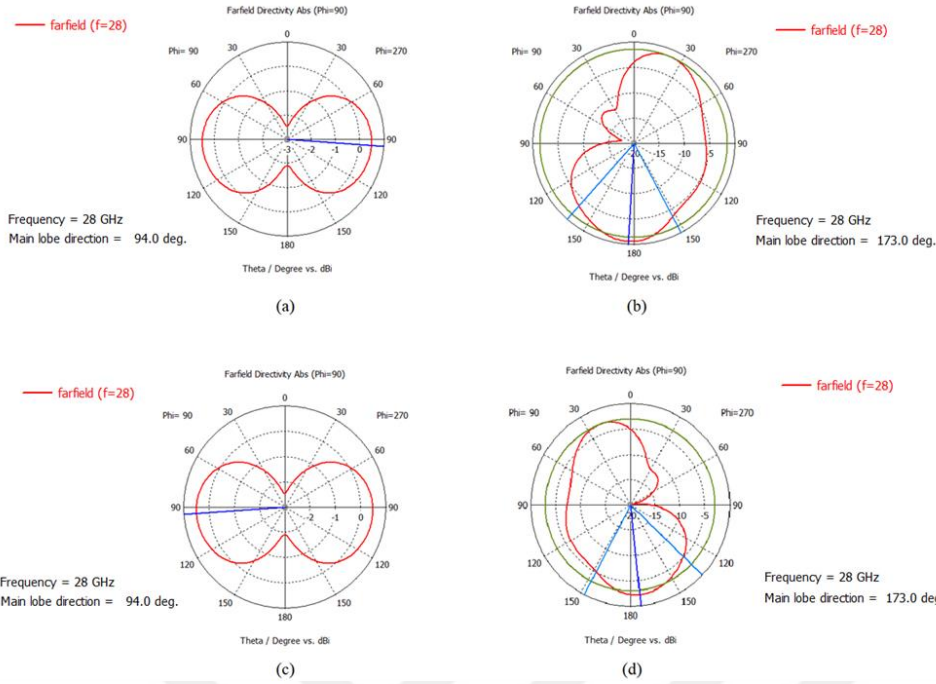
Şekil 3.5. Mod 1 çalışma durumundaki 3D ışıma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Kapalı, SW3: Kapalı, SW4: Açık (b) SW1: Kapalı, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Kapalı (c) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Kapalı (d) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Kapalı, SW4: Kapalı



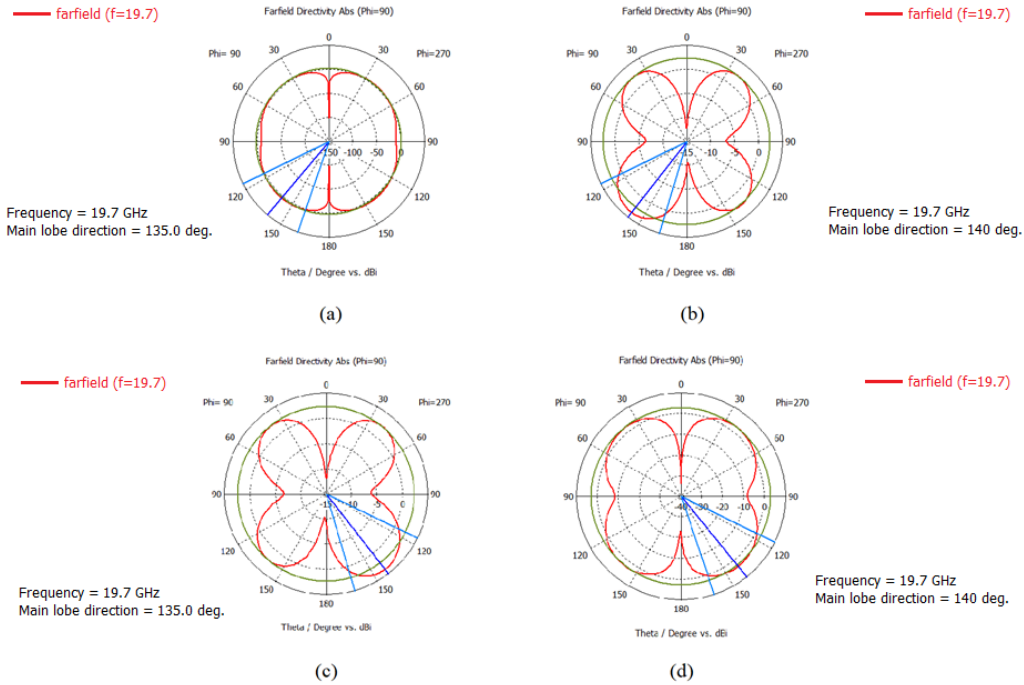
Şekil 3.6. Mod 2 çalışma durumundaki 3D ışınma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Açık (b) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Kapalı (c) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Kapalı (d) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Kapalı



Şekil 3.7. Mod 3 ve Mod 4 çalışma durumundaki 3D ışınma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Açık (b) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Açık (c) SW1: Açık, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Açık (d) Tüm anahtarlar Açık

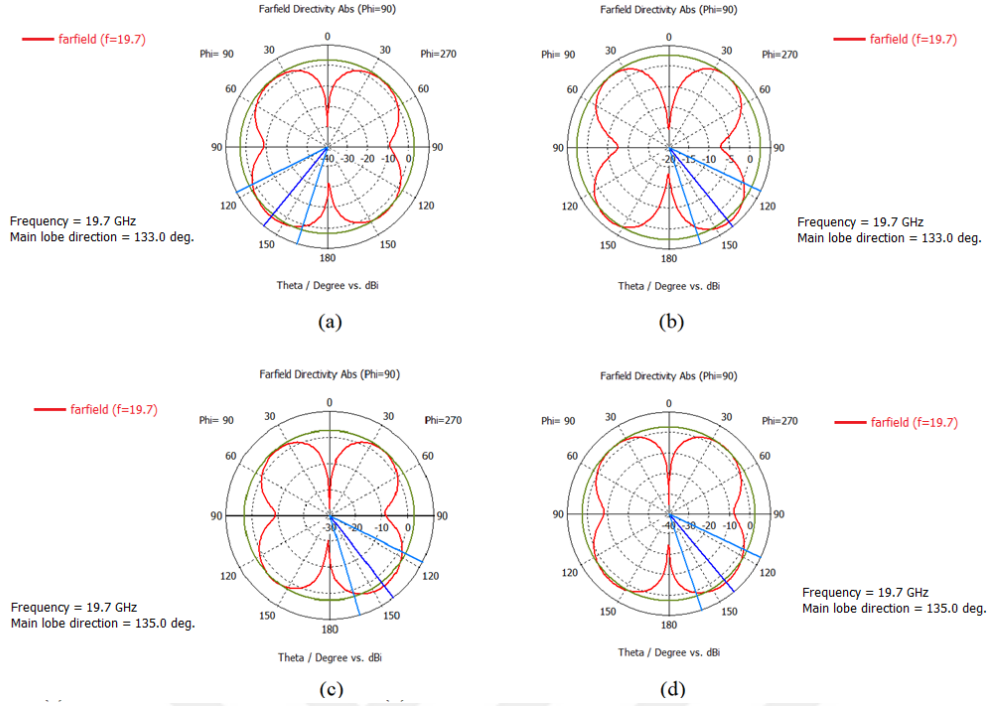


Şekil 3.8. Mod 1 çalışma durumundaki 1D ışıma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Kapalı, SW3: Kapalı, SW4: Açık (b) SW1: Kapalı, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Kapalı (c) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Kapalı (d) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Kapalı, SW4: Kapalı



Şekil 3.9. Mod 2 çalışma durumundaki 1D ışıma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Açık (b) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Kapalı (c) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Kapalı (d) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Kapalı





Şekil 3.10. Mod 3 ve Mod 4 çalışma durumundaki 3D ışıma desenleri (a) SW1: Kapalı, SW2: Açık, SW3: Açık, SW4: Açık (b) SW1: Açık, SW2: Kapalı, SW3: Açık, SW4: Açık (c) SW1: Açık, SW2: Açık, SW3: Kapalı, SW4: Açık (d) Tüm anahtarlar Açık

## 4. FREKANS YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN

### 4.1. Giriş

Yeni nesil iletişim sistemlerinin, MMW spektrumun sahip olduğu etkili band genişliğini kullanarak, yüksek veri hızı ve geniş sistem kapasitesi ile ultra hızlı 5G alt yapısı sunması beklenmektedir (Ofcom, 2017). Bu alt yapının oluşturulması için çeşitli AR-GE platformları tarafından vurgulanan K/Ka-Bandına ulaşmak üzere verimli anten ön uçlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Rappaport, ve diğerleri, 2013). Sistem kapasitesini arttırmak için, geniş band antenler her zaman bir seçenek olmuştur. Ancak büyük band genişliği elde edilirken bazı durumlarda anten verimliliğinde azalma yaşanmaktadır. Ek olarak, frekans spektrumunun verimli kullanılması açısından, yeniden yapılandırılabilir antenler geniş band antenlere nazaran daha faydalıdır. Frekans yeniden yapılandırılabilir antenler, geniş band antenler gibi aynı anda tüm bandlarda çalışma zorunluluğu olmadığından, spektrum daha verimli kullanılır.

Yeniden yapılandırılabilir antenlerin, istenilen çalışma frekansında rezonans sağlayabilmesi için farklı teknolojiler kullanılarak anten geometrisinde değişiklikler yapılmaktadır. Bu durum bilişsel sistemlerde, yeni nesil iletişim ağlarının genel etkili band genişliği ve ağ kapasitesini arttırmak üzere veri çıkışının artırılmasında oldukça etkilidir (Mansoul, Ghanem, Hamid, ve Trabelsi, 2014). Literatürde, yeniden yapılandırılabilir antenlerde anahtarlama yöntemi olarak farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda düzlemsel yama antenlerinde PIN diyotlar, MEMS, FET varaktör ve optik anahtar kullanılmıştır (Romputtal ve Phongcharoenpanich, 2017; Rajagopalan, Kovitz, ve Rahmat-Samii, 2014; Pringle, ve diğerleri, 2004; Horestani, Shaterian, Naqui, Martin, ve Fumeaux, 2016). Uygun anahtarlama yöntemi seçilirken ekleme kaybı, güvenilirlik, izolasyon, doğrusallık ve maliyet gibi etkenler göz önüne alınmaktadır. FET'ler ve PIN diyotlar iyi yapılandırılmıştır ve ticari olarak erişilebilir durumdadırlar. PIN diyotlar düşük ekleme kaybı ve yüksek frekanslarda yüksek izolasyon sağlamakla birlikte yüksek güçlere de çıkabilmektedir.

MIMO antenler, 4G ağlarında sağlamış olduğu başarıdan sonra yeni nesil iletişim sistemleri ağlarında da umut verici bir hal almıştır. MIMO anten dizileri eşzamanlı sinyal çıkışı sağlayan ve istenilen iletişim düzeyini destekleyen bağımsız iletişim kanallarıdır (Prather, ve diğerleri, 2017). Frekans yeniden yapılandırılabilir antenlerin MIMO sistemlerine entegre

edilmesiyle frekans seçiminin yanı sıra sinyal çıkışında da uyarlanabilirlik sağlamaktadır. Bu durum spektrumun verimli kullanılması açısından son derece önemlidir.

Bu bölümde 5G ve K-Band radar uygulamalarında kullanılmak üzere 6 farklı frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmaktadır. Sunulan bu tasarımların, üretimi, sayısal ve deneysel değerlendirmeleri detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

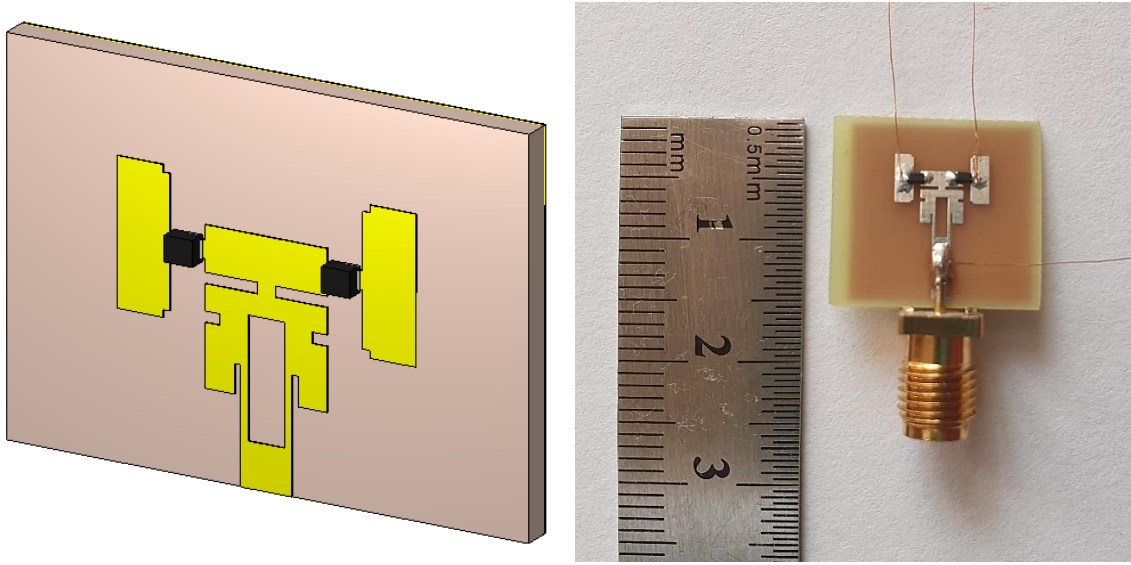
## 4.2. 18 GHz ve 28/38 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Anten

### 4.2.1. Anten tasarımı ve üretimi

Bu bölümde, 5G uygulamaları için FCC ve Ofcom standartlarını karşılayacak şekilde 28/38 GHz frekanslarında ayrıca, K-Band radar uygulamaları için 18 GHz frekans bandında çalışabilen bir frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımda anten geometrisinin değiştirilmesi için PIN diyot kullanılmıştır. Anten, modifiye edilmiş dikdörtgen yama antene benzer yapı ve her iki yanında optimize edilmiş iki eklentiden oluşmaktadır. Her iki yanda bulunan eklenti yüksek izolasyona sahip bir PIN diyot ile anahtarlanmaktadır. Eklentilerin anten yapısından ayrıldığı durumlarda, 28 GHz ve 38 GHz bandında çalışan anten yapısı, eklentiler dahil edildiği takdirde 18 GHz bandı da çalışmaktadır.

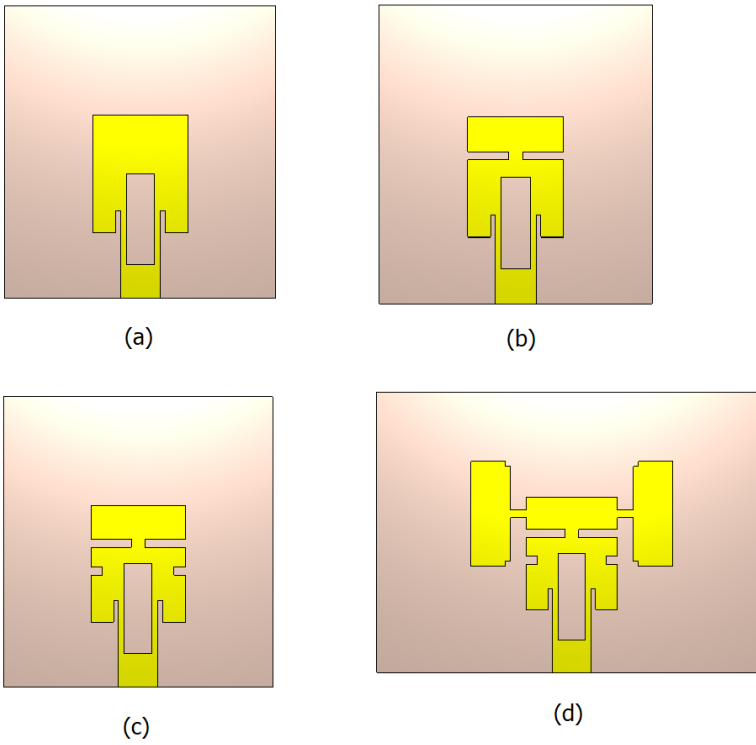
PIN diyotların çalışması için diyot terminallerine Bias gerilimi uygulanmıştır. PIN diyotu “KAPALI” durumda RF akımının geçmesini engeller ve ideal durumlarda  $S_{21}$  parametresi yüksek izolasyon sağlandığını gösterirken,  $S_{11}$  parametresinin ise 0 dB olması beklenir. Öte yandan, PIN diyotun “AÇIK” durumda kısa devre gibi çalışması ve maksimum akımın geçmesine izin vermesi beklenir. İdeal durumda, daha iyi bir empedans uyumu için  $S_{11}$  parametresi düşük olmalı ve %100 güç aktarımı için  $S_{21}$  parametresi 0 dB olmalıdır. Ancak pratik kullanımlarda yaşanan kayıplardan dolayı tam güç aktarımı veya yansıma sağlanamamaktadır.

Önerilen geometri, 35  $\mu\text{m}$  bakır kalınlığına ve 0,8 mm substrate kalınlığına sahip, çift taraflı FR-4 ( $\epsilon_r = 4.3$ ) malzeme üzerine inşa edilmiştir. 3,20 mm uzunluğa ve 1,46 mm genişliğe sahip besleme hattı 50  $\Omega$  empedansa uyum sağlamak üzere tasarlanmıştır. Şekil 4.1 (a)’da anten geometrisi ve PIN diyotların yerleşim düzenleri Şekil 4.1 (b)’de ise üretilen anten prototipi gösterilmiştir.

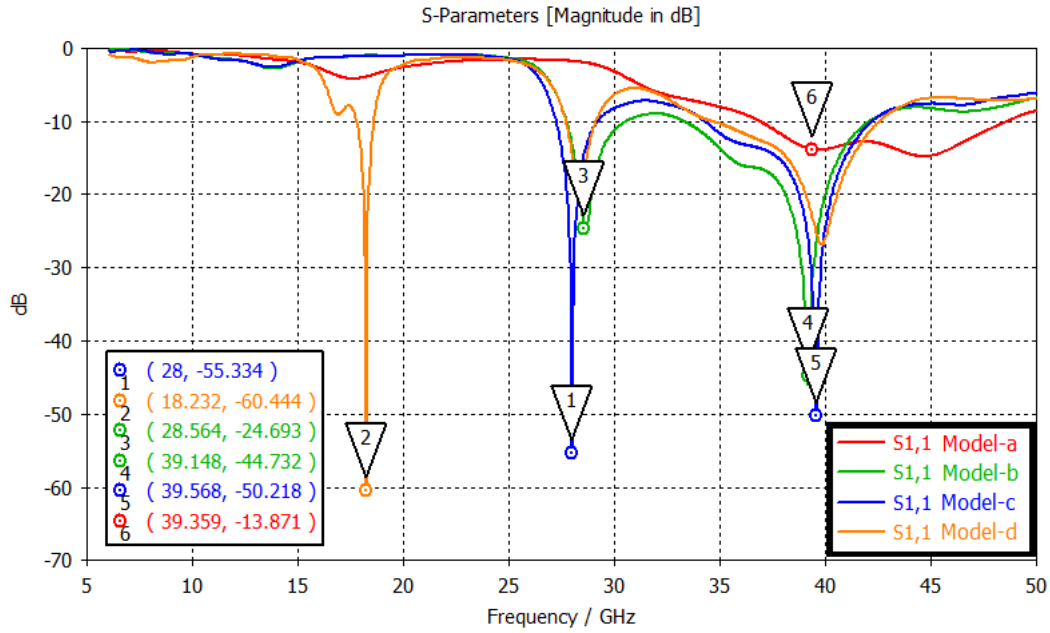


Şekil 4.1. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten: (a) Simüle edilmiş anten geometrisi; (b) Üretilen anten prototipi

Sunulan anten yapısı nihai sonuca ulaşmadan önce dört temel aşamada tasarlanmıştır. Bu tasarım aşamaları “Model – a”, “Model – b”, “Model – c” ve “Model – d” olacak şekilde isimlendirilmiştir. Şekil 4.2’de gösterilen tasarım aşamalarına ait geri dönüş kaybı kıyaslama grafiği Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Önerilen antenin tasarım aşamaları; (a) Model-a, (b) Model-b, (c) Model-c, (d) Model-d

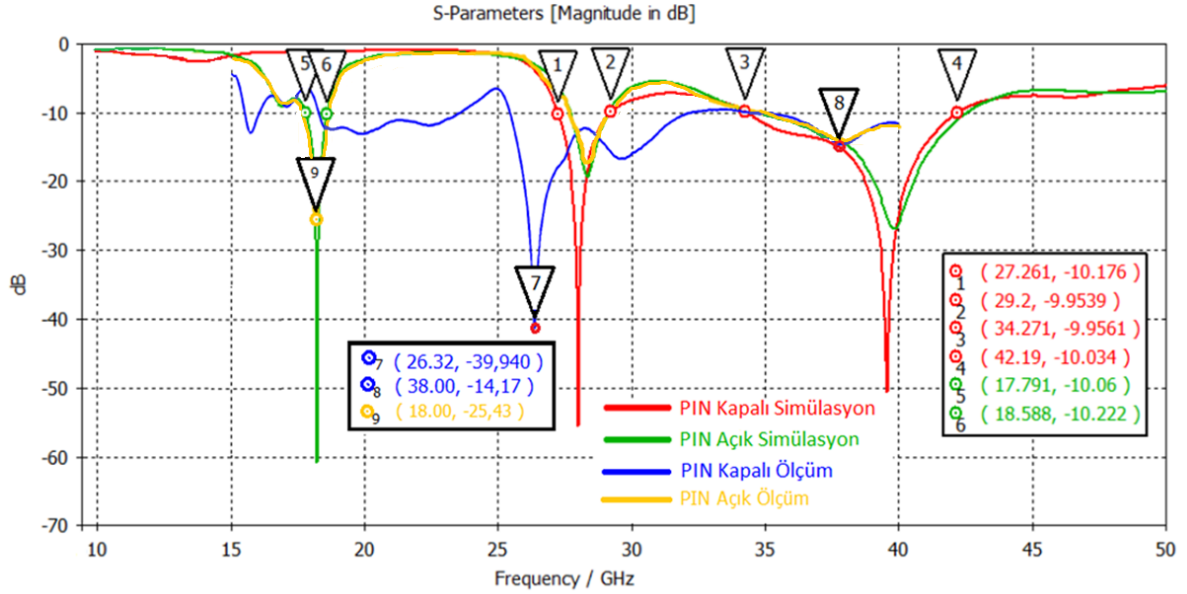


Şekil 4.3. Tasarım aşamasında ele alınan modellerin  $S_{11}$  karakteristikleri

Tasarım aşamasındaki modeller incelendiğinde, Model-a üzerine açılan slotlar ile antenin farklı frekanslarda rezonansa girmesi sağlanmıştır. Ayrıca bu slotlar sayesinde anten geri dönüş kaybında da bir azalma yaşanmıştır. Ek olarak tasarımın her iki yanına eklenen ek yapı sayesinde 18 GHz frekansında bir rezonans elde edilmiştir.

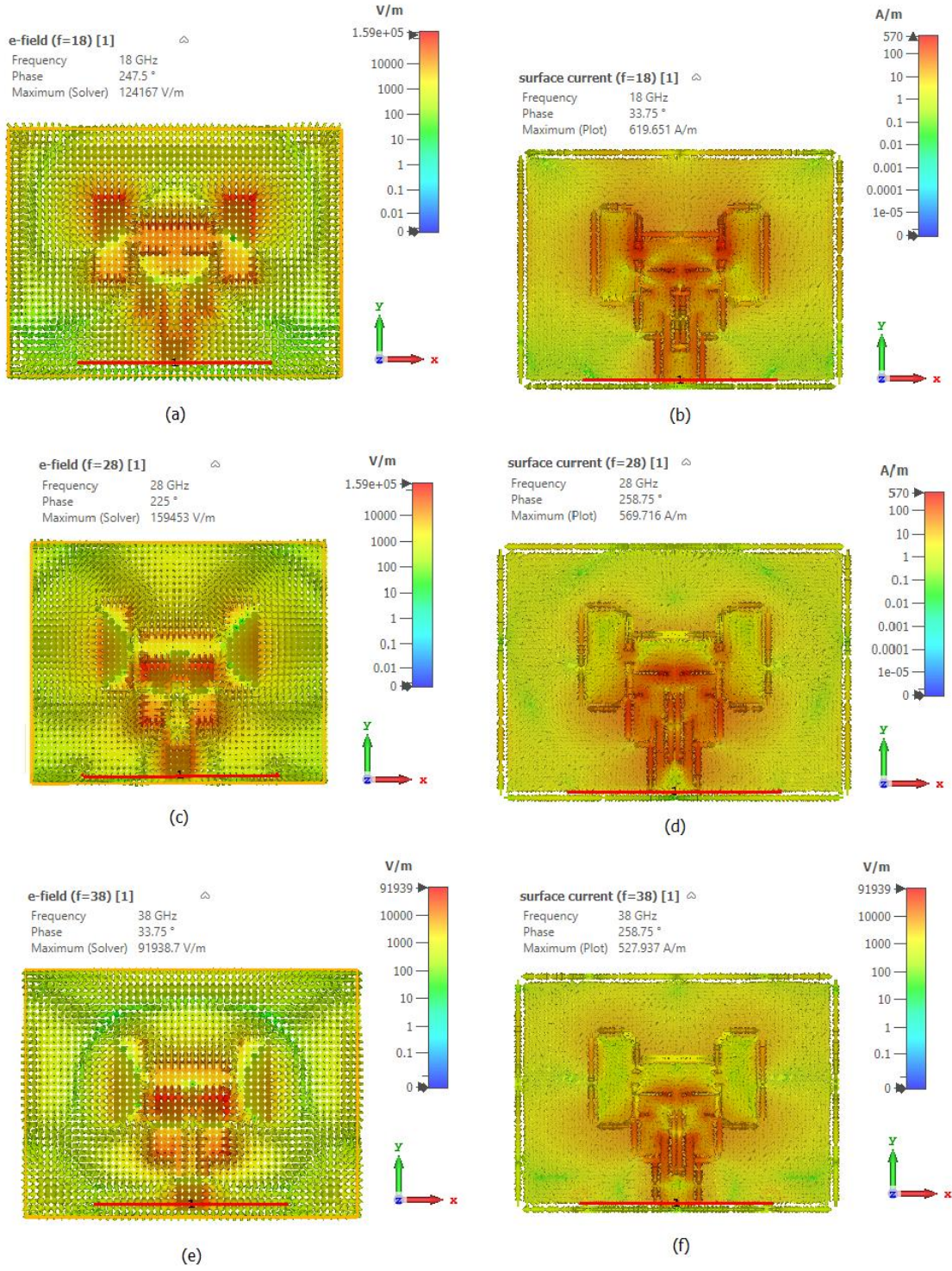
#### 4.2.2. Sonuçlar ve tartışma

Önerilen anten geometrisi, her iki yanda anahtarlama görevi gören PIN diyotlar ve ek yamalardan oluşmaktadır. Frekans yeniden yapılandırılabilme yeteneği PIN diyotlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. PIN diyotların “Kapalı” olduğu durumlarda anten 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında rezonansa girmektedir. PIN diyotların açık olduğu durumda ise, anten 18 GHz bandında rezonansa girmektedir. Önerilen antenin simülasyonu FIT tabanlı simülasyon elemanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, simülasyon sonuçlarını doğrulamak için işlevsel bir prototip de üretilmiştir. Geri dönüş kaybı Agilent Technologies PNA-L N5234A Network Analyzer cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Anten belirlenen frekans aralıklarında kompaktlık, üretim kolaylığı, frekans ayarlama yeteneği ve kararlı ışın genişliği avantajları ile donatılmıştır. Ayrıca her bir ışın için sağlanan kazanç, kısa menzilli kablosuz ağlar için uygundur. Bu avantajlar önerilen anten geometrisini 5G kısa menzilli kablosuz sistemleri ve K-Band radar uygulamaları için uygun kılmaktadır.



Şekil 4.4. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten  $S_{11}$  parametresi

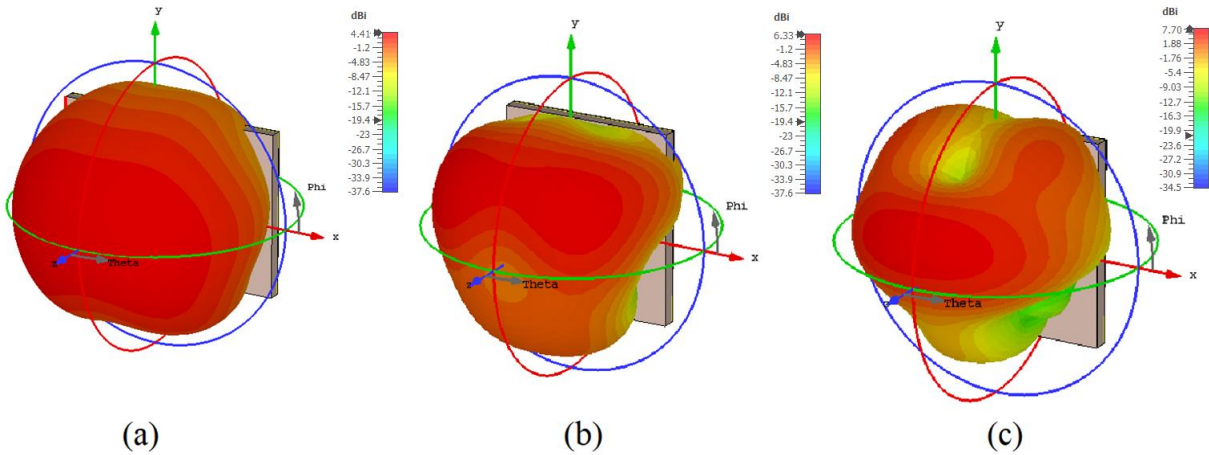
Şekil 4.4’de PIN diyotun “Açık” ve “Kapalı” durumdaki  $S_{11}$  parametresi desibel cinsinden gösterilmiştir. Önerilen antenin -10 dB’deki band genişliği 18 GHz, 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında sırasıyla 0,797 GHz, 1,939 GHz ve 7,919 GHz dir. Ayrıca 18 GHz, 28 GHz ve 38 GHz frekanslarındaki  $S_{11}$  geri dönüş kaybı simülasyon sonuçlarına göre sırasıyla -60,75 dB, -56,28 dB ve -14,20 dB’dir. Buna karşılık üretilen işlevsel prototipin ölçüm sonuçlarına göre 18 GHz, 28 GHz ve 38 GHz frekanslarındaki  $S_{11}$  geri dönüş kaybı -25,43 dB, -12,45 dB, -14,17 dB’dir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, anten üretim toleransları ve konektör kayıpları nedeniyle çalışma frekanslarında kaymalar yaşanmaktadır. Anten ışına desenindeki simetrisinin bozulmaması için her iki PIN diyot aynı durumda kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Frekans yeniden yapılandırılabilir anten yapına ait (a) 18 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 18 GHz Yüzey akım dağılımı, (c) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (d) 28 GHz Yüzey akım dağılımı, (e) 38 GHz Elektrik alan dağılımı, (f) 38 GHz Yüzey akım dağılımı

Şekil 4.5 (a)'da 18 GHz rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımı gösterilirken Şekil 4.5 (b)'de ise 18 GHz rezonans frekansındaki yüzey akımları dağılımı gösterilmiştir. 18 GHz'deki elektrik alan dağılımları 0-124167 V/m aralığında ayarlanmıştır. 18 GHz'deki yüzey akım dağılımı ise 0-619,65 A/m aralığında elde edilmiştir. Şekil 4.5 (c)'de 28 GHz frekansındaki elektrik alan dağılımı ve Şekil 4.5 (d)'de ise yüzey akımları dağılımı gösterilmiştir. 28 GHz'deki elektrik alan dağılımları 0-159453 V/m aralığında ayarlanırken, yüzey akım dağılımı ise 0-569,71 A/m aralığında elde edilmiştir. Şekil 4.5 (e)'de ise 38 GHz rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımı Şekil 4.5 (f)'de yüzey akımları dağılımı gösterilmiştir. 38 GHz için elektrik alan dağılımları 0-91938,7 V/m aralığında ayarlanırken, yüzey akım dağılımı ise 0-527,93 A/m aralığında elde edilmiştir.

Şekil 4.6'da önerilen tasarımın 3 boyutlu ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Ayrıca önerilen frekans yeniden yapılandırılabilir anten simülasyon sonuçlarına göre, 18 GHz, 28 GHz ve 38 GHz'de sırasıyla 4,41 dB, 6,33 dB ve 7,70 dB kazanç sağlamaktadır.



Şekil 4.6. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten 3D ışınma örüntüsü (a) 18 GHz; (b) 28 GHz; (c) 38 GHz



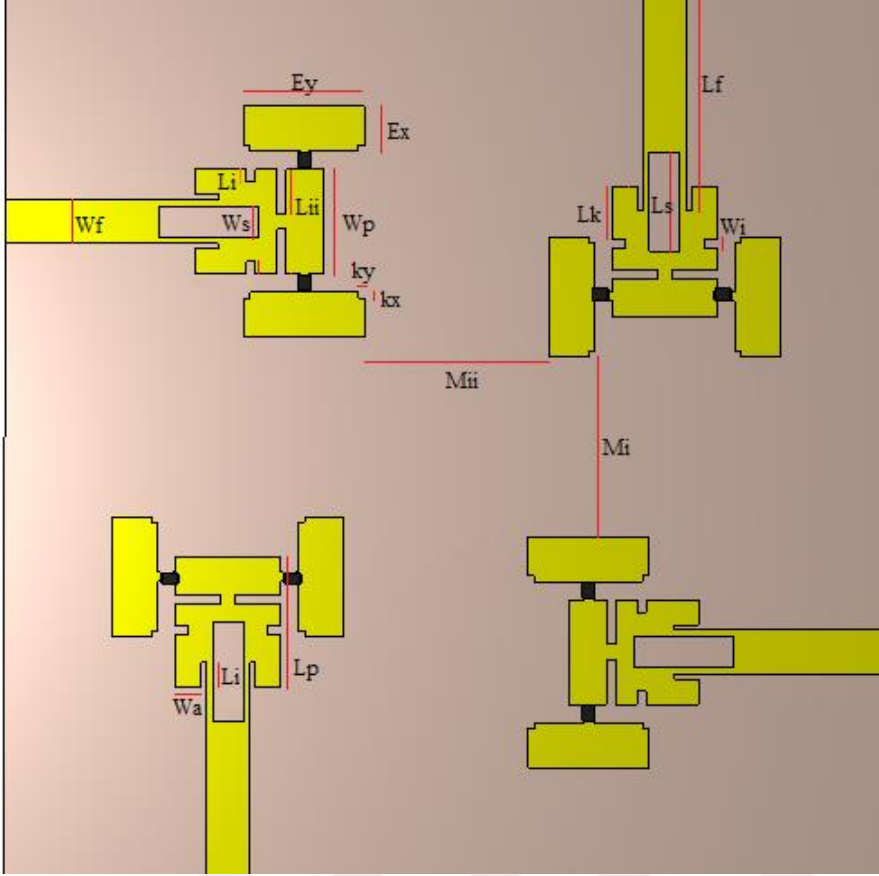
### 4.3. 18 GHz ve 28/38 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir MIMO Anten

#### 4.3.1. Anten tasarımı ve üretimi

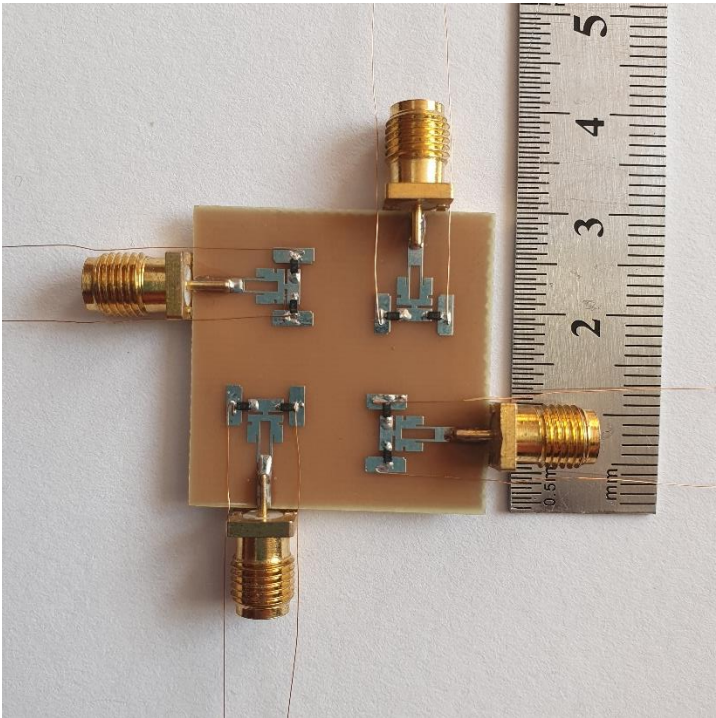
Bir önceki bölümde tasarlanan anten yapısı K-band radar uygulamaları ve 5G iletişim ağlarında kullanılmak üzere dört elemanlı bir MIMO dizisi konfigürasyonu oluşturacak şekilde daha da geliştirilmiştir. MIMO anten yapısının tümü 29,30 x 29,30 mm<sup>2</sup> boyutlarında tek bir FR-4 (h=0,8 mm,  $\epsilon_r = 4.3$ ,  $\tan\delta = 0.002$ ) malzeme üzerinde inşa edilmiştir. Antenler 2x2 düzeni oluşturacak ve birbirleri ile 90° açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Ayrıca birbirlerine olan uzaklıkları da optimize edilmiştir. Bu şekilde iki komşu antenin izolasyonu sağlanmış ve antenin genel geri dönüş kaybı (S parametreleri) profili korunmuştur. Şekil 4.7’de önerilen MMW MIMO anten geometrisi gösterilirken Şekil 4.8’de ise üretilen anten prototipi gösterilmiştir. Oluşturulan MIMO yapısı sayesinde tasarım daha yönlü bir hal almıştır. Çok kanallı olma özelliğinin yanı sıra, anten elemanlarının farklı frekanslarda ayarlanmasıyla, aynı anda farklı frekans bandlarında da hizmet verebilir bir hal almıştır. Çizelge 4.1’de anten parametreleri verilmektedir.

Çizelge 4.1. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten parametreleri

Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
<b>Wp</b>	3,47	<b>Ws</b>	1,02	<b>Lf</b>	7,09
<b>Lp</b>	4,29	<b>Wf</b>	1,46	<b>Ls</b>	3,30
<b>Li</b>	0,43	<b>ky</b>	0,20	<b>Lk</b>	1,73
<b>Lii</b>	1,48	<b>kx</b>	0,20	<b>Wi</b>	0,30
<b>La</b>	0,80	<b>Ey</b>	4,00	<b>Mi</b>	5,95
<b>Wa</b>	0,83	<b>Ex</b>	1,30	<b>Mii</b>	6,12



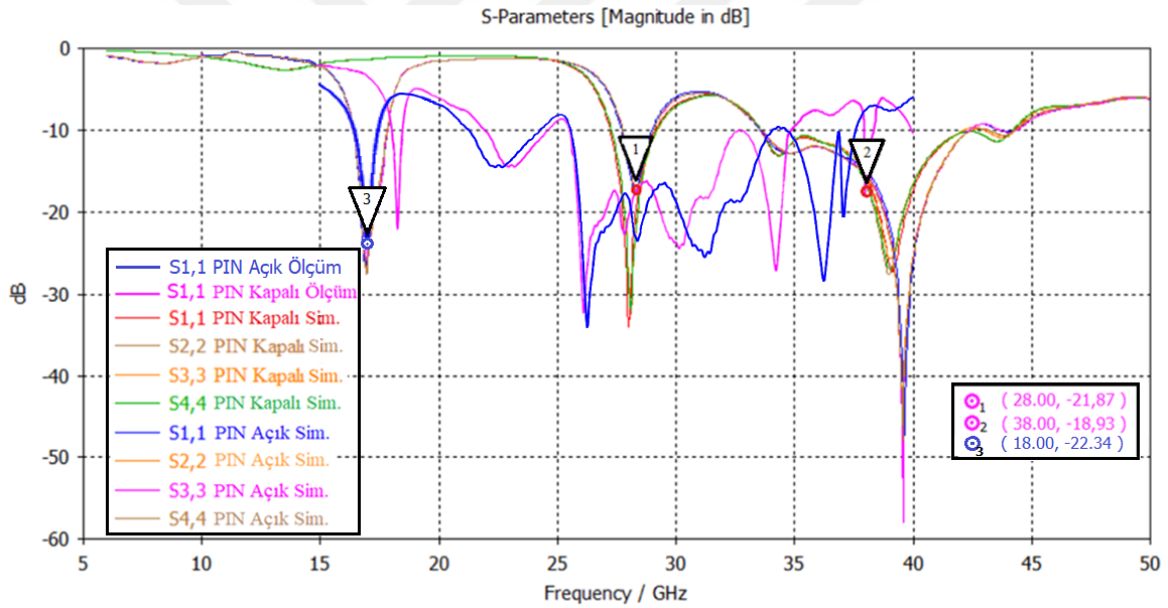
Şekil 4.7. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten geometrisi



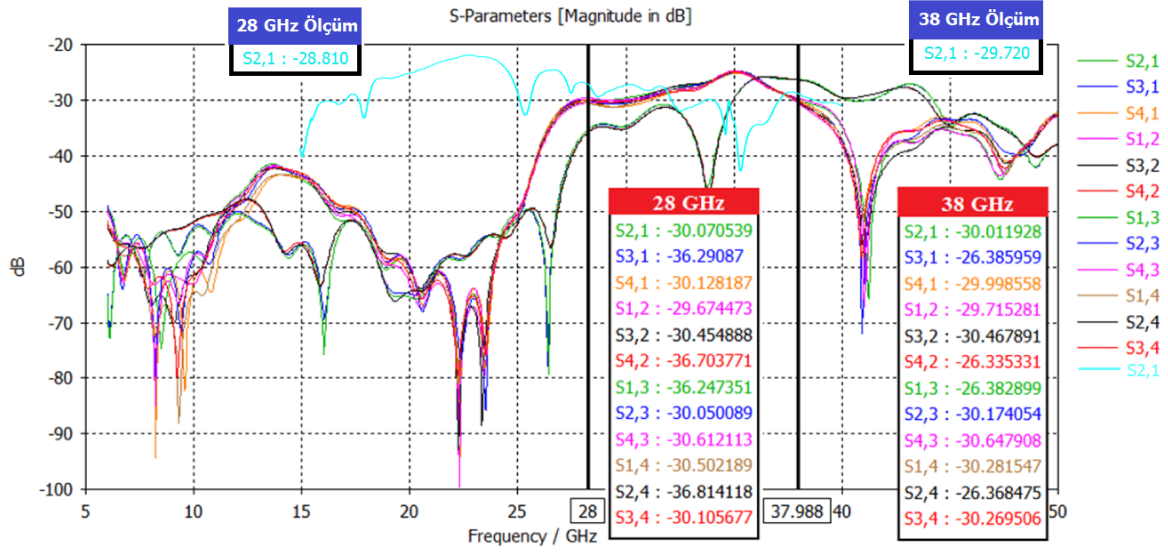
Şekil 4.8. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten prototipi

### 4.3.2. Sonuçlar ve tartişma

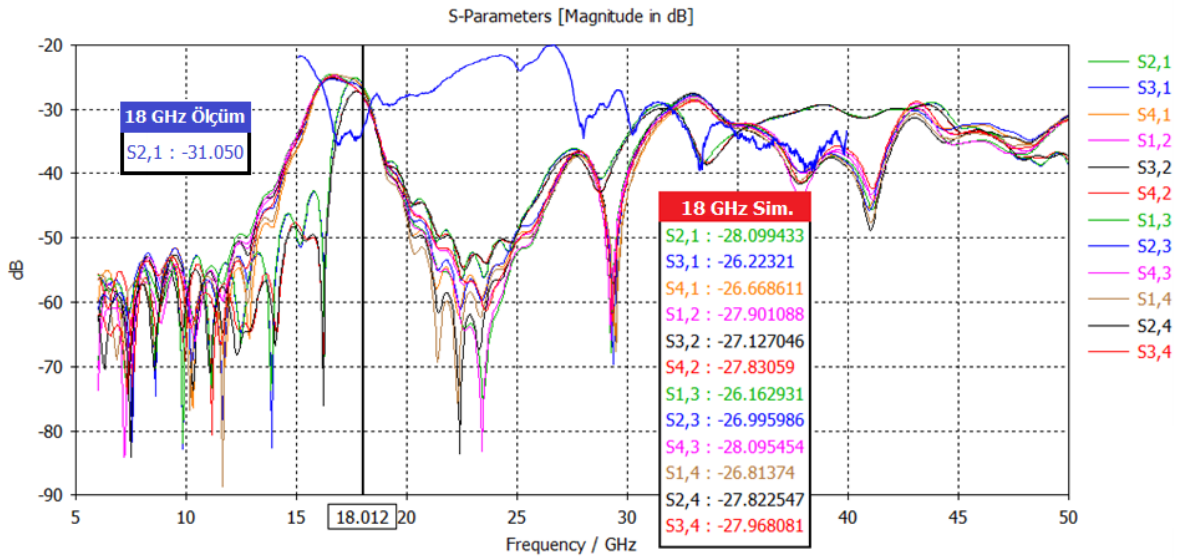
MIMO antenin performansı parametrik çalışma ile değerlendirilmiş olup, üretilen prototip ile ölçümler doğrulanmıştır. Yapılan lümlerde, S-parametreleri, üretim toleransları ve konektör kayıpları nedeniyle oluşan bazı uyumsuzluklar dışında, simüle sonuçlarla örtüşmektedir. şekil 4.9’da tasarlanan antenin yansıma katsayıları gösterilmektedir. Sunulan tasarımda antenler arasındaki iletim katsayıları da şekil 4.10 ve şekil 4.11’de de gösterildiği üzere PIN diyotun her iki durumu için -25 dB’nin altındadır. Daha düşük karşılıklı etkileşim ve yüksek izolasyon için bu seviyenin en az -10 dB’nin altında olması gerekmektedir. Sonuçlar 18, 28 ve 38 GHz frekansları için bu değerin yeterli seviyede olduğunu ve MIMO antenin farklı çalışma frekanslarında sorunsuz çalışabileceğini göstermektedir.



şekil 4.9. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten  $S_{11}$  parametresi



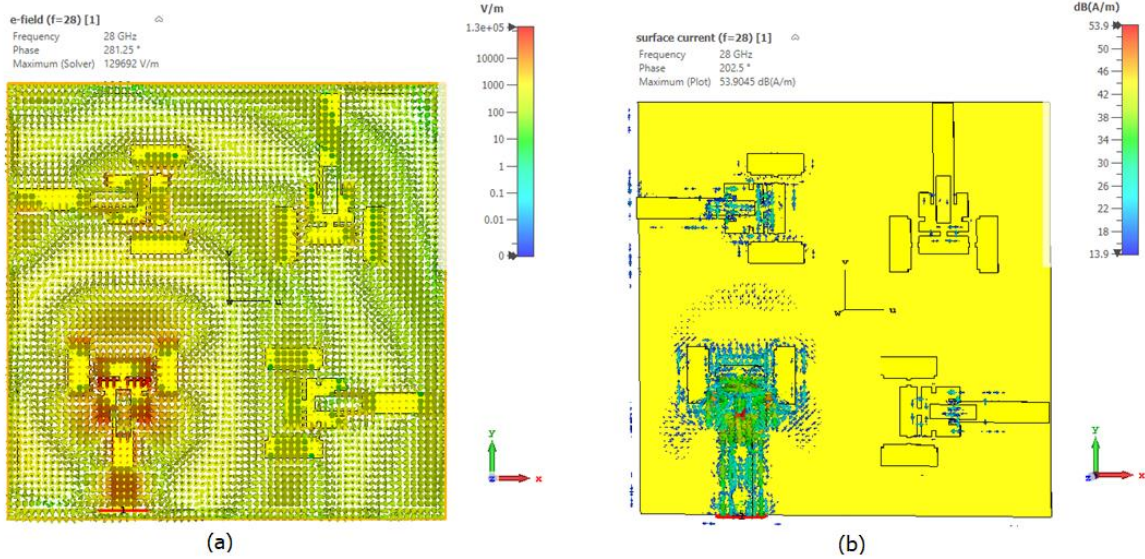
Şekil 4.10. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten PIN kapalı durum için antenler arasındaki iletim katsayıları



Şekil 4.11. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten PIN açık durum için antenler arasındaki iletim katsayıları

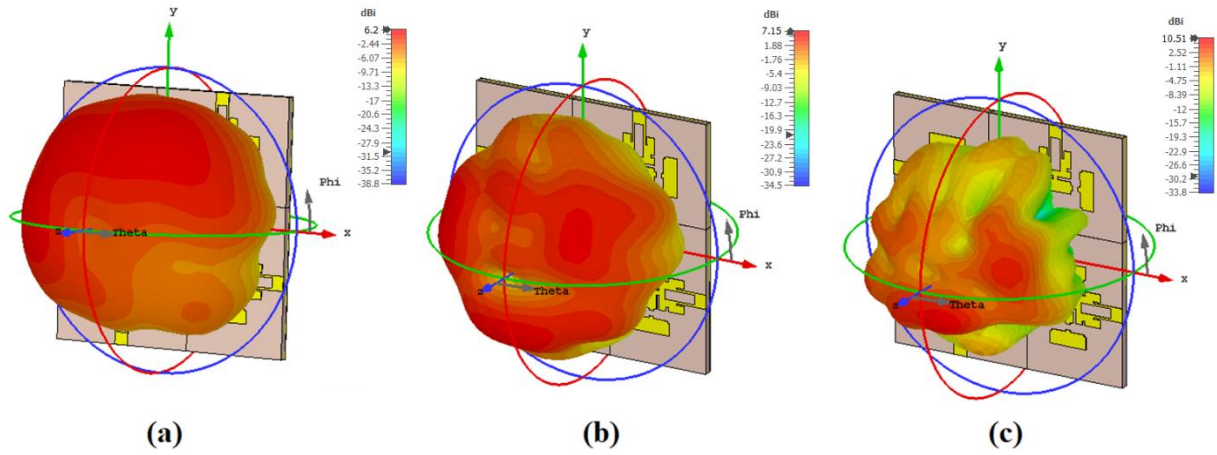
MIMO anten yapılarında yayın yapan her bir anten elemanının birbirleri ile olan iletimin mümkün mertebe az olması beklenir. Bu sayede sinyal kayıpları minimuma indirilecektir. Sunulan tasarımda elemanlar arasında izolasyonun sağlanması için komşu antenler birbirlerine göre dik olarak ve aralarında  $\lambda/2$  mesafe olacak şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 4.12’de “Port 1” enerjili iken 28 GHz çalışma frekansındaki elektrik alan dağılım ve yüzey akımları dağılım grafiği gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere elektrik akımı daha çok besleme hattı üzerinde bulunan slot etrafında yoğunlaşmaktadır. Anten

elemanı yüzeyinde oluşan maksimum akımı, 495 A/m olduğu görülmektedir. Ek olarak, anten  $\lambda/2$  uzaklıkta dik birbirlerine olarak konumlandırılması sonucunda Anten-1'in diğer elemanlara etkisinin oldukça az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten yapısına ait (a) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 28 GHz Yüzey akım dağılımı

Şekil 4.13'de önerilen MIMO anten tasarımının 3 boyutlu ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Yeniden yapılandırılabilir MIMO antende, tek bir anten elemanı için 18 GHz, 28 GHz ve 38 GHz frekanslarındaki kazanç değerleri sırasıyla 6,20 dB, 7,15 dB ve 10,51 dB'dir. MIMO antenlerde her anten elemanı ayrı ayrı çalışmaktadır. Bu sebeple tek bir eleman kazancının belirlenmesi genel MIMO düzenininin toplam dizi kazancından daha fazla önem taşımaktadır.



Şekil 4.13. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten 3 boyutlu ışınma örüntüsü (a) 18 GHz; (b) 28 GHz; (c) 38 GHz

Sunulan MIMO anten tek anten ile karşılaştırıldığında çalışma frekanslarının korunduğu görülmektedir. Ayrıca MIMO anten yapısında 18 GHz’de kazanç 4,41 dB’den 6,20 dB’ye çıkmıştır. Tek antende 28 GHz çalışma frekansında 6,33 dB olan kazanç, MIMO yapısında 7,15 dB’de çıkarken 38 GHz çalışma frekansında ise 7,70 dB’den 10,51 dB’ye çıkmıştır. MIMO yapısıyla çok kanallı iletimin yanı sıra kazanç artışı da sağlanmıştır.

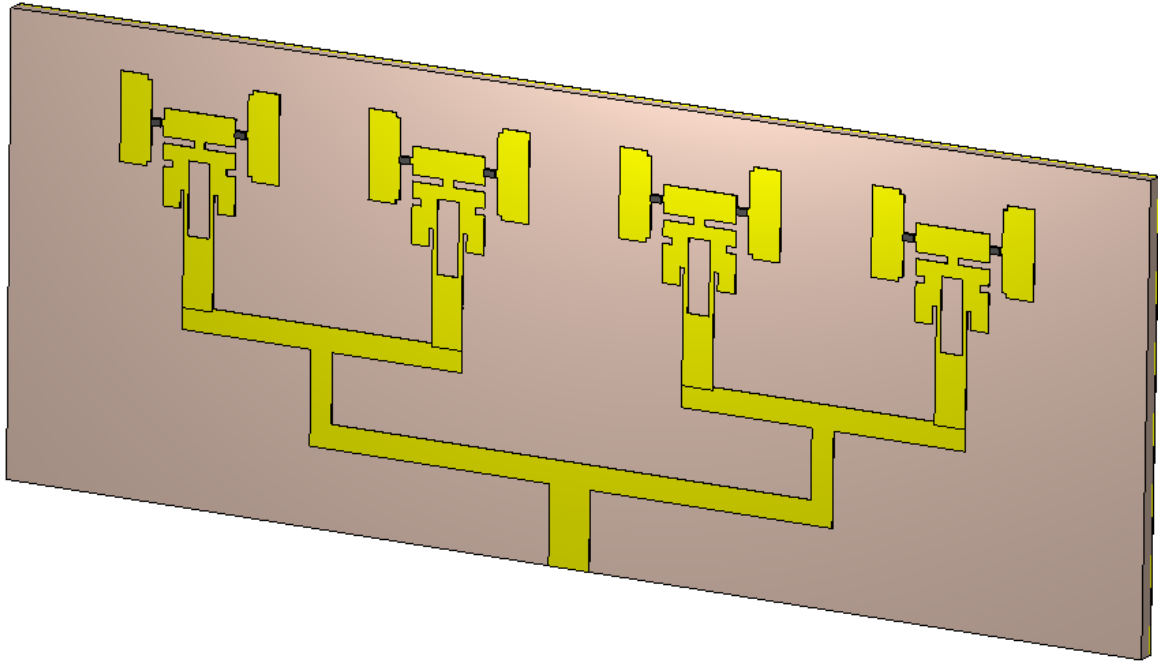
#### 4.4. 18 GHz ve 28/38 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Dizi Anten

##### 4.4.1. Anten tasarımı ve üretimi

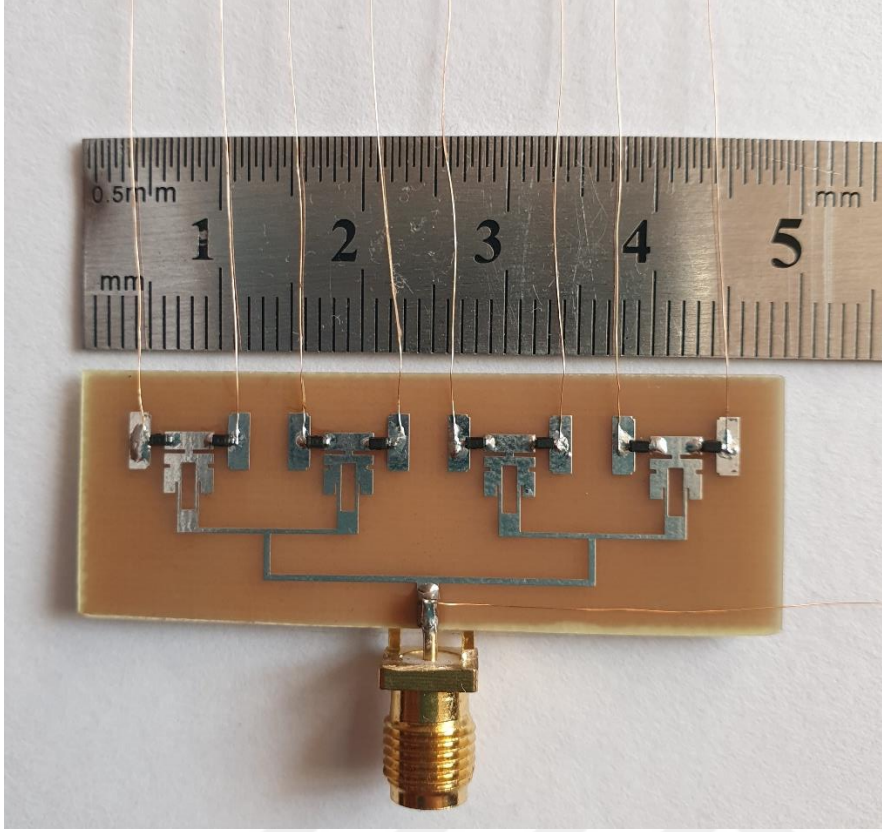
Anten band genişliği, 5G için temel gereksinimlerden biri olmakla beraber dikkate alınması gereken başka parametrelerde bulunmaktadır. Örnek olarak, yüksek frekanslarda atmosferik absorpsiyonlara bağlı olarak yol kaybı sorunlarının üstesinden gelmek için yüksek kazançlı antenler gerekmektedir. Bu bölümde, MIMO dizisine ek olarak, bir önceki bölümde tasarlanan anten bir güç bölücü ile kullanılarak, 5G frekanslarında çok bandlı yanıt ve 10 dBi veya üzeri yüksek kazanç elde etmek üzere dizi anten tasarımı yapılmıştır. Dizi antenler, elektromanyetik dalgaları iletmek veya almak için tek bir anten olarak birlikte çalışan, karşılıklı olarak bağlı bir dizi anten olarak tanımlanır. Eleman adı verilen tekli anten yapıları tek bir kaynağa, elemanlara güç veren besleme hatları ile bağlanmaktadır. Dizi anten yapısının tümü  $48,43 \times 17,26 \text{ mm}^2$  boyutlarında tek bir FR-4 ( $h=0,8 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_r = 4,3$ ,  $\tan\delta = 0,002$ ) malzeme üzerine inşa edilmiştir. Antenler Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de de görüleceği üzere 1x4 düzeni oluşturacak şekilde konumlandırılmıştır. MMW frekanslarında anten

boyutları çok küçük olduğundan çoklu anten elemanlarının dizi entegrasyonları kompaktlık sağlarken yüksek kazanç ve yönlendirici ışın ile sonuçlanmaktadır.

Bir dizi anten tasarımında iki eleman arasındaki mesafe önemli bir faktördür. Elemanlar arasındaki mesafe toplam anten kazancını kontrol etmektedir. Anten elemanları arasında  $2\lambda$  kadar mesafe bırakıldığında, dizi anten tasarımından maksimum kazanç elde edilebilir. Ancak bu, dizi boyutunu önemli ölçüde artıracaktır. Genel olarak, iki eleman arasındaki mesafenin tipik değeri  $0,5\lambda$  ile  $0,9\lambda$  arasındadır. Bu çalışmada elemanlar arasındaki mesafe yaklaşık olarak  $0,5\lambda$  olacak şekilde ayarlanmıştır. Sunulan tasarımda her bir anten elemanı  $100\ \Omega$  besleme hattına bağlanmıştır. Ortak bir noktada birleştirilen iki  $100\ \Omega$  besleme hattı  $50\ \Omega$  empedans ile sonuçlandırılmıştır. Daha sonra bu iki ortak noktanın  $50\ \Omega$  empedansla sonuçlandırılacak şekilde tekrar bağlantısı yapılmıştır.



Şekil 4.14. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir dizi anten geometrisi

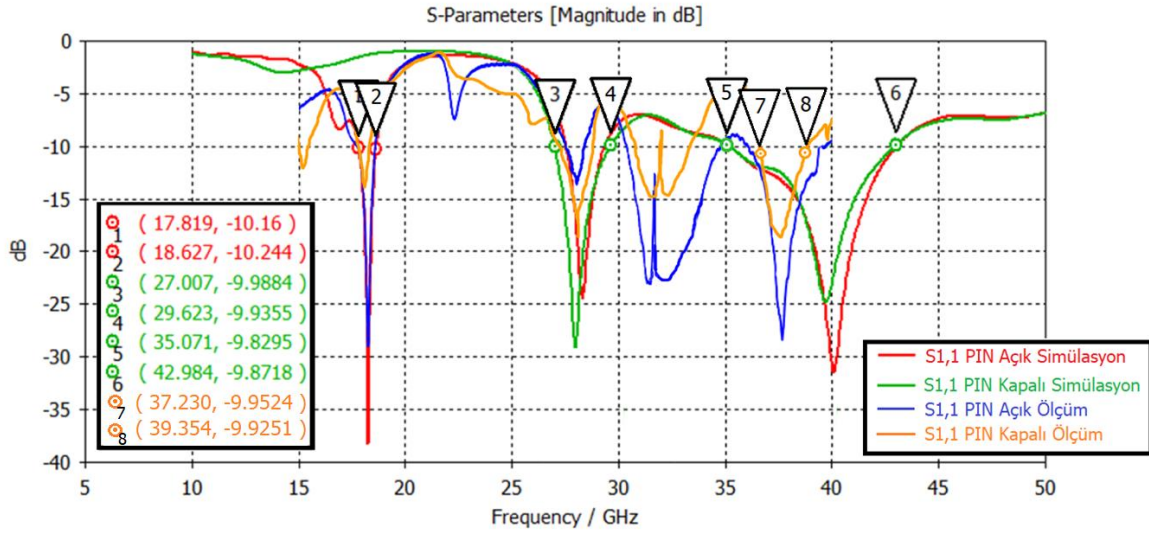


Şekil 4.15. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir dizi anten prototipi

#### 4.4.2. Sonuçlar ve tartışma

Bir anten performansını incelemek için kullanılan en temel parametre, yansıyan güç ve iletilen güç hakkında bilgi veren  $S_{11}$  grafiğidir.  $S_{11}$  parametresinin değeri ne kadar düşükse anten o kadar iyi rezonansa girmektedir. Ayrıca antenin çalışma frekansı ve bant genişliği de geri dönüş kaybı grafiğinden belirlenmektedir. Şekil 4.16’da sunulan frekans yeniden yapılandırılabilir dizi antene ait  $S_{11}$  grafiği gösterilmektedir. Şekil 4.16’da yeşil renkte gösterilen grafik PIN diyotların “Kapalı” olduğu durumdaki simüle edilen saçılmayı göstermektedir. Buna göre sunulan yeniden yapılandırılabilir dizi antenin 28 GHz ve 38 GHz frekanslarındaki geri dönüş kaybı sırasıyla -29,10 dB ve -24,57 dB’dir. Şekilde kırmızı renk ile gösterilen grafik ise PIN diyotların “Açık” durumdaki simüle edilmiş sonuçlarını göstermektedir. PIN diyotlar açık olduğunda anten 18 GHz’de -38,03 dB geri dönüş kaybı sunmaktadır. Ayrıca Şekil 4.16’da PIN diyotların iki durumu için ölçülen  $S_{11}$  grafiği de gösterilmektedir.



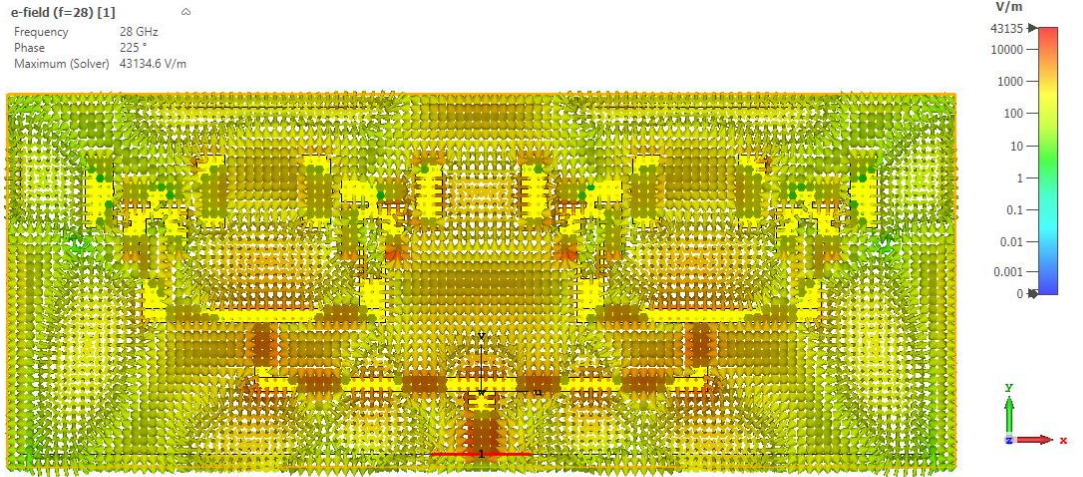


Şekil 4.16. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir dizi anten  $S_{11}$  parametresi

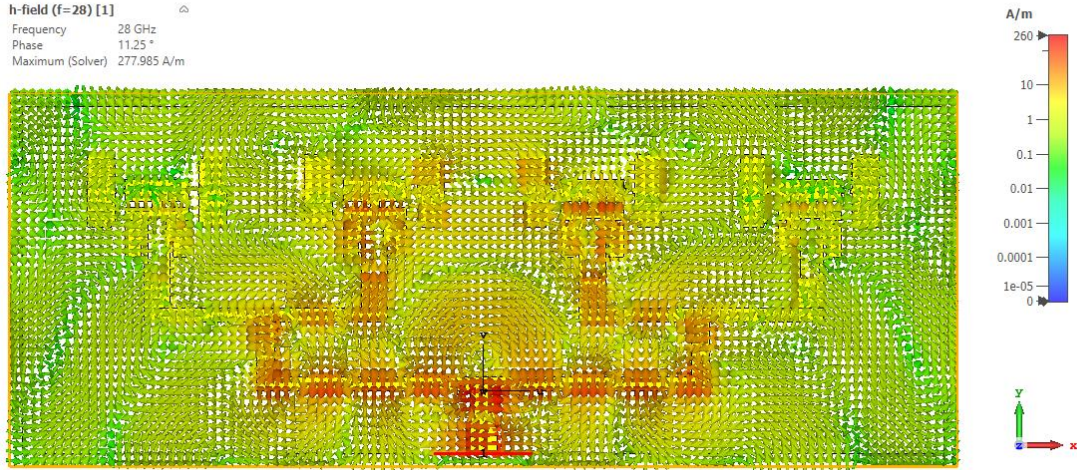
Ek olarak,  $S_{11}$  grafiğine bakılarak -10 dB referans seviyesindeki bant genişliği de çıkarılabilir. Buna göre 18 GHz, 28 GHz ve 38 GHz frekans bantlarında bant genişliği simülasyon sonuçlarına göre, sırasıyla 0,80 GHz, 2,62 GHz ve 7,91 GHz'dir. Bu değerler sunulan tasarımın FCC tarafından bildirilen MMW 5G bantlarının tamamında çalışabileceği anlamına gelmektedir.

Şekil 4.17 (a)'da 28 GHz rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımı gösterilirken Şekil 4.28 (b)'de ise 28 GHz rezonans frekansındaki yüzey akımları dağılımı gösterilmiştir. 28 GHz'deki elektrik alan dağılımları 0-43135 V/m aralığında ayarlanmıştır. 28 GHz'deki yüzey akım dağılımı ise 0-260 A/m aralığında elde edilmiştir.

Antenden yayılan gücün uzaydaki üç boyutlu görünümü, uzak alan bölgesinde ölçülen 3D radyasyon modeli olarak bilinir. Başka bir deyişle, izotropik bir antene göre belirli bir yönde yayılan gücün ölçüsüdür. 3D ışınma desenine bakılarak antende belirli bir yönde iletilen güç gözlemlenebilir. Şekil 4.18'de yeniden yapılandırılabilir dizi antene ait 3D ışınma desenleri sunulmuştur. Ayrıca önerilen frekans yeniden yapılandırılabilir anten simülasyon sonuçlarına göre, 18 GHz, 28 GHz ve 38 GHz'de sırasıyla 6,41 dB, 10,33 dB ve 11,70 dB kazanç sağlamaktadır.

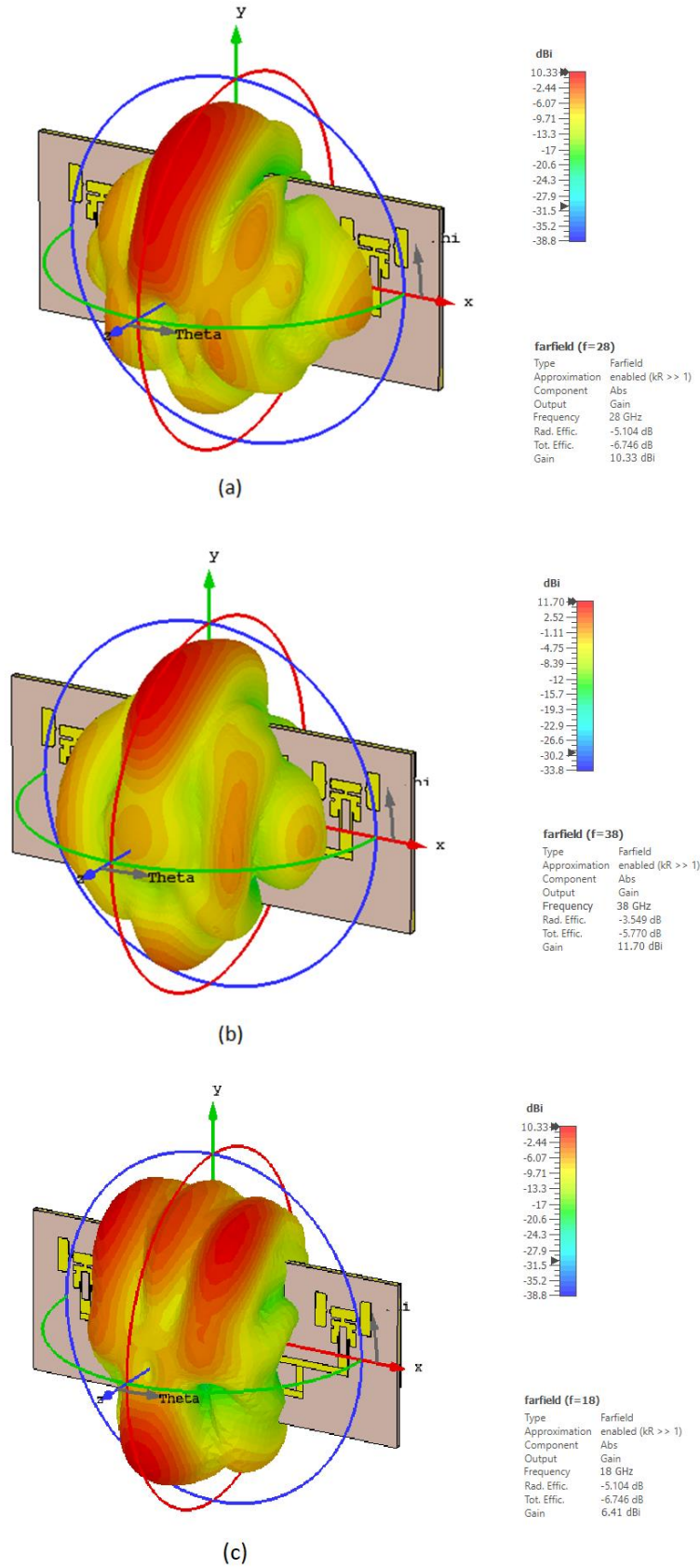


(a)



(b)

Şekil 4.17. Frekans yeniden yapılandırılabilir dizi anten yapısına ait (a) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 28 GHz Yüzey akım dağılımı



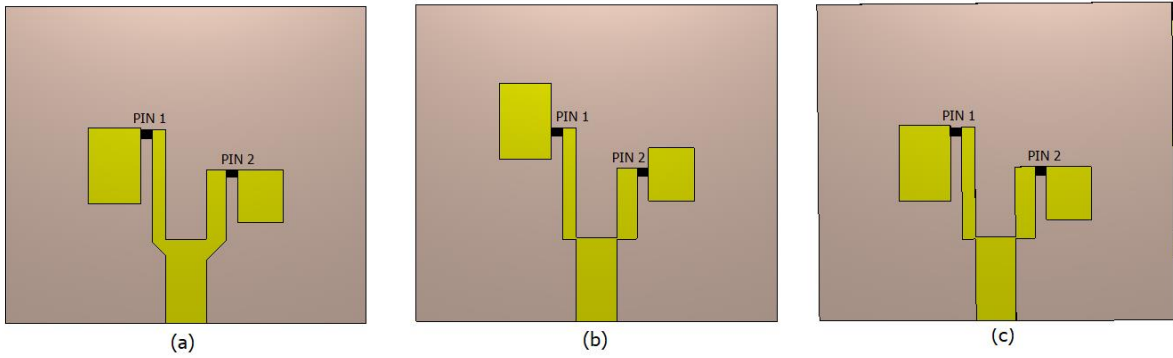
Şekil 4.18. 18 GHz ve 28/38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir MIMO anten 3D ışınma örüntüsü; (a) 28 GHz, PIN Kapanlı (b) 38 GHz, PIN Kapanlı (c) 18 GHz, PIN Açık

## 4.5. 28 GHz ve 38 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Anten

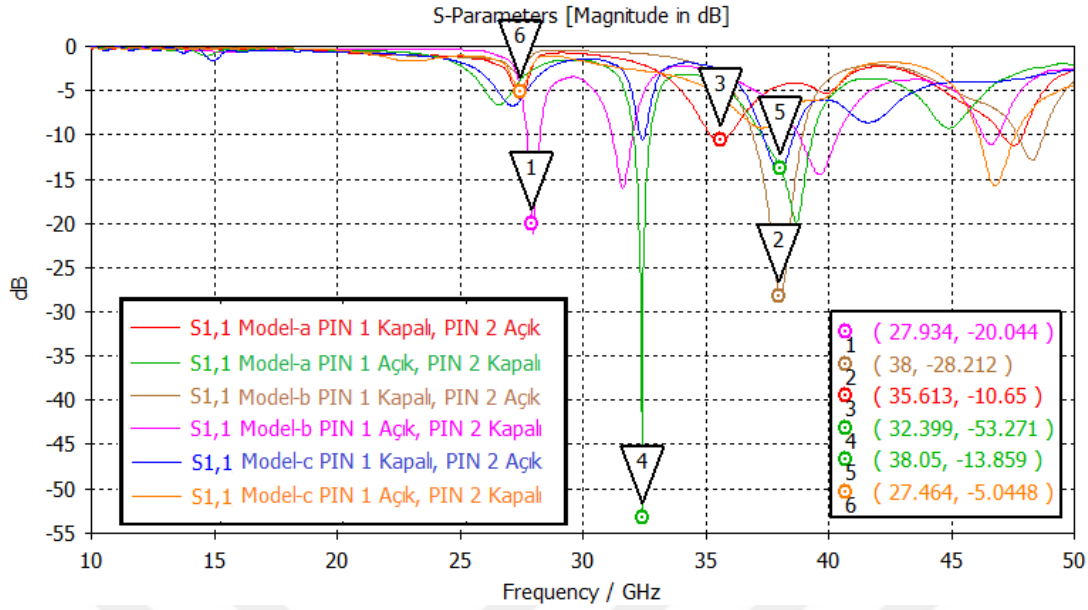
### 4.5.1. Anten tasarımı

Bu bölümde önceki tasarımdan farklı olarak 5G ağları için tahsis edilen iki frekans (28 ve 38 GHz) bandında yeniden ayarlanabilen bir tasarım sunulmuştur. FR-4 alttaşı yüksek frekanslı elemanlarda, yüksek yayılma faktörüne sahiptir. Bu durum yüksek frekanslarda daha fazla sinyal kaybına neden olmaktadır. Ayrıca empedans stabilitesinde FR-4 alttaşı daha fazla değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple bu bölümde FR-4 alttaşına alternatif yüksek frekanslı uygulamalar için daha uygun bir alttaşı kullanılmıştır.

Sunulan yeniden yapılandırılabilir anten tasarımında nihai ürün elde edile kadar üç farklı tasarım üzerinde çalışılmıştır. Bu tasarımlar “Model-a”, “Model-b” ve “Model-c” olarak adlandırılmıştır. Bu tasarımlarda yayın yapan elemanın konumları ve besleme hattının şekli değiştirilerek istenilen frekanstaki en uygun tasarıma ulaşılmıştır. Şekil 4.19’da üç tasarım modeli de gösterilmektedir. Bu üç model için PIN Açık/Kapalı durumlarındaki geri dönüş kayıpları Şekil 4.20’de gösterilmektedir.

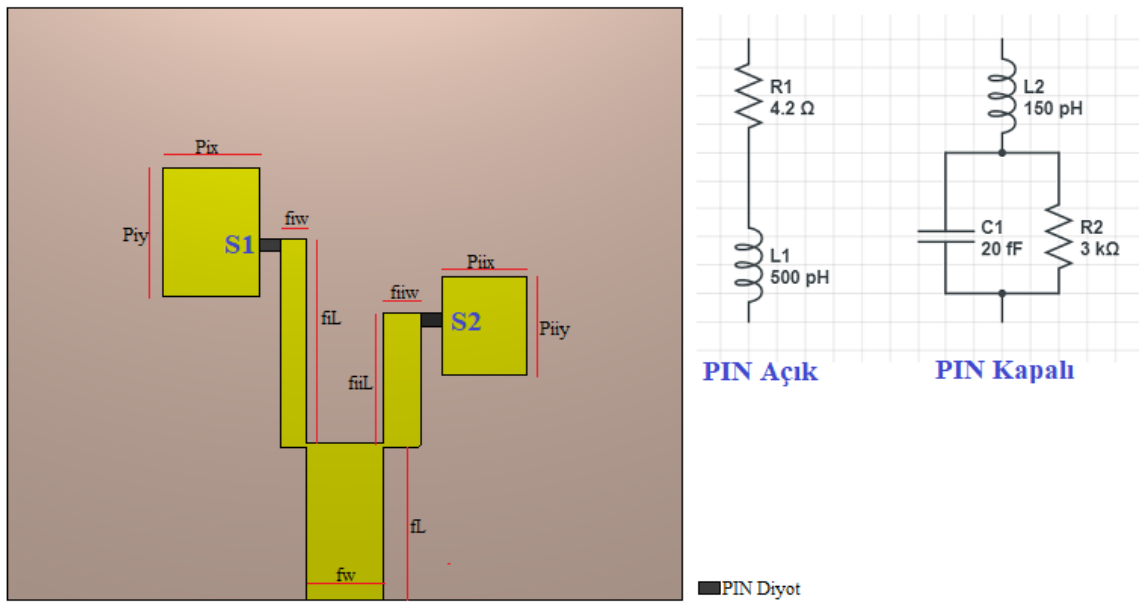


Şekil 4.19. Önerilen antenin tasarım aşamaları; (a) Model-a, (b) Model-b, (c) Model-c



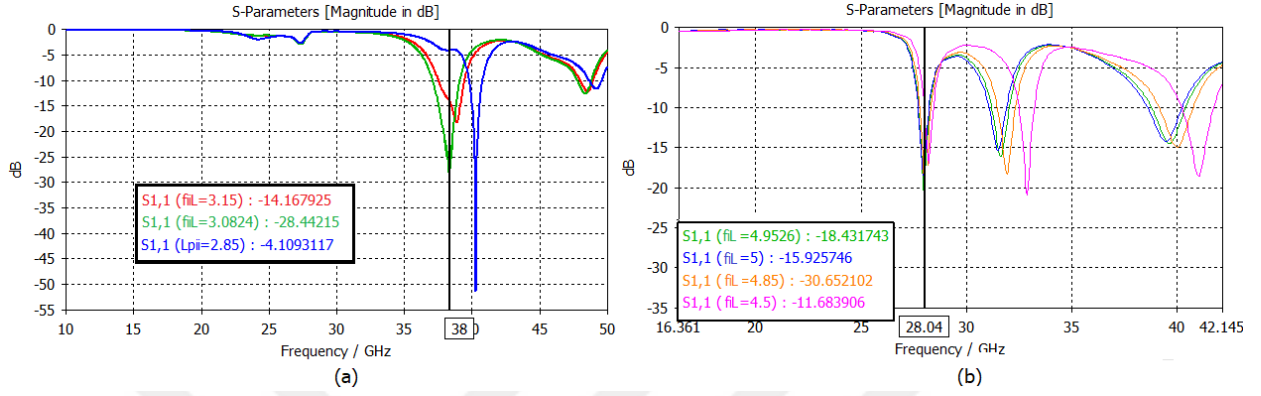
Şekil 4.20. Tasarım aşamasında ele alınan modellerin  $S_{11}$  karakteristikleri

Sunulan tasarım “Y” şeklinde mikroşerit besleme hattı ile beslenen iki yama antenden oluşmaktadır. Şekil 4.21’de de görüleceği üzere, anahtarlama görevi gören iki PIN diyot “S1” ve “S2”, frekans yeniden yapılandırma için kullanılmaktadır. S1 anahtarı “Kapalı” S2 anahtarı “Açık” olduğu durumda anten 28 GHz frekansında rezonansa geçmektedir. S1 anahtarı “Açık” S2 anahtarı “Kapalı” olduğu durumlarda ise anten 38 GHz frekansında rezonansa geçmektedir.



Şekil 4.21. 28 GHz ve 38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten geometrisi ve PIN diyot eşdeğer devresi

Şekil 4.22’de farklı uzunluktaki besleme bağlantı hattının anten geri dönüş kaybı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında optimum frekans cevabının  $f_{iL} = 4,85$  mm ve  $f_{iiL} = 3,08$  mm’de sağlandığı görülmektedir. FIT tabanlı simülatör ile modellenen antene ait nihai tasarım parametreleri, Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Besleme bağlantı hattı uzunluğu değişimine göre geri dönüş kaybı karakteristikleri

Çizelge 4.2. 28 GHz ve 38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarım parametreleri

Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
<b>Pix</b>	2,32	<b>Piy</b>	3,35
<b>Piix</b>	2,02	<b>Piyy</b>	2,35
<b>fiw</b>	0,60	<b>fiL</b>	4,85
<b>fiiw</b>	0,80	<b>fiiL</b>	3,08
<b>fw</b>	1,80	<b>fL</b>	3,60

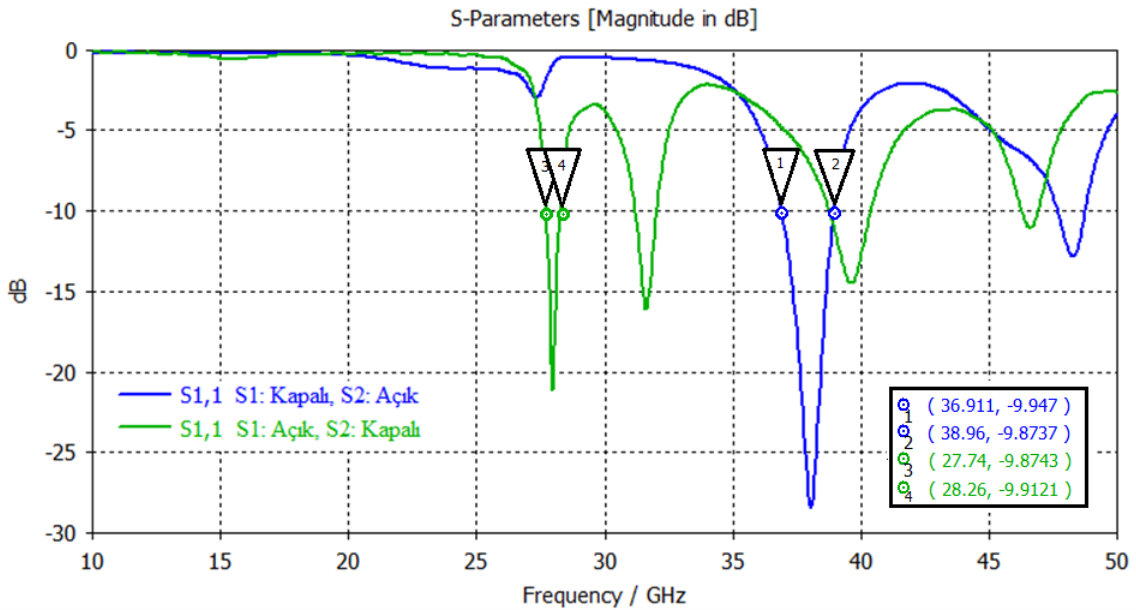
16 x 14 x 0,256 mm<sup>3</sup> boyutlarında Rogers RT5870 ( $\epsilon_r = 2,33$ ,  $\tan\delta = 0.001$ ) malzeme üzerine inşa edilen antenin, yeniden yapılandırılabilir özellik kazanması için PIN diyotların tetiklenmesi gerekmektedir ve bunun için de PIN diyot terminallerine Bias gerilimi uygulanmalıdır. İdeal anahtar konfigürasyonundan farklı olarak PIN diyot kullanıldığında, sistemde çeşitli kayıplar oluşmaktadır. Simülasyonda PIN diyot veri sayfasında belirtilen spesifikasyonlar göz önüne bulundurularak analiz yapılmıştır. Pasif elemanların sisteme dahil edilmesi, anten tasarımı açısından oldukça zor bir süreçtir. Direnç, kapasitör gibi pasif bileşenlerin uygun değerleri seçilerek polarlama devresindeki kayıplar minimuma indirilmelidir. Ayrıca sisteme bağlı olan DC-Bias hatları, antene yakınlığı nedeniyle

parazitlik oluşturacağından, radyasyon etkisini kontrol altında tutmak için hat genişlikleri olabildiğince azaltılmalıdır.

#### 4.5.2. Sonuçlar ve tartişma

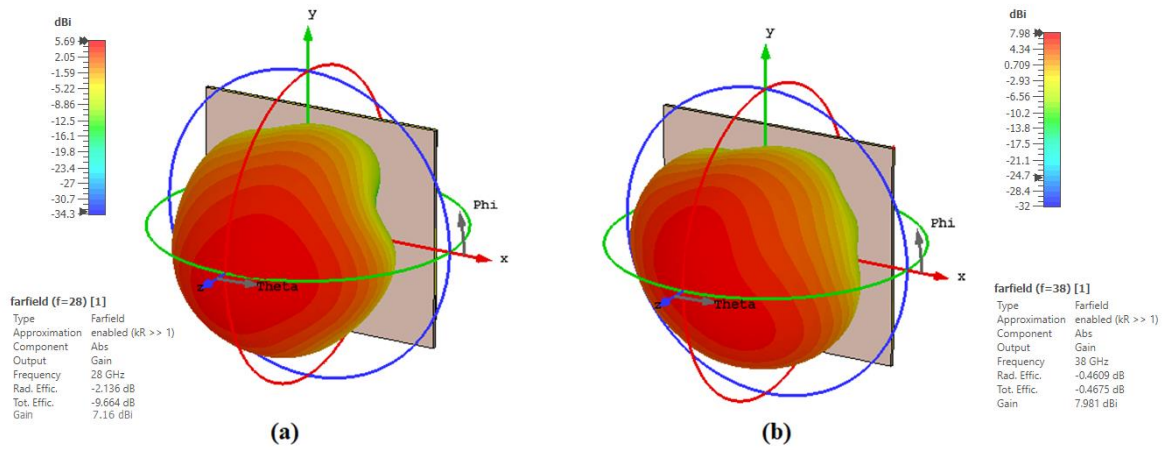
Bu bölümde sunulan anten parametrelerinin simüle edilmiş sonuçları, geri dönüş kaybı ( $S_{11}$ ) ve işıma desenleri sunulmaktadır. Anten performansının parametrik çalışma ile doğrulanması sürecinde eşdeğer devre modeli ve PIN diyot veri sayfası (anahtar performansının deneysel verileri) dikkate alınmıştır. Yeniden yapılandırılabilirliğe özelliği MACOM tarafından temin edilen MA4AGFCP910 PIN diyot ile sağlanmıştır. MA4AGFCP910 PIN diyot 10 GHz’de ‘‘Açık’’ durumda 4,2  $\Omega$  seri direnç ( $R_S$ ) ve 0,5 nH seri endüktans sunarken, ‘‘Kapalı’’ durumda 20 fF kapasitans ve 3 K $\Omega$  şont direnci sunmaktadır.

şekil 4.23 de önerilen yeniden yapılandırılabilir antenin  $S_{11}$  parametresi gösterilmektedir. S1 anahtarı ‘‘Kapalı’’ S2 anahtarı ‘‘Açık’’ olduğu durumda, 28 GHz frekans bandında -10 dB’deki band genişliği 0,52 GHz iken geri dönüş kaybı ise, -21,12 dB’dir. S1 anahtarı ‘‘Açık’’ S2 anahtarı ‘‘Kapalı’’ olduğu durumda 38 GHz frekans bandında ise, -10 dB’deki band genişliği 2,02 GHz iken geri dönüş kaybı, -28,44 dB’dir.



şekil 4.23. 28 GHz ve 38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten  $S_{11}$  parametresi

Şekil 4.24’de ise önerilen yeniden yapılandırılabilir anten tasarımının 3 boyutlu ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Tasarımın asimetrik geometrisi sebebiyle ışınma örüntüsü simetrik değildir. Öte yandan sunulan tasarım, 28 GHz’de 7,16 dB kazanç sağlarken 38 GHz’de 7,98 dB kazanç sağlamaktadır. Bu çalışmada önceki tasarımlardan farklı olarak Rogers RT5870 alttaşı kullanılmıştır. FR-4 alttaşı sabit empedansı korumak için uygun bir malzeme değildir. Bunun nedeni, tek bir FR-4 alttaşı içerisinde dielektrik geçirgenliğin değişiklik göstermesidir. Buna karşılık, Rogers RT5870 yüksek frekanslarda daha stabil bir empedans sağlamaktadır. Rogers RT5870 alttaşının bir diğer avantajı ise sıcaklık yönetimidir. Sıcaklık performansları karşılaştırılırken dielektrik sabitinin termal katsayısı iyi bir göstergedir. Bu katsayı, bir malzemenin dielektrik sabitinin, sıcaklıkla ne kadar değiştiğinin ifadesidir. Rogers RT5870 alttaşı, FR-4’e göre daha iyi termal özelliklere sahiptir.



Şekil 4.24. 28 GHz ve 38 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten 3 boyutlu ışınma örüntüsü (a) 28 GHz; (b) 38 GHz

## 4.6. 25 GHz - 29 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Anten

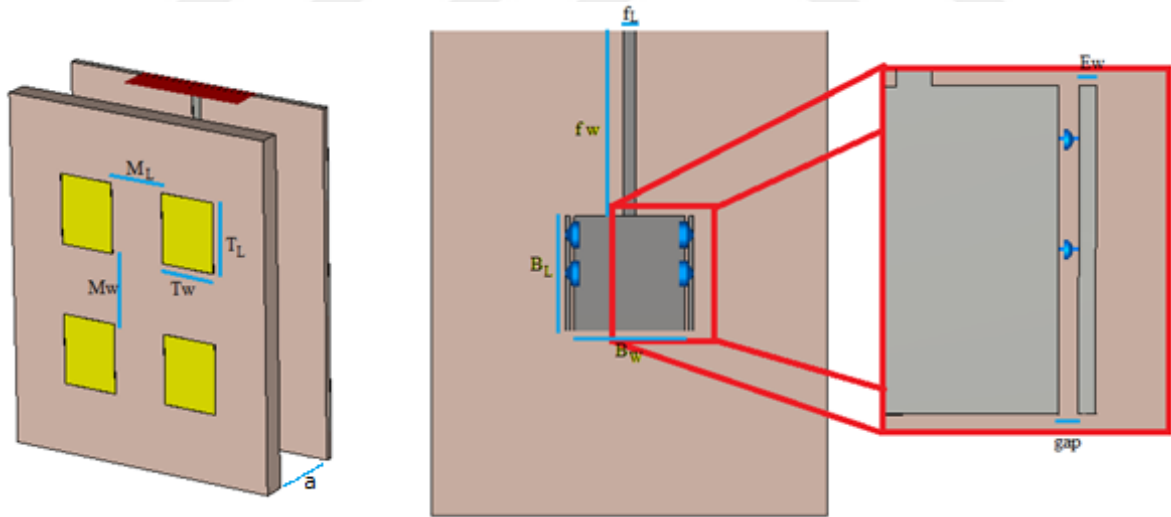
### 4.6.1. Anten tasarımı

MMW spektrumunda çalışan hücresel ağlar için çözülmesi gereken bazı kritik sınırlamalar bulunmaktadır. Atmosferik zayıflamalar ve yağmur, sis gibi hava olaylarında yaşanan kayıplar bu sınırlamalara örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca Anten üzerinde oluşabilecek buzlanma ve yoğun kir gibi etkenler çalışma frekansında kaymalara neden olabilir. Bu gibi durumlarda sunulan frekans yeniden yapılandırılabilir anten ile bu hassasiyet giderilebilir, anten performansı artırılabilir. Bu bölümde sunulan yeniden yapılandırılabilir antenin



önceki tasarımlardan en önemli farkı, 25 GHz ve 29 GHz arasında sürekli bir geçişe imkân sağlamasıdır. Bu sayede, 28 GHz için kurulan bir ağda yaşanabilecek frekans kaymaları tolere edilir.

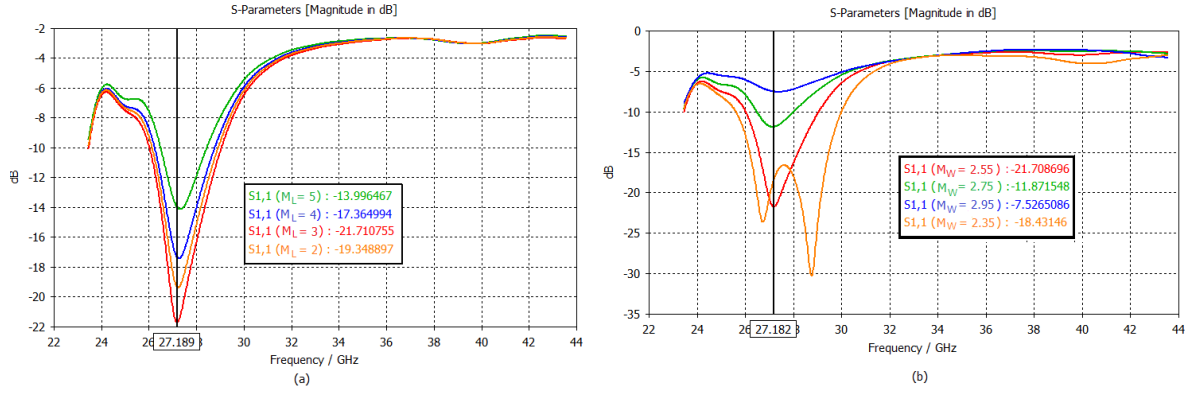
Ayarlanabilir dirençler, yeniden yapılandırılabilir bir antende, besleme hattına yerleştirilebileceği gibi yayın yapan yama yüzeyine de yerleştirilebilir. Değişken dirençlerin  $\Omega$  değerleri değiştirilerek, entegre edilen antene ait performansın ayarlanmasını sağlanmaktadır. Önerilen anten yapısı iki katmandan oluşmaktadır. Bunlar dielektrik sabiti 4.3 ve kalınlığı 0,8 mm olan bir FR-4 alttaşı ve dielektrik sabiti 2,2 ve kalınlığı 0,256 mm olan bir Rogers5880 alttaşıdır. Rogers5880 50  $\Omega$  empedansa uyum sağlamak üzere tasarlanan besleme hattını, yayın yapan yüzeyi ve ayarlanabilir dirençleri üzerinde barındırır. FR-4 katman ise rezonansla etkileşime giren iletken yamaları barındırmaktadır. Her iki katman arasında 3 mm uzaklık bulunmaktadır. Yeniden yapılandırılabilir anten yapısı Şekil 4.25’de gösterildiği gibi imal edilmiş olup, anten tasarım parametreleri Çizelge 4.3’te verilmiştir.



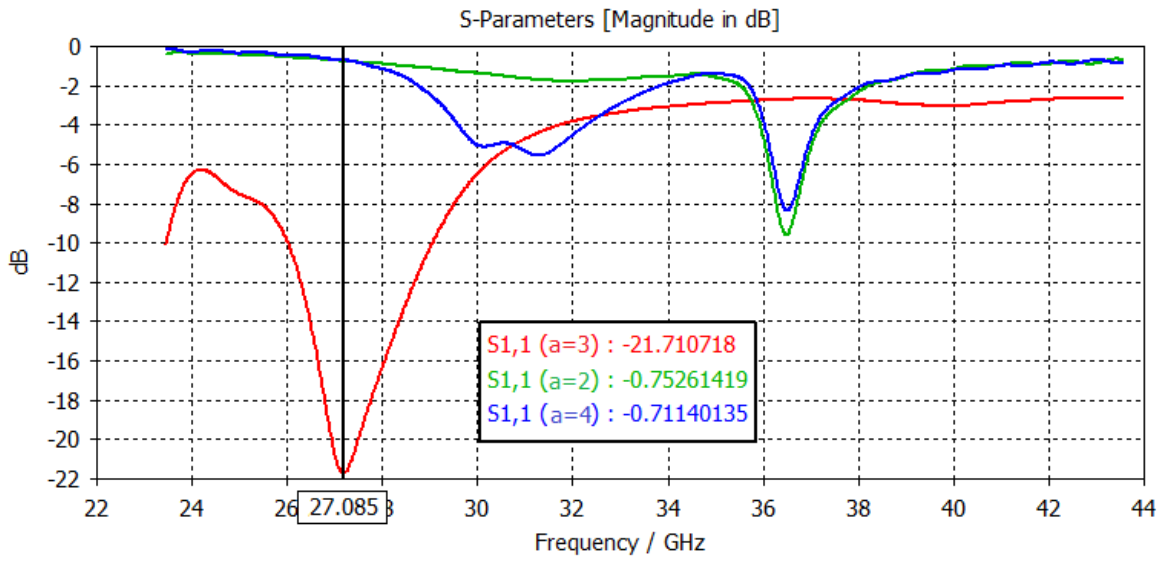
Şekil 4.25. 25 GHz - 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten geometrisi

Anten parametreleri belirlenirken FR-4 katmanın uzaklığı (a) ve bu katman üzerindeki yamaların birbirleri ile olan mesafesi incelenmiştir.  $M_L$  ve  $M_W$  parametrelerinin değişimi sonrasında anten geri dönüş kaybı üzerindeki etkisi Şekil 4.26’de gösterilmiştir. 250  $\Omega$  direnç kullanılarak 27 GHz çalışma frekansı için ayarlanmış antende, FR-4 katmanının uzaklığındaki değişim ise Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde optimum

parametre değerleri  $M_L = 2$  mm,  $M_W = 2,55$  mm ve FR-4 katmanın uzaklığı (a) 3mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.26. Anten parametreleri değişimine göre geri dönüş kaybı karakteristikleri; (a)  $M_L$ , (b)  $M_W$



Şekil 4.27. FR-4 katmanın uzaklığına göre geri dönüş kaybı karakteristikleri

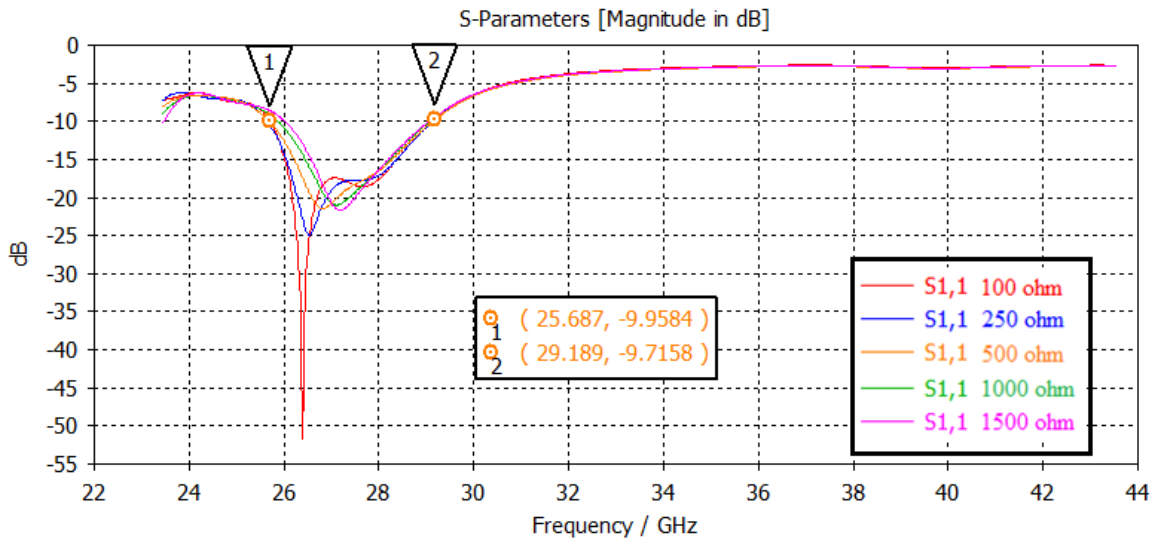
Tasarımın toplam boyutları  $10,04 \times 12,58$  mm<sup>2</sup>dir. Tasarımda, yayın yapan yüzeyinin her iki tarafı optimize edilmiş ve  $0,15 \times 2,98$  mm<sup>2</sup> boyutlarında iki parça bulunmaktadır. Bu parçalar ile yama yüzey arasına değişken bir kapasitif bağlantı elde etmek için ayarlanabilir dirençler yerleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. 25 GHz – 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarım parametreleri

Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
$M_L$	2,00	$f_L$	0,35
$M_W$	2,55	$f_W$	4,80
$T_L$	2,51	$B_L$	3,00
$T_W$	2,05	$B_W$	2,80
$E_W$	0,15	<b>gap</b>	0,15

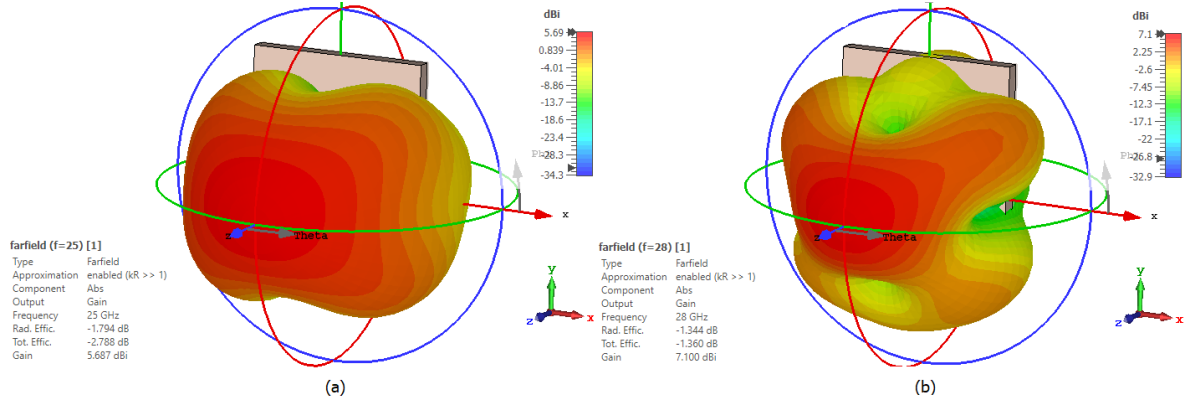
#### 4.6.2. Sonuçlar ve tartışma

Önerilen yeniden yapılandırılabilir anten performansı, saçılma S-parametreleri, radyasyon karakteristikleri ve gerçekleşen kazanç profili aracılığıyla incelenmiştir. FIT tabanlı simülörde gerçekleştirilen sayısal değerlendirmelerde,  $S_{11}$  parametresi dB cinsinden Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. 25 GHz ve 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten  $S_{11}$  parametresi

Önerilen antenin band genişliği -10 dB referansta 3,44 GHz (25,65 - 29,09 GHz) olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, rezonans frekansları ve karşılık gelen band genişliği, otoriteler tarafından tahsis edilen 5G bantlarında korunmuştur. Kullanılan ayarlanabilir dirençlerin farklı  $\Omega$  değerlerine karşılık 3D radyasyon modelleri Şekil 4.29’da gösterilmektedir.



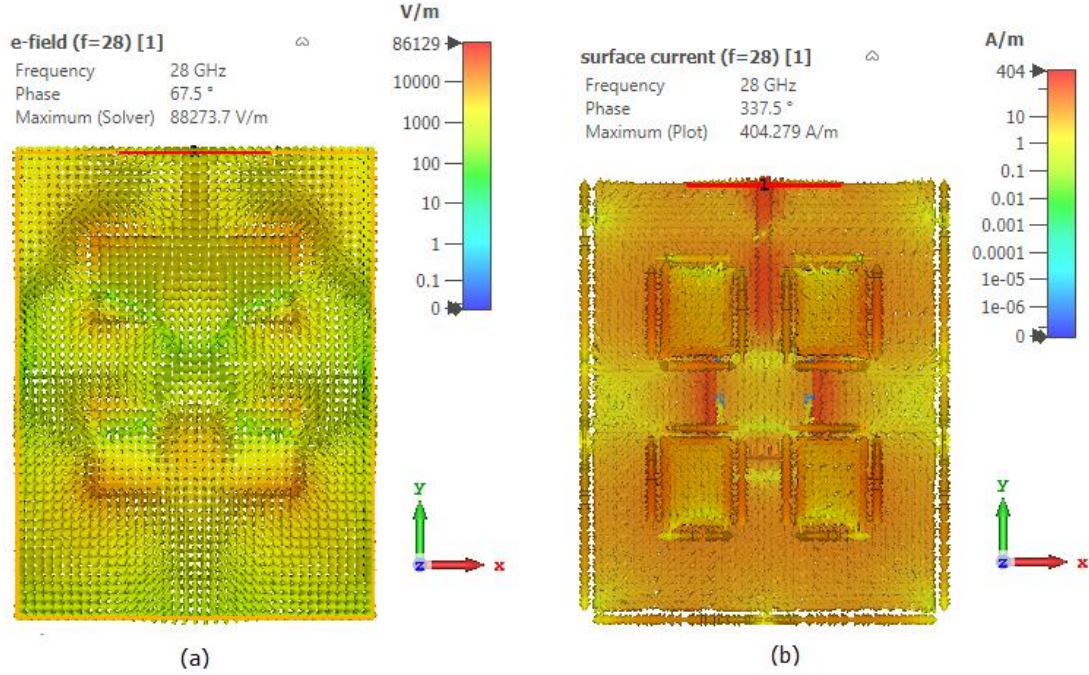
Şekil 4.29. 25 GHz ve 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten 3 boyutlu ışınma örüntüsü; (a) 26 GHz, (b) 28 GHz

Ayrıca Çizelge 4.4 çalışma aralığı üzerindeki farklı frekanslardaki anten kazancını göstermektedir. Çizelgeye göre, Ka-bandı bant genişliğini kapsayan makul kazanç profili elde edilmiştir. Sonuçlar, Ka-bant 5G merkezli iletişim mimarileri ve K-Band radar uygulamaları için önerilen anteni uygun kılmaktadır. Bu sonuçlara bakılarak, önerilen antende farklı direnç değerleri kullanılarak, istenilen çalışma frekansı ayarlandığında kazancında arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. 25 GHz – 29 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten kazanç değerleri

Direnç Değeri	Frekans	Kazanç	Direnç Değeri	Frekans	Kazanç
100 $\Omega$	26,5 GHz	4,91 dB	500 $\Omega$	29,0 GHz	6,70 dB
100 $\Omega$	28,0 GHz	7,10 dB	500 $\Omega$	28,0 GHz	6,86 dB
250 $\Omega$	27,0 GHz	6,38 dB	1000 $\Omega$	27,0 GHz	5,16 dB
250 $\Omega$	28,0 GHz	6,92 dB	1000 $\Omega$	28,0 GHz	6,80 dB
1500 $\Omega$	26,0 GHz	5,02 dB	1500 $\Omega$	28,0 GHz	6,78 dB

Şekil 4.30 (a)'da 28 GHz rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımı gösterilirken Şekil 4.30 (b)'de ise 28 GHz rezonans frekansındaki yüzey akımları dağılımı gösterilmiştir. 28 GHz'deki elektrik alan dağılımları 0-86129 V/m aralığında ayarlanmıştır. 28 GHz'deki yüzey akım dağılımı ise 0-404 A/m aralığında elde edilmiştir.



Şekil 4.30. Frekans yeniden yapılandırılabilir anten yapına ait (a) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 28 GHz Yüzey akım dağılımı

## 4.7. 15,5 GHz – 30 GHz Frekans Yeniden Yapılandırılabilir Anten

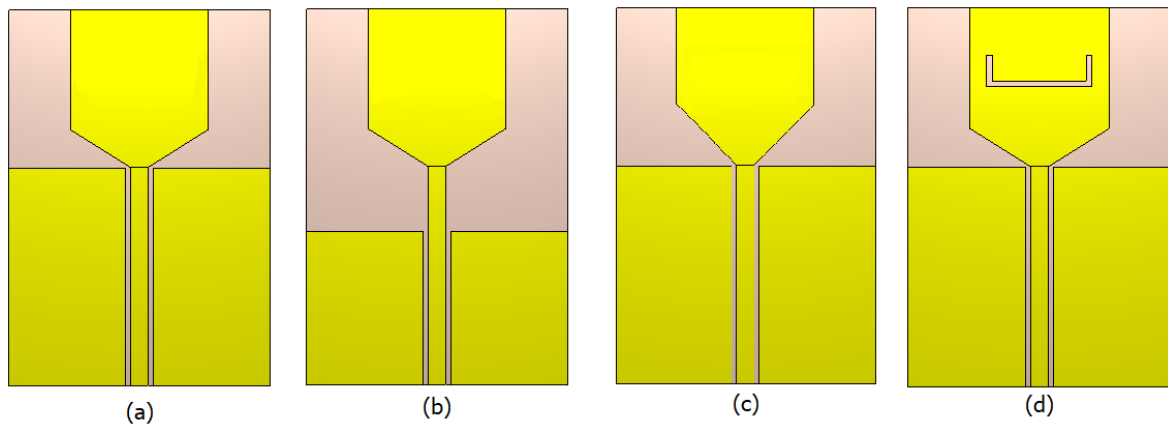
### 4.7.1. Anten tasarımı

Literatürde yeniden yapılandırılabilir antenler üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların büyük çoğunluğunda yeniden yapılandırılma yeteneği PIN diyotlar, FET'ler, MEMS'ler, varaktörler ve optik anahtarlar tarafından sağlanmaktadır. Bu yapılar, sahip oldukları çeşitli avantajlar ve kolaylıklar için tercih edilmekle birlikte ciddi dezavantajlara da sahiptirler. PIN diyotlar kapalı durumda düşük kapasitans ve makul seviyede doğrusallık sağlarken beraberinde yüksek DC güç tüketimi ve karmaşık besleme devresi de gerektirmektedir. FET'ler 2,4 GHz ve 5 GHz bantlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. FET'ler PIN diyotlara nazaran düşük DC tüketimi sağlarken, geniş bant uygulamaları için FET anahtarlar henüz ticari olarak mevcut değildir. RF-MEMS'ler çok düşük ekleme kaybı ve kapalı durumda çok düşük kapasitans sunarlar ve son derece doğrusaldırlar. Buna karşılık düşük anahtarlama hızları, düşük güvenilirlik sağlar. En önemlisi ise yüksek çalıştırma voltajına (20-90V) ihtiyaç duyarlar. Varaktörler belirli bir çalışma frekansı içerisinde kesintisiz ayarlanabilme sağlamaktadır ve düşük DC güç tüketimi sunarlar. Varaktörlerin dezavantajı ise son derece doğrusal olmayan özellikte olmalarıdır. Optik anahtarlar ise anten

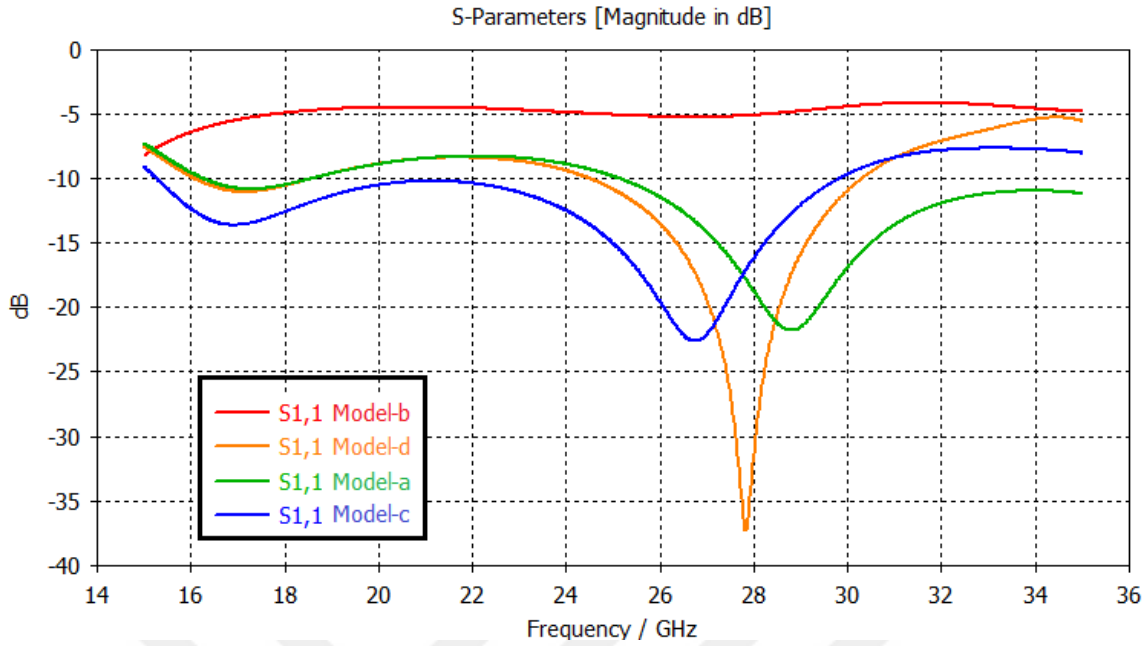
performansını etkileyen parazit oluşturan besleme hatlarına ihtiyaç duymamaktadır. Bu durum onları ön plana çıkartsa da her anten uygulaması için kullanılabilir değildirler.

Tüm bunların yanında, mekanik olarak da antenin yeniden yapılandırılması mümkündür. Bu bölümde esnek poliimid malzeme üzerine inşa edilen frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Poliimid malzemeler düşük dielektrik sabiti, mükemmel mekanik mukavemet ve yüksek termal stabiliteye sahiptir. Sunulan tasarım dielektrik geçirgenliği 4,2 olan poliimid malzeme üzerine inşa edilmiştir. K-bandının tamamını kapsayacak şekilde 14 GHz genişliğinde bir anten tasarımı hedeflenmiştir. Tasarım, modelleme ve sayısal değerlendirme için FIT tabanlı simülatör kullanılmaktadır. Eş düzlemlilik dalgı kılavuzu (CPW) kullanılarak beslenen bu tasarım 50  $\Omega$  empedansa uyum sağlayacak şekilde oluşturulmuştur.

Sunulan anten yapısı nihai sonuca ulaşmadan önce dört temel aşamada tasarlanmıştır. Bu tasarım aşamaları “Model – a”, “Model – b”, “Model – c” ve “Model – d” olacak şekilde isimlendirilmiştir. Model – b’de besleme hattının iki yanındaki GND düzleminin etkisi incelenmiştir. Model – c’de monopol antenin GND düzlemi ile arasındaki açının etkisi incelenirken, Model – d’de ise U slotun etkisi incelenmiştir. Şekil 4.31’de gösterilen tasarım aşamalarına ait geri dönüş kaybı kıyaslama grafiği Şekil 4.32’de gösterilmektedir. Şekil 4.32’den de anlaşılacağı üzere 28 GHz frekansta en iyi sonuç Model – d’de elde edilmiştir.

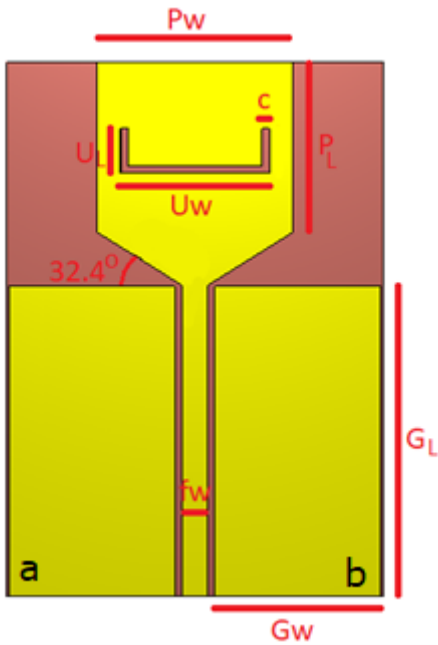


Şekil 4.31. Önerilen antenin tasarım aşamaları; (a) Model-a, (b) Model-b, (c) Model-c, (d) Model-d



Şekil 4.32. Tasarım aşamasında ele alınan modellerin  $S_{11}$  karakteristikleri

Nihai tasarım Şekil 4.33'de de görüleceği üzere GND düzlemiyle  $32,4^\circ$  açı yapacak şekilde U çentikli bir yama antenden oluşmaktadır. Sunulan tasarımın tamamı  $4,26 \times 6,13 \text{ mm}^2$  boyutlarındadır ve Çizelge 4.5'de FIT modelinin anten parametreleri ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 4.33. 15,5 GHz - 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten geometrisi

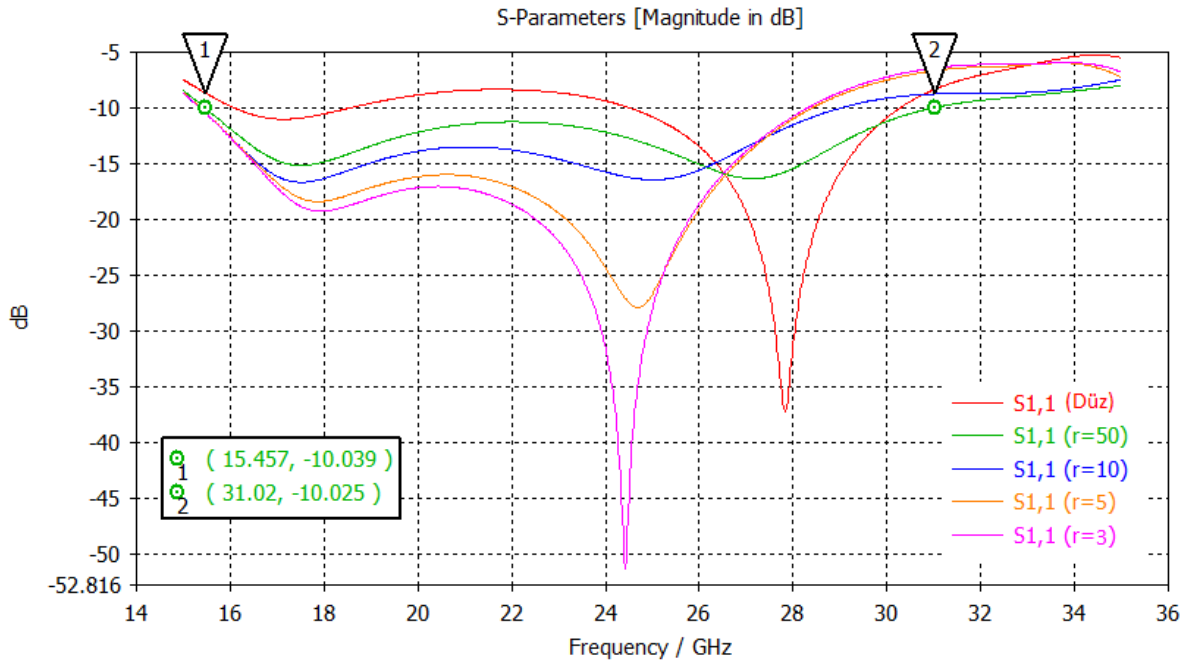
Sunulan esnek tasarımın besleme hattına paralel hayali bir eksen olduğu düşünülürse a ve b uçlarında bir silindiri saracak şekilde anten katlanmıştır. Bu süreçte anten besleme hattının, monopol yapının ve GND düzleminin geometrisi değişmektedir.

Çizelge 4.5. 15,5 GHz – 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarım parametreleri

Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
$P_W$	2,26	$P_L$	2,00
$G_W$	1,95	$G_L$	3,55
$U_W$	1,75	$U_L$	0,52
$f_w$	0,30	$c$	0,10

#### 4.7.2. Sonuçlar ve tartışma

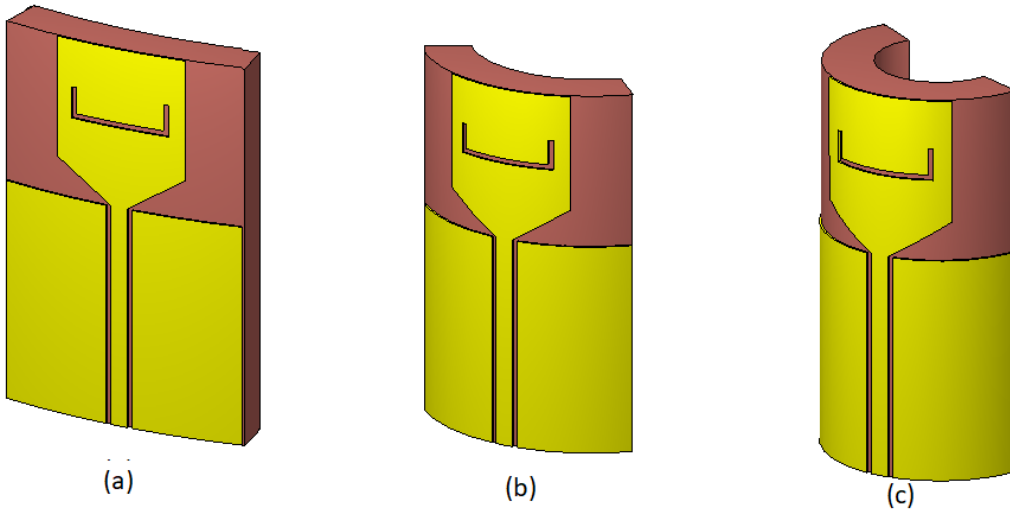
Önerilen MMW esnek anten, çeşitli tasarım parametreleri üzerinde gerçekleştirilen parametrik analiz yoluyla optimize edilmiştir. Önerilen anten yarıçapı “r” olan bir silindirin kavisli yüzeyi boyunca bükülmüştür. Tasarımda bu “r” yarı çapı değiştirilerek antene frekans yeniden yapılandırılabilme özelliği getirilmiştir. Şekil 4.34’de sunulan tasarıma ait  $S_{11}$  grafiği ve Şekil 4.35’de farklı yarıçaplarda bükülmüş yapılar gösterilmiştir.



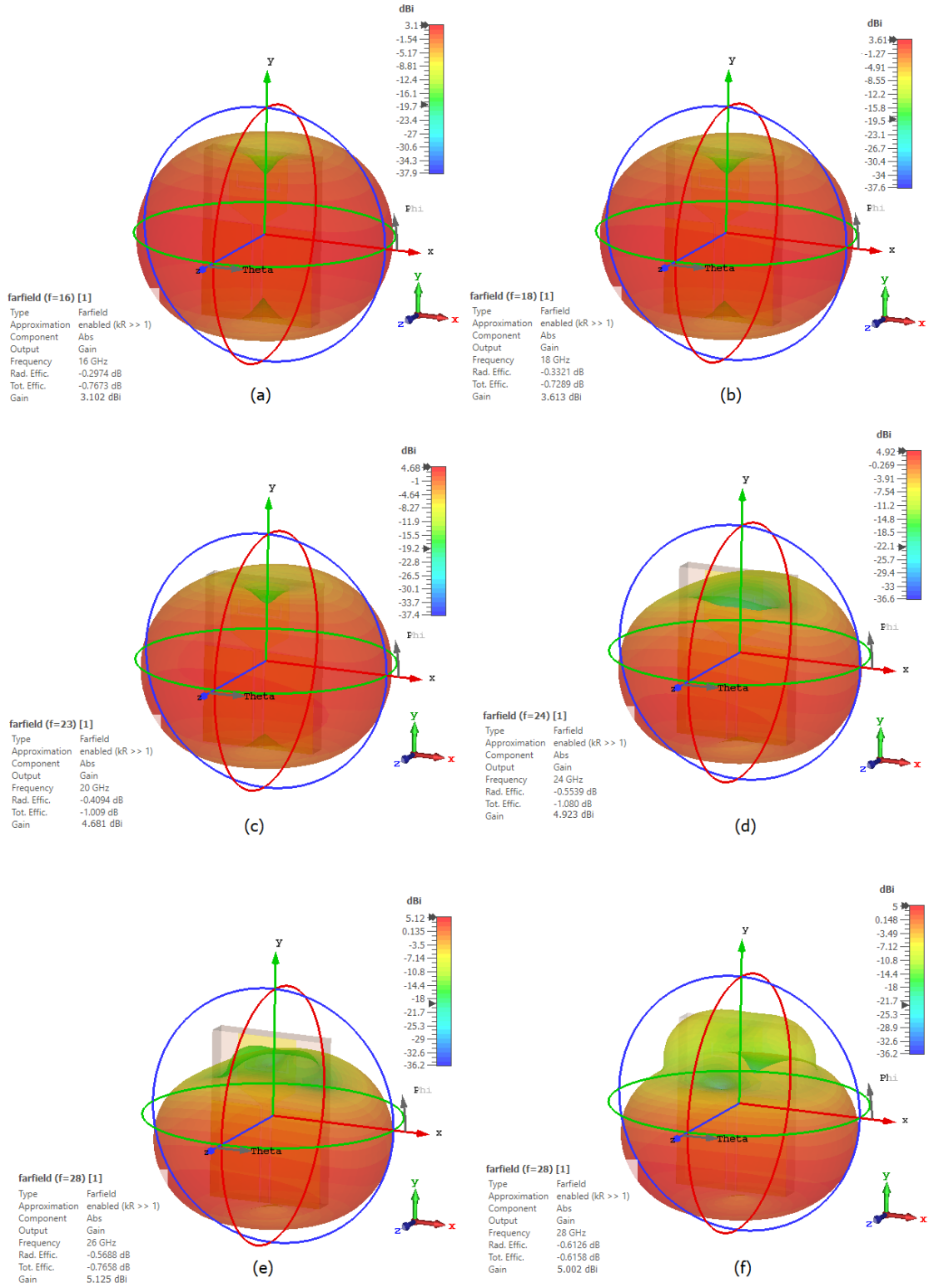
Şekil 4.34. 15,5 GHz ve 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten  $S_{11}$  parametresi



S parametrelerinin gösterildiği grafikten de anlaşılacağı üzere -10 dB referans seviyesinde 15,45 GHz ile 31 GHz arasında 14 GHz'lik bir bant genişliği elde edilmiştir. Bu K-bandının tamamını kapsamaktadır. Dolayısıyla bu tasarım yeni nesil MMW iletişim sistemlerinde ve K-bandı radar uygulamalarında kullanılabilir. Farklı bükülme çaplarında frekans kaymaları görülse de bant genişliği genel olarak korunmaktadır. Işıma desenlerine bakıldığında standart çok yönlü bir yapı görülmektedir. Şekil 4.36'da bazı frekanslar için 3D ışınım desenleri sunulmaktadır.

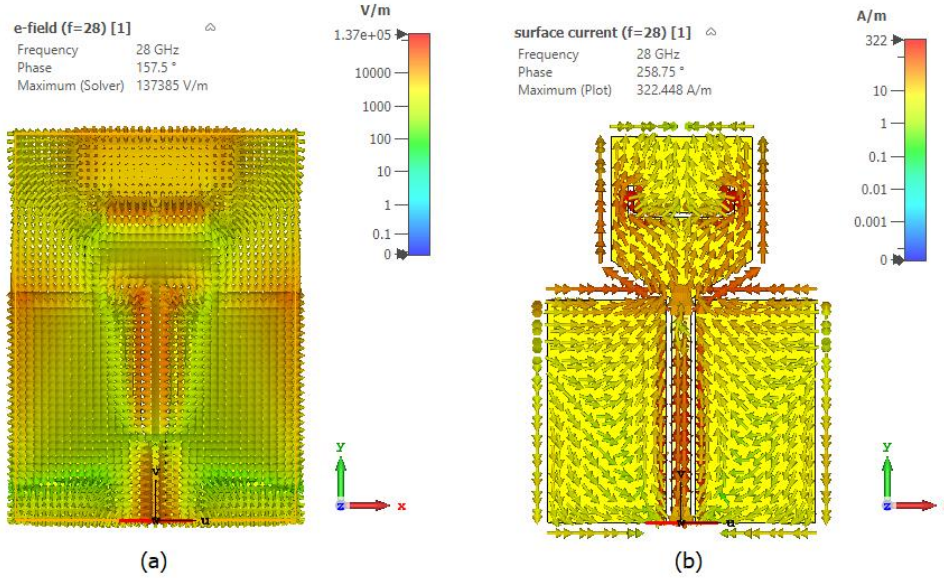


Şekil 4.35. Kavisli yüzey boyunca bükülmüş anten yapısı; (a)  $r=10$  mm, (b)  $r=5$  mm, (c)  $r=2$  mm



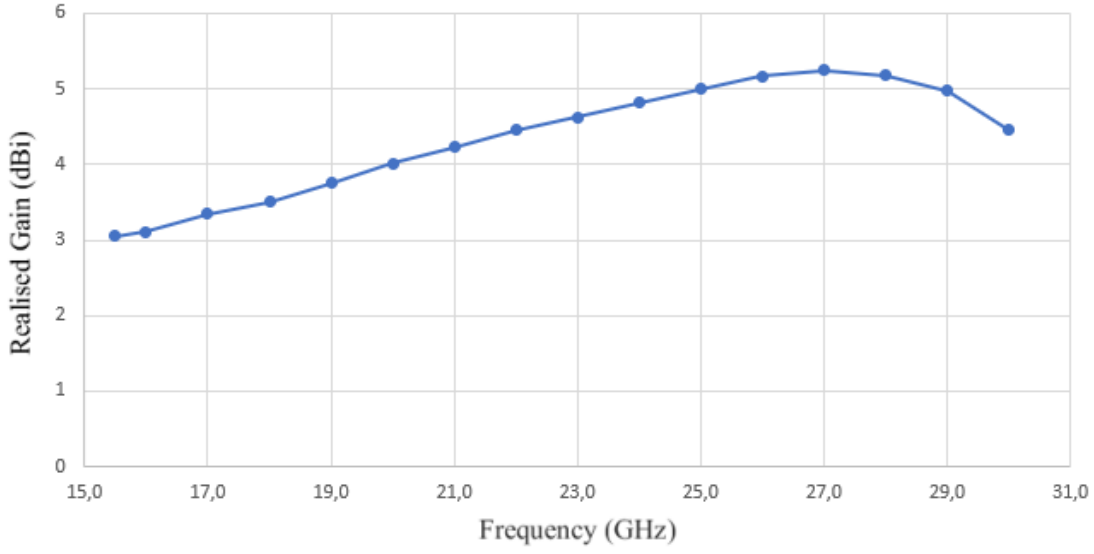
Şekil 4.36. 15,5 GHz ve 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten 3 boyutlu ışınma örüntüsü (a) 16 GHz, (b) 18 GHz, (c) 23 GHz, (d) 24 GHz, (e) 28 GHz (f) 30 GHz

Şekil 4.37 (a)'da 28 GHz rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımı gösterilirken Şekil 4.37 (b)'de ise 28 GHz rezonans frekansındaki yüzey akımları dağılımı gösterilmiştir. 28 GHz'deki elektrik alan dağılımları 0-137385 V/m aralığında ayarlanmıştır. 28 GHz'deki yüzey akım dağılımı ise 0-322 A/m aralığında elde edilmiştir. Yüzey akımları özellikle U slot yapısına ait yan kolların üst bölgesine doğru artış göstermektedir.



Şekil 4.37. Frekans yeniden yapılandırılabilir anten yapına ait (a) 28 GHz Elektrik alan dağılımı, (b) 28 GHz Yüzey akım dağılımı

Tutarlı kazanç profili, güvenilir bir anten performansı sağlamak için tüm bant genişliğinde esastır. Genellikle kazanç her zaman aynı kalmaz ve monopol yama antenlerinin geniş bant uygulamalarında değişiklik gösterebilir. Bu tutarsızlık, yetersiz kazanç büyüklüğü nedeniyle geniş bant uygulamalarında belirli frekanslarının kullanımını kısıtlamaktadır. Önerilen bu tasarımın ayırt edici özelliği, bant genişliği içerisindeki herhangi bir frekansta yakın seviyelerde kazanç elde ederek, eşit derecede güvenilirlik sunmasıdır. Frekansa karşılık elde edilen kazancın simüle edilmiş sonuçları Şekil 4.38'de gösterilmiştir.



Şekil 4.38. 15,5 GHz ve 30 GHz frekans yeniden yapılandırılabilir anten kazanç grafiği

Şekil 4.38’de anlaşılacağı üzere 18 GHz rezonans frekansında anten 3,613 dBi kazanç sağlamaktadır. Ayrıca sunulan anten tasarımı 23 GHz, 24 GHz ve 28 GHz çalışma frekanslarında sırasıyla 4,681 dBi, 4,923 dBi ve 5,125 dBi kazanç sağlamaktadır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6 GHz altı spektrumdaki sınırlı band genişlikleri ve ortaya çıkan tıkanıklık sorunları, yeni nesil iletişim sistemlerinde yüksek frekansların kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmektedir. Milimetre dalga spektrumundaki kullanılmayan band genişlikleri, sistem kapasitesini arttırmak ve daha yüksek veri iletim hızları elde etmek için kullanılabilir. Kapsama alanı, çevresel koşullar ve dielektrik kayıplarla bağlantılı sinyal zayıflamaları, 6 GHz altı sistemlerle karşılaştırıldığında, milimetre dalga mimarisi için oldukça büyük sorunlar teşkil etmektedir. Kısa menzilli altyapılar ve doğru konumlandırma ile bu sorunun üstesinden gelinebilir. Mobil cihazların ve akıllı nesnelere gün geçtikçe artan kullanımı dikkate alındığında antenlerin boyutları, maliyetleri ve performansları önem taşımaktadır. Milimetre dalga spektrumunda çalışan antenler küçük boyutları sayesinde cihazlara kolayca entegre edilebilir. Yeni nesil iletişim sistemlerinde beklenen bir dizi anten performansı özelliği bulunmaktadır. İstenilen performansta anten tasarımı ile 5G ağlarına geçiş hızlandırılabilir.

İletişim sistemlerinde kullanılacak antenlerin, yüksek veri iletim hızları sunması için, yüksek band genişliği, oluşabilecek zayıflamaların üstesinden gelebilmesi için de yüksek kazanç sağlayabilmesi gerekmektedir. Bunun yanında antenlerin kompakt, karmaşıklıktan uzak, seri üretim için elverişli ve uygun maliyetli olması beklenmektedir. Bu sebeple, yüksek bant genişliğine sahip, yüksek kazançlı ve uyarlanabilir anten tasarımları bu çalışmanın temel hedefleridir. Yeni nesil iletişim sistemleri için milimetre dalga spektrumunun sunmuş olduğu avantajlar ve zorluklar Bölüm 2’de sunulmuştur. Bu bölümün temel odak noktası, yeni nesil iletişim sistemleri için yeniden yapılandırılabilir antenlerin önemini ve ihtiyacını belirtmektir. Bu çalışmada FCC ve Ofcom gibi otoritelerin yeni nesil iletişim sistemleri için önerdikleri MMW bandında (26,5 GHz – 40 GHz) çalışan birkaç anten tasarımı sunulmuştur.

Bölüm 3’te yeni bir ışınma deseni yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımda dört PIN diyot kullanılmış ve on beş farklı ışınma deseni elde edilmiştir. Sunulan bu tasarım sayesinde yüksek kazanç değerleri ve geniş bir sinyal kapsama alanı elde edilmiştir. Işınma deseninin yeniden yapılandırılması ile fazladan faz kaydırıcı devreler kullanmadan antenin ışınma huzmesi yönlendirilmektedir.

Bölüm 4’te ise 5G ve radar uygulamaları için 6 farklı frekansı yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı önerilmiştir. Bu tasarımlardan ilki, 5G için önerilen MMW frekansları (28

GHz – 38 GHz) arasında geçiş yapabilme ve K-bandı uygulamaları için 18 GHz'de çalışabilme özelliğine sahiptir. Bu tasarım basit yapısı ile üretim kolaylığı sağlamaktadır ve sağladığı yüksek kazanç yüksek bant genişliği ile umut vadetmektedir. Bir sonraki çalışmada, tasarlanan bu yapının MIMO konfigürasyonu sunulmuştur. Bu çalışmanın en önemli vurgusu frekans yeniden yapılandırılabilir antenler ve MIMO teknolojisinin tercih edilen özellikleri birleştirilerek 5G için uyumlu antenlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktır. Üçüncü tasarım daha önce sunulan yeniden yapılandırılabilir antenin doğrusal dizi oluşturulmuş halidir. Doğrusal dizi antenleri, teker teker çalışan antenlerin ışıma desenlerini, yüksek yönlendirici bir ışın huzmesi ile bir araya getirme yeteneğine sahiptir. MIMO dizileri çok kanallı sinyal iletimini için oldukça faydalı olmakla beraber, yayın yapan her bir anten bireysel performans gösterdiğinden kazanç sınırlıdır. Buna karşılık doğrusal anten dizilerinde çoklu antenlerin birleşik etkisi yüksek kazanç sağlamaktadır. Dördüncü frekans yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı 28 GHz ve 38 GHz frekans bantları arasında geçiş yapabilmektedir ve yüksek kazanç sunmaktadır. Üretim karmaşıklığından uzak kompakt bir yapıya sahip bu tasarım 5G uyumlu mobil cihazlar için tercih edilebilir niteliktedir. Beşinci tasarımda ise kablosuz iletişim uygulamalarının yanında radar uygulamaları için de tercih edilebilecek bir yapı sunulmuştur. Bu tasarımda yeniden yapılandırılabilme yeteneği ayarlanabilir dirençler kullanılarak yapılmıştır. Yüksek bant genişliği sunulan bu tasarımda çalışma frekansları arasında sürekli bir geçiş mümkündür.

Şimdiye kadarki çalışmalarda frekans yeniden yapılandırması için PIN diyot ve ayarlanabilir dirençler kullanılmıştır. Bunlara ek olarak literatürde varaktör, RF-MEMS, optik anahtar gibi yöntemler kullanılan çalışmalar mevcuttur. Bu anahtarlama sistemleri, düşük profil ve kompakt yapı sunmakla beraber ekleme kayıplarına da yol açmaktadır. Oluşabilecek ekleme kayıplarını ortadan kaldırmak için mekanik yeniden yapılandırma teknikleri de tercih edilebilir. Sunulan tasarımda anten geometrisi fiziksek olarak değiştirilmekte ve 15,5-30 GHz frekans aralığında bir yeniden yapılandırma sunmaktadır.

Yeni nesil iletişim sistemlerinin yüksek frekans spektrumunda çalışması beklenmektedir. Buna karşılık mevcut bildirilen anten çalışmalarının büyük bir kısmı daha düşük frekanslar için tasarlanmıştır. Beşinci nesil iletişim sistemleri için araştırmalar milimetre dalga bantlarına yönelmiş olsa da anten gereksinimleri bir dereceye kadar belirsizliğini korumaktadır. Yeni nesil iletişim sistemlerine geçiş sürecinin hızlandırılması anten performans özelliklerinin ve sistematik üretim süreçlerinin daha fazla araştırılması

gerekmektedir. Bu çalışmada yeni nesil hücresele iletişim sistemleri ve K-bandı radar uygulamaları için çeşitli olasılıkları araştırmak üzere anten tasarımına odaklanmaktadır.

Bu çalışmada PIN diyotlar ve ayarlanabilir dirençlerin yanı sıra mekanik olarak uyarlanabilen anten tasarımları sunulmuştur. Gelecek çalışmalarda varaktör ve RF-MEMS anahtarlar da kullanılabilir. MEMS anahtarlar PIN diyotlara nazaran oldukça düşük kayıp ve daha az güç tüketimi sağlayarak, iyi bir doğrusallık sunmaktadırlar.

Bu çalışmada ışınma deseni ve frekansı yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı sunulmuştur. Sonraki çalışmalarda yeni nesil iletişim sistemleri için polarizasyon yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı yapılabilir. Özellikle mobil cihazlarda yaşanabilecek polarizasyon uyumsuzluğundan kaynaklanan kayıplar, polarizasyonun yeniden yapılandırılması ile giderilebilir. Üretim basitliği sağlamak için bu araştırmada çok katmanlı yapılardan ve elektronik, bant aralığı oluklu yapılar, elektrolizle kaplanmış yollar gibi karmaşık yapılardan kaçınılmıştır. Bu yapıların da eklenmesiyle daha verimli yapılar elde edilebilir.

Son olarak radyasyon emiliminin vücut üzerindeki etkisini tespit edebilmek için, mobil cihazlarda ve ağ istasyonlarındaki konumlarını gösteren senaryolarda, MMW antenlerin SAR ölçümleri de yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Aboufoul, T., Parini, C., Chen, X., ve Alomainy, A. (2013). Pattern-Reconfigurable Planar Circular Ultra-Wideband Monopole Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 4973-4980.
- Ahmad, W., ve Khan, W. (2017). Small form factor dual band (28/38 GHz) PIFA antenna for 5G applications. *IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*. Linz.
- Al-Amoodi, K., Mirzavand, R., Honari, M. M., Melzer, J., Elliott, D. G., ve Mousavi, P. (2020). A Compact Substrate Integrated Waveguide Notched-Septum Polarizer for 5G Mobile Devices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12(19), 2517-2521.
- Ali, M. M., ve Sebak, A. (2016). Design of compact millimeter wave massive MIMO dual-band (28/38 GHz) antenna array for future 5G communication systems. *17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, 1-2. Montréal, QC, Canada.
- Alizadeh, M., Shaker, G., De Almeida, J., Morita, P., ve Safavi-Naeini, S. (2019). Remote monitoring of human vital signs using mmWave FMCW radar. *IEEE Access*, 54958–54968.
- Almasi, M., Mehrpouyan, H., Vakilian, V., Behdad, N., ve Jafarkhani, H. (2017). Reconfigurable Antennas in mmWave MIMO Systems. *arXiv preprint*, 50-55.
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S., Lozano, A., Soong, A. C., ve Zhang, J. (2014). What Will 5G Be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 6(32), 1065-1082.
- Awais, M., Riaz, A., ve Khan, W. T. (2019). An Ultra-wideband (16 40 GHz) mmWave Antenna for Automotive Radar and 5G Applications. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. Atlanta, USA.
- Bai, Y. Y., Xiao, S., Tang, M. C., Ding, Z. F., ve Wang, B. Z. (2011). Wide-angle scanning phased array with pattern reconfigurable elements. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 11(59), 4071–4076.
- Balanis, C. (2008). *Modern Antenna Handbook*. New Jersey: John Wiley Sons, Inc.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design (4.Edition)*. New York: John Wiley ve Sons.



- Balleri, A. (2021). Measurements of the Radar Cross Section of a nano-drone at K-band. *IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. Pisa, Italy.
- Bamy, C. L., Mbango, F. M., Konditi, D., ve Mpele, P. M. (2021). A compact dual-band Dolly-shaped antenna with parasitic elements for automotive radar and 5G applications. *Heliyon* (7), 50-57.
- Baykas, T., Sum, C., Lan Z., Wang, J., Rahman, M., Harada, H., ve Kato, S. (2011). IEEE 802.15.3c: the first IEEE wireless standard for data rates over 1 Gb/s. *IEEE Communications Magazine*, 7(49), 114-121.
- Bernhard, J. T. (2005). *Reconfigurable Antennas*. New York: Wiley.
- Bouras, C., ve Diles, G. (2017). Energy efficiency in sleep mode for 5G femtocells. *WD 2017: Wireless Days*, 143-145. Porto, Portugal.
- Burov, V. N., Kuzin, A. A., Myakinkov, A. V., Pluzhnikov, A. D., Ryndyk, A. G., Fadeev, R. S., Rogov, P. S. (2019). Development of the Automotive Radar for the Systems of Adaptive Cruise Control and Automatic Emergency Breaking. *International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*. Moscow.
- Chang, W. S., Yang, C., Cahng, C. K., Liao, W. J., Cho, L., ve Chen, W. S. (2016). Pattern reconfigurable millimeter-wave antenna design for 5G handset applications. *10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Davos.
- Chang, Y., Jiao, Y., Zhang, L., Chen, G., ve Qiu, X. (2017). A K-band seriesfed microstrip array antenna with low side-lobe for anticollision radar application. *Proc. 6th Asia-Pacific Conf. Antennas Propag. (APCAP)*. Xi'an.
- Chen, S. H., Row, J. S., ve Wong, K. L. (2007). Reconfigurable square-ring patch antenna with pattern diversity. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 472-475.
- Chen, S., Row, J., ve Wong, K. (2007). Reconfigurable square-ring patch antenna with pattern diversity. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 472-475.
- Chen, Z., ve Wong, H. (2017). Wideband Glass and Liquid Cylindrical Dielectric Resonator Antenna for Pattern Reconfigurable Design. *EEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2157-2164.
- Chen, Z., ve Zhang, Y. P. (2013). FR4 PCB Grid Array Antenna for Millimeter-Wave 5G Mobile Communications. *2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO)*. Singapore.

- Cheng, W. S., Yang, C., Chang, C. K., Liao, W. J., Cho, L., ve Chen, W. S. (2016). Pattern reconfigurable millimeter-wave antenna design for 5G handset applications. *10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* 1-3. Davos: IEEE.
- Dadgarpour, A., Sorkherizi, M. S., ve Kishk, A. A. (2016). Wideband low-loss magnetolectric dipole antenna for 5G wireless network with gain enhancement using Meta lens and gap waveguide technology feeding. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 12(64), 5094–5101.
- Dahlman, E., Mildh, G., Parkvall, S., Peisa, J., Sachs, J., Selen, Y., ve Sköld, J. (2014). 5G wireless access: Requirements and realization. *IEEE Communications Magazine*, 12(52), 42-47.
- Ding, X., Cheng, Y. F., Shao, W., ve Wang, B. Z. (2017). A wide-angle scanning phased array with microstrip patch mode reconfiguration technique. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 9(65), 4548–4555.
- El-Sayed, M., Gad, N., El-Aasser, M., ve Yahia, A. (2020). Slotted Rectangular Microstrip-Antenna Design for Radar and 5 G Applications. *International Conference on Innovative Trends in Communication and Computer Engineering (ITCE)*. Aswan, Egypt.
- Federal Communications Commission [FCC]. (2016). *81 FR 58269 - Use of Spectrum Bands Above 24 GHz for Mobile Radio Services*. Washington DC: Office of the Federal Register.
- Federici, J. F., Moeller, L., ve Su, K. (2013). 6 - Terahertz wireless communications. *Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications* 156-214. içinde Sawston: Woodhead Publishing.
- Fioranelli, F., Kerneç, J., ve Shah, S. (2019). Radar for Health Care: Recognizing Human Activities and Monitoring Vital Signs. *IEEE Potentials*, 4(38), 16-23.
- Gamba, J. (2019). Automotive Radar Applications. *Radar Signal Processing for Autonomous Driving (Signals and Communication Technology)* 123-142. içinde Singapore: Springer.
- Gan, Z., Tu, Z., ve Xie, Z. (2018). Pattern-Reconfigurable Unidirectional Dipole Antenna Array Fed by SIW Coupler for Millimeter Wave Application. *IEEE Access.*, 22401-22407.
- Gong, P., Li, Z., Huang, H., Sun, G., ve Wang, L. (2011). ICESat GLAS Data for Urban Environment Monitoring. *IEEE TGARS*, 3(49).
- Gromek, D., Stasiak, K., Samczynski, P., ve Radecki, K. (2021). Experimental results of a K-band SAR system for automotive applications. *13th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. Berlin.

- Guo, Z. J., Hao, Z. C., Yin, H. Y., Sun, D. M., ve Luo, G. Q. (2021). A Planar Shared-Aperture Array Antenna with a High Isolation for Millimeter-wave Low Earth Orbit Satellite Communication System. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* ( Early Access ), 1-11.
- Gupta, A., ve Jha, R. K. (2015). A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. *IEEE Access*, 1206-1232.
- Gupta, M. S. (2007). Automotive radar. *RF Microwave. Appl. Syst.* 319-328. içinde Florida: CRC Press.
- Harter, M., Chaudhury, S., Ziroff, A., ve Zwick, T. (2011). Realization of an innovative 3D imaging digital beamforming radar system. *Proc. IEEE CIE Int. Conf. Radar.* Chengdu.
- Horestani, A. K., Shaterian, Z., Naqui, J., Martin, F., ve Fumeaux, C. (2016). Reconfigurable and Tunable S-Shaped Split-Ring Resonators and Application in Band-Notched UWB Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 3766-3776.
- Hossain, M. A., Bahçeci, İ., ve Çetiner, B. A. (2017). Parasitic Layer-Based Radiation Pattern Reconfigurable Antenna for 5G Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 6444-6452.
- Hsu, Y., Huang, T., Lin, H., ve Lin, Y. (2017). Dual-Polarized Quasi Yagi–Uda Antennas With Endfire Radiation for Millimeter-Wave MIMO Terminals. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 12(65), 6282-6289.
- Huang, J., Wang, C., Liu, Y., Sun, J., ve Zhang, W. (2018). A novel 3D GBSM for mmWave MIMO channels. *China Inf. Sci.*, 61(10), 102305.
- Huang, M. Y., Chi, T., Wang, F., Li, T. W., ve Wang, H. (2018). A 23-to-30GHz hybrid beamforming MIMO receiver array with closed-loop multistage front-end beamformers for fullFoV dynamic and autonomous unknown signal tracking and blocker rejection. *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, 68-70. San Francisco.
- Hussain, R., ve Sharawi, M. (2016). Planar meandered-F-shaped 4-element reconfigurable multiple-inputmultiple-output antenna system with isolation enhancement for cognitive radio platforms. *IET Microw., Antennas Propag.*, 1(10), 45-52.
- Hussain, R., Alreshaid, A. T., Podilchak, S. K., ve Sharawi, M. S. (2017). Compact 4G MIMO antenna integrated with a 5G array for current and future mobile handsets. *IET Microwaves, Antennas ve Propagation*, 2(11), 271-279.
- Hyun, E., Jin, Y., ve Lee, J. (2017). Moving and stationary target detection scheme using coherent integration and subtraction for automotive FMCW radar systems. *Proc. IEEE Radar Conf. (RadarConf)*, 476–481. Seattle.

- International Telecommunication Union. (2015, 09 29). *IMT vision: Framework and overall objectives of the future development of IMT for*. 10 14, 2021 tarihinde [www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/en](http://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/en) adresinden alındı
- Iqbal, A., Smida, A., Mallat, N., Ghayoula, R., Elfergani, I., Rodriguez, J., ve Kim, S. (2019). Frequency and Pattern Reconfigurable Antenna for Emerging Wireless Communication Systems. *Electronics*, 407-411.
- Iqbal, S., ve Shereen, M. (2020). Radiation Pattern Reconfigurable Antenna for 5G Applications. *Information Communication Technologies and Robotic Application*, 46-52.
- Jalali Mazlouman, S., Mahanfar, A., Soleimani, M., Chan, H., Menon, C., ve Vaughan, R. G. (2014). Pattern Reconfiguration by Rotating Parasitic Structure Using Electro-Active Polymer (EAP) Actuator. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1046-1055.
- Jehangir, S. S., ve Sharawi, M. S. (2017). A single layer semi-ring slot yagi-like MIMO antenna system with high front-to-back ratio. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2(65), 937-942.
- Jia, Y., Liu, Y., ve Zhang, Y. (2019). A 24 GHz microstrip antenna array with large space and narrow beamwidth. *Microwave and Optical Technology Letters*, 4(62), 1615-1620.
- Jilani, S. F., Abbas, S. M., Esselle, K. P., ve Alomainy, A. (2015). Millimeter-wave frequency reconfigurable T-shaped antenna for 5G networks. *IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. Bologna.
- Jin, G., Li, M., Liu, D., ve Zeng, G. (2018). A Simple Planar Pattern-Reconfigurable Antenna Based on Arc Dipoles. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* , 1664 - 1668.
- Johnson, W. J., Weller, T., ve Gong, X. (2013). Pactive sensors for security applications. *IEEE Annual Conference on Wireless and Microwave Technology (WAMICON)* 1-4 Orlando: IEEE.
- Jusoh, M., Sabapathy, T., Jamlos, M. F., ve Kamarudin, M. R. (2014). Reconfigurable Four-Parasitic-Elements Patch Antenna for High-Gain Beam Switching Application. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 79-82.
- Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K., Einede, M., Younis, M., De Zan, F., Moreira, A. (2009). The Tandem-L Mission Proposal: Monitoring Earth's Dynamics with High Resolution SAR Interferometry. *IEEE Radar Conference*. Pasadena, CA, USA.

- Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., ve Marzetta, T. L. (2014). Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. *IEEE Communications Magazine*, 2(52), 186-195.
- Li, Q., ve Shih, T. Y. (2021). A Kirigami-Inspired Pattern-Reconfigurable Antenna with Switchable Omnidirectional and Unidirectional Beams. *2021 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*, 151-152. California: IEEE.
- Li, Q., Niu, H., Papathanassiou, A., ve Wu, G. (2014). 5G Network Capacity. *IEEE vehicular technology magazine*, 1(9), 71-78.
- Li, W., ve Zhao, Y. (2016). A pattern reconfigurable patch antenna for wide-angle scanning phased array. *Proc. Wireless Inf. Technol. Syst. (PICWITS) Appl. Comput. Electromagn. (ACES)*(12), 1-2.
- Lin, H. S., ve Lin, Y. C. (2017). Millimeter-wave MIMO antennas with polarization and pattern diversity for 5G mobile communications: The corner design. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation ve USNC/URSI National Radio Science Meeting*. San Diego, California, USA.
- Liu, H., Quing, A., Yu, Z., ve Zhang, S. (2019). Broad Band and Wide Scan SIW Cavity-backed Phased Arrays for 5G Applications. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. Singapore.
- Lu, Z. L., Yang, X. X., ve Tan, G. N. (2017). A multidirectional pattern reconfigurable patch antenna with CSRR on the ground. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 416-419.
- Mabrouk, I., Al-Hasan, M., Nedil, M., Denidni, T., ve Sebak, A. (2019). A Novel Design of Radiation Pattern-Reconfigurable Antenna System for Millimeter-Wave 5G Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2585-2592.
- Mahmood, S. M., ve Denidni, T. A. (2016). Pattern-Reconfigurable Antenna Using a Switchable Frequency Selective Surface With Improved Bandwidth. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1148-1151.
- Maltsev, A., Sadri, A., Pudneyev, A., ve Bolotin, I. (2016). Highly Directional Steerable Antennas: High-Gain Antennas Supporting User Mobility or Beam Switching for Reconfigurable Backhauling. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 32-39.
- Mansoul, A., Ghanem, F., Hamid, M. R., ve Trabelsi, M. (2014). A Selective Frequency-Reconfigurable Antenna for Cognitive Radio Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (13), 515-518.
- Mapelli, D., Giudici, D., ve Monti Guarnieri, A. (2011). Study of the Performance of Spaceborne SAR Interferometry in Ka Band for High Resolution DEM and Ocean. *ARSI*.

- Marcus, M., ve Pattan, B. (2005). Millimeter wave propagation: Spectrum management implications. *IEEE Microwave Mag.*, 2(6), 54-62.
- Marzouk, H. M., Ahmed, M., ve Shaalan, A. (2019). Novel Dual-Band 28/38 GHz MIMO Antennas for 5G Mobile Applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 93, 103-117.
- Mehran, F., ve Rahimian, A. (2012). Physical layer performance enhancement for femtocell SISO/MISO soft real-time wireless communication systems employing Serial Concatenation of Quadratic Interleaved Codes. *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*. Tahrán.
- Mehrpouyan, H., Almasi, M., Vakilian, V., Behdad, N., ve Jafarkhani, H. (2018). A New Reconfigurable Antenna MIMO Architecture for mmWave Communication. *International Conference on Communications (ICC)* 1-7. Seoul: IEEE.
- Meredith, J. M. (2019). *Solutions for NR to Support non-Terrestrial Networks (NTN)*, Standard TR 38.821 V16.0.0. Cedex: 3GPP.
- Musavand, A., Zehforoosh, Y., Ojaroudi, H., ve Ojaroudi, N. (2016). A compact UWB slot antenna with reconfigurable band-notched function for multimode applications. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. ACES J.*, 975–980.
- Nandi, D., ve Maitra, A. (2018). Study of rain attenuation effects for 5G Mm-wave cellular communication in tropical location. *IET Microw. Antennas Propag.*, 9(12), 1504-1507.
- Ofcom. (2017). *Update on 5G spectrum in the UK*. London: Office of Communications.
- Ojaroudi, N., Al-Yasir, Y., Abdulkhaleq, A., Elfergani, I., Rayit, A., Noras, J., Abd-Alhameed, R. (2018). Frequency Reconfigurable Antenna Array for MM-Wave 5G Mobile Handsets. *International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems*. Qingdao, China.
- Parchin, N., Abd-Alhameed, R., ve Shen, M. (2019). A radiation-beam switchable antenna array for 5G smartphones. *Proceedings of the Photonics ve Electromagnetics Research Symposium (PIERS)* 17-20. Xiamen, China: IEEE.
- Peterson, G. (2021). Miniature K-Band Radar for Agricultural Remote Sensing. *IEEE 21st Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*. Florida.
- Prather, D. W., Shi, S., Schneider, G. J., Yao, P., Schuetz, C., Murakowski, J., Ross, D. D. (2017). Optically Upconverted, Spatially Coherent Phased-Array-Antenna Feed Networks for Beam-Space MIMO in 5G Cellular Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 12(65), 6432-6443.

- Pringle, L. N., Harms, P. H., Blalock, S., Kiesel, G. N., Kuster, E. J., Friederich, P. G., Smith, G. S. (2004). A reconfigurable aperture antenna based on switched links between electrically small metallic patches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1434-1445.
- Qin, P., Guo, Y. J., Weily, A. R., ve Liang, C. (2012). A pattern reconfigurable U-slot antenna and its applications in MIMO systems. *IEEE Antennas Wireless Propag.*, 453-456.
- Qin, P., Guo, Y. J., Weily, A. R., ve Liang, C. (2012). A pattern reconfigurable U-slot antenna and its applications in MIMO systems. *IEEE Antennas Wireless Propag.*, 453-456.
- Rahimian, A., ve Mehran, F. (2011). RF link budget analysis in urban propagation microcell environment for mobile radio communication systems link planning. *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Çangşa.
- Rajagopalan, H., Kovitz, J., ve Rahmat-Samii, Y. (2014). MEMS reconfigurable optimized E-shaped patch antenna design for cognitive radio. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1056-1064.
- Rajan, S. P., ve Vivek, C. (2019). Analysis and Design of Microstrip Patch Antenna for Radar Communication. *Journal of Electrical Engineering ve Technology (14)*, 923-929.
- Rangan, S., Rappaport, T., ve Erkip, E. (2014). Millimeter wave cellular wireless networks: potentials and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 3(102), 366-385.
- Rappaport, T. S., Murdock, J. N., ve Gutierrez, F. (2011). State of the art in 60 GHz integrated circuits systems for wireless communications. *Proc. IEEE*, 8(99), 1390-1436.
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., . . . Gutierrez, F. (2013). Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! *EEE Access*, 335-349.
- Ren, Z., Zhao, A., ve Wu, S. (2019). MIMO Antenna With Compact Decoupled Antenna Pairs for 5G Mobile Terminals. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7(18), 1367-1371.
- Romputtal, A., ve Phongcharoenpanich, C. (2017). Frequency reconfigurable multiband antenna with embedded biasing network. *IET Microw., Antennas Propag.*, 1369-1378.
- Samimi, M. K., ve Rappaport, T. S. (2016). "3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 7(64), 2207-2225.

- Samiullah Muhammed, A. L., Thakur, A., ve Ali, T. (2018). A Compact Reconfigurable Dual band mm-wave 5G Antenna. *3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. California.
- Santos, R., Penchel, R., Bontempo, M., ve Cerqueira, S. (2016). Reconfigurable printed antenna arrays for mm-wave applications. *10th European Conference on Antennas and Propagation 1-5*. Madrid: EurAPP.
- Sehrai, D. A., Abdullah, M., Altaf, A., Kiani, S., Muhammed, F., Tufail, M., Rahman, S. (2020). A Novel High Gain Wideband MIMO Antenna for 5G Millimeter Wave Applications. *Electronics*, 1031-1044.
- Sharaf, M. H., Zaki, A., Hamad, R., ve Omar, M. (2020). A Novel Dual-Band (38/60 GHz) Patch Antenna for 5G Mobile Handsets. *Sensors*, 50-55.
- Shereen, M. K., Khattak, M. I., ve Al-Hasan, M. (2020). A Frequency and Radiation Pattern Combo-Reconfigurable Novel Antenna for 5G Applications and Beyond. *Electronics*, 1372-1377.
- Shi, S., ve Ding, W. (2015). Radiation pattern reconfigurable microstrip antenna for WiMAX application. *Electronics letters*, 662–664.
- Shoykhetbrod, A., Hommes, A., ve Pohl, N. (2014). A scanning FMCW-radar system for the detection of fast moving objects. *Proc. Int. Radar Conf.*, 1-5. Lille, France.
- Ta, S. X., Choo, H., ve Park, I. (2017). Broadband Printed-Dipole Antenna and Its Arrays for 5G Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, 2183-2186.
- Tang, S., Zhang, Y., Han, Z., Chiu, C., ve Murch, R. (2021). A Pattern-Reconfigurable Antenna for Single-RF 5G Millimeter-Wave Communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2344-2348.
- Walther, L. (2021). *Challenges and Techniques for Characterizing Massive MIMO Antenna Systems for 5G*. Germany: Rohde ve Schwarz. [https://cdn.rohde-schwarz.com/it/seminario/Massive\\_MIMO\\_antenna\\_OTA\\_170420\\_Italy.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/it/seminario/Massive_MIMO_antenna_OTA_170420_Italy.pdf)  
adresinden alindi
- Wang, R., Wang, B., Ding, X., ve Yang, X. (2015). Planar phased array with wide-angle scanning performance based on image theory. *IEEE Trans Antennas Propag.*, 9(63), 3908–3917.
- Wani, Z., Abegaonkar, M., ve Koul, S. (2018). A 28-GHZ ANTENNA FOR 5G MIMO APPLICATIONS. *Electromagnetics Research Letters* (78), 73-79.
- Wells, J. (2009). Faster than fiber: The future of multi-G/s wireless. *IEEE Microw. Magazine*, 3(10), 104-112.



- Xia, H., Lei, J., Meng, L., ve Yang, G. (2016). Design and analysis of a compact reconfigurable phased antenna array with 3D coverage for 5G applications in portable devices. *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*. Shanghai.
- Yang, G., Li, J., Zhou, S. G., ve Qi, Y. (2017). A wide-angle E-plane scanning linear array antenna with wide beam elements. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2923–2926.
- Ye, S., Liang, X., Wang, W., Jin, R., Geng, J., ve Bird, T. S. (2012). High-Gain Planar Antenna Arrays for Mobile Satellite Communications [Antenna Applications Corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 6(54), 256-268.
- Yi, X., Feng, G., Liang, Z., Wang, C., Liu, B., Li, C., Xue, Q. (2019). A 24/77 GHz dual-band receiver for automotive radar applications. *IEEE Access*, 48053–48059.
- Ying, Z. (2012). Antennas in cellular phones for mobile communications. *Proceedings of the IEEE*, 7(100), 2286-2296.
- Yu, C., Li, E., Jin, H., Cao, Y., Su, G., Che, W., ve Chin, K. (2019). 24 GHz horizontally polarized automotive antenna arrays with wide fan beam and high gain. *IEEE Trans. Antennas Propag*, 2(67), 892–904.
- Yuan, Z., ve Chang-Ying, W. (2016). An approach for optimizing the reconfigurable antenna and improving its reconfigurability. *IEEE Int. Conf. Signal Processing, Commun. Comput. (ICSPCC)*. Shaanxi, China.
- Zanki, D., Schuster, S., Feger, R., ve Stelzer, A. (2017). What a Blast!: A Massive MIMO Radar System for Monitoring the Surface in Steel Industry Blast Furnaces. *IEEE Microwave Magazine*, 6(18), 52-69.
- Zhang, J., Ge, X., Li, Q., ve Guizani, M. (2017). 5G Millimeter-Wave Antenna Array: Design and Challenges. *IEEE Wireless Communications* (24), 106-112.
- Zhang, L., Zhao, S., Shang, P., Liu, J., ve Han, F. (2017). Distributed Adaptive Range Extension Setting for Small Cells in Heterogeneous Cellular Network. *IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-7. Sydney.
- Zhao, Q., ve Li, J. (2016). Rain attenuation in millimeter wave ranges. *IEEE Int. Symp. Antennas, Propag. EM Theory*, 1-4. Guilin, China.
- Zheng, K., Wang, D., Han, Y., Zhao, X., ve Wang, D. (2020). Performance and Measurement Analysis of a Commercial 5G Millimeter-Wave Network. *IEEE Access*, 163996-164011.
- Zhou, H., Cao, P., ve Chen, S. (2016). A novel waveform design for multitarget detection in automotive FMCW radar. *Proc. IEEE Radar Conf. (RadarConf)*, 1-5. Philadelphia.

Zhu, H., Cheung, S., ve Yuk, T. (2015). Mechanically pattern reconfigurable antenna using metasurface. *IET Microwaves, Antennas ve Propagation*, 1331-136.

Zhuang, K., Geng, J., Wang, K., Zhou, H., Liang, Y., Liang, X., Ma, W. (2019). ‘Pattern reconfigurable antenna applying spoof surface plasmon polaritons for wide angle beam steering. *IEEE Access*, 15444–15451.

Zulkifli, S., ve Balleri, A. (2020). Design and development of k-band fmcw radar for nano-drone detection. *IEEE Radar Conference (RadarConf20)*. Floransa, İtalya.



## DİZİN

### 4

4G · xv, 7, 9, 18, 35, 66

### 5

5G · 2, 3, iv, v, vii, xv, 5, 6, 7, 8, 9,  
10, 11, 14, 17, 18, 20, 21, 22,  
27, 29, 31, 35, 36, 37, 39, 44,  
46, 48, 52, 53, 59, 62, 63, 64,  
65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72,  
73, 74, 76

### 6

6 GHz altı · 5, 10, 14, 59

### A

absorpsiyon · xiv, 5, 13  
anten kazancı · 15, 18  
AR-GE · 35  
atmosferik zayıflama · 5, 16

### D

Doppler · 17  
dron · 16  
Düşük Dünya Yörüngesi · xvi, 17

### F

Frekans yeniden yapılandırılabilir  
· 6, 35

### G

geniş band · 17, 18, 20, 21, 22,  
25, 35

Geniş huzmeli tarama · 15  
Görüş Hattı Bağlantısı · xvi, 11

### I

IMT · ix, xvi, 11, 12, 66  
ışınma deseni · 6, 8, 20, 21, 24, 25,  
26, 27, 28, 29, 59, 61  
ışınma deseni yeniden  
yapılandırılabilir · 6, 24

### i

interferometrik radar · 16

### K

K bandı · 6, 7  
Ka bandı · 6  
K-bandı · 6, 8, 10, 15, 16, 17, 56,  
60, 61  
kısa menzil · 10, 16, 17  
kısa menzilli · 5, 6, 8, 9, 11, 16, 37

### M

Mekânsal filtreleme · 15  
MIMO · vii, ix, xiv, xv, xvi, 5, 6, 7,  
9, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25,  
26, 35, 39, 40, 41, 42, 43, 44,  
46, 47, 60, 62, 66, 67, 68, 69,  
70, 71, 72, 73  
mikrodalga · iv, 6, 10, 25  
MMW · iv, v, xiv, xvi, 5, 6, 7, 8,  
10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19,  
20, 21, 22, 35, 39, 44, 46, 55,  
56, 59, 61

### N

Nesne tespiti · 15

### O

otonom · 6, 13, 15, 17

### P

penetrasyon · 5  
PIN diyot · xvi, 24, 25, 26, 27, 36,  
38, 48, 49, 59, 60

### R

Radar · vii, xvi, 15, 16, 17, 62, 63,  
64, 65, 66, 68, 70, 71, 72, 73,  
74, 76  
RF-MEMS · 24, 54, 60, 61

### U

ufuk ötesi · 13

### V

varaktör · 24, 35, 60, 61

### Y

Yagi · 18, 22, 66  
yeni nesil iletişim sistemleri · 8, 9,  
20, 35, 59, 61  
Yeni nesil iletişim sistemleri · 9,  
14, 59  
Yüksek frekans · 5, 10



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

