T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

5G HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MİLİMETRE DALGA BOYLU YAMA ANTENLERİN TASARIM VE ÜRETİMİ

Hazırlayan
Barış Gürcan HAKANOĞLU

Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Doktora Tezi

Haziran 2021
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

5G HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MİLİMETRE DALGA BOYLU YAMA ANTENLERİN TASARIM VE ÜRETİMİ

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Barış Gürcan HAKANOĞLU

Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Haziran 2021
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Barış Gürcan HAKANOĞLU

“5G Haberleşme Uygulamaları İçin Milimetre Dalga Boylu Yama Antenlerin Tasarım ve Üretimi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Barış Gürcan HAKANOĞLU	Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince bana her türlü yardımı ve fedakârlığı esirgemeyen, çalışmalarımda bana bilgi ve tecrübeleriyle yön gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında birlikte yol aldığım Dr. Öğr. Üyesi Şekip Esat HAYBER'e, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmek için Abdullah Gül Üniversitesi bünyesinde bulunan RF-Mikrodalga Laboratuvarı'nın teknik altyapı imkânlarını sağlayıp her türlü desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Veli Tayfun KILIÇ'a, ölçümler konusundaki tüm yardım ve destekleri için Tübitak UME'den Osman ŞEN'e ve Ankara Üniversitesi bünyesinde bulunan Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı'nda üretim ve ölçüm konularında her türlü desteği sağlayan meslektaşım Öğr. Gör. İ. Burak KOÇ'a değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Barış Gürcan HAKANOĞLU

Haziran 2021, KAYSERİ

5G HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MİLİMETRE DALGA BOYLU YAMA ANTENLERİN TASARIM VE ÜRETİMİ

Barış Gürcan HAKANOĞLU

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Haziran 2021
Danışman: Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ÖZET

Bu tez çalışmasında milimetre dalga (mm-dalga) spektrumu için yeni yama anten yapıları araştırılmıştır. Tasarlanan yama antenler gelenkesel yapıdaki antenlerden band genişliği, geri dönüş kaybı ve akım yoğunluğu gibi karakteristik özellikler bakımından daha üstündür. mm-dalga bandı için 15 GHz, 30 GHz, 37 GHz ve 39 GHz frekansları seçilmiş ve bu frekanslarda hem yeni geometriler önerilmiş hem de antenlerde kullanılan farklı dielektrik malzemeler farklı frekanslar için karşılaştırılmıştır. 30 GHz'de yapılan yeni tasarımla 10,75 dB geri dönüş kaybı iyileşmesi ve 46 MHz band genişliği artışına ulaşılmıştır. 15 GHz frekansı için metalik yamada yapılan modellemelere ilaveten bozulmuş toprak yapısı da kullanılmıştır. Oluşturulan yeni tasarımla gelenksel antene göre 27,62 dB geri dönüş kaybı iyileşmesi ve 30 MHz band genişliği artışı elde edilmiştir. 37 GHz ve 39 GHz için yapılan çalışmalarda ise daha yüksek dielektrik sabitli malzeme ile yapılan tasarımlar için anten karakteristiklerinde daha yüksek oranlarda iyileşmeler olduğu bulunmuştur. Ek olarak erken 5G bandları için yeni bir minyatürizasyon yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde ayarlama çıkıntısı ekleme tekniği kullanılmıştır ve bu sayede yama antenin kapladığı alanın %50'ye yakın bir oranda azaltılması sağlanmıştır. Ayarlama çıkıntılarının boyu anten boyutları ve dolaysıyla çalışma frekansı ile ilişkili seçilmiş ve böylece farklı frekanslarda da yöntemin uygulanabilirliği artırılmıştır. Bu özellik ile yapılan çalışma literatürde yer alan diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 5G, kablosuz haberleşme; milimetre dalga boyu; mikroşerit yama antenler; milimetre dalga spektrumu; 5G frekansları.

DESIGN AND MANUFACTURING MILLIMETER WAVELENGTH PATCH ANTENNAS FOR 5G COMMUNICATION APPLICATIONS

Barış Gürcan HAKANOĞLU

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD Thesis, June 2021
Supervisor: Assoc Prof. Mustafa TÜRKMEN

ABSTRACT

Acoustic In this thesis, new patch antenna structures are investigated for the millimeter wave (mm-wave) spectrum. The designed patch antennas are superior to conventional antennas in terms of characteristic features such as bandwidth, return loss and current density. For the mm-wave band, 15 GHz, 30 GHz, 37 GHz and 39 GHz frequencies are selected and new geometries are proposed at these frequencies. Different dielectric materials are used in antennas and they are compared for different frequencies. With the new design made at 30 GHz, 10.75 dB return loss improvement and 46 MHz bandwidth increase have been achieved. For the 15 GHz frequency, in addition to the modifications made on the metallic patch, the defected ground structure method is also used. With the new design created, 27.62 dB return loss improvement and 30 MHz bandwidth increase are achieved compared to the conventional antenna. In studies conducted for 37 GHz and 39 GHz, it is found that there are higher improvements in antenna characteristics for designs made with materials with higher dielectric constants. In addition, a new miniaturization method has been proposed for early 5G bands. In the proposed method, the tuning stub addition technique is used and thus the area covered by the patch antenna is reduced by nearly 50%. The size of the tuning stubs has been chosen in relation to the antenna dimensions and the operating frequency. This has increased the applicability of the method at different frequencies with different materials. With this feature, the study differs from other studies in the literature.

Keywords: 5G; wireless communication; millimeter wavelength; microstrip patch antennas; millimeter wave spectrum; 5G frequencies.

İÇİNDEKİLER

5G HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MİLİMETRE DALGA BOYLU YAMA ANTENLERİN TASARIM VE ÜRETİMİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii

YÖNERGEYE UYGUNLUK iii

KABUL VE ONAY iv

TEŞEKKÜR v

ÖZET vi

ABSTRACT vii

İÇİNDEKİLER viii

KISALTMALAR VE SİMGELER x

TABLOLAR LİSTESİ xiv

ŞEKİLLER LİSTESİ xv

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

HÜCRESEL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

1.1. Mobil Hücresel Ağların Gelişimi 2

1.2. Birinci Nesil (1G) 2

1.3. İkinici Nesil (2G) 3

1.4. Üçüncü Nesil (3G) 3

1.5. Dördüncü Nesil (4G) 4

1.6. Beşinci Nesil (5G) 5

1.7. 5G Hücresel Şebeke Mimarisi 9

1.8. Birden Çok Katmanda Spektrum Gereksinimleri 12

1.9. C-Bandı (3,3-4,2 GHz ve 4,4-5 GHz) 13

1.10. Yüksek Frekans Bantları 15

1.11. 5G İçin Diğer Frekans Bantları 18

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

YÖNTEM VE MATERYAL **19**

2.1. Hesaplamalı Elektromanyetik **19**

2.1.1. Sonlu Integrasyon Tekniği (Finite Integration Technique-FIT) 22

2.1.2. CST Microwave Studio 23

2.2. Anten Yapısında Kullanılan Malzemeler **24**

2.3. Üretim Yöntemi **24**

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. 30 GHz İçin Bir Kare Yama Antende Geri Dönüş Kaybı İyileştirilmesi **27**

3.2. 15 GHz İçin Bozulmuş Toprak Düzlem Yapılı Kare Yama Antende Geri Dönüş Kaybı İyileştirilmesi **32**

3.3. 3,5 GHz İçin Bozulmuş Toprak Yapılı Kare Yama Antende Performans İyileştirilmesi **37**

3.4. Alt 6 GHz ve Wi-Fi Frekans Bandlarında Yeni Bir Minyatürizasyon Yöntemi **42**

3.5. 37 ve 39 GHz İçin Deltoid Yarıkların ve Dielektrik Malzeme Farklarının Anten Performansına Etkisi **62**

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Giriş **71**

4.2. Sonuçlar ve Öneriler **71**

KAYNAKÇA **75**

ÖZGEÇMİŞ **82**

KISALTMALAR VE SİMGELER

3D	3 Dimensional
3GPP	3rd Generation Partnership Project
8PSK	8 Phase Shift Keying
ABC	Absorbing Boundary Condition
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AuC	Authentication Center
BS	Base Station
CBRS	Citizen Broadcast Radio Service
CDMA	Code Division Multiple Access
CEM	Computational Electromagnetics
CFIE	Combined Field Integral Equation
CR	Cognitive Radio
D2D	Device to Device Communication
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EFIE	Electric Field Integral Equation
EGPRS	Enhanced GPRS
EIR	Equipment Identitiy Register
EM	Electromagnetics
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finite Element Method
FIT	Finite Integral Technique

FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
FVTD	Finite Volume Time Domain
Gbps	Gigabit per second
GFSK	Gauss Frequency Shift Keying
GHz	Gigahertz
GMSK	Gauss Minimum Shift Keying
GOS	Grade of Service
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HLR	Home Location Register
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IE	Integral Equation
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMT	International Mobile Telecommunication
IMT-A	IMT-Advanced
IMTSC	IMT Single Carrier
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
ITU-R	ITU-Radiocommunication Sector
Kbps	Kilobit per second
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine Communication
MFIE	Magnetic Field Integral Equation
MHz	Megahertz

MIMO	Multiple Input Multiple Output
MIN	Mobile Identification Number
mm-dalga	Milimetre dalga
MMS	Multimedia Messaging Service
mMTC	Massive Machine Type Communication
MoM	Method of Moments
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
MTSO	Mobile Telephone Switching Office
NFV	Network Functions Virtualization
NMT	Nordic Mobile Telephone
NR	New Radio
NTT	Nippon Telephone and Telegraph
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCS	Personal Communication Systems
PDE	Partial Differential Equation
PO	Physical Optics
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTD	Physical Theory of Diffraction
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
SIM	Subscriber Identity Module
SIR	Signal to Interference Ratio
SNA	Scalar Network Analyzer
SNR	Signal to Noise Ratio
TACS	Total Access Communication System
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TLM	Transmission Line Matrix

UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication
UTD	Uniform Theory of Diffraction
VLR	Visitor Location Register
VNA	Vector Network Analyzer
WAP	Wireless Application Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WRC	World Radio Communication
WWW	World Wide Web

c	Serbest uzaydaki ışık hızı (3×10^8 m/s)
ε	Elektriksel geçirgenlik
ε_{eff}	Etkin dielektrik sabiti
$\tan\delta$	Kayıp tanjantı
ε_0	Boş uzayın dielektrik katsayısı
ε_r	Bağıl dielektrik sabiti
f	Frekans
f_r	Rezonans frekansı
λ	Dalga boyu
S_{11}	Yansıma katsayısı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. 5G kullanım senaryoları için çok katmanlı frekans yaklaşımı [41]. 13
Tablo 1.2. WRC-19 ajandasına göre aday frekans bantları [41]. 15
Tablo 3.1. Önerilen antenin geometrik boyutları. 28
Tablo 3.2. Önerilen antenin geometrik boyutları. 32
Tablo 3.3. Optimize edilmiş anten boyutları. 37
Tablo 3.4. Anten#1'in optimize edilmiş parametreleri. 43
Tablo 3.5. Farklı frekanslar için tasarım aşamalarının doğrulanması. 54
Tablo 3.6. Hedef antenler ve önerilen tasarımlar arasındaki karşılaştırma. 61
Tablo 3.7. Önerilen tasarımlar ve literatür çalışmaları arasındaki karşılaştırma. 62
Tablo 3.8. RT5880 taban malzemeli antenler için 37 ve 39 GHz'de boyutlar. 64
Tablo 3.9. RO3003 taban malzemeli antenler için 37 ve 39 GHz'de boyutlar. 64
Tablo 3.10. 37 ve 39 GHz'de çalışan antenler için eşit seçilen optimize boyutlar. 64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 5G mobil iletişim sistemlerinin sunacağı hizmetler [21]. 6
Şekil 1.2. 5G mobil iletişim teknolojisinin başlıca hedefleri [21]. 8
Şekil 2.1. Hesaplamalı elektromanyetik kategorileri [18]. 20
Şekil 2.2. Her iki yüzeyi de bakır kaplı FR4 taban malzemesi. 25
Şekil 3.1. İçeriden beslemeli kare mikroşerit antenler, (a) Geleneksel, (b) Önerilen. 29
Şekil 3.2. Anten#1 ve Anten#2 için yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi. 30
Şekil 3.3. Yama antenlerin akım dağılımları, (a) Anten#1, (b) Anten#2. 31
Şekil 3.4. Yama antenlerin ışıma örüntüleri, (a) Anten#1, (b) Anten#2. 31
Şekil 3.5. (a) 15 GHz'de çalışan orjinal model Anten#1, (b) Yeni geometriye sahip önerilen elmas şekilli yarıklara sahip model Anten#2. 33
Şekil 3.6. 15 GHz 'de Anten#1 ve Anten#2 için yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi. 34
Şekil 3.7. Anten#3 için elmas şekilli yarık açılmış toprak düzlemi. 34
Şekil 3.8. Yarık açılmış toprak düzlemli tasarım için yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi. 35
Şekil 3.9. Antenlerin akım dağılımları, (a) Anten#1, (b) Anten#3. 36
Şekil 3.10. Antenlerin ışıma örüntüleri (a) Anten#1, (b) Anten#3. 36
Şekil 3.11. Dahili beslemeli dikdörtgen yama anten. 38
Şekil 3.12. Eşkenar dörtgen şekilli yuvaları ile Anten#2 önden görünüş. 38
Şekil 3.13. (a)Anten#3 arkadan görünüş, (b)Anten#4 arkadan görünüş. 39
Şekil 3.14. Yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi, Anten#1 ve Anten#2. 39
Şekil 3.15. Yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi, Anten#3 ve Anten#4. 40
Şekil 3.16. Önerilen anten için uzak alan ışıma örüntüleri, (a) Anten#1, (b) Anten#2, (c) Anten#3, (d) Anten#4. 41
Şekil 3.17. Oluşturulan modeller için akım dağılımları, (a) Anten#1, (b) Anten#2, (c) Anten#3, (d) Anten#4. 42
Şekil 3.18. Tasarım parametrelerinin gösterimi. 43
Şekil 3.19. Anten#1'in 3,5 GHz için yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi. 44
Şekil 3.20. Üst yayılan kenara çıkıntı yerleştrilmiş Anten#2. 45
Şekil 3.21. *stub_length*=*Lp*/50 için *stub_width* değişiminin frekansa etkisi. 46
Şekil 3.22. *stub_length*=5*Lp*/50 için *stub_width* değişiminin frekansa etkisi. 46

Şekil 3.23. *stub_length*=15*Lp*/50 için *stub_width* değişiminin frekansa etkisi.....47
Şekil 3.24. *stub_length*=25*Lp*/50 için *stub_width* değişiminin frekansa etkisi.....47
Şekil 3.25. *stub_width*=W*p*/50 için *stub_length* değişiminin frekansa etkisi. 48
Şekil 3.26. *stub_width*=5W*p*/50 için *stub_length* değişiminin frekansa etkisi. 48
Şekil 3.27. *stub_width*=15W*p*/50 için *stub_length* değişiminin frekansa etkisi. 49
Şekil 3.28. *stub_width*=25*Wp*/50 için *stub_length* değişiminin frekansa etkisi. 49
Şekil 3.29. Ek ayar çıkıntıları ile Anten#3. 50
Şekil 3.30. *stub_2_length*=5.6 mm için *stub_2_width*'in etkileri. 51
Şekil 3.31. *stub_2_width*=5 mm için *stub_2_length*'in etkileri. 51
Şekil 3.32. Üç ayarlama çıkıntısı ve bir yuvaya sahip önerilen anten modeli, Anten#4.52
Şekil 3.33. *slot_length*=21 mm için *slot_width* değişiminin etkileri. 53
Şekil 3.34. *slot_width*=2 mm için *slot_length* değişiminin etkileri. 53
Şekil 3.35. Anten #0, #1, #2, #3, ve #4 için frekans cevabı karşılaştırmaları. 54
Şekil 3.36. Önerilen tasarım prosedürü için akış şeması. 55
Şekil 3.37. Ölçüm düzeneği. 56
Şekil 3.38. Üretilen Anten#4'ün boyutları. 57
Şekil 3.39. Anten#4 için ölçüm ve simulasyon sonuçlarının karşılaştırılması. 58
Şekil 3.40. 2.43 GHz'de Anten#0 and Anten#4 için ışıma örüntüleri, (a) E–düzlemi, (b) H-düzlemi.....58
Şekil 3.41. Rezonans frekanslarında akım dağılımları, (a) Anten#0, (b) Anten#4. 59
Şekil 3.42. Önerilen yöntemin 3,5 GHz'de çalışan anten için doğrulanması. 60
Şekil 3.43. Önerilen yöntemin 4,7 GHz'de çalışan anten için doğrulanması. 60
Şekil 3.44. Önerilen yöntemin 5,8 GHz'de çalışan anten için doğrulanması. 61
Şekil 3.45. 37 GHz ve 39 GHz için referans anten modeli. 63
Şekil 3.46. 37 GHz ve 39 GHz frekanslarinda çalışan antenler için önerilen model.....64
Şekil 3.47. RT5880 taban malzemeli antenin yansıma katsayısının frekansla değişimi.65
Şekil 3.48. RO3003 taban malzemeli antenin yansıma katsayısının frekansla değişimi. 66
Şekil 3.49. Deltoid şekilli yarıklara sahip 37 GHz'de RT5880 taban malzemeli anten ışıma örüntüleri. 67
Şekil 3.50. Deltoid şekilli yarıklara sahip 39 GHz'de RT5880 taban malzemeli anten ışıma örüntüleri. 67

Şekil 3.51. Deltoid şekilli yarıklara sahip 37 GHz'de RO3003 taban malzemeli anten ışıma örüntüleri. 68
Şekil 3.52. Deltoid şekilli yarıklara sahip 39 GHz'de RO3003 taban malzemeli anten ışıma örüntüleri. 68
Şekil 3.53. Deltoid şekilli yarıklara sahip RT5880 dielektrik taban malzemeli önerilen anten modelleri üzerindeki akım dağılımları, (a) 37 GHz, (b) 39 GHz. 69
Şekil 3.54. Deltoid şekilli yarıklara sahip RO3003 dielektrik taban malzemeli önerilen anten modelleri üzerindeki akım dağılımları, (a) 37 GHz, (b) 39 GHz. 69

GİRİŞ

Yeni nesil 5G kablosuz haberleşmenin şu anki 4G LTE (Long Term Evolution) şebekelerine göre en büyük avantajı Gbps seviyesinde veri hızı, baz istasyonları verici kapasitelerinin yükselişi ve kullanıcı tarafından algılanan servis kalitesinde (Quality of Service-QoS) önemli derecede artış olacak olmasıdır. Kablosuz şebeke istatistikleri gezgin trafik yoğunluğunun çok büyük oranlarda arttığını göstermektedir. Bu artışın en büyük sorumlusu akıllı telefonlardır. Bunun ötesinde araştırmacıların keşfettiği yeni uygulamalar yine bu veri trafiğini artırma yönünde etki edecek ve mevcut sistem bunu karşılayamayacaktır. Bu uygulamalar arasında IoT (Internet of Things), D2D (Device to Device Communication), e-sağlık, M2M (Machine to Machine Communication) ve finansal teknoloji sayılabilir.

Bu tez çalışması ile üretilecek olan anten sistemlerinin, lisanssız kullanıma açılan kablosuz geniş bant frekansları 15 GHz, 28 GHz, 37 GHz, 39 GHz bantlarında, kablosuz yerel alan ağları (Wireless Local Area Networks-WLAN) cihazları, kablosuz kişisel alan ağları (Wireless Personal Area Networks-WPAN), vücut üstü kablosuz cihazlar, araba çarpışma önleyici radarlar ve faz-dizilim radarları gibi birçok uygulamada kullanılması öngörülmektedir. Daha kompakt ve ucuz alıcı-verici tasarımları ve genel sistem performansını arttıracak yeni tekniklerin geliştirilmesiyle, mm-dalga sistemleri çok daha fazla uygulama alanında kullanılacaktır. İlaveten erken 5G frekansları için yeni bir minyatürizasyon yöntemi de yine bu tez kapsamında önerilecektir. Bu yöntemde kullanılacak modelleme anten boyutları ile ilişkili seçileceğinden, farklı frekans bandları için de kullanılabilir olacaktır. Bu yönüyle literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılacaktır. Belirli frekanslarda çalışacak daha küçük boyutlu antenler cihaz tasarımcılarının daha fazla donanımı cihazları içinde tasarlayabilmelerine imkân verecektir Geleneksel antenlerle aynı veya daha iyi karakterstiklere sahip daha küçük antenler bu açıdan günümüz teknolojisinde büyük önem taşımaktadır.

1. BÖLÜM

HÜCRESEL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

1.1. Mobil Hücresel Ağların Gelişimi

Mobil kablosuz endüstrisi, 1970'lerin başından beri teknoloji oluşturma, değişim ve gelişimine başlamıştır. 1990'ların ortalarından itibaren hücresel iletişim endüstrisi patlayıcı bir büyümeye tanık olmuştur. Kablosuz iletişim ağları, hücresel konsept ilk kez 1960'larda ve 1970'lerde uygulandığında, herkesin hayal edebileceğinden çok daha yaygın hale gelmiştir. Mobil hücresel aboneler her yıl yüksek seviyelerde artmaktadır [1-2].

Abone sayısındaki hızlı artış gezgin haberleşmenin verimli bir şekilde uygulandığının göstergesi olmuştur. Kullanıcıların artışı operatörlerin yeni teknolojileri hayata geçirmesinde hızlandırıcı bir unsur olmuştur.

1.2. Birinci Nesil (1G)

1G ilk nesil kablosuz telefon teknolojisidir. Kullanılan cep telefonları analog telefonlardı ve 1980'de tanıtılmışlardır. Öncesinde 1979'da, dünyanın ilk hücresel sistemi Japonya'nın Tokyo kentinde Nippon Telephone and Telegraph (NTT) tarafından faaliyete geçirilmiştir. Avrupa'da en popüler iki analog sistem Nordic Mobile Telephone (NMT) ve Total Access Communication System (TACS) idi. Diğer analog sistemler de 1980'lerde Avrupa'da tanıtılmıştır. Tüm sistemler devir ve dolaşım yeteneği sundu, ancak hücresel ağlar ülkeler arasında birlikte çalışamadı. Bu, birinci nesil mobil ağların ana dezavantajıydı. 1G'nin kapasitesi düşük güvenilir olmayan aktarımı, zayıf sesli bağlantılara sahipti ve sesli aramalar radyo kulelerinde gerçekleştiğinden ve bu aramaların parazitlere karşı duyarlı olmalarından dolayı güvenlik yoktu.

ABD'de Advanced Mobile Phone System (AMPS), 1982'de piyasaya sürülen ilk 1G standardıydı. AMPS sistemine, federal iletişim komisyonu (Federal Communications Commission-FCC) tarafından 0,8-0,9 GHz frekans aralığı içinde 40 MHz bant genişliği tahsis edildi. 1988'de AMPS'ye genişletilmiş spektrum olarak adlandırılan ek 10 MHz bant genişliği tahsis edilmiştir [3-5].

1.3. İkinici Nesil (2G)

2G, 1990'ların başında dijital teknolojilere dayanan ikinci nesil kablosuz standartlardır. 1991'de 2G Finlandiya'da piyasaya sürüldü. 2G, metin mesajı, resimli mesajlar ve Multimedia Messaging Service (MMS) gibi hizmetler sağladı. 2G hem gönderen hem de alıcı için daha fazla güvenliğe sahiptir. Tüm metin mesajları dijital olarak şifrelenir, bu da verilerin yalnızca hedeflenen alıcının alabileceği ve okuyabileceği şekilde aktarılmasına izin verir. 2G sistemi, TDMA ve CDMA gibi dijital mobil erişim teknolojisini kullanır. TDMA, sinyali zaman dilimlerine bölerken, CDMA her kullanıcıya bir çoklu fiziksel kanal üzerinden iletişim kurmak için özel bir kod tahsis eder [6].

Mobil haberleşme için küresel system (Global System for Mobile Communication-GSM), kullanılan tüm mobil teknolojiler arasında en yaygın standarttır. GSM standardı, cep telefonu operatörleri arasında uluslararası dolaşımı çok yaygın hale getirerek abonelerin dünyanın birçok yerinde telefonlarını kullanmalarına olanak tanır. GSM, 0,9 ve 1,8 GHz bantlarında kanal başına 8 çağrıya kadar çoğullama yapmak için TDMA kullanır. GSM yalnızca ses iletmekle kalmaz, aynı zamanda 14.4 kbps'ye kadar hızlarda devre anahtarlamalı verileri de iletebilir. 20 yıl boyunca GSM teknolojisi, pazarda daha iyi hizmetler sunmak için sürekli olarak geliştirildi. Orijinal GSM sistemine dayalı yeni teknolojiler geliştirildi ve 2,5 ve 2,75 nesil (2,5G ve 2,75G) sistemler olarak bilinen bazı gelişmiş sistemlere yol açtı [4-6].

1.4. Üçüncü Nesil (3G)

3G, üçüncü nesil cep telefonu standartları ve teknolojisidir. 2 GHz aralığında küresel frekans bandı uygulamak için bir plan hazırlayan Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'ne (International Telecommunications Union-ITU) dayanmaktadır ve bu, dünyadaki tüm ülkeler için her yerde bulunan tek bir kablosuz iletişim standardını

destekleyecektir. CDMA sistemleri için 3G'nin gelişimi, CDMA 2000'e yol açmıştır [6-7].

3G teknolojileri, ağ operatörlerinin kullanıcılara daha geniş bir yelpazede daha gelişmiş hizmetler sunmasını sağlarken, gelişmiş spektral verimlilik yoluyla daha büyük ağ kapasitesi elde etmesini de sağlar. Hizmetler arasında geniş alan kablosuz sesli telefon, görüntülü aramalar, geniş bant kablosuz veriler, mobil televizyon, küresel konumlandırma sistemi (Global Positioning System-GPS) ve video yer alır. Bir önceki nesilde olduğu gibi yapılan geliştirme çalışmaları ile 3,5G ve 3,75G sistemleri de daha sonra hizmete alınmıştır [7].

1.5. Dördüncü Nesil (4G)

4G aslında bir önceki nesle göre çok gelişmiş ve çok yeni bir standart değildir. Operatörler bunu bir pazarlama yöntemi olarak düşünmüşlerdir. 3G temelli yapılan hız artırımları yine de abonelerin beklentilerini karşılamış ve yeni bir nesil olarak karşımıza çıkmıştır. 4G'den beklenti, uçtan uca İnternet Protokolü üzerinden yüksek ses/video akışıdır. Uzun süreli gelişim (Long Term Evolution-LTE) bazen 4G olarak da adlandırılır ve hareketli kullanıcılar için 150 Mbps veri indirme hızları ve sabit kullanıcılar için 1 Gbps hızları sağlayabilir. 4G, mobil multimedya için, her zaman her yerde küresel destek ve entegre özelleştirilmiş kişisel hizmet ile dördüncü nesil kablosuz teknolojidir denebilir [7-8]. Kullanıcıların ilgisini çeken 4G hizmetlerinin temel özellikleri, uygulama uyarlanabilirliği ve yüksek dinamizm kullanıcı trafiği, radyo ortamı, hava arayüzleri ve hizmet kalitesidir. Avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Etkileşimli medya, ses ve video akışı, oyun, internet ve diğer geniş bant hizmetleri için destek.
- IP tabanlı mobil sistem.
- Yüksek hız, yüksek kapasite ve bit başına düşük maliyet.
- Küresel erişim, hizmet taşınabilirliği ve mobil hizmetleri ölçeklendirme
- Tıkanıklıktan kaçınma.

- Çoklu protokollerin kesintisiz ağı. 4G'nin tamamı IP olduğu için, tüm yaygın ağ teknolojileriyle uyumlu olacaktır.

- Diğer analog kablosuz teknolojilerle birlikte önceden var olan 3G sistemlerini idare etmek için altyapı.

Genel olarak 4G ağının, kalite ve veri aktarım hızları açısından mevcut 3G stratejilerine üstün bir alternatif geliştirmeyi kolaylaştırmak için tasarlandığına inanılmaktadır. 4G, sofistike grafik kullanıcı arayüzü, yüksek kaliteli oyun, yüksek tanımlı video akışı ve yüksek performans gibi etkileyici kullanıcı uygulamalarıyla kablosuz deneyimini tamamen yeni bir seviyeye getirmeyi vaat ediyor. Bu bakış açısıyla, yeni veri ağının, çeşitli ihtiyaçlar için minimum kesinti ile yüksek hızlı veri ağlarına bağımlı hale gelen tüketici ve farklı endüstrilerin beklenen taleplerini karşılaması çok önemlidir [6-8].

1.6. Beşinci Nesil (5G)

Kablosuz mobil iletişim sistemlerinin olağanüstü başarısı aynı zamanda yenilikçi teknolojilerin ilerleme hızını da yansıtmıştır. 2G mobil iletişim sistemlerinin hizmete sunulduğu 1991 yılından 3G sistemlerin ilk hizmete başladığı 2001 yılına kadar geçen sürede kablosuz mobil ağlar saf telefon sisteminden zengin multimedya içeriklerini taşıyabilir bir ağa dönüşmüştür. 4G kablosuz sistemler tüm hizmetler için internet protokolü (IP) kullanarak Uluslararası Mobil İletişim Yetkilendirme (International Mobile Telecommunications-Advanced, IMT-A) gereksinimlerini yerine getirmek için tasarlanmışlardır. 4G sistemlerde ileri bir radyo ara yüzü, OFDM, MIMO sistem ve bağlantı adaptasyon teknolojileri ile birlikte kullanılmaktadır. 4G kablosuz ağlar yerel kablosuz erişim gibi düşük gezginlik için 1 Gbps veri hızlarını, mobil erişim gibi yüksek gezginlik için ise 100 Mbps veri hızlarını destekleyebilmektedir. LTE ve uzantıları (LTE-Advanced sistemler) pratik 4G sistemler olarak son yıllarda kullanımda olan teknolojidir. Diğer taraftan gelişen kablosuz iletişim sistemlerinin üstesinden gelmesi gereken çeşitli zorluklar da bulunmaktadır. En önemli sorunlardan birisi hücresel iletişim sistemleri için tahsis edilen radyo frekans spektrumunun fiziksel azlığıdır. Hücresel sistemlerde birkaç yüz MHz'den birkaç GHz'e kadar uzanan ultra yüksek frekans bantları yoğun olarak kullanılmaktadır. Bir diğer zorluk ise gelişmiş kablosuz teknolojilerin dağıtımının yüksek enerji tüketim maliyetine sebep olmasıdır. Kablosuz iletişim sistemlerinde enerji tüketiminin artışı şu anda çevre için büyük bir tehdit olarak kabul edilen karbondioksit

emisyonunun artışını doğrudan etkilemektedir. Buna ek olarak baz istasyonlarının enerji tüketimlerinin operatörlerin toplam enerji tüketiminde %70 oranında etkili olduğu da operatörler tarafından rapor edilmektedir. Aslında etkin enerjili iletişim 4G kablosuz sistemlerin ilk gereksinimlerden birisi olmayıp, daha sonraki aşamalarda bir sorun olarak gündeme gelmiştir. Bunun dışında diğer zorluklar ise ortalama spektral verimlilik, yüksek veri hızı ve gezginlik, sorunsuz kapsama alanı, QoS gereksinimleri ve bölünmüş kullanıcı deneyimi olarak sınıflandırılabilir [9-13].

5G mobil iletişim sistemlerinin 2020'li yıllarda standartlaştırılması beklenmektedir. Şu an için var olan mevcut bilgiler ışığında 4G sistemler ile karşılaştırıldığında, 5G iletişim ağlarının 1000 kat daha fazla sistem kapasitesi, 10 kat daha fazla spektral verimlilik, enerji verimliliği ve veri hızı ve 25 kat daha fazla ortalama hücre hacmi sunması beklenmektedir [24]. 5G mobil iletişim sistemlerinin amacı herkes ve her şey (insan-makine, makine-makine) için nerede olurlarsa olsunlar ne zaman ihtiyaç duyarlarsa duysunlar ne tür hizmet talep ettiklerine bakılmaksızın kesintisiz ve kapsamlı bir iletişim gerçekleştirmek, kısacası tüm dünyayı birbirine bağlamaktır.



Şekil 1.1. 5G mobil iletişim sistemlerinin sunacağı hizmetler [21].

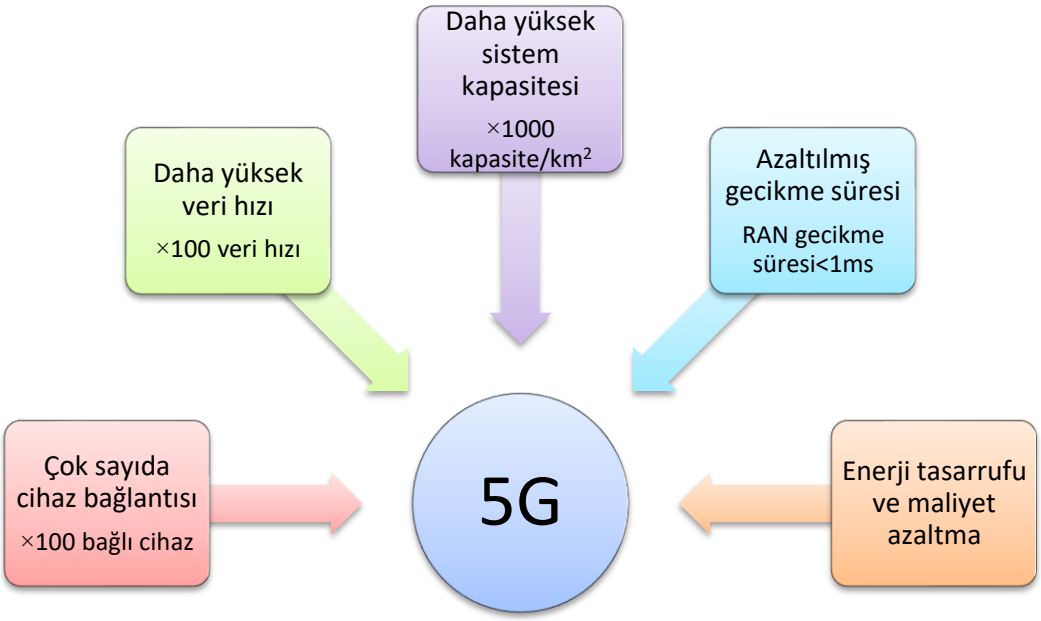
Şekil 1.1'den de görülebileceği gibi 5G mobil iletişim sistemleri 4G sistemlerin desteklemediği bazı özel senaryolar için de iletişim imkânı sağlayabilmek zorundadır. Örneğin yüksek hızlı trenler kolaylıkla 500 km/saat hızlara ulaşabilmektedirler ancak 4G sistemler sadece 250 km/saat hıza kadar olan iletişim senaryolarını destekleyebilmektedir. LTE Ağ Mimarisi, IP tabanlı bir mimari de sağlar. Kurumsal güvenlik ihtiyaçlarını karşılayamaz ve kimlik doğrulama, IMEI ve SIM ayrıntıları kullanılarak yapılır. Yalnızca kimliği değil, aynı zamanda kurumsal sertifikaları da doğrulayan gelişmiş bir güvenlik yöntemi önerilmiştir. OFDM ve MIMO için 2×2 çoklu anten kullanarak, bu sistem 150 Mbps'ye kadar veri aktarım hızı sağlayabilir [14-20].

5G teknolojisinin karşılaması hedeflenen sekiz ana gereksinim tanımlaması bulunmaktadır ve bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Ağdaki tüm son bağlantı noktalarında 1-10Gbps veri hızının sağlanması
- Ağda uçtan uca 1 ms döngü gecikmesi
- Birim başına 1000 kat daha fazla bant genişliği
- 10-100 kat daha fazla bağlı cihazı destekleme
- %99,999 kullanılabilirlik
- %100 kapsama
- Ağ enerji kullanımında %90 azalma
- Düşük güç için on yıla kadar pil ömrü

5G teknolojisi günümüz ağlarından çok daha fazla olacak olan trafik hacmini yönetme kabiliyetine sahip olmak zorundadır. Bu, gelecekteki ağ yapısı için en önemli ve zorlayıcı sorun olarak değerlendirilmektedir [21-23]. Daha önceden de belirtildiği gibi hedef LTE sistemi ile karşılaştırıldığında km^2 başına 1000 kat daha fazla kapasite sunabilmektir. Diğer önemli bir gereksinim ise daha yüksek veri hızı sağlanması konusudur. 5G teknolojisinde günümüz sistemlerinin sunduğundan çok daha yüksek veri hızlarının sağlanması gerekmektedir. Ayrıca daha zengin içerik ve bulut hizmetlerinin gelişen trendi göz önüne alındığında, 5G kullanıcı deneyiminin daha kaliteli sağlanmasının yanı sıra

daha hızlı veri hızı hizmetlerinin sağlanması da hedeflenmek zorundadır. Yeni teknolojinin ağa eş zamanlı olarak bağlanan çok sayıdaki cihaza bulut hizmetlerinin ve nesnelerin sürekli bağlantısını desteklemek için izin vermesi gerekmektedir. Bu teknolojide hedef LTE sistemlere göre 100 kat daha fazla eş zamanlı kullanıcı desteğinin sağlanabilmesidir. 5G teknolojisi sadece yüksek veri hızları sağlamak yerine aynı zamanda da radyo erişim ağları (Radio Access Network-RAN) üzerinde 1 ms'den daha az süreli bir kullanıcı gecikmesi sağlamak zorundadır. Bu özellik gelecek bulut hizmetlerinin neredeyse sıfır gecikmeli hizmet sunmasını ve dokunmatik internet, artırılmış gerçeklik ve M2M sistemler için gerçek zamanlı ve dinamik kontrol gibi yeni hizmetleri mümkün kılacaktır [24-27]. Bunlara ek olarak 5G teknolojisi birim ağ maliyeti başına artan bir kapasite sağlamak, enerji verimli olmak ve doğal afetlere karşı gürbüz olmak da zorundadır. Bu durum özellikle önem kazanmaktadır çünkü gelecekteki ağ yapısının aynı anda farklı ortamları ve hizmetleri desteklemesi gerekecektir. Örneğin kullanılacak spektrum dar ve geniş frekans bantlarında değişebilen, farklı bir yapıda olacaktır. Ek olarak gelecekteki ağ yapısı daha fazla küçük hücrelerin gelişimi ile artan bir yoğunluğa sahip olacaktır. Bu gereksinimler farklı endüstriyel bakış açılarına bağlı olarak belirlenmiştir ancak yeni bir teknolojinin eş zamanlı olarak bu koşulların tamamının sağlayabileceğini düşünmek de zordur. 5G teknolojisi için hedeflenen başlıca gereksinimler Şekil 1.2'de özet olarak verilmektedir [28-29].



Şekil 1.2. 5G mobil iletişim teknolojisinin başlıca hedefleri [21].

1.7. 5G Hücresel Şebeke Mimarisi

3GPP tarafından geliştirilen LTE-Advanced standardına dayalı dördüncü nesil (4G) mobil iletişimin küresel ticari başarısının ardından, endüstri, araştırma topluluğu ile birlikte 5G mobil iletişimi giderek daha fazla araştırılmaktadır. 20Gb/sn'ye kadar hızı desteklemek için 5G, gelişmiş mobil geniş bantın (Enhanced Mobile Broadband-eMBB) en yüksek veri hızı gereksinimi, önemli ölçüde daha geniş bant genişliği sağlayabilen yeni frekans bantlarının kullanımını motive eder [27-28].

Günümüzün geleneksel hücresel frekans bantlarındaki spektrum kıtlığı, teknolojik gelişmelerle birlikte, özellikle milimetre dalga (mm-dalga) frekans bantlarında yeni spektrum fırsatlarının keşfedilmesini motive etti. Hem iç hem de dış ortamlarda [31] 28 GHz'de yürütülen bazı ilk çalışmalar ve prototip oluşturma çabaları, mm-dalga bantlarının 5G vizyonlarını ve gereksinimlerini yerine getirmek için umut verici olduğunu göstermiştir. Buna göre 6 GHz'in üzerindeki, gelecek 5G mobil iletişimler için en uygun olan spesifik frekans bantlarının tanımlanması da büyük ilgi uyandırdı. Mm-dalga frekansları çok büyük miktarda spektrum ve çok geniş iletim bant genişlikleri sunarken, daha yüksek frekanslarda çalışmak, daha düşük bantlara kıyasla daha yüksek zayıflama ve farklı uygulama zorlukları anlamına gelir. Örneğin, daha yüksek zayıflama daha sınırlı ağ kapsamı anlamına gelirken, uygulama zorlukları çıkış gücü seviyelerinde veya filtre yeteneklerinde sınırlar oluşturabilir. Kapsam sınırlaması bir dereceye kadar, gelişmiş donanım tasarımı ile uygulama zorluklarının üstesinden gelinebilir. Hüzmeleme teknolojilerinin kullanımıyla telafi edilebilir. Bununla birlikte, kapsama alanı, daha düşük frekans bantlarında elde edilebilenlerle karşılaştırılamaz. Böylece operasyon düşük frekans bantları, 5G ağlarının geniş kapsamını sürdürmek için çok önemli olmaya devam edecek. Örneğin, 3,5 GHz civarındaki frekans bantlarının operatör başına komşu hücrelerle girişim yapmayacak seviyede büyük bant genişliği sağlaması beklenir [25-29].

1 GHz'nin altındaki frekans bantları, büyük nüfuz kaybı olan senaryolarda geniş alan kapsamı ve derin kapsama desteği gerektiren çok büyük sayıda makine tipi haberleşme (Massive Machine Type Communication-mMTC) hizmetleri sağlamak için özellikle kullanışlıdır. Analog televizyon yayınının dijital televizyona geçişinden sonra mobil iletişim için kullanılabilirliği nedeniyle 5G için 700 MHz bandının da kullanımına olan ilgi artmaktadır. Küresel gelişimi dikkate alan 3GPP, Aralık 2017'ye kadar ilk spesifikasyon setini sağlamayı amaçlayan 5G işletim bantlarını tanımlamaya başladı. Bu

sürüm, 3,3-4,2 GHz, 4,4-5 GHz, 24,25-29,5 GHz ve 37-40 GHz gibi yeni frekans aralıklarını içerir. Ayrıca 1,7 GHz, 2 GHz, 2,5 GHz civarında mevcut LTE bantlarından bazılarını ve 1 GHz'in altındaki birkaç bandı da içerir [30].

Şu anda piyasadaki 5G ağını düşünmek için, ağdaki çoklu erişim tekniklerinin neredeyse hareketsiz olduğu ve ani iyileştirme gerektirdiği açıktır. OFDMA gibi güncel teknolojiler en az önümüzdeki 50 yıl boyunca çalışacak. Üstelik 1G'den 4G'ye çıkan kablosuz kurulumda herhangi bir değişikliğe gerek yoktu. Alternatif olarak, kullanıcı gereksinimlerini karşılamak için yalnızca temel ağda yapılan bir uygulama veya iyileştirme eklenebilir. Bu, paket sağlayıcılarını 4G ticari olarak kurulduğu andan itibaren 5G ağı için kaymaya teşvik edecektir [32]. Kullanıcının taleplerini karşılamak ve 5G sisteminde öne sürülen zorlukların üstesinden gelmek için 5G kablosuz hücresel mimariyi tasarlama stratejisinde önemli bir değişikliğe ihtiyaç vardır. Araştırmacıların genel bir gözlemi, [33]'te kablosuz kullanıcıların çoğunun zamanın yaklaşık yüzde 80'i içeride ve yaklaşık yüzde 20'si dışarıda kaldığını göstermiştir. Mevcut kablosuz hücresel mimaride, bir mobil kullanıcının içeride veya dışarıda iletişim kurması için, bir hücrenin ortasında bulunan bir dış baz istasyonu, iletişime yardımcı olur. Bu nedenle, içerideki kullanıcıların dış baz istasyonuyla iletişim kurması için, sinyallerin iç mekan duvarlarından geçmesi gerekecek ve bu, çok yüksek nüfuz kaybına neden olacak ve buna bağlı olarak düşük spektral verimlilik, veri hızı ve enerji verimliliği maliyetleri ile sonuçlanacaktır. Bu zorluğun üstesinden gelmek amacıyla, 5G hücresel mimarisini planlamak için ortaya çıkan yeni bir fikir veya tasarım tekniği, dış ve iç kurulumları ayırt etmektir [32]. Bu tasarım tekniği ile binanın duvarlarındaki penetrasyon kaybı bir miktar azaltılacaktır. Bu fikir, coğrafi olarak dağınık anten dizisinin onlarca veya yüzlerce anten birimine sahip olduğu devasa MIMO teknolojisi yardımıyla desteklenecektir. Şu andan beri MIMO sistemleri iki veya dört anten kullanıyor, ancak büyük MIMO sistemleri fikri, büyük kapasite kazanımları açısından büyük dizi anten elemanlarının avantajlarından yararlanma fikrini ortaya çıkardı [30-34].

Büyük bir devasa MIMO ağı kurmak veya inşa etmek için, öncelikle dış baz istasyonlarına geniş anten dizileri takılacak, bunların arasında bazıları altıgen hücre etrafına dağıtılacak ve büyük MIMO teknolojilerinin yardımıyla fiber optik kablolarla baz istasyonuna bağlanacak. Dışarıda bulunan mobil kullanıcılar genellikle belirli sayıda anten birimiyle donatılmıştır, ancak baz istasyonlarının anten dizileriyle birlikte iş birliği

yapılarak sanal devasa MIMO bağlantıları kurularak büyük bir sanal anten dizisi oluşturulabilir. İkinci olarak, her bina dış mekan baz istasyonları ile donatılarak görüş hattı bileşenleri yardımıyla haberleşmek için dışarıdan destekli geniş anten dizileri ile kapsanacaktır. Bina içindeki kablosuz erişim noktaları, iç mekan kullanıcıları ile iletişim kurmak için kablolar aracılığıyla geniş anten dizilerine bağlanır. Bu, hücresel sistemin enerji verimliliğini, ortalama hücre verimini, veri hızını ve spektral verimliliğini önemli ölçüde iyileştirecek, ancak artan altyapı maliyetine sebep olacaktır. Böyle bir mimarinin ortaya çıkmasıyla, içerideki kullanıcılar yalnızca kablosuz erişim noktalarına bağlanmak veya iletişim kurmak zorunda kalacaklardır [32]. İç mekan iletişimi için, WiFi, küçük hücre, ultra geniş bant, mm-dalga iletişimi [35] ve görünür ışık iletişimi [36] gibi belirli teknolojiler, büyük veri hızlarına sahip küçük aralıklı iletişimler için kullanışlıdır. Ancak milimetre dalgası ve görünür ışık iletişimi gibi teknolojiler, hücresel iletişim için geleneksel olarak kullanılmayan yüksek frekansları kullanıyor. Ancak bu yüksek frekanslı dalgaları dış ve uzun mesafeli uygulamalar için kullanmak verimli bir fikir değildir çünkü bu dalgalar yoğun malzemelerden verimli bir şekilde sızmayacaktır ve yağmur damlacıkları, gazlar ve bitki örtüsü ile kolayca dağıtılabilir. Yine de milimetre dalgaları ve görünür ışık iletişim teknolojileri, büyük bir bant genişliğine sahip olduklarından dolayı iç mekan kurulumları için iletim veri hızı artırılabilir. Geleneksel olarak kablosuz iletişim için kullanılmayan yeni spektrumun tanıtılmasıyla birlikte, bilişsel radyo (Cognitive Radio-CR) ağları aracılığıyla mevcut radyo spektrumlarının spektrum kullanımını iyileştirerek spektrum sıkıntısı sorununu çözmek için bir yöntem daha vardır [32-37].

5G hücresel mimarisi heterojen olduğundan, makro hücreler, mikro hücreler, küçük hücreler ve röleler içermelidir. Mobil küçük hücre konsepti, 5G kablosuz hücresel ağın ayrılmaz bir parçasıdır ve kısmen mobil röle ve küçük hücre konseptlerinden oluşur [38]. Bu yeni konsept, otomobillerin ve yüksek hızlı trenlerin içinde bulunan yüksek hareket kabiliyetine sahip kullanıcıları yerleştirmek için tanıtıldı. Mobil küçük hücreler, otomobilin içindeki kullanıcılarla iletişim kurmak için hareketli otomobillerin içine yerleştirilirken, büyük anten dizilerinden oluşan devasa MIMO ünitesi, dış baz istasyonuyla iletişim kurmak için otomobilin dışına yerleştirildi. Kullanıcının görüşüne göre, mobil bir küçük hücre, normal bir baz istasyonu olarak gerçekleştirilmekte ve müttefik kullanıcılarının tümü tek bir yukarıdaki iç ve dış mekan kurulumlarını ayırma

fikrini kanıtlayan baz istasyonuna bağlanabilir. Mobil küçük hücre kullanıcıları [38], [32]'de gösterildiği gibi, önemli ölçüde azaltılmış sinyalleme ek yükü ile veri hızı hizmetleri için yüksek bir veri hızına sahiptir. 5G kablosuz hücresel ağ mimarisi bir radyo ağı ve bir ağ bulutu olarak yalnızca iki mantıksal katmandan oluştuğundan, radyo ağını, farklı işlevleri yerine getiren farklı tipte bileşenler oluşturacaktır. Ağ işlevi sanallaştırma (Network Functions Virtualization-NFV) bulutu, sırasıyla kullanıcı ve kontrol düzlemiyle ilgili daha yüksek katman işlevlerini gerçekleştiren bir kullanıcı düzlemi varlığı ve bir kontrol düzlemi varlığından oluşur. Hizmet olarak özel ağ işlevselliği ihtiyaca göre hizmet verecek, kaynak havuzlama örneklerden biridir ve bir radyo ağı ile bir ağ bulutu arasındaki bağlantıdır [39]. D2D iletişim, küçük hücre erişim noktaları ve IoT kavramı da bu önerilen 5G hücresel ağ mimarisine dahil edilmiştir. Genel olarak, önerilen bu 5G hücresel ağ mimarisi, gelecekteki 5G standardizasyon ağı için iyi bir platform sağlayabilir [40].

1.8. Birden Çok Katmanda Spektrum Gereksinimleri

ITU-R IMT-2020 (International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector International Mobile Telecommunication) (5G) Vision üç kullanım senaryosu içerir; eMBB, mMTC ve Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim (Ultra Reliable Low Latency Communication-URLLC). Ayrıca, önceki nesil IMT sistemlerine kıyasla büyük iyileştirmeler içeren IMT-2020'nin temel yeteneklerini de belirtir. 5G'nin öngörülen kullanım senaryolarından çeşitli gereksinimleri ele almak için, 5G'nin 'yüksek', 'orta' ve 'düşük' frekanslara (Tablo 1.1) erişmesi ve spektrumun farklı bölümlerinin belirli özelliklerinden yararlanmaya ihtiyacı vardır. 2 ile 6 GHz arasındaki frekanslar (örn. 3,3-3,8 GHz) 2 GHz'in altındaki (örn. 700 MHz) ve 6 GHz'in üzerindeki (örn. 24,25-29,5 ve 37-43,5 GHz) frekanslarla kombinasyon halinde çalışması gerekecektir. Her katmanda yeterli miktarda uyumlaştırılmış spektrum, mobil operatörlerin 5G hizmetleri sunmasını sağlamak için ulusal düzenleyiciler tarafından zamanında sağlanmalıdır [38-41].

6 GHz altındaki bantlar, geniş bir alanda çoğu 5G kullanım senaryosunu desteklemek için çok önemlidir. 3,3-4,2 GHz ve 4,4-5 GHz frekans aralıkları, geniş alan kapsamı ile iyi kapasite arasında en iyi uzlaşmayı sağlamak için uygundur. 5G'nin erken dağıtımı için, her 5G ağına her zaman her yerde 100Mbps'lik kullanıcı deneyimine sahip veri hızını ve diğer 5G teknik gereksinimlerini desteklemek için C-bandından (3,3-4,2 GHz ve 4,4-5

GHz) en az 100 MHz bitişik spektrum bant genişliği atanmalıdır. Düşük frekanslar (2 GHz'in altında), 5G mobil geniş bant deneyimini geniş alanlara ve derin iç ortamlara genişletmek için gerekli olmaya devam edecek; mMTC ve URLLC kullanım senaryoları da düşük frekansların genişletilmiş kapsamından büyük ölçüde faydalanacaktır. Kullanılabilir düşük frekans bantları (örn. 0,7, 0,8, 0,9, 1,8 ve 2,1 GHz), operatörlerin C bandının daha hızlı ve uygun maliyetli olarak yerleştirilmesini sağlamak için C bandında yeni radio (New Radio-NR) ile kombinasyon halinde LTE/NR yukarı bağlantı spektrum paylaşımı için kullanılabilir. Yüksek frekanslar (6 GHz üzeri), ek kapasite sağlamak ve bazı 5G eMBB uygulamalarının gerektirdiği son derece yüksek veri hızlarını sağlamak için vazgeçilmez olduğunu kanıtlayacaktır. 5G'nin erken dağıtımı için yüksek frekanslardan bitişik spektrum bant genişliğine sahip ağ başına en az 0,8 GHz önerilir. Her bir katmanda bitişik geniş spektrumlu bant genişliğinin atanması, enerji verimliliğini artıracak ve ağ maliyetini düşürecek olan taşıyıcı birleştirme ile ilişkili sistem karmaşıklığını azaltır [35-41].

Tablo 1.1. 5G kullanım senaryoları için çok katmanlı frekans yaklaşımı [41].

Haberleşme Modeli	**Katman Tipi**	**Frekans Bölgesi**
eMBB	Yüksek Frekanslar Süper Veri Katmanı	Üst 6 GHz
eMBB, URLLC, mMTC	Orta Frekanslar Kapsama&Kapasite Katmanı	2-6 GHz
mMTC, eMBB, URLLC	Düşük Frekanslar Kapsama Katmanı	Alt 2 GHz

1.9. C-Bandı (3,3-4,2 GHz ve 4,4-5 GHz)

6 GHz altındaki frekans bantları arasında, 3,3-4,2 GHz, 4,4-5 GHz ve 0,7 GHz bantları, son zamanlarda 5G sistemlerin erken fazları için dikkat çekmiştir. 3,3-4,2 GHz aralığı, operatör başına büyük bant genişliği sağlayabilen 5G için bir frekans aralığı olarak büyük ilgi görmektedir. 3,4-3,6 GHz aralığı IMT için Dünya Radyo İletişim Konferansı'nda (WRC-15) tanımlanmıştır ve bu spektrum tüm dünyada mevcuttur, 3,3-4,2 GHz'in diğer parçalarının kullanılabilirliği bölgeden bölgeye veya ülkeden ülkeye değişmektedir [41].

3,3-4,2 GHz ve 4,4-5 GHz aralıklarında IMT için spektrum kullanılabilirliği dünya çapında artmaktadır. 3,4-3,6 GHz frekans bandı, hemen hemen tüm ülkelerde Mobil Hizmete tahsis edilmiştir. Yönetimlerin, 3,3-4,2 ve 4,4-5 GHz aralıklarının farklı bölümlerini farklı zamanlarda kullanıma sunması ve artımlı olarak büyük bitişik bloklar oluşturması planlanmaktadır. Birçok ülkeden gelen sürüm planlarına uygun olarak, 3,3-3,8 GHz bandı, zaman içinde dünya çapında uyum için en büyük potansiyele sahip birincil 5G bandı olacaktır: bu banttan her 5G ağına en az 100 MHz bitişik bant genişliğinin tahsis edilmesi önerilir. Avrupa'da, birçok ülke, ECC Kararı (11) 06'daki mevcut uyumlaştırılmış teknik koşullar altında, 3,4-3,8 GHz aralığını bölgesel mobil/sabit iletişim ağları lisanslarıyla ödüllendirmiştir. Avrupa ayrıca, mobil ağlar ile mevcut uydu ve 3,6-3,8 GHz bandındaki sabit hizmetler arasında spektrum paylaşımı için operasyonel kılavuzlar geliştirmiştir [42]. Dahası, Avrupa bu bandı bir 5G öncü bant olarak tanımlamıştır ve şu anda uygun bir çerçeve oluşturmak amacıyla 3,4-3,8 GHz bandının 5G için uygunluğunu değerlendirme sürecindedir. Japonya, 5G için 3,6-4,2 GHz bandını da tanımladı. Buna ek olarak, Güney Kore ve Çin, 5G hizmetlerini etkinleştirmek için lisanslı olarak sırasıyla 3,4-3,7 GHz ve 3,3-3,6 GHz bantları yayınlamayı planlıyor. Öte yandan, Amerika Birleşik Devletleri, çeşitli ticari hizmetleri ortak bir temelde barındırmak için üç aşamalı bir spektrum yetkilendirme çerçevesi tarafından yönetilen yeni bir Vatandaş Geniş Bant Radyo Hizmeti (Citizen Broadcast Radio Service-CBRS) için 3,55-3,7 GHz bandını açtı. CBRS bandı ile ilgili olarak, mobil endüstri, kapsama ve QoS garantilerinin etkin bir şekilde sunulmasının amaç olduğu yerlerde ulusal lisansların tercih edilebileceğini öne sürdü [40-43].

4,4-5 GHz bandı, mobil servisler için yaygın olarak kullanılmamaktadır. Japonya ve Çin, bu bandın 5G için çıkarılmasında başı çekti. Japonya, 5G denemeleri için 4,4-4,9 GHz bandını kullanırken, Çin yakın zamanda 5G için 4,8-5 GHz'i piyasaya sürdü ve bir sonraki aşama için planlanan band ise 4,4-4,5 GHz kararlaştırıldı [28-30]. Japonya ve Çin tarafından yönlendirilen 4,4-5 GHz bandındaki bir ekosistem, diğer ülkelere, özellikle de yakın gelecekte 3,4-3,6 GHz'yi mobil iletişim için kullanamayan Asya-Pasifik ülkelerine fayda sağlayabilir. 3,3-4,2 GHz ve 4,4-5 GHz bantlarının daha yüksek yayılma kayıpları, 4G sistemleri için kullanılan mevcut bantlardan daha küçük kapsama alanı ile sonuçlanacaktır [30-32]. Aşağı bağlantı yönündeki yayılma kaybı, istenen mobil cihazlara doğru yönlü ışınlar oluşturarak ve aynı zamanda gönderme ve alma çeşitliliği

teknolojilerinden yararlanarak üstesinden gelinebilir. Yer-uydu bağlantısı kapsamındaki azalmayla mücadele, farklı teknolojiler gerektirir, çünkü mobil cihazda çok sayıda gönderme anteninin uygulanması, uygulama maliyeti ve karmaşıklığı nedeniyle tipik olarak tercih edilmez. Olası bir yaklaşım, bir yalnızca aşağı bağlantı taşıyıcısının, daha düşük frekanslar kullanan başka bir çift yönlü FDD (Frequency Division Duplexing-FDD) veya çift TDD (Time Division Duplexing-TDD) taşıyıcı ile bir taşıyıcı kümeleme kurulumunda bir destekleyici taşıyıcı olarak hareket edebildiği tamamlayıcı aşağı bağlantı kullanmaktır. Diğer bir yaklaşım, bu bantları, örneğin 3,3-4,2 GHz veya 4,4-5 GHz bandında çift yönlü taşıyıcı işlemiyle birlikte yukarı bağlantı sinyallerini iletmek için kullanılan daha düşük frekanslarda (örn. yaklaşık 2 GHz) tamamlayıcı bir yukarı bağlantı ile kombinasyon halinde kullanmaktır [30-35].

1.10. Yüksek Frekans Bantları

WRC-19'da IMT bantlarının tanımlanmasına ilişkin kararlar almayı amaçlayan WRC-15, ITU-R'nin, olup olmadığını değerlendirmek için 24,25 GHz ile 86 GHz [44] arasındaki frekans aralığında 12 aday frekans bandını incelemesine karar vermiştir (Tablo 1.2). IMT, hem paylaşılan hem de bitişik frekans bantlarında sabit ve uydu hizmetleri gibi yerleşik hizmetlerle bir arada bulunabilirliğe paylaşım çalışmaları olarak adlandırmıştır.

Tablo 1.2. WRC-19 ajandasına göre aday frekans bantları [41].

Grup 30 (GHz)	**Grup 40 (GHz)**	**Grup 50 (GHz)**	**Grup 70/80 (GHz)**
24,25-27,5	37-40,5	45,5-47	66-71
31,8-33,4	40,5-42,5	47-47,2	71-76
	42,5-43,5	47,2-50,2	81-86
		50,4-52,6	

Paylaşım çalışmaları ile ilgili olarak, ITU-R'nin IMT uzman grubu, 5G için gerekli spektrum miktarının bir tahminini gerçekleştirdi. ITU-R tarafından iki metodoloji kullanılmıştır [30];

- En yüksek veri hızı ve uygulama kullanım modeli gibi uygulamaya özel gereksinimlerin dikkate alındığı uygulama tabanlı bir yaklaşım,

- 5G’nin üç temel performans göstergesini dikkate alan teknik performansa dayalı bir yaklaşım: kullanıcı deneyimine sahip veri hızı, en yüksek veri hızı ve alan trafik kapasitesi.

Maksimum tahmin, uygulama tabanlı yaklaşımda aşırı kalabalık yoğun kentsel alan için 18,7 GHz ve teknik performansa dayalı yaklaşımdaki yoğun kentsel mikro veya kapalı bir sıcak nokta için 19,7 GHz’dir [45]. Çalışma, tahmini spektrum ihtiyacı kullanılan metodolojiye ve varsayılan senaryolara bağlı olmasına rağmen, 24,25 GHz ve 86 GHz aralığında 5G için yeterli spektrumun tanımlanması için net bir ihtiyaç olduğunu göstermiştir.

Paylaşım çalışmalarını gerçekleştirmek amacıyla ITU-R tarafından mm-dalga için yeni yayılma modelleri geliştirilmiştir. Örneğin, mm-dalga bantlarındaki 5G baz istasyonlarının tipik olarak her yerde dağıtılması beklenmez, bunun yerine yoğun nüfuslu alanlarda ek iletişim kapasitesi sağlamaya odaklanır. Bu nedenle, mm-dalga bant baz istasyonlarının sayısı ve dolayısıyla bunların uzaydaki uydular gibi diğer iletişim sistemlerine olan toplam girişimleri, her yerde bulunan konuşlandırmalara kıyasla büyük ölçüde azalacaktır. Bu yönün incelenmesi için, ITU-R’de belirli bir alan için 5G baz istasyonlarının sayısını tahmin eden bir model geliştirilmiştir [45-47].

Mm-dalga bandındaki 5G baz istasyonlarının tipik olarak, odaklanmış alanlarda daha yüksek kapasite sağlamaya konsantre olabilmeleri için, kirişlerin yere doğru yönlendirildiği kentsel/banliyö ortamlarında bina çatılarının altına (örneğin, lamba direklerine veya duvarlara sabitlenmiş) yerleştirilmesi beklenir. Sonuç olarak, 5G dağıtımlarını çevreleyen binalar ve diğer altyapılar, mm-dalga bant sinyallerinin yayılmasına engel teşkil edebilir ve böylece diğer hizmet sistemlerine yönelik paraziti azaltabilir. Bu etkiyi yeterince tahmin etmek için, ITU-R tarafından iki yeni yayılma modeli geliştirilmiştir: açıklanan ‘dağınıklığın’ (yani, binalar ve diğer insan yapımı engeller) etkisinden kaynaklanan ek sinyal kaybını öngören bir ‘dağınıklık kaybı’ modeli [46] ve sinyallerin bina duvarlarından yayılmasından kaynaklanan ek kaybı öngören bir ‘bina giriş kaybı’ modeli. Tipik olarak içeride bulunan 5G sistemleri ve dışarıda bulunan diğer hizmet sistemleri kapasiteleri bu iki modele göre hesaplanabilecektir [47].

ITU-R sürecine paralel olarak, farklı bölgeler de mm-dalga spektrumunda 5G kullanmaktadır. Bazı frekans aralıkları, ilgili teknik koşulların tanımları da dahil olmak üzere, WRC-19'dan önce belirli bölgelerde 5G'ye atanacaktır. Amerika Birleşik Devletleri 27,5-28,35 GHz'i 38,6-40 GHz ve 37-38,6 GHz bantlarıyla birlikte spektrum sınır bantlarından biri olarak tanımlamıştır; bu bantlarda 5G uygulaması için teknik koşullar [48]'da bulunabilir. Kanada ayrıca 27,5-28,35 GHz, 37-40 GHz ve 64-71 GHz bantlarına odaklanarak 5G kablosuz ağların konuşlandırılmasını desteklemek için büyük miktarda spektrum yayınlama konusunda halka açık bir istişare başlattı [29-30]. Kore, Şubat 2018'de PyeongChang Kış Olimpiyat Oyunlarında 5G denemeleri için 26,5-29,5 GHz bandını kullandı ve 2017'nin başlarında 5G dağıtımı için bu bandın kullanımını içeren ulusal geniş bant planını belirtti. Çin'de, 5G için mm dalga spektrumu ile ilgili henüz bir karar yok. Bununla birlikte, Çin hükümeti kısa süre önce 24,75-27,5 GHz, 37-42,5 GHz frekans aralıkları ve 5G spektrum planlaması için diğer mm-dalga bantları hakkında bir kamuoyu görüşleri koleksiyonunu tamamladı. Japonya, 27,5-29,5 GHz bandını 5G için aday bant olarak tanımladı. 27,5-29,5 GHz bandının Tokyo'daki 2020 Olimpiyat Oyunları sırasında 5G bağlantısı sağlamak için kullanılması planlanıyordu. Avrupa, 24,25-27,5 GHz aralığını (26 GHz olarak da adlandırılır) mm-dalga spektrumunda 5G öncü bant olarak tanımlamıştır. Bu bantta 5G'nin konuşlandırılması için teknik koşulların tanımlanması için çalışmalar devam etmektedir. Ek olarak, 31,8-33,4 GHz ve 40,5-43,5 GHz frekans aralıkları, Avrupa için gelecek vaat eden bantlar olarak adlandırılmıştır [30].

Yukarıda listelenen tek tek ülke ve bölgelerin faaliyetlerine ek olarak, Kanada, Japonya, Kore, Singapur, İsveç ve Amerika Birleşik Devletleri, dünyanın önde gelen mobil üreticileriyle birlikte Haziran 2017'de küresel 5G pazarını geliştirmek için bir girişimde bulundu [49]. Bu girişim, ölçek ekonomileri elde etmek için 26,5-29,5 GHz bandının teknik ve düzenleyici koşullarını küresel bazda uyumlu hale getirmeyi amaçlamaktadır. 5G için yüksek frekans bantlarının küresel eğilimleri göz önüne alındığında, Mart 2017'de başlayan 5G spesifikasyon çalışmasının bir parçası olarak 3GPP, 24,25-29,5 GHz, 31,8-33,4GHz ve 37-40 GHz için teknik spesifikasyonları tanımlamıştır. 24,25-29,5 GHz aralığı, en son teknolojileri kullanarak tüm 5,25 GHz bant genişliğini desteklemek zor olabileceğinden, ikisi arasında 1 GHz ile örtüşen iki bantla kapsanmaktadır (yani, 24,25-27,5 GHz ve 26,5-29,5 GHz). Ancak, uzun vadede 24,25-29,5 GHz aralığının

tamamını tek bir RF cihazla desteklemenin mümkün olabileceği düşünülmektedir. Geniş RF ayarlama aralığının kullanılabilirliği, 37-43,5 GHz gibi diğer frekans aralıkları için küresel ekosistemler oluşturmaya da yardımcı olabilir [30-32].

1.11. 5G İçin Diğer Frekans Bantları

L bandı (1,427-1,518 GHz), dünyadaki çoğu ülkede mobile tahsis edilme potansiyeline sahip başka bir 5G aday bandıdır. Bağımsız 5G sistemleri durumunda, bir TDD erişim şeması potansiyel olarak uygun bir seçenektir ve yükleme/indirme (Upload/Download) yönlerinde trafik asimetrisini iyi ölçek ekonomisi potansiyeli ile barındırabilir. 700 MHz bandı, çoğu ülkede mobil için zaten uyumlu hale getirilmiştir. Avrupa bu bandı 5G için kullanmayı planlıyor. Uzun vadede, UHF (Ultra High Frequency) bandının (470-694/698 MHz) diğer frekansları da mobil için kullanılabilirken, ABD bandın yayından mobil hizmete aktarılması sürecini başlatmıştır [40-41].

700 MHz, hem 5G mMTC uygulamaları için gerekli olan geniş alan kapsama ve derin kapsama sağlama kapasitesi nedeniyle potansiyel bir 5G bandıdır, bu da hizmet sürekliliği ve daha düşük altyapı yatırımı anlamına gelir. Bazı makine tipi cihazlar (örneğin, sensörler) uzak dağlar veya ormanlar gibi az nüfuslu alanlara veya binalardaki derin bodrumlar gibi çok zor yayılma koşullarına sahip alanlara yerleştirilebilir. Bu alanların mMTC uygulamalarını destekleyen mobil ağlar tarafından kapsanması gerekir. 700 MHz bandı LTE için zaten mevcut ve kullanımı dünyanın tüm bölgelerinde giderek artmaktadır. 700 MHz bandındaki LTE ağlarının 2020 veya daha sonraki zaman aralığında 5G sistemlerine geçebileceği belirtiliyor. Örneğin, Avrupa Komisyonu 700 MHz bandını ülke çapında ve iç mekanda 5G kapsamını mümkün kılmak için 5G için frekans bantlarından biri olarak belirlemiştir. Amerika Birleşik Devletleri kısa süre önce 600 MHz bandının teşvik müzayedesini gerçekleştirdi ve 614-698 MHz'i mobil kullanım için yeniden düzenlemeye karar vermiştir [46-50].

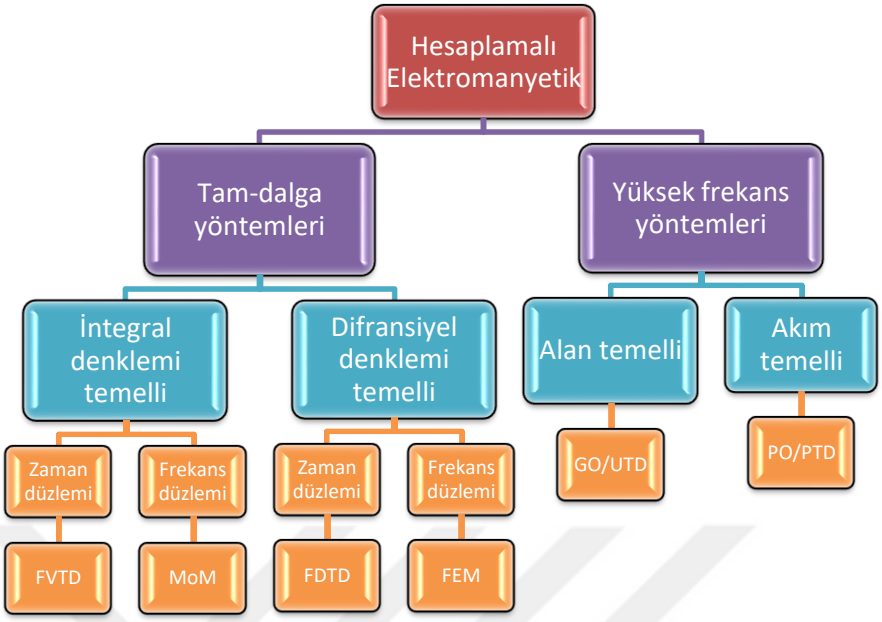
2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Hesaplamalı Elektromanyetik

Hesaplamalı elektromanyetik (Computational Electromagnetics-CEM), genel olarak elektromanyetik problemler için sayısal sonuçlar elde etmek için bir dijital bilgisayarın doğal ve rutin olarak kullanılmasını içeren disiplin olarak tanımlanır [51]. CEM daha olgunlaştıkça, deneyler tasarlamak için giderek daha fazla kullanılmaktadır ve deneysel sonuçlar kolayca elde edilemediğinde elektromanyetik problemleri çözmek için uygun maliyetli bir alternatif sunmaktadır. CEM, son yıllarda elektromanyetik problemlerin simülasyonu için bunlara dayanan çeşitli ticari yazılımlarla bir dizi farklı teknik geliştirdi. Belirli bir uygulama için verimli bir simülasyon modelinin nasıl oluşturulacağını ve en iyi doğruluk ve hesaplama verimliliği için yazılımda parametrelerin nasıl ayarlanacağını bilmek için kullanılan yöntemin altında yatan ilkeleri anlamak çok avantajlıdır [51-54]. CEM'deki teknik çeşitleri sınıflandırmanın çeşitli yolları vardır. İlk olarak CEM'i iki ana kategoriye ayıracağız: Şekil 2.1'de gösterildiği gibi önceden sayısal yöntemler olarak adlandırılan ilk prensiplere dayalı tam dalga yöntemleri ve yüksek frekanslı yöntemler.

Tam dalga yöntemleri, anteni veya saçıcıyı ve belirli yöntemlerde çevreleyen alanı da içeren hesaplama alanının ayrıklaştırılmasını ve ardından [A][x]=[B] şeklinde bir matris denkleminin oluşturulmasını ve bunun frekans veya zaman alanında uzay ve zaman şemasında çözümü olan, $[x]=[A]^{-1}[B]$ ile çözümünü içerir. Bu teknikler, en kolay şekilde üç boyutlu büyüklükleri dalga boyunun bir veya iki katı içinde olan nesnelere uygulanır. Öte yandan, akımla ilgili asimptotik genişlemelere veya varsayımlara dayanan yüksek frekanslı yöntemler, kapsam olarak birçok dalga boyu olan nesnelere en uygun olanıdır [53-54].



Şekil 2.1. Hesaplamalı elektromanyetik kategorileri [18].

Tam dalga yöntemleri kategorisi altında teknikler, kısmi diferansiyel denklem (Partial Differential Equation-PDE) tabanlı veya integral denklem (Integral Equation-IE) tabanlı olarak sınıflandırılabilir, çünkü Maxwell denklemleri sırasıyla diferansiyel veya integral formda ifade edilebilir. PDE teknikleri, anteni veya dağıtıcıyı ve etrafındaki boşluğu, yakın segmentler, yamalar veya hücrelerle etkileşime giren küçük parçalara, yamalara veya hücrelere böler. Çevreleyen uzay sonsuza bölünemediğinden, radyasyon problemlerinde sonsuzluğu simüle etmek için nesne veya nesnelerin etrafında soğurucu bir sınır koşulu (Absorbing Boundary Condition-ABC) oluşturulmalıdır. Bunun aksine, IE teknikleri yalnızca problem alanındaki nesneyi veya nesneleri alt bölümlere ayırır, ancak alanın kendisini değil. Her alt bölüm, diğer tüm alt bölümlerle etkileşim halindedir. Eşdeğerlik teoremi, boş uzayda sonsuza kadar yayılan eşdeğer akımları üretmek için kullanılır. Üç tür integral denklem vardır: elektrik alan integral denklemi (Electric Field Integral Equation-EFIE), manyetik alan integral denklemi (Magnetic Field Integral Equation-MFIE) ve rezonans fenomeninin üstesinden gelmek için gerekli olan kombine alan integral denklemi (Combined Field Integral Equation-CFIE). IE ve PDE kategorileri altında, zaman alanı ve frekans alanı teknikleri arasında bir ayrım vardır. Frekans alanı teknikleri, Maxwell denklemlerini her seferinde bir frekansta çözdüğü için, bunlar genellikle Fourier dönüşümü yoluyla çoklu frekanslarda veri sağlayan, sistem dürtü

yanıtını hesaplayan zaman alanı tekniklerinin aksine, dar bant genişliğine sahip problemler için doğal seçimdir. Bu, zaman etki alanı tekniklerini birçok geniş bant genişliği sorunu için nispeten verimli hale getirir [18].

Dalga boyu açısından bir problem büyük olduğunda, tam dalga yöntemleri daha az çekici hale gelir çünkü bilinmeyen akımları veya alanları hesaplamak, çok büyük bir lineer sistem denklemleri sistemini çözmeyi veya çok sayıda zaman adımında alanların yürümesini gerektirir. Bu, bilgisayar kaynaklarına aşırı talepler getirebilir. Bu tür sorunlar için, yüksek frekanslı yöntemler makul bir alternatif sağlar. Yüksek frekanslı yöntemler, alan tabanlı veya akım tabanlı olabilir. Alan tabanlı yöntemler, elektromanyetik alanların yansımasını, kırılmasını ve kırınımını hesaba katmak için ışın optiği kullanır. Akıma dayalı yöntemler, akım ve yüzey alanları arasındaki ilişki hakkında temel bir varsayımla başlar ve ardından yayılan alanı elde etmek için akım ve muhtemelen iyileştirmeleri üzerinden entegre olur. Yüksek frekanslı yöntemlerde, tam dalga yöntemlerinde gerektiği gibi anten veya saçıcı üzerindeki bilinmeyen akımların veya alanların çözülmesine gerek yoktur ve bu nedenle bilgisayar kaynakları genellikle daha az sorun teşkil eder [18].

Radyasyon problemlerini modellemek için birçok teknik vardır;

1. Momentler yöntemi (Method of Moments-MoM)

2. Sonlu fark zaman alanı (Finite Difference Time Domain-FDTD)

3. Tek tip kırınım teorisine (Uniform Theory of Diffraction-UTD) sahip geometrik optik (Geometrical Optics-GO)

4. Fiziksel kırınım teorisi (Physical Theory of Diffraction-PTD) ile fiziksel optik (Physical Optics-PO)

Bunlar günümüzde kullanılan tek teknik değildir, ancak popüler sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method-FEM) dışında muhtemelen en yaygın kullanılanları temsil ederler. Diğer popüler CEM teknikleri, tümü FDTD ile benzerlik gösteren sonlu hacim zaman alanı tekniği (Finite Volume Time Domain-FVTD), sonlu integral tekniği (Finite Integral Technique-FIT) ve iletim hattı matrisi (Transmission Line Matrix-TLM) yöntemidir. Diğer bir yöntem kategorisi, her birinin zayıflıklarından kaçınırken, her birinin güçlü yönlerinden yararlanmak için çeşitli teknikleri birleştiren karma

yöntemlerdir. Bunlardan bazıları MoM UTD, MoM-PO, FEM-MoM, FEM-PO ve FEM-FDTD'dir. Açıktır ki, çok çeşitli anten problemlerini çözmek için çok çeşitli teknikler mevcuttur.

2.1.1. Sonlu Integrasyon Tekniği (Finite Integration Technique-FIT)

FIT ilk olarak 1977'de [52] literatüre sunuldu ve o zamandan beri farklı elektromanyetik dalga problemlerini çözmek için uygulandı. FIT'in ayrıklaştırma yöntemi, homojen ortam için FDTD yöntemine benzer. Bununla birlikte, FIT, Maxwell denklemlerini integral formlarında doğrusal bir denklem sistemine dönüştürür. Bu teknik, farklı ortamlar arasındaki arayüzleri daha doğru bir şekilde ele alır. Geometrik modellemede esnektir ve kavisli sınırları ve karmaşık şekilleri daha doğru bir şekilde işler.

FIT, basit uygulama ve verimli paralel hesaplama gibi FDTD yöntemiyle aynı avantajların çoğuna sahiptir. Ayrıca bazı FDTD dezavantajlarını da telafi eder. Maxwell denklemleri için olan bu sonlu hacim tipi ayrıklaştırma, Faraday yasasının tüm etki alanı ve her ayrıklaştırma hücresi gibi denklemleri karşılar. Bu anlamda, FIT homojen olmayan bir ortamda ayrık alanların korunum özelliklerini kanıtlamaya izin verir [53]. FDTD yöntemine benzer şekilde, sonlu entegrasyon tekniğinin en yaygın dezavantajı, karmaşık ve ortogonal olmayan yapılar ayrıklaştırıldığında esnek olmayan Yee Kartezyen ağın kullanılmasıdır. Yee'nin yöntemi hesaplamalı elektrodinamiği modellemek için kullanılan sayısal bir analiz yöntemidir [54].

FDTD gibi, FIT'nin açık formülasyonunun en büyük dezavantajı, CFL koşuluna dayalı olarak ızgara boyutuna zaman adımının bağımlılığıdır. Özellikle, çok küçük ağ boyutunun gerekli olduğu litografi simülasyonu gibi bazı uygulamalar için. Bu durumda, zaman adımı önemli ölçüde küçük hale gelir ve bu da daha yüksek bir simülasyon süresi ile sonuçlanır.

[55]'de FIT'in yakın tarihli bir incelemesi ve formülasyonu sunulmaktadır ve geniş bir uygulama yelpazesi için bu tekniğin çeşitli uygulamaları anlatılmaktadır. Akustik dalga problemlerini çözmek için kullanımının yanı sıra, elektromanyetik problemlerdeki en iyi bilinen uygulamalar arasında çok çeşitli saçılma problemleri [56-57], radyo frekansı ve mikrodalga simülasyonu [58], manyetik cihazlar [59], dielektrik rezonatörler [60]

bulunmaktadır. Ayrica insan vücudundaki elektromanyetik alan [61], dağıtıcı ortam [62] ve güneş pilleri [63] de diğer uygulama alanlarıdır.

2.1.2. CST Microwave Studio

CST Studio Suite, elektromanyetik (EM) bileşenleri ve sistemleri tasarlamak, analiz etmek ve optimize etmek için yüksek performanslı bir üç boyutlu (3D) EM analiz yazılım paketidir. EM spektrumundaki uygulamalar için elektromanyetik alan çözücüler, CST Studio Suite'teki tek bir kullanıcı arayüzünde bulunur. Çözücüler, hibrit simülasyonları gerçekleştirmek için birleştirilerek mühendislere birden çok bileşenden oluşan tüm sistemleri verimli ve basit bir şekilde analiz etme esnekliği sağlar. Diğer SIMULIA ürünleriyle birlikte tasarım, EM simülasyonunun tasarım akışına entegre edilmesini sağlar ve geliştirme sürecini en erken aşamalardan itibaren yürütür. EM analizinin ortak konuları arasında antenlerin ve filtrelerin performansı ve verimliliği, elektromanyetik uyumluluk ve parazit (Electromagnetic Compatibility-EMC/Electromagnetic Interference-EMI), insan vücudunun EM alanlarına maruz kalması, motorlarda ve jeneratörlerde elektromekanik etkiler ve yüksek güçlü cihazlarda termal etkiler yer alır. CST Studio Suite, dünyanın önde gelen teknoloji ve mühendislik şirketlerinde kullanılmaktadır. Daha kısa geliştirme döngüleri ve daha düşük maliyetler sağlayarak, pazara önemli ürün avantajları sunar. Simülasyon, sanal prototip oluşturmanın kullanılmasını sağlar. Cihaz performansı optimize edilebilir, potansiyel uyum sorunları tasarım sürecinin erken aşamalarında tespit edilebilir ve hafifletilebilir, gerekli fiziksel prototip sayısı azaltılabilir ve test başarısızlıkları ve geri çağırma riski en aza indirilebilir. CST Studio Suite, kullanıcılara FEM, FIT ve TLM gibi yöntemleri kullanan çoklu EM simülasyon çözücülerine erişim sağlar. Bunlar, yüksek frekanslı simülasyon görevleri için en güçlü genel amaçlı çözücüleri temsil eder. Elektriksel olarak büyük veya oldukça rezonanslı yapılar gibi uzman yüksek frekans uygulamaları için ek çözücüler, genel amaçlı çözücüleri tamamlar. CST Studio Suite, elektromekanik cihazlar, transformatörler veya sensörler gibi statik ve düşük frekanslı uygulamalara adanmış FEM çözücüleri içerir. Bunların yanı sıra yüklü parçacık dinamiği, elektronik ve çoklu fizik problemleri için mevcut simülasyon yöntemleri vardır. Çözücülerin CST Studio Suite'teki tek bir kullanıcı arayüzüne sorunsuz entegrasyonu, belirli bir problem sınıfı için en uygun simülasyon yönteminin kolay seçimini mümkün kılar ve çapraz doğrulama yoluyla

gelişmiş simülasyon performansı ve benzeri görülmemiş simülasyon güvenilirliği sunar [64].

2.2. Anten Yapısında Kullanılan Malzemeler

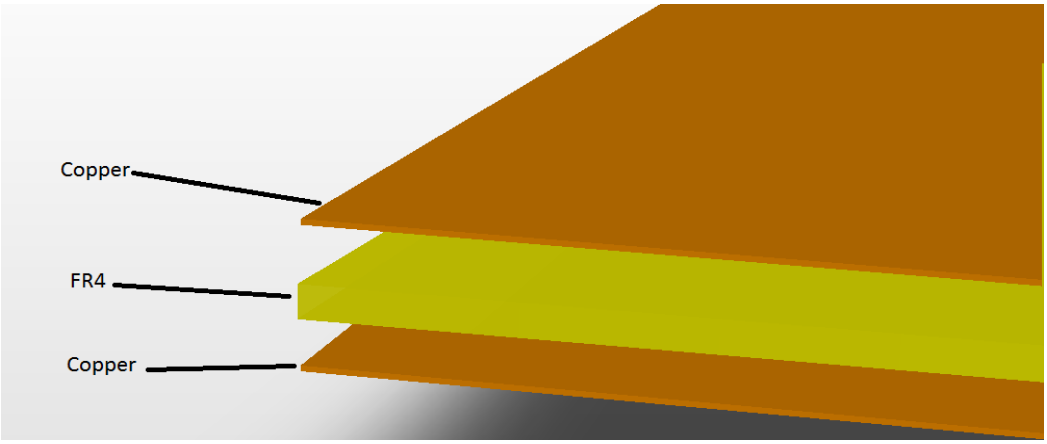
Tez çalışmasında 5G mm-dalga uygulamaları için uygun elektriksel özelliklere sahip dielektrik taban malzemeleri kullanılmıştır. Anten bant genişliği açısından önemli avantaj sağlayan düşük dielektrik sabiti değerine sahip taban malzemesi olan Rogers RT5880 yüksek frekans uygulamalarında tercih edilirken, orta ve düşük frekans bölgeleri için FR4 üretimlerde kullanılmıştır. Ayrıca tasarım için önerilen yöntemlerin farklı dielektrik malzemelerdeki etkisini tespit etmek için RO3003 plaketi de tercih edilmiştir. Kullanılan plaketlerin üzerinde iletken olarak bakır kullanılmıştır ve kalınlık tüm uygulamalarda 0,035 mm olarak alınmıştır.

2.3. Üretim Yöntemi

Elde edilen simülasyon sonuçları neticesinde fabrikasyon kolaylığı da göz önünde bulundurularak çalışmalar belirli sayıda anten üzerine yoğunlaşmıştır. Belirlenen mikroşerit antenlerle ilgili detaylı optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Sonrasında antenler, istenen 5G sınır şartları elde edilerek, laboratuvar ortamında gerçekleştirilmişlerdir. Simülasyon çalışmaları bitirilen mikroşerit antenlerin üretimleri, Quick Circuit 7000 baskı devre kazıma cihazı ile yapılmıştır. CST programında tasarlanan antenler uygun bir formata dönüştürülerek baskı devre kazıma cihazı ile çalışan ISOPRO isimli paket yazılımına aktarılarak kazıma işlemleri tamamlanmıştır.

Antenlerin üretiminde kullanılan taban malzemeleri, farklı dielektrik özellikler gösteren FR4 ve RT/Duroid tipi tabanlardır. Bu malzemelerden FR4 cam epoksi, popüler ve çok yönlü, yüksek basınçlı ısıda sertleşen kat kat yapıda, iyi bir ağırlık kuvvet oranına sahip bir malzemedir. Neredeyse sıfır su geçirme özelliği ile en çok kullanılan elektrik yalıtım malzemelerinden biridir. FR4 kuru ve nemli ortamlarda yakın değerde elektrik ve mekaniksel özelliklerini korumasıyla bilinir.

Şekil 2.2 de bakır plakalar arasında bir FR4 katman görülmektedir. Yama anten yapısında da anten ve toprak düzlem arasına konan FR4, istenen elektriksel özellikleri yakalamada en büyük yardımcılardan biridir.



Şekil 2.2. Her iki yüzeyi de bakır kaplı FR4 taban malzemesi.

Yazılım ortamında hedeflenen sonuçlar alındıktan sonra anten yukarıda belirtilen şekilde laboratuvar ortamında üretilip uygun analiz cihazları ile gerçek ortamda test aşamasına geçilmiştir. Bu analiz cihazlarından kullanılmış olanı vektör şebeke analizör (Vector Network Analyzer-VNA)'dür. Genel olarak bir şebeke analizörü bir elektriksel sistemin şebeke parametrelerini ölçen bir cihazdır. Günümüzde şebeke analizörleri genellikle S-parametrelerini ölçmektedirler çünkü elektriksel sistemlerin yansıma ve iletimi, yüksek frekanslarda ölçüm için kolaydır. S-parametrelerinin dışında y-parametreleri, z-parametreleri ve h-parametreleri gibi diğer sistem parametreleri de vardır. Şebeke analizörleri çoğunlukla amplifikatör ve filtre gibi iki portlu şebekelerin karakterizasyonunda kullanılırlar, fakat daha farklı sayıda porta sahip sistemlerde de kullanılabilirler [65].

Şebeke analizörleri çoğunlukla yüksek frekanslarda kullanılırlar, fakat çalışma frekansı aralıkları 5 Hz'den 1,05 THz'e kadar değişebilir. Özel tip şebeke analizörleri 1Hz'den daha düşük bölgeleri de kapsayabilirler. Bu tarz analizörler örneğin açık çevrimlerin kararlılık analizinde veya ultrasonik bileşenlerin ölçümünde kullanılabilirler [66].

Şebeke analizörlerin iki tipi vardır; birincisi sadece genlik özelliklerini belirleyen skaler şebeke analizör (Scalar Network Analyzer-SNA) ve ikincisi ise hem genlik hem de faz özelliklerini belirleyen VNA'dır. Bir VNA RF tasarım uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir RF şebeke analizör çeşididir. Birçok VNA'nın dört S-parametresinin (S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}) belirlenmesi için iki test portu bulunur. Daha fazla portu olanlar da vardır. Bir VNA, radyo frekans ve mikrodalga cihazlarının RF performanslarının şebeke saçılma

parametreleri cinsinden test edilmelerini sağlayan bir cihazdır. Bu parametrelere kısaca S-parametreleri denir. S-parametreleri elektriksel bir sistemde portlar arasındaki giriş çıkış ilişkisini tanımlar. Örneğin Port 1 ve Port 2 isminde iki portumuz olsun, bu durumda S_{12} Port 2'den Port 1'e olan güç transferini gösterir. Benzer şekilde S_{21} ise Port 1'den Port 2'ye olan güç transferini gösterir. Genel olarak çok portlu bir sistem için S_{NM}, Port M'den Port N'ye olan güç transferini gösterir.

Pratikte antenlerle ilgili en çok kullanılan parametre S_{11}'dir. S_{11} antenden ne kadar gücün yansıdığının bir göstergesidir ve bu yüzden yansıma katsayısı veya geri dönüş kaybı (return loss) olarak da bilinir. Eğer S_{11}=0 dB olursa bu, bütün gücün antenden yansıdığını ve hiçbir şeyin yayılmadığını gösterir. Eğer S_{11}=-10 dB olursa bu da 3 dB'lik bir gücün antene iletilmesiyle -7 dB lik yansıyan bir gücün olacağını gösterir. Kalan güç ise anten tarafından kabul edilen veya antene iletilen güçtür. Bu kabul edilen güç ya ortama yayılır ya da anten içerisinde kayıp olarak soğrulur. Antenler genel olarak düşük kayıplı imal edildiklerinden bu gücün büyük çoğunluğu anten tarafından ortama yayılır.

Tez çalışması kapsamında tasarlanacak antenlerin önce Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) [64] yazılımı yardımıyla simülasyonları yapıldı. Anten karakteristik özellikleri bakımından en iyi sonuçların alınabilmesi için detaylı parametrik analizler ve optimizasyonlar gerçekleştirildi. Parametrik analizler oluşturulan yapının geometrik boyutlarına ilişkin olarak yapıldı ve analiz aralıkları mümkün olduğunca dar seçilerek antenlerin çalışma frekanslarında oluşabilecek bütün değişiklikler gözlendi. Seçilen çalışma frekanslarında en az kayıplı ve yüksek kazançlı istenen özelliklerdeki antenler belirlendikten sonra, bu bilgiler ışığında prototip üretimleri baskı devre kazıma cihazı kullanılarak yapıldı. Dielektrik taban malzemesi olarak FR4, RT/D6002, RT5880 ve RO3003 malzemeleri kullanıldı. Üretilen mikroşerit antenlerin ölçümleri VNA yardımıyla yapıldı. Elde edilen ölçüm sonuçları, simülasyon sonuçları ile kıyaslanarak literatüre sunuldu.

3. BÖLÜM

BULGULAR

Bu bölümde tez çalışması kapsamında tasarlanan, üretilen, uluslararası konferanslarda sunulan, TR dizin ve SCI'da taranan dergilerde yayınlanan özgün çalışmalar anlatılmıştır. Bu çalışmalardan 3.1, 3.2 ve 3.3 bölümlerinde anlatılanlar yurtdışı uluslararası konferanslarda sunulmuş ve IEEE Xplore'da yayınlanmıştır. Bu üç çalışma mm-dalga ve erken faz 5G bantlarında çalışan antenler için yeni geometriler sunmuştur ve önerilen yeni yapılar sayesinde kayıplar azaltılmış, anten performansı artırılmıştır. Tez kapsamında tasarlanan ve üretilen çalışmalardan 3.4 ve 3.5 bölümlerinde anlatılanlar ise sırasıyla SCI ve TR dizinlerde taranan dergilerde yayınlanan çalışmalardır. Bölüm 3.4'te açıklanan çalışmadaki önerilen yöntemle erken faz 5G bantlarında çalışan antenlerin daha az alan işgal etmelerini sağlayacak yeni bir minyatürizasyon üretim şeması gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemde tasarım aşamalarında bulunan parametreler çalışma dalga boyu ile ilişkilendirilmiş ve bu sayede yöntemin erken faz 5G uygulamalarının yanında Wi-Fi bandında da uygulanabilir olması sağlanmıştır. Son aşamada anten baskı devre kazıma yöntemi ile üretilmiş ve bir VNA yardımıyla ölçümleri tamamlanmıştır. Bölüm 3.5'te anlatılan çalışma mm-dalga bantlarındaki yama antenler için farklı malzemelerin, yama üzerinde yapılan aynı değişikliklere verdikleri tepkinin araştırılmasıdır. Bu çalışmada hem yeni anten geometrileri tasarlanmış hem de mm-dalga bantlarında kullanılan güncel malzemelerin karşılaştırması yapılmıştır.

3.1. 30 GHz İçin Bir Kare Yama Antende Geri Dönüş Kaybı İyileştirilmesi

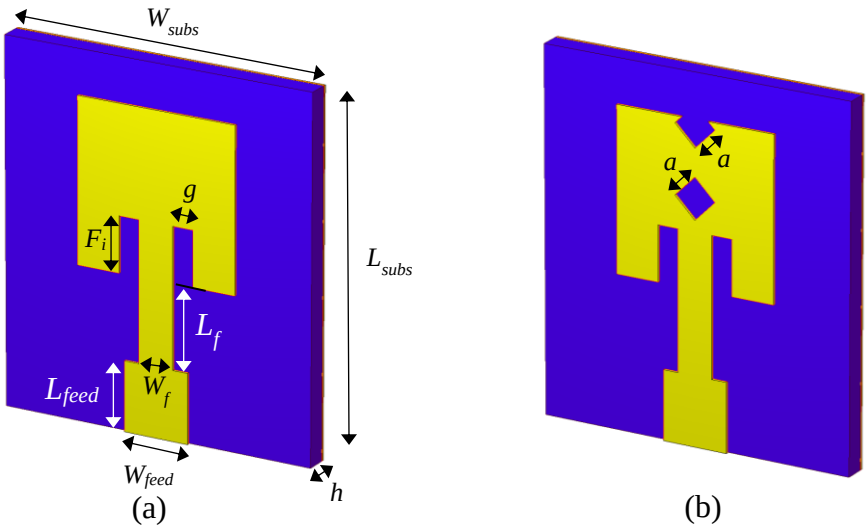
Bu çalışmada, iyileştirilmiş dönüş kaybı özelliklerine sahip mm-dalga frekanslarında çalışan bir kare mikroşerit yama anten önerilmiştir.

Önerilen yama anten, elmas şeklindeki yuvalara sahip yeni bir geometridedir ve 5G iletişim frekansları arasında yer alan 30 GHz'de çalışmaktadır. Bu çalışmadaki ilk tasarım, Anten#1, geleneksel içten beslemeli bir kare mikroşerit yama antendir ve bu anten çeyrek dalga boyu empedans eşleştirme hattına sahiptir. Düşük geri dönüş kaybı ve yüksek bant genişliği gereksinimleri, bizi anten tasarımını değiştirmeye motive etmiştir. Bu nedenle, yama üzerine, sistem bant genişliğinde 46 MHz'e kadar ek bir artışa ve geri dönüş kaybı seviyesinde 10,751 dB'ye kadar düşüşe yol açan elmas şeklindeki yuvalar eklenmiştir, Anten#2. Bu yeni özelliklerden dolayı, önerilen yama anten tasarımının 5G iletişim sistemlerinin gereksinimlerini karşılamak için uygun bir aday olduğu gösterilmektedir. Önerilen antenin çalışma frekansı, geometrik boyutlarının ayarlanmasıyla, mikrodalgadan THz bölgesine kadar spektrumda kullanılabilecektir.

30 GHz'de çalışan antenin tasarım aşaması dikdörtgen mikroşerit yama antenin tasarım prosedürüne uygun olarak yapılmış [18] ve daha sonra yamanın en ve boy değerleri birbirine eşit alınmıştır. Bir mikroşerit yama antenin en büyük dezavantajı dar bant genişliğidir ve mm-dalga frekansları söz konusu olduğunda bu dezavantaj daha büyük önem taşır. Bu sebeple bu çalışmada yüksek bant genişlikli ve düşük geri dönüş kayıplı bir anten tasarımı üzerinde yoğunlaşılmıştır. Bu amaç için bir kenar uzunluğu 2,36 mm olan bir kare yama anten tasarlanmıştır. Yama, dielektrik sabiti ε_r=4,3 ve kayıp tanjantı δ=0,025 olan bir FR4 dielektrik tabanı üzerine monte edilmiştir. Şekil 3.1a'da Anten#1'in perspektif görünüşü verilmiştir. Tablo 3.1'de ise önerilen antenin optimize edilmiş boyutları görülmektedir. W_{subs} ve L_{subs}, sırasıyla tabanın genişliğini ve uzunluğunu göstermektedir. Besleme hattı ile empedans uyumunun sağlanması amacı ile L_f uzunluğunda ve W_f genişliğinde bir çeyrek dalga dönüştürücü hat kullanılmıştır.

Tablo 3.1. Önerilen antenin geometrik boyutları.

ε_r	W_{patch}	L_{patch}	h	W_{subs}	L_{subs}
4,3	2,36 mm	2,36 mm	0,3 mm	4,6 mm	5,2 mm
F_i	g	L_f	W_f	L_{feed}	W_{feed}
0,8 mm	0,3 mm	1,21 mm	0,51 mm	1 mm	0,955 mm



Şekil 3.1. İçeriden beslemeli kare mikroşerit antenler, (a) Geleneksel, (b) Önerilen.

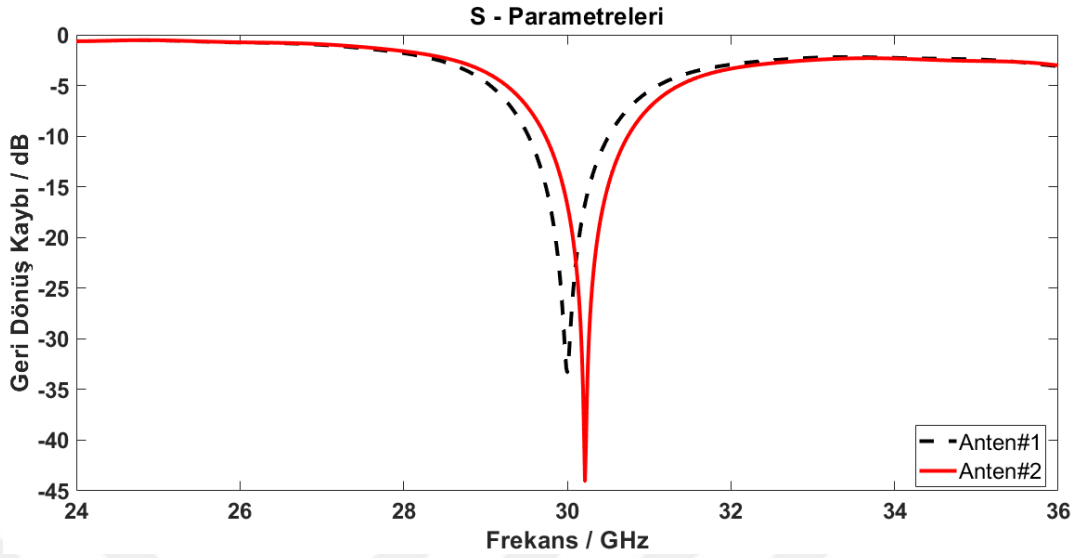
Tasarım metoduna göre [18] kare yamanın boyutları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$W = L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}} \tag{3.1}$$

Burada W, yamanın genişliğini, L, yamanın uzunluğunu, c, ışık hızını, ε_r, taban malzemesinin dielektrik sabitini, f_r ise antenin rezonans frekansını göstermektedir. Anten iç noktadan 75Ω'luk bir mikroşerit besleme hattı ile enerji almaktadır.

Yüksek bant genişliği ve düşük geri yansıma kaybı için anten üzerinde herbirinin kenar uzunluğu a=0,42 mm olan elmas şekilli yarıklar önerilmiştir. Bu tasarım Şekil 3.1(b)'de görülmektedir.

İlk olarak birinci tasarım olan Anten#1 simüle edilmiştir. Şekil 3.2'den görüldüğü gibi, anten tam olarak 30 GHz'de rezonans frekansına sahiptir. Geri dönüş kaybı,-33,307 dB ve bant genişliği yaklaşık 0,962 GHz'dir. Bant genişliğini artırmak ve geri dönüş kaybını azaltmak için yama üzerinde elmas şekilli yarıklar açılmıştır. Antenin bu son hali için yansıma katsayısı sonuçları da Şekil 3.2'de görülmektedir. Geri dönüş kaybında 10,751 dB'lik bir azalışla-44,059 dB'lik bir değere ulaşılmıştır. Ayrıca band genişliği 0,046 GHz artarak 1,008 GHz'e yükselmiştir.

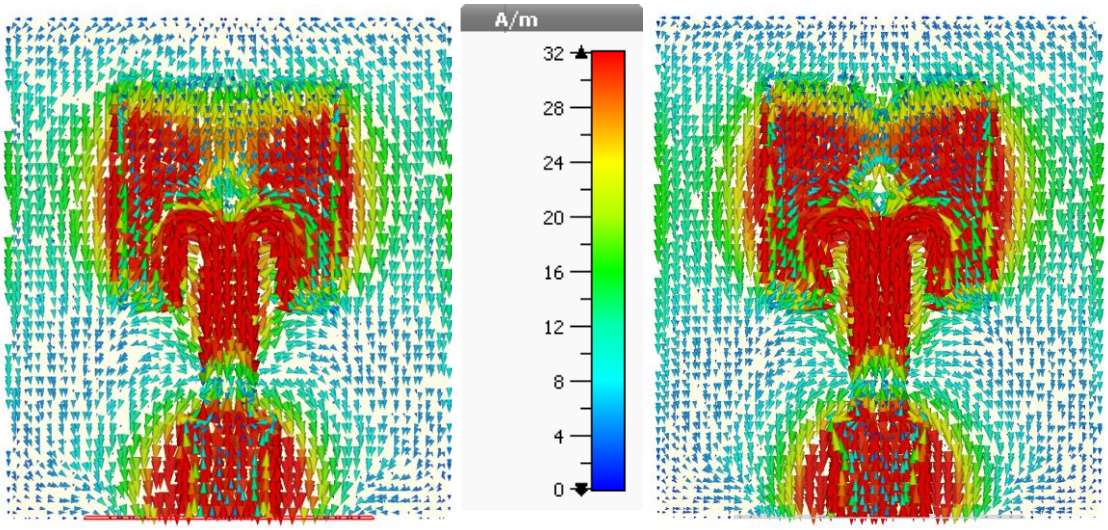


Şekil 3.2. Anten#1 ve Anten#2 için yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi.

Önerilen model, antenin giriş empedans uyumunda olumlu etkilere sebep olmuştur. Böylece sinyallerin giriş veya çıkış yaptıkları noktada yansıma kayıpları azaltılmıştır. Beşinci nesil haberleşme için bu kayıpların azaltılması tasarımcılar için en büyük zorluklardan biri olacaktır.

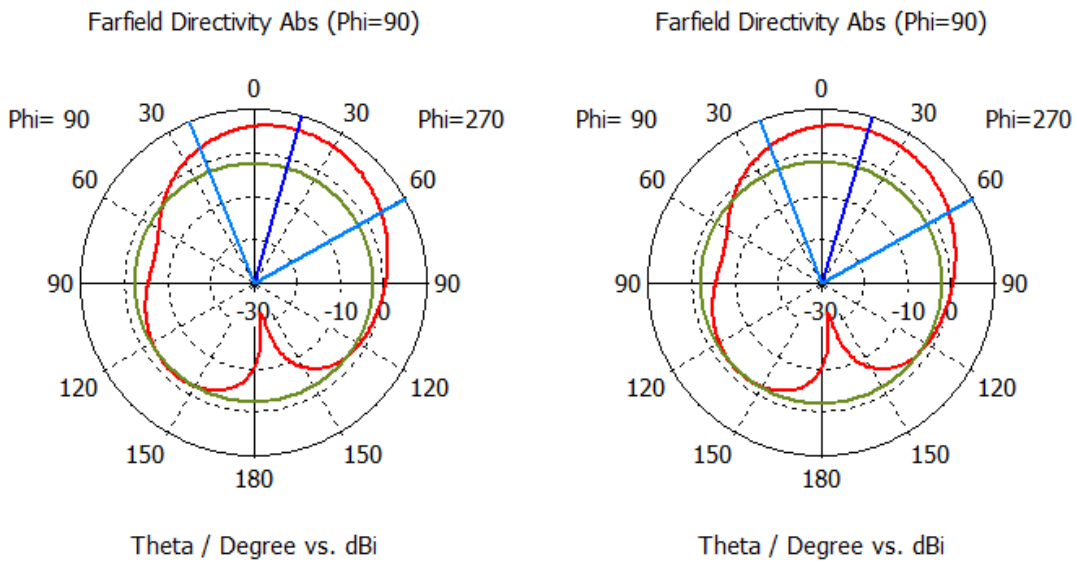
Şekil 3.3(a) ve 3.3(b), sırasıyla Anten#1 ve Anten#2 üzerindeki akım dağılımlarını göstermektedir. Akım yoğunluğunun rezonans frekansında yarık kenarlarında yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Böylece, yamanın kenarları boyunca oluşturulacak yüzeylerin akım yoğunluğunu artırdığı yorumunu rahatlıkla söyleyebiliriz. Bunun sonucu olarak da antenin ışıma karakteristikleri olumlu yönde etkilenecek ve kayıplar azalacaktır. Özellikle beşinci nesil haberleşme sistemlerindeki yüksek frekanslar düşünüldüğünde çok kısa dalga boylarının verimli şekilde yayılması için kayıplar olabildiğince azaltılmalıdır.

Şekil 3.4(a) ve 3.4(b) sırasıyla Anten#1 ve Anten#2'nin ışıma örüntülerini göstermektedir. Işıma örüntü sonuçları anten tasarımlarında önemli göstergelerdendir. Özellikle orijinal ışıyan kısım üzerinde değişiklik yapıldıysa son model için bulunan sonuçlar en az orijinal yapı kadar veya daha iyi sonuçlar içermelidir. Bu çalışma sonucunda şekilden de görülebileceği gibi her iki anten için ışıma karakteristiklerinin biribirine çok yakın olduğu söylenebilir.



(a) (b)

Şekil 3.3. Yama antenlerin akım dağılımları, (a) Anten#1, (b) Anten#2.



(a) (b)

Şekil 3.4. Yama antenlerin ışıma örüntüleri, (a) Anten#1, (b) Anten#2.

Bu şekillerden görülmektedir ki yeni anten tasarımı ile orijinal antenin ışıma örüntüleri çok yakın seviyelerdedir. Ayrıca simülasyon sonuçlarına bakıldığında yan lob seviyesinde -8,8 dB'den -8,7 dB'e bir düşüş olurken, ana lob için bu durum 6,56 dBi'den 6,60 dBi'ye bir artış şeklinde olmuştur. Bu sonuçlar da yeni antenin avantajları olarak

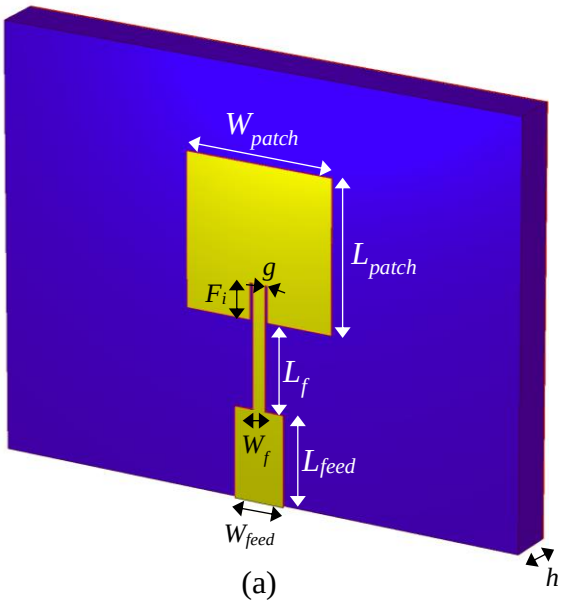
alınabilir. Milimetre dalga spektrumu için tasarlanan yeni model, boyutların ayarlanmasıyla diğer frekans bantları için de uygulanabilir.

3.2. 15 GHz İçin Bozulmuş Toprak Düzlem Yapılı Kare Yama Antende Geri Dönüş Kaybı İyileştirilmesi

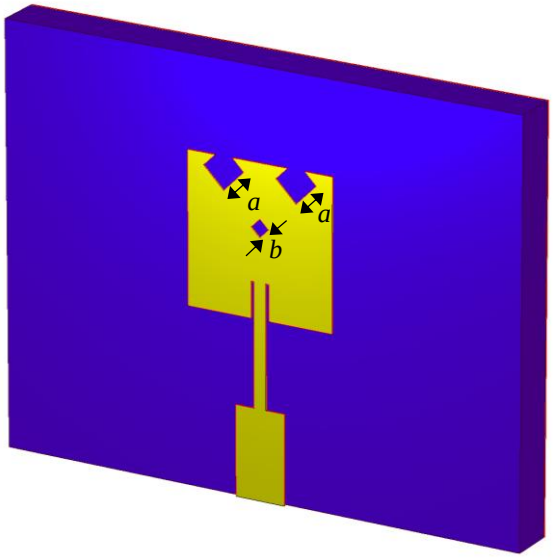
İkinci çalışma olarak 5G aday frekans bantlarından biri olan 15 GHz'de çalışan bozulmuş toprak yüzeyi (Defected Ground Structure-DGS) yapısına sahip yeni bir kare mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Anten boyutları yukarıda belirtilen eşitlik 3.1'e göre hesaplanmış ve istenen çalışma frekansına göre antenin kenar boyutu 5,05 mm olarak bulunmuştur. Taban malzemesi olarak dielektrik sabiti ε_r=2,94 ve kayıp tanjantı δ=0,0012 olan bir Rogers RT/D6002 dielektrik taban kullanılmıştır. Besleme hattı ile empedans uyumunun sağlanması amacı ile L_f uzunluğunda ve W_f genişliğinde bir çeyrek dalga dönüştürücü hat kullanılmıştır. Şekil 3.5(a)'da Anten#1'in perspektif görünüşü verilmiştir. Yeni tasarım olarak antenin üst kenarında bir kenarı a=1,13 mm olan iki adet elmas şekilli açıklık ve ortasına yakın bir noktada bir kenarı b=0,42 mm olan bir adet elmas şekilli açıklık tasarlanmıştır. Şekil 3.5(b)'de önerilen Anten#2 görülmektedir. Tablo 3.2'de ise önerilen Anten#2'in optimize edilmiş boyutları görülmektedir.

Tablo 3.2. Önerilen antenin geometrik boyutları.

ε_r	W_{patch}	L_{patch}	h	W_{subs}	L_{subs}	a
2,94	5,05 mm	5,05 mm	1,52 mm	24 mm	14 mm	1,13 mm
F_i	g	L_f	W_f	L_{feed}	W_{feed}	b
1,2 mm	0,1 mm	2,91 mm	0,42 mm	3 mm	1,70 mm	0,42 mm



(a)

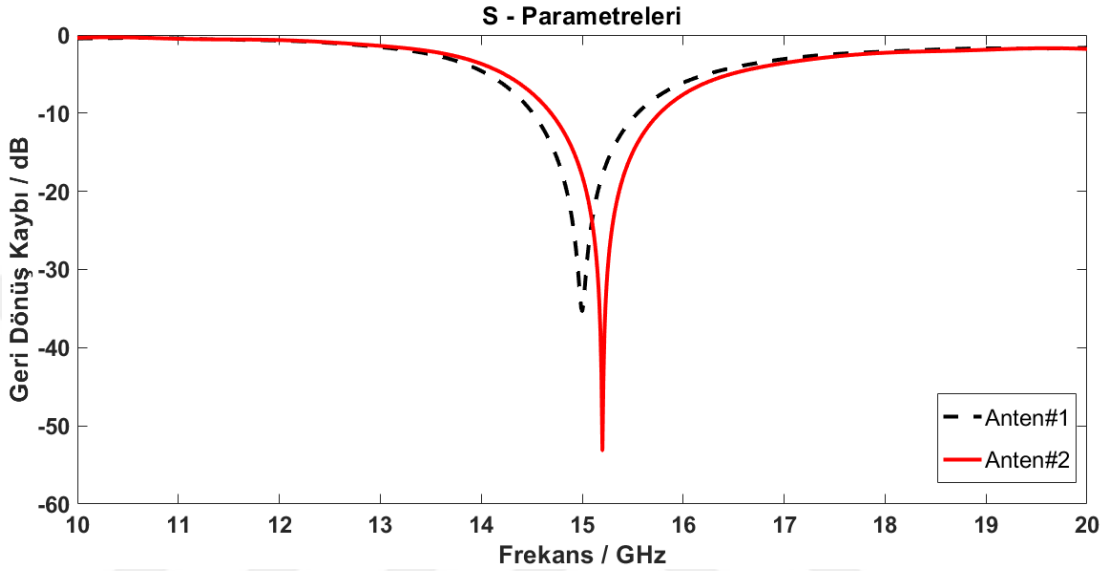


(b)

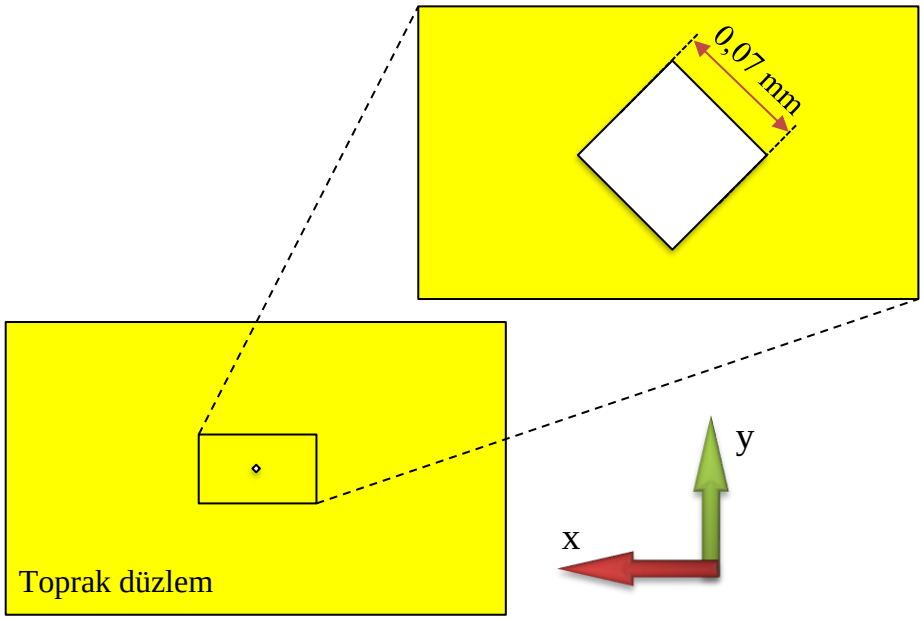
Şekil 3.5. (a) 15 GHz'de çalışan orjinal model Anten#1, (b) Yeni geometriye sahip önerilen elmas şekilli yarıklara sahip model Anten#2.

Anten#1 için analiz yapıldığında 15 GHz'deki geri dönüş kaybı -35,34 dB olarak bulunmuştur. Bu frekanstaki band genişliği ise 1,04 GHz olarak elde edilmiştir. Şekil 3.6'da Anten#1 ve Anten#2 için yansıma katsayısı frekans sonuçları verilmiştir. 5G haberleşme sistemlerinde yüksek veri hızları hedeflendiğinden büyük band genişliğine sahip ve düşük geri dönüş kayıplı antenlerin kullanılması gerekmektedir. Hem geri dönüş kaybını azaltmak hem de aynı zamanda band genişliğini artırmak için ışıyan yama

üzerinde elmas şekilli yarıklar açılmıştır. Bu düzenleme ile akım dağılımı etkilenerek geri dönüş kaybı -53,94 dB'ye düşmüş, band genişliği ise 1,07 GHz'e çıkmıştır. Bu sonuçlar ilk tasarıma göre geri dönüş kaybında 18,6 dB'lik bir düşüşe, band genişliğinde ise 30 MHz'lik bir artışa işaret etmektedir.



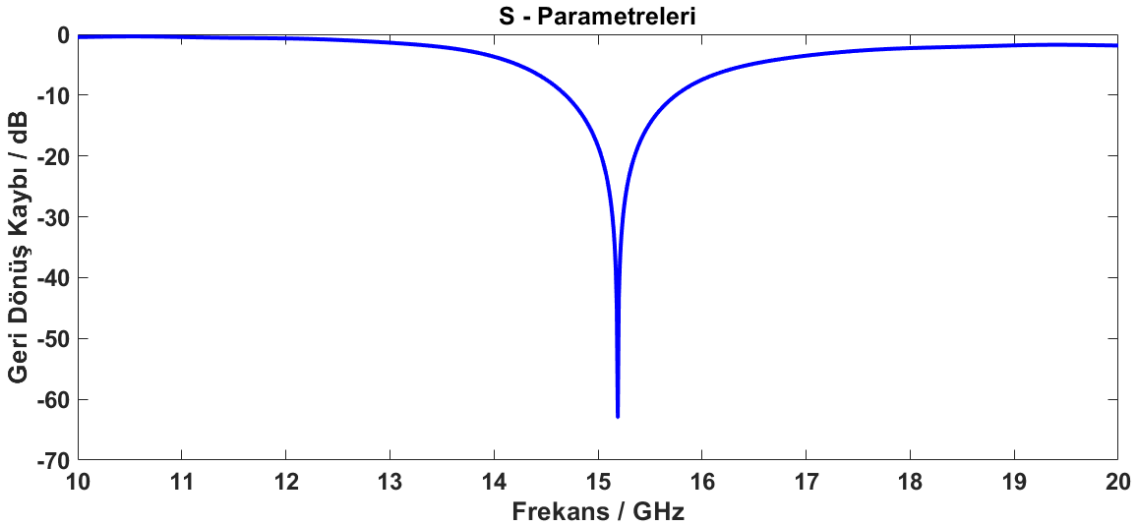
Şekil 3.6. 15 GHz 'de Anten#1 ve Anten#2 için yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi.



Şekil 3.7. Anten#3 için elmas şekilli yarık açılmış toprak düzlemi.

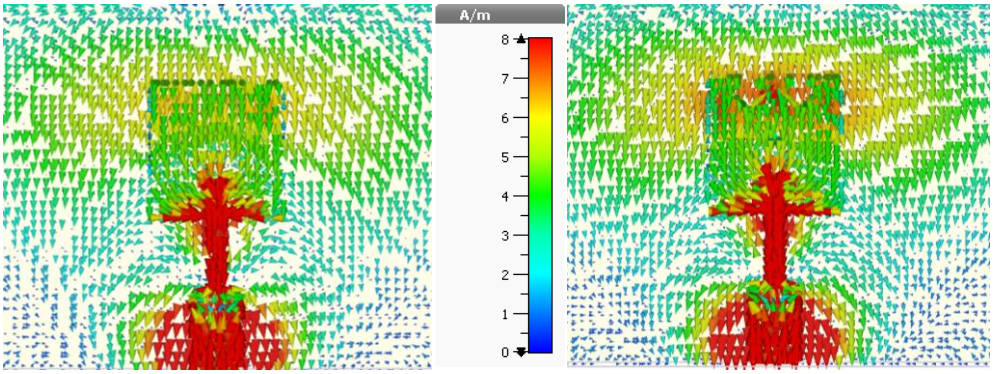
Band genişliğini artırmanın yollarından biri de DGS yapısıdır. Toprak düzlem üzerine kazınan farklı geometrik şekiller ile anten performansının artması sağlanmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada antenin toprak düzlemi üzerinde elmas şekilli, bir kenarı 0,07 mm olan bir bozulma tasarlanmıştır. Tasarımın üçüncü aşamasındaki bu antene Anten#3 denilecektir. Şekil 3.7'de nokta şeklinde görülen elmas şekilli bozulma, büyütülmüş olarak tekrar çizilmiştir.

Bu bozulma metal tabakanın efektif kapasitans ve induktansını değiştirerek akım dağılımına etki eder ve geri dönüş kaybında azalmalara sebep olur. Parametrik analiz sonucunda geri dönüş kaybı için en iyi değerin, DGS yapısının bir kenarının 0,07 mm olduğu durum için elde edildiği bulunmuştur. Frekansa bağlı çizimi Şekil 3.8'de görülmektedir. Rezonans frekansında geri dönüş kaybı, -62,96 dB ve band genişliği ise 1,07 GHz olarak bulunurken, rezonans frekansında 0,19 GHz'lik bir kayma olmuştur. Bu sonuçlar ilk tasarıma göre geri dönüş kaybında 27,62 dB'lik bir azalma ve band genişliğinde 0,030 GHz'lik bir artış demektir. İkinci tasarıma göre ise geri dönüş kaybındaki azalma 9,02 dB olurken band genişliğinde bir değişim görülmemiştir.



Şekil 3.8. Yarık açılmış toprak düzlemli tasarım, Anten#3, için yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi.

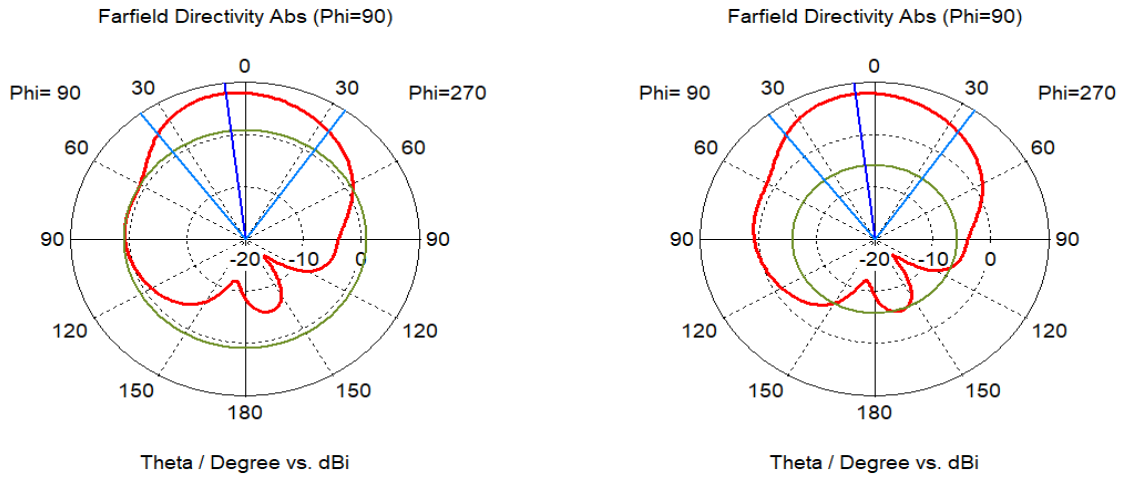
Şekil 3.9'da ise Anten#1 ve Anten#3 için akım dağılımları görülmektedir. Anten üzerindeki elmas şekilli yarıklar ışıma yüzeyini artırmıştır ve bu şekilde antenin geri dönüş kaybı azalmıştır.



(a) (b)

Şekil 3.9. Antenlerin akım dağılımları, (a) Anten#1, (b) Anten#3.

Şekil 3.10 ise Anten#1 ve Anten#3 için ışıma örüntülerini göstermektedir. İlk ve son model için ışıma karakteristiklerine bakılırsa yeni yapının da orijinal yapıyla benzer karakteristiklere sahip olduğu görülür. Her iki durum için sırasıyla Anten#1 ve Anten#2 'den alınan ana lob güç şiddetleri 8,04 dBi ve 7,97 dBi olarak bulunmuştur. 3 dB açısal genişlik dereceleri ise yine Anten#1 ve Anten#3 için sırasıyla 71,3° ve 72,2° olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre son durumda yaklaşık aynı güç daha dar bir açı ile yayılmaktadır. Yapılan değişiklikler sayesinde aynı yöndeki yayılmalar için daha fazla band genişliği ve daha fazla empedans uyumu sağlanmıştır.



(a) (b)

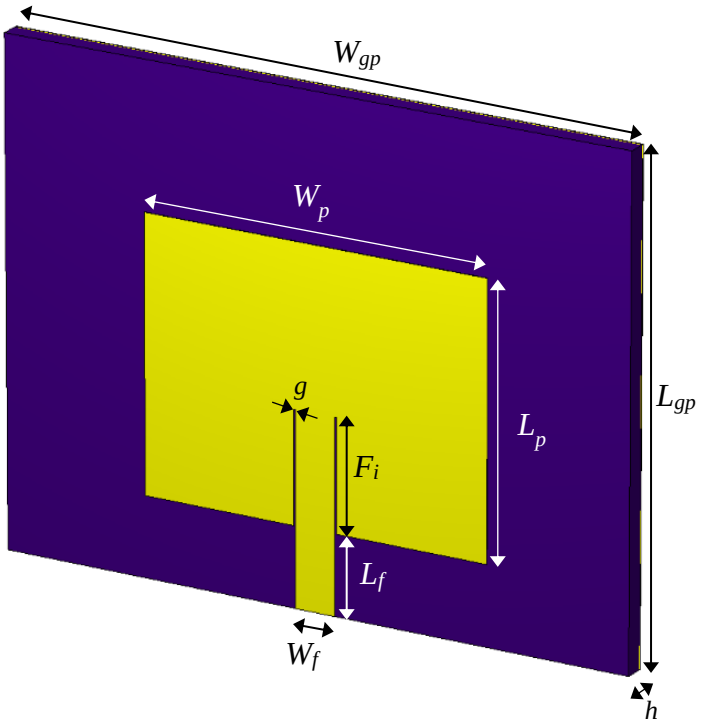
Şekil 3.10. Antenlerin ışıma örüntüleri (a) Anten#1, (b) Anten#3.

3.3. 3,5 GHz İçin Bozulmuş Toprak Yapılı Kare Yama Antende Performans İyleştirilmesi

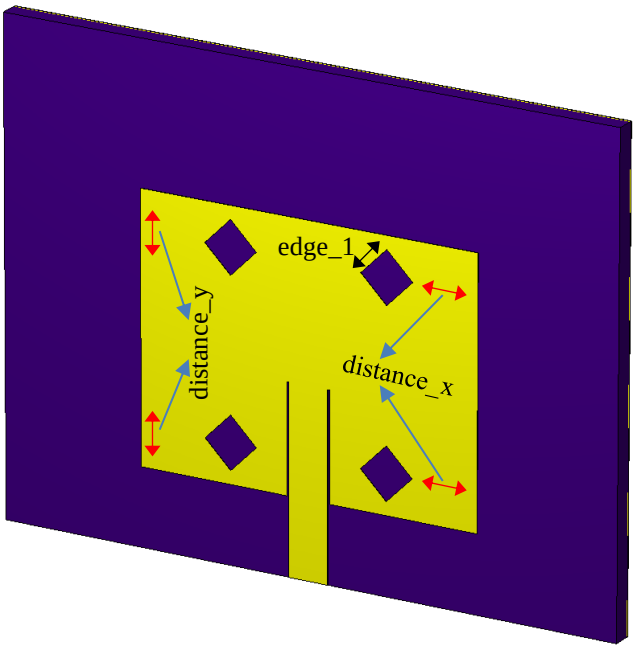
Bu çalışma, dikdörtgen bir yama antenin yeni bir tasarımını sunmaktadır. Işıma yapan yüzey üzerinde eşkenar dörtgen şekilli yuvalara sahip anten oluşturulmuş ve toprak düzleminde de beş yuva ile bozulmuş zemin yapısı tasarlanmıştır. İlk prototip bir geleneksel içten beslemeli dikdörtgen yama antendir ve 3,51 GHz'de erken faz 5G frekansında rezonansa sahiptir. Antenin dönüş kaybı seviyesi -37,97 dB'dir ve 10 dB bant genişliği ise 114,8 MHz'dir. Daha düşük geri dönüş kaybı seviyeleri ve geliştirilmiş bant genişliği için yayılan kısım ve zemin düzlemine kazınmış eşkenar dörtgen şekilli yuvalar önerilmiştir. Eşkenar dörtgen şekilli yuvaların etkilerinin analizi detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında son antende 116,4 MHz'lik 10 dB bant genişliği ve -55,42 dB'lik dönüş kaybına ulaşılmıştır. Bu sonuçlar referans antenle karşılaştırıldığında 1600 Hz'lik bir bant genişliği artışı ve 17,45 dB'lik dönüş kaybı azalmasına denk gelmektedir. Bunların bir sonucu olarak geliştirilmiş radyasyon özellikleri ile önerilen antenin erken faz 5G tasarımları için uygun bir aday olduğu bulunmuştur. Şekil 3.11 geleneksel mikroşerit yama anten ve bu çalışmadaki model Anten#1'i göstermektedir. Burada W_p, yamanın genişliğini, L_p, yamanın uzunluğunu, c, ışık hızını, ε_r, taban malzemesinin dielektrik sabitini, f_r ise antenin rezonans frekansını göstermektedir. Anten iç noktadan 50Ω'luk bir mikroşerit besleme hattı ile enerji almaktadır. Tasarımı ve analizi yapılan antenin hesaplanan boyutları Tablo 3.3'te görülmektedir. Gelişmiş ışıma karakteristikleri için ön yüzde dört adet eşkenar dörtgen şekilli yuva açılmıştır. Şekil 3.12'de ise önerilen anten tasarımının önden görünüşü verilmiştir. Bu tasarım, model Anten#2'yi göstermektedir.

Tablo 3.3. Optimize edilmiş anten boyutları.

W_p	L_p	W_{gp}	L_{gp}
26,06 mm	20,02 mm	47,46 mm	36,57 mm
g	F_i	W_f	L_f
0,14 mm	8,2 mm	3 mm	5,86 mm

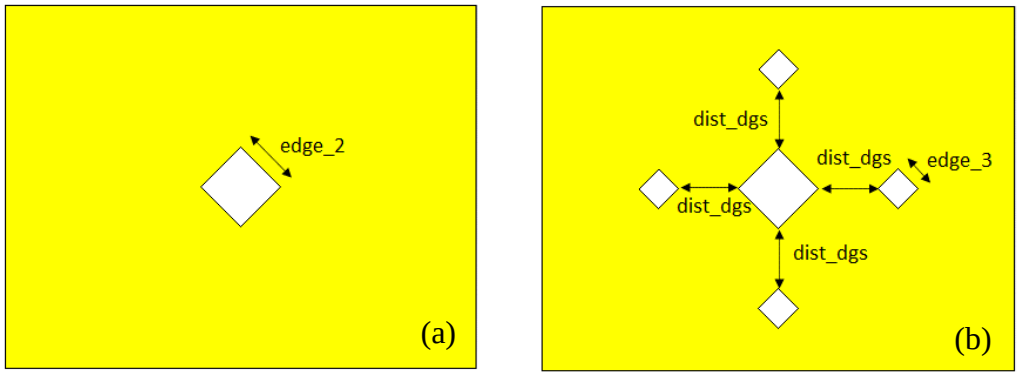


Şekil 3.11. Dahili beslemeli dikdörtgen yama anten.

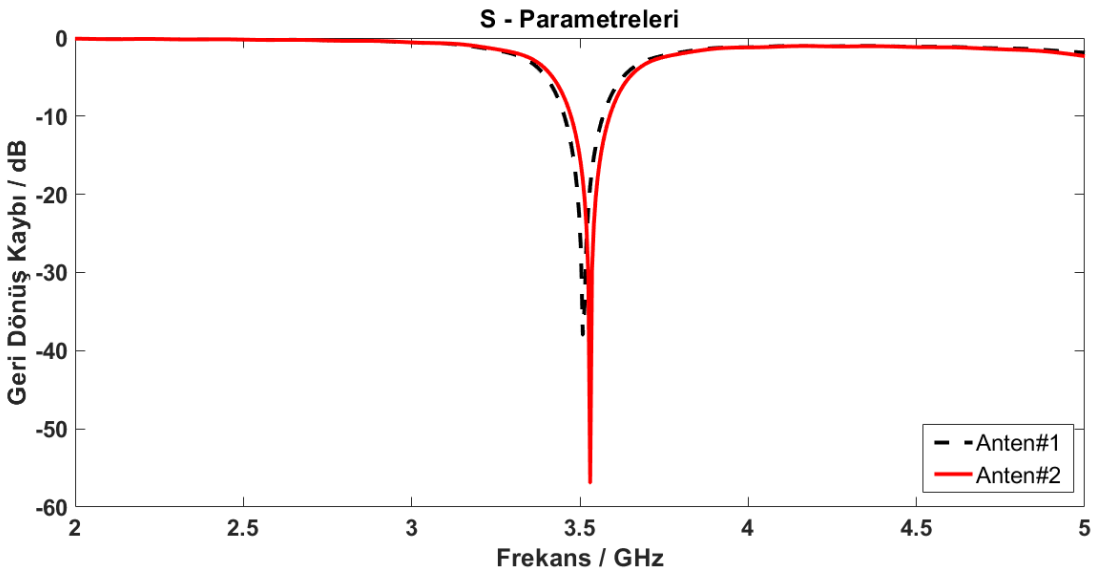


Şekil 3.12. Eşkenar dörtgen şekilli yuvaları ile Anten#2 önden görünüş.

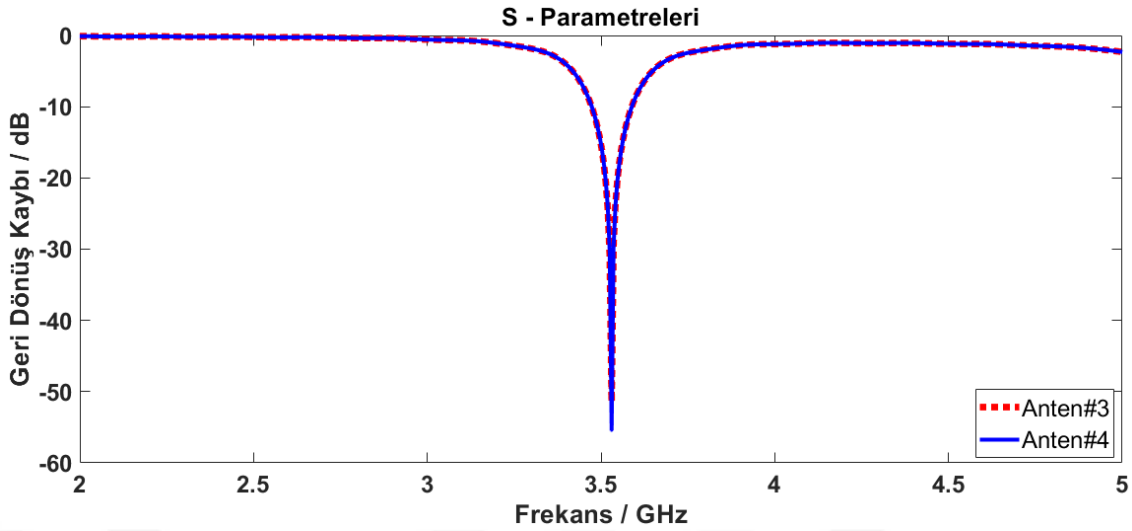
Yuvanın kenar uzunluğu, antenin yan kenarından uzaklığı ve düşey eksende antenin L_p kenarının 1/4 uzaklığı referans alınarak bulunan noktaya uzaklığı sırasıyla *edge_1*, *distance_x* ve *distance_y* ile gösterilmiştir. Bu parameterler ile ilgili detaylı analiz yapılmış ve en iyi anten performansında sabit bırakılmıştır. Şekil 3.13(a)'da yamanın toprak düzlem merkezine açılmış, kenar uzunluğu *edge_2* ile gösterilen bir yuva ile bozulmuş zemin yapısı oluşturularak Anten#3 elde edilmiştir. Son olarak dört adet yuva merkezdeki yuvanın etrafına açılarak Anten#4 oluşturulmuş ve ilave performans kazanımları elde edilmiştir. Şekil 3.13(b)'de önerilen anten modeli görülmektedir.



Şekil 3.13. (a)Anten#3 arkadan görünüş, (b)Anten#4 arkadan görünüş.



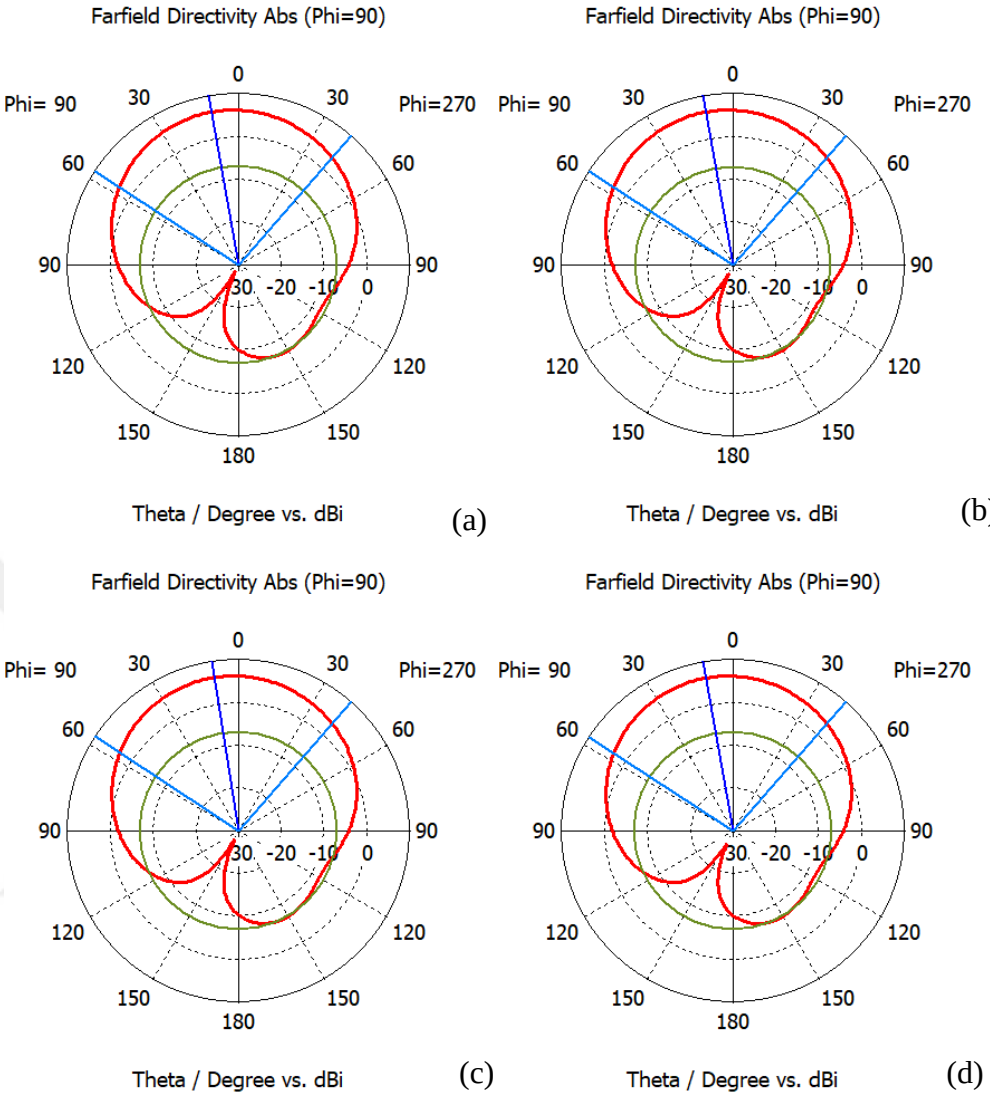
Şekil 3.14. Yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi, Anten#1 ve Anten#2.



Şekil 3.15. Yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi, Anten#3 ve Anten#4.

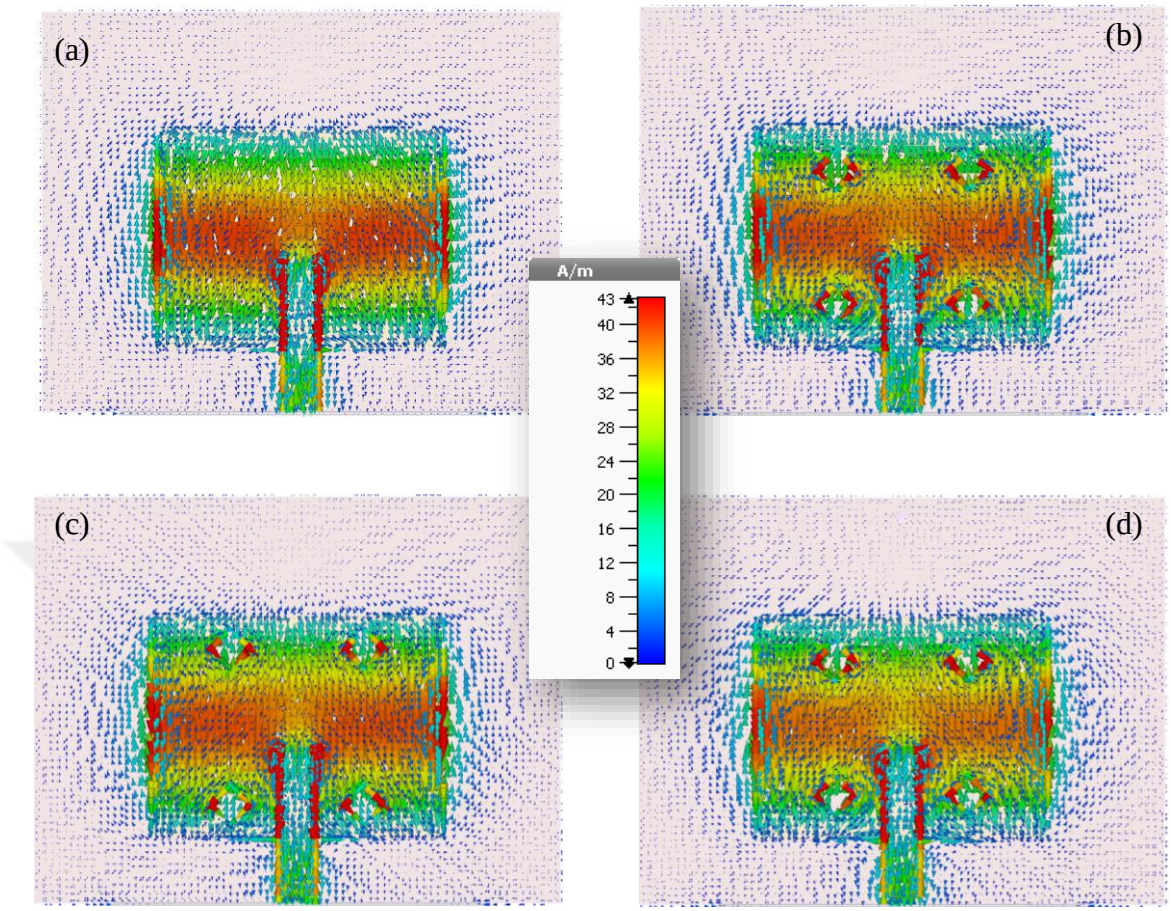
Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 bütün tasarım aşamaları için antenlerin dönüş kaybı-frekans karakteristiklerini göstermektedir. Görüldüğü üzere ön yüze açılan yuvaların etkisi kayıpları azaltmada büyük rol oynamıştır. Toprak düzlemine yapılan modifikasyonlar ise daha çok band genişliği artırma yönünde etki etmiştir. Son aşamada antenin bant genişliği 1600 Hz artmıştır.

Şekil 3.16 ise dört anten modeli için ışıma örüntülerini göstermektedir. Dört model için ışıma karakteristiklerine bakılırsa yeni yapıların da orijinal yapıyla benzer karakteristiklere sahip olduğu görülür. Her dört durum için sırasıyla Anten#1, Anten#2, Anten#3 ve Anten#4'ten alınan ana lob güç şiddetleri 6,15 dBi, 6,15 dBi, 6,17 dBi ve 6,16 dBi olarak bulunmuştur. Önerilen antenin yayılma gücü alıcı veya verici olarak kullanılmak için uygundur. 3 dB açısal genişlik dereceleri ise yine Anten#1, Anten#2, Anten#3 ve Anten#4 için sırasıyla 98,2°, 98,1°, 97,9° ve 98° olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre son durumda yaklaşık aynı güç 0,2° daha dar bir açı ile yayılmaktadır. Yapılan değişiklikler sayesinde aynı yöndeki yayılmalar için daha fazla band genişliği ve daha fazla empedans uyumu sağlanmıştır.



Şekil 3.16. Önerilen anten için uzak alan ışıma örüntüleri, (a) Anten#1, (b) Anten#2, (c) Anten#3, (d) Anten#4.

Şekil 3.17 bütün anten modelleri için akım dağılımlarını göstermektedir. Anten#1 ile karşılaştırıldığında diğer antenlerde akımın özellikle yarık çevrelerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Bunun sonucunda ise anten kayıpları azalmış ve konnektör bağlantı noktasındaki empedans uyumu artmıştır. Diğer 5G bantlarında olduğu gibi 3,5 GHz bandı için de bu iyileştirmeler antenin performanslı bir şekilde kullanımını sağlayacaktır.

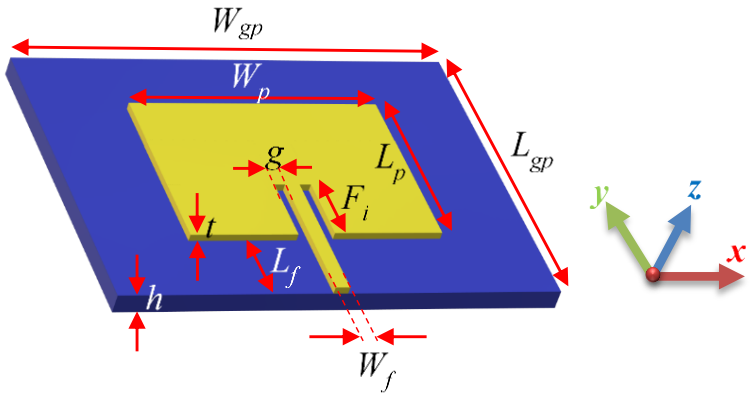


Şekil 3.17. Oluşturulan modeller için akım dağılımları, (a) Anten#1, (b) Anten#2, (c) Anten#3, (d) Anten#4.

3.4. Alt 6 GHz ve Wi-Fi Frekans Bandlarında Yeni Bir Minyatürizasyon Yöntemi

Bu makale, hem ayarlama çıkıntılı dikdörtgen yama antenin kapsamlı bir analizini hem de anten için daha kompakt boyutlar elde etmede yeni bir yöntemi sunmaktadır. Belirli çıkıntı boyutları ile çalışma frekansının yaklaşık %24-%27 daha düşük aralıklara kaydığı ve bu kaydırılmış bantlarda daha kompakt boyutlarda anteni tasarlamanın mümkün olduğu bulunmuştur. Model antenler, alt 6 GHz 5G bantlarında ve 5,8 GHz Wi-Fi bandında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Yöntemin 1,3 GHz ile 8 GHz arasındaki herhangi bir frekans için de kullanılabileceği gösterilmiştir. En iyi sonuçlar için detaylı parametrik analizler yapılmıştır. Bu modifikasyonlarla, neredeyse aynı veya daha iyi radyasyon özelliklerine sahip her anten için %50'lik bir boyut azalması anlamına gelen yaklaşık $0{,}32\lambda^2$'den $0{,}16\lambda^2$'ye kayda değer bir boyut küçültme elde edilmiştir. Ayrıca, yöntemi daha net bir şekilde açıklamak için tasarım prosedürü için bir akış şeması

verilmiştir ve simülasyon sonuçlarımız için daha fazla güven kazanılması için 2,4 GHz'de bir prototip üretilmiş ve ölçülmüştür. Deneysel ölçümler ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu kanıtlanmıştır. Tasarım süreci, anten ve dielektrik malzemenin çalışma frekansının seçimine karar verilmesi ile başlar. Süreç boyunca Anten#1, Anten#2, Anten#3 ve Anten#4 ile gösterilen dört model tasarlayacağız. Ayrıca, karşılaştırma için istenen frekansta çalışan Anten#0 da bilinen iletim hattı modeli ile tasarlanan anteni temsil edecektir. Önerilen tasarım prosedürünün ilk adımında sunulan Anten#1 ile gösterilen geleneksel dikdörtgen yama anten, iletim hattı modeli kullanılarak tasarlanmıştır [67]. Dileketrik sabiti ε_r=4,4, yüksekliği h=1,524 mm ve dielektrik kayıp tanjantı δ=0,025 olan antenin tabanı için FR4 malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.18, geleneksel yama anteninin perspektif görünümünü sunar.



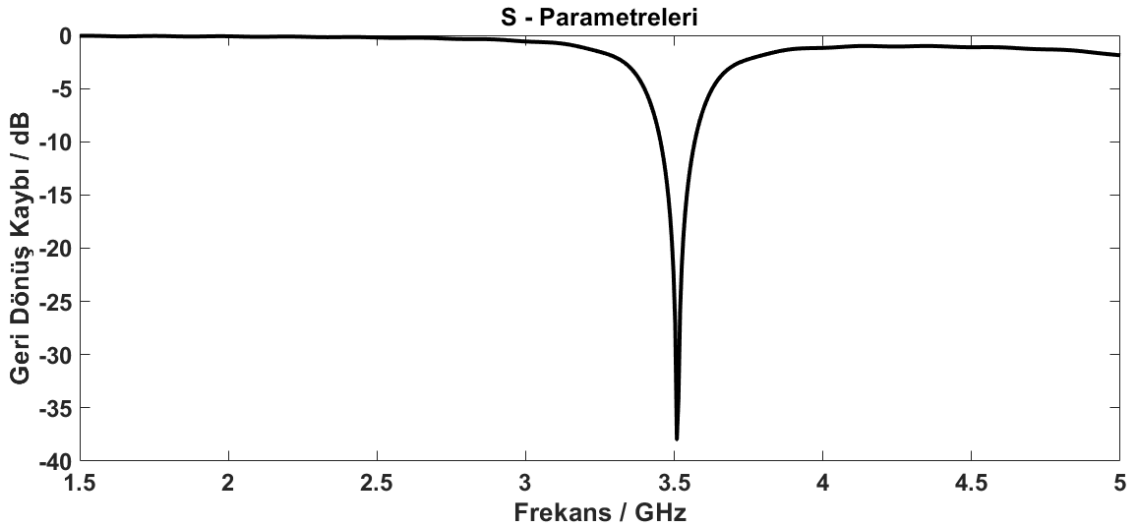
Şekil 3.18. Tasarım parametrelerinin gösterimi.

Tablo 3.4. Anten#1'in optimize edilmiş parametreleri.

Anten parametreleri	**Değer**	**Birim**
f_r (Anten#0)	2,40	GHz
f_r (Anten#1)	3,50	GHz
ε_r	4,40	-
h	1,52	mm
Yama uzunluğu, L_p	20,02	mm
Yama genişliği, W_p	26,06	mm
Yama kalınlığı, t	0,035	mm
Dielektrik taban uzunluk, L_{gp}	36,57	mm
Dielektrik taban genişlik, W_{gp}	47,46	mm
Dahili besleme hattı uzunluğu, F_i	8,20	mm
Dahili besleme hattı genişliği, g	0,14	mm
Mikroşerit besleme hattı uzunluk, L_f	7,77	mm
Mikroşerit besleme hattı genişlik, W_f	3,00	mm

Yer düzlemi uzunluğu ve genişliği için belirli kurallar yoktur. Yer düzlemi boyutları, yer düzlemi kenarları ile yayılan yama kenarları arasındaki mesafenin çeyrek dalga boyundan daha az olmaması gerektiği şeklindeki temel kurala göre tasarlanmıştır [68]. Bu nedenle, anten modeli için yama kenarlarından çeyrek dalga boyu mesafesini ekleyerek yer düzleminin boyutu belirlenmiştir.

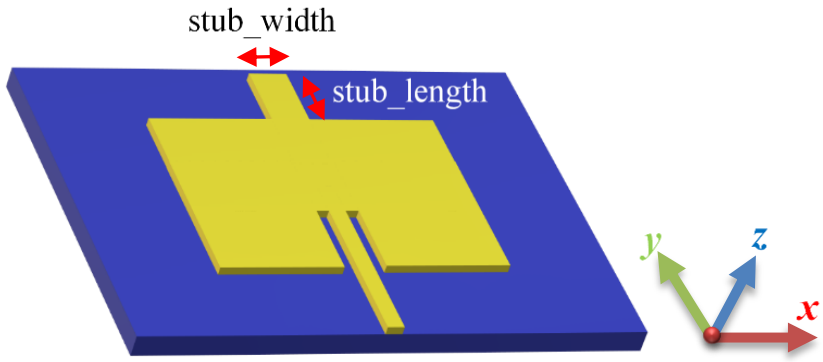
Yayılan kısım kayıplı bir iletken olarak modellenmiştir ve kalınlığı 0,035 mm olarak ayarlanmıştır. Besleme, F_i uzunluğu ve g genişliği boyutlarına sahip bir iç besleme parçası ile birlikte bir W_f genişliğine ve bir L_f uzunluğuna sahip bir mikroşerit besleme hattı aracılığıyla gerçekleştirilir. Tasarım için besleme hattı genişliği, 50Ω SMA konektörünün imalat ve empedans eşleştirme koşulları için 3 mm olarak alınmıştır. 50Ω'luk iç besleme genişliğini eşleştirmek için g, W_f, h ve ε_r ile birlikte hesaplanır. Ek beslemenin uzunluğu, F_i, en düşük S_{11} seviyelerine sahip oluncaya kadar parametrik tarama analizleri ile elde edilir. Antenin optimize edilmiş parametreleri Tablo 3.4'te özetlenmiştir; burada f_r (Anten#0) hedef frekansı gösterir ve f_r (Anten#1), bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak açıklanacak olan önerilen tasarım prosedürünün ilk adımının frekansını gösterir.



Şekil 3.19. Anten#1'in 3,5 GHz için yansıma katsayısının frekansa bağlı değişimi.

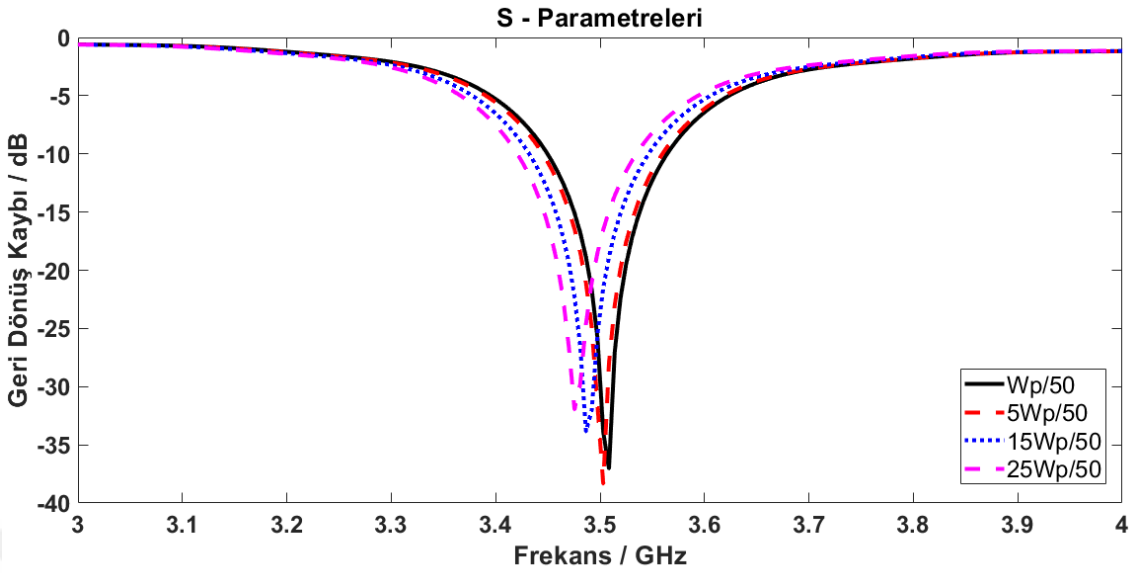
Yukarıdaki sonuçlara göre Anten#1, CST MWS [64] kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon sonuçları Şekil 3.19'da gösterilmektedir.

3,5 GHz için tasarlanan antenin, 3,5085 GHz'de, -37,971 dB'lik bir geri dönüş kaybı seviyesi ile rezonansa sahip oldugu ve 6,148 dBi yönlülüğü olduğu bulunmuştur. Bu değerleri başlangıç durumları olarak alacağız ve sonraki bölümlerde ayar çıkıntıları olan modellerle karşılaştıracağız. Ayar çıkıntısının etkilerini elde etmek için, antenin üst kenarının ortasına dikdörtgen şekilli bir çıkıntı yerleştiririz. Şekil 3.20, Anten#2 ile gösterilen değiştirilmiş anten modelini göstermektedir. *Stub_length* parametresi çıkıntının *y* yönündeki uzunluğunu ve *stub_width* parametresi çıkıntının *x* yönündeki genişliğini belirtir. Bu çıkıntı parametrelerinin değişimi, antenin radyasyon özelliklerini etkiler. Bu yuzden çıkıntı parametreleri hakkında detaylı bir parametrik analiz gerçekleştireceğiz.

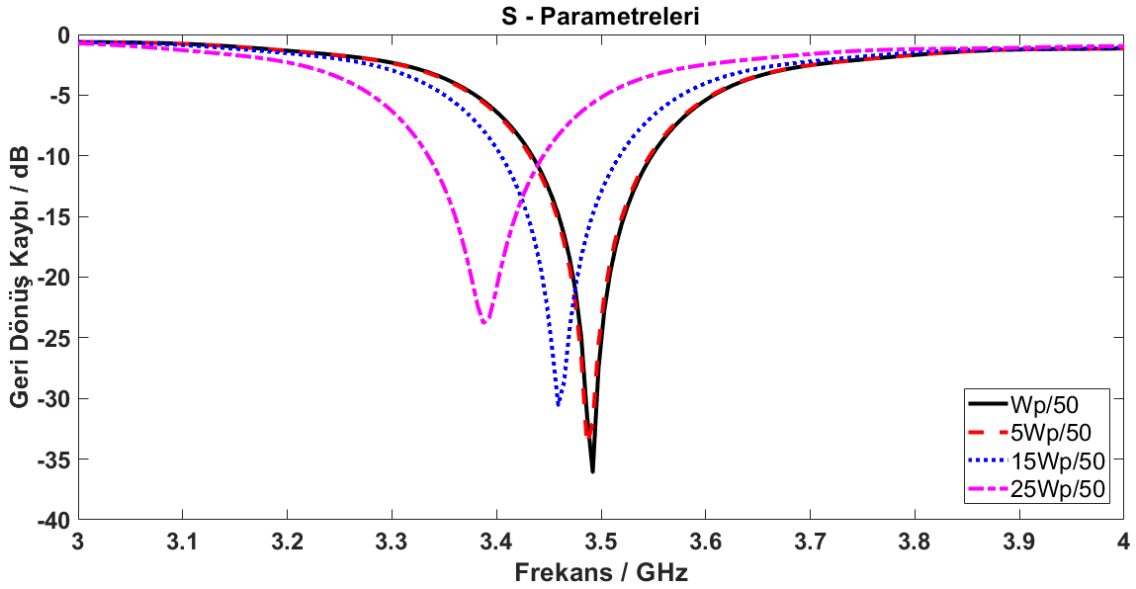


Şekil 3.20. Üst yayılan kenara çıkıntı yerleştrilmiş Anten#2.

Önceki çalışmalarda, çıkıntı uzunluğunun yayılan kenardaki dalga boyu neredeyse dörtte birine eşit olduğu durumlarda, çıkıntının yama rezonans frekansından daha düşük frekanslar için kapasitif empedans ve yama rezonans frekansından daha yüksek frekanslar için endüktif empedans sunabileceği belirtilmişti. [69-71]. Bu çalışmada, çıkıntının diğer uzunluk değerlerinin etkilerini elde etmek ve çıkıntı boyutlarını anten boyutları ile ilişkilendirmek için sırasıyla $W_p/50$ ve $L_p/50$ ile başlayan *stub_width* ve *stub_length* parametrelerini seçiyoruz. Daha sonra parametrik analiz amacıyla *stub_width* için $5W_p/50$, $15W_p/50$ ve $25W_p/50$ ve *stub_length* için $5L_p/50$, $15L_p/50$ ve $25L_p/50$ gibi diğer üç değeri seçiyoruz.



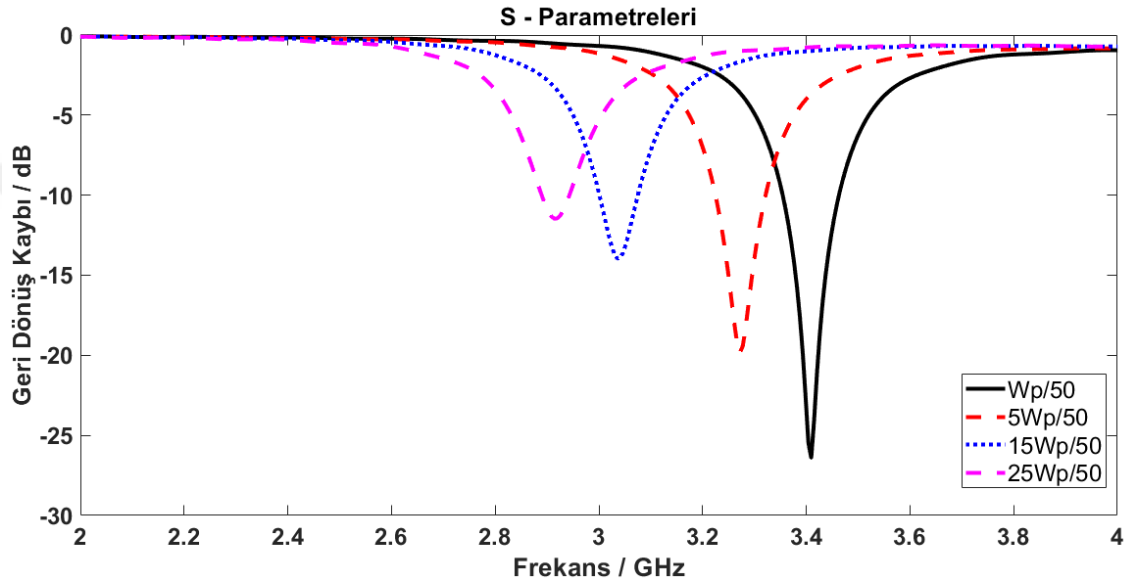
Şekil 3.21. stub_length=Lp/50 için *stub_width* değişiminin frekansa etkisi.



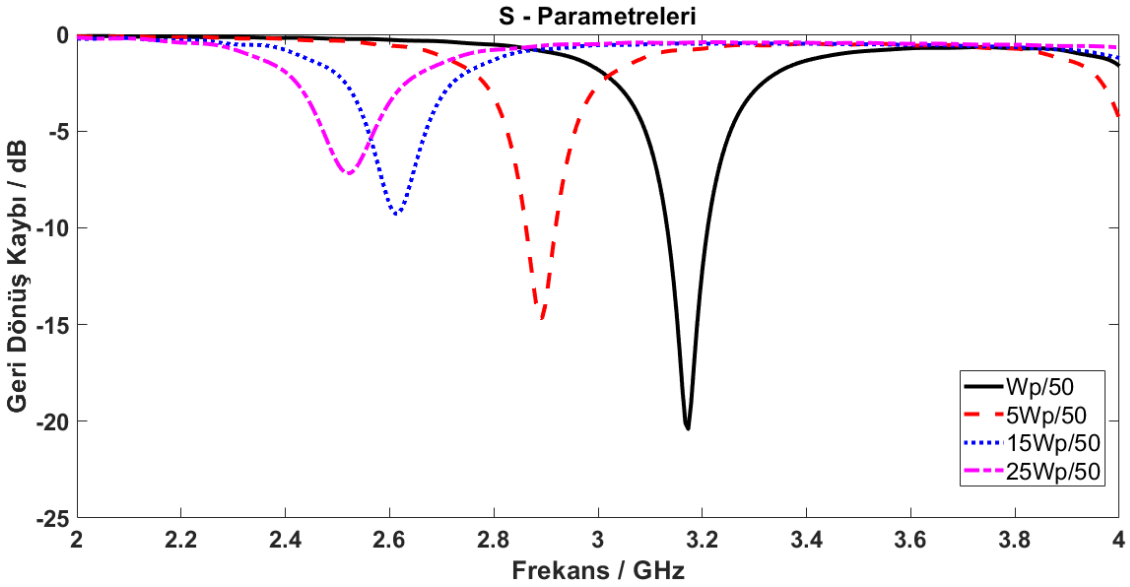
Şekil 3.22. stub_length=5*Lp*/50 için *stub_width* değişiminin frekansa etkisi.

Parametrik analiz için, her seferinde bir parametreyi seçilen değere sabitleyip diğerini değiştiriyoruz. Sonraki bölümlerde, çıkıntı boyutlarındaki değişimin etkilerini ayrıntılı olarak sunacağız. İlk olarak, *stub_width* parametresinin 3,5 GHz'de çalışan yama anten için etkilerini sunacağız. Bu parametre, sabit *stub_length* değerleri için *n*'nin 1, 5, 15 ve 25 olarak seçildiği $n \times W_p/50$'lik adımlarla $W_p/50$ ila $25W_p/50$ arasında değişir. Şekil 3.21–3.24, *stub_width* değişikliğine bağlı olarak rezonans frekansı varyasyonlarını

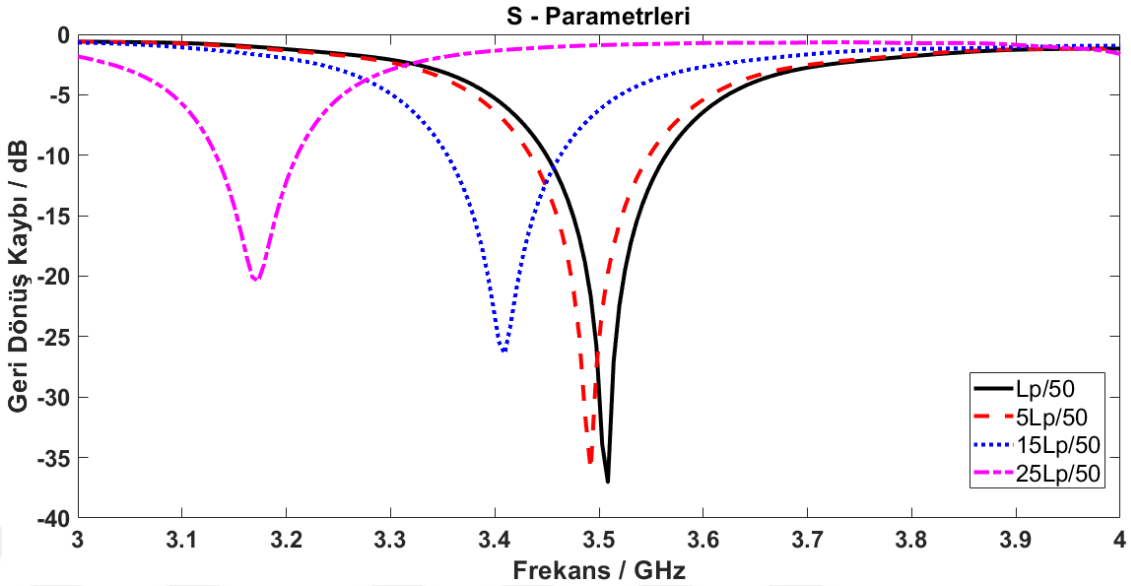
göstermektedir. *Stub_length* parametresinin düşük değerleri için stub_width parametresindeki artış hem rezonans frekansı kaymasını hem de dönüş kaybı seviyelerini çok fazla etkilemez. Bununla birlikte, çıkıntı uzunluğu arttığında ve $5L_p/50$, $15L_p/50$ ve $25L_p/50$ değerlerine sahip olduğunda ve dielektriğin uç noktasına daha yakın olduğunda, *stub_width*, frekans kaymasını daha fazla etkiler. Rezonans frekansı 2,52 GHz'e kadar kayar ve bu 3,5 GHz anten için neredeyse 1 GHz aşağı kayma anlamına gelir.



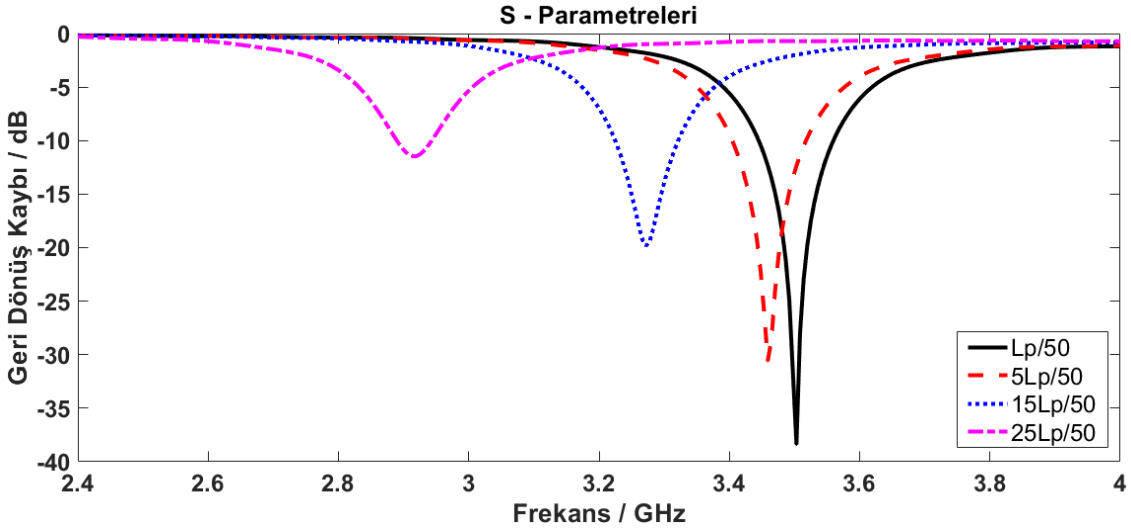
Şekil 3.23. stub_length=15*Lp*/50 için *stub_width* değişiminin frekansa etkisi.



Şekil 3.24. stub_length=25*Lp*/50 için *stub_width* değişiminin frekansa etkisi.



Şekil 3.25. stub_width=W*p*/50 için *stub_length* değişiminin frekansa etkisi.

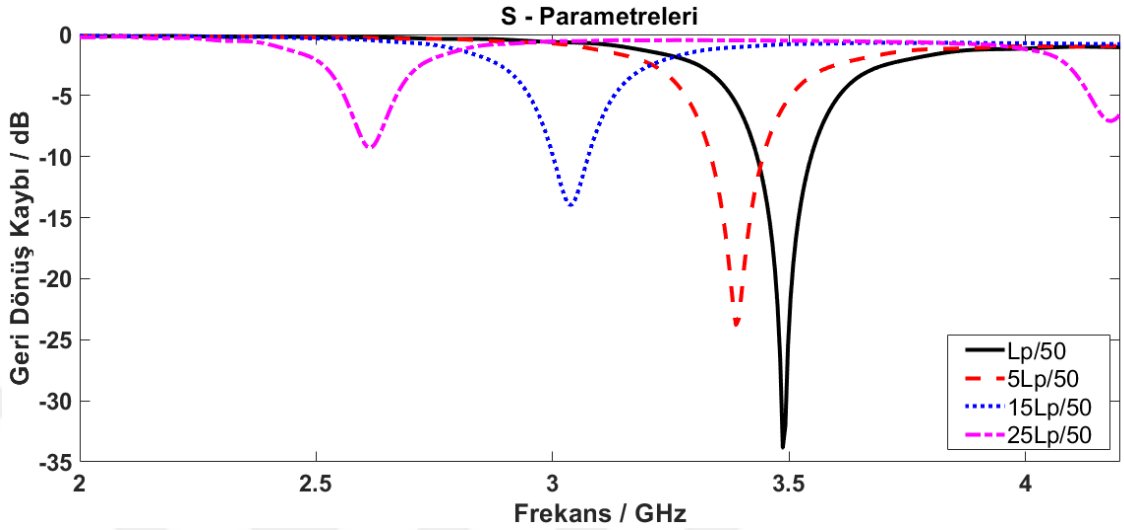


Şekil 3.26. stub_width=5W*p*/50 için *stub_length* değişiminin frekansa etkisi.

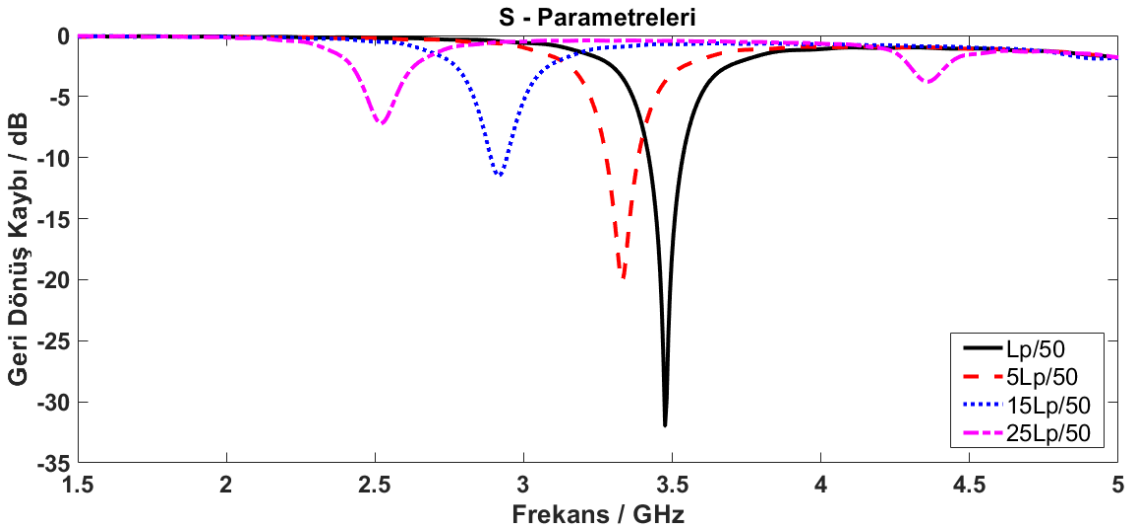
Rezonans frekansının kaydırılmasının yanı sıra, dönüş kaybı seviyeleri, kenar boyunca empedans uyumunun bozulması nedeniyle *stub_width* parametresinin artışından da etkilenir.

Anten alanının artması, frekansların aşağıya doğru kaymasına neden olurken, giriş empedans uyumsuzluğu, yansıma katsayısı parametrelerinin antenin ışıma yapamayacak seviyelere düşmesine neden olur. *Stub_length* parametresinin etkilerini elde etmek için, başlangıç noktası olarak L_p/50'yi alan aynı prosedürü kullanırız ve bunu, dielektrik

sınırına ulaşıncaya kadar $n \times Lp/50$ değerleriyle arttırırız (n=1, 5, 15 ve 25). Şekil 3.25-3.28, rezonans frekansı üzerindeki *stub_length* etkisini göstermektedir.



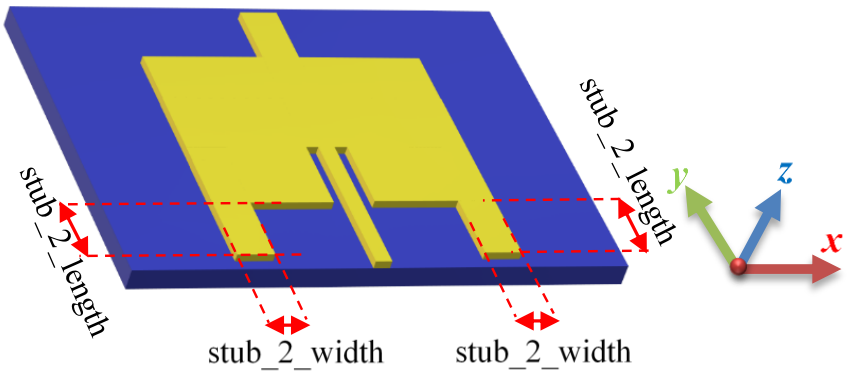
Şekil 3.27. stub_width=15W*p*/50 için *stub_length* değişiminin frekansa etkisi.



Şekil 3.28. stub_width=25*Wp*/50 için *stub_length* değişiminin frekansa etkisi.

Stub_width parametresinin düşük değerleri için *stub_length* parametresindeki artış hem rezonans frekansı kaymasını hem de dönüş kaybı seviyelerini çok fazla etkilemez. Bununla birlikte, *stub_width* genişlediğinde ve $5W_p/50$, $15W_p/50$ ve $25W_p/50$ değerlerine sahip olduğunda ve yamanın son noktasına daha yakın olduğunda, *stub_length* frekansı gittikçe daha fazla etkiler. Çıkıntı genişliğini artırmanın etkilerine benzer şekilde, çıkıntı uzunluğunu arttırmak yansıma katsayısı seviyelerini düşürür. Ayrıca, kenar boyunca

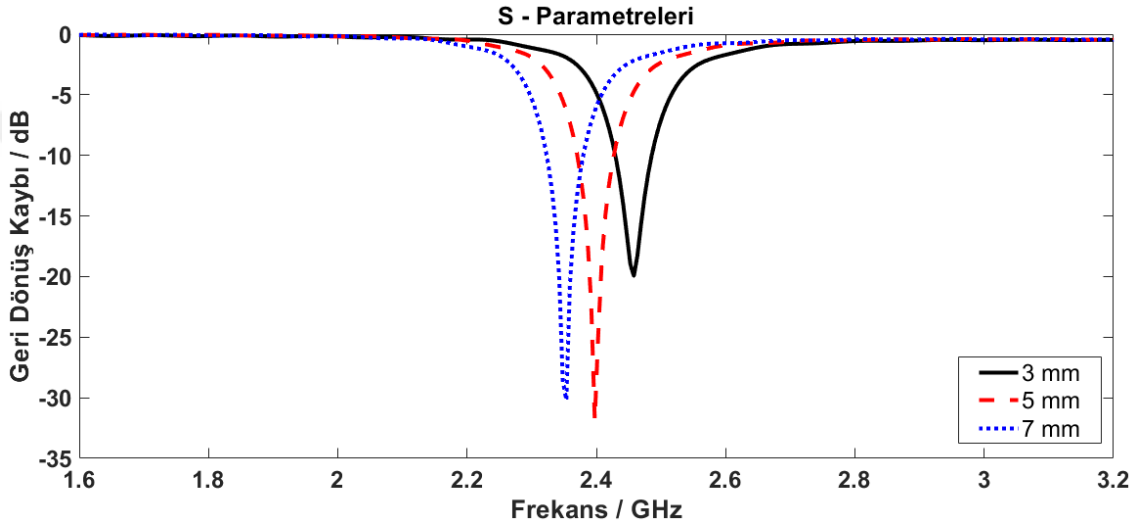
empedansın uyumunun bozulması, geri dönüş kaybı seviyelerinin -10 dB'nin altına düşmesine neden olur. Bu noktada, empedans eşleşmesine ulaşmak ve dönüş kaybı seviyelerini ışıma için makul seviyelere geri getirmek için bir yöntem öneriyoruz. Ayar çıkıntıları olan mikroşerit antenler için uygun empedans eşleşmesi düşünüldüğünde, besleme konumu çıkıntının diğer tarafında yer almalıdır ve daha iyi eşleşme için besleme konumu, çıkıntının mevcut olduğu *y* ekseni konumundan hareket ettirilebilir [72-73]. Çalışmalarda, bir yama anteninin rezonans frekansının, çıkıntının genişliğine ve uzunluğuna bağlı olarak elde edilebilen ayar ile bir yama anteninin bir kenarına bir ayar çıkıntısı yerleştirilerek nasıl ayarlanabileceği ve pratik ayar aralığının sınırlı olduğu gösterilmiştir [74-75]. Dahası, antenin bir kenardan yüklenmesi, asimetrik alan dağılımına ve yüksek çapraz polarizasyon seviyelerine neden olur [76]. Besleme konumunu değiştirmeden ve alan dağılımını daha simetrik hale getirmek için, alt yayılan kenarın köşelerinde iki ek çıkıntı öneriyoruz. Bu modifikasyon ayrıca antenin çapraz polarizasyon seviyelerini geliştirecek ve sonuç olarak geri dönüş kaybı seviyelerini artıracaktır. Şekil 3.29, Anten#3 olarak belirtilen ek ayar çıkıntılarına sahip anteni göstermektedir. Bu çıkıntılar, sırasıyla *stub_2_width* ve *stub_2_length* parametre adlarıyla aynı genişliğe ve uzunluğa sahiptir.



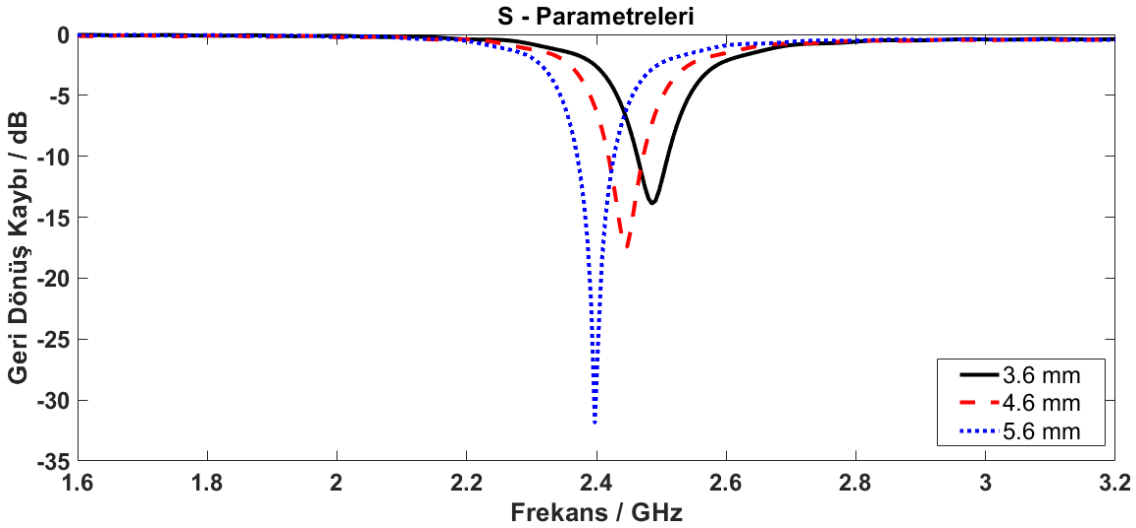
Şekil 3.29. Ek ayar çıkıntıları ile Anten#3.

Bu modelle, antenin altındaki ayar çıkıntıları tarafından, çıkıntıların genişliği ve uzunluğu olmak üzere dört fiziksel parametre eklenir. Bu nedenle, yeni model, çalışma frekansını ve antenin diğer özelliklerini kontrol etmek için değiştirilebilen çok sayıda parametre içerir. Eklenen bu çıkıntıların etkilerini elde etmek için Anten#2'de -10 dB'nin altında kritik bir dönüş kaybı seviyesi seçiyoruz. Şekil 3.24 veya 3.27'den görülebileceği gibi,

çıkıntı boyutları *stub_width*=15W_p/50 ve *stub_length*=25L_p/50 değerlerini aldığında, dönüş kaybı seviyesinin -9,28 dB olduğu görülür ve anten bu noktada uygun radyasyon özelliklerine sahip değildir. Çıkıntıların bu değerleri için antenin çalışma frekansı 2,6 GHz'dir, bu da çıkıntının alt bölgeye doğru %26'lık bir frekans kaymasına neden olduğu anlamına gelir. Bu noktada, antenin bu kaydırılmış frekansta makul bir -10 dB bant genişliğine sahip olmasını hedefliyoruz. Bu nedenle, *stub_2_width* ve *stub_2_length* boyutları hakkında parametrik bir analiz yaptık.



Şekil 3.30. stub_2_length=5.6 mm için *stub_2_width*'in etkileri.

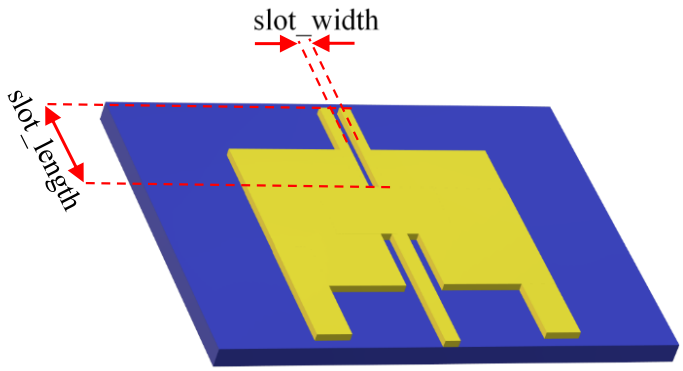


Şekil 3.31. stub_2_width=5 mm için *stub_2_length*'in etkileri.

En iyi dönüş kaybı seviyelerini *stub_2_length* 5.6 mm ve *stub_2_width* 5 mm olduğunda elde ettik, bu da *stub_2_width*'in yaklaşık $\lambda/8$ mm olduğu ve *stub_2_length*'in $\lambda/8$ mm'den biraz daha uzun olduğu anlamına gelir.

Tasarım kolaylığı için *stub_2_width* ve *stub_2_length* eşit olarak alınabilir, yani her ikisi de $\lambda/8$ mm uzunluğunda olabilir. Farklı değerler için frekans tepkileri Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de gösterilmektedir.

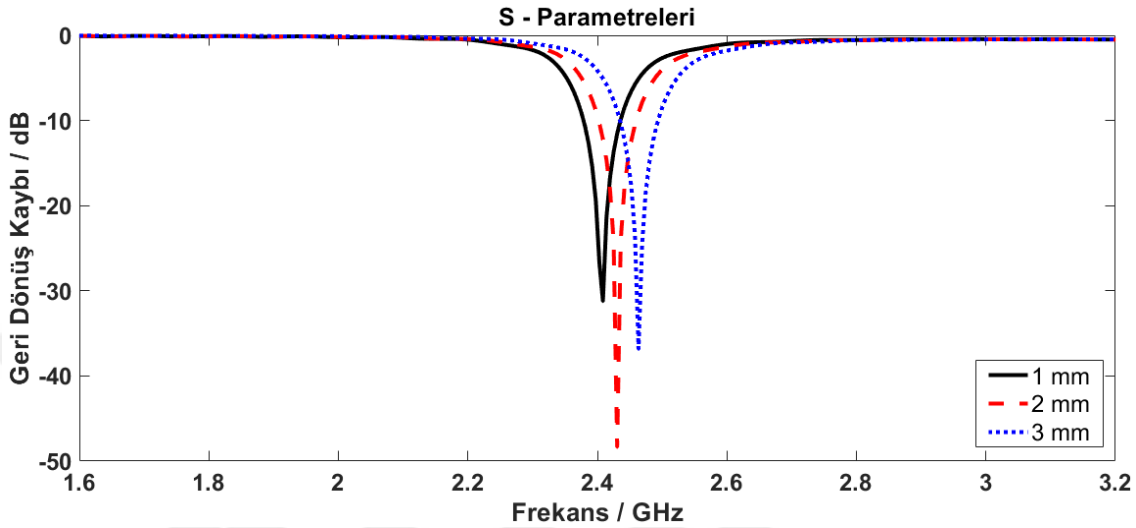
Parametrik analizler, bir parametre değiştirilerek diğeri en iyi değerinde sabitlenerek yapılmıştır. Ek ayar çıkıntılar yerleştirerek, -31,85 dB'lik iyileştirilmiş bir dönüş kaybı elde ederiz, bu da dönüş kaybı seviyesi için 22,57 dB iyileşme ve 2,40 GHz'de 56,82 MHz bant genişliği iyileştirmesi anlamına gelir. Anten#2 ve Anten#3'ün rezonans frekansları sonuçları karşılaştırılırsa, kenar empedans değişimi nedeniyle 2,61 GHz'den 2,40 GHz'e hafif bir frekans kayması vardır, ancak, -9,23 dB'den -31,85 dB'e kayda değer bir dönüş kaybı ilerlemesi vardır. Üstelik 0 MHz'den 56,82 MHz'e -10 dB bant genişliği artışı elde edilir.



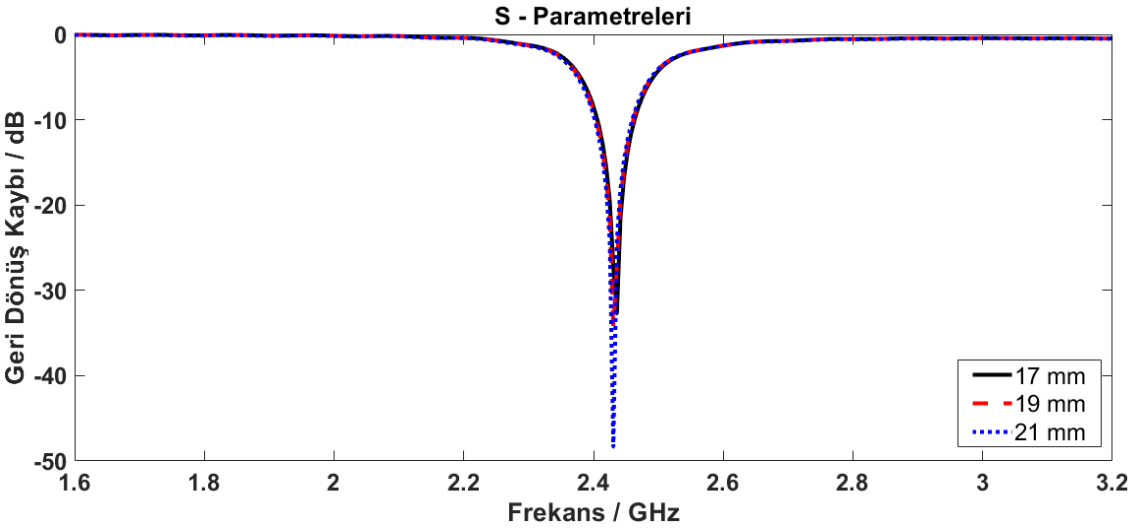
Şekil 3.32. Üç ayarlama çıkıntısı ve bir yuvaya sahip önerilen anten modeli, Anten#4.

Son adım olarak, mevcut performansı artırmak ve ek empedans eşleşmesi elde etmek için üst çıkıntıya bir yuva açılmıştır. Şekil 3.32, Anten#4 olarak belirtilen önerilen antenin tasarım konseptini göstermektedir. Anten#3'e ek olarak, üst çıkıntıdaki yuva tarafından *slot_width* ve *slot_length* ile gösterilen iki fiziksel parametre daha eklenir. Yuvanın uzunluğunun ve genişliğinin anten özellikleri üzerindeki etkilerini elde etmek için, *slot_length* ve *slot_width* parametreleri için bir parametrik analiz gerçekleştirdik. Şekil 3.33 ve Şekil 3.34, yuva parametrelerinin varyasyonlarına verilen frekans yanıtlarını

göstermektedir. *Slot_length* parametresinin değişimi rezonans frekans noktalarını etkilerken, *slot_width* parametresinin değişimi esas olarak aynı çalışma frekansı için geri dönüş kaybı seviyelerini etkiler.



Şekil 3.33. slot_length=21 mm için *slot_width* değişiminin etkileri.



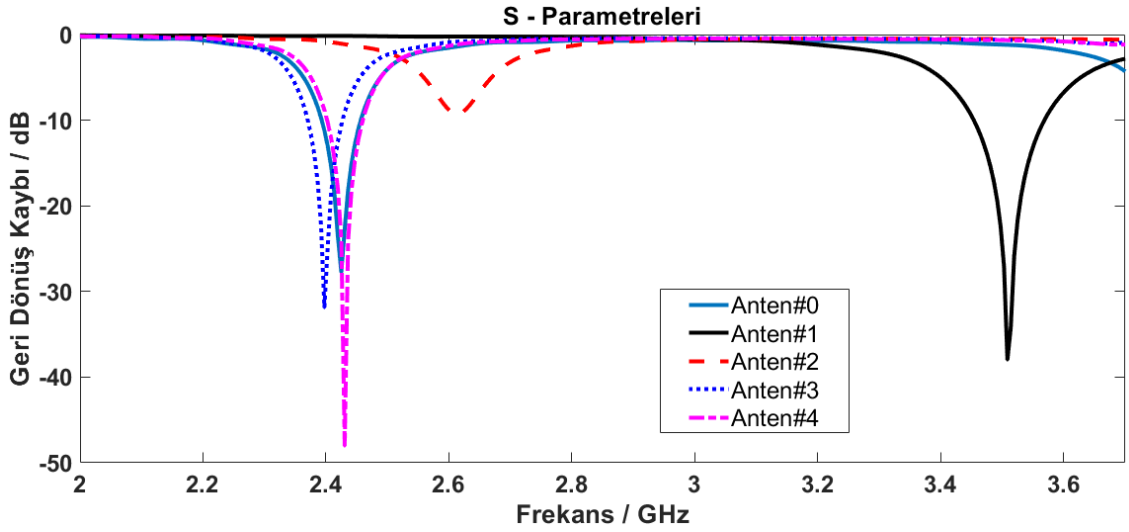
Şekil 3.34. slot_width=2 mm için *slot_length* değişiminin etkileri.

Her tasarımla, geri dönüş kaybı seviyeleri ve 10 dB bant genişlikleri açısından önemli iyileştirmeler elde edilmiştir. Nihai tasarım için (Anten#4), geri dönüş kaybı seviyemiz -48.02 dB'dir, bu da Anten#3'e kıyasla 16.17 dB'lik ek bir gelişme anlamına gelir. Ek olarak, 10dB bant genişliği 58.45 MHz'dir ve bu, yuvanın 10 dB bant genişliğinde Anten#3'e kıyasla 1,63 MHz artışla katkıda bulunduğu anlamına gelir.

Şekil 3.35, Anten#0, #1, #2, #3 ve #4 olarak belirtilen tüm antenlerin frekans yanıtlarının karşılaştırmasını gösterir. İyileştirme şekilden açıkça görülebilir. Yapılan çoklu parametrik analizlerin sonuçlarını özetlersek, tasarım aşamaları Şekil 3.36'da verilen akış şemasına göre gerçekleştirilir. $25L_p/50$ ve $15W_p/50$ boyutlarında üst kenarda bir ayar çıkıntısı bulunan antenlerin yüklenmesi, rezonans frekanslarını her tasarım için orijinal frekansın %24-%27'si arasında kaydırmıştır. Tablo 3.5, 1.3 GHz ve 8 GHz arasındaki frekanslarda çalışan antenler için $25L_p/50$ ve $15W_p/50$ boyutlarında ayar çıkıntısının etkisinin başka örneklerini göstermektedir.

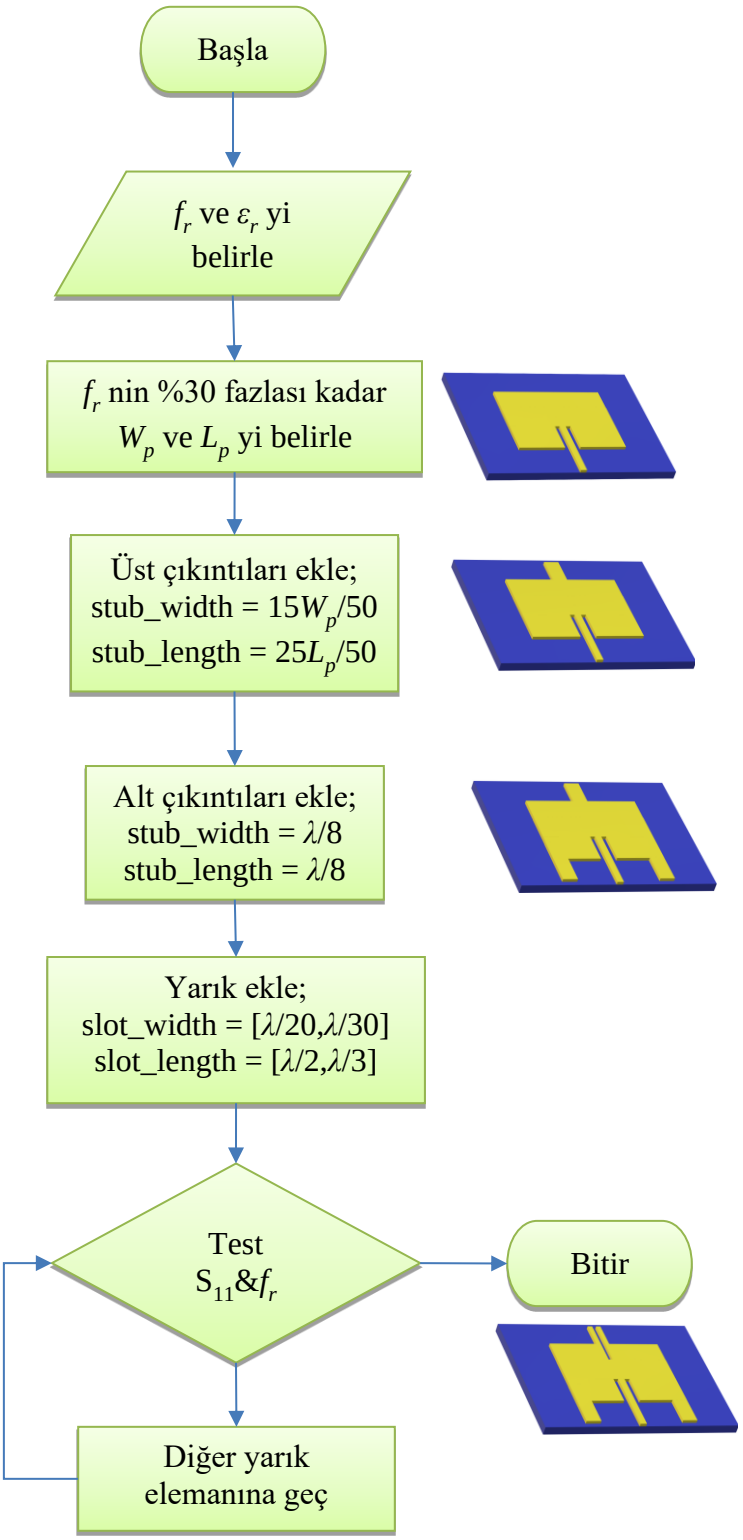
Tablo 3.5. Farklı frekanslar için tasarım aşamalarının doğrulanması.

f_r (GHz)	Yüklenen çıkıntı boyutları (genişlik×uzunluk)	f_r (GHz)	Frekans kayması (%)
1,3	$15W_p/50 \times 25L_p/50$	0,948	27
2,6	$15W_p/50 \times 25L_p/50$	1,92	26
3,9	$15W_p/50 \times 25L_p/50$	2,924	25
5,2	$15W_p/50 \times 25L_p/50$	3,964	25
6,64	$15W_p/50 \times 25L_p/50$	5,032	24
8,06	$15W_p/50 \times 25L_p/50$	6,13	24



Şekil 3.35. Anten #0, #1, #2, #3, ve #4 için frekans cevabı karşılaştırmaları.

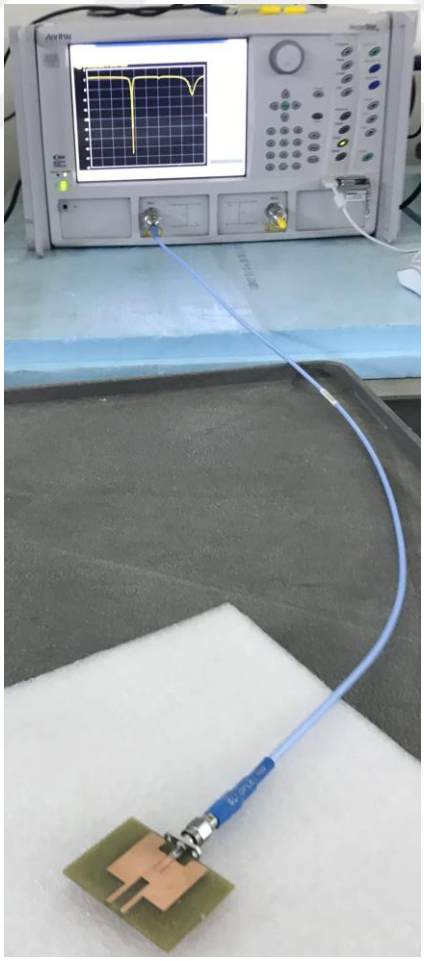
Bu nedenle, daha kompakt yapılara sahip olmak için tasarım prosedürünün, hedef banttan %30 fazla bir frekans için ilk adımda anteni almaya başlaması gerektiği sonucuna varılabilir. Örneğin, 5 GHz frekans için kompakt bir anten tasarlamak isteniyorsa, başlangıç noktası önce 5+5×(30/100)=6.5 GHz için bir anten tasarlamaktır.



Şekil 3.36. Önerilen tasarım prosedürü için akış şeması.

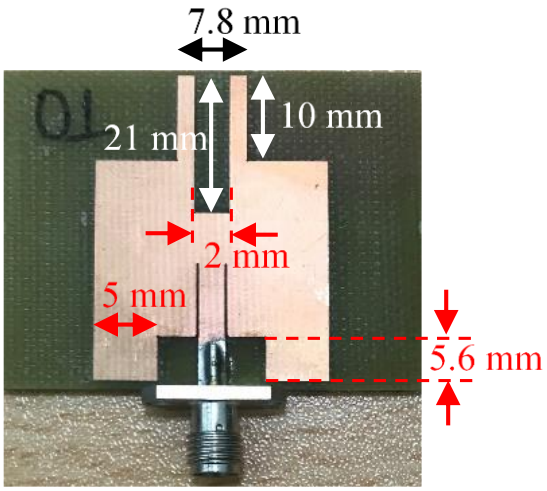
Daha sonra, bu frekans için dikdörtgen anten, iletim hattı modeline göre tasarlanır. Bundan sonra, gerekli noktada frekans değerine sahip olmak için, dikdörtgen ayar çıkıntısı, genişlik için $15W_p/50$ ve uzunluk için $25L_p/50$ uzunluğunda antenin üst kenarına yüklenir. Bu değişiklikler nedeniyle, geri dönüş kaybı seviyeleri makul seviyelerde değildir, bu nedenle antenin alt köşelerine ek çıkıntılar yüklenir. Ve son bir iyileştirme için, en iyi S_{11} seviyeleri için kısa bir parametrik analiz gerçekleştirilerek dikdörtgen şekilli bir yuva üst çıkıntıya oyulur. Anten#1, #2, #3 ve #4 çalışma boyunca tasarım aşamalarındaki ilerlemeyi göstermek için karşılaştırılmıştır, ancak ana performans karşılaştırması Anten#0 ve #4 arasındadır.

Simülasyon sonuçlarının geçerliliğini elde etmek için Anten#4'ün bir prototipi üretilmiş ve ölçülmüştür. Geri dönüş kaybı seviyelerinin ölçümleri için VNA modeli Anritsu 4644B (0-40 GHz) kullanılmıştır. Şekil 3.37, fabrikasyon anten ile ölçüm kurulumunu göstermektedir.



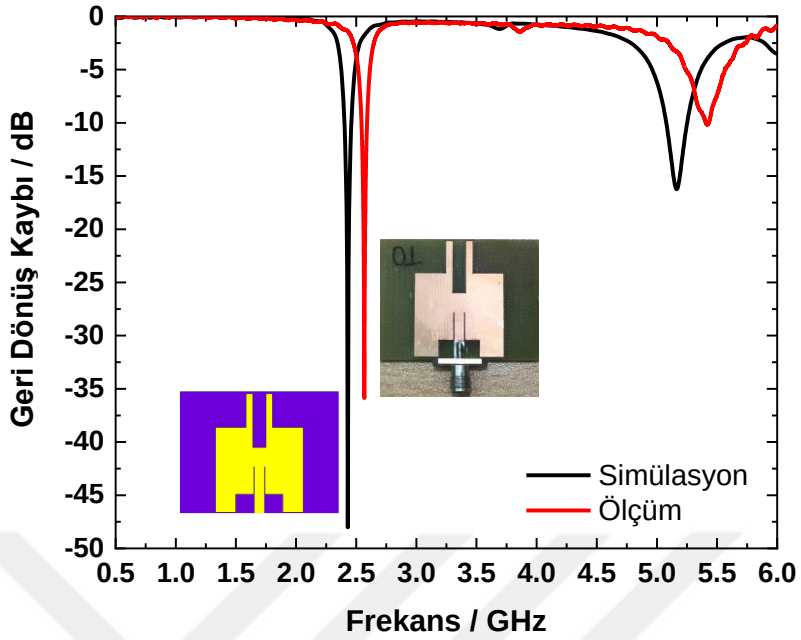
Şekil 3.37. Ölçüm düzeneği.

Şekil 3.38, boyutlarıyla birlikte Anten#4'ün fabrikasyon modelini göstermektedir. Şekil 3.39, ölçülen geri dönüş kaybı seviyelerini ve simüle edilen sonuçları birlikte gösterir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu açıkça görülmektedir. Hafif bir frekans kayması vardır. Bunun nedeni, SMA konektörünün lehimlenmesi sırasında ortaya çıkan fabrikasyon toleransı ve ideal olmayan koşullardır.



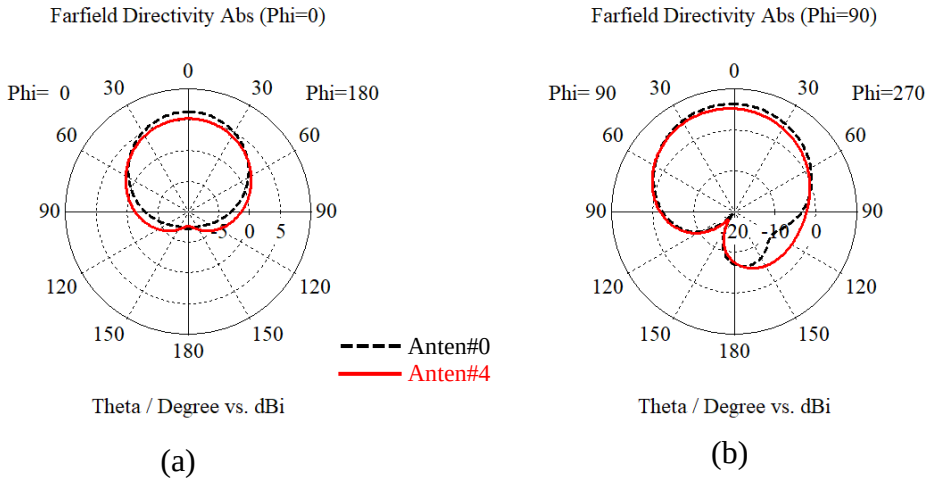
Şekil 3.38. Üretilen Anten#4'ün boyutları.

Şekil 3.40(a) ve (b), 2.43 GHz'de Anten#0 ve Anten#4 için E-düzlemi ve H-düzlemi radyasyon özelliklerini göstermektedir. Sonuçlar, E-düzlemi için Anten#0'ın 3 dB açısal genişliği 89,7° olan 6.28 dBi'lik bir ana lob büyüklüğüne sahip olduğunu ve Anten#4 için ana lob büyüklüğünün 5.16 dBi ve 3 dB bant genişliği 111,2° olduğunu göstermektedir. Ek olarak, H-düzlemi için Anten#0, 3 dB açısal genişliği 98,1° olan 6.31 dBi ana lob büyüklüğüne sahiptir ve Anten#4 için ana lob büyüklüğü 106,1° 3 dB bant genişliği ile 5.32 dBi'dir. Şekillerden, önerilen yöntemle minyatürleştirilmiş anten modelinin orijinal antenle hemen hemen aynı radyasyon özellikleri ile gerçekleştirilebileceği açıkça anlaşılabilir. Anten#0 ve Anten#4'ün akım dağılımları Şekil 3.41'de sunulmuştur. Anten#0 için akım dağılımı anten yüzeyi üzerindedir. Yüzeydeki bu akım dağılımı, antenin yayılma özelliklerini fazla etkilemez. Uygulanan modifikasyonlar sayesinde yüzey akım dağılımı olması gerektiği gibi antenin alt ve üst uçlarına yönlendirilir. Üstelik, üst köşelerde mevcut olan akım dağılım yoğunluğunun arttırılmasına ek olarak, alt ayar çıkıntılarına karşılık gelen yayılma kenarlarında yeni akım dağılımları yaratılmıştır.



Şekil 3.39. Anten#4 için ölçüm ve simulasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

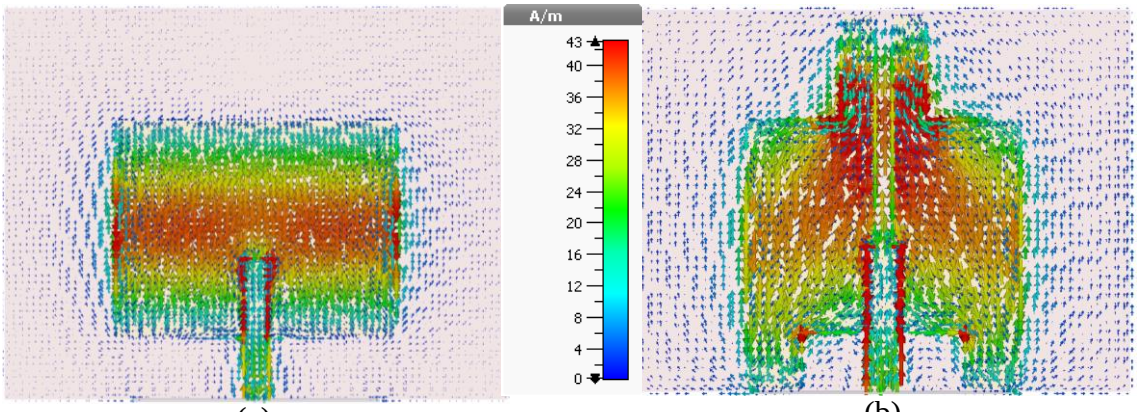
Mevcut yaklaşımın daha ileri düzeyde doğrulanması için farklı modeller 3,5 GHz, 4,7 GHz ve 5,8 GHz'de çalışmak üzere tasarlanmıştır. ε_r=4,4 dielektrik geçirgenliği olan FR4 tabanı, 1,524 mm ile aynı yüksekliğe ve δ=0,025 degerine sahip taban olarak tüm modeller için kullanılmıştır. Ayrıca, tabanın boyutları aynı prosedür kullanılarak hesaplanır [68].



Şekil 3.40. 2.43 GHz'de Anten#0 and Anten#4 için ışıma örüntüleri, (a) E–düzlemi, (b) H-düzlemi.

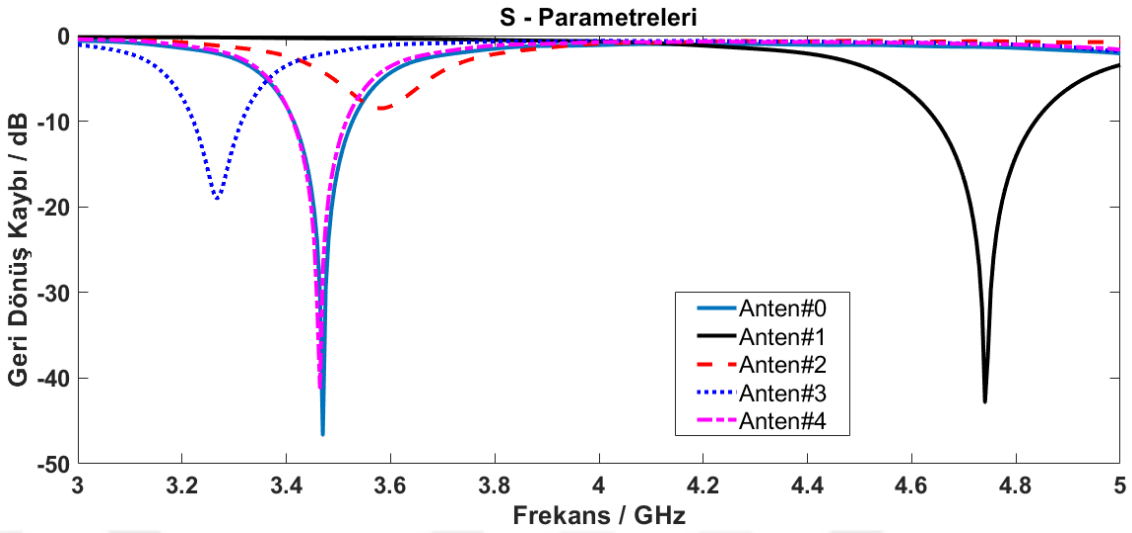
Şekil 3.42, Şekil 3.43 ve Şekil 3.44'teki her çizim, sırasıyla 3,5 GHz, 4,7 GHz ve 5,8 GHz bantları için her tasarım adımının antenlerinin frekans yanıtlarının karşılaştırmalarını gösterir. Dört farklı frekans bandı için Anten#4 ile aynı etkiler elde edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.6'da özetlenmiştir. Antenlerin son modelleri bize yapıları daha kompakt alanlarda tasarlama imkânı da vermiştir. 2,43 GHz'de çalışan önerilen antenin boyutu $W_p \times L_p$=26,06 mm×20,02 mm'dir, ancak 2,43 GHz için geleneksel bir yama anten tasarlarsak $W_p \times L_p$=37,53 mm×29,08 mm boyutuna sahiptir. Benzer şekilde, 3,46 GHz'de çalışan önerilen antenin boyutu $W_p \times L_p$=19,41 mm×14,74 mm'dir, ancak 3,46 GHz için geleneksel bir yama anten tasarlarsak $W_p \times L_p$=26,37 mm×20,25 mm boyutuna sahiptir. 4,7 ve 5,8 GHz çalışan antenler için de aynı sonuçlar elde edilmektedir.

Tasarlanan anten, minyatürleştirme tekniği, anten boyutları, boyut küçültme yüzdeleri, rezonans frekansları, rezonans frekanslarında en yüksek kazançlar ve dönüş kaybı seviyeleri açısından Tablo 3.7'de literatürde yer alan önerilen minyatürleştirilmiş antenlerle karşılaştırılmıştır. Tabloda, önerilen yöntemle 2,4 GHz, 3,5 GHz, 4,7 GHz ve 5,8 GHz hızında çalışan antenler ile sırasıyla %51, %47, %44 ve %47 oranında boyut küçültme sağlanabildiği görülmektedir. Önerilen yöntemin en önemli avantajı, tasarım parametrelerinin boyutlarının çalışılan dalga boyu ile ilişkilendirilmesidir. Böylelikle farklı frekanslar ve farklı malzemelerle çalışan antenler için yöntemin rahatlıkla uygulanabilir olması sağlanmıştır.

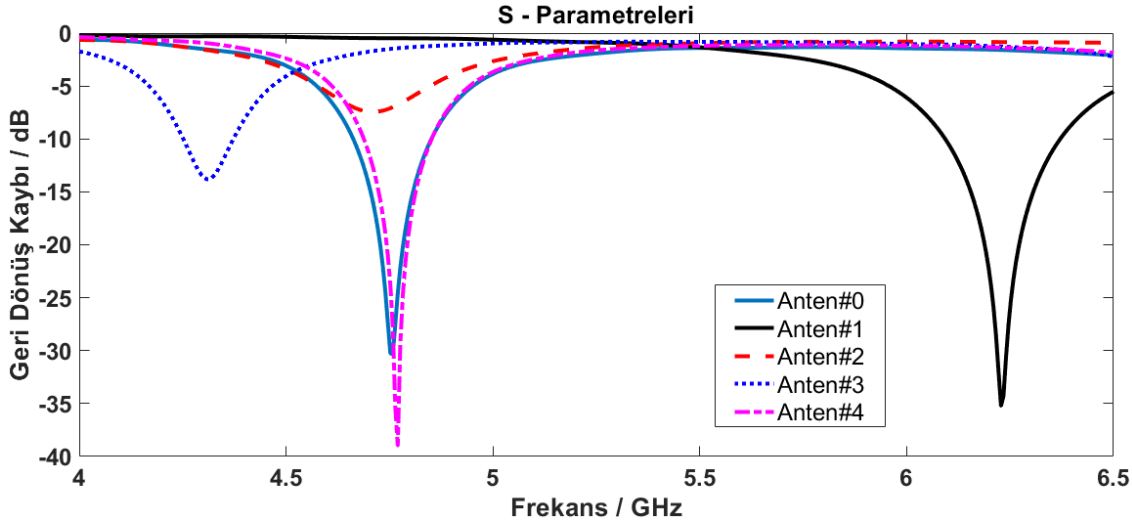


(a) (b)

Şekil 3.41. Rezonans frekanslarında akım dağılımları, (a) Anten#0, (b) Anten#4.



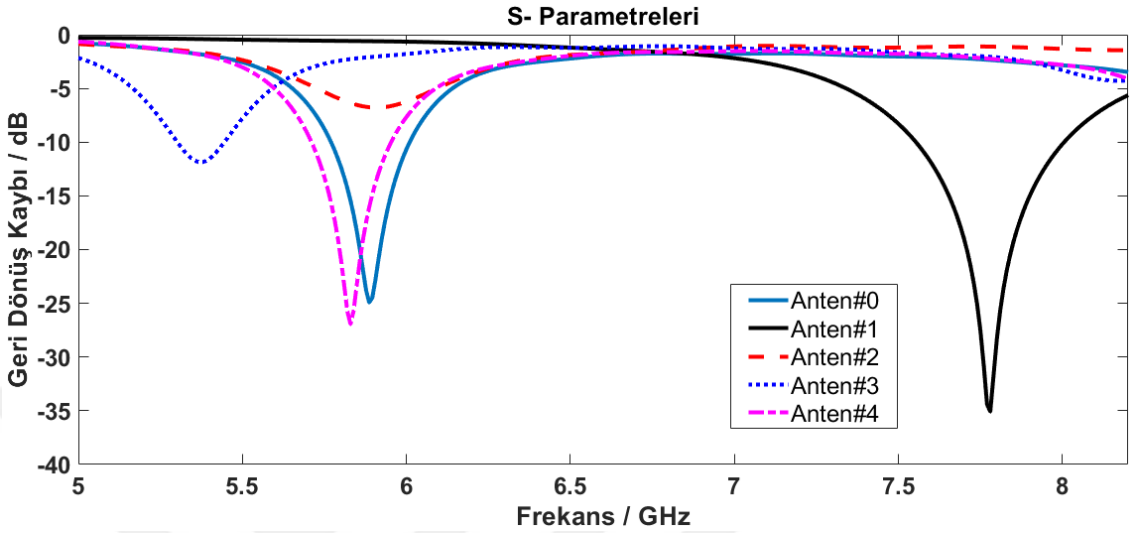
Şekil 3.42. Önerilen yöntemin 3,5 GHz'de çalışan anten için doğrulanması.



Şekil 3.43. Önerilen yöntemin 4,7 GHz'de çalışan anten için doğrulanması.

Yama antenleri için kompakt tasarımlar elde etmek amacıyla yeni bir yöntem önerilmiş ve dikdörtgen şekilli ayar çubuklarının 2,4 GHz, 3,5 GHz, 4,7 GHz ve 5,8 GHz için tasarlanmış dikdörtgen yama antenin rezonans frekansları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yama anteninin tek bir çıkıntı ile yüklenmesi, bant genişliği ve dönüş kaybı seviyelerinde sınırlamalara neden olduğu bulunmuştur. Bu sorunu çözmek için, antenin alt yayılan kenarındaki köşelere yüklenmiş ek ayar çıkıntıları önerdik. Sonuç olarak, antenin geri dönüş kaybı seviyelerinde ve bant genişliğinde dikkate değer bir ilerleme sağlanmıştır. Ek iyileştirmeler için, üst yayılan kenardaki ayar çıkıntısına dikdörtgen şekilli bir yuva oyulmuştur. Sonuç olarak, bir ayar çıkıntısının geri dönüş

kaybı seviyeleri ve bant genişliği üzerindeki olumsuz etkisi, çıkıntı geniş yüzey boyutlarına sahip olduğunda ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3.44. Önerilen yöntemin 5,8 GHz'de çalışan anten için doğrulanması.

Tablo 3.6. Hedef antenler ve önerilen tasarımlar arasındaki karşılaştırma.

Anten Par.	**2,4 GHz**		**3,5 GHz**		**4,7 GHz**		**5,8 GHz**	
	Ant.#0	Ant.#4	Ant.#0	Ant.#4	Ant.#0	Ant.#4	Ant.#0	Ant.#4
f_r(GHz)	2,43	2,43	3,47	3,46	4,76	4,77	5,89	5,83
S_{11} (dB)	-27,74	-48,02	-46,65	-41,14	-30,32	-38,98	-24,92	-26,94
A.Yoğ. (A/m^2)	124,3	209,1	327,4	416,4	815,4	1433	1503	2244
Ana Lob (dBi)	6,31	5,32	6,15	5,38	6,21	5,56	6,36	5,59
10 dB BG (MHz)	63,8	58,5	113,5	102,3	188,5	166,1	241,8	246,1
% BG	2,63	2,41	3,27	2,96	3,96	3,48	4,11	4,22
W_p (λ)	0,63	0,44	0,64	0,47	0,65	0,49	0,65	0,49
L_p (λ)	0,49	0,33	0,49	0,36	0,49	0,37	0,49	0,36
$W_p \times L_p$ (λ^2)	0,31	0,15	0,32	0,17	0,32	0,18	0,32	0,17
W_{gp} (mm)	68,01	47,46	48	34,81	35,51	27,44	28,88	22,33
L_{gp} (mm)	52,76	36,57	36,99	26,80	27,14	20,77	21,90	16,72
$W_{gp} \times L_{gp}$ (mm^2)	3588,2	1735,61	1775,52	932,91	963,74	569,93	632,47	373,35

Tablo 3.7. Önerilen tasarımlar ve literatür çalışmaları arasındaki karşılaştırma.

Referans	**Anten Boyut (mm^3)**	**Boyut Azalma Oranı**	**Frek. (GHz)**	**Kazanç (dBi/dB)**	**Geri Dönüş Kaybı (dB)**
[77]	48×41,6×1.6	22%	1,708	-	-
[78]	35×29×1,5	37,9%	2,47	4,68 dBi	-24
[79]	37×47×2	62,3%	2,29	5,72 dB	-25
[80]	43×70×1,5	57%	0,915	4,74 dB	-
[81]	40×40×4,9	-	2,5 5,8	4,3 dBi 3,8 dBi	-28 -18
[82]	64×45×1	-	2,5 5,8	-1,8 dBi 1,1 dBi	-18 -19
Bu çalışma	26×20×1,5	51%	2,4	5,32 dBi	-48
	20×15×1,5	47%	3,5	5,38 dBi	-40
	15×11×1,5	44%	4,7	5,56 dBi	-39
	12×8.8×1,5	47%	5,8	5,59 dBi	-27

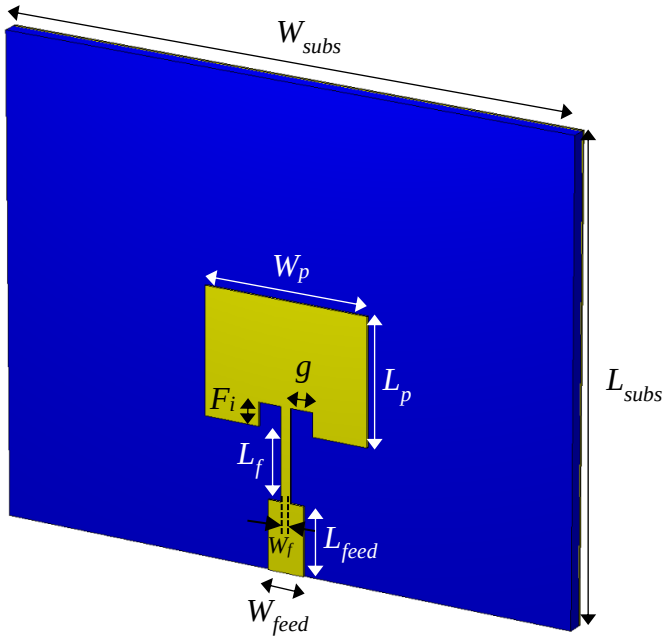
Daha küçük alanı kaplayan son model üretilmiştir ve üretilen antenin simüle edilen ile neredeyse aynı sonuçlara sahip olduğu gösterilmiştir. Daha fazla doğrulama için, 3,5 GHz, 4,7 GHz ve 5,8 GHz için farklı antenler tasarlanmıştır. Aynı prosedür, değiştirilmiş frekanslarda daha kompakt boyuta ve uygun radyasyona sahip olmak için antenlere uygulanır. Sonuç olarak, dönüş kaybı seviyelerinin ve kaydırılmış frekanslarda antenin bant genişliğinin iyileştirilmesi için aynı sonuçları elde ettik.

3.5. 37 ve 39 GHz İçin Deltoid Yarıkların ve Dielektrik Malzeme Farklarının Anten Performansına Etkisi

Bu çalışmada deltoid şekilli yarıklara sahip iki dikdörtgen yama anten önerilmiştir. Farklı frekanslar ve farklı tabanlar için yarıkların etkilerinin gösterilmesi amaçlanmaktadır. Antenler, mm-dalga bantlarında öngörülen 5G frekansları arasında yer alan 37 GHz ve 39 GHz için tasarlanmıştır. Tasarımlar için RT5880 ve RO3003 dielektrik tabanlar, malzemelerin etkilerini elde etmek üzere her anten için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Farklı çalışma frekanslarında ve farklı taban malzemelerinde, deltoid şekilli yarıklar, geri dönüş kayıplarında farklı seviyelerde iyileşmeler sağlar. RT5880 ile tasarlanan yarıklara sahip antenin geri dönüş kayıplarında, 37 GHz için 18,81 dB ve 39 GHz için 16,37 dB iyileşme elde edilmiştir. Bu değerler yüzde olarak 37 GHz için %44,47 ve 39 GHz için %36,14'lük bir iyileşmeye karşılık gelir. RO3003 ile tasarlanan yarıklara sahip antenin geri dönüş kayıplarında, 37 GHz için 25.17 dB ve 39 GHz için 27.54 dB iyileşme elde

edilmiştir. Bu değerler benzer şekilde yüzde olarak 37 GHz için %58,44 ve 39 GHz için %78,80'lik bir iyileşme anlamına gelir. Sonuçlar, anten tasarımcıları için, antenlerin mm-dalga bantlarındaki farklı taban malzemeleri için farklı frekanslarda aynı modifikasyonlara nasıl tepki verdiğini göstermesi açısından önem taşımaktadır.

Anten prototipi Şekil 3.45'te gösterilmektedir. Referans antenler, sırasıyla 2.2 ve 3 nispi geçirgenliğe sahip Rogers RT5880 ve RO3003 olan iki farklı dielektrik taban üzerinde ayrı ayrı tasarlanmıştır. Tüm modeller için, tabanların boyutları W_{subs}×L_{subs}=10 mm×8 mm olarak optimize edilmiştir ve W_{subs} ile genişliği ve L_{subs} ile tabanın uzunluğu belirtilmiştir. Her taban için, iki farklı rezonans frekansı için iki anten tasarlanmıştır. Sonuçlar arasında iyi bir karşılaştırma yapmak için, bu tabanların fiziksel yükseklikleri ticari olarak temin edilebilir bir boyutta RT5880 için 0,254 mm ve RO3003 için 0.25 mm olarak birbirine hemen hemen eşit olarak seçilmiştir. Tablo 3.8 ve Tablo 3.9'da sırasıyla RT5880 ve RO3003 tabanları için tasarlanan antenlerin optimize boyutlarını gösterirken, Tablo 3.10 ise her iki yapı için ortak hesaplanan boyutları göstermektedir. Çalışma frekansı ve alt tabakanın türü belirlendikten sonra, yamanın genişliği ve uzunluğu mikroşerit antenin iletim hattı eşdeğer denklemleri kullanılarak hesaplanabilir [67].



Şekil 3.45. 37 GHz ve 39 GHz için referans anten modeli.

Tablo 3.8. RT5880 taban malzemeli antenler için 37 ve 39 GHz'de boyutlar.

f_r (GHz)	L (mm)	W (mm)	L_{feed} (mm)	L_f (mm)	W_f (mm)
37	3,32	4,28	1,80	1,81	0,17
39	2,48	3,28	1,36	1,37	0,26

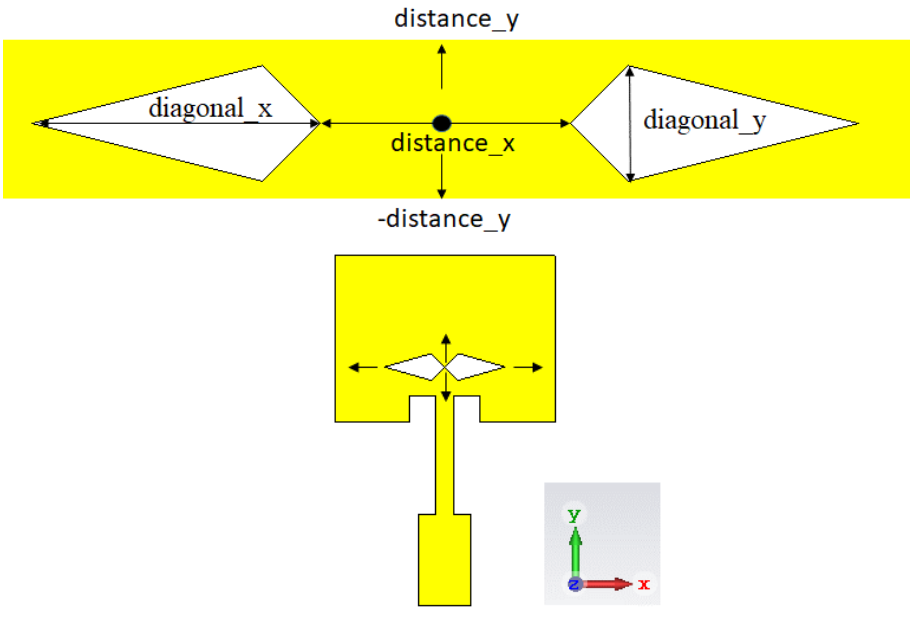
İyileştirilmş dönüş kaybı seviyeleri için, anten uzerinde deltoid şekilli yarıklar önerilmiştir. Deltoid, köşegenlerin boyutlarını değiştirerek çalışma frekansını ve geri dönüş kaybı seviyesini kontrol etme imkânı veren iki ikizkenar üçgenden oluşur. Başlangıçta deltoid şekilli yarıklar, yamanın ön yüz merkez noktasında bir köşeye sahip olacak şekilde simetrik olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.46, deltoid şekilli yarıklara sahip anteni göstermektedir.

Tablo 3.9. RO3003 taban malzemeli antenler için 37 ve 39 GHz'de boyutlar.

f_r (GHz)	L (mm)	W (mm)	L_{feed} (mm)	L_f (mm)	W_f (mm)
37	2,87	3,79	1,54	1,55	0,14
39	2,14	2,87	1,16	1,17	0,16

Tablo 3.10. 37 ve 39 GHz'de çalışan antenler için eşit seçilen optimize boyutlar.

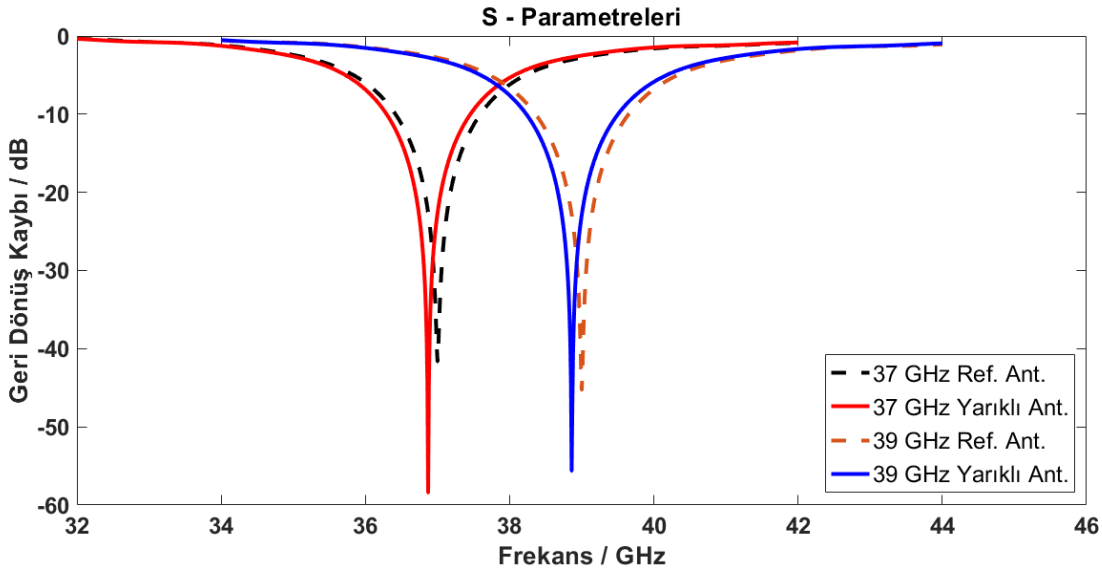
f_r (GHz)	Fi (mm)	g (mm)	W_{feed} (mm)	
			ε_r=2,2	ε_r=3
37	0,40	0,40	0,78	0,63
39	0,40	0,40	0,78	0,63



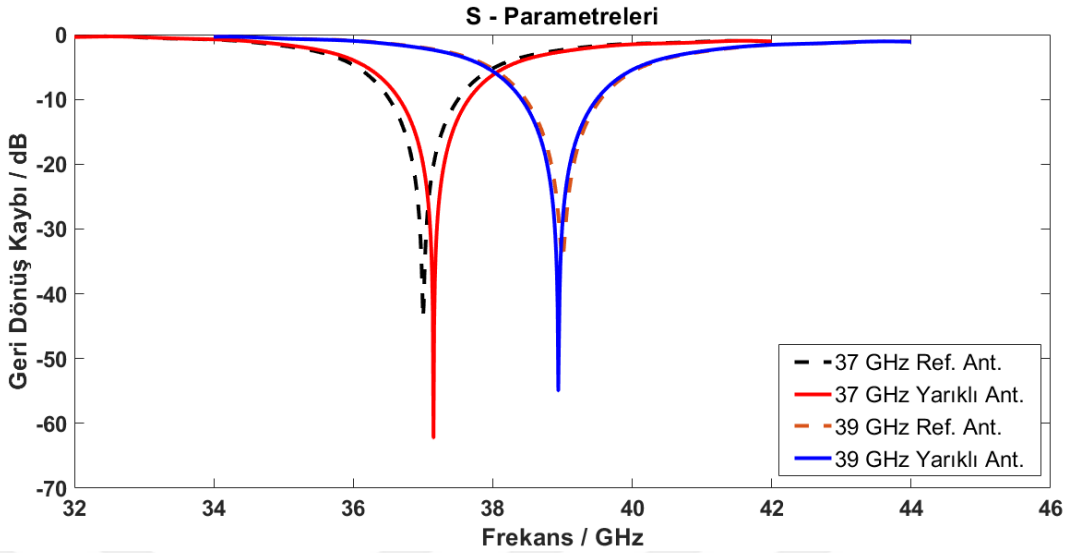
Şekil 3.46. 37 GHz ve 39 GHz frekanslarinda çalışan antenler için önerilen model.

Burada *diagonal_y*, *y* yönündeki daha kısa köşegeni belirtir ve *diagonal_x*, *x* yönündeki deltoidin daha uzun köşegenini belirtir. Ek olarak, *distance_x* parametresi, yarıklar arasındaki boşluğu belirtir ve *distance_y* parametresi, *y* koordinatındaki referans noktasına olan mesafeyi belirtir. Tüm bu parametreler antenin performansını etkiler. Böylece en iyi sonuçları elde etmek için *distance_x*=0 mm, *distance_y*=0 mm, *diagonal_y*=0,001 mm ve *diagonal_x*=0,1 mm'den başlayarak en iyi sonuçları elde etmek için detaylı bir parametrik analiz yapılır. Farklı 5G frekanslarında yarıkların etkilerini görmek için analiz, 37 GHz ve 39 GHz için RT5880 ve RO3003 ile tasarlanmış iki farklı dielektrikli dört anten için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Antenler, CST Microwave Studio 2016 yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Şekil 3.47 ve Şekil 3.48, sırasıyla dielektrik taban RT5880 ve RO3003 ile geleksel antenlerin ve önerilen antenlerin yansıma katsayısı sonuçlarını 37 GHz ve 39 GHz için göstermektedir. RT5880 taban malzemesi için referans antenler, sırasıyla -42,30 dB ve -45,29 dB'lik dönüş kaybı seviyeleriyle tam olarak 37 GHz ve 39 GHz'de rezonansa sahiptir. Ek olarak, 10 dB bant genişlikleri 37 GHz için 1,17 GHz ve 39 GHz anten için 1,29 GHz'dir. Yarıklar kazındıktan ve gerçekleştirildikten sonra geri dönüş kaybı seviyeleri 37 GHz için -61,11 dB ve 39 GHz için -61,66 dB'ye düşmüştür. Her iki frekans için bant genişlikleri aynı kalmıştır.



Şekil 3.47. RT5880 taban malzemeli antenin yansıma katsayısının frekansla değişimi.

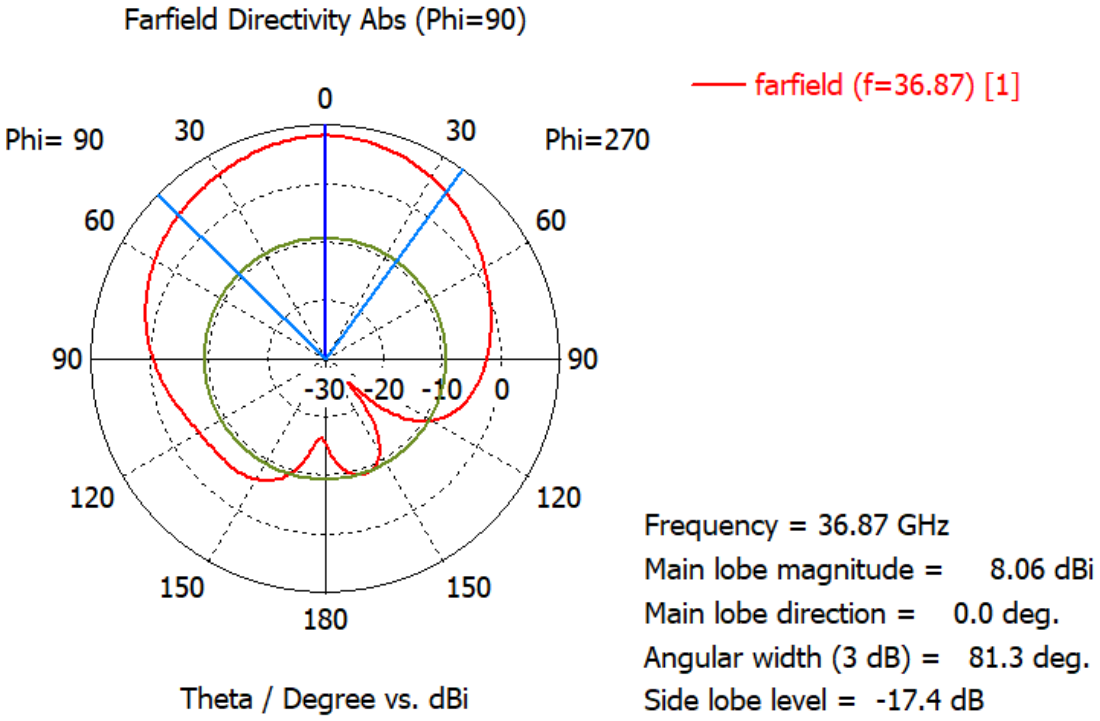


Şekil 3.48. RO3003 taban malzemeli antenin yansıma katsayısının frekansla değişimi.

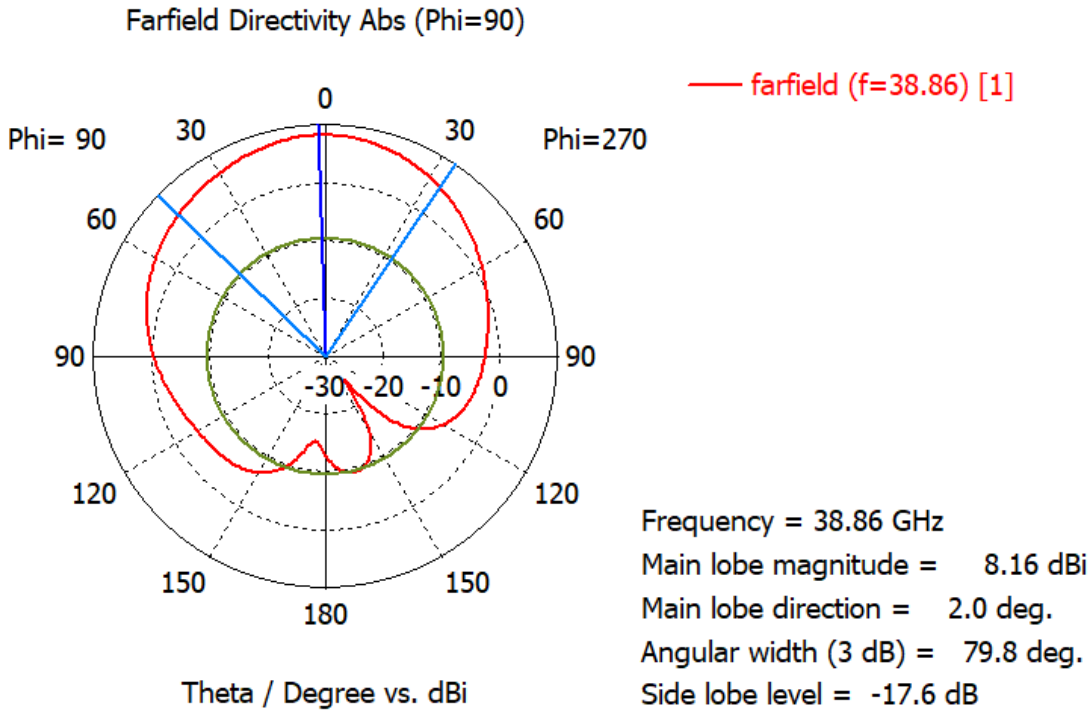
Yarıklar olmadan dielektrik taban RO3003 ile tasarlanan referans antenler, 37 GHz için -43.07 dB ve 39 GHz için 34.95 dB geri dönüş kaybı seviyelerine sahiptir. Yarıklara aynı prosedür uygulandığında, geri dönüş kaybı seviyeleri 37 GHz için -68.24 dB'ye ve 39 GHz için -62.49 dB'ye düşmüştür. Yarıklı ve yarıksız RO3003 ile her iki tasarım için de bant genişlikleri 37 GHz antenler için 0.98 GHz ve 39 GHz antenler için 1.07 GHz'dir.

Şekillerden, daha yüksek dielektrik tabanlı ile geri dönüş kaybı azaltmalarının, her iki frekans için de RT5880 ile yapılan azalmalardan daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. Şekil 3.49 - Şekil 3.52 önerilen antenler için uzak alan modellerini göstermektedir. RO3003 alt tabakalı 37 GHz anten için ana lob büyüklüğü, RT5880 alt tabakalı antene kıyasla 0.08 dBi artarken, RO3003 ile 39 GHz anten, RT5880 alt tabakalı antene kıyasla 0.04 dBi daha düşük ana lob büyüklüğü seviyesine sahiptir. Ek olarak hem 37 GHz anten hem de RT5880 alt tabakalı 39 GHz anten, RO3003'e sahip antenlerden daha yüksek 3 dB açısal genişliğe sahiptir.

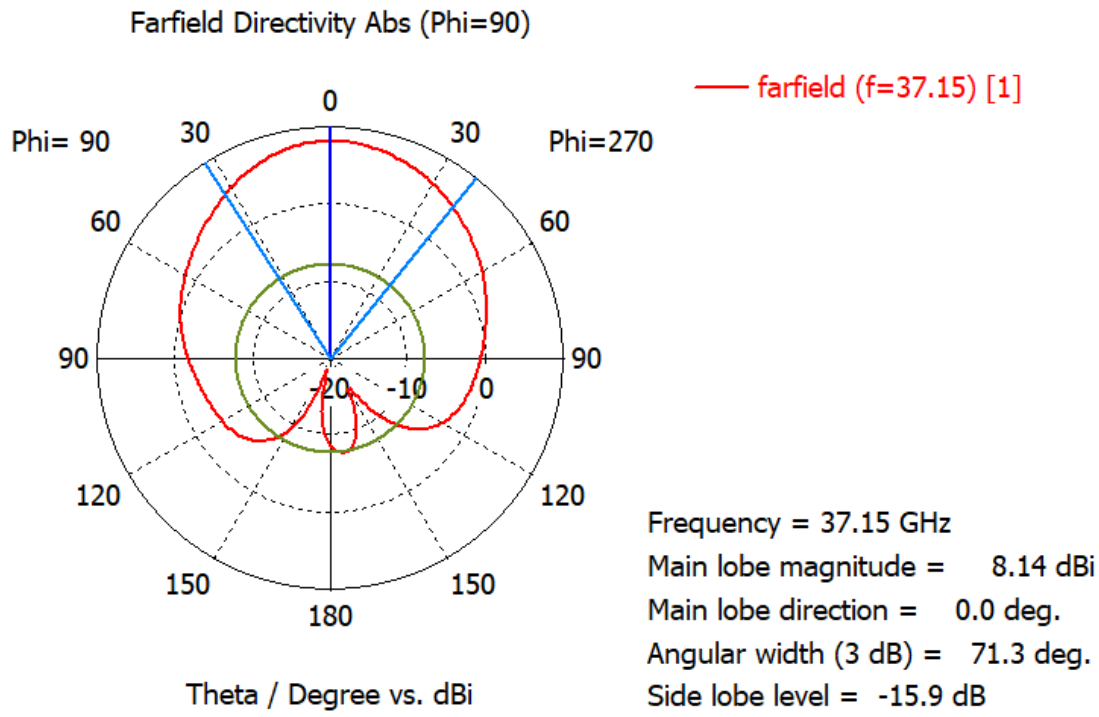
Deltoid şekilli yarıkların dikdörtgen yama antenler üzerindeki etkileri, iki farklı çalışma frekansı ve iki farklı dielektrik taban için incelenmiştir. Seçilen frekanslar, öngörülen 5G spektrumlarından 37 GHz ve 39 GHz olup, seçilen dielektrikler 2.2 geçirgenlikli RT5880 ve geçirgenliği 3 olan RO3003'tür. Her iki tasarım frekansı için de farklı miktarlarda geri dönüş kaybı seviyesinde azalmalar elde edilir.



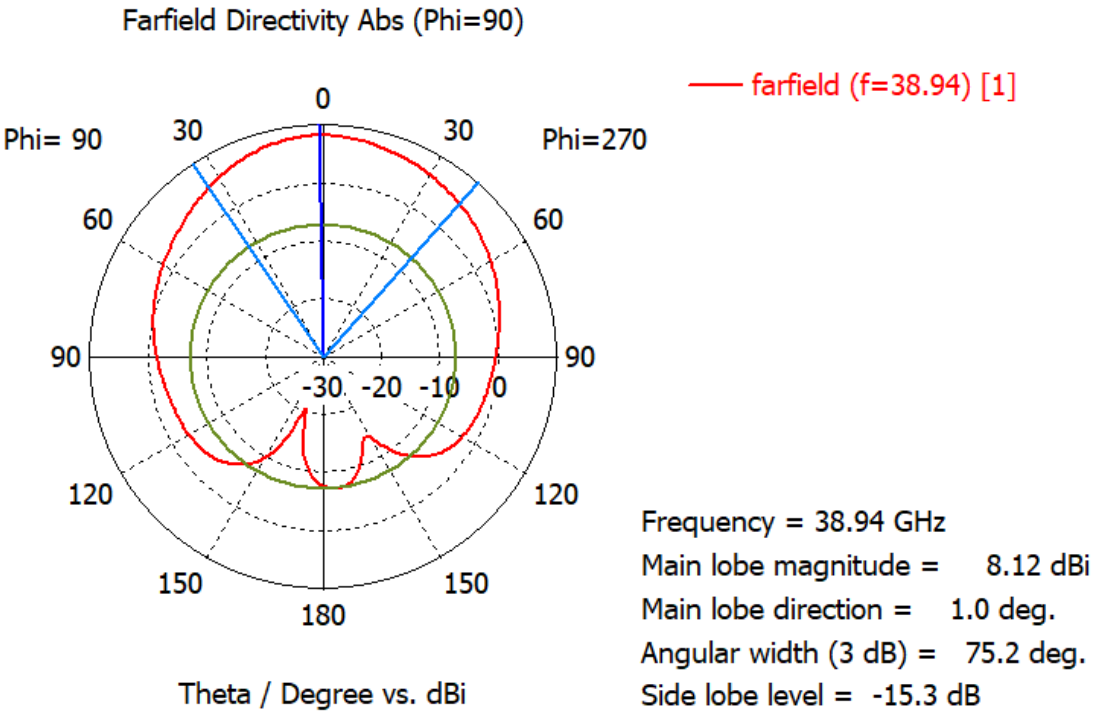
Şekil 3.49. Deltoid şekilli yarıklara sahip 37 GHz'de RT5880 taban malzemeli anten ışıma örüntüleri.



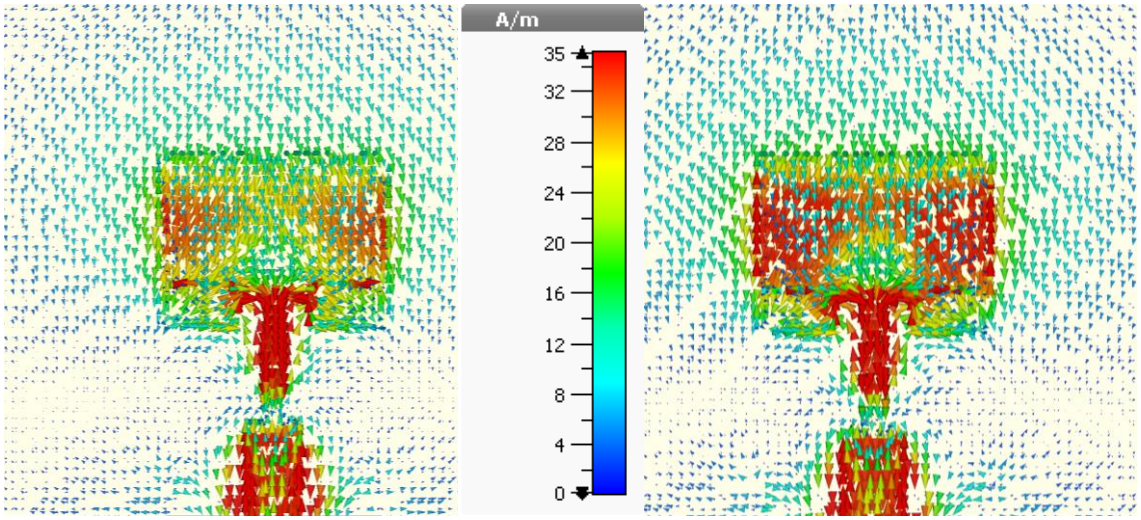
Şekil 3.50. Deltoid şekilli yarıklara sahip 39 GHz'de RT5880 taban malzemeli anten ışıma örüntüleri.



Şekil 3.51. Deltoid şekilli yarıklara sahip 37 GHz'de RO3003 taban malzemeli anten ışıma örüntüleri.

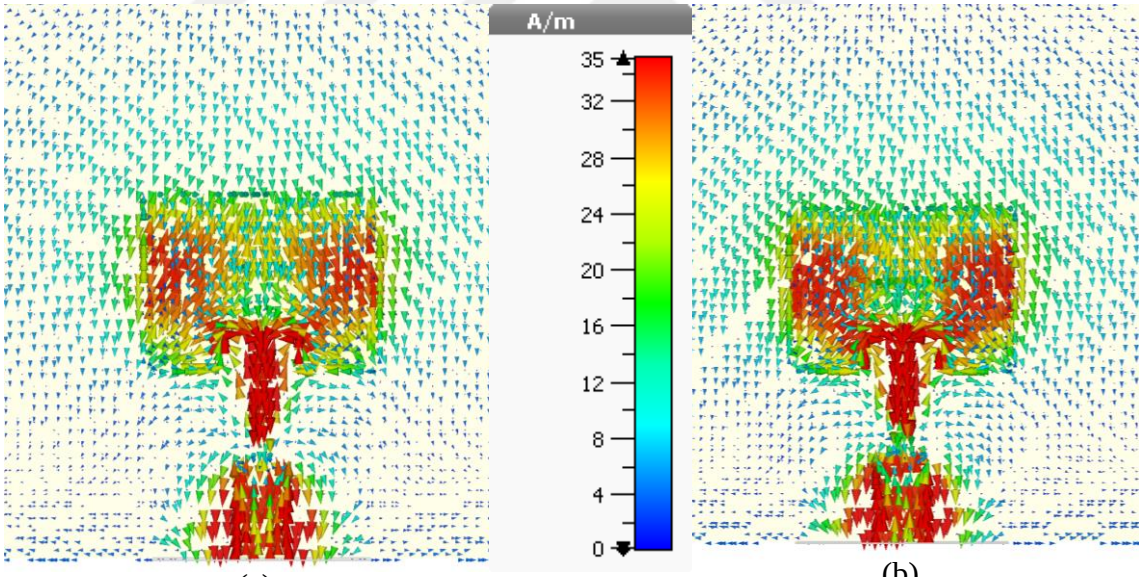


Şekil 3.52. Deltoid şekilli yarıklara sahip 39 GHz'de RO3003 taban malzemeli anten ışıma örüntüleri.



(a) (b)

Şekil 3.53. Deltoid şekilli yarıklara sahip RT5880 dielektrik taban malzemeli önerilen anten modelleri üzerindeki akım dağılımları, (a) 37 GHz, (b) 39 GHz.



(a) (b)

Şekil 3.54. Deltoid şekilli yarıklara sahip RO3003 dielektrik taban malzemeli önerilen anten modelleri üzerindeki akım dağılımları, (a) 37 GHz, (b) 39 GHz.

Her iki tasarım frekansında da RO3003'lü yapılar, RT5880'li yapılara göre daha fazla S_{11} seviyesinde azalma ile sonuçlanmıştır. Bu çalışma, hem yeni bir yama anten tasarımı hem de farklı frekanslar ve malzemeler arasında karşılaştırmayı önermektedir. İyileştirilmiş

sonuçlar ayrıntılı ve farklı bakış açılarından verilmiştir. Bu çalışmanın amacı sadece yeni bir yapı oluşturmak değil, aynı zamanda tasarlanan yapının diğer dielektrik malzemelerle ve diğer çalışma frekanslarında da kullanılabileceğini göstermektir.

Şekil 3.53 ve Şekil 3.54 sırasıyla RT5880 ve RO3003 dielektrik tabanlı önerilen anten modellerinin 37 GHz ve 39 GHz frekansları için akım dağılımlarını göstermektedir. Her iki malzeme için de daha yüksek frekansta akım yoğunluğunun arttığı gözlenirken deltoid şekilli yarıkların da üzerlerinde ek bir akım yoğunluğu oluşturdukları tespit edilmiştir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Giriş

Bu tez çalışması kapsamında, planlanan 5G frekans bantlarında çalışan özgün tasarıma sahip mikroşerit yama antenler tasarlanmıştır. Ek olarak alt 6 GHz bantları için bir minyatürizasyon tekniği önerilmiş ve bu teknikle tasarlanan yapı üretilip deneysel sonuçları sunulmuştur. Anten yapıları öncelikle CST yazılımı yardımıyla bilgisayar ortamında tasarlanmış ve sayısal analizleri tamamlanmıştır. Sonrasında üretim ve ölçüm aşamaları ile teorik olarak yapılan işlemler doğrulanmıştır. Anten yapılarında yalıtkan taban malzemesi olarak FR4, RT/D6002, RT5880 ve RO3003 kullanılmıştır. Bu farklı malzemelerle anten karakteristiklerinin hem mm-dalga hem de orta 5G frekanslarında nasıl değiştikleri ortaya konmuştur. Tez çalışmasında önerilen anten modelleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıda verilmiştir.

4.2. Sonuçlar ve Öneriler

Bölüm 3.1'de anlatılan anten 30 GHz'de çalışan bir kare yama antendir. Bu frekanslarda dalgaların boşlukta aşırı derecede zayıflamaları mm-dalga bandı için önemli bir sorundur. Bu sebeple antenler mümkün olduğunca az kayıplı bir şekilde tasarlanmalıdır. Önce geleneksel yama anten tasarımı yapıldıktan sonra, üst ışıyan kenar ve anten merkezinde kenar boyutları eşit iki eşkenar dörtgen şekilli yuva açılmıştır. Üst kenardaki yuva +y yönünde kaydırılmış ve bu kenarın etkili yüzey miktarı artırılarak akımın yayılma yolu genişletilmiştir. Orta kısımdaki yuva da yine yüzey akım dağılımına etki etmiştir. Böylece ilk antene göre yapılan bu değişikliklerle anten band genişliği 46 MHz artmış ve geri dönüş kaybı seviyesinde 10,75 dB'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Bu tasarımın boyutları çalışma frekansına göre ayarlanarak mikrodalgadan terahertz bölgesine kadar spektrumda kullanılabileceği öngörülmüşür.

Bölüm 3.2'de anlatılan anten modeli 15 GHz'de çalışan bir kare yama anten yapısıdır. Anten üst ışıyan kenarında iki adet ve merkezde bir adet eşkenar dörtgen şeklinde yuvalar açılmıştır. Bu modelde ek olarak antenin toprak düzlemi merkezi üzerinde bir eşkenar dörtgen yuva açılarak DGS yapısı elde edilmiştir. Önerilen modelde amaç antenin performansını etkileyen parametre sayısını artırmanın yanında 5G frekanslarında DGS yapısının etkisini incelemektir. Orijinal yama anten istenen frekans için tasarlandıktan sonra ışıyan kısım için bahsedilen yuvalar parameterik analiz yapılarak açılmıştır. En iyi performans bulunduktan sonra DGS yapısı için toprak düzlem üzerine bir eşkenar dörtgen şekilli yuva açılmıştır. Parametrik analizler sonrası ilk tasarıma göre geri dönüş kaybında 27,62 dB'lik azalış elde edilirken band genişliğinde ise 30 MHz'lik bir artış olmuştur. Böylece toprak düzlemi üzerinde basit yapılarla da 5G frekanslarında performans artışı olabileceği gösterilmiştir.

Bölüm 3.3'te anlatılan çalışma ise alt 6 GHz bölgesi 5G frekanslarından 3,5 GHz için dikdörtgen şekilli bir yama anten önermektedir. Işıyan kısım ve toprak düzlemi üzerinde sırasıyla dört adet ve beş adet eşkenar dörtgen şekilli yuva açılmıştır. Ön yüzdeki yuvalar için kenar boyutları ve bulundukları konumlara göre detaylı parameterik analizler yapılmıştır. Daha sonra da toprak düzlemi merkezinde bir ek yuva açılmış, onun en iyi sonuç verdiği boyut ve pozisyon için köşelerinden eşit uzaklıkta dört adet yuva daha açılmıştır. Böylece toprak düzlemdeki akım dağılımı etkilenerek antenin kapasitif ve indüktif empedansları değiştirilmiştir. Tüm yapılanlar sonucunda 3,5 GHz bölgesi için ışıyan kısımda yapılan değişikliklerin geri dönüş kayıplarında azalmaya neden olurken, toprak düzlemdeki değişikliklerin band genişliğine etkisi olduğu gözlenmiştir. Orijinal antene göre son tasarımda 1600 Hz'lik band genişliği kazanımı ve 17,45 dB'lik geri dönüş kaybı düşüşü elde edilmiştir.

Bölüm 3.4'te anlatılan çalışmada alt 6 GHz 5G spektrumu için bir minyatürizasyon yöntemi önerirken, çalışmanın aynı zamanda Wi-Fi frekanslarında da kullanılabilirliği gösterilmiştir. Önerilen yöntemde dikdörtgen yama antenin üst ve alt ışıyan kenarlarına dikdörtgen şekilli ayarlama çıkıntıları eklenmektedir. Ayrıca üst çıkıntının içine ek performans artışı için bir dikdörtgen yuva açılmıştır. Önerilen yöntemin çalışma frekansı ve anten boyutları ile ilişkili olması için çıkıntıların kenar uzunlukları dalga boyunun katları şeklinde seçilmiştir. İlk olarak çalışılmak istenen frekansın %30 fazlası alınarak o frekansta orijinal dikdörtgen yama antenin tasarımı yapılmıştır. İkinci aşama olarak

antenin frekansının istenen frekansa kayması için yama genişliğinin 15/50'si ve uzunluğunun 25/50'si boyutlarında dikdörtgen şeklinde bir çıkıntı anten ucuna eklenmiştir. Sonrasında istenen dalga boyunun yaklaşık 1/8 boyutlarında ek çıkıntılar alt kenarlara eklenip üst çıkıntı içine bir dikdörtgen yuva açılmıştır. Son tasarım ile anten boyutlarında $0{,}32\lambda^2$'den $0{,}16\lambda^2$'ye azalma elde edilmiştir. Önerilen tasarımın gerçeklenmesi, üretilerek ve ölçülerek yapılmıştır. Antenin uzak alan ışıma özelliklerinde aynı seviye korunmuştur. Yöntemin alt 6 GHz 5G frekanslarının yanında 5,8 GHz Wi-Fi bandı için de doğrulaması simülasyonlarla yapılmıştır.

Bölüm 3.5'te anlatılan çalışmada, mm-dalga bandı frekanslarından 37 GHz ve 39 GHz için iki farklı yalıtkan malzemenin benzer anten yapı modifikasyonlarına nasıl yanıt vereceği araştırılmıştır. Bu amaç için yalıtkanlık sabiti 2,2 olan RT5880 ve 3 olan RO3003 tabanları seçilmiştir. Orijinal dikdörtgen yama antenler bu iki farklı taban üzerinde iki farklı çalışma frekansı için tasarlanmıştır. Böylece birinci durum için dört adet anten yazılım ortamında oluşturulmuştur. Sonrasında ışıyan kısımlar üzerine deltoid şekilli yuvalar köşeleri birbirine temas edecek şekilde tanımlanmıştır. Her yapı için bu yuvalar konum ve kenar boyutları esas alınarak detaylı parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. En iyi sonuçların alındığı değerler için antenlerin yayılım özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak RT5880 ile tasarlanan antenlerde geri dönüş kayıplarında 37 GHz için 18,81 dB ve 39 GHz için 16,37 dB'lik azalma elde edilmiştir. Bu sonuçlar RT5880'li orijinal antenlerle karşılaştırıldığında 37 GHz için %44,47 ve 39 GHz için %36,14'lük iyileşme anlamına gelmektedir. RO3003 ile tasarlanan antenlerde geri dönüş kayıplarında 37 GHz için 25,17 dB ve 39 GHz için 27,54 dB iyileşmeye ulaşılmıştır. Bu sonuçlar RO3003'lü orijinal antenlerle kıyaslandığında 37 GHz'de %58,44 ve 39 GHz'de %78,80'lik bir iyileşme anlamına gelmektedir. Sonuçlara bakıldığı zaman antenlerin aynı modifikasyonlar için ne kadar farklı tepkiler verdiği açıkça görülmektedir. Bu çalışma, mm-dalga boylarındaki malzeme etkisinin anlaşılmasını göstermesi açısından önem taşımaktadır.

5G haberleşme sistemlerinde çalışacak antenler için bundan sonraki çalışmalarda çoklu giriş çoklu çıkış yapısına sahip yüksek kazançlı antenler üzerinde yoğunlaşılması planlanmaktadır. Günümüzde dünyanın birçok ülkesinde orta frekanslar kullanıma girmektedir. 2020'li yılların sonuna doğru ise 5G yüksek frekanslar bölgesinin daha fazla kullanımda olacağı öngörülmektedir. Dolaysıyla hem mobil cihazlar hem de baz

istasyonu antenlerinin bu spektrum için uygun boyut ve ışıma özellikleri ile tasarlanıp üretilmesi büyük önem kazanacaktır. Ayrıca 2030'lu yıllar ve sonrasında kullanıma girecek daha yeni haberleşme sistemlerinin başarısı bugünkü 5G sistemlerinin performansına bağlı olacaktır. Bu açıdan da önümüzdeki yıllarda araştırılacak ve kullanılacak olan anten tasarımları büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

1. Rappaport, T. S., 2002. Wireless Communications. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, New York, 641 pp.
2. Noble, D. E, 1962. The history of land-mobile radio communications. **Proceedings of the Journal of the Institute of Radio Engineers**, vol. 50, no. 5, pp. 1406-1416.
3. MacDonald, V H., 1979. The cellular concept. The Bell Systems Technical Journal, vol. 58, no.1, pp. 15-43.
4. Young, W.R., 1979. Advanced mobile phone service introduction, background, and objectives. **The Bell Systems Techinical Journal**, vol. 58, no. 1, pp. 1-14.
5. Radio Paging Code No. 1, 1986. The Book of the CCIR, McGraw Hill Book Co, London, pp. 462.
6. Sandvos, J. L., 1982. A comparison of binary paging codes, pp. 392-402. *IEEE Vehicular Technology Conference*, March 23-26, 1982, San Diego.
7. Mir, M. M., Kumar, S., 2015. Evolution of mobile wireless technology from 0G to 5G. **International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)**, vol. 6, no. 3, pp. 2545- 2551.
8. Sumukh, B., Kammar, R., 2016. 4G technology. **International Journal of Scientific Research and Modern Education (IJSRME)**, vol.1, no. 2, pp. 96-99.
9. Hashimoto, A., Yorshino, H., Atarashi, H., 2008. Roadmap of IMT-advanced development. **IEEE Microwave Magazine**, vol. 9, no. 4, pp. 80–88.
10. Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N., 2016. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey. **IEEE Communications Surveys&Tutorials**, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655.
11. Ofcom, 2015. Spectrum above 6 GHz for future mobile communications. Ofcom, London, www.ofcom.org.uk. (Erişim tarihi: Ocak 2017).
12. Zhao, Q., Li, J., 2006. Rain attenuation in milimeter wave ranges, pp. 1-4. *IEEE International Symposium on Antennas, Propagation&EM Theory*, October 26-29, 2006, Guilin.
13. Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., Gutierrez, F., 2013. Milimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!. **IEEE Access**, vol. 1, pp. 335-345.

14. Han, C. et al., 2011. Green radio: radio techniques to enable energy efficient wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, vol. 49, no. 6, pp. 46–54.
15. Zaidi, A., Baghdad, A., Ballouk, A., Badri, A., 2016. Design and optimization of an inset-fed circular microstrip patch antenna using DGS structure for applications in the millimeter wave band, pp. 99-103. *International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications*, October 26-29, 2016, Fez.
16. Jilani, S. F., Alomainy, A., 2016. Milimeter – wave t-shaped antenna with defected ground structures for 5G wireless networks, pp. 1-3. *Loughborough Antennas&Propagation Conference*, November 14-15, 2016, Loughborough.
17. Tu, D. T.T., Hoc, N. V., Quan, H., Yem, V. V., 2016. Compact MIMO Antenna with Low Mutual Coupling Using Defected Ground Structure, pp. 242-247. *IEEE International Conference on Communications and Electronics*, July 27-29, 2016, Ha-Long.
18. Stutzmann, W. L., Thiele, G. A., 1998. Antenna Theory and Design, J. Wiley&Sons, New York, 648 pp.
19. Ali, I., Chang, R. Y., 2015. Design of Dual–Band Microstrip Patch Antenna with Defected Ground Plane for Modern Wireless Applications, pp. 1-5. *IEEE Vehicular Technology Conference*, September 6-9, 2015, Boston.
20. Matin, M. A., Sayeed, A. I., 2010. A Design Rule for Inset–Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna. **WSEAS Transactions on Communications**, vol. 9, no. 1, pp. 63-72.
21. DOCOMO 5G White Paper, 2014. 5G Radio access: requirements, concept and technologies.https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_Paper.pdf. (Erişim tarihi: Mart 2018).
22. Huawei Technologies Co, 2014. eLTE2.2 DBS3900 LTE configuration principles. https://actfornet.com/HUAWEI_ELTE_DOCS/eLTE2.2%20DBS3900%20LTE%20FDD%20Configuration%20Principles.pdf. (Erişim tarihi: Ekim 2018).
23. Stallings, W., 2007. Data and Computer Communications. Pearson/Prentice Hall, New Jersey, pp. 878.
24. Bangerter, B., Talwar, S., Arefi, R., Stewart, K., 2014. Intel networks and devices for the 5G era. **IEEE Communications Magazine**, vol. 52, no. 2, pp: 90- 96.

25. Andrews, J., G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S., V., Lozano, A., Soong, A., C., K., Zhang, J., C. 2014. What will 5G be?. **IEEE Journal on Selected Areas In Communications**, vol. 32, no. 6, pp: 1065-1082.
26. Khan, F., Pi, Z., Rajagopal, S. 2012. Millimeter-wave mobile broadband with large scale spatial processing for 5G mobile communication, pp: 1517-1523. *Communication, Control, and Computing (Allerton), 50th Annual Allerton Conference*, October 1-5, 2012, Monticello.
27. Adhikari, P. 2008. Understanding millimeter wave wireless communication. www.loeacom.com, (Erişim tarihi: Ekim 2016).
28. GSMA Intelligence. 2014. Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile. www.gsma.com, (Erişim tarihi: Ocak 2018).
29. Chen, S., Zhao, J. 2014. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication. **IEEE Communications Magazine**, vol. 52, no. 5, pp: 36-43.
30. Lee, J., et al., 2018. Spectrum for 5G: Global Status, Challenges, and Enabling Technologies. **IEEE Communications Magazine**, vol. 56, no. 3, pp. 12-18.
31. Roh, W., et al., 2014. Millmeter-Wave Beamforming as an Enabling Technology for 5G Cellular Communications: Theoretical Feasibility and Prototype Results. **IEEE Communications Magazine**, vol. 52, no. 2, pp. 106–13.
32. Wang, C.-X., et al., 2014. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. **IEEE Communications Magazine**, vol. 52, no. 2, pp. 122–130.
33. Chandrasekhar, V., Andrews, J. G., Gatherer, A., 2008. Femtocell networks: A survey. **IEEE Communications Magazine**, vol. 46, no. 9, pp. 59–67.
34. Rusek, F., et al., 2013. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays. **IEEE Signal Processing Magazine**, vol. 30, no. 1, pp. 40–60.
35. Bleicher, A., 2013. Millimeter waves may be the future of 5G phones. https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/millimeter-waves-may-be-the-future-of-5g-phones, (Erişim tarihi: Nisan 2018).
36. Haas, H., 2011. Wireless data from every light bulb. http://bit.ly/tedvlc, (Erişim tarihi: Haziran 2018).
37. Hong, X., Wang, C.-X., Chen, H.-H., Zhang, Y., 2009. Secondary spectrum access networks. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, vol. 4, no. 2, pp. 36–43.

38. Haider, F., et al., 2011. Spectral efficiency analysis of mobile Femtocell based cellular systems, pp. 347-351. *IEEE 13th International Conference on Communication Technology*, September 25-28, 2011, Jinan.

39. Agyapong, P., Iwamura, M., Staehle, D., Kiess, W., Benjebbour, A., 2014. Design considerations for a 5G network architecture. **IEEE Communications Magazine**, vol. 52, no. 11, pp. 65–75.

40. Gupta, A., Jha, R. K., 2015. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. **IEEE Access**, vol. 3, pp. 1206-1232.

41. Huawei, 2017. 5G spectrum public policy spectrum. https://www-file.huawei.com/, (Erişim tarihi: Ocak 2019).

42. ECC Report 254, 2016. Operational guidelines for spectrum sharing to support the implementation of the current ECC framework in the 3600–3800 MHz range. https://docdb.cept.org/document/958, (Erişim tarihi: Mart 2019).

43. Global Mobile Suppliers Association (GSA) White Paper, 2017. The future of IMT in the 3300–4200 MHz frequency range. www.gsacom.com, (Erişim tarihi: Aralık 2019).

44. Resolution 238 (WRC-15), 2015. Studies on frequency-related matters for international mobile telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of international mobile telecommunications for 2020 and beyond. www.itu.int, (Erişim tarihi: Ekim 2020).

45. ITU-R WP 5D, 2017. Liaison statement to task group 5/1 — spectrum needs and characteristics for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz. Doc. TG5.1/36. www.itu.int, (Erişim tarihi: Kasım 2020).

46. ITU-R Rec. P.2108-0, 2017. Prediction of clutter loss. www.itu.int, (Erişim tarihi: Kasım 2020).

47. ITU-R Rec. P.2109-0, 2017. Prediction of building entry loss. www.itu.int, (Erişim tarihi: Kasım 2020).

48. FCC 16-89, Report and Order, 2016. Use of spectrum bands above 24 GHz for mobile radio services. www.fcc.gov, (Erişim tarihi: Kasım 2020).

49. TTA, 2017. Industry&government initiative to develop the global 5G market in the 28 GHz spectrum band. http:// www.tta.or.kr/, (Erişim tarihi: Kasım 2020).
50. Roadmap towards 5G for Europe: Opinion on Spectrum Related Aspects for Next-Generation Wireless Systems (5G). https://rspg-spectrum.eu/, (Erişim tarihi: Ocak 2021).
51. Miller, E. K., 1988. A Selective Survey of Computational Electromagnetics. **IEEE Transactions on Antennas&Propagation**, vol. 36, pp. 1281–1305.
52. Weiland, T., 1977. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. **Electronics and Communications AEUE**, vol. 31, no. 3.
53. Clemens, M., Weiland, T., 2002. Magnetic field simulation using conformal FIT formulations. **IEEE Transaction Magnetics**, vol. 38, no. 2, pp. 389-392.
54. Yee, K. S., 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. **IEEE Transaction Antennas and Propagation**, vol. AP-14, no. 3, pp. 302-307.
55. Marklein, R., 2002. The finite integration technique as general tool to compute acoustic, electromagnetic, elastodynamic, and coupled wave fields. **IEEE Antennas Wireless Propagation Letter**, vol. 1, pp. 31-34.
56. Rao, S. M., Gothard, G. K., Wilton, D. R., 1998. Application of finite integration technique to electromagnetic scattering by two-dimensional cavity-backed aperture in a ground plane. **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, vol. 46, no. 5, pp. 679-686.
57. Langberg, K. J., Marklein, R., 1999. Inverse scattering with acoustic, electromagnetic, and elastic waves as applied in nanodestructive testing. **Springer Wavefield Inversion**, vol. 398, pp. 59-118.
58. Munteanu, I., Weiland, T., 2007. RF and microwave simulation with the finite integration technique from components to system design. **Springer Mathematics in Industry**, vol. 11, pp. 247-260.
59. Funieru, M., Gersem, H. D., Weiland, T., 2007. Transient simulation of a liner actuator discretized by the finite integration technique. **Springer Mathematics in Industry**, vol. 11, pp. 281-286.

60. Chew, S. T., Leong, M. S., Kooi, P. S.,1993. Application of finite integration technique to the problem of whispering-gallery modes. **Electronics Letter**, vol. 29, no. 10, pp. 888-890.
61. Montrescu, V. C., Rienen, U. V., 2002. Simulation of electromagnetic fields in the human body using finite integration technique (FIT). **Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering**, vol. 47, no. s1a, pp. 282-284.
62. Gutschling, S., Krger, H., Weiland, T., 2000. Time-domain simulation of dispersive media with the finite integration technique. **Intenational Journal of Numerical Modeling**, vol. 13, no. 4, pp. 329-348.
63. Haase, C., Stiebig, H., 2007. Thin-film silicon solar cells with efficient periodic light trapping texture. **Lasers, Optics, and Optoelectronics**, vol. 91, no. 6, pp. 329-348.
64. Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio, Ver. 2016, Framingham, MA, USA, 2016.
65. Agilent Vector Network Analyzer, 2021. www.agilent.com, (Erişim tarihi: Mart 2021).
66. Verspecht, J., 2005. Large Signal Network Analysis. **Microwave Magazine**, vol. 6, no. 4, pp. 82-92.
67. Balanis, C. A., 2005. Antenna Theory Analysis Design. Wiley-Interscience, New Jersey, pp. 1117.
68. Huang, J., 1983. The finite ground plane effect on the microstrip antenna radiation patterns. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation,** vol. 31, no. 4, pp. 649-653.
69. Deshmukh, A. A., Baxi, P., Kamdar, C., Vora, B., Ray, K. P., 2012. Analysis of Stub Loaded Rectangular Microstrip Antenna. **Proceedings of National Conference on Communications (NCC),** pp. 1-5.
70. Bahl, I. J., Bhartia, P., 1980. Microstrip antennas. pp. 203-215, Artech House, London.
71. Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., Ittiboon, A., 2001. Microstrip antenna design handbook. pp. 302-311, Artech House, London.
72. Rahman, M. M., Islam, M. S., Wong, H. Y., Alam, T., Islam, M. T., 2019. Performance analysis of a defected ground-structured antenna loaded with stub-slot for 5G communication. **Sensors,** vol. 19, no. 11, pp. 26-34.

73. Yang, F. R., Qian, Y., Coccioli, R., Itoh, T., 2007. Analysis and application of photonic band-gap (PBG) structures for microwave circuits. **Electromagnetics,** vol. 19, no. 3, pp. 241-254.

74. Pozar, D. M., 1987. Trimming stubs for microstrip feed networks and patch antennas. **IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter,** pp. 26-28.

75. Pozar, D. M., Kaufman, B., 1990. Design considerations for low sidelobe microstrip arrays. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation,** vol. 38, no. 8, pp. 1176-1185.

76. Daniel, A. E., Kumar, G., 1995. Tunable dual and triple frequency stub loaded rectangular microstrip antennas, pp. 2140-2143. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, June 18-23, 1995, Newport Beach.

77. Lu, J. H., Wong, K. L., 2000. Single-feed circularly polarized equilateral-triangular microstrip antenna with a tuning stub. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vol. 48, no. 12, pp. 1869-1872.

78. Singh, D., Thakur, A., Srivastava, V. M., 2018. Miniaturization and gain enhancement of microstrip patch antenna using defected ground with EBG. **Journal of Communications,** vol. 13, no. 12, pp. 730-736.

79. Li, Y., Liu, Y., Gong, S., 2008. Microstrip antenna using ground-cut slots and miniaturization techniques with low RCS. **Progress In Electromagnetics Research Letters,** vol. 1, pp. 211-220.

80. Ghiotto, A., Cantalice, S. F., Vuong, T. P., Pouzin, A., Fontgalland, G., Tedjini, S.,2008. Miniaturized patch antenna for the radio frequency identification of metallic objects, pp. 583-586. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, June 15-20, 2008, Atlanta.

81. Chen, H., Wang, Y., Lin, Y., Lin, S., Pan, S., 2009. A Compact Dual-Band Dielectric Resonator Antenna Using a Parasitic Slot. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,** vol. 8, pp. 173-176.

82. Hsieh, C., Wu, C., Ma, T., 2015. A Compact Dual-Band Filtering Patch Antenna Using Step Impedance Resonators. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,** vol. 14, pp. 1056-1059.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Barış Gürcan HAKANOĞLU
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:
Medeni Durum:
E-mail:
Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Mersin Üniversitesi, Fen Bil. Enst. Elektrik–Elektronik Mühendisliği Ana Bil. D., Mersin	2005
Lisans	Kocaeli Üniversitesi, Müh. Fak. Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Kocaeli	2001
Lise	İsmail Safa Özler Anadolu Lisesi, Adana	1995

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2008-Halen	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman MYO	Öğr. Gör.
2006-2007	Mersin Üniversitesi Tarsus Teknik Eğitim Fakültesi	Ücretli Öğr. Elm.
2001-2005	Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Arş. Gör.

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

1. Hakanoğlu, B. G., Koc, B., Sen, O., Yalduz, H., Turkmen, M., 2021. Stub Loaded Patch Antenna and a Novel Method for Miniaturization at Sub 6 GHz 5G and Wi-Fi Frequencies. **Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)**, vol. 21, no. 2, pp. 23-32.

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Hakanoğlu, B. G., Yalduz, H., Koc, B., Hayber, S. E., Türkmen, M., 2020. Comparative Analysis of the Effects of the Substrate Material and Deltoid Shaped Slots on Patch Antennas for 5G Networks at 37 GHz and 39 GHz. **Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi**, Ejosat Special Issue 2020 (ARACONF), pp. 405-411.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında (Proceedings) Basılan Bildiriler:

1. Hakanoglu, B. G., Turkmen, M., 2017. An Inset Fed Square Microstrip Patch Antenna To Improve the Return Loss Characteristics for 5G Applications, pp. 1-4. *XXXII. International Union of Radio Science (URSI) General Asembly&Scientific Symposium (GASS)*, August 19–26, 2017, Montreal.

2. Hakanoglu, B. G., Sen, O., Turkmen, M., 2018. A Square Microstrip Patch Antenna With Enhanced Return Loss Through Defected Ground Plane For 5G Wireless Networks, pp. 1-4. *II. URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC)*, May 28–June 01, 2018, Gran Canaria.

3. Hakanoglu, B.G., Sen, O., Koc, B., Hayber, S. E., Turkmen, M., 2020. Defected Grounded Rectangular Patch Antenna with Rhombic-Shaped Slots for Early Phase 5G Applications, pp. 1-4. *XXXIII. URSI GASS*, August 29–September 5, 2020, Rome.