

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEŞİNCİ NESİL (5N) HABERLEŞME SİSTEMLERİ
İÇİN ÇOKLU-GİRİŞ ÇOKLU-ÇIKIŞ MİKROŞERİT
YAMA ANTEN TASARIMLARI

Duygu Yaşar GÜNDOĞDU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ağâh Oktay ERTAY

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2023
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BEŞİNCİ NESİL (5N) HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN ÇOKLU-GİRİŞ ÇOKLU-ÇIKIŞ MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMLARI

Duygu Yaşar GÜNDOĞDU

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ağâh Oktay ERTAY

Kablosuz haberleşme teknolojileri günümüzde çokça araştırılan ve geliştirilen alanların başında gelmektedir. Bu sistemlerin gelişmesi ile hayatımıza dâhil olan 5N teknolojiler ise popülerliğini sürdürmekte ve aktif olarak kullanılmaya devam etmektedir. Bu popülerliğin etkilediği yapılardan biri olan anten tasarımları ve yapıları bu gelişen sistemlere entegre olabilmesi için yeniliklere ihtiyaç duymaktadır. Yapılan yeni tasarımlarla birlikte 5N teknolojileri için yüksek kanal kapasitesi, yüksek kazanç ve düşük maliyetler sağlanabilmektedir. 5N haberleşme sistemlerinde kanal kapasitesi, kazanç gibi parametreler ise Çoklu-Giriş Çoklu-Çıkış (MIMO) anten kullanılarak istenilen seviyelere getirilebilmektedir. Bu tez çalışmasının temel amacı, 5N haberleşme sistemlerinde amaca uygun kullanılabilecek MIMO mikroşerit anten tasarımlarını sunmaktır. Tasarımı yapılan antenlerin parametrik analizleri yapılmış ve uygun yama düzeltmelerinin anten performansına etkileri araştırılmıştır. Sunulan tasarımlardan ilkinde toprak zemini üzerine eklenen yamaların parametre değerleri üzerine etkisi incelenmiş, ikinci tasarım adımı ise antenin ön yüzeyine eklenen yamaların etkileri ele alınmıştır ve tasarım adımlarında elektromanyetik benzetim yazılımları (CST ve HFSS) kullanılmıştır.

2023, 82 Sayfa

Anahtar Kelimeler: 5N, Mikroşerit Antenler, MIMO Anten

ABSTRACT

MSc Thesis

MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT (MIMO) MICROSTRIP PATCH ANTENNA DESIGNS FOR FIFTH GENERATION (5G) COMMUNICATION SYSTEMS

Duygu Yaşar GÜNDOĞDU

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ağâh Oktay ERTAY

Wireless communication technologies are one of the most researched and developed areas today. With the development of these systems, 5N technologies, which are included in our lives, continue to be popular and continue to be used actively. Antenna designs and structures, one of the structures affected by this popularity, need innovations in order to be integrated into these developing systems. With the new designs made, high channel capacity, high gain and low costs can be provided for 5N technologies. In 5N communication systems, parameters such as channel capacity and gain can be brought to desired levels by using Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) antenna. The main purpose of this thesis is to present MIMO microstrip antenna designs that can be used in 5N communication systems. Parametric analyzes of the designed antennas were made and the effects of appropriate patch corrections on antenna performance were investigated. In the first of the presented designs, the effect of the patches added on the soil ground on the parameter values was examined, in the second design step, the effects of the patches added on the front surface of the antenna were discussed and electromagnetic simulation software (CST and HFSS) were used in the design steps.

2023, 82 Pages

Keywords: 5G, Microstrip Antennas, MIMO Antenna

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Agâh Oktay ERTAY’a tezin başından sonuna kadar gösterdiği destek için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen bugüne kadar gösterdikleri hoşgörü ve sabırla her zaman bana destek olan sevgili aileme en içten duygularla teşekkür ederim.

Duygu Yaşar GÜNDOĞDU

Ağustos, 2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	7
3.1. Haberleşme Sistemlerinin Gelişimi.....	7
3.1.1. Beşinci nesil teknolojiler	9
3.1.2. Nesnelerin interneti	10
3.1.3. Milimetre dalga frekans bantları (mmWave)	11
3.2. Mikroşerit Antenler	13
3.2.1. Mikroşerit antenlerin tarihi.....	13
3.2.1.1. Mikroşerit antenlerin avantajları.....	14
3.2.1.2. Mikroşerit antenlerin dezavantajları	15
3.2.2. Mikroşerit antenlerin çeşitleri	16
3.2.2.1. Geleneksel mikroşerit antenler	16
3.2.2.2. Yama ve toprak düzlemi değiştirilmiş mikroşerit antenler.....	17
3.2.2.3. IFA- ters F antenler.....	18
3.2.2.4. PIFA (planar inverted F antenna)	19
3.2.3. Mikroşerit antenlerin besleme türleri	19
3.2.3.1. Mikroşerit besleme yöntemi	20
3.2.3.2. Koaksiyel besleme yöntemi	21
3.2.3.3. Açıklık bağlaşımlı besleme yöntemi.....	21
3.2.3.4. Yakınlık bağlaşımlı besleme yöntemi.....	22
3.2.4. Mikroşerit anten parametreleri	23
3.2.4.1. Saçılma parametreleri	23
3.2.4.2. Empedans bant genişliği	23

3.2.4.3.	Gerilim duran dalga oranı (GDDO-VSWR).....	24
3.2.4.4.	Yönlülük ve kazanç	24
3.2.4.5.	Anten verimliliği.....	24
3.2.4.6.	Işıma örüntüsü.....	24
4.	MATERYAL VE YÖNTEM	26
4.1.	Mikroşerit Anten Tasarımları.....	26
4.1.1.	6 GHz altı frekanslarda çalışan mikroşerit anten tasarımları	26
4.1.1.1.	Parazitik yamalı dikdörtgen çerçeveli anten tasarımı	27
4.1.1.1.1.	Anten 1 tasarımı	27
4.1.1.1.2.	Anten 2 tasarımı	30
4.1.1.1.3.	Anten 3 tasarımı	31
4.1.1.1.4.	Anten performanslarının karşılaştırılması.....	34
4.1.2.	6 GHz üstü frekanslarda çalışan mikroşerit anten tasarımları.....	35
4.1.2.1.	28 GHz'de çalışan geniş bant mikroşerit yama anten tasarımı	35
4.1.2.1.1.	Anten 1 tasarımı	36
4.1.2.1.2.	Anten 2 tasarımı	38
4.1.2.1.3.	Anten 3 tasarımı	40
4.1.2.1.4.	Anten performanslarının karşılaştırılması.....	43
4.2.	Çoklu giriş çoklu çıkış antenler.....	45
4.2.1.	MIMO anten parametreleri.....	46
4.2.1.1.	S parametreleri.....	46
4.2.1.2.	Empedans bant genişliği	47
4.2.1.3.	Zarf korelasyon katsayısı, ECC	47
4.2.1.4.	Toplam aktif yansıma katsayısı, TARC.....	48
4.2.1.5.	Ortalama etkin kazanç (MEG).....	48
4.2.1.6.	Çeşitlilik kazancı.....	48
5.	ARAŞTIRMA BULGULARI	49
5.1.	MIMO anten tasarımları.....	49
5.1.1.	Tasarım 1	49
5.1.1.1.	Anten 1.....	52
5.1.1.2.	Anten 2.....	54
5.1.1.3.	Anten 3.....	57
5.1.2.	Tasarım 2	61
5.1.2.1.	Anten 1.....	61

5.1.2.2. Anten 2.....	64
5.1.2.3. Anten 3.....	66
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	74
EKLER.....	81
EKLER.....	82



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Mikroşerit anten geometrileri	14
Şekil 3.2 Geleneksel mikroşerit anten yapısı	17
Şekil 3.3 Toprak düzlemi değiştirilmiş ve yamalı mikroşerit anten	18
Şekil 3.4 Ters F anten.....	18
Şekil 3.5 Düzlem ters F anten (PIFA).....	19
Şekil 3.6 Mikroşerit besleme yöntemi	20
Şekil 3.7 Koaksiyel besleme (İmamoğlu, 2019)	21
Şekil 3.8 Açıklık bağlaşımlı besleme yöntemi (Kütük, 2012).....	22
Şekil 3.9 Yakınlık bağlaşımlı besleme yöntemi (Kütük, 2012).....	22
Şekil 4.1 Anten 1'e ait tasarım geometrisi	28
Şekil 4.2 Anten 1'e ait $ S_{11} $ grafiği	29
Şekil 4.3 Anten 1'e ait VSWR grafiği	29
Şekil 4.4 Anten 2'ye ait tasarım geometrisi	30
Şekil 4.5 Anten 2'e ait $ S_{11} $ grafiği	31
Şekil 4.6 Anten 2'ye ait VSWR grafiği	31
Şekil 4.7 Anten 3'e ait tasarım geometrisi	32
Şekil 4.8 Anten 3'e ait $ S_{11} $ grafiği	33
Şekil 4.9 Anten 3'e ait VSWR grafiği	33
Şekil 4.10 Anten 3'e ait a) XZ ve b) YZ ışıma örüntüsü	33
Şekil 4. 11 Anten 3'e ait 3,5 GHz'deki a) ışıma örüntüsü ve b) akım yoğunluğu.....	34
Şekil 4.12 Tüm anten tasarımlarına ait $ S_{11} $ grafiği.....	34
Şekil 4.13 Anten tasarımlarına ait VSWR grafiği.....	35
Şekil 4.14 Anten 1'e ait tasarım geometrisi	37
Şekil 4.15 Anten 1'e ait $ S_{11} $ grafiği	38
Şekil 4.16 Anten 1'e ait VSWR grafiği	38
Şekil 4.17 Anten 2'e ait ön yüz tasarım geometrisi	39
Şekil 4.18 Anten 2'ye ait $ S_{11} $ grafiği	40
Şekil 4.19 Anten 2'ye ait VSWR grafiği	40
Şekil 4.20 Anten 3'e ait ön yüz tasarım geometrisi	41

Şekil 4.21 Anten 3'e ait $ S_{11} $ grafiği	42
Şekil 4.22 Anten 3'e ait VSWR grafiği	42
Şekil 4.23 Anten 3'e ait a) XZ ve b) YZ ışıma örüntüsü	42
Şekil 4.24 Anten 3'e ait ışıma örüntüsü	43
Şekil 4.25 Anten 3'e ait akım yoğunluğu.....	43
Şekil 4.26 Anten tasarımlarına ait $ S_{11} $ grafiği	44
Şekil 4.27 Anten tasarımlarına ait VSWR grafiği.....	44
Şekil 4.28 Mikroşerit anten	45
Şekil 4.29 İki elemanlı mikroşerit MIMO anten.....	46
Şekil 5.1 Başlangıç antenine ait tasarım geometrisi a) ön yüz b) arka yüz.....	50
Şekil 5.2 Başlangıç antenine ait $ S_{11} $ frekans karakteristiği	51
Şekil 5.3 Anten 1'ye ait tasarım geometrisi a) ön yüz ve b) arka yüz	52
Şekil 5.4 Anten 1'e ait S-parametreleri grafiği	53
Şekil 5.5 Anten 1'e ait ECC grafiği	54
Şekil 5.6 Anten 1'e ait DG ve MEG karakteristikleri.....	54
Şekil 5.7 Anten 2'ye ait arka yüzdeki tasarım geometrisi	55
Şekil 5.8 Anten 2'ye ait S-parametreleri frekans karakteristikleri.....	55
Şekil 5.9 Anten 2'ye ait ECC karakteristiği.....	56
Şekil 5.10 Anten 2'ye ait DG ve MEG karakteristikleri.....	56
Şekil 5.11 Anten 3'e ait arka yüzdeki tasarım geometrisi	57
Şekil 5.12 Anten 3'e ait S-parametreleri frekans karakteristikleri.....	58
Şekil 5.13 Anten 3'e ait kazanç grafiği.....	58
Şekil 5.14 Anten 3'e ait ECC grafiği	59
Şekil 5.15 Anten 3'e ait DG ve MEG grafiği	59
Şekil 5.16 Anten 3'e ait TARC grafiği	59
Şekil 5.17 Anten 3'e ait a) XZ ve b) YZ düzlemi ışıma örüntüleri	60
Şekil 5.18 Anten 3'e 3,5GHz'deki yüzey akım yoğunluğu	60
Şekil 5.19 Anten 1'e ait tasarım geometrisi a) ön yüz b) arka yüz	62
Şekil 5.20 Anten 1'e ait S-parametreleri.....	63
Şekil 5.21 Anten 1'e ait ECC grafiği	63
Şekil 5.22 Anten 1' ait DG ve MEG grafiği	64
Şekil 5.23 Anten 2'ye ait tasarım geometrisi	64

Şekil 5.24 Anten 2'ye ait S-parametre grafiği	65
Şekil 5.25 Anten 2'ye ait ECC grafiği	65
Şekil 5.26 Anten 2'ye ait DG ve MEG grafiği	66
Şekil 5.27 Anten 3'e ait önyüz tasarım geometrisi	66
Şekil 5.28 Anten 3'e ait S-parametreleri grafiği	67
Şekil 5.29 Anten 3'e ait kazanç grafiği.....	67
Şekil 5.30 Anten 3'e ait ECC grafiği	68
Şekil 5.31 Anten 3'e ait DG ve MEG grafiği	68
Şekil 5.32 Anten 3'e ait TARC grafiği	68
Şekil 5.33 Anten 3'e ait a) XZ ve b) YZ düzlemi ışıma örüntüleri	69
Şekil 5.34 Anten 3'e ait 3,5 GHz'deki yüzey akım yoğunluğu	69
Şekil 6.1 T1A3 ve T2A3'e ait $ S_{11} $ frekans karakteristikleri	71
Şekil 6.2 T1A3 ve T2A3'e ait $ S_{21} $ frekans karakteristikler	71

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Literatürde yer alan anten tasarımları	6
Tablo 4.1 Anten 1'e ait anten parametre değerleri.....	29
Tablo 4.2 Anten değerlerinin karşılaştırılması.....	35
Tablo 4.3 Anten 1'e ait anten parametre değerleri.....	37
Tablo 4.4 Anten 2'ye ait anten parametre değerleri.....	39
Tablo 4.5 Anten 3'e ait anten parametre değerleri.....	41
Tablo 4.6 Anten değerlerinin karşılaştırılması.....	44
Tablo 5.1 Başlangıç antenine ait parametre değerleri.....	51
Tablo 5.2 Anten 1'e ait parametre değerleri	53
Tablo 5.3 Anten 2'ye ait parametre değerleri	55
Tablo 5.4 Anten 3'e ait parametre değerleri	57
Tablo 5.5 Anten 1'e ait parametre değerleri	63
Tablo 5.6 Anten 2'ye ait parametre değerleri	65
Tablo 5.7 Anten 3'e ait parametre değerleri	67
Tablo 6.1 Anten tasarımlarının literatür ile karşılaştırılması	72

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

Γ	Yansıma Katsayısı
$^{\circ}$	Derece

Kısaltmalar

1N	Birinci Nesil
2N	İkinci Nesil
3N	Üçüncü Nesil
4N	Dördüncü Nesil
5N:	Beşinci Nesil
CST	Computer Simulation Technology
DG:	Diversity Gain
ECC:	Envelope Correlation Coefficient
HFSS:	High Frequency Structural Simulator
MEG:	Mean Effective Gain
MIMO:	Multiple Input Multiple Output
S-Parametreleri:	Saçılma Parametreleri
T1A3:	Tasarım 1-Anten 3
T2A3:	Tasarım 2-Anten 3
TARC:	Total Active Reflection Coefficient
VSWR:	Voltage Standing Wave Ratio

1. GİRİŞ

İletişim sistemleri, günümüzde teknolojik gelişmeler doğrultusunda hayatımıza dâhil olmakta yeni gereksinimleri karşılamaya yönelik birçok farklı yöntemi kullanıcılara sunmaya devam etmekte ve temelde kullanıcıların taleplerinin karşılamak, daha kaliteli hizmet sunmak ve daha yüksek kazançlar sağlamak gibi birçok amaca ulaşmayı hedeflemektedir. Kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesi kablosuz haberleşme sistemlerini etkilemesiyle bu sistemlere ilginin artması da birçok yeniliği beraberinde getirmiştir (Berlemann, 2005).

İletişim sistemleri tarihçesi incelendiğinde ilk olarak bu sistemler, basit bir temele dayanan ve sadece konuşma aracı olarak kullanılanıma uygun özelliklerden meydana gelmekteydi fakat bu durum, insanların içerisinde bulunduğu yaşam şartlarını ve kalitesini arttırmak için yaptığı çeşitli çalışmalarla birlikte değişmeye başladı. İletişim sistemleri basit temellere dayanan ve Birinci Nesil (1N) teknolojiler olarak adlandırılan jenerasyondan çıkıp daha gelişmiş olan yeni teknolojilere adım atmış oldu. Bu yeni adımlar sayesinde kablolu iletişimden kablosuz iletişim sistemlerine ilgi ve eğilim artmış sonrasında günümüzde kullanılan Dördüncü Nesil (4N) sistemlere geçiş sağlanmıştır. Günümüzde ise aktif olarak yer alan 4N ve 4.5N sistemlerinin yakın bir gelecekte yerinin yeni nesil teknolojiler olarak adlandırılan Beşinci Nesil (5N) teknolojilere bırakması öngörülmektedir.

Beşinci Nesil yeni sistemlerin gelişiminde rol alan birçok farklı kaynak, ana amaç olarak kullanıcıların artan ihtiyaçlarına yönelik talepleri karşılamayı vaat etseler de bu amacın beraberinde birçok farklı vizyonu da üstlenmekte yine bu hususta kullanıcılara yeni deneyimler sunmak için çeşitli misyonlarından da sıkça söz etmektedir. Söz edilen bu gelişmelerle birlikte teknolojik anlamda yeni bir devrim olacağı ve birçok iş ve işlemlerin sistematik olarak değişeceği düşünülmektedir. Sistemlerde kullanılan cihazların yeni fikir ve tasarımlarla farklı bir boyut kazanması söz konusu olacaktır. Bu gelişmelerin etkileyeceği cihazlardan biri de birçok alanda kullanılan antenlerin olması muhtemeldir.

Kablosuz sistemlerde oldukça büyük bir öneme sahip olan antenler, teknolojik anlamda birçok sistem içerisinde yer almakta ve günümüzde yeni gelişmelerle beraber geçmişten farklı olarak çeşitli özelliklerin kullanıldığı sistemler sunmaktadır. Bilgiye kesintisiz ve

hızlı bir şekilde erişim sağlanması günümüz teknolojik gelişmeleriyle birlikte büyük bir önem kazanmış ve içerisinde bulunduğumuz çağa uyum sağlanabilmesi için yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinin de ana amaçları arasında yer almıştır. Kablosuz haberleşme sistemlerinin beraberinde getirdiği ve bu sistemler içerisinde yer alan elemanların da önemi yeni gelişmelerle birlikte artmaktadır. Cep telefonu, dizüstü bilgisayar ve kablosuz modem gibi taşınabilir cihazlardaki değişimler aynı zamanda benzer kullanıma sahip antenlerin de gelişmesine olanak sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında beşinci nesil haberleşme sistemleri uygulamaları için kullanılabilecek, görece küçük, geniş bantlı izolasyon seviyeleri yüksek çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) özellikli iki kapılı mikroşerit anten tasarımları yapılmıştır. Antenlerin performansları literatür ile karşılaştırılmıştır. Tüm son tasarımlar elektromanyetik benzetim ortamlarında (CST ve HFSS) modellenmiş ve tasarımların doğrulaması yapılmıştır. Bu yüksek lisans tezi Giriş, Kaynak Özetleri, Kuramsal Temeller, Materyal ve Yöntem, Araştırma Bulguları ve Sonuçlar ve Öneriler olmak üzere altı başlıktan oluşmaktadır. Anten tasarımları ele alınırken 5N teknolojilerin ihtiyaç duyduğu gereksinimlerin karşılanması ve literatüre yaptığı katkılar değerlendirilecektir. Tasarımlara ait elde edilen bulgular ve analizleri sonuç kısmında yer alacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde 5N teknolojilere yönelik birçok farklı mikroşerit anten tasarımlarının olduğu görülmektedir. Araştırmacılar tarafından son yıllarda 5N frekanslarda mikroşerit antenlerin bant genişliğini arttırmak için kullanılan bazı yöntemler de var olan tasarımlara eklemiştir. Mikroşerit anten tasarımlarında antenlerin bant genişliğini arttırmak için ışıyan düzlem üzerine veya toprak yüzeyine farklı şekillerde kusurlar açılması, parazit yama kullanılması ve farklı sayıda katmana sahip altaş kullanımı tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Kullanılan bu yöntemlerin yanı sıra mikroşerit antenlerin kazanç, verimlilik, bant genişliği gibi birçok farklı parametrik değerinin iyileştirmesine yönelik literatürde yer alan diğer bir yöntem ise aynı altaş üzerinde yer alan çoklu girişli çoklu çıkışlı (MIMO) anten yapılarının tasarımıdır. MIMO antenler ile mikroşerit antenlerin ortaya çıkarmış olduğu olumsuz anten performansları minimize edilmeye çalışılmış ve bu sebeple MIMO antenler 5N haberleşme sistemlerinde sıkça kullanılmıştır. Tablo 2.1’de literatürde yer alan anten tasarımlarına ilişkin performans karakteristikleri verilmiştir.

Osama M. Haraz vd., 2015 yılında 5N kablosuz haberleşme sistemlerine yönelik yakınlık kuplaj besleme yöntemini kullanarak mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen anten 28/38 GHz frekanslarında geniş bir bant aralığında çalışmaktadır. Bu çalışmada 28 GHz frekansında yaklaşık 8 GHz ve 38 GHz frekansında ise yaklaşık 6 GHz’lik bant genişliğine sahip mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir (Haraz vd., 2015).

Mohamed Mamdouh M. Ali vd., yakınlık kuplaj besleme yöntemi ile 2016 yılında 28/38 GHz frekanslarında çalışan, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2,2$ olan Rogers RT Duroid 5880 kullanılarak bir mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Mikroşerit yama anten 28 GHz’de yaklaşık 5,5 GHz bant genişliğine ve 38 GHz’de ise 6 GHz bant genişliğine sahiptir (Ali vd., 2016).

Nanae Yoon ve Chulhun Seo, 2017 yılında 28 GHz frekansında çalışan mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirmiştir, yapılan çalışmada anten tasarımının sahip olduğu dikdörtgen yama üzerine açılan tek ve çift U şekilli yarıkların tasarım üzerine olan etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda U şeklinde yarık açmanın antenin bant

genişliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Çalışmada kullanılan U şeklinde yarık açma tekniği 2×2 dizi mikroşerit anten tasarımı için de kullanılmış ve sonuçta bant genişliği ve kazanç artırılmıştır (Yoon ve Chulhun, 2017).

Syed S. Haider vd., 2018 yılında çift frekansta rezonansa giren bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda rezonans frekanslarında bant genişlikleri sırasıyla 2,6 GHz ve 2,5 GHz olarak bulunmuştur (Haldier vd., 2018).

Islam Md. Rafiqul vd., 2018 yılında parazit yama tekniği kullandıkları mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan teknik ile mikroşerit yama antenin bant genişliğini arttırılmıştır, tasarımı yapılan antende çift dielektrik tabaka kullanılmış ve bu tasarımda üst tabakanın üzerine mevcut ısıya yapan yamadan daha küçük boyutta olan ikinci bir yama eklenerek parazit ısıya yapılması hedeflenmiştir. Sonuç olarak tasarlanan anten 28 ve 30 GHz frekanslarında rezonansa girmiş ve antenin bant genişlikleri sırasıyla 2 GHz ve 1,5 GHz olarak bulunmuştur (Rafigul vd., 2018).

Abdalnaser F. Kaeib vd., 2019 yılında 0,8 mm kalınlıkta ve dielektrik sabiti 4,4 olan FR4 alttaş kullanarak 28 GHz frekansında çalışan küçük boyutlu bir mikroşerit anten tasarlamışlardır. Bu tasarımda ilk olarak çeyrek dalga dönüşümü yöntemi kullanılarak besleme hattı ile antenin empedans uyumlaması yapılmış ve daha sonra ise mikroşerit antenin bant genişliğini, kazancını vd., performans parametrelerini iyileştirmek için yama üzerine yarık açılmıştır. Anten tasarımına ait elde edilen sonuçlarda ısıya verimliliği % 86,7, antenin bant genişliği ise 2,48 GHz olarak gözlemlenmiştir (Kaeib vd., 2019).

Kyoseung Keum ve Jaehoon Choi yapmış oldukları çalışmada yama üzerine çift U şeklinde yarık açarak tek mikroşerit anten ve 4×4 dikdörtgen mikroşerit dizi anten tasarımı yapmışlardır. Tek dikdörtgen mikroşerit antenin bant genişliği 3,77 GHz, 4×4 mikroşerit yama dizi antenin bant genişliği ise 4,71 GHz olarak bulunmuştur (Keum ve Choi, 2018).

Henry Abu Diawuo ve Young-Bae Jung 2018 yılında yayımladıkları çalışmalarında seri ve paralel mikroşerit yama anten tasarımında yakınlık kuplaj besleme tekniği kullanarak bir tasarım gerçekleştirilmiştir. 6×5 mikroşerit yama anten dizisi 5N teknolojilere

yönelik tasarlanmıştır ve antenin sahip olduğu kazanç 21,86 dB, bant genişliği ise %9,8 olarak bulunmuştur (Diawou ve Jung, 2018).

Sulthani ve Veeremani 2018 yılında 28, 37, 41 ve 74 GHz bantlarında çalışan MIMO dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarım kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılmak için gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan tek anten, sırasıyla 28GHz, 37GHz, 41GHz ve 74GHz frekanslarında -22dB , -37dB , -10 dB ve -19dB $|S_{11}|$ değerlerine sahiptir (Sulthani ve Veereemani, 2018).

Shen vd., 2019 yılında 5N teknolojilere yönelik elektromanyetik bant aralığı (EBG) yapısının kullanıldığı 26,500 - 29,500 MHz frekans bandında çalışan iki elemanlı bir MIMO anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan anten ile minyatür bir anten yapısı elde edilmiştir (Shen vd., 2019).

Zhang vd., tarafından 2019 yılında 5N teknolojilere yönelik MIMO dielektrik rezonatörlü anten tasarımı sunulmuştur. Anten tasarımında yamanın üst yüzeyine basılmış bir metal şerit yerleştirilmiştir ve uyguladıkları bu yöntemle 27,5–28,35 GHz aralığındaki izolasyonda maksimum 12 dB iyileştirme sonucu alınmıştır (Zhang vd., 2019).

Colaco vd., tarafından 2020 yılında 26 GHz merkez frekansına sahip 5N teknolojilerine yönelik bir anten tasarımı sunulmuştur. Tasarım sonucunda 3,56 GHz bant genişliği elde edilmiştir (Colaca vd., 2020).

Elgiddawy vd., tarafından 2020 yılında 5N teknolojilere yönelik bir MIMO anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımı $160\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 4,6\text{ mm}$ boyutlarında yeniden yapılandırılabilir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tasarım sonucunda $-22,44\text{ dB}$ 'den yüksek izolasyon değeri ve 0,015'ten düşük bir zarf korelasyon katsayısı garanti edilmiştir (Elgiddawy vd., 2021).

Yapılan literatür taramaları MIMO anten tasarımlarının iki kapılı yapılar ile başlayıp çoklu MIMO dizilere doğru ilerlediğini ve iki kapılı yapıların popülerliğini korumaya devam ettirdiğini göstermektedir. Ayrıca 5N teknolojilerde 6GHz üstü frekansların giderek önem kazandığı görülmektedir.

Tablo 2.1 Literatürde yer alan anten tasarımları

Referans	Anten Tipi	Anten Yapısı	Tasarım Yöntemi	Kullanılan Malzeme	Merkez Frekansı (GHz)	Anten Boyutu (mm ²)	$S_{11} \leq -10$ dB*, (GHz)
Haraz vd., 2015	Mikroşerit	1 Kapılı	Yama Anten	Rogers Rt 5880	28-38	7×8.5	24-30, 34-40
Ali vd., 2016	Mikroşerit	1 Kapılı	Yama Anten	Rogers Rt 5880	28-38	5×5	24-30, 35-40
Haldier vd., 2018	Mikroşerit	1 Kapılı	Yama Anten	Rogers Rt 5880	28-38	5×5	26,8-29,4 / 37,7-40,2
Rafigul vd., 2018	Mikroşerit	1 Kapılı	Yama Anten	Arnol Diclad 880	28-30	16×16	27,54-29,56
Kaeib 2019	Mikroşerit	1 Kapılı	Yarık Anten	FR4	28	8,06×6,96	-
Yoon vd., 2017	MIMO	4 Kapılı	Yama Anten	Rogers Rt 5880	28	41,3×44	27,5–31,44
Sulthani 2018	MIMO	4 Kapılı	Yama Anten	FR4	28-37-41-74	26×3,25	-
Shen vd., 2019	MIMO	2 Kapılı	Yama Anten	Rogers 4003	27	15×12,7	26,5-29,5
Zhang vd., 2019	MIMO	8 Kapılı	Yama Anten	FR4	3,5-5,5	140×70	3,4-3,6 / 5,15-5,29
Elgiddawy vd., 2021	MIMO	4 Kapılı	Yama Anten	FR4	2,44	160×160	2,42-2,46

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Haberleşme Sistemlerinin Gelişimi

Kablolu iletim yolu ile hayatımıza giren farklı haberleşme sistemleri (ör. Telefon, telgraf vb.) günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte birçok farklı alanda yerini kablosuz haberleşme sistemlerine bırakmıştır. Kablosuz haberleşme ilk olarak 1897 yılında Marconi tarafından geliştirilen telgraf ile hayatımıza girmiş ve her geçen yüz yılda gelişimini hızla devam ettirip, elektronik ve yarı iletken teknolojilerle haberleşme sistemleri için önemli birtakım gelişmeleri de beraberinde getirmiştir (Bondyopadhyay, 1998). Özellikle yeni nesil telefonlarla yapılan görüşmelerinin kablosuz olarak sürdürülmesiyle beraber kullanıcılara önemli olanaklar sağlamasından dolayı kablosuz haberleşme hızla yayılmış ve ses kalitesi, bant genişliği, kapsama alanı gibi kalite parametrelerine yönelik kullanıcı talepleri bu doğrultuda artışını sürdürmüştür. Bu hususta ortaya çıkan 1N hücreli teknolojileri, gelişmelerle yerini 2N, 3N, 4N ve 5N teknolojilere bırakmış ve kablosuz sistemlerin önünün hızla açılmasına da olanak sağlar hale getirmiştir (Geylani vd., 2016).

Birinci Nesil teknolojileri 1975-1990 yılları arasında yaygın olarak kullanılmaya başlanış olup bu sistemlerde geliştirilen teknoloji temelde yalnızca ses verisinin iletimi üzerine tasarlanmış olup kullanılan sistemler tamamen analog sistemler üzerine kurulmuştur. Birinci nesil haberleşme sistemlerinde yalnızca Frekans Modülasyonunun (FM) ve FDMA (Frequency Division Multiple Access) tekniğinin ve düşük bant genişlikli kanalların kullanılması sistemlerin veri aktarımının kısıtlanmasına neden olmaktaydı (Geylani vd., 2016).

İkinci Nesil haberleşme sistemlerine geçiş süreci teknolojik gelişmelerle beraber 1990-2000 yılları arasında olmuştur. Bu yıllar arasında yaygın olarak kullanılan 2N sistemleri sayısal modülasyonun yanında TDMA (Time Division Multiple Access) ve CDMA (Code Division Multiple Access) teknikleri de FDMA tekniğinin yanına eklenmiştir. İkinci nesil haberleşme sistemleri uygulanan tekniklerle beraber birinci nesil sistemlere göre daha kaliteli ses iletimi ve Kbps seviyesinde veri aktarımına olanak sağlamıştır (Geylani vd., 20016).

Zaman içerisinde kablosuz haberleşme sistemlerinin yaygınlaşması ve kullanıcıların buna yönelik artan talepleriyle mevcut teknikler de yetersiz kalmış ve daha yeni teknolojik gelişmeler öne çıkmaya başlamıştır. Yapılan teknolojik gelişmeler üçüncü nesil (3N) teknolojilerinin zeminini oluşturmuştur.

Üçüncü nesil sistemler 2000 yılı sonrasında kullanılmaya başlanmıştır. Haberleşme sistemlerinde gelişmiş modülasyon ve kodlama tekniklerinin yanında CDMA tekniğinin de kullanıldığı bilinmektedir (Hussain vd., 2007). 3N sistemlerle beraber kullanılan kanalların bant genişliği de artırılmış ve MHz seviyelerine çıkılmıştır (Hussain vd., 2007). Gelişmiş anten teknikleri üçüncü nesil sistemlerin gelişimine önemli katkılarda bulunmuştur. 2N sistemler ile karşılaştırıldığında artan veri oranlarıyla elde edilen gelişmeler ele alınan konuda görüntülü görüşme, video izleme ve müzik dinleme gibi farklı özelliklerin kullanıcılara sunulmasına olanak tanınmıştır. İnternet kullanımının kullanıcılar arasında yaygınlaşması, sosyal ağların kullanımı ve görüntülü görüşmeye yönelik artan talepler akıllı cihazların hayatımıza girmesine ve zamanla kullanımlarının yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır.

Mobil veri tüketimin kullanıldığı son teknolojiyle piyasaya sürülen akıllı cihazların kullanımının yaygınlaşması tüketicilerin kullanım alışkanlıkları ve beklentilerinin değişimine sebep olmuştur. Bu gelişmelerle beraber artık ses trafiğinden ziyade veri trafiği konusu daha fazla işlenmeye ve buna yönelik çalışmaların artmasına zemin hazırlamıştır.

Dördüncü nesil (4N) sistemler 2012 yılı ve sonrası itibariyle piyasada yer almaya başlamıştır. Dördüncü nesil (4N) sistemleri daha ileri seviye modülasyon tekniklerinin yanında farklı kodlama teknikleri, çoklu anten sistemleri ve çok daha geniş frekans kanallarını da kullanmaya başlanmıştır. Dördüncü nesil haberleşme sistemlerinde çoklu erişim bütünüyle değişmiş, OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ve SC-FDMA (Single Carrier FDMA) gibi spektrum verimliliğine yönelik olan tekniklerin kullanımı başlamıştır (Myung vd., 2006).

Kablosuz haberleşme sistemleri günümüzde giderek yaygınlaşmış ve kullanımı kolaylaşmıştır. Sistemlerin işletmeciler için yeni bir iş alanı olması ve kullanıcılara yönelik olan kablolu iletişimin sınırlarını ortadan kaldırması nedeniyle ilerleyen

zamanlarda kullanıcıların duydukları ihtiyaç ve yaygınlaşan farklı uygulamalarla beraber değerlendirildiğinde haberleşme sistemlerinin gelişimi ve sürekliliğinin devam edeceği bir gerçektir. Ortaya konulan gelişmeler ışığında günümüzde kullanılmakta ve gelişimine sürekli olarak devam etmekte olan 4N sistemlerinin yanında yakın bir gelecekte beşinci nesil (5N) mobil haberleşme teknolojilerinin hayatımıza girecektir. Bu sistemlerin ön görülmesiyle kullanıcıların duydukları gereksinimlere yönelik standart çalışmaları başlamış ve yeni fikirler ileri sürülmüştür.

3.1.1. Beşinci nesil teknolojiler

Teknolojik gelişmelerin son yıllarda mobil iletişimin gelişimini de beraberinde getirmiştir. Günümüzde beşinci nesil teknolojiler 4N LTE ağlarının gelişmiş şekli olan yeni nesil mobil ağı olarak bilinmektedir. 5N teknolojisi son zamanlarda yaygınlaşan büyük veri ve nesnelerin interneti gibi kavramlarının ortaya koyduğu bir teknolojidir. Geliştirilmekte olan yeni nesil 5N teknolojileri hedefte çok daha hızlı bir internet bağlantısını mümkün kılmaktadır (Bakırlı, 2018).

5N teknolojisiyle birbirine bağlanan sayıca çok fazla cihazın ihtiyaç duyduğu hızlı internet karşılanması hedeflenmektedir. Bu kapsamda 5N teknolojisinin en uzun filmleri, videoları, oyunları bile birkaç saniyede indirmeye imkân verecektir. Aynı şekilde yararlanılan teknoloji bağlantılarda ortaya çıkabilecek sorunları ve meydana gelebilecek kopuklukları en aza indirecektir. Bunların dışında 5N teknolojilerinin bir diğer özelliği ise geniş kapsama alanıdır.

Günümüzde telekomünikasyon şirketlerinin başlatıp devam ettirdiği 5N teknolojilerine uyumlu telefonlarla birlikte çalışan bu cihazlar başlangıçta 4G sistemlerle beraber kullanılması öngörülmektedir. Sürecin hızlanması ve yaygınlaşması ile daha sonraki zamanlarda kapsamının genişletilerek tamamen 5N sistemlere geçilmesi hedeflenmekte ve sistemlerin yapılarının bağımsız ağlar aracılığıyla yürütülmesi planlanmaktadır.

Yeni nesil 5N Teknolojisinin kullanıcıların hayatında birçok değişiklik yapması beklenmektedir. Bu hususta ilk olarak 5N vericilerinin oldukça küçük boyutlarda olması planlanmaktadır. Bu küçük boyutlu vericiler sayesinde şehirlerde yer alan yüksek baz

istasyonlarının yerine daha küçük ve modemi andıran teknolojik aletlerin kullanımının artacağı tahmin edilmektedir (Sözen, 2019).

5N teknolojileri gelecekte 20 Gbps hızında bir internet erişimi hedeflemektedir. Bu hedeflerle beraber hızı ve geniş kapsama alanı avantajlarıyla iletişimi hızlı ve kesintisiz bir hale getirilecektir. Bunların yanı sıra bu teknolojik gelişmeler hayatımızın birçok alanında da yer alarak yaygınlaşacaktır (Geylani vd., 2016).

Önceleri evlerde kullanılmaya uygun olan bu teknoloji zamanla hastanelerde, akıllı bandaj gibi sağlık cihazlarına da entegre edilerek farklı kullanım alanlarına yönelik imkanlar sunacaktır. Böylelikle, bu birçok avantajı bulunan teknolojik gelişmeler sayesinde düşük maliyetli, verimli ve yenilikçi sağlık ekipmanlarıyla sağlık alanında çok önemli gelişmeler artarak sunulmaya devam edecektir.

5N'nin etki edeceği alan sadece sağlık sektörü değildir. Bu teknolojinin diğer birçok alanda da etkili olacağı düşünülmektedir. Kullanım alanların biri de şoförsüz akıllı otomobillerdir. Geliştirilen teknoloji sayesinde kesintisiz bilgi akışı sağlanıp akıllı ulaşımın en kritik faktörü yerine getirilmiş olacaktır. 5N teknolojilerin sunduğu kesintisiz ve hızlı internet imkânlarıyla kazaların önüne geçilmesinde önemli bir adım atılması beklenmektedir.

Bu alanların dışında yeni nesil teknolojilerin kullanılacağı bir diğer alan ise sanal gerçekliktir. Sanal gerçeklik, son yıllarda sürekli değişim ve gelişim gösteren bir alandır. Teknolojik gelişmelerin sanal gerçeklik alanında da kullanılması ve sanal gerçeklik alanının gelişmesini etkileyeceği bir gerçektir. Bu yönden sanal gerçekliği zenginleştirilmesi beklenmektedir. 5N ile akıllı telefon, mobil cihaz ve benzetim araçlarında çok fazla değişikliğe uğrayacağı öngörülmektedir. Bu sayede akıllı cihazlar devrim geçirecek ve gelişimlerini daha hızlı ve güvenilir olarak devam ettirecektir.

3.1.2. Nesnelerin interneti

Nesnelerin İnterneti kavramının 5N teknolojisiyle bir araya gelişi, önceki sistemlere nazaran daha farklı ve gelişmiş bir veri zenginliği sağlamaktadır. Milyarlarca teknolojik cihaz birbirine entegre edilmekte ve bu cihazları yeni nesil 5N teknolojisiyle en hızlı

şekilde yönlendirme imkânı bulunmaktadır. Bu noktada işletmeler, elde ettikleri hızlı ve güvenli veri aracılığı ile önemli bir karar mekanizması haline gelmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda öngörülen bir diğer gelişme ise tarımsal faaliyetlerin yenilenmesidir. Tarım alanında yeniliklerin yapılması ve akıllı çiftlikler kurulması birçok avantajı bünyesinde barındırmaktadır. Çalışmaların sonucunun en önemli avantajı ise kuşkusuz geniş çaplı üretim yapılmasıdır.

Günümüzde 5N ve Nesnelerin İnterneti kavramının uyumuyla çalışan farklı birtakım örnekler her geçen gün sayıca çoğalmaktadır. Gerçekleşen gelişmelere örnek olarak, dünyanın gelişmiş ülkeleri arasında yer alan Finlandiya'da sanal gerçeklik teknolojisiyle ile iyileştirme hizmeti veren gelişmeler yer almaktadır. Ayrıca bir diğer gelişme ise sağlık sektöründe yeni doğan ünitelerine yönelik yapılan çalışmalardır. Akıllı küvözler sayesinde yeni doğan ünitelerinde daha iyi koşullarda hizmet verilmesi ve akıllı bandajlar ile hastalara daha verimli bir şekilde hizmet sunulması da öngörüler arasında yer almaktadır. Nesnelerin interneti kavramının 5N teknolojilerine entegre olmasıyla birçok kuruluşun maliyet tasarrufu, daha iyi müşteri deneyimi gibi daha birçok avantaj da kullanıcıların hizmetine sunmaktadır.

3.1.3. Milimetre dalga frekans bantları (mmWave)

Kablosuz haberleşme sistemlerinde 5N teknolojilerine yönelik ilk safhada ele alınan frekanslarda 6GHz bir eşik olarak belirlenmiştir. 6 GHz altı ve üstü olarak belirlenen bu aralıklarda çeşitli frekans bantları (6 GHz altı olarak düşük bant spektrumu 1 GHz altı ve orta spektrum bandı 1-6 GHz ve 6GHz üstünde ise 24-100 GHz)yer almaktadır (Ghosh 2014). Kullanılması planlanan bu spektrum milimetre dalga bandında kısa mesafelerde yerel kapsama alanı sağladığı için yeni nesil teknolojiler için mevcut olan mobil teknolojilerden daha yüksek kapasite değerleri sağlayacağı öngörülmektedir (Agiwal vd., 2016).

Tahsis edilen düşük bant spektrumu aralığı teknolojiler için en yüksek veri hızı olarak yaklaşık 100 Mbps olmakta ve büyük kapsama alanı sağlamaktadır (Zhang vd., 2019). Buna karşın tahsis edilen orta bant spektrumu, düşük bant spektrumlarından daha hızlı

veri iletimi ve düşük gecikme süresi sağlamakta ve bununla birlikte 1 Gbps'e kadar veri hızları sunmaktadır.

6GHz üstü frekans bantlarında yer alan ve Milimetre Dalga Bandı (mmWave) olarak da adlandırılan yüksek bant spektrumu ise 5N teknolojiler için diğer spektrumlara oranla en yüksek performansı sağlarken büyük sinyal zayıflıklarına da neden olmaktadır. Tahsis edilen bu yüksek bant spektrumu 10 Gbps'e kadar veri hızlarına ve son derece düşük gecikme süresine sahiptir (Shafi 2017 ve Zhanf vd., 2019). Yüksek spektrum bantlarının sahip olduğu temel engel düşük kapsama alanı ve elektromanyetik zayıflamalardır, bu spektrumlarda milimetre dalgalar iletilirken duvar, cam vb. cisimlerle karşılaştığında zayıflamaktadır. Bu durum, yüksek spektrum bant ağını oluşturmakta çok sayıda minyatür baz istasyonu olarak adlandırılabilen hücrelerin kullanılacağı anlamına gelmektedir ve kullanılacak olan minyatür baz istasyonlarının sahip oldukları kapsama alanını genişletmek için demet biçimlendirme teknolojisiyle birlikte kullanılması öngörülmektedir (Busari vd., 2017).

Demet biçimlendirme teknolojisi, hücresel baz istasyonlarının trafik sinyalizasyonuna yönelik geliştirilen ve baz istasyonlarına bağlı belirli bir kullanıcıya en verimli veri dağıtımını sağlayan ve bu kullanıcıların yakınında yer alan diğer kullanıcılar için ise parazitini azaltan bir sistemdir. Bu sistemlerin de kullanıldığı 5N teknolojiler için ultra yüksek geniş bant hızlarını karşılamak için 6 GHz'in üzerinde 26, 28, 38 GHz gibi bantları yaygın olarak kullanılmakta ve bu aralıktaki en fazla uluslararası desteğe sahiptirler (Sakaguchi, 2017; Morgado vd., 2018).

5N teknolojiler için kullanıma sunulan bantları belirleyen kuruluşlar aynı zamanda geliştirilen teknolojiler için ağların da ne şekilde dağıtılacağını belirlemektedir. Bu hususta izlenecek yolda ilk adım orta bantlar (örneğin 3,5 GHz) ve yüksek bantlar (24-100 GHz) gibi ek kapasitenin gerekebileceği kentsel erişim merkezlerinin yoğun olarak yer aldığı küçük hücre baz istasyonlarında kullanımıdır (Sakaguchi, 2017). Bu baz istasyonlarında sabit kablosuz erişiminin de içinde yer aldığı demet biçimlendirme teknolojisi kullanılarak daha geniş alan kapsamı için makro hücrelerde de kullanılabilecektir (Giordani, 2019). 5N teknolojiler için izlenecek bu yöntemler ile 3,5 GHz bandının kapsama alanını sağlayabileceği ve 1,8 ve 2,6 GHz gibi mevcutta kullanılan mobil bantlarla aynı hücre yerlerini kullanabileceği de belirlenmektedir.

5N teknolojiler için ülkeler farklı frekans değerlerini yüksek frekans spektrumları için tahsis etmektedir. 5N için yüksek frekans spektrumu tahsisi eden ülkelerden İtalya, 26 GHz frekansını ve Japonya’da 28 GHz frekansı için çalışmalar yürütmektedir. Bunların yanı sıra yine yüksek spektrumlarda Güney Kore, Uruguay vb. ülkeler her iki grubu da lisanslamaktadır (5G and spectrum different approaches, 2019). 5N teknolojilere yönelik ülkemizde yürütülen çalışmalarda bazı Avrupa ülkelerinde olduğu gibi 6 GHz altı ve üstü olmak üzere milimetre dalga frekansları çalışmaları devam etmekte ve yüksek frekans bantlarında 26 ve 28 GHz çalışmalarda yer almaktadır (5G ve Ötesi Beyaz Kitap, 2018).

3.2. Mikroşerit Antenler

Antenler, kablosuz iletişim sistemleri için temel ve ara eleman olarak görev yapan, işaretlerin iletiminde alıcı ve verici olarak yer alan yapılardır. Aynı zamanda elektromanyetik dalgalarında iletimini üstlenen bir dönüştürücüdür (Balanis 2005). Bu bölüm içerisinde 5N teknolojilere yönelik yapılan çalışmalarda kullanılan mikroşerit antenler ve özellikleri yer almaktadır.

3.2.1. Mikroşerit antenlerin tarihi

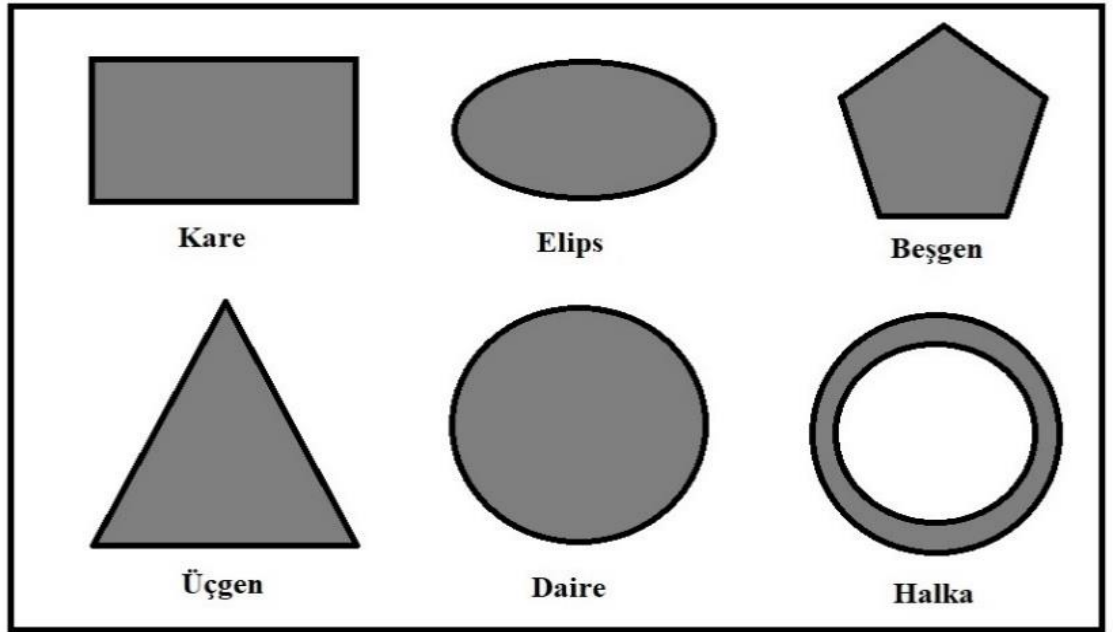
Mikroşerit yama antenler, tarihte ilk olarak 1953 yılında sunulmuş ve 1955 yılında da patenti alınmıştır. Bu gelişmelerin yanı sıra 1970’li yıllarda ilgi görmüş ve popülerleşmeye başlamıştır (Garg ve Bahal, 2001). Mikroşerit antenler 1970’li yıllarda düşük kayıplı, mekanik ve ısı açıdan uygun olan dielektrik taban malzemelerinin geliştirilmesiyle “Munson (1974) ve Howell (1975)” tarafından ilk kez ortaya konulmuştur. Sunulan bu antenlerin tasarımları ince ve yüzeye uyumlu olacak şekilde yapılmıştır. Bu antenlerin uzay mekikleri ve füzeler vb. teknolojik ekipmanlarda kullanılmışlardır (Sözen, 2019).

Mikroşerit antenler ilk olarak uzay teknolojileri, uçak vb. uygulamalarda boyut küçültme, ağırlığı hafifletme, performansı iyileştirme ve montaj kolaylığı açısından önemli uygulamalarda kullanılmış ve ardından da mobil cihazlar, radyo ve kablosuz haberleşme vb. ticari ve kamusal uygulamalarda küçük boyutlu antenlere duyulan gereksinimi giderek artmıştır. Bu gereksinimi ve gelecekte doğabilecek yeni gereksinimleri karşılamak amacıyla mikroşerit yama antenlere yönelik geniş ve farklı birçok kullanım

yeri ortaya çıkmış bununla beraber geçen sürede bilimsel araştırmalara yönelik bir nokta halini almıştır (Toktaş, 2009). Mikroşerit antenlerin yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte bu alanda birçok çalışma yapılmaya başlanmıştır. Mikroşerit antenlerin sahip oldukları avantajları artırmak ve dezavantajlarını azaltmak için Şekil 3.1 'de görüldüğü gibi çeşitli tasarımlar sunulmuştur.

3.2.1.1. Mikroşerit antenlerin avantajları

Mikroşerit antenler günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanım alanlarında sağladığı avantajlar sayesinde diğer kullanılan antenlere oranla yaygınlık kazanmıştır.



Şekil 3.1 Mikroşerit anten geometrileri

Mikroşerit antenler yaklaşık bir değer belirlenecek olursa 100 MHz'den 50 GHz'e kadar geniş bir frekans kullanım aralığı sunarlar. Mikroşerit antenlerin diğer mikrodalga antenlerine göre avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Sözen, 2019; Yazgan 1987):

- Mikroşerit antenler hafif ve küçük hacimlidirler, bu nedenle üretim maliyetleri de bu oranla düşük kalmaktadır,
- Kullanışlı olmalarının bir diğer nedeni düzlemsel biçimliliğidir ve yapıları birçok yere uyumlanabildiği için uzay araçları vb. yapılarda rahatlıkla kullanılabilirler.

- Mikroşerit antenler güdümlü mermiler, roketler vb. araçlar üzerinde çeşitli büyük değişikliklere neden olmazlar ve bu sayede sıklıkla tercih edilirler.
- Bu antenler yapılarında besleme yerlerinde yapılan ufak değişikliklerle doğrusal ve dairesel kutuplanmış ışıma yapabilirler.
- Diğer bir avantajı ise ikili frekans antenlerinin basit bir şekilde yapılabilir olmasıdır.
- Bu antenler yapıları gereği boşluk desteği gerekmez.
- Bu antenler besleyici hatları ve uyumlandırma devreleri, kendileriyle birlikte aynı zamanda üretilebilir şekilde tasarlanmıştır.

3.2.1.2. Mikroşerit antenlerin dezavantajları

Mikroşerit antenler, yapılarında birçok avantaj bulundursa bile bunların yanında bazı dezavantajlara da sahiplerdir. Sahip oldukları bu dezavantajların ortadan kalkması ve tasarımların daha iyi sonuç vermesi için literatürde yer alan birçok farklı çalışma yer almaktadır (Sözen, 2019; Yazgan, 1987). Bu dezavantajlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Mikroşerit antenler yapıları gereği dar bant genişliğine sahiptirler bu nedenle farklı tasarım fikirlerine ihtiyaç vardır.
- Antenlerin çeşitli kayıplardan kaynaklı olarak ortaya çıkan düşük kazanca sahip olmaları bir diğer dezavantajdır.
- Yapılarından kaynaklı olarak mikroşerit antenlerin birçoğu yarı düzlem içinde ışırlar.
- Mikroşerit antenler 8dBi ve dizi antenleri ise 20 dBi olan en üst kazanca sahiplerdir. Bu kazancın elde edilmesinde birçok farklı zorluklar vardır.
- Mikroşerit antenler düşük uçtan ışıma performansı gösterirler.
- Bu antenlerin besleyici ve ışıma elemanı arasında zayıf bir yalıtım vardır.
- Yüzey dalgaları uyarımının mümkün olabilmektedir.
- Mikroşerit antenler yapıları gereğince düşük güç kapasitesine sahiplerdir.

3.2.2. Mikroşerit antenlerin çeşitleri

Mikroşerit antenler yapısal olarak farklılıklar göstermektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde ve yeni tasarım fikirlerine bakıldığında mikroşerit antenler kendi içinde türlere ayrılmaktadır.

3.2.2.1. Geleneksel mikroşerit antenler

Mikroşerit antenler arasında en bilinen geleneksel mikroşerit anten yapısı dikdörtgen yama antendir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi bu antenler $L \times W$ boyutlarında dikdörtgen iletkenin altta yer alan toprak düzlemi ve üzerinde h yüksekliğindeki ϵ_r dielektrik sabitine sahip bir alttaş düzlemine yerleştirilmesiyle oluşmaktadır (Balanis, 2005).

Dikdörtgen mikroşerit anten yama genişliği W ;

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}. \quad (4.1)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Hesaplama formülü verilen denklemde c ışık hızını, f_r rezonans frekansı, ϵ_0 boşluk dielektrik geçirgenliği, μ_0 boşluk manyetik geçirgenliği ve ϵ_r kullanılan dielektrik malzemenin dielektrik sabitidir. Dikdörtgen mikroşerit anten yamanın uzunluğu L ;

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff} + 1}} - 2\Delta L. \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Eşitlik (4.2)’deki ϵ_{eff} etkin dielektrik sabiti ve ΔL saçaklanma etkilerinin dikkate alındığı ek uzunluk eşitlik (4.3)’te ve eşitlik (4.4) ‘te verilmiştir.

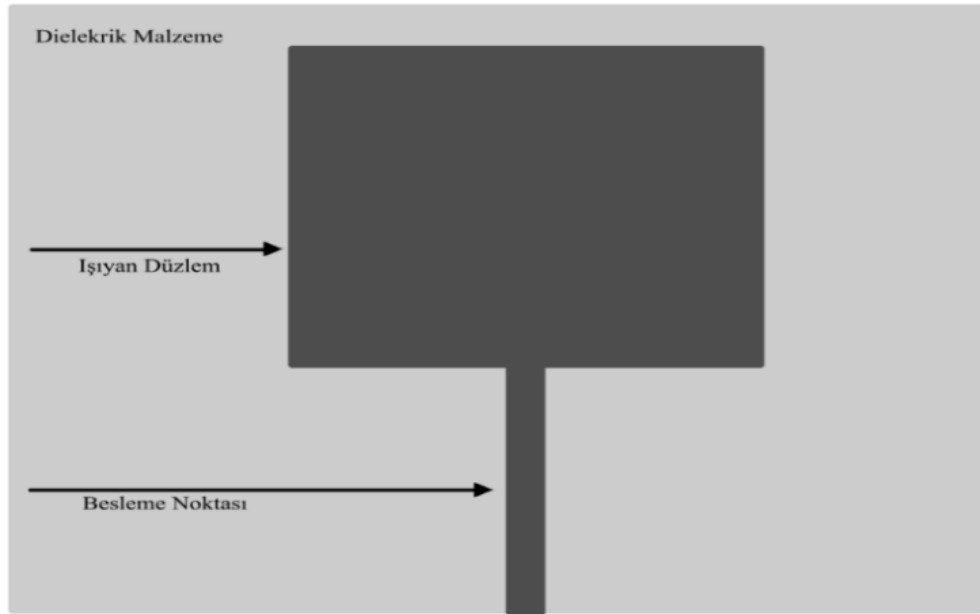
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (4.3)$$

$$L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}. \quad (4.4)$$

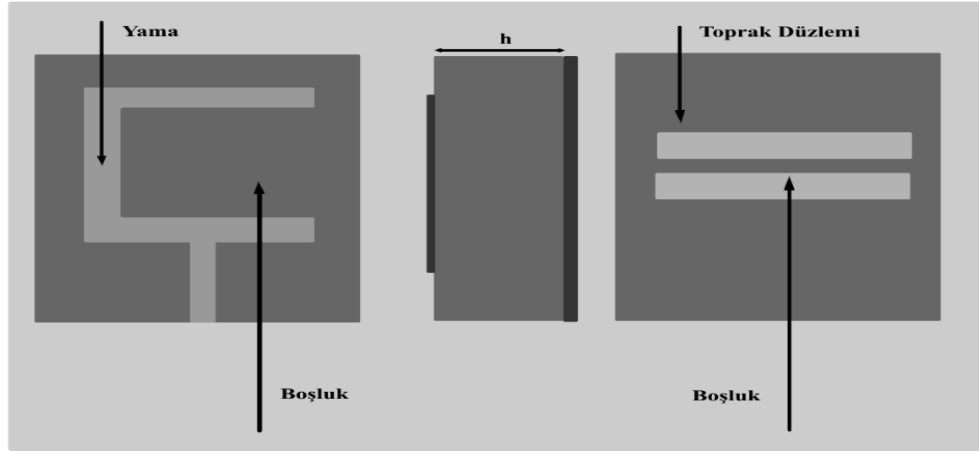
Geleneksel mikroşerit antenlerin sıkça kullanılmasının nedeni tasarımlarının ve yapılan tasarımları analiz etmenin kolay olmasıdır. Belirtilen avantajlarının yanı sıra yapı olarak diğer antenlere oranla daha büyüktür ve daha dar bant genişliğine sahiptir. Birçok dezavantajlarının bulunması nedeniyle, farklı geometrilere sahip veya geleneksel şekilli antenlerin değiştirilmesiyle farklı anten tasarımları literatürde yer almaktadır (Bkz. Şekil 3.1).

3.2.2.2. Yama ve toprak düzlemi değiştirilmiş mikroşerit antenler

Mikroşerit anten türleri içerisinde yer alan diğer bir türü ise Şekil 3.3'te verilen yama ile toprak düzlemi değiştirilmiş mikroşerit antenlerdir. Bu anten türü için yapılan tasarımlarda düzlemlere boşluk yükleme yapılarak veya kısa devre pin uygulanarak istenilen performans kriterleri yakalanılmaya çalışılmaktadır. Uygulanan yöntemleri gerekli olan yerlerde kullanarak oldukça geniş bant, çoklu bant ve dairesel polarizasyona sahip olan anten çeşitleri elde edilmektedir fakat belirtilen özelliklere sahip olan anten çeşitlerinin tasarlanması oldukça zordur. Bu tür antenlerin geometrileri doğrusal olmayan bir yapıdadır ve antenleri manuel olarak veya optimizasyon teknikleriyle birlikte birçok iyileştirme yapıldıktan sonra hedeflenen özelliklere sahip anten tasarlanabilmektedir (Sözen, 2019).



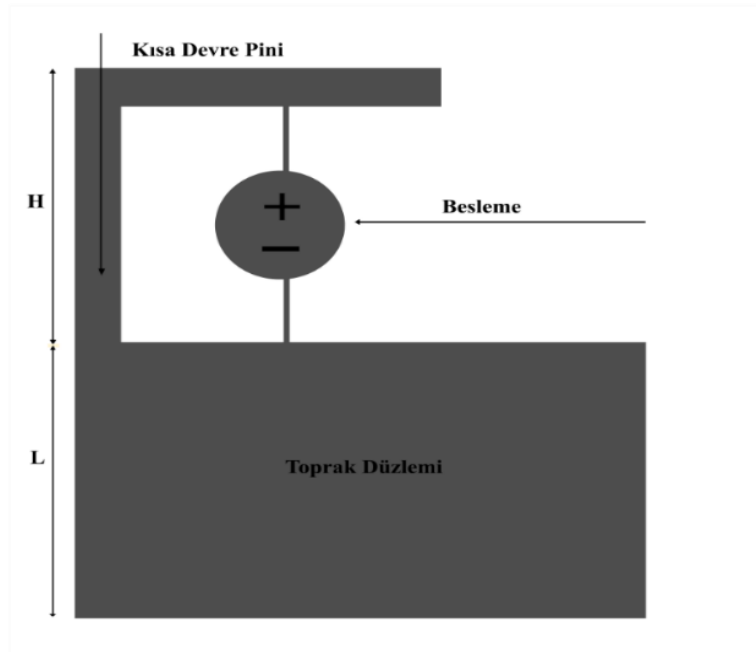
Şekil 3.2 Geleneksel mikroşerit anten yapısı



Şekil 3.3 Toprak düzlemi değiştirilmiş ve yamalı mikroşerit anten

3.2.2.3. IFA- ters F antenler

Mikroşerit antenler içerisinde yer alan bir diğer anten çeşidi Şekil 3.4’te verilen IFA (Ters F Anten) yapısı toprakla beraber düzleme bütünleşik olarak yerleştirilmektedir. Antenler ters yatmış F harfine benzediği için de IFA olarak literatürde yer almışlardır. Bu anten yapılarında ana karta birleşik bir şekilde yerleştirilip alanına uyumlandırılarak tasarlanabildiğinden, özellikle dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları vb. kablosuz iletişim cihazlarında kullanılmaktadır (Akman, 2017).



Şekil 3.4 Ters F anten

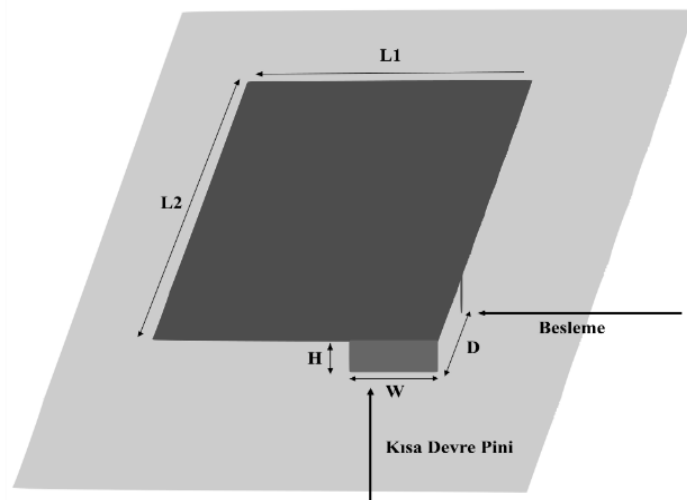
3.2.2.4. PIFA (planar inverted F antenna)

Şekil 3.5'te verilen toprak düzleminden h yüksekliğinde bir düzleme entegre edilmiş ve toprak düzlemiyle de kısa devre yapılmış bir iletken yamaya sahip olan antenler ise bir diğer mikroşerit anten çeşididir ve literatürde bu antenlere PIFA çeşitli antenler denilmektedir. Bu antenlerin ters F antenlerden farkı ise yamanın, toprak düzleminden farklı ve paralel bir düzleme yerleştirilmesidir. Yerleştirmede kullanılan düzlemin varlığı nedeniyle IFA anten isminin başında düzlem (planar) kelimesi getirilerek PIFA anten olarak anılırlar.

PIFA antenler de dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları vb. kablosuz haberleşme cihazlarının ana kartına birleşik olarak tasarım yapılmaktadır. PIFA antenlerin SAR (specific absorption rate) değeri düşük olduğundan avantaj sağladıkları için son yıllarda cep telefonlarında yoğun olarak kullanılmaktadır (Akman, 2017).

3.2.3. Mikroşerit antenlerin besleme türleri

Mikroşerit antenlerin türleri olduğu gibi farklı besleme çeşitleri de vardır. Mikroşerit antenlerde besleme türleri genel olarak sınıflandırılmak istenirse iki gruba ayrılarak incelenebilirler. Bu gruplar temaslı ve temassız olarak ikiye ayrılmaktadır. Her iki grupta elektriksel enerjinin taşındığı hat ışıma elemanı ile direkt bağlı ise temaslı besleme olarak adlandırılır.



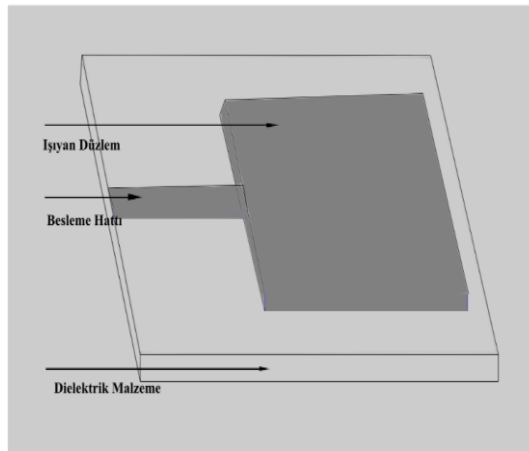
Şekil 3.5 Düzlem ters F anten (PIFA)

Tüm bunların yanı sıra enerji hattı ile ışıma elemanı arasında direkt bağlantı yerine elektromanyetik bağlaşım ile sağlanıyorsa temassız besleme olarak adlandırılır. Antenlerde besleme tekniğinin seçiminde birçok faktör etkilidir ve dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. Bunlardan ilki gücün, besleme ile ışıma elemanı arasında verimli bir şekilde transfer edilmesidir. Transfer işleminde istenmeyen ışımaların oluşumu iki yapı arasındaki empedans uyumuna bağlı olarak etkilenmektedir. İkincisi ise tasarımı yapılacak olan anten yapılarının fiziksel uyumluluğudur. Mikroşerit antenlerde besleme tipleri dört farklı gruba ayrılmaktadır (Sözen, 2019).

3.2.3.1. Mikroşerit besleme yöntemi

Mikroşerit hat ile besleme yönteminde Şekil 3.6’da görüldüğü gibi kaynak ile anten arasında mikroşerit hat kullanılmaktadır. Kullanılan mikroşerit hat genişliği kapı empedansı ile uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Mikroşerit ile besleme yönteminin kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri yama, mikroşerit hattın uzantısı olduğu için üretimi kolay olmasıdır. Üretim kolaylığı sağladığı için çokça tercih edilmekte ve kullanımında öncelik tanınmaktadır.

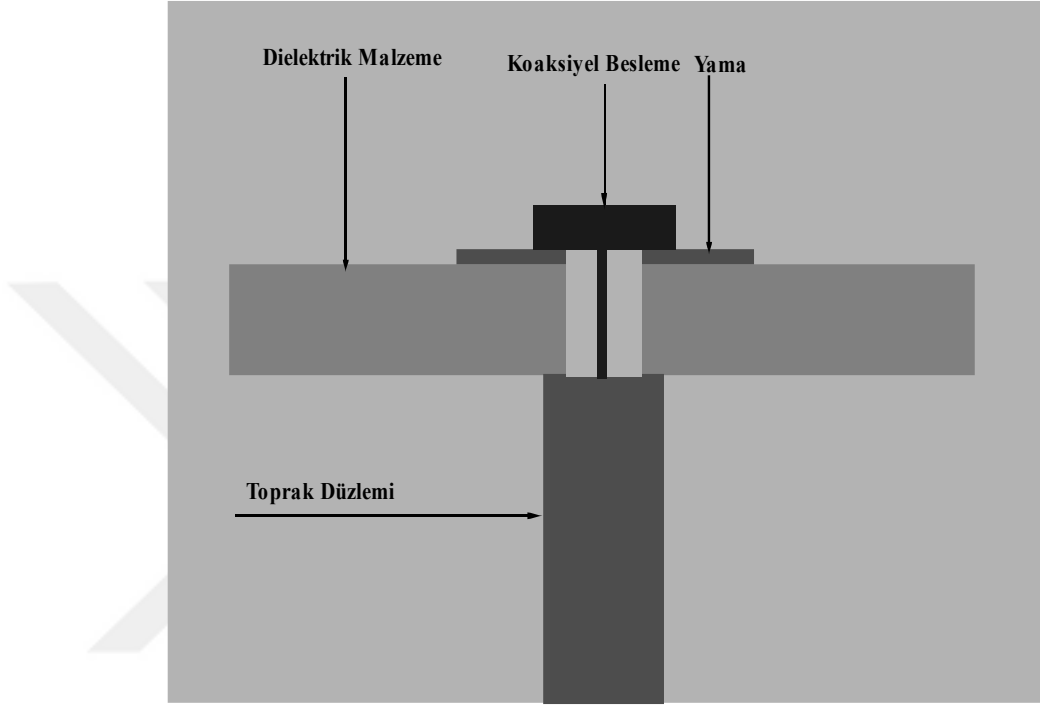
Mikroşerit hat ile besleme yönteminde besleme hattı anten içerisinde yer alan yamadan daha ince olacak şekilde tasarlanmaktadır. Besleme hattının konumu değiştirilerek empedans uyumluluğu sağlanabilmektedir. Fakat bu durumda dielektrik yüzeyin kalınlığı bu durumu etkileyerek fazla olduğunda istenmeyen dalgalar oluşur ve bant genişliğinin %2-%5 olarak sınırlandırılmasına neden olmaktadır (Akman, 2017).



Şekil 3.6 Mikroşerit besleme yöntemi

3.2.3.2. Koaksiyel besleme yöntemi

Koaksiyel besleme yöntemi, Şekil 3.7’de görüldüğü gibi kablunun dışında yer alan topraklama bölümünün antendeki toprak bölümüne, kablunun içindeki gücü ileten bölüm de antenin yama yüzeyinin altına bağlanmasıyla sağlanmaktadır.

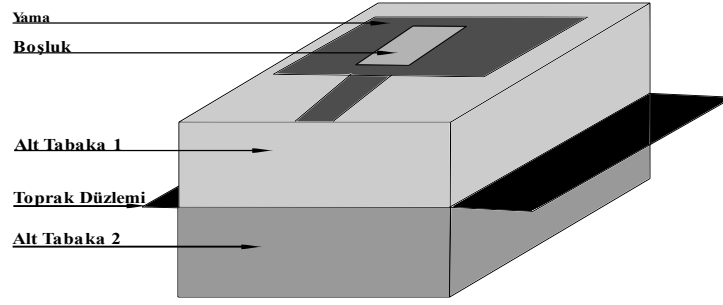


Şekil 3.7 Koaksiyel besleme (İmamoğlu, 2019)

Bu yöntem kablo şekillendirmek için kolay olduğundan birçok alanda kullanılmaktadır. Koaksiyel besleme yüksek anten verimliliği sağlayan yenilikçi bir yöntemdir ve bu avantajları doğrultusunda besleme yönteminin sık kullanılmaktadır. Bahsedilen besleme yönteminde hat kayıplarının az olmasından dolayı diğer mikroşerit anten besleme türlerine oranla fazla güç ile çalışmaya ve yüksek frekanslara yönelik çalışmalar için uygundur (Sözen, 2019).

3.2.3.3. Açıklık bağlaşımlı besleme yöntemi

Açıklık bağlaşımlı besleme yönteminde Şekil 3.8’de görüldüğü gibi iki yalıtkan malzeme arasında toprak iletken yerleştirilerek besleme yapılmaktadır. Konu edilen yöntemde toprak yüzeyinde yer alan açıklıktan besleme hattındaki ışıma yüzeyine enerji aktarılır.

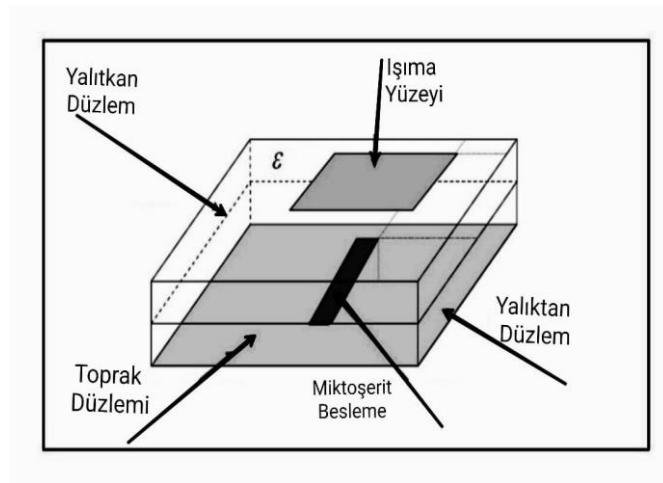


Şekil 3.8 Açıklık bağlaşımlı besleme yöntemi (Kütük, 2012)

Toprak yüzeyinde açıklık yer almazsa ise iletim hattından gelen enerji ışıma yüzeyine ulaşamaz. Bu durumda geri yansır ve ışıma yüzeyi ve antenin işlevsiz hale gelmesine neden olur (Akman, 2017).

3.2.3.4. Yakınlık bağlaşımlı besleme yöntemi

Yakınlık bağlaşımlı besleme yöntemi de açıklık bağlaşımlı besleme gibi temasız beslemenin bir çeşididir. Bu besleme türü de Şekil 3.9’da görüldüğü gibi açıklık bağlaşımlı besleme gibi iki yalıtkan tabakadan oluşur. Yakınlık bağlaşımlı besleme yönteminde de besleme hattı iki yalıtkan yüzeyin arasına yerleştirilir. Beslemenin araya yerleştirilmesiyle birlikte açık devre yan hat ile sonlanır. Bu yöntemde toprak düzlemi en alt düzlemdir ve ışıma yüzeyi en üstte yer almaktadır (Sözen, 2019).



Şekil 3.9 Yakınlık bağlaşımlı besleme yöntemi (Kütük, 2012)

3.2.4. Mikroşerit anten parametreleri

3.2.4.1. Saçılma parametreleri

Anten tasarımlarında dikkate alınması gereken bazı parametre değerleri vardır ve bu parametrelerden biri de Saçılma parametreleridir (S-Parametreleri). S-parametreleri, anten tasarımında empedans uyumunu ve ışıma performansını gösteren önemli etkenlerden biridir ve S-parametrelerinin gösterdiği farklı değerler, bu değerlere ait olan hesaplamalar ise tasarımlar için önem teşkil etmektedir. S-parametrelerinde; $|S_{11}|$ parametresi birinci antenden geriye dönen işaretin birinci antene iletilen işarete oranını göstermekteyken aynı şekilde $|S_{22}|$ parametresi ise ikinci anten yapısı için bu değeri göstermektedir. Tasarlanan antenin ideal olması için ideal anten kapılarında geri dönen işaret olmaması gerekir ve antene giren bütün gücün ışıyarak yayılması anlamına gelmektedir. $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ dışında yer alan parametreler ise ($|S_{12}|$ ve $|S_{21}|$), iki kapılı antenler için anten çiftleri arasındaki ortak etkileşimin bir göstergesi olarak tanımlanabilmektedir. Burada $|S_{12}|$, ikinci anten ışımasının birinci anten üzerindeki etkisinden kaynaklanan ve birinci antenden geri dönen sinyalin ikinci antene verilen sinyale oranını belirtmektedir. $|S_{21}|$ ise aynı mantıkla birinci anten ışımasının ikinci anten üzerindeki etkisinden kaynaklanan ikinci antenden geri dönen sinyalin birinci antene verilen sinyale oranını belirtmektedir. Tek antenin yer aldığı bir sistemde yalnızca $|S_{11}|$ parametresi vardır ve bu durumda $|S_{11}|$, bu sistem içerisinde antene iletilen işaretin ne kadarının geri yansıdığının ölçütüdür.

3.2.4.2. Empedans bant genişliği

Anten tasarımlarında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer parametre ise empedans bant genişliğidir. Empedans bant genişliğinin hesaplanması o antene ait olan S-parametrelerinin frekansa karşı eğrileri kullanılarak yapılmaktadır. Empedans Bant genişliği S-parametreleri için genellikle -10dB değeri baz alınarak hesaplanıp, hesaplanan değer göz önüne alındığında, anten ışıma performansının -10dB değerine düştüğü ilk frekans değeri alt frekans değeri olarak adlandırılırken çıktığı son frekans değeri ise üst frekans değeri olarak adlandırılır (Ahmad, 2008)

3.2.4.3. Gerilim duran dalga oranı (GDDO-VSWR)

Gerilim Duran Dalga Oranı, bir anten sisteminin bulunduğu hat empedans uyumunun derecesini gösteren bir ölçüttür ve antenin yansıyan gücünü tanımlamaktadır (Ahmad 2008). Antenlerin yansımaya katsayısının bir fonksiyonudur ve bu fonksiyona ait eşitlik 4.5'te verilmiştir.

$$VSWR = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|} \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.5)'te yer alan Γ yansımaya katsayısını göstermektedir. VSWR her zaman 1'den büyük ve pozitif bir sayıdır. Yansımaya katsayısı -10 dB'nin altına indikçe karşılık gelen VSWR değeri de 1'e yaklaşır.

3.2.4.4. Yönlülük ve kazanç

Bir antenin yönlülüğünün hesaplanabilmesi için, azami ışıma şiddetinin, yönsüz (izotropik) antenin ışıma şiddetine olan oranı ölçüt olarak belirlenip hesaplama yaparken kullanılmaktadır. Hesaplama yapılırken yönsüz antenin ışıma şiddeti, ışıyan gücün 4π 'ye bölünmesiyle hesaplanır ve aynı zamanda yönlülük değeri antenler için her daim 1'den büyük olmalıdır. Kazancın hesaplanması ise bir antenin verimliliği ile yönlülüğün çarpımı yardımıyla belirlenmektedir (Ahmad, 2008).

3.2.4.5. Anten verimliliği

Anten parametreleri arasında verim de yer almaktadır ve antenler için verim bu antenlerin elektromanyetik dalgaya dönüştürdüğü güçlerinin, antene giren güçlerine oranı olarak verilmektedir. Antenlerin verimliliğini etkileyen birbirinden farklı birçok faktör bulunmaktadır ve bu faktörler arasında dielektrik kaybı, iletim kaybı, yansımaya kaybı, polarizasyon kaybı ve herhangi bir yükte dağılan güç vb. olarak sıralanabilmektedir.

3.2.4.6. Işıma örüntüsü

Işıma örüntüsü önemli olan bir diğer parametre değeridir ve temelde bir anten yapısının yer aldığı uzaysal koordinatlara bağlı olan fonksiyonu o antenin ışıma yeteneğinin potansiyeline bağlıdır. Genellikle, ışıma örüntüsü bir anten için uzak alan için yönlü

koordinatlara bağlı fonksiyonun gösterimidir ve o antenin ışıma yeteneği, güç akış yoğunluğu, alan g, yönlülük vb. barındırmaktadır. Antenlerde ışıma yetenekleri genellikle iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) olarak verilmektedir (Yang vd., 2005).



4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Mikroşerit Anten Tasarımları

Mikroşerit anten tasarımları için spektrum tahsisi önemli bir konudur (Gündoğdu ve Ertay, 2021). 5N teknolojilerin aktif olarak kullanılması için spektrum tahsisi oldukça önemli ve dikkat edilmesi gereken bir konudur çünkü bu teknolojilerin ihtiyaç duyduğu gereklilikler ve elektromanyetik özellikler için spektrum tahsisi önemli bir etken oluşturmaktadır. Bu gereksinimler dikkate alındığında ise 5N teknolojiler için 6GHz bir frekans sınırı olarak kabul edilmiştir ve farklı ülkelerde 6 GHz altı ve 6 GHz üstü birçok farklı frekans bandı 5N haberleşme sistemleri için tanımlanmıştır (Huang, 2018).

Mikroşerit anten tasarımlarında dikkate alınması gereken performans kriterleri içerisinde yer alan bant genişliği, kazanç, geri dönüş kaybı ve duran dalga oranı vb. değerler tasarım adımlarına göre farklılık göstermektedir. Tasarımlarda farklılık gösteren bu parametre değerlerinin değiştirilmesi ve istenilen seviyeye getirilmesi için birçok farklı yöntem literatürde yer almaktadır. Bu yöntemler içerisinde yer alan yama tekniği ise son yıllarda Beşinci Nesil sistemlerin ihtiyaçların karşılanabilmesi için mikroşerit anten tasarımlarında sıkça başvurulan bir metot olarak yerini almaktadır. Mikroşerit anten tasarımlarında yama tekniği üç farklı şekilde uygulanabilmektedir ve aşağıda bu yöntemler belirtilmiştir.

- Toprak zemin üzerinde yapılan değişiklikler
- Işıma yüzeyinde yapılan değişiklikler
- Hem toprak hem ışıma yüzeyinde yapılan değişiklikler

Bu bölümde 6 GHz üstü ve 6 GHz altı frekans bantlarında tasarımı yapılacak milimetre boyutlarda olan mikroşerit antenlerin parametre değerleri yama tekniği doğrultusunda gerçekleştirilecektir. Anten tasarım adımları gerçekleştirildikten sonra anten basamakları arasındaki farklar incelenmeye çalışılacaktır.

4.1.1. 6 GHz altı frekanslarda çalışan mikroşerit anten tasarımları

5N haberleşme sistemleri için Dünyanın birçok ülkesinde farklı frekans bantları bu teknolojiler için tahsis edilmektedir. Avrupa ülkelerinde özellikle kullanılması

hedeflenen frekans bantlarından birkaçı ise 2-3 GHz arası frekans bantları ve 3,3-4,2 GHz arası bantlardır (Gündoğdu ve Ertay, 2021). Bu bölümde 3,5 GHz merkez frekansına sahip 5N kablosuz haberleşme sistemlerine yönelik mikroşerit yama anten tasarımları sunulacaktır. Antenlere ait tasarım adımları ve parametre değerleri ise yine bu bölümde açıklanacaktır (Gündoğdu ve Ertay, 2021).

4.1.1.1. Parazitik yamalı dikdörtgen çerçeveli anten tasarımı

Bu bölümde 5N uygulamalar için n40 ve n41 frekans bantlarını kapsayacak şekilde 3,5 GHz frekansında çalışan bir mikroşerit yama anten tasarımı ele alınmış olup tasarım sonucunda ise 4,74 dB kazanç ve 0,35 GHz empedans bant genişliği değerlerine ulaşılmıştır. Anten tasarımı üç adımda gerçekleştirilmiş ve tasarımı yapılan antenin ilk aşamasında yer alan dikdörtgen bir çerçeve içerisinde çeşitli yama geometrileri değiştirilerek yeni yamalar eklenerek diğer tasarım adımları elde edilmiştir.

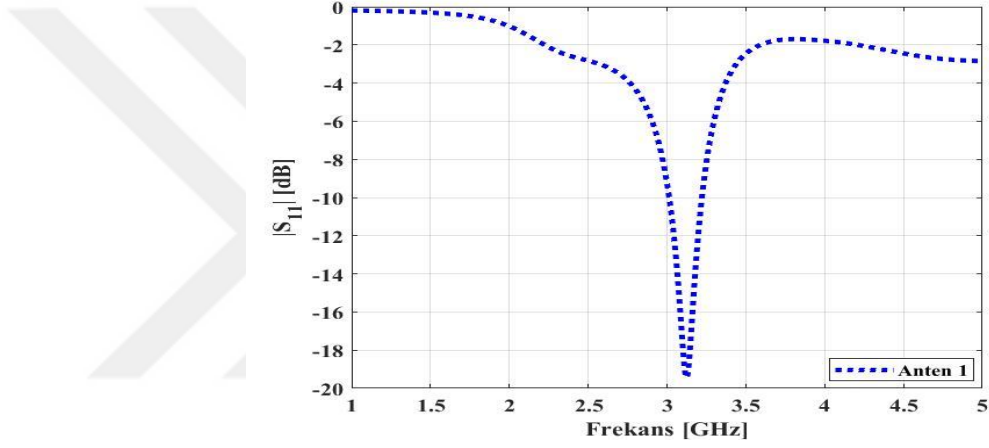
Anten tasarımında 4.bölümde bahsedilen dikdörtgen mikroşerit anten tasarım formülleri kullanılarak 3,5 GHz merkez frekansına sahip mikroşerit yama anten tasarımı yapılmıştır. 3,5 GHz dikdörtgen mikroşerit anten için dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4,3$ ve yüksekliği 1,6 mm olan FR4 malzeme tasarım adımlarının tamamında kullanılmıştır. FR4 dielektrik malzemesi düşük kayıp faktörü $\tan\delta = 0,025$ ve düşük dielektrik sabitine ($\epsilon_r = 4,3$) sahiptir ve mikroşerit anten tasarımları için uygun maliyetle olması nedeniyle sıkça tercih edilmektedir. Anten tasarım adımları sonucunda yama tekniğinin anten performans parametrelerinden olan $|S_{11}|$ -dB, bant genişliği, duran dalga oranı ve anten kazancı üzerindeki etkileri incelenecektir. Mikroşerit anten tasarımında çeşitli yamalar kullanılabilir ve bu çalışma içerisinde parametre değerleri, anten tasarım adımlarının sonuçları doğrultusunda karşılaştırılacaktır. Tasarım adımları CST Microwave Studio'da gerçekleştirilmiştir.

4.1.1.1.1. Anten 1 tasarımı

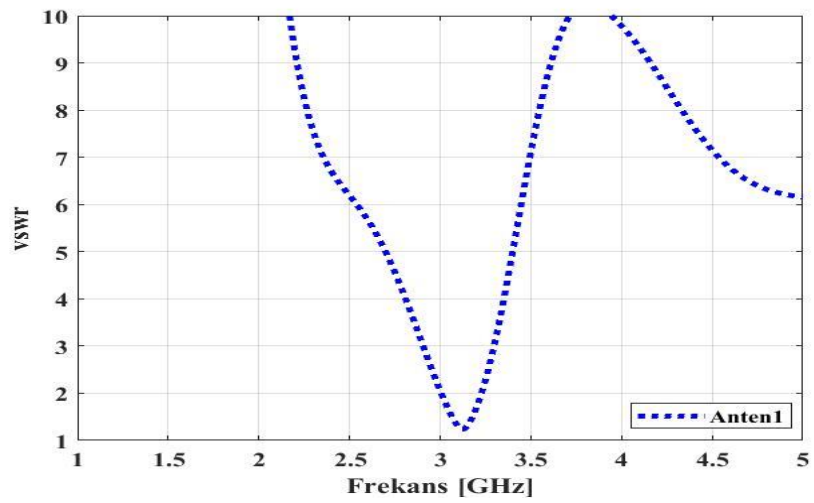
Tasarımın ilk adımı olan Anten 1 adımı ana hedef olarak geniş bant aralığına sahip bir mikroşerit yama anten tasarımları belirlenmiş ve belirlenen ana amacın yanı sıra ilgilenilen frekanslar için daha düşük seviyede $|S_{11}|$ -dB ve daha yüksek kazanç elde etmek de hedefler arasında yer almıştır. Tasarımı yapılmak istenen mikroşerit antenin

Tablo 4.1 Anten 1'e ait anten parametre değerleri

Parametre	W	Lg	W1	W2	R
Değer(mm)	36-40	40	12	14	6,5
Parametre	Wg	Lg	L1	L2	d
Değer(mm)	36	20	5,5	2,5	8

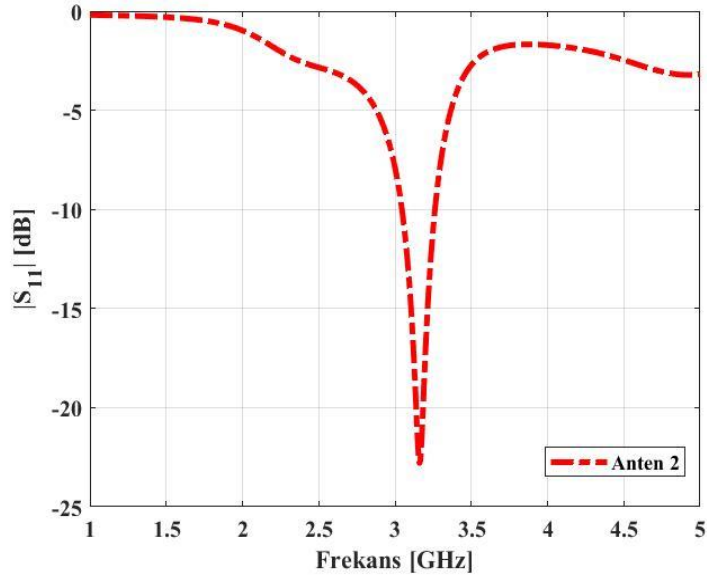


Şekil 4.2 Anten 1'e ait $|S_{11}|$ grafiği

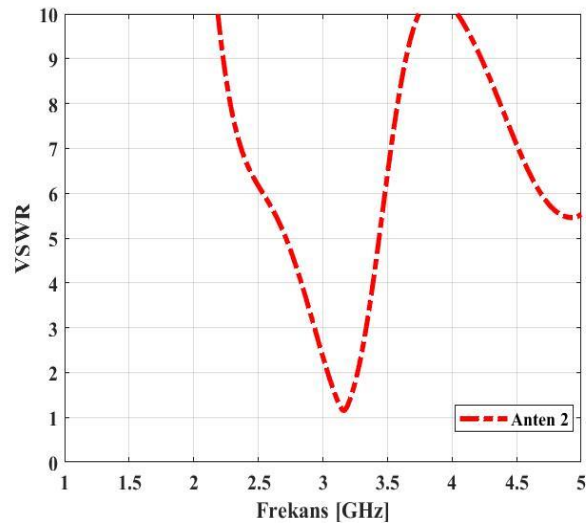


Şekil 4.3 Anten 1'e ait VSWR grafiği

ise 1,16 olarak bulunmuştur. Ayrıca VSWR değeri antenin çalıştığı bant genişliği için 2'nin altında olmaktadır.



Şekil 4.5 Anten 2'e ait $|S_{11}|$ grafiği

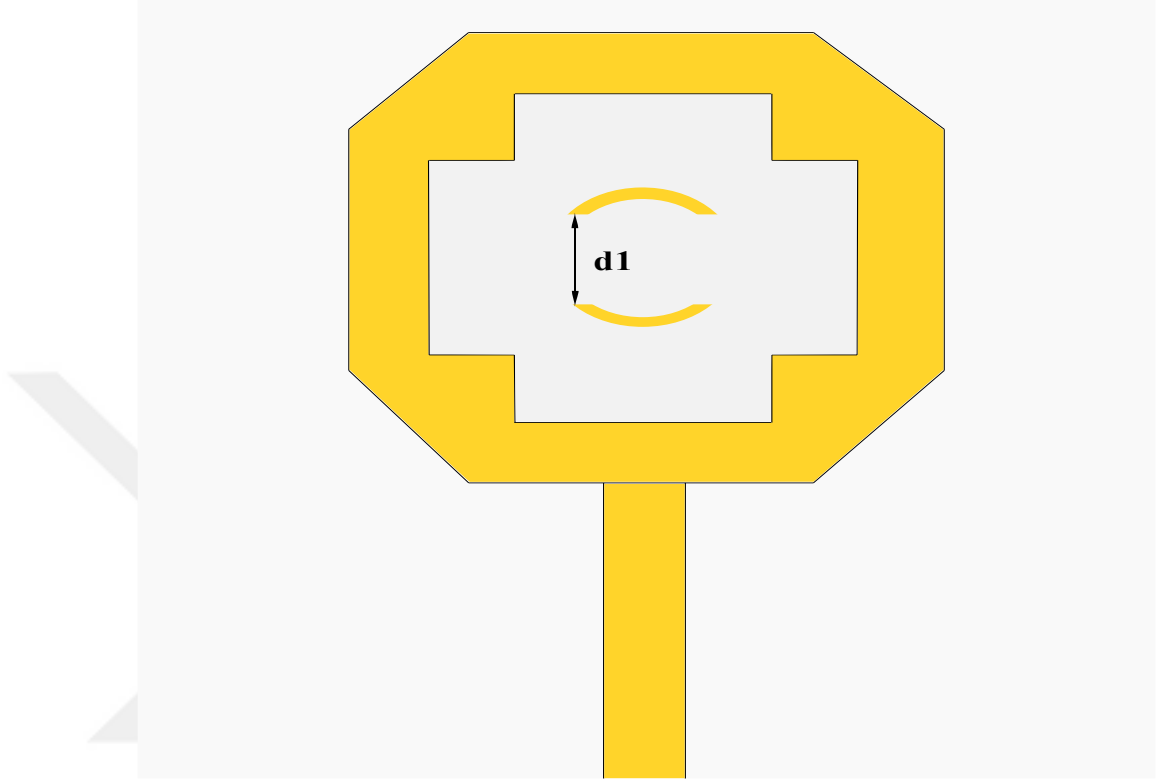


Şekil 4.6 Anten 2'ye ait VSWR grafiği

4.1.1.1.3. Anten 3 tasarımı

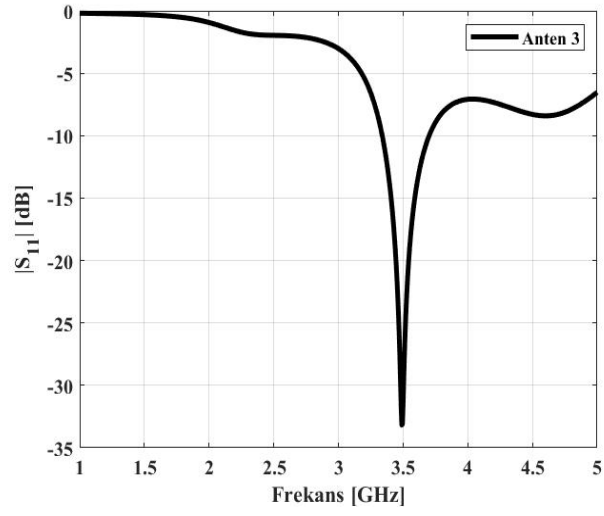
Tasarım adımlarının sonuncusu olan Anten 3 tasarımında yine ikinci adımda olduğu gibi ana çerçeve korunarak $d_1 = 9$ mm uzunluğunda dikdörtgen geometrik bir yamanın bu

çerçeve içerisine yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Anten tasarımının toprak zemininde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Anten 3'te de FR4 dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Şekil 4.7'de Anten 3'e ait tasarım geometrisi verilmiştir.

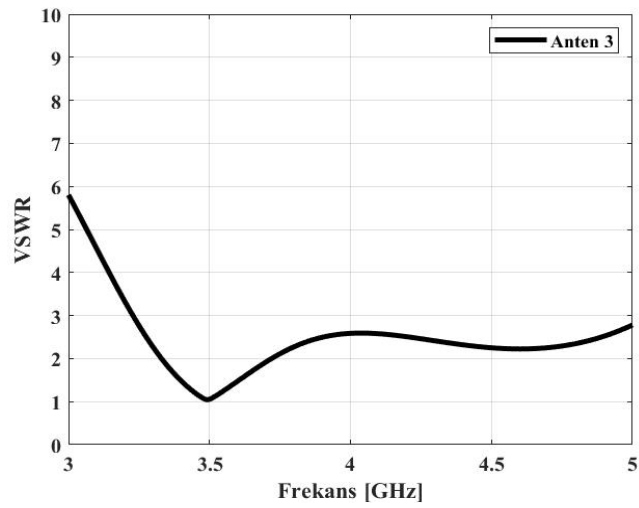


Şekil 4.7 Anten 3'e ait tasarım geometrisi

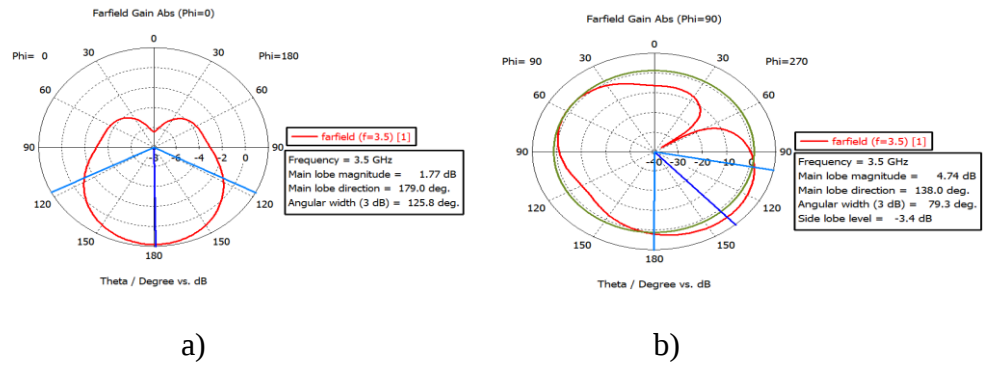
Anten 3'e ait $|S_{11}|$ -dB frekans karakteristiği Şekil 4.8'de verilmiştir ve Antenin çalışma frekansının 3,5 GHz olduğu görülmektedir. Antenin $|S_{11}|$ -dB'nin -10dB seviyesi için empedans bant genişliğinin 3,33-3,70 GHz arasında ve toplamda 0,37 GHz olduğu gözlemlenmiştir. Antenin 3,5 GHz'de kazancı 4,74dB olarak bulunmuştur. Anten 3'e ait VSWR grafiği Şekil 4.9'da verilmiş ve 3,5 GHz'deki değeri ise 1,05 olarak bulunmuştur. Ayrıca VSWR değeri antenin çalıştığı bant genişliği için 2'nin altında olmaktadır. 3,5 GHz merkez frekansına sahip Anten 3 tasarımının iki boyutlu XZ ve YZ düzlemi ışıma örüntüleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir, XZ ve YZ düzleminde ana kulakçık yönelimlerinin sırasıyla 179° ve 138° 'lerde maksimum oldukları görülmektedir. Anten 3'e ait üç boyutlu ışıma örüntüsü ve 3,5 GHz'deki yüzey akım dağılımı ise sırasıyla Şekil 4.11a)'da ve b)'de verilmektedir. 3,5 GHz'de akımın yöneliminin daha çok besleme noktasına yakın olan yerlerde olduğu gözlemlenmiştir.



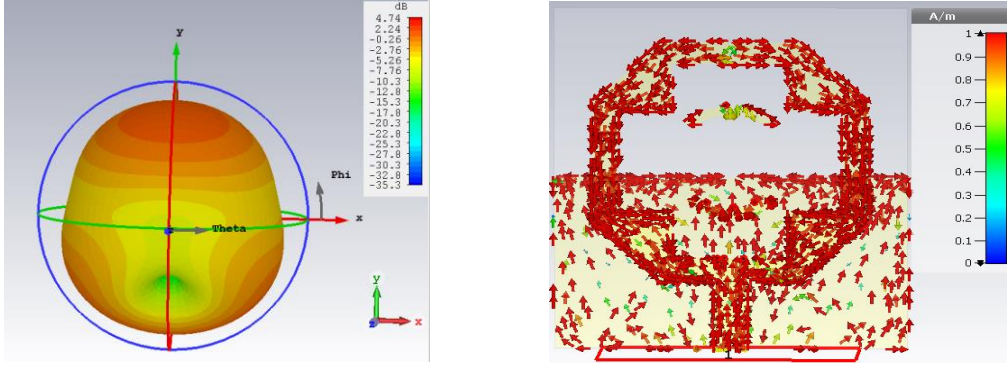
Şekil 4.8 Anten 3'e ait $|S_{11}|$ grafiği



Şekil 4.9 Anten 3'e ait VSWR grafiği



Şekil 4.10 Anten 3'e ait a) XZ ve b) YZ ışıma örüntüsü



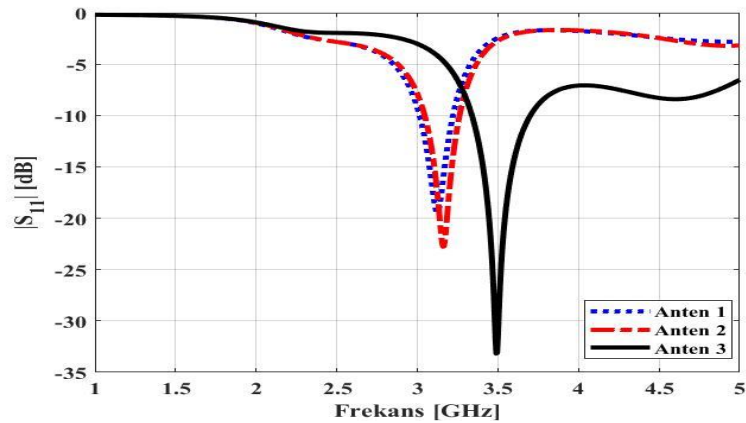
a)

b)

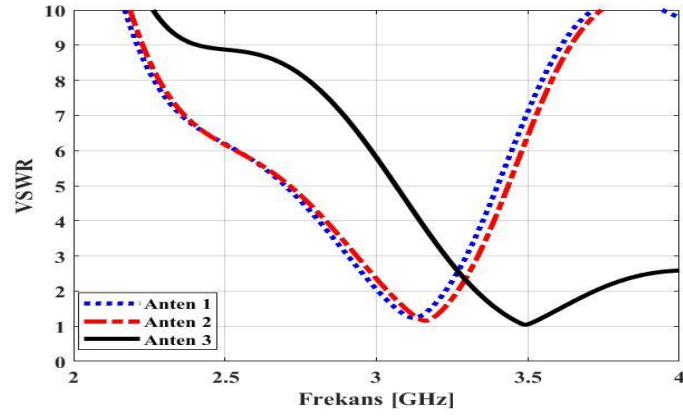
Şekil 4. 11 Anten 3'e ait 3,5 GHz'deki a) ışıma örüntüsü ve b) akım yoğunluğu

4.1.1.1.4. Anten performanslarının karşılaştırılması

Yapılan tüm anten tasarımlarına ait $|S_{11}|$ sonuçları Şekil 4.12'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Antenler arasında istenilen çalışma frekansı 3,5 GHz'in yakalandığı tasarımın Anten 3 olduğu görülmektedir. Anten tasarımlarının bant genişlikleri değerlendirildiğinde Anten 3 tasarımı daha iyi sonuç vermekte ve VSWR değeri içinde bu sonuç benzerlik göstermektedir. Anten tasarımlarına ait VSWR grafiği ise Şekil 4.13'te görüldüğü gibi elde edilmiştir. Antenlere ait karşılaştırma tablosu ise Tablo 4.2'de verilmiştir. Antenler kazanç için Anten 1 ile aynı değerde Anten 2'den ise daha iyi bir sonuç vermektedir. Yine Anten 3'ün hem bant genişliği hem de $|S_{11}|$ dB değerleri için karşılaştırılacak olursa diğer antenlerden daha iyi performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12 Tüm anten tasarımlarına ait $|S_{11}|$ grafiği



Şekil 4.13 Anten tasarımlarına ait VSWR grafiği

Tablo 4.2 Anten değerlerinin karşılaştırılması

	Boyut (mm ²)	S ₁₁ -dB, Merkez Frekansı için	VSWR, Merkez Frekansı için	Kazanç (dB) 3,5 GHz	B.G.(GHz) Merkez Frekansı için
Anten 1	36×40	-19,44	1,24	4,74	0.21
Anten 2	36×40	-22,8	1,16	4,36	0.22
Anten 3	36×40	-33,13	1,04	4,74	0,37

4.1.2. 6 GHz üstü frekanslarda çalışan mikroşerit anten tasarımları

5N haberleşme sistemleri için dünyanın birçok ülkesinde farklı frekans bantları bu teknolojiler için tahsis edilmektedir Avrupa ülkelerinde özellikle kullanılması hedeflenen frekans bantlarından birkaçı ise 26,5-29,5 GHz arası frekans bantlarıdır (everythingrf, 2023). Bu bölümde 28 GHz merkez frekanslarına sahip 5N kablosuz haberleşme sistemlerine yönelik mikroşerit yama anten tasarımları sunulacaktır. Antenlere ait tasarım adımları ve parametre değerleri ise yine bu bölümde açıklanacaktır.

4.1.2.1. 28 GHz'de çalışan geniş bant mikroşerit yama anten tasarımı

Anten yapılarının 5N kablosuz haberleşme sistemlerine entegre edilmesi için yapılan çalışmalarda farklı birçok ülke çeşitli frekans bantlarını bu sistemler için tahsis etmeyi

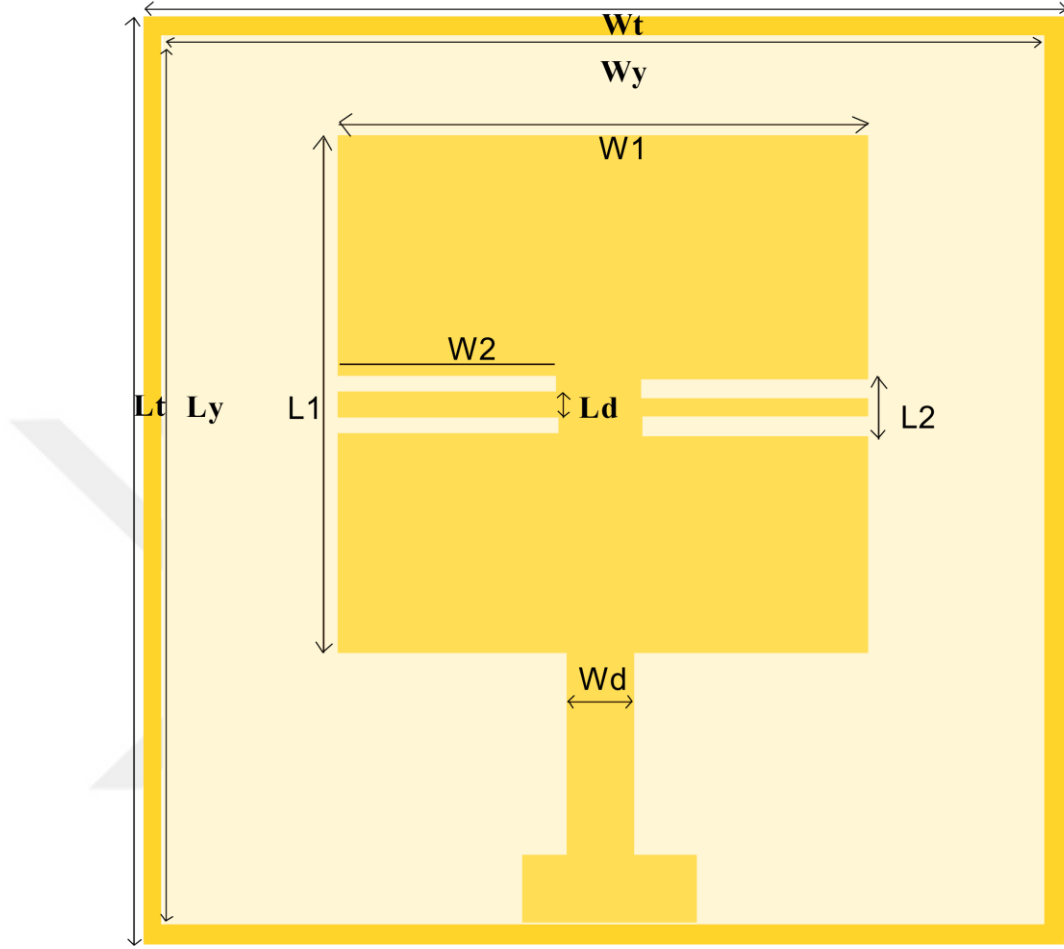
planlanmaktadır. 5N teknolojiler için birçok farklı frekans bant grubu çalışma frekansı olarak kabul görmekte ve bu frekanslara yönelik birçok tasarım ise literatürde yer almaktadır. Bu gruplandırma içerisinde 6 GHz üstü (28, 60 GHz gibi) birçok farklı frekans bandı yer almaktadır (Gündoğdu ve Ertay, 2022). Aktif olarak hayatımızda yer alan yeni anten tasarımlarının da 6 GHz sınır frekansından daha yüksek frekans bantlarında da çalışacağı öngörülmektedir. Daha yüksek bant genişliği elde etmek ve daha küçük yapıda bir anten tasarımı gerçekleştirmek ise anten tasarımlarında karşılaşılan zorluklar arasında oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada daha yüksek bir kazanç ve geniş bir bant aralığı için tasarlanan antenler amaç olarak belirlenmiş ve çalışmanın sonucunda bu özelliklere sahip bir mikroşerit yama anten tasarımı yapılması hedeflenmiştir. Anten tasarımı üç adımda gerçekleştirilmiş olup anten adımlarına ait sonuçlar ise bu bölümde değerlendirilecektir.

4.1.2.1.1. Anten 1 tasarımı

Dikdörtgen geometriye sahip mikroşerit antenler literatürde sıkça kullanılmaktadır ve literatürde yer alan birçok farklı anten tasarımları incelendiğinde klasik bir mikroşerit yama antenin üzerine çeşitli geometrilerde yamalar eklenerek bant genişliğinin artırılması sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin kullanılması ile hedeflenen anten tasarımı için ilk adımda dikdörtgen geometriye sahip bir anten tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan antene ait geometrinin ön ve arka yüzeyi Şekil 4.14'te Anten 1 ismi ile verilmiştir.

Anten tasarımında 4,3 dielektrik sabiti olan ve 0,025 kayıp tanjantına sahip FR4 dielektrik malzeme 0,5 mm yüksekliğinde kullanılmıştır. Benzetim ortamında besleme ucu dalga kılavuzu kapısı olarak 50Ω 'a uygun olacak şekilde seçilmiştir. Tasarlanan antenin taban iletkeni boyutları $7 \times 7 \text{ mm}^2$ olacak şekilde seçilmiş ve üstüne ise $5,8 \times 5,8 \text{ mm}^2$ boyutlarında yama eklenmiştir. Bu antene ait parametre değerleri Tablo 4.3'te verilmektedir. Anten 1'e ait $|S_{11}|$ -dB frekans karakteristiği Şekil 5.15'te verilmiştir ve Anten 1'in 26 GHz'de çalışma frekansına sahip olduğu görülmektedir ve bu frekansta $|S_{11}|$ -dB -12dB seviyelerindedir. Şekil 4.15 incelendiğinde antenin $|S_{11}|$ -dB'nin -10dB seviyesi için empedans bant genişliği 25,46 GHz-26,58 GHz arasında ve toplamda 1,12 GHz olarak gözlemlenmiştir. Antenin 28 GHz'de kazancı 3,06 dB olarak bulunmuştur.

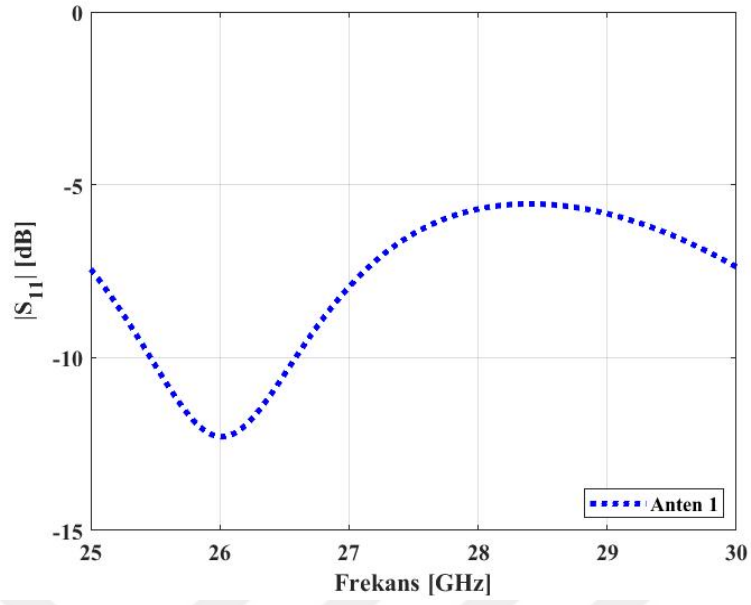
Anten 1'e ait VSWR grafiği Şekil 4.16'da verilmiş ve 28 GHz'deki değeri ise 3,1 olarak bulunmuştur.



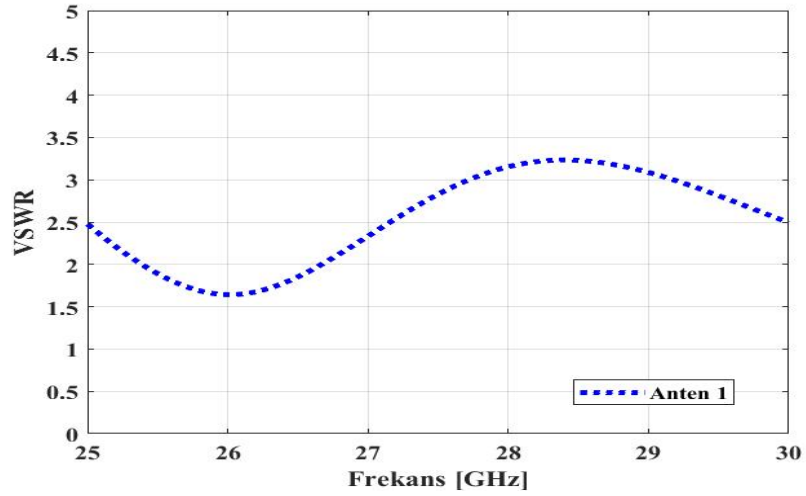
Şekil 4.14 Anten 1'e ait tasarım geometrisi

Tablo 4.3 Anten 1'e ait anten parametre değeri

Parametre	Değer (mm)
Wt-Lt	7-7
Wy-Ly	5,8-5,8
W1-L1	3,5-3,7
W2-L2	1,05-0,4
Wd-Ld	0,15-0,4



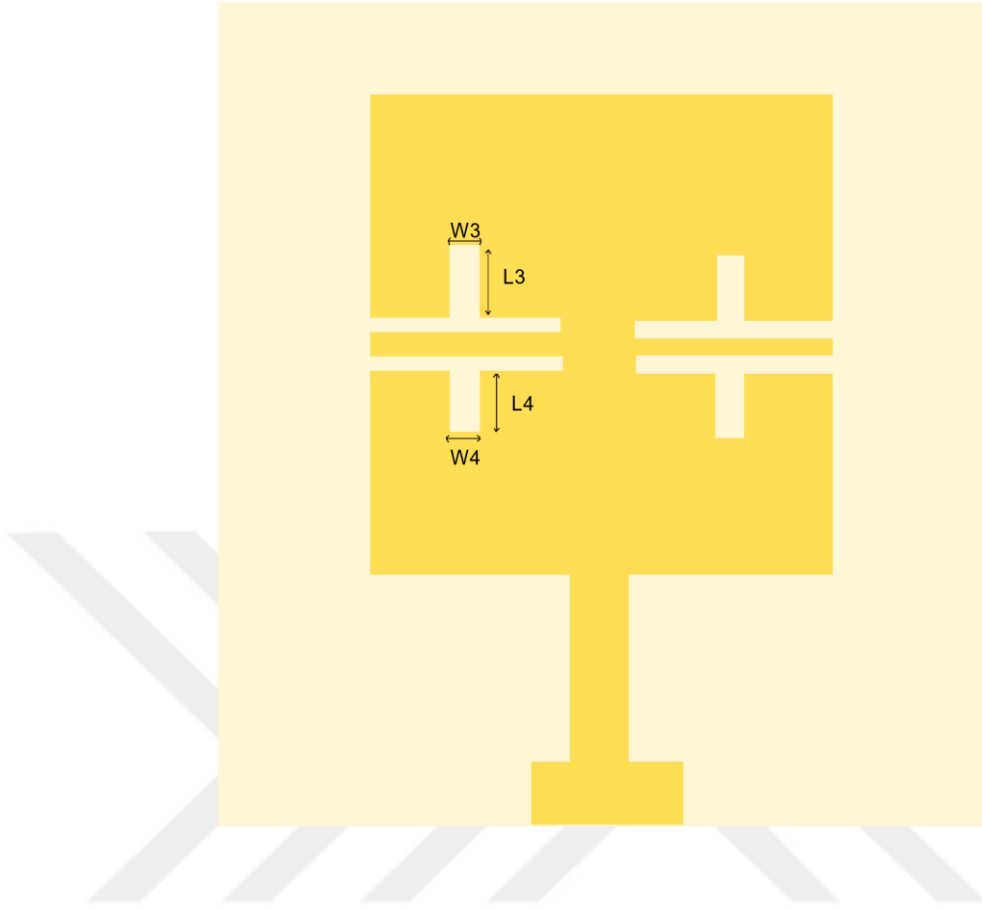
Şekil 4.15 Anten 1'e ait $|S_{11}|$ grafiği



Şekil 4.16 Anten 1'e ait VSWR grafiği

4.1.2.1.2. Anten 2 tasarımı

Anten 1 tasarım adımından sonra ikinci adım olan Anten 2 tasarımına geçilmiş ve Anten 1'in tasarımının ön yüzeyine iki adet $W3 \times L3 \text{ mm}^2$ ve iki adet de $W4 \times L4 \text{ mm}^2$ boyutlarında toplam dört adet dikdörtgen yama eklenerek Anten 2 geometrisi elde edilmiştir. Anten 2'ye ait geometrinin ön ve arka yüzeyleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Bu antenlere ait parametre değerleri Tablo 4.4'te verilmektedir.



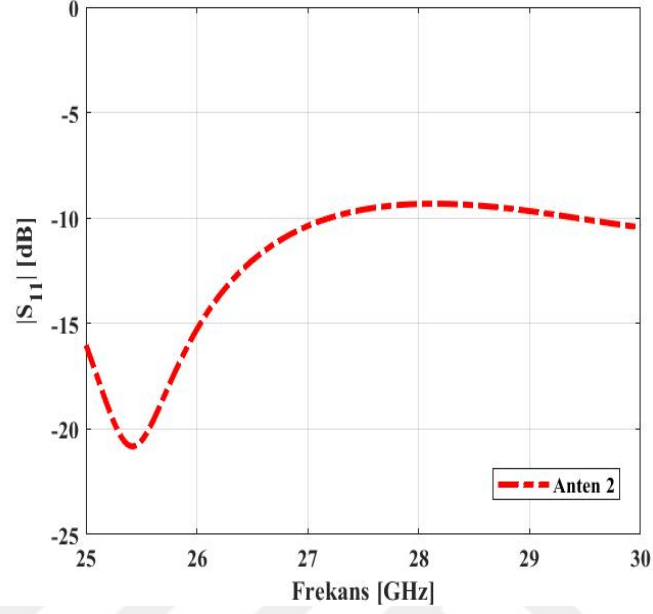
Şekil 4.17 Anten 2'ye ait ön yüz tasarım geometrisi

Tablo 4.4 Anten 2'ye ait anten parametre değerleri

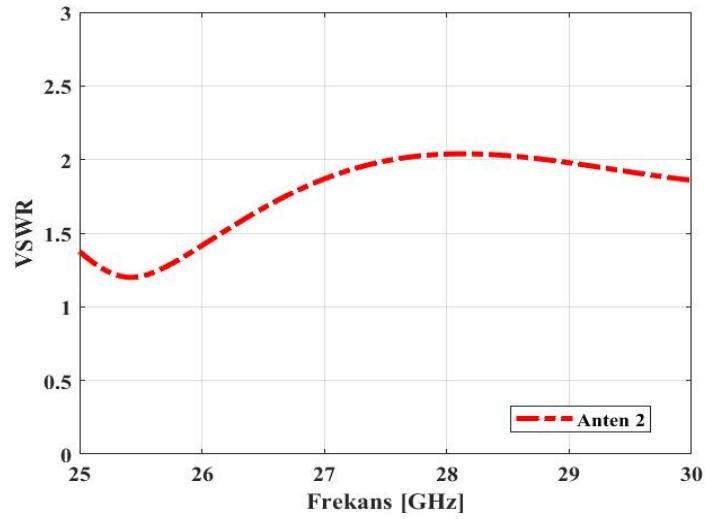
Parametre	Değer (mm)
W3	0,2
L3	0,5
W4	0,2
L4	0,4

Anten 2'ye ait $|S_{11}|$ -dB frekans karakteristiği Şekil 5.18'te verilmiştir ve Anten 2'nin merkez frekansının 25,4 GHz olarak elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.18 incelendiğinde antenin $|S_{11}|$ -dB'nin -10dB seviyesi için empedans bant genişliği 24,1-27,17 GHz arasında ve toplamda 3,07 GHz olarak gözlemlenmiştir. Anten 2'ye ait VSWR

grafiği ise Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Antenin 28 GHz’de kazancı 4,17dB olarak bulunmuştur. Anten 2’in 28 GHz’deki VSWR değeri ise 2,05 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.18 Anten 2’ye ait $|S_{11}|$ grafiği

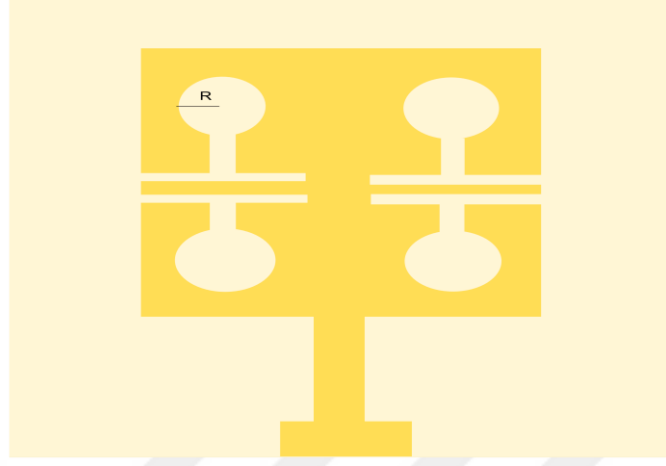


Şekil 4.19 Anten 2’ye ait VSWR grafiği

4.1.2.1.3. Anten 3 tasarımı

Anten 3 boyutları $7 \times 7 \text{ mm}^2$ olacak şekilde diğer antenlerde olduğu gibi korunmuş ve antenin toprak zemini aynı kalmıştır. Antenin ön yüzeyi üzerine R yarıçapında dört adet

yama eklenmiştir. Şekil 4.20’de Anten 3’e ait geometri verilmiş ve parametre değerleri ise Tablo 4.5’te gösterilmiştir.

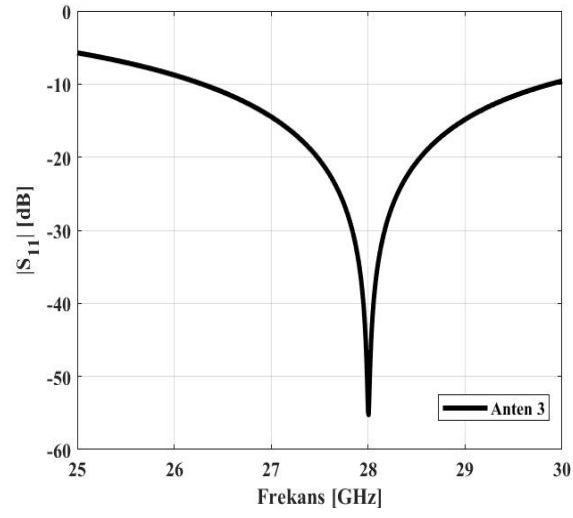


Şekil 4.20 Anten 3’e ait ön yüz tasarım geometrisi

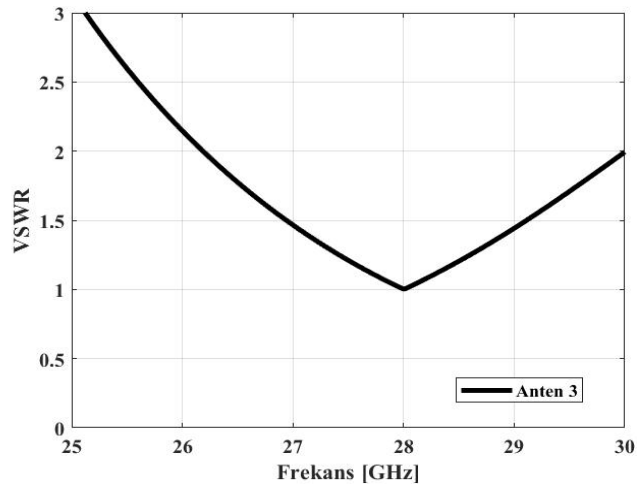
Tablo 4.5 Anten 3’e ait anten parametre değerleri

Parametre	R
Değer (mm)	0,4

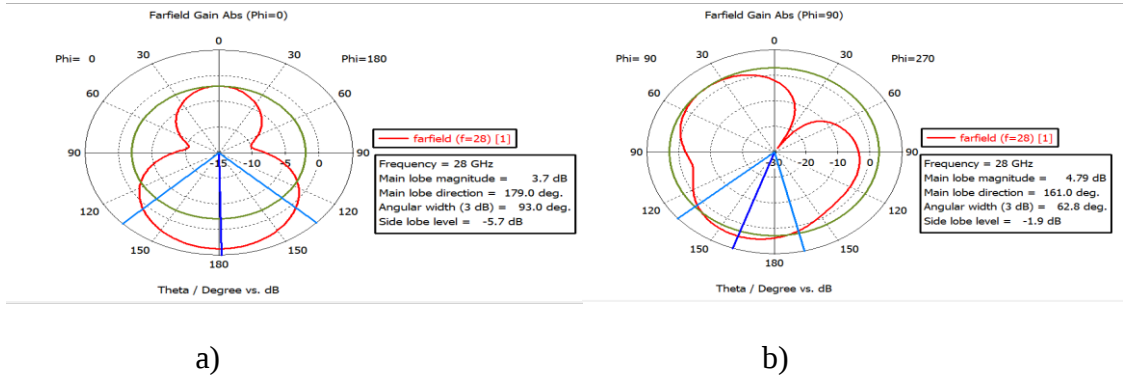
Anten 3’e ait olan $|S_{11}|$ -dB frekans karakteristiği ise Şekil 4.21’de gösterildiği gibi elde edilmiş ve antenin merkez frekansı 28 GHz olarak bulunmuştur. Şekil 4.21 incelendiğinde antenin $|S_{11}|$ -dB’nin -10dB seviyesi için empedans bant genişliği 26,28-29,87 GHz arasında ve toplamda 3,59 GHz olarak gözlemlenmiştir. Antenin 28 GHz’de kazancı 4,17dB olarak bulunmuştur. Anten 3’ün $|S_{11}|$ dB değeri 28 GHz için -55,05 dB’dir. Anten 3’e ait VSWR grafiği ise Şekil 4.22’deki gibi elde edilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi 28 GHz’de VSWR 1.003 olarak bulunmuştur. Anten 3’e ait iki boyutlu XZ ve YZ düzlemi ışıma örüntüleri Şekil 4.23’te verilmiş olup sırasıyla Anten 3 için ana kulakçık yönelimlerinin 179° ve 161° ’lerde maksimum oldukları gözlemlenmiştir. Anten 3’e ait üç boyutlu ışıma örüntüsü ve 28 GHz’deki yüzey akım dağılımı Şekil 4.24’te ve Şekil 4.25’te gösterilmiştir. 28 GHz’de akımın yöneliminin homojen yoğunlaştığı görülmektedir.



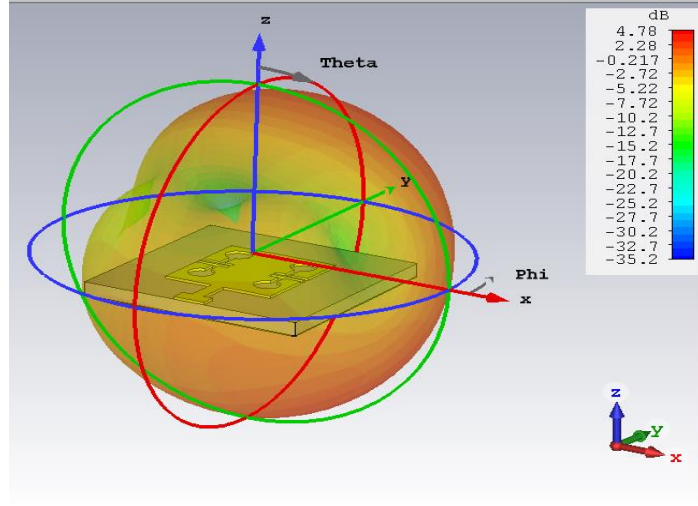
Şekil 4.21 Anten 3'e ait $|S_{11}|$ grafiği



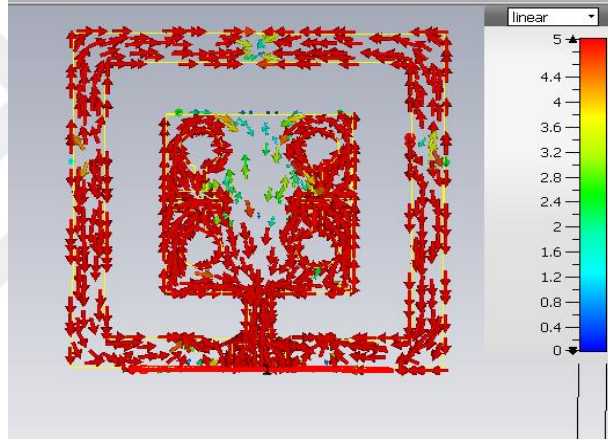
Şekil 4.22 Anten 3'e ait VSWR grafiği



Şekil 4.23 Anten 3'e ait a) XZ ve b) YZ ışıma örüntüsü



Şekil 4.24 Anten 3'e ait ışıma örüntüsü



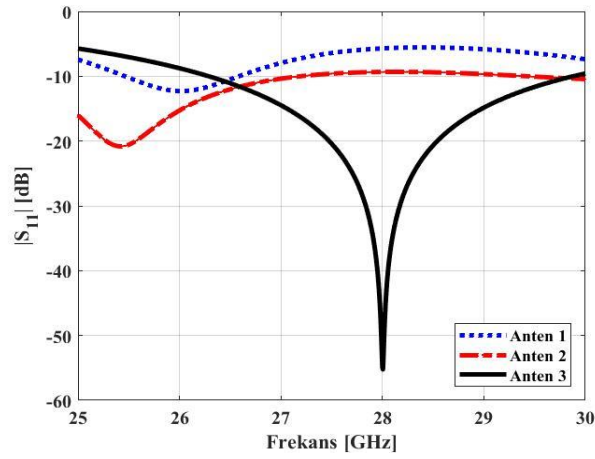
Şekil 4.25 Anten 3'e ait akım yoğunluğu

4.1.2.1.4. Anten performanslarının karşılaştırılması

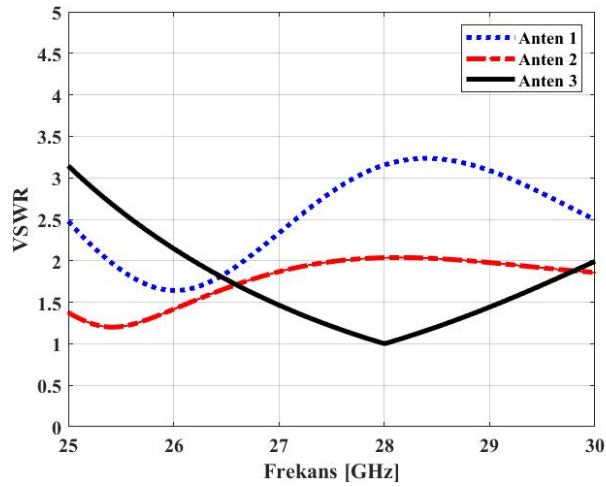
Tüm anten tasarımlarına ait $|S_{11}|$ -dB frekans karakteristikleri Şekil 4.26'da verilmektedir. Antenler arasında istenilen çalışma frekansı 28 GHz'in yakalandığı tasarımın Anten 3 olduğu görülmektedir. Anten tasarımlarının bant genişlikleri değerlendirildiğinde Anten 3 tasarımı daha iyi sonuç vermekte ve VSWR değeri içinde bu sonuç benzerlik göstermektedir. Tüm anten tasarımlarına ait VSWR grafikleri Şekil 4.27'de verilmiştir. Antenlere ait karşılaştırma tablosu Tablo 4.6'da verilmiştir. Antenler kazanç için Anten 1 ile aynı değerde Anten 2'den ise daha iyi bir sonuç vermektedir. Anten 3, hem bant genişliği hem de $|S_{11}|$ -dB değerleri için diğer antenlerden daha iyi performansa sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 4.6 Anten değerlerinin karşılaştırılması

	Boyut (mm ²)	S ₁₁ -dB, Merkez Frekansı için	VSWR, Merkez Frekansı için	Kazanç (dB) 28 GHz	B.G.(GHz) Merkez Frekansı için
Anten 1	7×7	-12,2	1,6	3,06	1,12
Anten 2	7×7	-20,8	1,2	4,17	3,07
Anten 3	7×7	-55,05	1,00	4,78	3,59



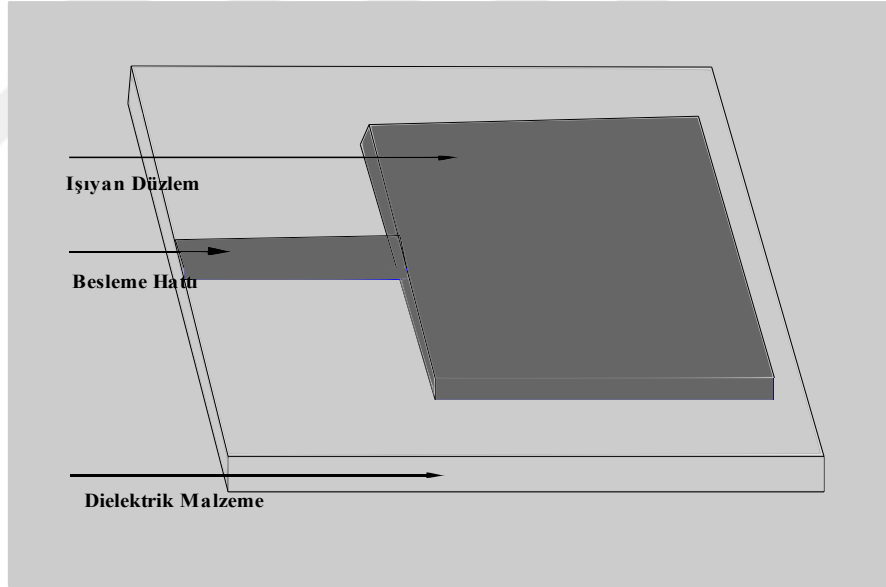
Şekil 4.26 Anten tasarımlarına ait $|S_{11}|$ grafiği



Şekil 4.27 Anten tasarımlarına ait VSWR grafiği

4.2. Çoklu giriş çoklu çıkış antenler

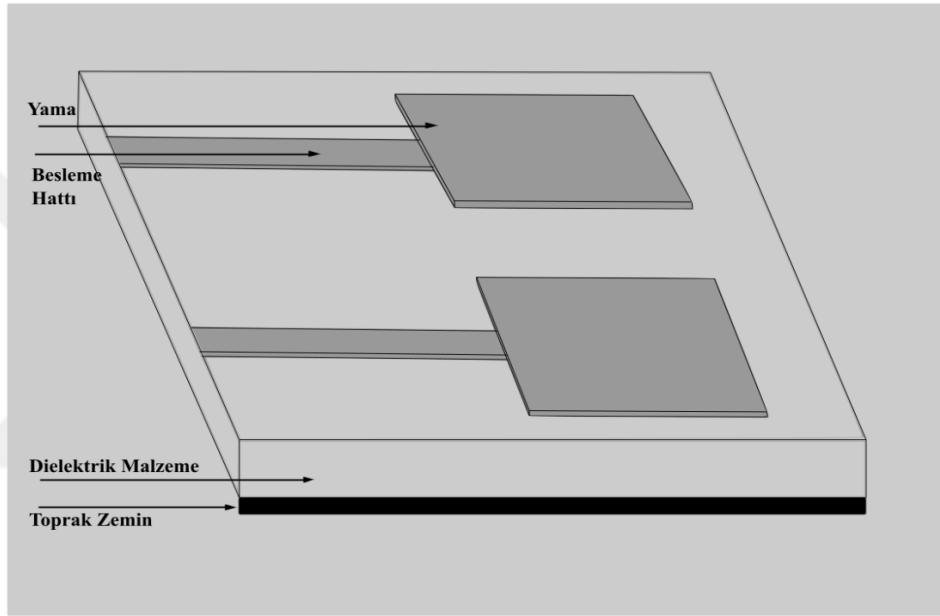
Kablosuz haberleşme sistemlerinin gelişmesiyle birlikte artan kullanıcı sayısına yönelik hızlı hizmet verebilmek ve veri trafiğinin yoğunluğunu çözebilmek için birçok farklı anten türü kullanılmaktadır. Şekil 4.28’de görülen tek kapılı yapılar olan klasik mikroşerit antenlerin bu konuda yetersiz kalmasıyla kullanılmaya başlanan diğer bir anten çeşidi de çoklu giriş çoklu çıkışlı (MIMO) anten yapılarıdır. Haberleşme ağlarında çoklu veri akışı içerisinde iletilmesi gereken veriler, bölünerek iletilmekte ve gönderimden sonra alıcı tarafta gecikme süreleri, gürültü ve parazit miktarları dikkate alınarak yeniden birleştirilmektedir. Klasik mikroşerit antenlerle iletilmesi gereken verinin birden fazla anten yardımıyla, küçük parçalara bölünerek iletilmesi mümkün değildir. Bu nedenle spektrum alanını verimli kullanmak ve aynı anda birden fazla anten tasarımlarıyla farklı verileri tek bir haberleşme kanalında gönderebilmek için MIMO anten yapıları kullanılmaktadır (Krumbein, 2016).



Şekil 4.28 Mikroşerit anten

MIMO antenler, Şekil 4.29’de görüldüğü gibi aynı alttaş düzlemi üzerine yerleştirilmiş ayrı besleme girişlerine sahip olan birden fazla anten yapısı içeren antenlerdir. MIMO antenler karşılıklı iletim yapabilen ve yalıtılmış olarak çalışan, yüksek spektral verim sağlayan tasarımlardır (Bakırlı, 2018).

Kablosuz iletişim sistemlerinde genel olarak baz istasyonu antenleri ile kablosuz terminaller çeşitli yapılar nedeniyle direkt birbirlerini görememektedirler, bu sebeple ortaya bazı sorunlar çıkmaktadır. Bu durumda alıcıya ulaşan işaret, gönderilen işaretin çeşitli yapılardan saçılmış ve her biri farklı zayıflamaya uğramış kopyalarını içermektedir. Bu gibi durumların ortadan kalkması için MIMO yapılar kullanılmaktadır. MIMO yapılar; çoklu anten kullanımıyla birlikte çoklu iletim kanallarıyla yüksek spektral verim sağlamasına ve bu getirilerin yanı sıra ek olarak da çeşitlemeye imkân vermektedir (Bakırlı, 2018).



Şekil 4.29 İki elemanlı mikroşerit MIMO anten

4.2.1. MIMO anten parametreleri

4.2.1.1. S parametreleri

MIMO anten tasarımlarında da mikroşerit antenlerde olduğu gibi dikkate alınması gereken bazı parametre değerleri vardır ve bu parametrelerden biri de S-parametreleridir. S-parametreleri, anten tasarımında empedans uyumunu ve ışıma performansını gösteren önemli etkenlerden biridir. Tasarlanan antenin ideal olması için ideal anten kapılarında geri dönen işaretin olmaması gerekir ve bu durumda antene giren bütün gücün ışıyarak yayılması anlamına gelmektedir. Tek antenin yer aldığı bir sistemde yalnızca $|S_{11}|$ parametresi vardır fakat çoklu giriş çoklu çıkışlı anten yapılarında $|S_{11}|$ değerinin yanı sıra

çoklu anten yapılarının arasındaki izolasyonun bir ölçütü olarak diğer S parametreleri de önem kazanmaktadır. Örneğin iki kapılı bir tasarıma sahip çoklu giriş çoklu çıkışlı antenlerde iki kapı arasındaki etkileşimi ölçmek için $|S_{21}|$ değeri de ölçüm sonuçlarında gösterilmektedir. MIMO anten tasarımlarında ilgilenilen frekans aralıklarında $|S_{11}|$ değerinin -10 dB ve $|S_{21}|$ değerinin ise -20dB seviyesinin altında değer alması istenir.

4.2.1.2. Empedans bant genişliği

MIMO Anten tasarımlarında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer parametre ise S-parametreleri yardımıyla ölçülebilen empedans bant genişliğidir. MIMO anten yapılarında $|S_{11}|$ değerinin -10dB'nin altına düştüğü ilk frekans noktası ile son frekans noktası arasındaki değer olarak ölçülmektedir.

4.2.1.3. Zarf korelasyon katsayısı, ECC

Çoklu giriş çoklu çıkışlı anten yapılarında elemanlar arasındaki mesafeye bağlı olarak ortak bir etkileşim (mutual coupling) oluşmaktadır. Elemanlar arasında oluşan bu etkileşim ise MIMO anten yapılarının kanal kapasitesi ve çeşitlilik performanslarını olumsuz yönde etkilemektedir bu sebeple tasarımda yer alan elemanlar arasında etkileşimin olabildiğince düşük olması hedeflenmektedir. Antenler arasındaki etkileşimin en az seviyede olabilmesi için elemanlar arasındaki mesafenin en az $\lambda/2$ 'den büyük olacak şekilde ayarlanması gerekir (Ma ve Chountalas, 2015).

MIMO anten yapılarında antenler arasındaki etkileşim seviyesinin derecesini gösteren en önemli parametrelerden biri de zarf korelasyon katsayısı (ECC)'dir ve iki elemana sahip MIMO anten yapılarında ECC hesabı eşitlik (6.1) yardımıyla bulunabilir (Balanis, 2013). MIMO anten tasarımlarında bu değer 0,1'den küçük olması beklenir.

$$ECC = \frac{(|S_{ii}^* S_{ji} + S_{ij}^* S_{jj}|^2)}{\left((1 - |S_{ii}|^2 - |S_{ij}|^2) (1 - |S_{ji}|^2 - |S_{jj}|^2) \right)}. \quad (6.1)$$

Eşitlik (6.1)'deki S_{ij} ifadesi S matrisi elemanlarını göstermekte i ve j değerleri ise $i = 1, 2, 3, \dots$ ve $j = 1, 2, 3, \dots$ şeklinde devam etmektedir.

4.2.1.4. Toplam aktif yansıma katsayısı, TARC

Toplam Aktif Yansıma Katsayısı (TARC), N kapılı bir MIMO sistemi için tüm kapılardan geriye dönen işaretlerin gücünün toplamının kapılara verilen işaretlerin toplam gücüne oranı olarak ifade edilir. İki elemana sahip MIMO anten yapılarında TARC hesabı eşitlik (6.2) yardımıyla bulunabilir (Marzudi vd., 2014).

$$TARC = -\sqrt{\frac{|(S_{ii} + S_{ij}e^{j\theta})|^2 + |(S_{jj} + S_{ji}e^{j\theta})|^2}{2}}. \quad (6.2)$$

Eşitlik (6.2)'deki S_{ij} ifadesi S matrisi elemanlarını göstermekte i ve j değerleri ise $i = 1, 2, 3, \dots$ ve $j = 1, 2, 3, \dots$ şeklinde devam etmektedir.

4.2.1.5. Ortalama etkin kazanç (MEG)

MIMO anten tasarımları için önemli bir diğer parametre ise Ortalama Etkin Kazanç (MEG) değeridir ve bu değer çevresel etkiler göz önüne alındığında anten performansının bir ölçütüdür. Saçılma parametrelerine dayalı olarak eşitlik (6.3) kullanılarak hesaplanabilir. İyi performans gösteren bir MIMO anten sistemi için, 5N Milimetre Dalga Uygulamaları için ≤ 3 dB seviyelerinde olmalıdır (Serghiou vd., 2020).

$$MEG_i = 0.5 * (1 - \sum_{j=1}^k |S_{ij}|). \quad (6.3)$$

4.2.1.6. Çeşitlilik kazancı

Çeşitlilik kazancı çoklu girişli çoklu çıkışlı antenin yapılarının özelliklerini incelemek için kullanılan bir diğer parametre Çeşitlilik Kazancı (DG)'dir. DG değerinin kablosuz haberleşme sistemlerde anten yapıları için 10 dB'ye yakın olması beklenmektedir. MIMO sistemler için bir antene ait çeşitlilik kazanç değeri eşitlik (6.4) yardımıyla hesaplanmaktadır (Blanch vd., 2003).

$$DG_{ij} = 10 * \sqrt{1 - (ECC_{ij})^2}. \quad (6.4)$$

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. MIMO anten tasarımları

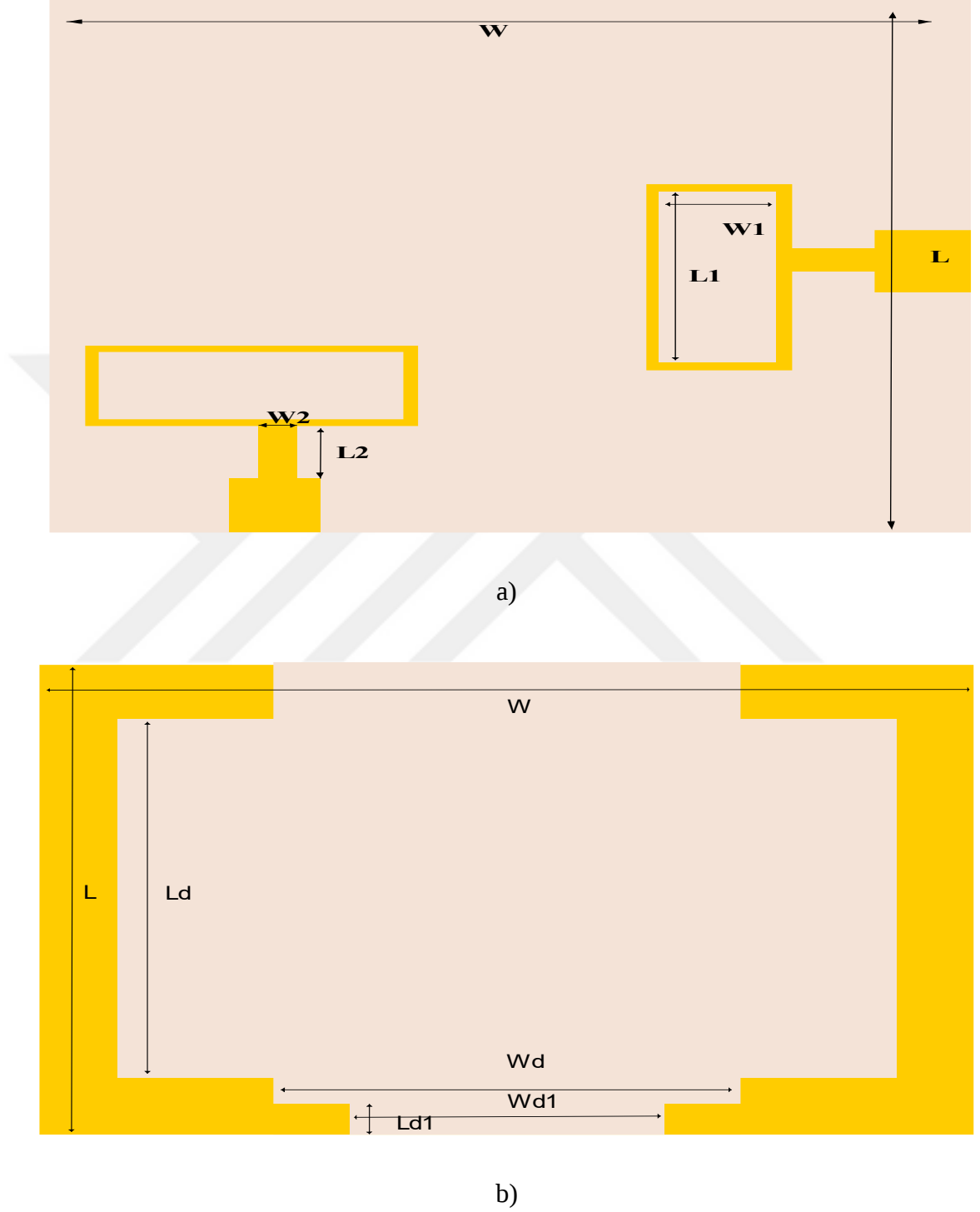
Mikroşerit anten tasarımlarının sahip olduğu dar bant genişliği, düşük kazanç, vb. performans karakteristiklerinin 5N teknolojilerin ihtiyaç duyduğu gereksinimleri karşılamakta oldukça yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle 5N teknolojilere yönelik farklı anten tipleri de literatürde zamanla yer almaya başlamıştır. Günümüz teknolojilerinin ihtiyaç duyduğu temel gereksinimleri ve kullanıcıların isteklerini karşılamak için tercih edilen bir anten tipi de MIMO anten yapılarıdır. MIMO anten tasarımlarında mikroşerit antenlerin sahip olduğu dezavantajları iyileştirmek veya tamamen ortadan kaldırmak için farklı birçok teknik kullanılmaktadır (Gündoğdu ve Ertay 2022). Bu bölümde de 6 GHz altı frekans bantlarında tasarımı yapılacak MIMO antenlerin parametrelerinin yama tekniğine ve kullanılan kapı seçimine göre değişimine değinilecektir. Anten tasarımları gerçekleştirildikten sonra anten adımları arasındaki farklar incelenmeye çalışılacaktır.

5.1.1. Tasarım 1

Bu bölümde 5N haberleşme sistemlerine yönelik görece küçük yapıli geniş bant aralığında çalışan MIMO anten tasarımı sunulmuştur. Tasarlanan bu anten literatürde yer alan diğer antenlere oranla daha küçük boyutlu ve yüksek izolasyona sahiptir. Anten tasarımı 5N teknolojilere uyumlu olması için çalışma frekansı 3,5 GHz olarak belirlenmiş ve CST programı yardımıyla anten tasarım adımları oluşturulmuştur.

MIMO anten tasarımlarında dikdörtgen geometri sıkça kullanılan şekillerden biridir ve literatürde de çokça yer almaktadır. Tasarımı yapılan bu çalışmada da ana geometri olarak birbirine dik iki dikdörtgen anten birbirlerine 90° olacak şekilde bir alttaş üzerine yerleştirilmiş ve böylece antenler arası izolasyon sağlanırken boyut ise küçültülmüştür. Tasarlanan antenin boyutları 30×20 mm²'dir ve anten tasarımı 2,2 dielektrik sabiti olan ve 0,0009 kayıp tanjantına sahip Rogers RT 5580 dielektrik malzeme kullanılmış, dielektrik yüksekliği ise 0,787 mm olarak belirlenmiştir. Anten tasarımının ön ve arka yüzü ise Şekil 5.1'de verilmiştir. Bu antene ait parametre değerleri ise Tablo 5.1'de

paylaşmıştır. Anten'e ait S-Parametreleri CST programı yardımıyla elde edilmiş olup çalışma frekansı 3,5 GHz olarak elde edilmiştir.

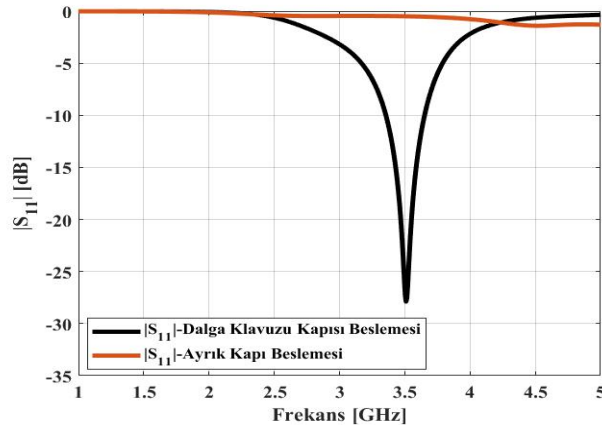


Şekil 5.1 Başlangıç antenine ait tasarım geometrisi a) ön yüz b) arka yüz

Tablo 5.1 Başlangıç antenine ait parametre değerleri

Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
W-W1-W2	30-4-1	Wd-Wd1	18-12
L-L1-L2	20-9,5-3,5	Ld-Ld1	15,4-1,3

Anten tasarımlarında sonuçların elde edilmesinin yanı sıra doğrulanabilir olması da oldukça önemlidir. Yapılan tasarım dalga kılavuzu kapısı ile beslenmiş olup sonuçların karşılaştırılması için ise ayrı kapı beslemesine ait tasarım sonuçları tekrar çizdirilmiştir. Çizimler ise Şekil: 5.2’de gösterilmiştir. Şekil 5.2 incelendiğinde elde edilen sonuçlar arasında tutarsızlık olduğu tespit edilmiştir. Anten tasarımlarında elde edilen sonuçların tutarsızlık nedenlerinden biri ise tanımlanan besleme seçimleridir. Dalga Kılavuzu kapı beslemesi, CST programında antenlerde otomatik olarak oluşturulabilmektedir fakat oluşturulan tasarımda boyutların küçük olması nedeniyle eklenen besleme anten boyutundan taşmalar oluşturduğundan bu durum anten performans karakteristiğinin doğru elde edilmesinde problem oluşturmaktadır.

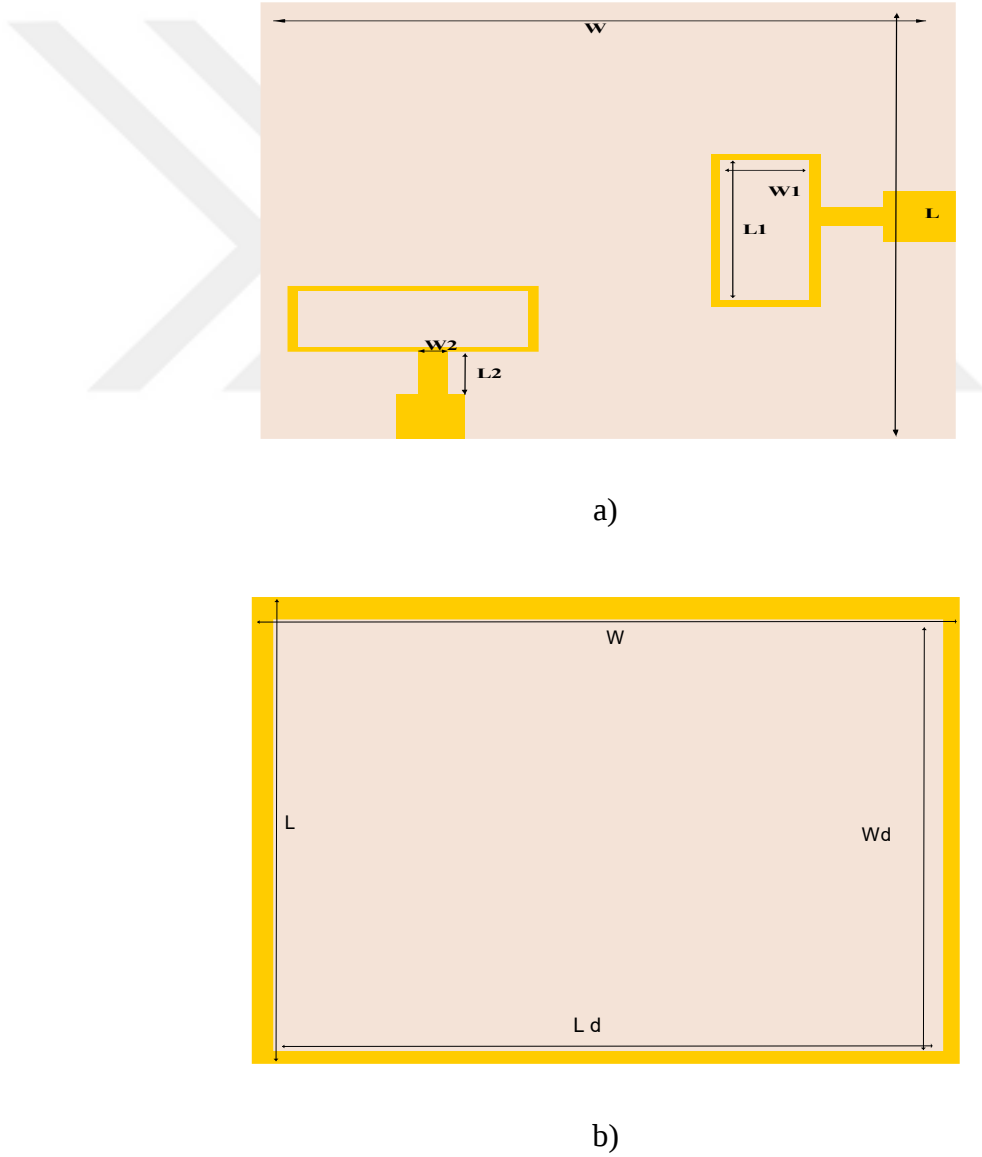
**Şekil 5.2** Başlangıç antenine ait $|S_{11}|$ frekans karakteristiği

Problemin çözümü için besleme yöntemi değişikliği yapılmalıdır fakat yapılan besleme değişiklikleri anten tasarımı üzerinde değişiklikler yapılmasına sebebiyet vermektedir. Anten boyutlarından kaynaklanan dalga kılavuzu kapısı beslemesinin antenin yan

kısımlarından taşmasının önüne geçilmesi için Anten tasarım adımlarında ayırık kapı beslemesi kullanılmıştır. Anten tasarım adımları değişen performans karakteristikleri sebebiyle yeniden oluşturulmuş ve tasarımlarda yama düzenleme tekniği kullanılarak 3,5 GHz’de çalışan ve doğrulanabilir bir anten tasarımı gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

5.1.1.1. Anten 1

Anten 1 tasarımında ön yüzeyi sabit tutularak antenin toprak zemininde değişiklikler yapılarak tasarım adımları oluşturulmaya çalışılmıştır. Anten 1’e ait geometri Şekil 5.3’te gösterilmiş ve parametre değerleri ise Tablo 5.2’de verilmiştir.

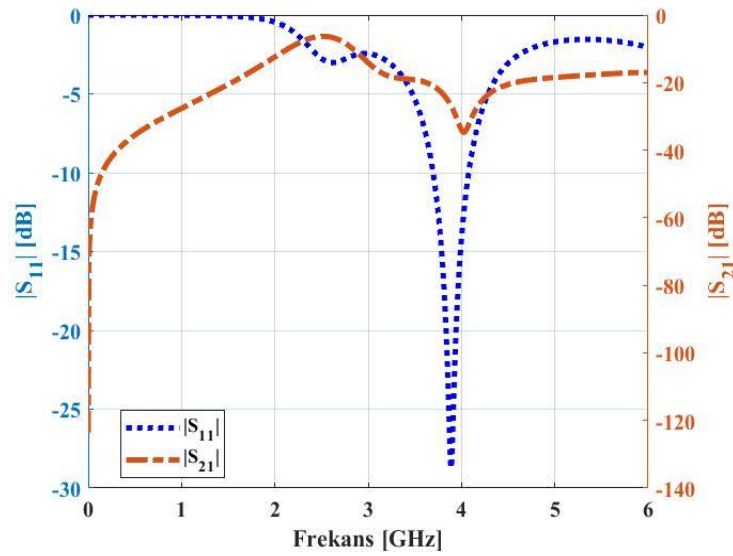


Şekil 5.3 Anten 1’ye ait tasarım geometrisi a) ön yüz ve b) arka yüz

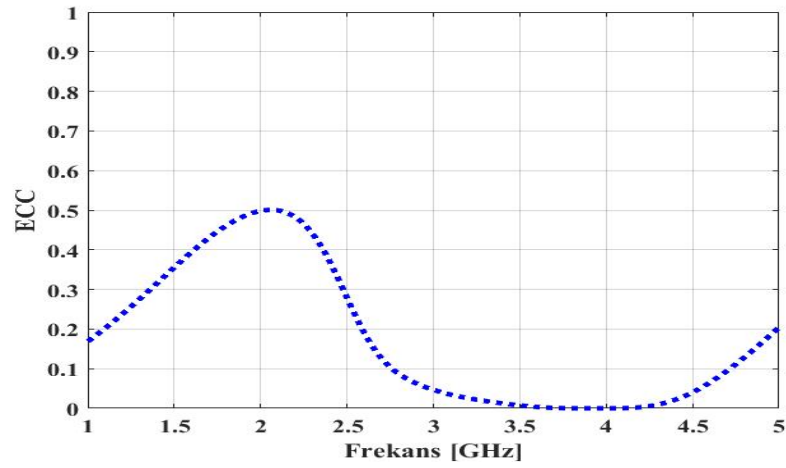
Tablo 5.2 Anten 1'e ait parametre değerleri

Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
W	30	L	20
Wd	27	Ld	17

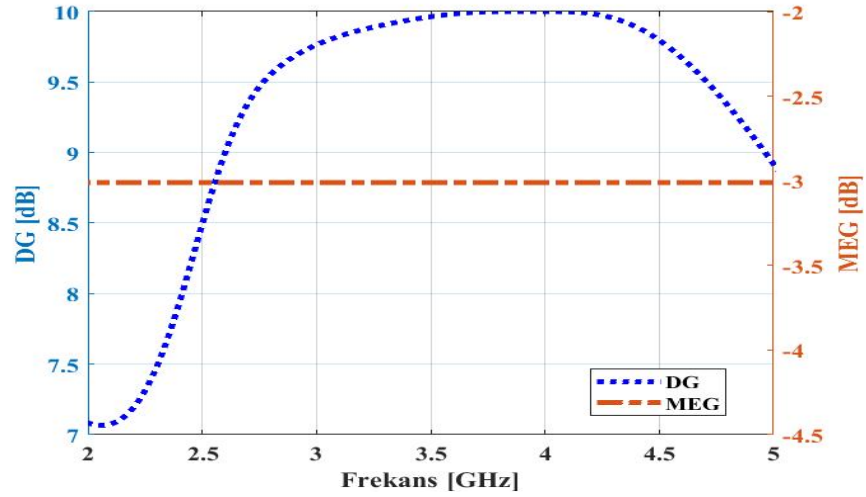
Anten 1'ye ait S-parametreleri frekans karakteristiği Şekil 5.4'te gösterilmiştir ve Anten 1'in 3,8 GHz alışma frekansına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.4 incelendiğinde, antenin $|S_{11}|$ -dB'nin -10dB seviyesi için empedans bant genişliği 3,69-4,07 GHz arasında ve toplamda 0,38 GHz olarak gözlemlenmiştir. Anten 1'in 3,5 GHz'de $|S_{21}|$ -dB değeri ise -19dB olarak bulunmuştur. Bu durumda ilgilenilen frekans aralıkları için izolasyon seviyelerinin -20dB altında olması hedeflenmektedir. Anten 1'in 3,5 GHz'de kazancı ise 4 dB olarak bulunmuştur.

**Şekil 5.4** Anten 1'e ait S-parametreleri grafiği

Anten tasarım adımlarına ait ECC grafiği Şekil 5.5'te gösterilmiş, verilen frekans aralığında 0,3'n altında ve MIMO antenler için uyumludur. Anten tasarımına ait DG, MEG karakteristikleri ise Şekil 5.6'da gösterilmiş olup DG değerlerinin de yine çalışma frekans bölgesinde 10 dB seviyelerinde olduğu grlmekte ve MEG değeri ise 3 dB seviyelerindedir.



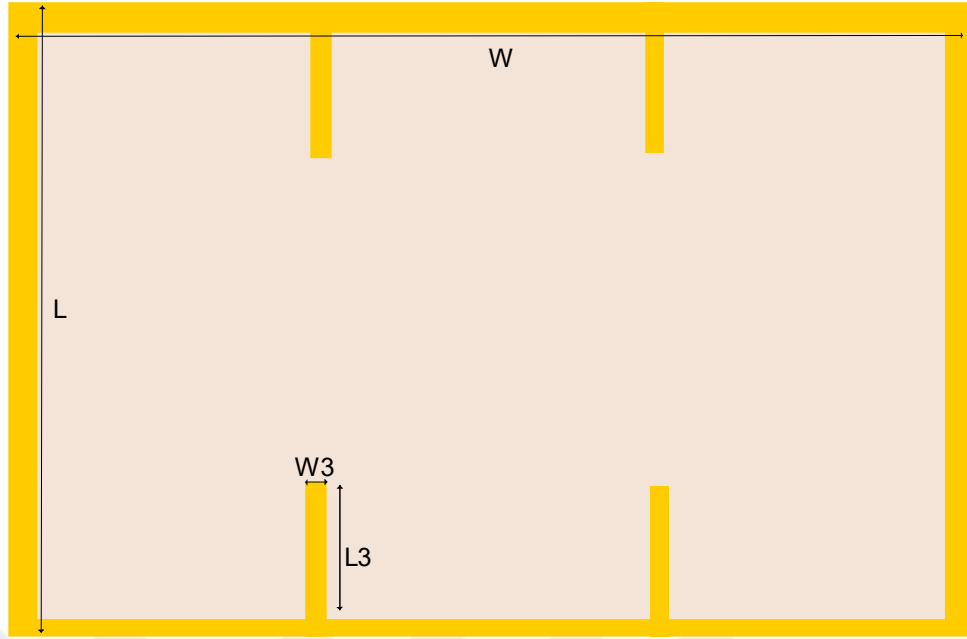
Şekil 5.5 Anten 1'e ait ECC grafiği



Şekil 5.6 Anten 1'e ait DG ve MEG karakteristikleri

5.1.1.2. Anten 2

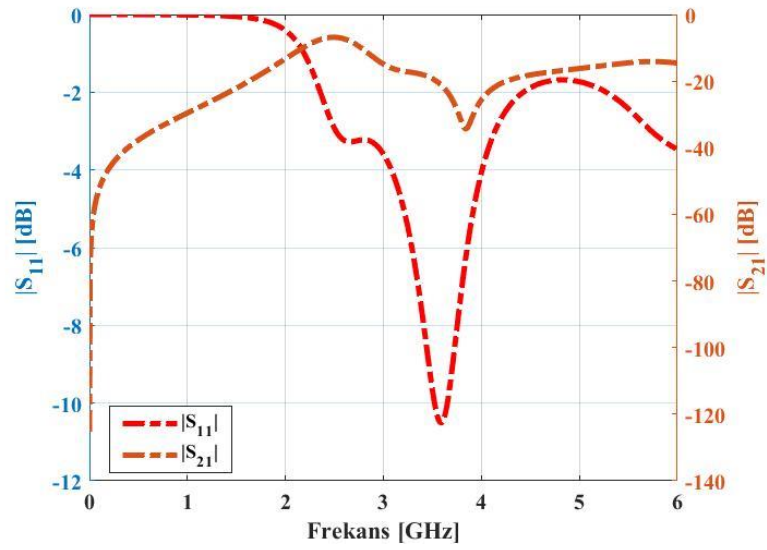
Anten tasarım adımı 2'de Anten 1'in geometrisinin arka yüzeyinde değişiklikler yapılarak Anten 2'ye ait tasarım geometrisi elde edilmiş ve bu tasarım Şekil 5.7'de verilmiştir. Tablo 5.3'te de Anten 2'ye ait eklenen dikdörtgenin parametre değerleri ve S-parametreleri frekans karakteristiği ise Şekil 5.8'de verilmiştir. Anten 2, 3,65 GHz frekansında rezonansa sahiptir ve bu noktadaki kazancı 3,81 dB olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında, $|S_{11}|$ -dB frekans karakteristiği, önceki anten performans karakteristiklerine göre 3,5 GHz'e yaklaştırılmış olup, 3,65 GHz'de -12 dB'ye ulaşan $|S_{11}|$ -dB değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.7 Anten 2'ye ait arka yüzdeki tasarım geometrisi

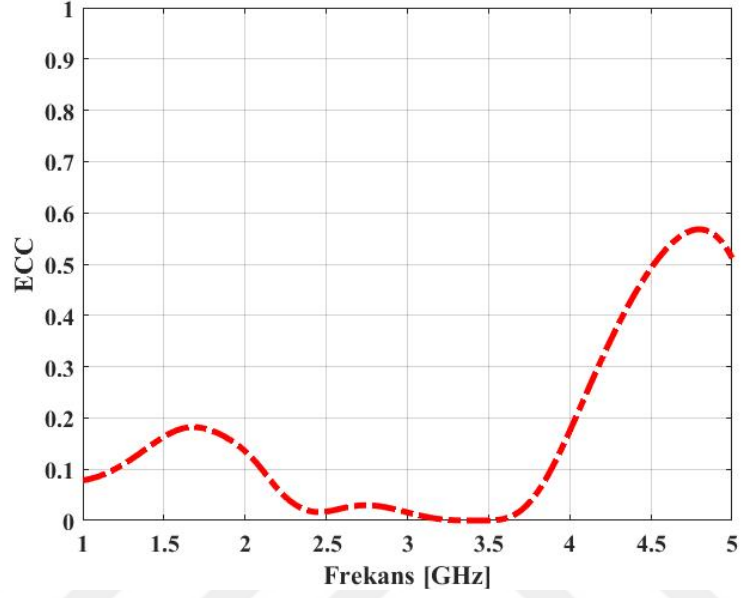
Tablo 5.3 Anten 2'ye ait parametre değerleri

Parametre	Değer(mm)
W3-L3	1-3,5

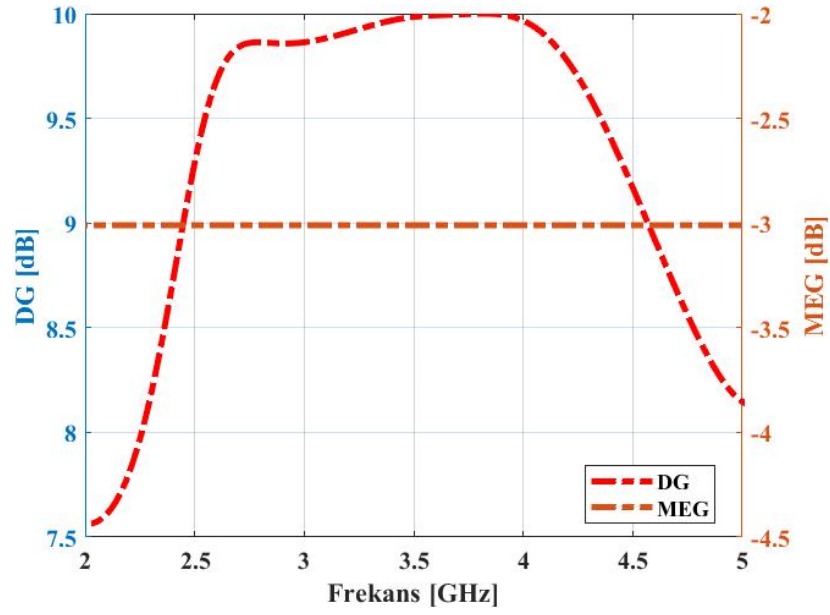


Şekil 5.8 Anten 2'ye ait S-parametreleri frekans karakteristikleri

Anten 2'ye ait ECC grafiği Şekil 5.9'da gösterilmiş, verilen frekans aralığında 0,3'ün altında ve MIMO antenler için uyumludur. Anten 2'ye ait DG, MEG değeri ise Şekil 5.10'da gösterilmiş olup DG değeri de yine çalışma frekans bölgesinde 10 dB seviyelerinde olduğu görölmekte ve MEG değeri ise -3 dB seviyelerindedir.



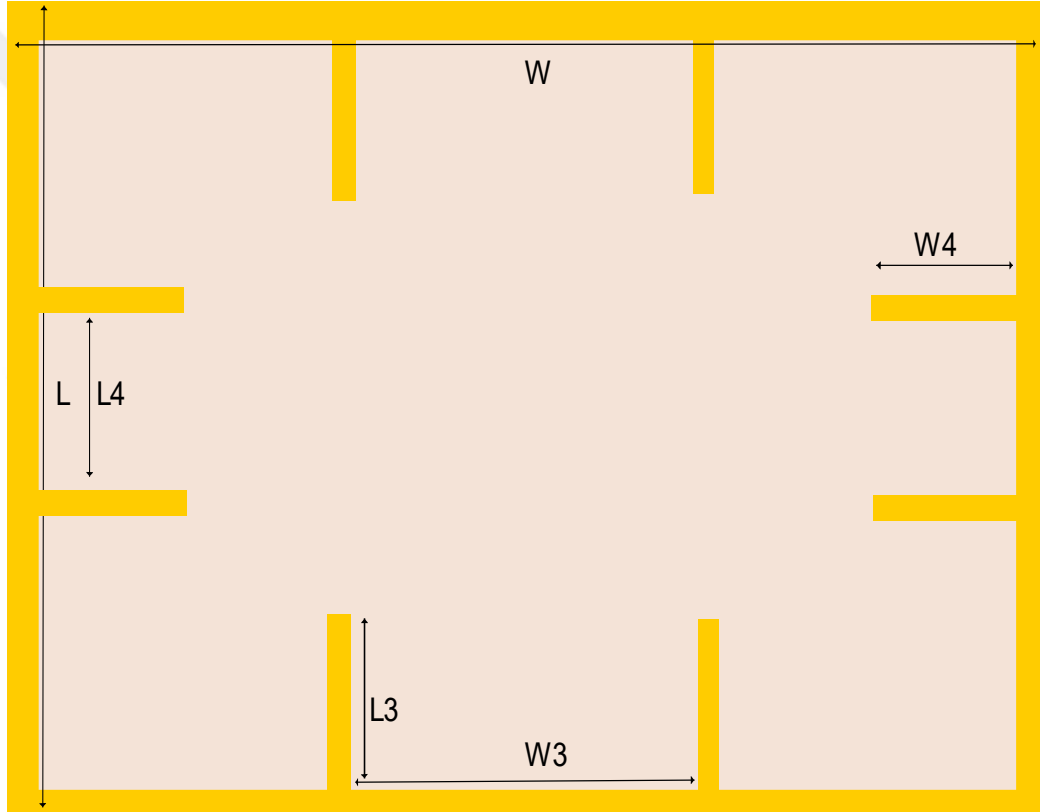
Şekil 5.9 Anten 2'ye ait ECC karakteristiği



Şekil 5.10 Anten 2'ye ait DG ve MEG karakteristikleri

5.1.1.3. Anten 3

Anten tasarım adımı 3'te Anten 2'nin geometrisinin arka yüzeyinde değişiklikler yapılarak Anten 3'e ait tasarım geometrisi elde edilmiş ve bu tasarım ise Şekil 5.11'de verilmiştir. Tablo 5.4'te de Anten 3'e ait eklenen dikdörtgenin parametre değerleri ve S-parametreleri frekans karakteristiği ise Şekil 5.12'de verilmiştir. Anten 3, 3,5GHz frekansında rezonansa sahiptir ve bu noktadaki kazancı 3 dB olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.13'te Anten 3'e ait kazanç frekans karakteristiği verilmiştir. İlgilenilen frekans bölgesinde Anten 3'ün kazanç değeri 3-4 dB seviyelerindedir. Bunun yanında, $|S_{11}|$ -dB frekans karakteristiği 3,5GHz'de -31,04 dB olarak elde edilmiştir.

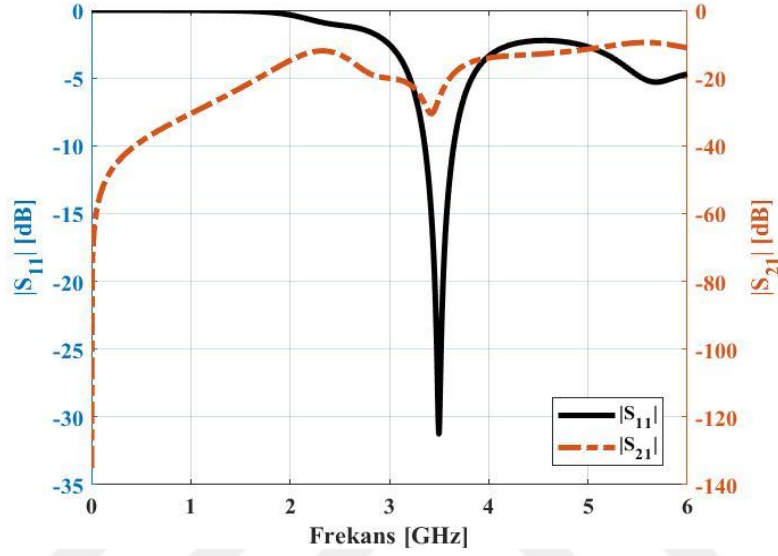


Şekil 5.11 Anten 3'e ait arka yüzdeki tasarım geometrisi

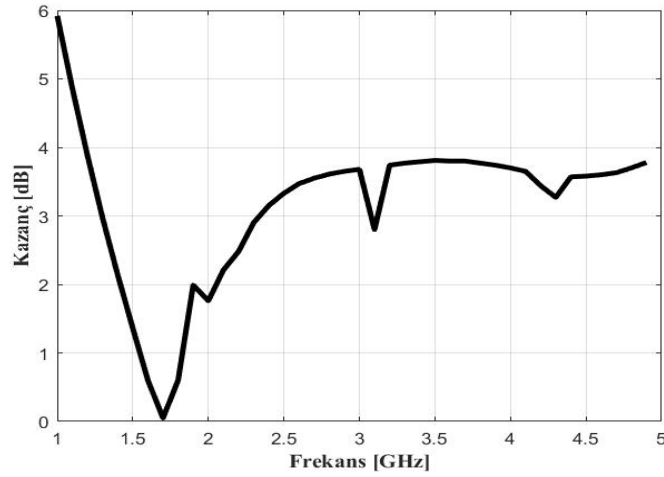
Tablo 5.4 Anten 3'e ait parametre değerleri

Parametre	Değer (mm)
W4-L4	3-9,5

Anten tasarım adımlarına ait ECC grafiği Şekil 5.14'te gösterilmiş, verilen frekans aralığında 0,3'ün altında ve MIMO antenler için uyumludur. Anten tasarımına ait DG, MEG değerleri ise Şekil 5.15'de gösterilmiş olup DG değerlerinin de yine çalışma frekans bölgesinde 10 dB seviyelerinde olduğu görülmekte ve MEG değeri ise 3 dB seviyelerindedir.

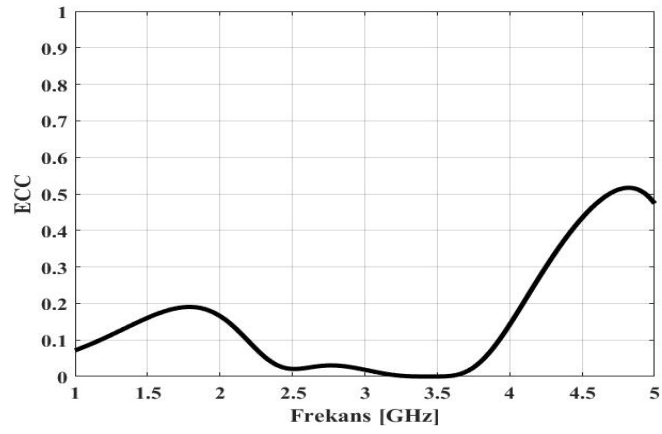


Şekil 5.12 Anten 3'e ait S-parametreleri frekans karakteristikleri

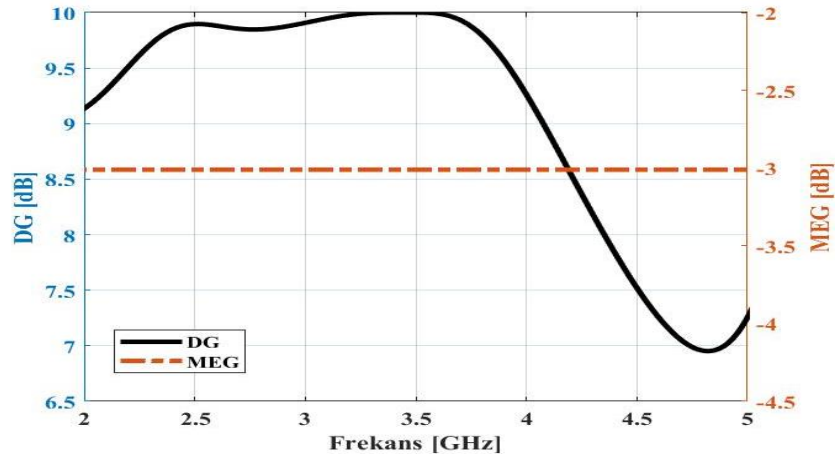


Şekil 5.13 Anten 3'e ait kazanç grafiği

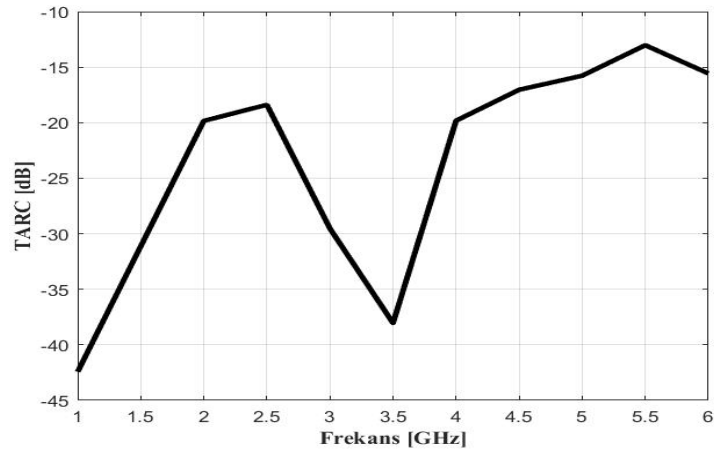
Anten 3'e ait TARC grafiği ise Şekil 5.16'de gösterildiği gibidir, 3,5 GHz frekansında TARC değeri -38 dB olarak bulunmuştur.



Şekil 5.14 Anten 3'e ait ECC grafiği

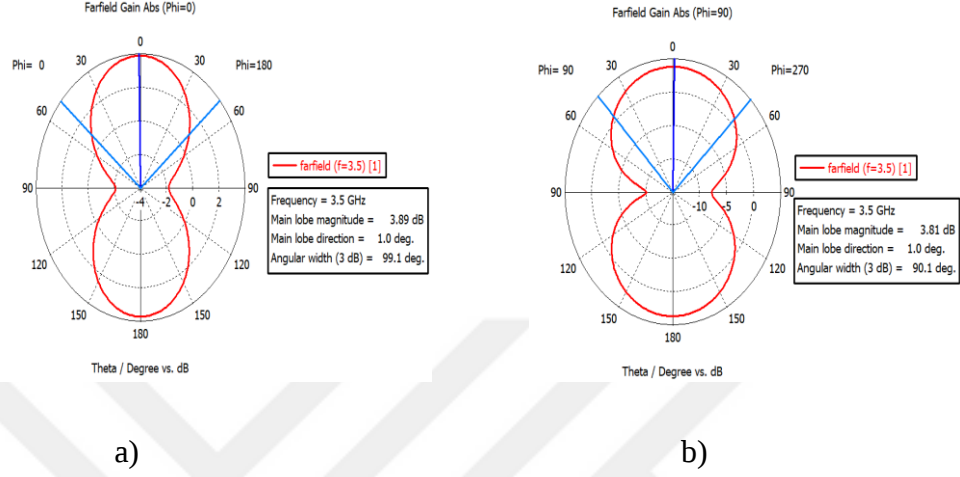


Şekil 5.15 Anten 3'e ait DG ve MEG grafiği



Şekil 5.16 Anten 3'e ait TARC grafiği

Anten 3'e ait iki boyutlu XY ve YZ düzlemi ışıma örüntüleri Şekil 5.17'de verilmiş olup sırasıyla Anten 3 için ana kulakçık yönelimlerinin 1° ve 1° 'de maksimum oldukları gözlemlenmiştir. Anten 3'e ait yüzey akım dağılımı Şekil 5.18'de gösterilmiştir. 3,5 GHz'de akımın yöneliminin homojen dağıldığı görülmektedir.



Şekil 5.17 Anten 3'e ait a) XZ ve b) YZ düzlemi ışıma örüntüleri



Şekil 5.18 Anten 3'e 3,5GHz'deki yüzey akım yoğunluğu

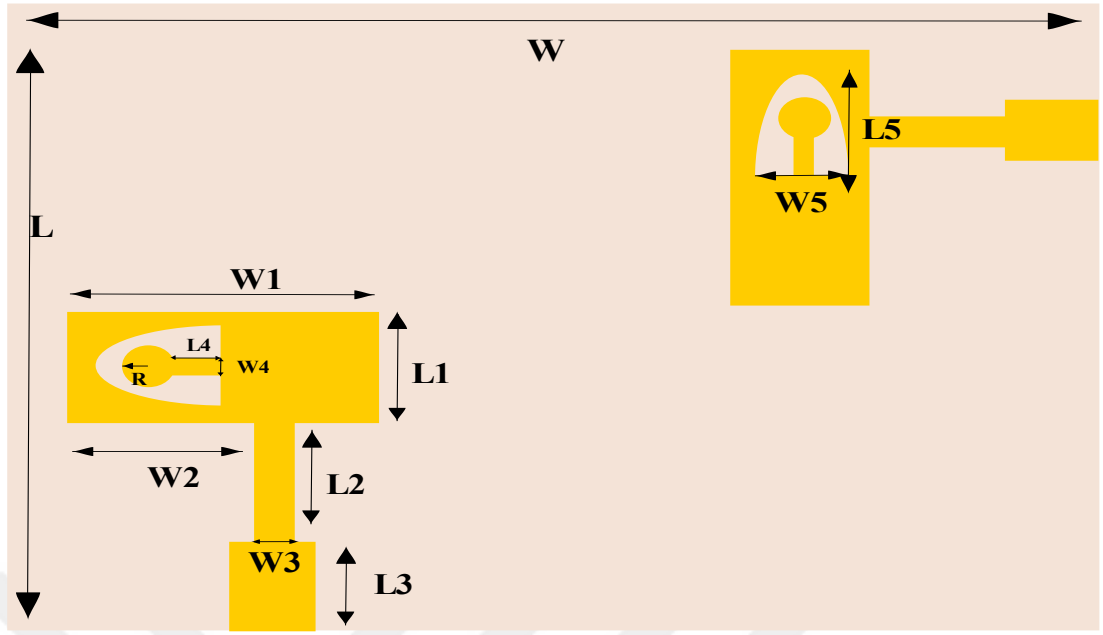
5.1.2. Tasarım 2

Bu bölümde 5N haberleşme sistemlerine yönelik yama düzenleme tekniği kullanılarak MIMO anten tasarımı sunulmuştur. Tasarlanan bu anten literatürde yer alan diğer antenlere oranla daha geniş bant aralığına ve yüksek izolasyona sahiptir. Anten tasarım adımlarına ait sonuçlar CST programı ile gerçekleştirilmiş ve tasarım adımlarında ayırık kapı beslemesi kullanılmıştır. Bu anten tasarımında 3,5 GHz merkez frekansında çalışması hedeflenmiş ve tasarım üç adımda gerçekleştirilmiştir. Tasarım adımlarında ön yüzey üzerine eklenen yamalar ile antenin değişen parametre değerleri incelenmiş ve yama düzenleme yönteminin etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır.

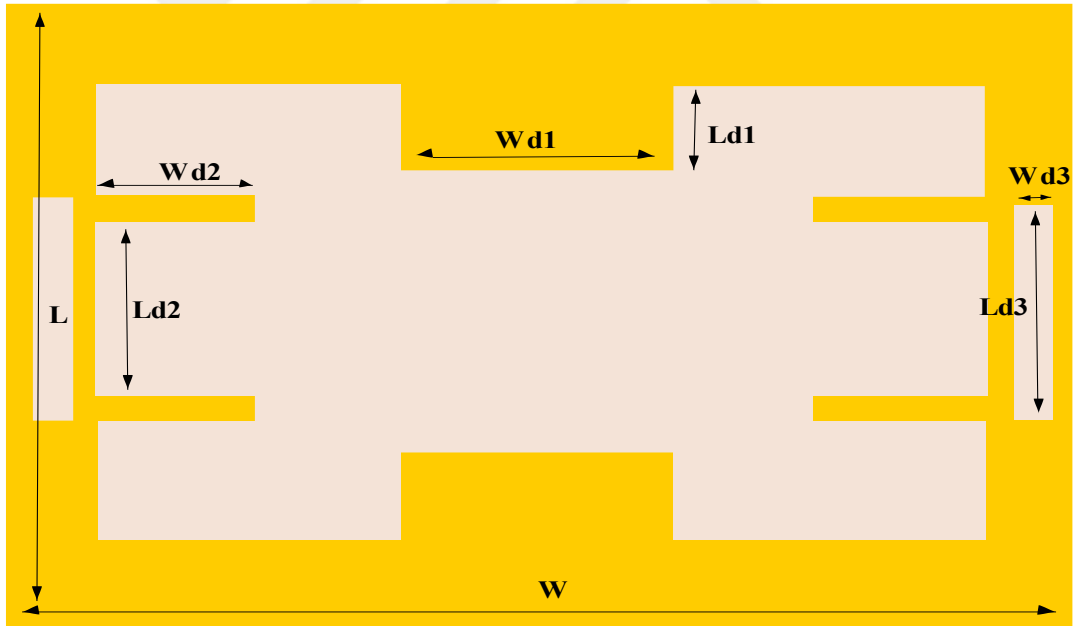
5.1.2.1. Anten 1

MIMO anten tasarımlarında dikdörtgen geometri sıkça kullanılan şekillerden biridir ve literatürde de sıkça yer almaktadır. Tasarımı yapılan bu çalışmada da ana geometri olarak birbirine dik iki dikdörtgen antenin üzerine yamalar eklenerek istenilen parametre değerleri yakalanmaya çalışılmıştır. Oluşturulan ilk anten adımının geometrisine ait ön ve arka yüzeyi Şekil 5.19’da Anten 1 ismi ile verilmiştir. Anten 1’in boyutları 30×20 mm² olacak şekilde tasarlanmış ve anten tasarımında 2,2 dielektrik sabiti olan ve 0,0009 kayıp tanjantına sahip Rogers RT 5580 dielektrik malzeme kullanılmış ve dielektrik yüksekliği ise 0,787 mm olarak belirlenmiştir. Bu antene ait parametre değerleri Tablo 5.5’te verilmektedir.

Anten 1’e ait S-Parametreleri frekans karakteristiği Şekil 5.20’de gösterilmiştir ve Anten 1’in 3,51 GHz çalışma frekansına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.20 incelendiğinde antenin $|S_{11}|$ -dB’nin -10dB seviyesi için empedans bant genişliği 3,36-3,66 GHz arasında ve toplamda 0,3 GHz olarak gözlemlenmiştir. Anten 1’in 3,5 GHz’de $|S_{21}|$ -dB değeri ise -21 olarak bulunmuştur. Anten 1’in 3,5 GHz’de kazancı ise 3,9 dB olarak bulunmuştur. Anten tasarım adımlarına ait ECC grafiği Şekil 5.21’de gösterilmiş, verilen frekans aralığında 0,3’ün altında ve MIMO antenler için uyumludur. Anten tasarımına ait DG, MEG değerleri ise Şekil 5.22’de gösterilmiş olup DG değerlerinin de yine çalışma frekans bölgesinde 10 dB seviyelerinde olduğu görülmekte ve MEG değeri ise 3,01 dB seviyelerindedir.



a)

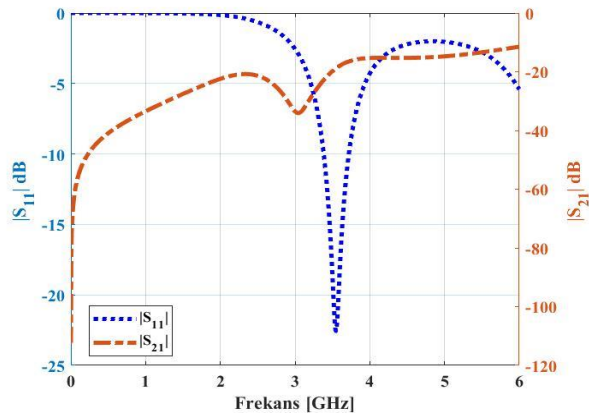


b)

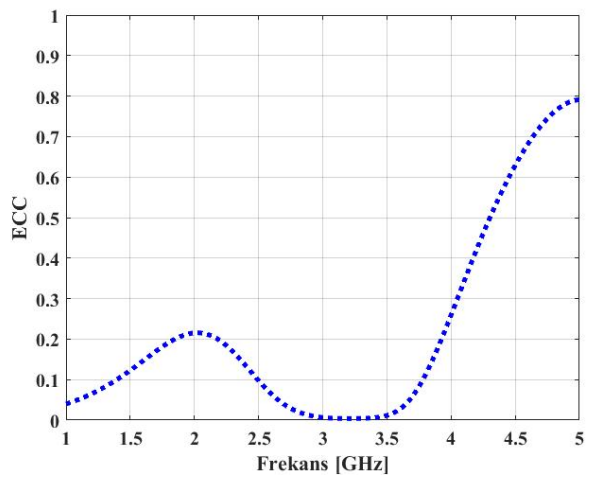
Şekil 5.19 Anten 1'e ait tasarım geometrisi a) ön yüz b) arka yüz

Tablo 5.5 Anten 1'e ait parametre değerleri

Parametre	Değer (mm)	Parametre	Değer (mm)
W-L	30-20	Wd1-Ld1	10-2,5
W1-L1	10,5-4	Wd2-Ld2	4-6
W2-L2	6-3,5	Wd3-Ld3	1-8
W3-L3	3-4,25	W4-L4	0,5-1,5
W5-L5	2,5	R	1



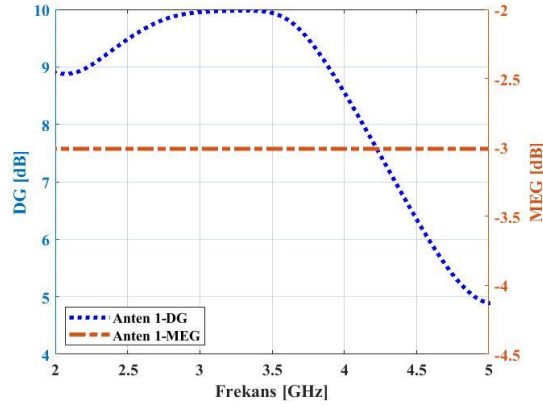
Şekil 5.20 Anten 1'e ait S-parametreleri



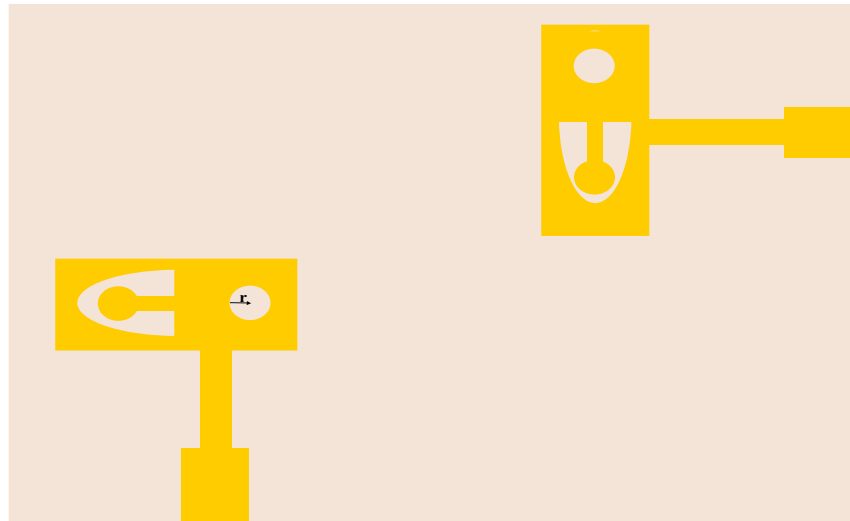
Şekil 5.21 Anten 1'e ait ECC grafiği

5.1.2.2. Anten 2

Anten 2 tasarımı Anten 1'e ait geometrik çerçevenin üzerine daire şeklinde yamaların eklenmesiyle elde edilmiş ve toprak düzlemi üzerinde herhangi bir değişim yapılmamıştır. Anten 2'ye ait geometri Şekil 5.23'de gösterilmiş ve parametre değerleri ise Tablo 5.6'da verilmiştir. Anten 2'ye ait S-Parametreleri frekans karakteristiği Şekil 5.24'te gösterilmiştir ve Anten 2'nin 3,51 GHz çalışma frekansına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.24 incelendiğinde antenin $|S_{11}|$ -dB'nin -10dB seviyesi için empedans bant genişliği 3,36-3,66 GHz arasında ve toplamda 0,3 GHz olarak gözlemlenmiştir. Anten 2'in 3,5 GHz'de $|S_{21}|$ -dB değeri ise -21dB olarak bulunmuştur. Anten 2'nin 3,5 GHz'de kazancı ise 3,9 dB olarak bulunmuştur.



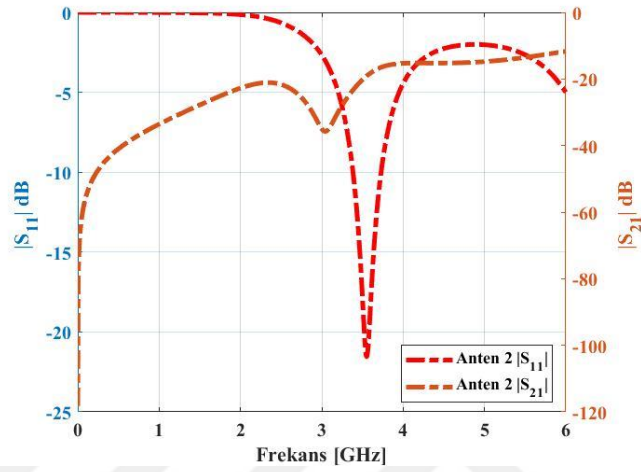
Şekil 5.22 Anten 1' ait DG ve MEG grafiği



Şekil 5.23 Anten 2'ye ait tasarım geometrisi

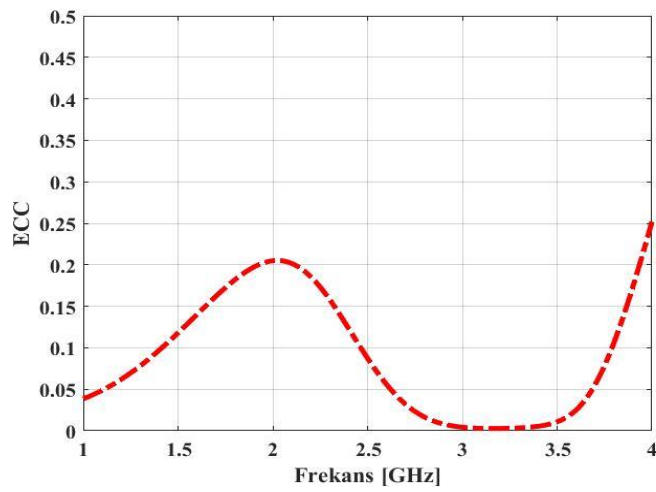
Tablo 5.6 Anten 2'ye ait parametre değerleri

Parametre	Değer
R	1

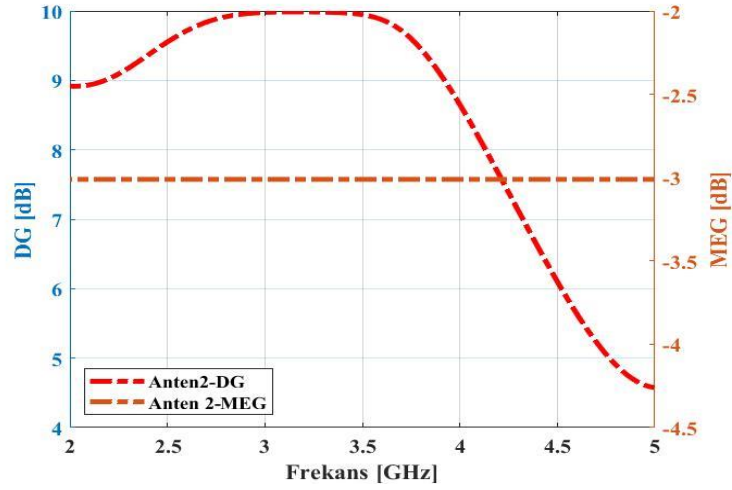


Şekil 5.24 Anten 2'ye ait S-parametre grafiği

Anten 2'ye ait ECC grafiği Şekil 5.25'te gösterilmiş, verilen frekans aralığında 0,3'ün altında ve MIMO antenler için uyumludur. Anten tasarımına ait DG, MEG değerleri ise Şekil 5.26'da gösterilmiş olup DG değerlerinin de yine çalışma frekans bölgesinde 10 dB seviyelerinde olduğu grlmekte ve MEG değeri ise 3,01 dB seviyelerindedir.



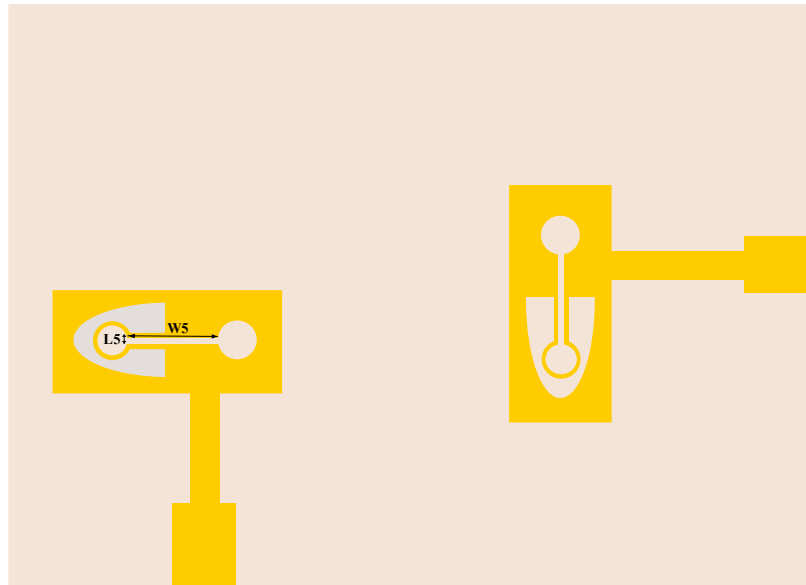
Şekil 5.25 Anten 2'ye ait ECC grafiği



Şekil 5.26 Anten 2'ye ait DG ve MEG grafiği

5.1.2.3. Anten 3

Anten tasarım adımı 3'te Anten 2'nin geometrisinin ön yüzeyinde değişiklikler yapılarak Anten 3' ait tasarım geometrisi elde edilmiş ve tasarım ise Şekil 5.27'de verilmiştir. Tablo 5.7'de de Anten 3'e ait eklenen dikdörtgenin parametre değerleri ve S-parametreleri frekans karakteristiği ise Şekil 5.28'de verilmiştir. Bunun yanında, $|S_{11}|$ -dB frekans karakteristiği, önceki anten performans karakteristiklerine göre iyileştirilmiş ve 3,5GHz'de -40 dB'ye ulaşan $|S_{21}|$ -dB değerleri elde edilmiştir.

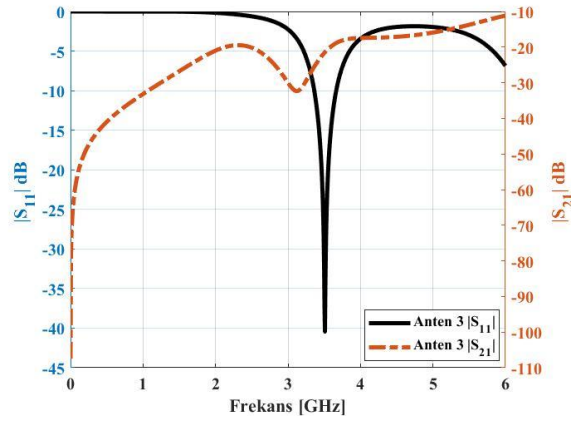


Şekil 5.27 Anten 3'e ait önyüz tasarım geometrisi

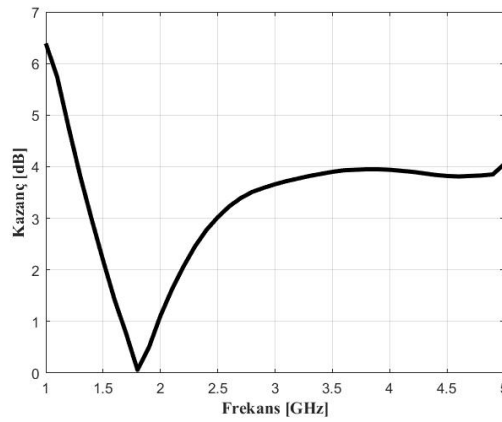
Tablo 5.7 Anten 3'e ait parametre değerleri

Parametre	Değer (mm)
W5-L5	3,75-0,5

Anten 3'ün 3,5 GHz alışma frekansına sahip olduğu görülmektedir. şekil 5.28 incelendiğinde Anten 3'n $|S_{11}|$ -dB'nin -10dB seviyesi için empedans bant genişliği 3,36-3,66 GHz arasında ve toplamda 0,3 GHz olarak gözlemlenmiş ve 3,5 GHz'deki $|S_{21}|$ -dB değeri ise -21 dB olarak bulunmuştur. Anten 3'e ait kazanç grafiği ise şekil 5.29'da gösterilmektedir ve 3,5 GHz'de kazancı ise 3,9 dB olarak bulunmuştur. Anten 3'e ait ECC grafiği şekil 5.30'da gösterilmiş, verilen frekans aralığında 0,3'n altında ve MIMO

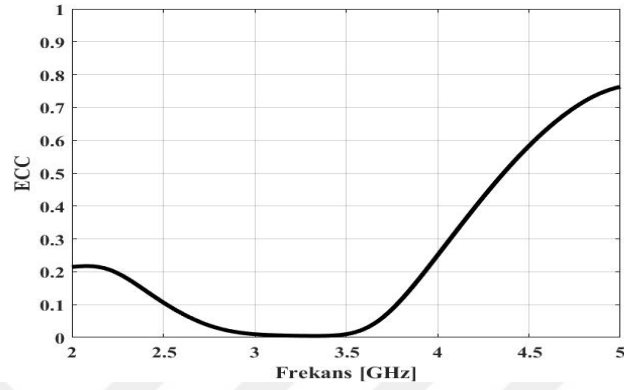


şekil 5.28 Anten 3'e ait S-parametreleri grafiği

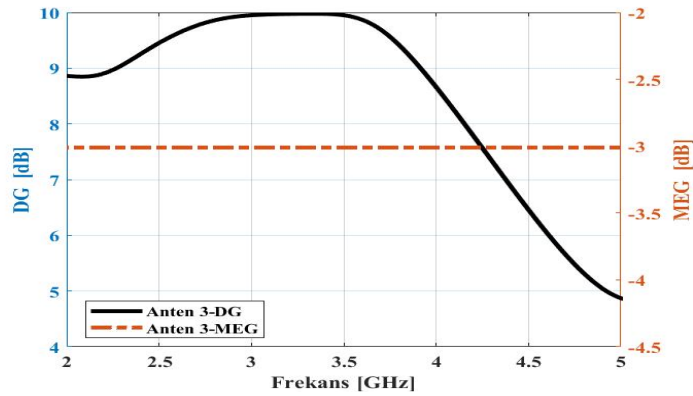


şekil 5.29 Anten 3'e ait kazanç grafiği

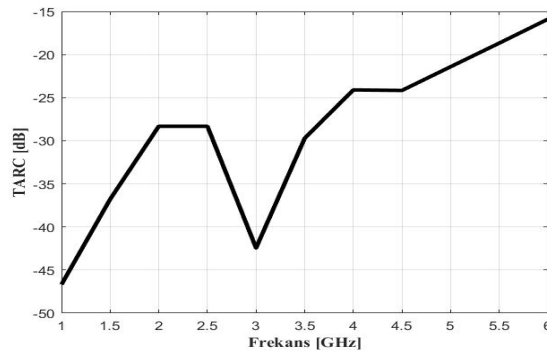
antenler için uyumludur. Anten tasarımına ait DG, MEG değerleri ise Şekil 5.31’de gösterilmiş olup DG değerlerinin de yine çalışma frekans bölgesinde 10 dB seviyelerinde olduğu görülmekte ve MEG değeri ise -3 dB seviyelerindedir. Anten 3’e ait TARC grafiği ise Şekil 5.32’de gösterilmiştir.



Şekil 5.30 Anten 3’e ait ECC grafiği

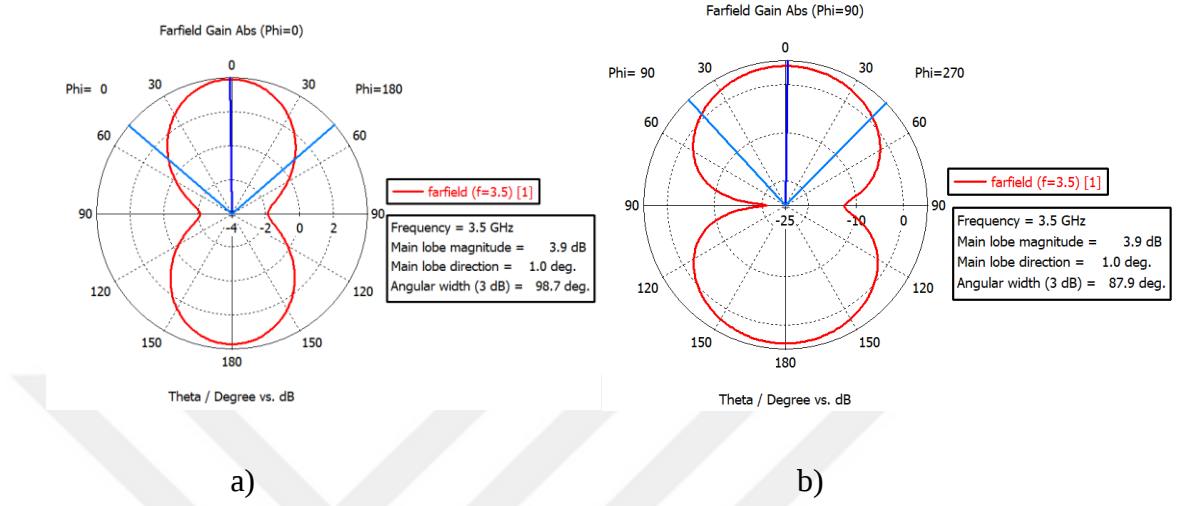


Şekil 5.31 Anten 3’e ait DG ve MEG grafiği



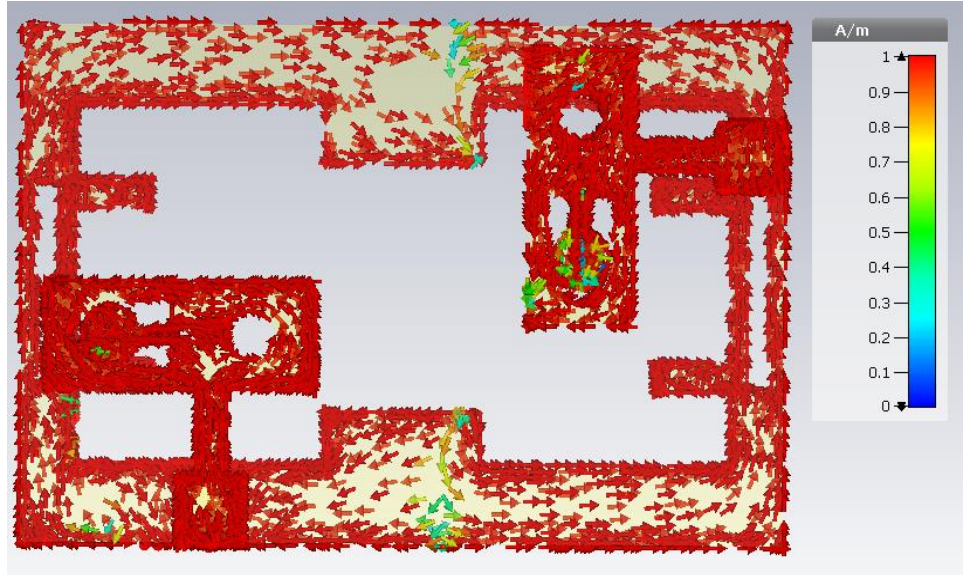
Şekil 5.32 Anten 3’e ait TARC grafiği

Anten 3'e ait iki boyutlu XZ ve YZ düzlemi ışıma örüntüleri Şekil 5.33'de verilmiş olup sırasıyla Anten 3 için ana kulakçık yönelimlerinin 1° ve 1° maksimum oldukları gözlemlenmiştir.



Şekil 5.33 Anten 3'e ait a) XZ ve b) YZ düzlemi ışıma örüntüleri

Anten 3'e ait 3,5 GHz'deki yüzey akım dağılımı Şekil 5.34'te gösterilmiştir. 3,5 GHz'de akımın yoğunluğunun ışıma yüzeylerinde daha baskın olduğu görülürken toprak zemini üzerinde ise daha homojen yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 5.34 Anten 3'e ait 3,5 GHz'deki yüzey akım yoğunluğu

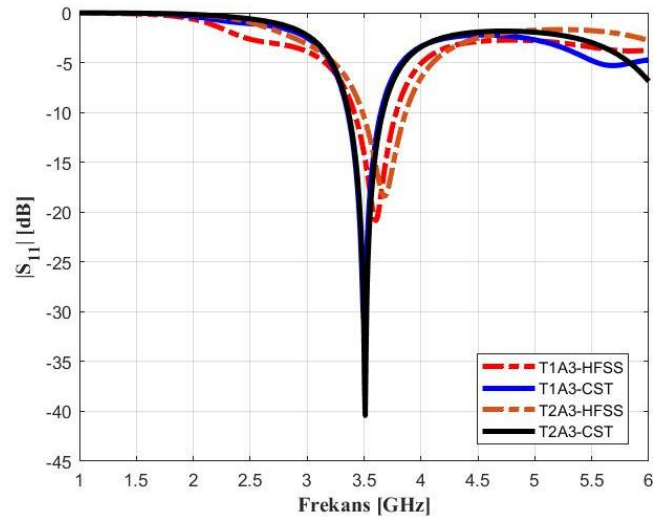
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında küçük boyutlarda, kapılar arasında yüksek izolasyona sahip çeşitlilik kazancı yüksek ve zarf korelasyon katsayısı oldukça düşük seviyelerde olan iki kapılı iki MIMO anten tasarımı önerilmiştir. MIMO anten tasarımına yönelik detaylı bir çalışma ele alınmış ve anten tasarımlarında yama düzenleme tekniğinin anten parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Anten tasarım adımları sonucunda hedeflenen performans karakteristiklerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak 3,5GHz merkez frekansına sahip $30 \times 20 \text{ mm}^2$ boyutlarında iki kapılı iki MIMO yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.

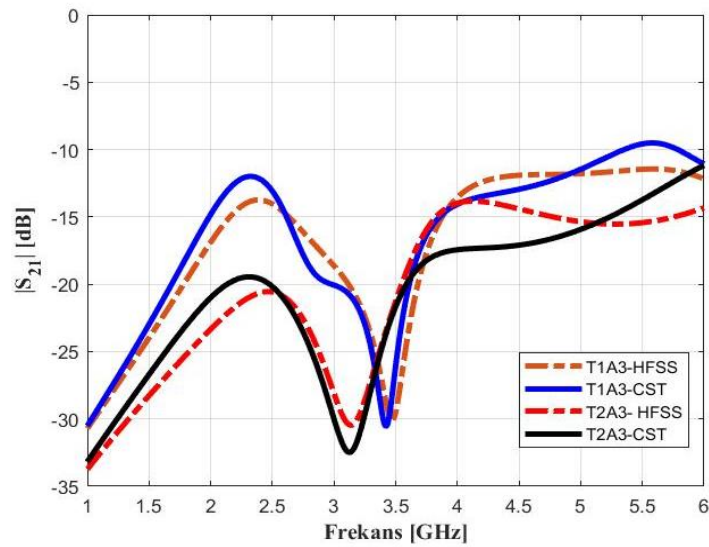
İlk tasarımda (Tasarım 1) görece küçük yapılı ve yüksek izolasyona sahip 5N teknolojilerde kullanılabilir bir tasarım elde edilmeye çalışılmıştır. Tasarım adımlarında antenin ön yüzeyi sabit tutularak toprak yüzeyine eklenen yamalarla istenilen karakteristik yakalanmaya çalışılmıştır. MIMO anten tasarımlarında toprak yüzeyine eklenen yamalar ile anten tasarım adımlarında parametre değerlerinin değişimi incelenmiştir. Tasarım adımlarının sonucunda istenilen küçük yapılı, yüksek kazançlı ve nispeten geniş bant aralığına sahip tasarım Tasarım 1-Anten 3 (T1A3) adımı ile gerçekleştirilmiştir. Anten boyutları $30 \times 20 \text{ mm}^2$ olarak tasarlanmış ve empedans bant genişliği $|S_{11}| = -10\text{dB}$ referans seviyesi için 0,3 GHz, çalışılan frekans bölgesi için maksimum -21 dB seviyelerinde izolasyon sağlanmıştır. T1A3'e ait 3,5GHz'deki kazanç 3dB olarak elde edilmiş ve ECC, DG değerleri, performans karakteristiği olarak MIMO teknolojisinin özelliklerini karşılayacak seviyededir.

İkinci tasarım (Tasarım 2)'da geniş bant aralığına sahip 5N teknolojilerde kullanılabilir bir tasarım elde edilmeye çalışılmıştır. Tasarım adımlarında toprak yüzeyi sabit tutularak ön yüzeye eklenen yamalarla istenilen karakteristik yakalanmaya çalışılmıştır. MIMO anten tasarımlarında antenin ön yüzeyine eklenen yamalar ile tasarım adımlarında parametre değerlerinin değişimi incelenmiştir. Tasarımda istenilen geniş bant aralığına sahip olması Tasarım 2- Anten 3 (T2A3) adımı ile gerçekleştirilmiştir. T2A3 adımının sonucunda 5N teknolojilere yönelik 3,5 GHz merkez frekansında 3,9 dB kazançla sahip ve bant genişliği 0,3 GHz olan anten yapısı elde edilmiştir.

T1A3 ve T2A3 adımları için saçılma parametrelerine ait CST ve HFSS sonuçları Şekil 6.1’de ve Şekil 6.2’de verilmiştir. T1A3 VE T2A3 adımlarında merkez frekans CST programında 3,5 GHz olarak bulunmuşken HFSS programında merkez frekansında az miktarda kaymalar olduğu görülmektedir. Bu farkın kullanılan programların benzetim parametrelerinden kaynaklandığı ifade edilebilmektedir, çünkü iki benzetim programı farklı hesaplama yöntemini kullanmaktadır. Şekil 6.1’den ve Şekil 6.2’den her iki tasarımında farklı benzetim programlarında tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. İki anten tasarımının literatürde yer alan antenlerle karşılaştırılması Tablo 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1 T1A3 ve T2A3’e ait $|S_{11}|$ frekans karakteristikleri



Şekil 6.2 T1A3 ve T2A3’e ait $|S_{21}|$ frekans karakteristikler

Tablo 6.1 Anten tasarımlarının literatür ile karşılaştırılması

Referans	Boyut (mm ²)	Anten Yapısı	S ₁₁ -dB, 3.5 GHz	S ₁₁ ≤ -10 dB*, (GHz)	S ₂₁ - (dB), 3.5 GHz	S ₂₁ _{maks} ⁺ (dB)	ECC ⁺	Kazanç ⁺ (dB)
Abdullah vd., 2017	136×68	4 Kapılı	-50	3,4 - 3.6	-18	-8	0.014	5.1
Sharma vd., 2018	85×50	2 Kapılı	-16	3,26 - 3.68	-18	-18	0.01	5.9
Serghiou vd., 2020	70×150	8 Kapılı	-20	3,1-3,85	-17	-17	0,006	5,62
Abdullah vd., 2021	138×68	8 Kapılı	-27	3,3-3,7	-15	-15	0,01	4
Singh vd., 2019	55×55	4 Kapılı	-22	3.36 - 3.68	-20	-20	0.025	2.8
Gao vd., 2018	120×73	4 Kapılı	-21	3,45-3,53	-15	-15	0,31	1,9
Ye vd., 2022	150×63	8 Kapılı	-15	3,42-3,73	-24	-	0,01	-
T1A3	30×20	2 Kapılı	-31,04	3,36-3,66	-21	-18	0,01	3
T2A3	30×20	2 Kapılı	-40	3-36-3,66	-21	-19	0,01	3,9

*Empedans Bant Genişliği, +Çalışılan frekans aralığına göre yazılmıştır.

Anten tasarımlarında önemli olan özelliklerden biri, tasarlanan antenlerin yerleştirilecek olan sistemler içerisine kolayca entegre olması açısından antenin sahip olduğu boyuttur. Anten tasarımlarının performans sonuçlarına bakıldığında anten yapıları içerisinde T1A3 ve T2A3'ün diğer antenlere göre görece küçük yapılı olduğu görülmektedir ve sahip olduğu boyutların yerleştirilecekleri sistemlere uyum sağlamasını kolaylaştırmaktadır. Yine antenlerin MIMO anten parametreleri incelendiğinde antenler arasında izolasyon seviyesinin kabul edilebilir bir seviyede olduğu ve antenlerin $|S_{11}|$ seviyelerinin ise ilgilenilen frekans aralıkları için oldukça düşük olduğu ve yer alan diğer antenlere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Anten tasarımlarının 3,5GHz'deki kazançları sırasıyla 3dB ve 3,9 dB olarak elde edilmiş, ECC, DG değerleri, performans karakteristikleri MIMO teknolojisinin özelliklerini karşılayacak seviyededir.

MIMO antenlerde dizi tasarımlarının 6GHz altı ve 6GHz üstü frekanslarda kullanılabilirlik açısından daha etkili olduğu ve MIMO dizilerin tasarımının gelecek çalışmalar olarak yapılabileceği öngörülmüştür

KAYNAKLAR

- Abdullah, M., Altaf, A., Anjum, M. R., Arain, Z. A., Jamali, A. A., Alibakhshikenari, M., and Limiti, E. (2021). Future smartphone: MIMO antenna system for 5G mobile terminals. *IEEE access*, 9, 91593-91603.
- Abdullah, M., Ban, Y., Kang, K., Li, M., and Amin, M. (2017). "Compact Four-Port MIMO Antenna System at 3.5 GHz." *2017 International Applied Computational Electromagnetics Society SymposiumItaly (ACES). IEEE*, 656-600.
- Agiwal, M., Roy, A. and Saxena, N. (2016). "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 18 (3), 1617–1655.
- Ahmad, A. H., Jar'alla, B. K. (2008). "Design and Simulation of Broadband rectangular microstrip Antenna", *Eng.Tech*, 26 (1), 1-15.
- Akman, H., (2017) "*Hücreli Otomata Ve Tabu Arama Algoritması İle Mikroşerit Yama Anten Tasarımı*", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Yayımlanmamış Yüksek lisans Tezi, Isparta, 9-18.
- Ali, M. M. M., Haraz, O., and Alshebeili, S. (2016). "Design of a dual-band printed slot antenna with utilizing a band rejection element for the 5G wireless applications," *in 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 1865–1866.
- Altuntaş, F. (2016) "*Ultra Geniş Bant (Ugb) Haberleşme Sistemleri İçin Mikroşerit Yama Anten Tasarımı*" Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 15-20, 25-27.
- Bakırlı, M.A. (2018) "Hücreli Mimo Haberleşme Sistemlerinde Antenler Arası Ortak Etkileşim Teknikleri" Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul, 5-14.
- Balanis, C. A. (2016). Antenna Theory: Analysis and Design, Aydın, E., Çağlar, M. F., ve Kara, A., *Nobel Akademi Yayıncılık*, Ankara, 811-816.

- Berlemann, L., Dimitrakopoulos, G., Moessner, K., & Hoffmeyer, J. (2005). "Cognitive radio and management of spectrum and radio resources in reconfigurable networks." *Wireless World Research Forum*, 4-10.
- Blanch, S., Romeu, J., & Corbella, I. (2003). Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description. *Electronics letters*, 39(9), 705-707.
- Bondyopadhyay PK. Sir JC Bose diode detector received Marconi's first transatlantic wireless signal of December 1901 (the "Italian Navy Coherer" Scandal Revisited). *Proceedings of the IEEE*, 86, 1998, 259-285.
- BTK. "5G ve Ötesi Beyaz Kitap. BTK, 2018." <https://www.btk.gov.tr/uploads/announcements/5g-ve-otesi-beyaz-kitap/beyaz-kitap-son.pdf>, Son erişim tarihi: 20.07.2023.
- Busari, S. A., Huq, K., Mumtaz, S, Dai, L. and Rodriguez, J. (2017). "Millimeter-Wave Massive MIMO Communication for Future Wireless Systems: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 20, 836–869.
- Cullen-International, "5G and spectrum different approaches, (2019)." https://www.cullen-international.com/dam/jcr:4112f060-e92f-47eb-b5f2-0fdc2b4c91a7/cullen-international_carolina-limbato_5G-spectrum-plans-americas-award-approaches.pdf , Son erişim tarihi: 16.07.2023.
- Diawuo, H. A. and Jung, Y. (2018) "Broadband Proximity-Coupled Microstrip Planar Antenna Array for 5G Cellular Applications," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, no. 7, 1286–1290.
- Everythingrf. "5G NR Band n257." <https://www.everythingrf.com/tech-resources/5g-nr-frequency-bands/5G-NR-Band-n257>. Son erişim tarihi: 16.07.2023.
- Gao, C., Li, X.-Q., Lu, W.-J., and Wong, K.-L. (2018) "Conceptual design and implementation of a four-element MIMO antenna system packaged within a metallic handset," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 60(2), 436–444.

- Garg, R., Bhartia, P., Bahal, I., and Ittipiboon, A. (2001) “*Microstrip Antenna Design Handbook. “Artech House antennas and propagation library”* London, 1-10.
- Geylani, M, Çıbuk, M, Çınar, H, Ağgün, F. (2016). Geçmişten Günümüze Hücresel Haberleşme Teknolojilerinin Gelişimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 18 (54), 606-623.
- Ghosh, A., Thomas, T. A., Cudak, M. C., Ratasuk, R., Moorut, P., Vook, F. W., ... & Nie, S. (2014). Millimeter-wave enhanced local area systems: A high-data-rate approach for future wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1152-1163.
- Giordani, M., Polese, M., Roy, A., Castor, D. and Zorzi, M. (2019). “A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmwave Frequencies,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 21(1), 173–196.
- Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. “A Broadband and High Gain 28GHz Microstrip Antenna Design for Milimeter-wave 5G Communication Systems”. *International Graduate Research Symposium Igrs’22*, 1- 3 Haziran 2022, İstanbul.
- Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. Beşinci Nesil Haberleşme Sistemi Uygulamaları için Parazitik Yamalı Dikdörtgen Çerçevesi Mikroselit Anten Tasarımı. *URSI-Türkiye 2021 X. Bilimsel Kongresi Gebze Teknik Üniversitesi*, 2020, Kocaeli.
- Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. Beşinci Nesil Haberleşme Sistemleri için Görece Küçük, Yüksek İzolasyonlu, İki Kapılı MIMO Anten Tasarımı. *ELECO 2022 Elektrik Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı* 24-26 Kasım 2022, Bursa.
- Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. Beşinci Nesil Haberleşme Uygulamaları için Altıgen Halka Biçimli Bant Genişliği İyileştirilmiş Mikroselit Yama Anten Tasarımı. *İlk Bildiriler Konferansı 2021*, 10- 11 Temmuz 2021, Ankara.
- Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. Beşinci Nesil Teknolojiler için Sekizgen Biçimli Mikroselit Yama Anten Tasarımı. *1. Elektrik Elektronik Mühendisliğinde Güncel Gelişmeler Sempozyumu*, 24- 25 Eylül 2021, Trabzon.

- Haider, S. S., Tahir, F. A., Chattha, H. T. and Abbasi, Q. H. (2018)“Compact Polarization Diversity Antenna for 28/38 ghz Bands,” *in 2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*,1–2.
- Haraz, O. M., Ali, M. M. M., Alshebeili, S., and Sebak, A., (2015). “Design of a 28/38 ghz dual-band printed slot antenna for the future 5G mobile communication 202 Networks,” *in 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 1532– 1533.
- Huang, H. C. (2018). “Overview of antenna designs and considerations in 5G cellular phones”. In 2018 *International Workshop on Antenna Technology (IWAT)*, 1-4.
- Hussain I, Hussain S, Khokhar I, Iqbal R. (2007).OFDMA as the Technology for the Next Generation Mobile Wireless Internet. *Proceedings of the Third International Conference on Wireless and Mobile Communications*. IEEE Computer Society, s.14.
- Kaeib, F., Shebani, N. M. and Zarek, A. R. “Design and Analysis of a Slotted Microstrip Antenna for 5G Communication Networks at 28 ghz,” (2019) 19th *International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 648–653.
- Keum and Choi, J. (2018). “A 28 ghz 4×4 U-Slot Patch Array Antenna for mmwave Communication,” *in 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 1–2.
- Krumbein, A. “Understanding the basics of MIMO communication Technology. Southwest Antennas. (2016)” <https://w1sye.org/wp-content/uploads/2023/04/swa-mimo-basics.pdf>
Son erişim tarihi: 16.07.2023.
- Kütük, H., Teşneli, A. Y., & Teşneli, N. B. (2000). 3.3 ghz mikroşerit anten tasarımı ve farklı besleme yöntemleri için analizi. *Sakarya University Journal of Science*, 17(1), 119-124.
- Ma, R. and Chountalas, I., (2015), “Pattern reconfigurable MIMO antennas for Multiband LTE Operation.” Master’s Thesis. *Department of Electrical and Information Technology Faculty of Engineering, LTH, Lund University*. Lund.

- Marchetti, N. (2015). "Towards 5th Generation Wireless Communication Systems," *ZTE Commun.*, 13, 11–19.
- Marzudi, W. N. N. W., Abidin, Z. Z., Muji, S. Z. M., Ma, Y., & Abd-Alhameed, R. A. (2015). "Minimization of mutual coupling using neutralization line technique for 2.4 GHz wireless applications." *International Journal of Innovation in the Digital Economy (IJIDE)*, 6(3), 1-15.
- Morgado, K. M. S. Huq, S. Mumtaz, and J. Rodriguez, (2018). "A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives," *Digit. Commun. Networks*, 4 (2), 87–97.
- Myung, H. G., Lim, J., & Goodman, D. J. (2006). Single carrier FDMA for uplink wireless transmission. *IEEE vehicular technology magazine*, 1 (3), 30-38.
- Rafiqul, M., Nibir, R., Mukit, N., Abdinasir, S. O., Habaebi, M. H. and Yasmin, S. (2018). "Dual Band Antenna Design Using Stacked Series Array For Ka-Band Application," in *2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, 114–118.
- Rodriguez, J. (2014). "Small Cells for 5G Mobile Networks," *Fundamentals of 5G Mobile Networks*, 63–104
- Sakaguchi, K. Haustein, T., (2017). "Where, When, and How mmwave is Used in 5G and Beyond," *IEICE Trans. Electron*,
- Serghiou, D., Khalily, M., Singh, V., Araghi, A., & Tafazolli, R. (2020). Sub-6 ghz dual-band 8×8 MIMO antenna for 5G smartphones. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(9), 1546-1550.
- Shafi, M., et al., (2017). "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 35 (6), 1201–1221.
- Sharma, Namita, ve Dishant Khosla. (2018). "A compact two element U shaped MIMO planar inverted-F antenna (PIFA) for 4G LTE mobile devices." *2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC). IEEE*, 338-341.

- Shen, X., Liu, Y., Zhao, L., Huang, G. L., Shi, X., & Huang, Q. (2019). A miniaturized microstrip antenna array at 5G millimeter-wave band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(8), 1671-1675.
- Singh, Manish, ve Manoj Singh Parihar. (2019). "A compact 4× 4 MIMO Antenna With High İsolation for 5G Application," *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). IEEE*, 688-690.
- Sözen, E. (2019) "5 Ghz Mikroşerit Anten Tasarımı Ve Besleme Çeşitlerinin Karşılaştırılması" Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, 17-23.
- Sunthari, P. M., & Veeramani, R. (2017, March). Multiband microstrip patch antenna for 5G wireless applications using MIMO techniques. In *2017 First international conference on recent advances in aerospace engineering (ICRAAE). IEEE*, 1-5.
- Tayyab, M., Gelabert, X. and Jäntti, R. (2019). "A Simulation Study on Handover in LTE Ultra-Small Cell Deployment: A 5G Challenge," in *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, 388–392.
- Toktaş (2009). "Farksal Gelişim Algoritması Kullanarak H Şekli Mikroşerit Antenlerin Rezonans Frekansının Hesaplanması" Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi F.B.E. Elektrik-Elektronik Müh. A.B.D.* Mersin, 9-16.
- Yang, G., Ali, M., & Dougal, R. (2005). A Wideband Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna for 5–6-GHz Wireless LAN Applications. *Microwave and optical technology letters*, 45(4), 279-285.
- Yazgan, E. (1987). "Mikroşerit Antenler." *Elektrik Elektronik Bölümü, Hacettepe Üniversitesi*. Ankara, 262-268.
- Ye, Y., Zhao, X. and Wang, J. (2022) "Compact High-Isolated MIMO Antenna Module With Chip Capacitive Decoupler for 5G Mobile Terminals," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21 (5), 928-932.

- Yerlikaya, M., (2021). “5G Mobil Terminaller İçin Yüksek Kazançlı Ve Çoklu Bant Frekans Seçici Anten Sistemi Tasarımı” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10 (5), 52 – 64.
- Yoon, N. and Seo, C. (2017). “A 28-ghz Wideband 2×2 U-slot patch array antenna,” *J. Electromagn. Eng. Sci*, 133–137.
- Zhang, Li, J., Wang, X., Chen, Z., Li, J., & Zhang, A. (2019). Dual-band eight-antenna array design for MIMO applications in 5G mobile terminals. *IEEE Access*, 7, 71636-71644.
- Zhang, X., Liu, Y., Wang, Y. and Bai, J. (2019). “Performance analysis and optimization for non-uniformly deployed mmwave cellular network,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw*, 1, 49.



EKLER

EKLER

Ek-1. Yüksek Lisans Eğitimi Sürecinde Tezle İlgili Yapılan Çalışmalar

1. Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. Beşinci Nesil Haberleşme Sistemleri için Görece Küçük, Yüksek İzolasyonlu, İki Kapılı MIMO Anten Tasarımı. **ELECO 2022 Elektrik Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı** 24-26 Kasım 2022, Bursa.
2. Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. “A Broadband and High Gain 28GHz Microstrip Antenna Design for Milimetter-wave 5G Communication Systems”. **International Graduate Research Symposium Igrs’22**, 1-03 Haziran 2022, İstanbul.
3. Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. Beşinci Nesil Teknolojiler için Sekizgen Biçimli Mikroşerit Yama Anten Tasarımı. **1. Elektrik Elektronik Mühendisliğinde Güncel Gelişmeler Sempozyumu**, 24-25 Eylül 2021, Trabzon.
4. Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. Beşinci Nesil Haberleşme Uygulamaları için Altıgen Halka Biçimli Bant Genişliği İyileştirilmiş Mikroşerit Yama Anten Tasarımı. **İlk Bildiriler Konferansı 2021**, 10-11 Temmuz 2021, Ankara.
5. Gündoğdu, D. Y. ve Ertay, A. O. Beşinci Nesil Haberleşme Sistemi Uygulamaları için Parazitik Yamalı Dikdörtgen Çerçeveveli Mikroşerit Anten Tasarımı. **URSI-Türkiye 2021 X. Bilimsel Kongresi Gebze Teknik Üniversitesi**, 2020, Kocaeli.