
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

5G SİSTEMLER İÇİN ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI

Dursun Miraç ER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Dursun Miraç ER

28/06/2024

5G SİSTEMLER İÇİN ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Dursun Miraç ER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

ÖZET

Yıllar içerisinde sürekli ilerleyen teknolojiyle beraber artan haberleşme ihtiyacı, üretici ve kullanıcı sayısındaki artış 5. nesil (5. Generation - 5G) haberleşme sistemlerine geçişi zorunlu kılmıştır. Bu geçiş anten tasarımları üzerinde yeni gereksinimlere sebep olmuş ve yüksek bant genişliğine sahip, düşük profilli ve aynı anda birden fazla kullanıcıyı destekleyebilecek anten tasarımlarının yapılmasını da zorunlu hale getirmiştir. Bu tez kapsamında çoklu girişi çoklu çıkışlı (Multiple Input Multiple Output - MIMO) mikroşerit antenlerin bant genişliğinin arttırılması ve portlar arası izolasyonlarının iyileştirilmesi üzerine çalışılmış, bozulmuş toprak yüzey (Defected Ground Structure – DGS) ve nötralizasyon hattı teknikleri kullanılarak 5G kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılabilecek iki elemanlı, düşük profilli, yüksek bant genişliğine sahip, çift polarizasyonda yayın yapabilen ve dört portlu MIMO mikroşerit anten tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş, ölçümleri yapılarak bant genişliği ve portlar arası izolasyon değerleri simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu	:	93415
Anahtar Kelimeler	:	5G, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış, mikroşerit anten, Bozulmuş Toprak Yüzey, nötralizasyon hattı
Sayfa Adedi	:	68
Danışman	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM

MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT MICROSTRIP ANTENNA DESIGN FOR 5G SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Dursun Miraç ER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

Over the years, the increasing need for communication, alongside the constantly advancing technology, has made the transition to 5. Generation (5G) communication systems imperative due to the growing number of producers and users. This transition has imposed new requirements on antenna designs, necessitating the development of antennas with high bandwidth, low profile, and the ability to support multiple users simultaneously. Within the scope of this thesis study, efforts have focused on increasing the bandwidth of Multiple Input Multiple Output (MIMO) microstrip antennas and improving the isolation between ports. A two-element, low-profile, high-bandwidth, dual-polarized, and four-port MIMO microstrip antenna design usable for 5G wireless communication systems has been designed and produced using techniques such as Defected Ground Structure (DGS) and neutralization line. Measurements have been conducted, and the bandwidth and port isolation values have been compared with simulation results.

Science Code	:	93415
Key Words	:	5G, Multiple Input Multiple Output, microstrip antenna, Defected Ground Structure, neutralization line.
Page Number	:	68
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kapsamında bana her konuda destek olan, beni hep bir adım daha ileriye taşımak için elinden gelen tüm desteği bana sağlayan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Nursel AKÇAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yüksek lisans çalışmamı destekleyen ASELSAN A.Ş.'ye ve ASELSAN Akademi'ye, değerli ekip liderim Eren KARAGÖZLÜ'ye ve her daim farklı bir bakış açısı ve tecrübeleriyle sıkıştığım her anda yardımıma koşan değerli meslektaşım Ali Furkan ASLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatımın her döneminde yanımda olan, beni destekleyen ve fikir dünyamın oluşmasında büyük payı olan annem Aysun ER'e ve konuşmaya gerek duymadan kendimi anlatabildiğim sevgili kardeşim İlayda ER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. 5G HABERLEŞME TEKNOLOJİSİ 5

3. MİKROŞERİT DİZİ ANTENLER VE MIMO YAPILAR 9

3.1. Mikroşerit Anten Tasarımı 9

3.1.1. Mikroşerit anten boyutlarının belirlenmesi 10

3.1.2. Mikroşerit anten besleme yöntemleri 11

3.2. Dizi Antenler 13

3.3. Çoklu Giriş Çoklu Çıkışlı Antenler 15

3.4. Mikroşerit Anten Tasarımı 16

4. ANTEN TASARIMI VE SİMÜLASYON SONUÇLARI 19

4.1. Tek Anten Tasarımı 19

4.2. İki Elemanlı MIMO Anten Tasarımı 24

4.3. Tasarlanan MIMO Anten Parametrelerinin İyileştirilmesi 27

5. ANTEN ÜRETİMİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI 37

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 49

KAYNAKLAR 53

Sayfa

EKLER..... 57

EK-1. Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları 58

ÖZGEÇMİŞ 68

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Tasarlanan ilk tek elemanlı anten parametreleri 22

Çizelge 4.2. İlk tasarlanan MIMO anten *S*-parametre değerleri 26

Çizelge 4.3. İkinci aşama DGS içeren antenin *S*-parametre değerleri 30

Çizelge 4.4. İkinci aşama DGS ve nötralizasyon hattı içeren antenin *S*-parametre değerleri 32

Çizelge 4.5. Tasarımın sonlandığı antenin *S*-parametre sonuçları ve ilk tasarlanan MIMO anten ile karşılaştırma tablosu 34

Çizelge 4.6. Tasarımın sonlandığı antenin kazanç değerleri ve ilk tasarlanan MIMO anten ile karşılaştırma tablosu 36

Çizelge 5.1. Tasarlanan antene ait S11, S22, S33 ve S44 sonuçlarının karşılaştırma tablosu 46

Çizelge 5.2. Tasarlanan antene ait S21, S31, S41, S32, S42 ve S43 sonuçlarının karşılaştırma tablosu 47

Çizelge 5.3. Literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma tablosu 48

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. 5G haberleşme teknolojisinin özellikleri 5
Şekil 2.2. Nesilden nesile gelişen haberleşme teknolojileri 7
Şekil 3.1. Mikroşerit anten katmanları 9
Şekil 3.2. Koaksiyel besleme 11
Şekil 3.3. Mikroşerit hat ile besleme 12
Şekil 3.4.Yakınlık kuplajlı besleme 12
Şekil 3.5. Açıklık kuplajlı besleme 13
Şekil 3.6. İki tane sonsuz küçük dipol ile oluşturulan dizi 14
Şekil 3.7. MIMO anten kullanılan sistem yapısı 15
Şekil 3.8. Bozulmuş Toprak Yüzey geometrileri 17
Şekil 3.9. DGS için eşdeğer RLC Devresi 17
Şekil 3.10. Nötralizasyon hattı 18
Şekil 4.1.Tasarlanan ilk tek elemanlı anten 21
Şekil 4.2. Tasarlanan ilk tek elemanlı antenin *S*-parametreleri 22
Şekil 4.3. Tek elemanlı üretilebilir anten 23
Şekil 4.4. Tek elemanlı üretilebilir antenin *S*-parametreleri 24
Şekil 4.5. İlk tasarlanan MIMO anten 25
Şekil 4.6. İlk tasarlanan MIMO anten *S*-parametre grafiği 26
Şekil 4.7. İlk tasarlanan MIMO antenin kazanç simülasyon sonuçları 27
Şekil 4.8. Birinci aşama DGS içeren anten 28
Şekil 4.9. İkinci aşama DGS içeren anten 29
Şekil 4.10. İkinci aşama DGS içeren antenin *S*-parametre grafiği 29
Şekil 4.11. İkinci aşama DGS ve nötralizasyon hattı içeren anten 31
Şekil 4.12. İkinci aşama DGS ve nötralizasyon hattı içeren antenin *S*-parametre grafiği 31
Şekil 4.13. Tasarımın sonlandırıldığı anten 33
Şekil 4.14. Tasarımın sonlandırıldığı antenin *S*-parametre grafiği 34
Şekil 4.15. Tasarımın sonlandığı MIMO antenin kazanç simülasyon sonuçları 35

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.1. Tasarımın sonlandığı MIMO antenin kazanç simülasyon sonuçları 37
Şekil 5.2. Üretilecek antenin gerber görüntüsü..... 38
Şekil 5.3. Üretimi tamamlanan anten..... 39
Şekil 5.4. Üretimi tamamlanan anten ölçümleri 40
Şekil 5.5. S11 karşılaştırma grafiği..... 41
Şekil 5.6. S22 karşılaştırma grafiği..... 41
Şekil 5.7. S33 karşılaştırma grafiği..... 42
Şekil 5.8. S44 karşılaştırma grafiği..... 42
Şekil 5.9. S21 karşılaştırma grafiği..... 43
Şekil 5.10. S31 karşılaştırma grafiği..... 43
Şekil 5.11. S41 karşılaştırma grafiği..... 44
Şekil 5.12. S32 karşılaştırma grafiği..... 44
Şekil 5.13. S42 karşılaştırma grafiği..... 45
Şekil 5.14. S43 karşılaştırma grafiği..... 45

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
C	Kapasitans
dB	Desibel
dBi	İzotropiğe Göre Desibel
Gbps	Gigabits per second
GHz	Gigahertz
h	Alttaşın Yüksekliği
Hz	Hertz
k	Faz Sabiti
Kbps	Kilobits per second
KHz	Kilohertz
Km^2	Kilometre kare
L	Antenin uzunluğu
L	Endüktans
Mbps	Megabits per second
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
N	Anten Dizisinde Bulunan Anten Elemanı Sayısı
oz	Ons
R	Direnç
r	Mesafe
t	Bakır Yüzeylerin Kalınlığı
tan δ	Dağılım Faktörü
W	Anten Elemanının Genişliği
Z_0	Besleme Hattının Karakteristik Empedansı
Z_a	Antenin Karakteristik Empedansı

Simgeler	Açıklamalar
Z_q	Çeyrek Dalga Boyu Besleme Hattının Karakteristik Empedansı
β	Faz Farkı
η	Öz Empedans
λ	Lamda
μ_0	Boş Uzay Manyetik Geçirgenliği
Ω	Ohm
$\vec{E}$	Elektrik Alan Vektörü
I_0	Uyarım Akımının Genliği
f_r	Rezonans Frekans
v_0	Boş Uzay Işık Hızı
ΔL	Saçaklanmaya Bağlı Olan Uzunluk Değişimi
ε_0	Boş Uzay Elektrik Geçirgenliği
ε_r	Dielektrik Sabiti
ε_{reff}	Etkin Dielektrik Sabiti

Kısaltmalar	Açıklamalar
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project
3GPP2	The 3rd Generation Partnership Project 2
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
BTY	Bozulmuş Toprak Yüzey
CBRS	Citizens Broadband Radio Service
CDMA	Code Division Multiple Access
CDMA2000	Code Division Multiple Access 2000
DF	Dizi Faktörü
DGS	Defected Ground Structure

Kısaltmalar	Açıklamalar
EDGE	Enhanced Data Rate for Global Evolution
eMBB	enhanced Mobile BroadBand
ESSS	Earth Exploration Satellite Service
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FR-1	Frequency Range-1
FR-2	Frequency Range-2
GPRS	General Packet Radio Service
GSA	Global Mobile Suppliers Association
GSM	Global System for Mobile Communications
HSCSD	High-Speed Circuit - Switched Data
IMT-2000	International Mobile Telecommunications - 2000
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommuncation Union-Radiocommunication
LTE	Long Term Evolution
MASSIVE MIMO	Massive Multiple Input Multiple Output
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMS	Multimedia Messaging Service
mMTC	Massive Machine Type Communication
NTR	Nötralizasyon
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCB	Printed Circuit Board
SMS	Short Messaging Service
***S*-parametre**	Yayılım parametre
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
Urllc	Ultra Reliable Low Latency Communication
W-CDMA	Wideband - Code Division Multiple Access

1. GİRİŞ

İlerleyen teknolojiyle beraber artan haberleşme ihtiyacı, üretici ve kullanıcı sayısındaki artış ve kullanıcı taleplerinin değişmesi haberleşme alanındaki gelişmeleri zorunlu kılmıştır. Kullanılan mevcut sistemlerden daha gelişmiş bir haberleşme altyapısının sağlanabilmesi için günümüzde yeni mobil kablosuz haberleşme standartları geliştirilmektedir [1]. Kullanımı henüz devam eden 4. nesil haberleşme standardı (4.Generation- 4G) gün geçtikçe kullanıcılar tarafından beklenen veri transferindeki gecikmenin azaltılması, yüksek veri hızlarının ve yüksek bant genişliğinin sağlanması, çoklu ve hızlı veri aktarımı desteğinin kullanıcılara sunulması vb. gereksinimleri karşılayamamakta ve yine artan kullanıcı miktarı ve haberleşme taleplerinden dolayı 4G haberleşmesi için kullanılan frekans bandının spektral verimliliğinin düştüğü gözlenmektedir [2]. Artan beklentilerin karşılanamaması 4G standardının daha da geliştirilmesini, 5G standardının ortaya çıkmasını zorunlu hale getirmiştir. Standartlaştırılma çalışmalarının henüz sürdürüldüğü 5G haberleşmenin yüksek veri hızlarını desteklemesi, yüksek kanal kapasitesine sahip olması, veri iletiminde düşük gecikme ve düşük güç tüketimi gibi temel özelliklere sahip olması ve milimetre dalga bandı olarak nitelendirilen 24 - 71 GHz arasındaki frekans spektrumlarının kullanıma açılması beklenmektedir [2, 3]. 5G haberleşmenin hedeflenen özelliklerinin sağlanabilmesi ancak bu gereksinimlere uygun; yüksek bant genişliklerini destekleyen, yüksek kazançlı, aynı anda birden fazla kullanıcıyı destekleyebilecek, kolay üretilebilir ve maliyet etkin antenlerin kullanımıyla mümkün olacaktır. Bu sebeple günümüzde değişen haberleşme ihtiyaçlarına yönelik anten tasarımlarının da geliştirilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Literatürde tüm bu gereksinimlerin; genel olarak düşük profilli, kolay üretilebilir ve maliyet etkin bir çözüm sunduğu için MIMO mikroşerit antenlerle sağlanabildiği gözlenmektedir.

Mikroşerit anten alt ve üst yüzeylerindeki iletken materyal arasında bir veya birden fazla dielektrik özellikli alttaş katmanı bulunan, üst yüzeyindeki yama adı verilen iletken yüzeyi ile ışıma yapan bir anten çeşididir [4]. Birçok geometrik şekillerde tasarlanabilen ve çokça besleme yöntemi olan mikroşerit antenler, literatürdeki tasarımlarda sıkça tercih ediliyor olsa da göreceli olarak düşük bant genişliğine ve düşük kazanca sahiptirler. Bu dezavantajların azaltılması için kalın alttaş malzemenin kullanılması, dielektrik sabiti düşük alttaş malzemenin kullanılması veya birden fazla katmanlı, birden fazla alttaş yüzeyinin olduğu, yapılar anten tasarımlarında tercih edilmektedir. Bu geleneksel yöntemlere ek olarak son

zamanlarda bant genişliğinin arttırılması amacıyla bozulmuş toprak yüzey (Defected Ground Structure- DGS) de yöntemi kullanılmaktadır.

Çoklu giriş çoklu çıkışlı (Multiple Input Multiple Output - MIMO) antenler bir anten üzerinde birden fazla sinyal portunun olduğu antenlerdir. Bu portlar sistem gereksinimlerine göre alıcı veya gönderici olarak kullanılabilir. MIMO antenlerin 5G sistemlerle beraber kullanılması; dizi yapıda tasarlanan çok elemanlı anten yapılarında her bir anten elemanının ayrı ayrı yönetilmesine olanak sağlaması, dizi yapıda tek noktadan beslenen antenlere göre daha az kapasite problemiyle karşılaşılması, tek elemanlı anten yapılarına göre daha yüksek kazanç ve bant genişliğinin sağlanması gibi avantajları beraberinde getirir. Buna karşın 5G sistemlerde kullanılan MIMO antenlerin en büyük dezavantajı portlar arası izolasyonun sağlanabilmesidir. Bu dezavantajın üstesinden gelebilmek için yine DGS yöntemi ve nötralizasyon hattı yöntemleri kullanılabilir.

Nötralizasyon hatları, MIMO antenlerde portlar arası istenmeyen etkileşimleri en aza indirmek amacıyla kullanılır. Nötralizasyon hatları, dizi yapıdaki anten elemanları arasındaki uzaklık, elemanların yerleşimi ve elemanlara ait portların konumları gibi faktörlere bağlı olarak değişik şekillerde tasarlanır. Doğru bir şekilde tasarlanan nötralizasyon hattı, MIMO sistemlerindeki anten elemanlarının performanslarını arttırır, anten elemanları ve portlar arası istenmeyen etkileşimleri minimuma indirger [5, 6].

DGS yöntemi, anten boyutlarının küçültülmesi, harmoniklerin azaltılması, çapraz polarizasyon yayılımlarının azaltılması, dizi antenlerde karşılıklı kuplajın azaltılması, dairesel polarizasyonda yayılım yapılması, birden fazla rezonans frekansına sahip anten tasarlanabilmesi ve bant genişliğinin arttırılması amacıyla kullanılır. DGS yöntemi, doğrudan bir iletim hattının altındaki toprak yüzey üzerinde açılan geometrik desenlerin antenin oluşturduğu elektromanyetik dalgaların dağılımını ve yayılımı değiştirmesiyle elde edilen bir optimizasyon yöntemidir [7].

Yapılan literatür taramalarında 5G sitemlerinin çalışması planlanan frekans bandının FR-1 ve FR-2 olarak ikiye ayrıldığı, FR-1 bandının 410 MHz ile 7,125 GHz arasını ifade ettiği, FR-2 ise 24,25 GHz ile 52,5 GHz arası bandı ifade ettiği gözlenmiştir. 5G'den önceki haberleşme standartlarının genel olarak FR-1 bandında olmasının, bu bandın spektral verimliliğinin düşmesine sebep olduğu ve ilgili bölgede artık neredeyse hiç yer kalmadığı

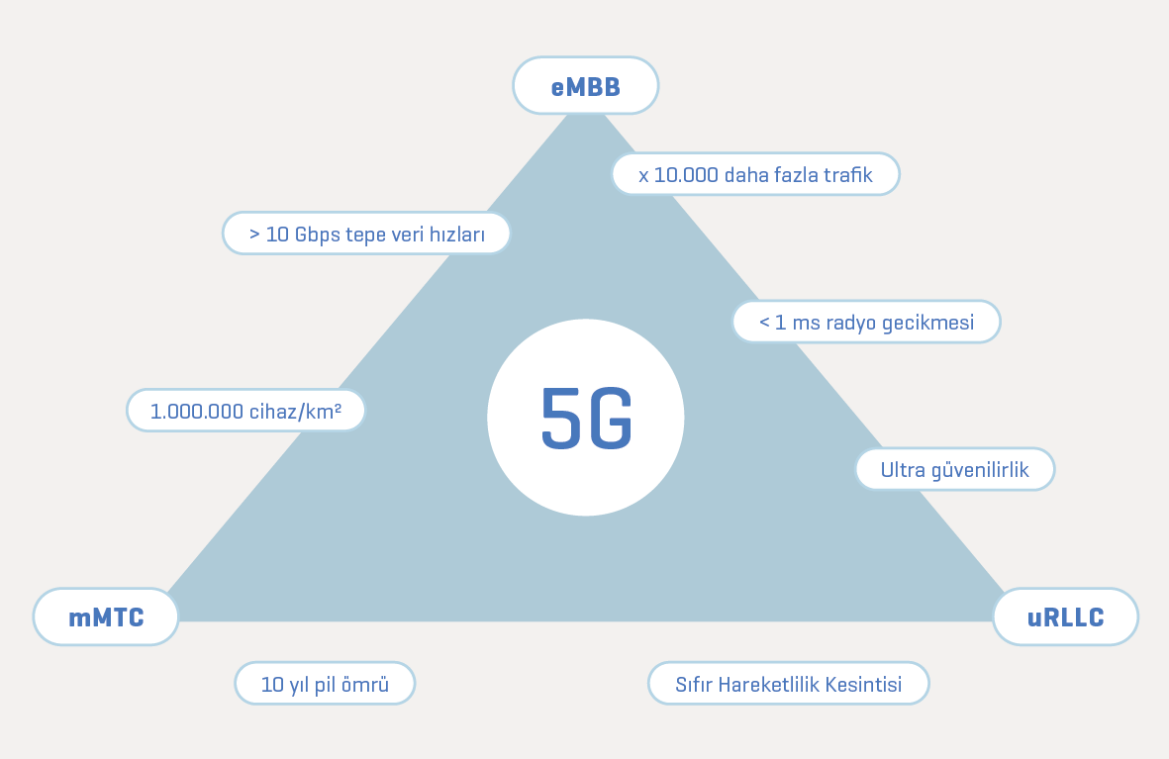
değerlendirilmiş, FR-2 olarak adlandırılan mmDalga boyundaki frekansları içeren bölgenin kullanıma açılmasıyla bu alanda hayatımıza birçok yenilik gireceği ve bu bantta çalışma yapmanın uygun olduğuna karar verilmiş, ilgili tasarımın en az 25 - 26 GHz aralığını kapsaması hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı 5G haberleşme sistemlerinde kullanılabilecek iki elemanlı, dizi anten yapısında, düşük profilli, yüksek bant genişliğine sahip, çift polarizasyonda yayın yapabilen ve dört portlu MIMO özelliklerine sahip üretilebilir bir mikroşerit anten tasarımının yapılmasıdır. Tasarımı hedeflenen MIMO antenin minimum 25 - 26 GHz aralığında, doğrusal (linear) olarak çift polarizasyonda çalışması ve yama yapıların çeyrek dalga boyu (0,25 λ) mesafeyle yerleştirilmiş olmalarına rağmen portlar arası izolasyonun -20 dB değerinden daha iyi olması amaçlanmıştır.

Tezin içeriği altı ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, MIMO mikroşerit antenler, bant genişliğinin arttırılması ve portlar arası izolasyonlarının iyileştirilmesi, DGS ve nötralizasyon hattı teknikleri ile ilgili literatürdeki çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir. İkinci bölümde 5G haberleşme teknolojisinin getireceği yenilikler bir önceki nesil haberleşme yöntemleriyle kıyaslanarak anlatılmıştır. Tezin üçüncü bölümünde mikroşerit antenler hakkında bilgiler verilmiş olup güçlü ve geliştirmeye açık özellikleri değerlendirilmiştir. Aynı zamanda dizi yapıdaki mikroşerit antenler ve MIMO antenler hakkında bilgiler verilmiş olup MIMO antenin 5G haberleşme sistemlerinde kullanım alanları incelenmiştir. MIMO antenin gelişime açık yönlerinin iyileştirilmesi için kullanılan DGS yöntemi ve nötralizasyon hattı yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir. Tezin dördüncü bölümünde önerilen anten tasarımının süreci anlatılmış, CST simülasyon programından elde edilen çıktılar verilmiş, analiz edilmiştir. Beşinci bölümde tasarımı tamamlanan anten üretilmiş ve üretilen antenin yayılım (S) parametre ölçümleri verilmiştir. Bir önceki bölümde verilen simülasyon sonuçlarıyla ölçüm sonuçları karşılaştırılmış, tasarım sonucunda elde edilen antene ait özellikler literatürdeki diğer tasarımlarla kıyaslanmıştır. Tezin son bölümü olan altıncı bölümde ise tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirilerek elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde tez çalışması ve sonuçlarının değerlendirilmesi yapılarak gelecek çalışmalar için öneriler verilmiştir.

2. 5G HABERLEŞME TEKNOLOJİSİ

5G haberleşme teknolojisi, günlük yaşamda kullandığımız tüm nesnelerin birbirleriyle bağlantılı olmasını hedefleyen, yüksek hız, düşük gecikme, çok daha güvenilir haberleşme ve yoğun bağlantı kapasitesi gibi yetenekleri bünyesinde barındıran yeni nesil bir haberleşme yöntemidir [8]. 5G'nin Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union – ITU)'ne göre kullanım senaryoları üç temel üzerine oturtulmuştur. Bunlardan ilki hareketli sistemlere 4G'nin sağladığı veri hızına göre daha yüksek veri hızlarının sağlanabildiği geniş bantlı haberleşmedir. İkincisi, kullanıcılara ait km^2 başına 1.000.000 aygıtın bağlantısının sağlanmasıdır. Üçüncüsü ise 4G'de daha önce bulunmayan yüksek güvenlikli düşük gecikmeli haberleşme senaryosudur. Bu senaryonun fabrika otomasyonlarında, akıllı elektrik dağıtım şebekelerinde, akıllı trafik ağlarında vb. çok sayıda uygulama için kullanılacağı değerlendirilmektedir (Şekil 2.1) [8].



Şekil 2.1. 5G haberleşme teknolojisinin özellikleri [8]
eMBB: Gelişmiş mobil geniş bant (Enhanced mobile broadBand)
mMTC: Yoğun makine tipi haberleşme (Massive machine type communication)
uRLLC: Aşırı güvenilirlikli ve düşük gecikmeli haberleşme (Ultra reliable low latency communication)

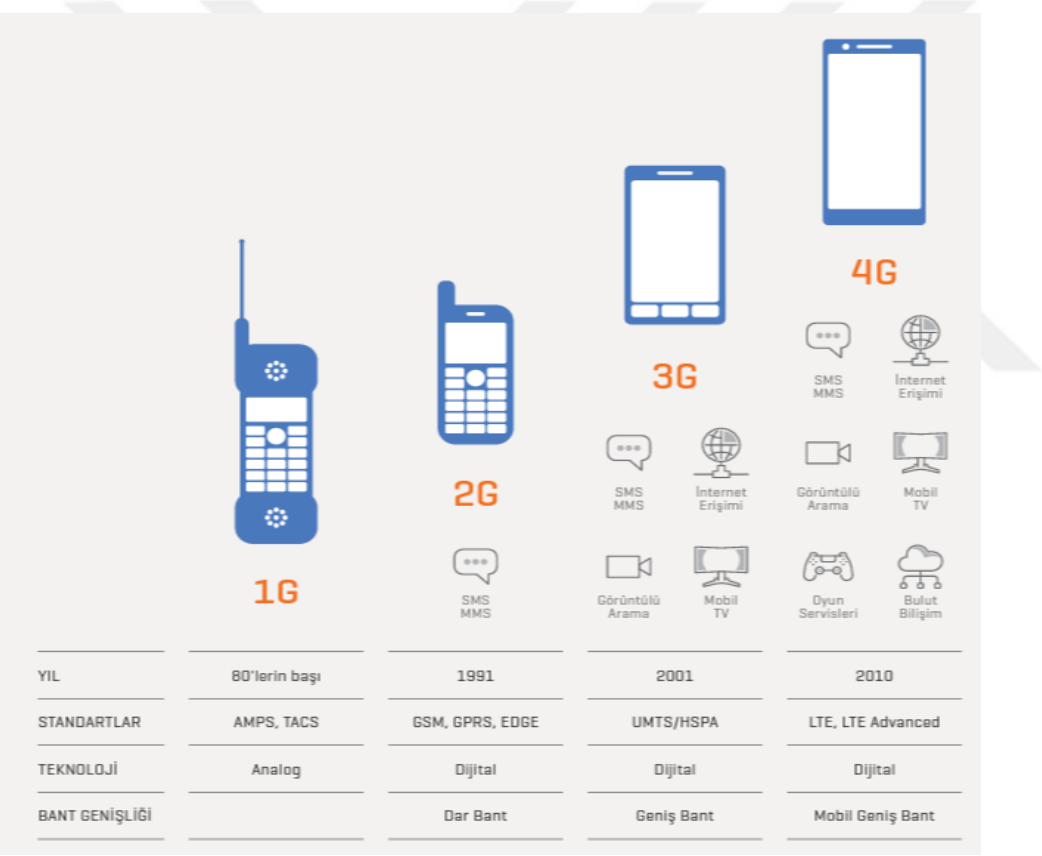
Geçmişten günümüze haberleşme teknolojileri incelendiğinde ilk olarak 1895 yılında Morse kodlarının elektromanyetik dalgaya çevrilerek noktadan noktaya aktarılmasıyla başladığı görülmektedir [2]. Devam eden çalışmalarda hücresel mobil haberleşmenin başlangıcı olarak değerlendirilen birinci nesil haberleşme yöntemi olarak standartlaştırılan 1G'nin ilk örneklerinin 1979 yılında Tokyo'da Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ile ABD'nin Chicago eyaletinde kurulan Advanced Mobile Phone Service (AMPS) sistemleri olduğu görülmektedir [2, 8]. Bu haberleşme standardında sadece ses iletiminin sağlandığı ve bunun frekans bölmeli çoklu erişim (Frequency Division Multiple Access - FDMA) tekniğiyle yapıldığı, analog modülasyon tekniklerinin kullanıldığı ve kanal başına bant genişliğinin yaklaşık 30 kHz olduğu görülmektedir [2].

2G haberleşme tekniği ise genel paket telsiz hizmeti (Global System for Mobile Communications - GSM) olarak tanımlanmış, mobil iletişimdeki devrimlerin başlangıcını oluşturmuş ve mobil haberleşme kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır [8]. Sayısal modülasyonun kullanıldığı bu haberleşme yönteminde FDMA ve zaman bölmeli çoklu erişim (Time Division Multiple Access - TDMA) kullanılmış, 200 kHz bant genişliğinde bir taşıyıcı ile sekiz kullanıcının haberleşebileceği bir yapı oluşturulmuş, ses iletiminin yanı sıra veri (Short Messaging Service - SMS ve Multimedia Messaging Service - MMS) iletimini de mümkün kılmıştır. Sonrasından yaşanan gelişmelerle aynı yapı yarı bant genişliğiyle elde edilmiş ve ilk olarak 900 MHz frekansında çalışan bu sistem sonrasında 800, 1800 ve 1900 MHz frekans bantlarını da kullanmış, başlangıçta 9,6 Kbps veri hızına sahip olan sistem geliştirilen yüksek hızlı devre anahtarlamalı veri (High-Speed Circuit-Switched Data - HSCSD) protokolü ve genel paket telsiz hizmeti (General Packet Radio Service - GPRS) protokolü ile 115,2 Kbps veri hızlarına ulaşmıştır. Küresel evrim için geliştirilmiş veri hızları (Enhanced Data Rate for Global Evolution - EDGE) protokolünün de geliştirilmesinden sonra dünya 2,5G ile tanışmış ve veri hızı 384 Kbps değerlerine kadar çıkmıştır [2].

2000 yılının başlarına gelindiğinde ise artan talepleri karşılamak adına ITU önderliğinde IMT-2000 (International Mobile Telecommunication*S*-2000) standartları geliştirilmiştir ve ortaya 3GPP (3rd Generation Partnership Project) tarafından geliştirilen geniş bant kod bölmeli çoklu erişim (Wideband Code Division Multiple Acces - WCDMA) tekniği ve 3GPP2 tarafından geliştirilen kod bölmeli çoklu erişim 2000 (Code Division Multiple Acces 2000 - CDMA2000) teknikleri çıkmıştır. Bu teknikler sayesinde 3G veri hızı 2 Mbps'ye kadar ulaşmış, gerçek zamanlı uygulamalar için kullanılır duruma gelmiş, sabit kullanıcılara

sağlanabilen veri hızları; hareketli olan (mobil) ve kullanıcıların bulundukları her noktadan erişilebilir olmuştur [2, 8].

2010 yılının başlarında ise uzun vadeli dönüşüm olarak adlandırılan (Long-Term Evolution - LTE) 4G teknolojisine gelindiği zaman dik alt taşıyıcılı frekans bölmeli çoklu erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA) tekniğinin de kullanılmasıyla veri hızları sabit kullanıcılar için 1 Gbps'ye hareketli kullanıcılar için 200 Mbps'ye ulaşmış; yüksek çözünürlüklü sayısal video yayınlama, videolu görüşme, çevrimiçi uygulamalar gibi yüksek hız ve düşük gecikme gereksinimleri olan kullanımlar için uygun duruma gelmiştir [2, 8]. 1G'den 4G'ye kadar olan gelişimlerin özeti Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Nesilden nesile gelişen haberleşme teknolojileri [8]

Sürekli gelişen teknoloji, artan çevrimiçi kullanıcı sayısı, kullanıcılar tarafından talep edilen yüksek bant genişliği ve yüksek veri hızı, aynı anda çok sayıda aygıta veya kullanıcıya destek verilmesi, düşük gecikmeli haberleşme gereksinimleri ve 4G frekans bandının spektral verimliliğinin düşmesi 5G'nin geliştirilmesi için bir motivasyon kaynağı olmuş ve standartlaştırma çalışmalarına başlanmıştır. 5G'nin gelişimi ve mevcut durumu incelendiği zaman 2019 yılında 3GPP'nin 15. sürümünde 5G'nin ilk tasarımı tanımlanmış olup Uzak

Doğu ülkelerindeki ve Amerika Birleşik Devletlerindeki bazı operatörler, ilk 5G servisini kullanıcılara sağladığını açıklamıştır. Küresel mobil tedarikçiler birliği (Global Mobile Suppliers Association - GSA) tarafından aktarılan bilgilere göre, Ağustos 2021'den bu yana 72 ülkede 176 operatör 3GPP uyumlu 5G şebekesi kurulumu gerçekleştirmiştir [2, 8].

5G'nin hedeflenen özelliklere sahip olması aynı zamanda birçok farklı konseptin de gelişmesini tetiklemiştir. Bunlardan ilki 5G'nin sağlanacağı frekans aralığının diğer haberleşme nesillerine (jenerasyonlarına) göre artmış olmasıdır. 4G'ye kadar olan mobil haberleşme teknolojileri, 3 GHz altı frekans bantlarını kullanmasına karşın 5G'de 71 GHz'e kadar spektrumun genişletilmesi beklenmektedir. Güncel durumda FR-1 ve FR-2 olarak ikiye ayrılan frekans bantlarından FR-1, 410 MHz ile 7,125 GHz arasını ifade ederken, FR-2 ise 24,25 GHz ile 52,5 GHz arası bandı ifade etmektedir. FR-2 bandının üzerindeki spektrum için ise standartlaştırma çalışmaları henüz devam etmektedir [3, 8].

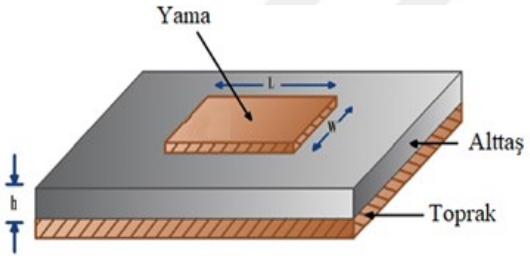
Milimetre dalga boyundaki frekans bantlarının kullanımıyla kullanılabilecek bant genişliği hücre başına 400 MHz'lere kadar çıkabilecek, böylece kapasitenin ve veri hızının artışı desteklenmiş olacaktır. Buna karşın yüksek frekanslarda çalışmanın getirdiği bir dezavantaj olarak atmosferik kayıp artmakta bu durum da yüksek kazançlı ve hüzme yönlendirme kapasitesinin yüksek olduğu antenlere olan ihtiyacı tetiklemektedir [8].

Bu sebeple gelişimi tetiklenen diğer konsept ise çok elemanlı, yüksek kazançlı Dev MIMO (Massive MIMO) antenlerin tasarlanması ve hüzme yönlendirme ile kapsamanın tek, geniş bir hüzme yerine, yönlendiriciliği yüksek birçok hüzme oluşturularak sağlanmasıdır. Sayısal veya analog olarak yönlendirilebilen anten hüzmesi ile kullanıcılara daha yüksek güçte sinyal ulaştırılabilmekte, kullanıcılar arası girişim minimuma indirilmekte ve bağlantı yoğunluğu artırılabilmektedir [2, 8].

Bir diğer konsept ise 1 ms gecikme süresine ulaşabilmek adına geliştirilen Çoklu Erişimli Uç Bilişim (Multi Access Edge Computing) teknolojisidir. Bu yöntem ile daha önceden merkezde bulunan birimlerin, merkezden uzaklaştırılarak kullanıcıların bulunduğu, verinin üretildiği yer olan şebekenin uçlarına yakınlaştırılmasıyla gecikmenin minimuma indirileceği değerlendirilmektedir [2, 8].

3. MİKROŞERİT DİZİ ANTENLER VE MIMO YAPILAR

Mikroşerit anten, alt ve üst yüzeylerindeki iletken malzeme arasında bir veya birden fazla alttaş katmanı bulunan üst yüzeyindeki yama adı verilen iletken yüzeyi ile ışıma yapan bir anten çeşididir [4]. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere antenin alt yüzeyindeki iletken yapı toprak, üst yüzeyindeki iletken kısım yama, toprak ve yama yüzey arasındaki dielektrik yapı ise alttaş olarak isimlendirilir. Temel olarak üç tabakaya sahip olan bu düşük profilli antenler öne çıktığı boyut, ağırlık, maliyet, kurulum kolaylığı ve kullanılacağı platformlar üzerinde aerodinamik profile minimum etkiye sahip olması sebebiyle yüksek performanslı uçak, uzay aracı, uydu ve füze uygulamalarında tercih edilmektedir. Birçok geometrik şekilde tasarlanabilen, birçok besleme yöntemi olan mikroşerit antenler her ne kadar sıkça tercih ediliyor olsalar da göreceli olarak verimliliklerinin düşük olduğu, düşük bant genişliğine ve düşük kazanca sahip olduğu, polarizasyon saflığı açısından istenen seviyelere çıkamadığı gözlenmektedir [9].



Şekil 3.1. Mikroşerit anten katmanları [2]

Mikroşerit antenlerin yatay ve dikey eksenler boyunca yan yana dizilmesiyle de mikroşerit dizi anten yapıları elde edilir. Sadece yatay eksende veya sadece dikey eksende dizilen mikroşerit antenler doğrusal dizileri, hem yatay hem de dikey eksende dizilen mikroşerit antenler düzlemsel dizileri oluşturur [2].

3.1. Mikroşerit Anten Tasarımı

Mikroşerit antenler tasarlanırken belirlenmesi geren üç temel parametre mevcuttur. Bunlar antenin çalışma frekansı (f_r), alttaş dielektrik sabiti (ε_r) ve alttaş yüksekliği (h)'dir. Alttaş olarak kullanılan her malzemenin faklı karakteristik özelliklerinin olması ve farklı değerlerde dielektrik sabitine sahip olması nedeniyle tasarım esnasında seçilen alttaş ve alttaş yüksekliği anten performansına büyük ölçüde etki eder. Literatürde, büyük dielektrik

sabitine sahip bir alttaşın kullanılması antenin boyutlarını küçültecek yönde etki etmesine karşın yönlülük ve kazanç değerlerini de düşürecek, antenin bant genişliğini azaltacak yöndedir. Alttaş yüksekliğinin artması durumunda ise anten boyutlarının küçüldüğü, rezonans frekansının düştüğü, yönlülüğünün, kazancının ve bant genişliğinin arttığı görülür [2].

3.1.1. Mikroşerit anten boyutlarının belirlenmesi

Mikroşerit antenin çalışma frekansı, alttaş dielektrik sabiti ve alttaş yüksekliği değerleri kullanılarak mikroşerit anten üzerindeki yamanın genişliği,

$$W_p = \frac{1}{2f_r\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} = \frac{v_0}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} \tag{3.1}$$

eşitliği ile hesaplanır [9]. Burada; yama antenin genişliği W_p, antenin rezonans frekansı f_r, serbest uzayın elektrik geçirgenliği ε_o, serbest uzayın manyetik geçirgenliği μ_o, ışık hızı v_o ve alttaşın dielektrik sabiti ε_r olarak ifade edilmiştir.

Yama üzerindeki elektromanyetik dalganın yayılımından kaynaklı olarak saçaklanma olarak isimlendirilen bir durum meydana gelir. Saçaklanmanın oluşması antenin, hesaplanan boyutlarından daha büyükmüş gibi davranmasına ve alttaşın dielektrik karakteristiğinin farklı davranmasına sebep olur. Bu yüzden yamanın uzunluğunun hesaplanabilmesi için öncelikle referans epsilon değeri (Eş. 3.2) ve saçaklanmaya bağlı uzunluğun değişimi (Eş. 3.3) hesaplanmalıdır [9]. Sonrasında mikroşerit anten üzerindeki yamanın uzunluğu Eş. 3.4'te verilen şekilde hesaplanır.

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[1 + 12\frac{h}{W_p}\right]^{-1/2} \tag{3.2}$$

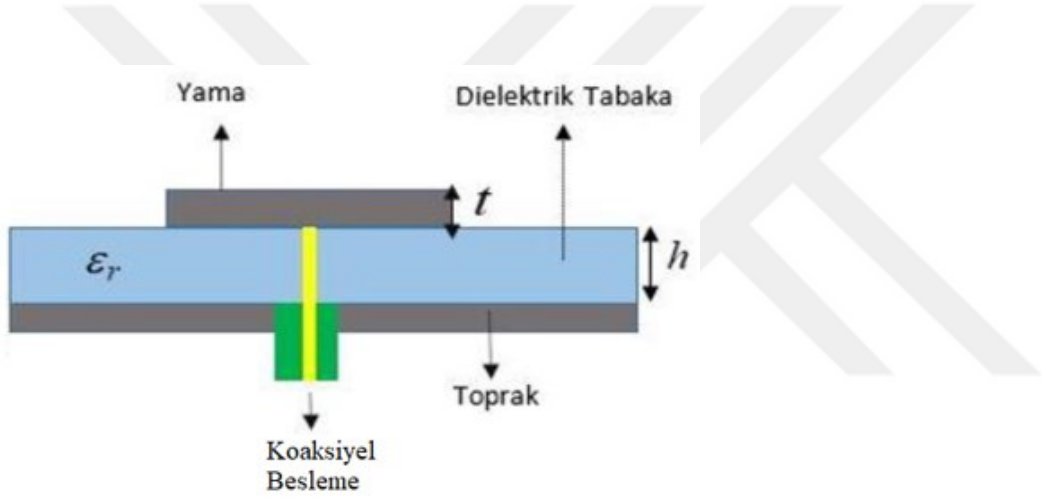
$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412\frac{(\varepsilon_{reff}+0.3)(\frac{W_p}{h}+0.264)}{(\varepsilon_{reff}-0.258)(\frac{W_p}{h}+0.8)} \tag{3.3}$$

$$L_p = \frac{1}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{reff}}\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} - 2\Delta L \tag{3.4}$$

Burada; yama antenin uzunluğu L_p, etkin dielektrik sabiti ε_{reff}, alttaşın yüksekliği h ve saçaklanmaya bağlı uzunluk değişimi ΔL'dir.

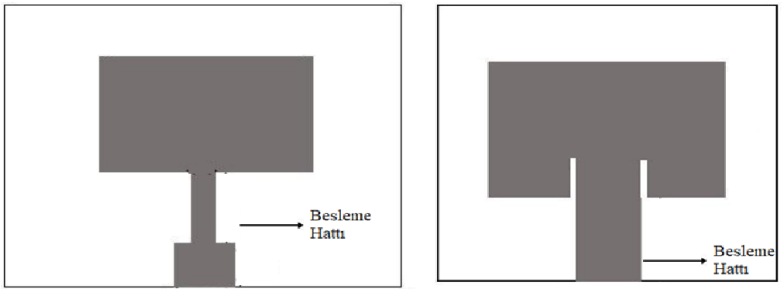
3.1.2. Mikroşerit anten besleme yöntemleri

Birçok farklı geometrik şekilde tasarlanabilen mikroşerit antenler için çok sayıda besleme yöntemi de mevcuttur. Bu yöntemlerden ilki koaksiyel besleme yöntemidir. Şekil 3.2'de verildiği üzere tasarımı ve üretimi kolay olan bu besleme yöntemi, yamanın alt kısmında belirlenen bir noktaya toprak ve alttaş içerisinden geçirilen canlı ucun doğrudan temas ettirilmesiyle oluşturulur. İzolasyon değerinin iyi olduğu bu besleme yöntemi bant genişliğinin azalmasına sebep olur [10].



Şekil 3.2. Koaksiyel besleme [10]

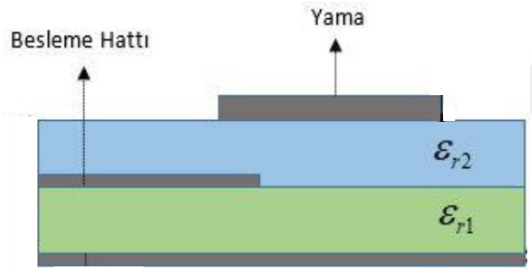
İkinci besleme yöntemi mikroşerit hat ile besleme yöntemidir. Şekil 3.3.(a)'da verilen dıştan besleme yönteminde yamanın bir kenarından alttaş yüzeyinin sonuna kadar çizilen iletken bir yol vasıtasıyla anten beslemesi yapılabilir. Bu besleme hattının 50 Ω'a uyumlandırılabilmesi için çeyrek dalga dönüşüm yöntemi kullanılabilir. Şekil 3.3.(b)'de verilen içten besleme yöntemi yama üzerine açılan oyuk ile 50 Ω'a uyumlandırılan besleme hattı üzerinden antenin beslenmesidir. Üretimi kolay olan bu besleme yönteminin 50 Ω'a uyumlandırılmasının tasarım aşamasında iyice optimize edilmesi gerekir [10].



(a) (b)

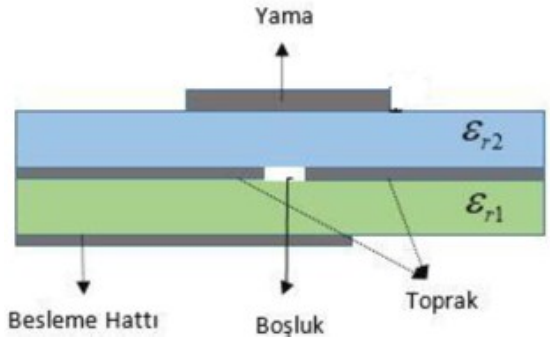
Şekil 3.3. Mikroşerit hat ile besleme; a) Dıştan besleme, b) İçten besleme [10]

Üçüncü besleme yöntemi yakınlık kuplajlı besleme yöntemidir. Şekil 3.4'de gösterilen yama ve besleme hattı arasında oluşturulan kapasitif kuplaj ile besleme yapmayı sağlayan bu yöntemin tasarımı ve üretimi nispeten zor olsa da yüksek bant genişliği sağlaması ve anten parametrelerini optimize edebilmek için farklı dielektrik malzemelerin bir arada kullanımına olanak sağlaması sebebiyle diğer besleme yöntemlerinden ayrılır [10].



Şekil 3.4.Yakınlık kuplajlı besleme [10]

Diğer besleme yöntemi ise açıklık kuplajlı besleme yöntemidir. Şekil 3.5'de gösterilen bu yöntem iki alttaş arasında bulunan oyuklu toprak yüzey ve alttaki alttaşın altında bulunan bir besleme hattından oluşur. Besleme hattına iletilen elektromanyetik dalganın oluşturduğu kuplaj etkisiyle yamanın beslenmesi sağlanır. Toprak yüzey üzerinde açılan oyuğun anten parametreleri üzerinde belirgin bir etkisi mevcuttur. Bu besleme yöntemiyle yüksek izolasyon değerlerine ulaşılsa da tasarımı ve üretimi zor olan bu besleme çeşidi diğer besleme yöntemlerine göre daha az tercih edilmektedir [10].



Şekil 3.5. Açıklık kuplajlı besleme [10]

3.2. Dizi Antenler

Dizi antenler herhangi bir anten çeşidinin yan yana dizilmesiyle elde edilen, doğrusal veya düzlemsel yapıda olan bir anten konfigürasyonudur. 5G'nin hayatımıza girmeye başlamasıyla 5G'ye uyumlu sistemlerin ihtiyaç duyduğu yüksek bant genişliğini destekleyen, yüksek kazançlı ve düşük profilli anten gereksinimleri dizi antenlerle hatta Dev MIMO adı verilen antenlerle karşılanabilmektedir [11].

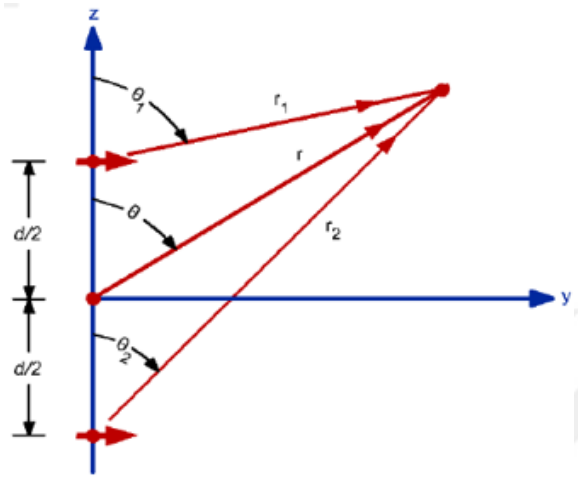
Mikroşerit antenlerin hüzmeleri 5G sistemlerde talep edilen değerlere göre daha geniş, yönlülükleri ve kazanç değerleri daha azdır. 5G'nin milimetre dalga boyunda ve geniş bir spektrumda çalışacak olması 5G sistemlerin atmosferik kayıplara karşı daha hassas olacağını, bu nedenle daha yüksek kazançlı antenlere ihtiyaç duyulacağını göstermektedir. Mikroşerit antenin boyutlarının büyütülmesiyle daha yönlü bir anten yapısı elde edilebilir, fakat bunun yerine antenlerin yan yana dizilmesiyle hem bant genişliğinin arttırılması hem düşük profilli antenlerin tasarlanması hem de kazancın yükseltilmesi sağlanabilir [2]. Antenlerin belirli mesafelerle yan yana eklenerek oluşturdukları dizi yapısındaki her bir anten elemanı anten hüzmesine belirli oranda bir katkı sağlar ve tüm elemanlar birleşerek dizi anteni oluştururlar.

Dizi anten üzerindeki eleman sayısının artması, anten performans parametrelerinin hesaplamalarını da karmaşık hale getirir. Bu nedenle dizi anten parametrelerinde dizi faktörünün hesaplanması tasarımcılara kolaylık sağlar [11].

Şekil 3.6'da verildiği üzere iki tane sonsuz küçük dipol anten dizi yapısında z eksenine yerleştirildiğinde her bir antenin elektrik alan ifadesi,

$$\vec{E} = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} cos\,\theta \tag{3.5}$$

biçiminde ifade edilir [9]. Burada; elektrik alan $\vec{E}$, birim vektör $\hat{a}_\theta$, ortamın öz empedansı η = (120π), faz sabiti k, uyartım akım genliği I_0, antenin uzunluğu l ve mesafe r'dir.



Şekil 3.6. İki tane sonsuz küçük dipol ile oluşturulan dizi [9]

Uzak alanda ise bu iki anten elemanının elektrik alan değerlerinin toplamı,

$$\vec{E}_t = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi}\left(\frac{e^{-j\left|kr_1 - (\beta/2)\right|}}{r_1}\cos\theta_1 + \frac{e^{-j\left|kr_2 - (\beta/2)\right|}}{r_2}\cos\theta_2\right) \tag{3.6}$$

Eş. 3.6'da verilen şekilde ifade edilir [9]. Burada; elemanlar arasındaki faz farkı β'dır.

Uzak alan hesaplamalarında $r_1 = r_2 = r$ ve $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ olduğu varsayıldığından Eş. 3.6 tekrar düzenlenerek

$$\vec{E}_t = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r}\cos\theta\, 2\cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta + \beta)\right] \tag{3.7}$$

elde edilir [9]. Eş. 3.7'de toplam elektrik alanın bir dipol antenin elektrik alan ifadesiyle başka bir ifadenin çarpımı olduğu görülmektedir. Bir dipol antenin elektrik alan ifadesinin dışında kalan ifade dizi faktörü (DF) olarak ifade edilir. Bu ifade normalize edilirse,

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

ifadesi elde edilir [9]. Eğer N elemanlı bir dizinin dizi faktörü hesaplanmak istenirse Eş. 3.9'de verilen ifade kullanılır [9].

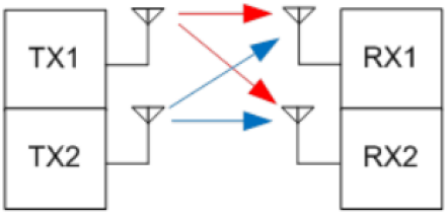
$$DF = \Sigma_{n=1}^{N} e^{j(n-1)\psi} \tag{3.9}$$

Burada;

$\psi = kd\cos\theta + \beta$ olarak ifade edilmektedir.

3.3. Çoklu Giriş Çoklu Çıkışlı Antenler

Çoklu giriş çoklu çıkışlı (MIMO) antenler kullanıldıkları sisteme aynı anda aynı veya farklı frekansta gönderme alma yeteneği kazandırabilen, her anten elemanının farklı besleme hatlarından beslendiği, yüksek bant genişliği ve yüksek kazanç özelliklerine sahip olan bir anten çeşididir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi kullanıldıkları sistem gereksinimlerine bağlı olarak hem gönderici hem alıcı olarak konfigüre edilebilen bu antenler çoklu kanaldan veri gönderimini ve alımını destekler.



Şekil 3.7. MIMO anten kullanılan sistem yapısı [11]

Haberleşme sistemlerinde veri gönderimi esnasında oluşan paket kayıpları; MIMO antenler kullanılarak farklı kanallardan gönderilebildiğinden minimize edilebilir, frekans seçici ortam etkilerinden kaçınılır, yansıma ve sönümleme etkileri en aza indirilebilir. MIMO antenler aynı anda birden fazla hüzme oluşturabildiğinden 5G sistemlerin gereksinimlerinden olan aynı anda birden fazla kullanıcıya hizmet verme gereksinimini de karşılayabilecek yapıya sahiptir. Aynı zamanda kazanç değerleri yüksek olan bu antenler kullanıldıkları sistemlerde kanal etkilerinden ve atmosferik kayıplardan en az oranda etkilenirler. Ayrıca çift polarizasyonda çalışabilecek şekilde tasarlanan MIMO antenler ile aynı frekansta farklı polarizasyonlarla veri aktarımı yapıldığı durumda, frekans bandı daha verimli kullanılarak çok daha fazla sayıda kullanıcı desteği sağlanabilir veya aynı veri paketi

farklı iki polarizasyonda alıcı sisteme iletildiğinde paket kayıplarının azaltılması da mümkün olur.

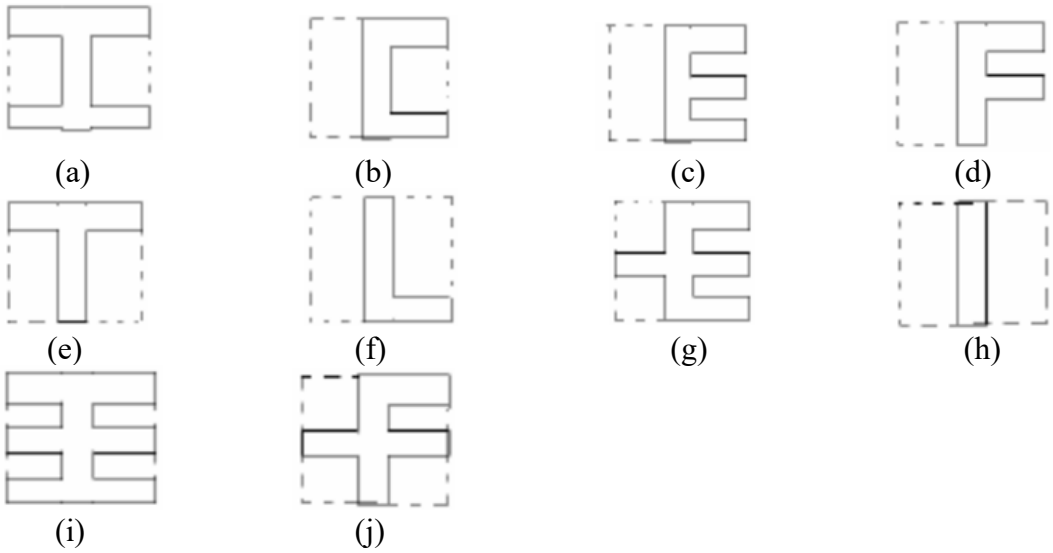
MIMO antenleri diğer dizi antenlerden ayıran en büyük özellik, her bir anten elemanının ayrı bir hatla beslenebilir olması ve bu sayede yukarıda belirtilen avantajlara ek olarak tek bir noktadan beslenen dizi antenlerde ortaya çıkabilen kapasite probleminin çok nadir ortaya çıkmasıdır [11].

MIMO antenler tekli yapıdaki mikroşerit antenlere göre yüksek bant genişliği sağlıyor olsa da bant genişliğini arttırmak ve MIMO antenlerdeki en büyük sorun olan portlar arası izolasyon değerlerini iyileştirmek önemlidir. Bunlar için kullanılan yöntemler literatürde mevcuttur.

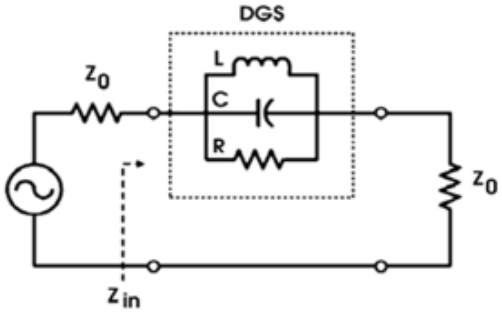
3.4. MIMO Anten Parametrelerinin İyileştirilmesi

5G sistemler için en uygun anten çeşidi olan mikroşerit MIMO antenlerin, diğer antenlere göre bant genişliği ve yüksek kazanç sağlaması tercih nedenidir. Bant genişliğinin arttırılması için geleneksel yöntemlerden olan yüksek dielektrik katsayısına sahip alttaş kullanımı veya kalın alttaş kullanımı tasarımlarda tercih ediliyor olsa da literatürde başka yöntemler de mevcuttur. Bu yöntemlerden biri DGS yöntemidir.

DGS yöntemi, anten boyutlarının küçültülmesi, harmoniklerin azaltılması, ters polarizasyon yayılımlarının azaltılması, dizi antenlerde karşılıklı kuplaj etkilerinin minimize edilmesi, dairesel polarizasyonun sağlanması, antenin birden fazla rezonans frekansını desteklemesi ve yüksek bant genişliğinin sağlanması amacıyla kullanılır [7]. Mikroşerit hat ile beslenen antenlerde iletim hattının toprak yüzeye iz düşümünün olduğu bölgeye açılan farklı desenlerdeki oyuklar antenin elektromanyetik dalga dağılımını ve yayılımını değiştirerek antenin rezonans frekansını, bant genişliğini ve eğer birden fazla port mevcutsa bu portlar arası izolasyonu büyük oranda değiştirir. Toprak yüzeye açılan oyukların basit veya karmaşık geometriye sahip olabilmesine karşın literatürde en çok kullanılan geometrik şekiller Şekil 3.8‘de verilmiş olanlardır [7, 12].



Şekil 3.8. DGS geometrileri; a) Örnek şekil 1, b) Örnek şekil 2, c) Örnek şekil 3, d) Örnek şekil 4, e) Örnek şekil 5, f) Örnek şekil 6, g) Örnek şekil 7, h) Örnek şekil 8, i) Örnek şekil 9 ve j) Örnek şekil 10 [13]



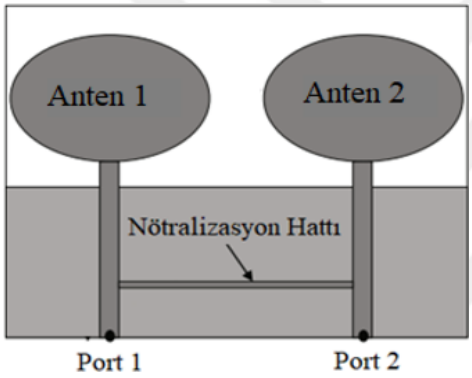
Şekil 3.9. DGS için eşdeğer RLC devresi [12]

Toprak yüzey üzerine açılan bu oyukların anten üzerindeki etkisi Şekil 3.9 'da verildiği üzere bir RLC devresiyle ifade edilir. DGS eşdeğer devresi, bağlandığı iletim hattında paralel ayarlı bir devre gibi davranır. Kaynak ve yük empedansları hat bölümünün değerleriyle aynıyken, L, C ve R değerleri, DGS yapısının boyutlarına, iletim hattı karakteristiğine ve DGS'nin eklendiği konuma göre değişir. Toprak yüzey bozulurken oluşturulan geometrik desene göre RLC devresi üzerindeki L - C oranı, bağlantı katsayısı ve diğer elektriksel parametreler farklılık gösterir. Bu sebeple anten parametreleri üzerinde etkiye sahip bölgeler üzerinde oluşturulan her geometrik desenin farklı bir karakteristiği, farklı değerlere sahip bir RLC devresi mevcuttur [7, 13].

DGS yönteminin iki temel özelliği mevcuttur. Bunlar antenin çalışma bandındaki dalga yayılım karakteristiği ve antenin çalışma bandı dışındaki bölümü, yani bant durdurma

karakteristiğidir [14]. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere DGS'ye ait eşdeğer devre kapasitans ve endüktanstan oluşan bir devredir.

Tasarım aşamasında toprak yüzeyinin oyulmasıyla oluşturulan geometrik desenler endüktansı arttıracak etkidedir, endüktanstaki bu artış dielektrik sabitini değiştirecek etkide bulunur, antenin çalışma frekansını ve bant genişliğini değiştirir. Bu nedenle anten için istenilen rezonans frekansı ve bant genişliği, toprak yüzeye eklenen geometrik şeklin çeşitli boyutları değiştirilerek elde edilebilir veya optimize edilebilir. Bant durdurma karakteristiği ise toprak yüzeye oyulan geometrik şeklin sebep olduğu endüktif etki, frekansın artmasıyla antenin reaktansını arttıracak yönde etki eder, böylece belirli frekans aralığının reddedilmesi başlatılabilir [7].



Şekil 3.10. Nötralizasyon hattı [15]

Bant genişliğinin arttırılması için kullanılan geleneksel yöntemlerin dışında kalan bir diğer yöntem ise nötralizasyon hattı yöntemidir. Nötralizasyon hattı, Şekil 3.10'da verildiği üzere yine birden fazla anten elemanının bulunduğu anten yapılarında bant genişliğini arttırmak, portlar arası istenmeyen etkileşimleri en aza indirmek ve portların 50 Ω uyumluluğunun optimizasyonu için kullanılır. Çoğunlukla DGS ile beraber kullanılan nötralizasyon hatları, anten elemanları arasındaki mesafeye, anten besleme hatları arasındaki mesafeye ve besleme portlarının yerleşimine göre farklı şekillerde tasarlanır. Doğru bir şekilde tasarlanan ve optimize edilen nötralizasyon hatları, MIMO antenlerdeki portlar üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğundan performansı arttırırlar. Antenler ile sistem arasındaki bağlantıyı iyileştirirler, portlar arasındaki ve anten elemanları arasındaki istenmeyen etkileşimleri de en aza indirgerler [5, 6].

4. ANTEN TASARIMI VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu tez çalışması kapsamında iki elemanlı, dizi anten yapısında, düşük profilli, yüksek bant genişliğine sahip, çift polarizasyonda yayın yapabilen ve MIMO özelliklerine sahip üretilebilir bir mikroşerit antenin tasarımı ve üretimi hedeflenmiştir.

Anten tasarımına öncelikle temel parametrelerin belirlenmesiyle başlanmış olup tek antenin tasarımı yapılmıştır. Tek antene ait parametreler belirlendikten sonra dizi anten yapısı oluşturulmuş, bant genişliğinin arttırılması ve portlar arası izolasyon değerlerinin en az -20 dB seviyesini sağlaması için DGS yöntemi ve nötralizasyon hattı yöntemleri tasarıma eklenmiştir. Tasarım süresince CST programı üzerinde simülasyonlar yapılmış, sonuçlar bu başlık altında verilmiştir.

4.1. Tek Anten Tasarımı

Tek anten tasarımına üç temel parametrenin belirlenmesiyle başlanmıştır. Bunlar antenin çalışma frekansı (f_r), alttaş dielektrik sabiti (ε_r) ve alttaş yüksekliği (h)'dir. Antenin minimum 25 - 26 GHz aralığında çalışması ve tasarımın üretilebilir olması hedeflendiğinden ilgili dielektrik malzemenin tedariğinin kolay olması dikkate alınmış ve alttaş olarak dielektrik katsayısı (ε_r) 2,2 olan, dağılım faktörü (tan δ) 0,0009 olan, kalınlığı 0,787 mm olan RT/duroId 5880 seçilmiştir [16]. Alttaşın alt yüzeyi olan toprak yüzeyde ve ışıma bölgesi olarak kullanılacak alttaşın üst yüzeyinde 1 oz (0,035 mm) kalınlığında bakır malzeme kullanılmasına karar verilmiştir. Temel parametrelerin belirlenmesinden sonra Eş. 3.1 – Eş. 3.4 ile tek elemanlı antenin yama boyutları belirlenmiştir. Üretim esnasında oluşabilecek hataları en aza indirmek ve tasarım kolaylığı dikkate alınarak antenin dışarıdan mikroşerit besleme ile tasarlanmasına karar verilmiştir. Dışarıdan mikroşerit besleme ile yamanın 50 Ω uyumlandırmasının yapılması için çeyrek dalga dönüşümünün kullanımına karar verilmiştir. Bu sebeple Eş. 4.1 – Eş. 4.6 kullanılarak çeyrek dalga dönüşüm hattının parametreleri hesaplanmıştır [10].

Antenin karakteristik empedansı,

$$Z_a = \frac{90\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1}\left(\frac{L_p}{W_p}\right)^2 \tag{4.1}$$

ve çeyrek dalga boyu iletim hattının karakteristik empedansı,

$$Z_q = \sqrt{Z_0 Z_a} \tag{4.2}$$

olarak ifade edilirler. Bu empedans çeyrek dalga boyu iletim hattının genişliği ile ifade edilirse,

$$Z_q = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} ln\left(\frac{8h}{W_q} + \frac{W_q}{4h}\right) \tag{4.3}$$

eşitliği elde edilir. Çeyrek dalga boyu iletim hattının uzunluğu,

$L_q = \frac{\lambda}{4}$ 'dir. (4.4)

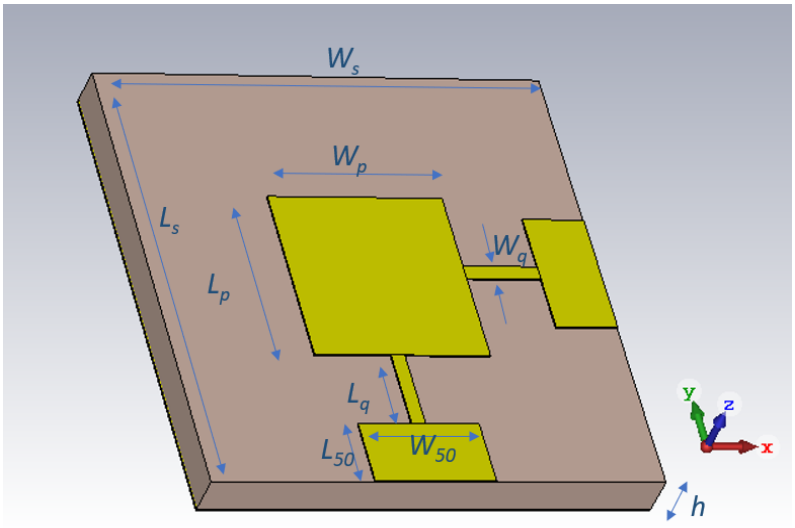
Besleme hattının karakteristik empedansı ise 50 Ω empedanslı besleme hattının genişliği ile ifade edilirse,

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{reff}\left(1.393 + \frac{w_{50}}{h} + \frac{2}{3} ln\left(\frac{w_{50}}{h} + 1.444\right)\right)}} \tag{4.5}$$

elde edilir. 50 Ω empedanslı besleme hattının uzunluğu;

$$L_{50} = \left(\frac{L_p}{\pi}\right)\left(cos^{-1}\left(\sqrt{\frac{Z_0}{Z_q}}\right)\right) \tag{4.6}$$

biçimindedir. Yukarıdaki eşitliklerde; yama antenin genişliği W_p, yama antenin uzunluğu L_p, etkin dielektrik sabiti ε_{reff}, alttaşın yüksekliği h, antenin karakteristik empedansı Z_a, besleme hattının karakteristik empedansı Z_0, çeyrek dalga boyu besleme hattının karakteristik empedansı Z_q, çeyrek dalga boyu besleme hattının genişliği W_q, çeyrek dalga boyu besleme hattının uzunluğu L_q, besleme hattının genişliği W_{50} ve besleme hattının uzunluğu L_{50} 'dur.



Şekil 4.1. Tasarlanan ilk tek elemanlı anten

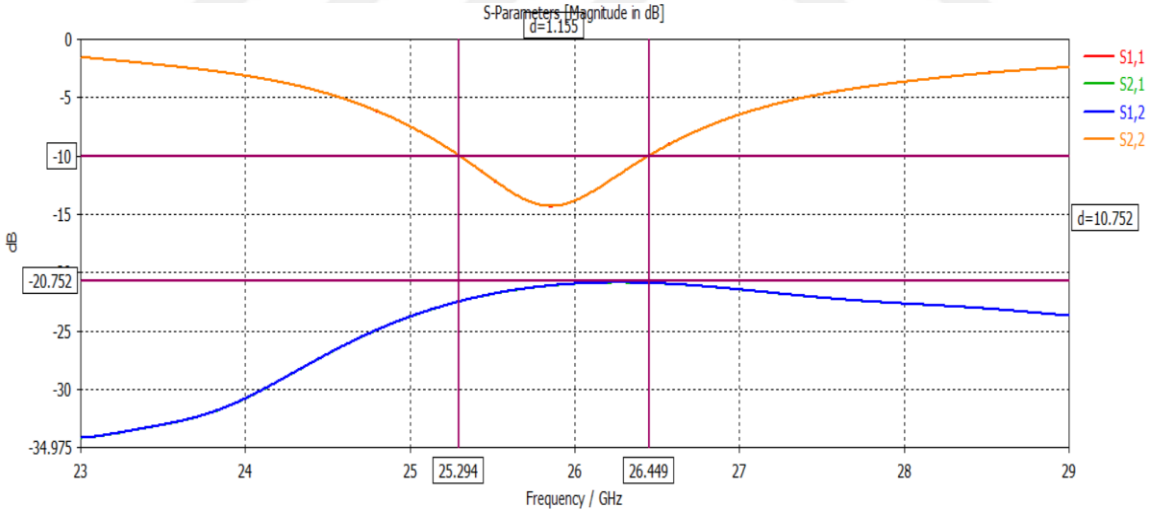
Antenin doğrusal polarizasyona sahip olması ve her iki doğrusal polarizasyon (yatay ve dikey polarizasyon) şeklinde de eş özelliklere sahip olması amacıyla, tasarımda yamanın karesel geometride olmasına karar verilmiştir. Ayrıca antenin çift polarizasyonda da çalışabilmesi amacıyla birbirine dik iki port yeri belirlenmiş, polarizasyonların kaymaması adına portların yerleri yama kenarlarının tam ortası olarak belirlenmiştir.

Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile parametrik analizler yapılarak optimum değerlere ulaşılmış, bu değerler kullanılarak Şekil 4.1'de verilen ilk tek elemanlı anten tasarımı yapılmıştır. Tasarımda kullanılan parametre değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1'de verilen değerlerle tasarlanan anten için CST programı üzerinde simülasyonlar yapılmış ve yayılım (*S*) parametreleri elde edilmiştir (Şekil 4.2). Şekil 4.2'de yatay polarizasyonda yayın yapan portun da dikey polarizasyonda yayın yapan portun da birbirine eş özelliklerde olduğu, antenin her iki polarizasyonda da 1,155 GHz bant genişliğine sahip olduğu ve portlar arası izolasyonun -20 dB'den daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1. Tasarlanan ilk tek elemanlı anten parametreleri

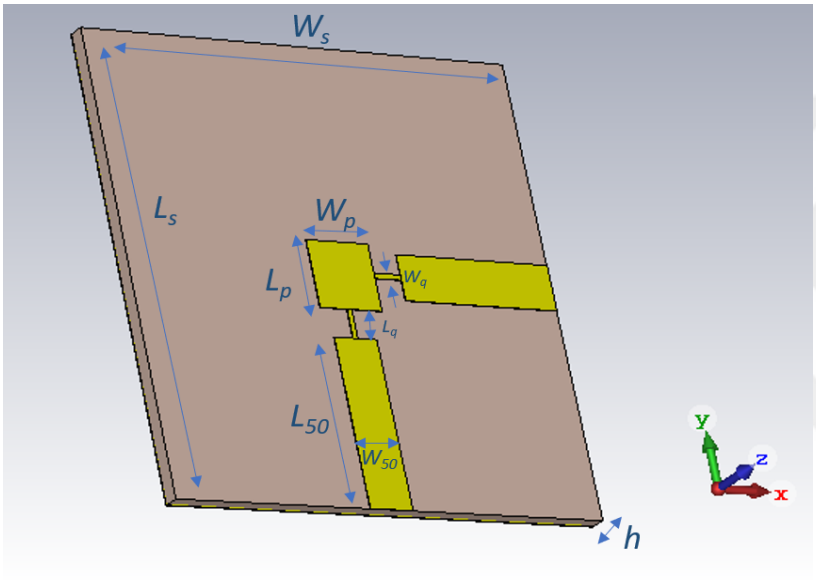
Parametre	Açıklama	Değer (mm)
W_p	Yama antenin genişliği	3,5
L_p	Yama antenin uzunluğu	3,5
W_s	Dielektrik yapının genişliği	9
L_s	Dielektrik yapının uzunluğu	9
W_q	Çeyrek dalga boyu besleme hattının genişliği	0,275
L_q	Çeyrek dalga boyu besleme hattının uzunluğu	1,5
W_{50}	50 Ω besleme hattının genişliği	2,4
L_{50}	50 Ω besleme hattının uzunluğu	1,25
h	Dielektrik yapının kalınlığı	0,787
t	Bakır yüzeylerin kalınlığı	0,035



Şekil 4.2. Tasarlanan ilk tek elemanlı antenin *S*-parametreleri

Tasarlanan antenin üretilmesi hedeflendiği için üretim sonrası kullanılacak olan konektörün de anten çalışma frekansına uygun ve anten boyutlarına etkisinin minimum olması göz önünde bulundurularak SV Microwave firmasının "SF1621-60036" üretici parça numaralı konektörü belirlenmiştir. Aynı zamanda kullanılacak olan konektörün lehimlenerek antene bağlantısının yapılmasının yüksek frekanslarda kayba yol açacağı değerlendirildiğinden ilgili konektör özellikle vida ile sıkıştırmalı olacak şekilde seçilmiştir. Konektör boyutlarına

göre antenin 50 Ω besleme hattının uzunluğu arttırılmış ve anten boyutları besleme hattının uzunluğuna göre yeniden düzenlenmiştir. Elde edilen yeni parametre değerlerinin sonucunda tek elemanlı üretilebilir antenin Çizelge 4.1'de verilen değerlerden farklı olarak $W_s = L_s = 24\ mm$, $L_{50} = 8{,}75\ mm$ alınmıştır. Değişen parametre değerlerine göre anten boyutları yeniden düzenlenerek Şekil 4.3'de verilen tasarım elde edilmiştir. Çizelge 4.1'de verilen değerlerden farklı olarak $W_s = L_s = 24\ mm$, $L_{50} = 8{,}75\ mm$ alınmıştır. Değişen parametre değerlerine göre anten boyutları yeniden düzenlenerek Şekil 4.3'de verilen tasarım elde edilmiştir.

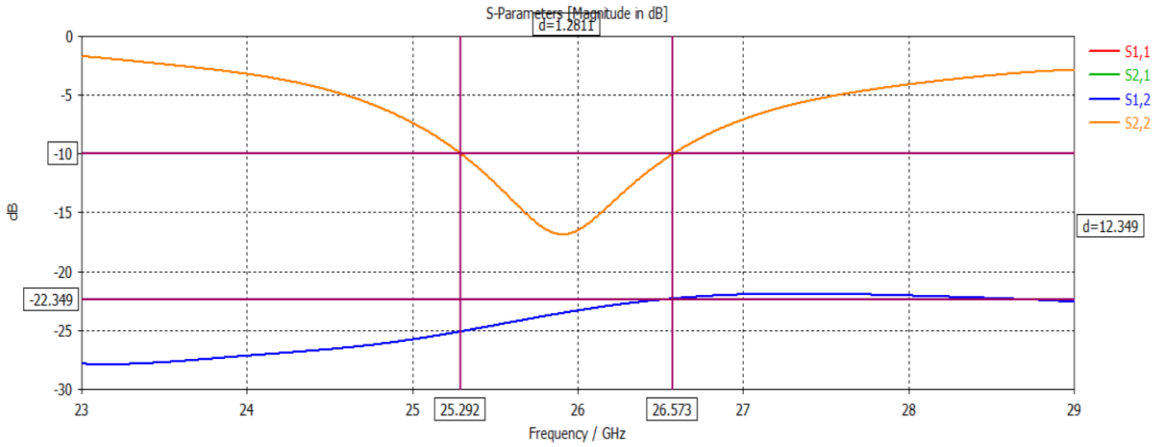


Şekil 4.3. Tek elemanlı üretilebilir anten

Anten boyutlarındaki güncellemenin ardından simülasyonlar tekrarlanmış, Şekil 4.4'de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.4'de verilen grafik incelendiğinde yatay polarizasyonda yayın yapan portu ile dikey polarizasyonda yayın yapan portun yine birbirine eş özelliklerde olduğu, antenin her iki polarizasyonda da 1,28 GHz bant genişliğine sahip olduğu ve portlar arası izolasyonun -22 dB'den daha düşük olduğu görülmektedir.

Tasarlanan ilk tek elemanlı antene ait *S*-parametre grafiğiyle (Şekil 4.2) karşılaştırıldığında benzer sonuçların alındığı görülür, tasarıma bu şekilde devam edilmiştir.

Tek elemanlı üretilebilir antenin tasarımı tamamlandıktan sonra dizi anten yapısına geçiş yapılmıştır. Tek elemanlı üretilebilir antenin yanına eş özellikli ikinci anten elemanı 0,25 λ mesafeyle yerleştirilmiştir.

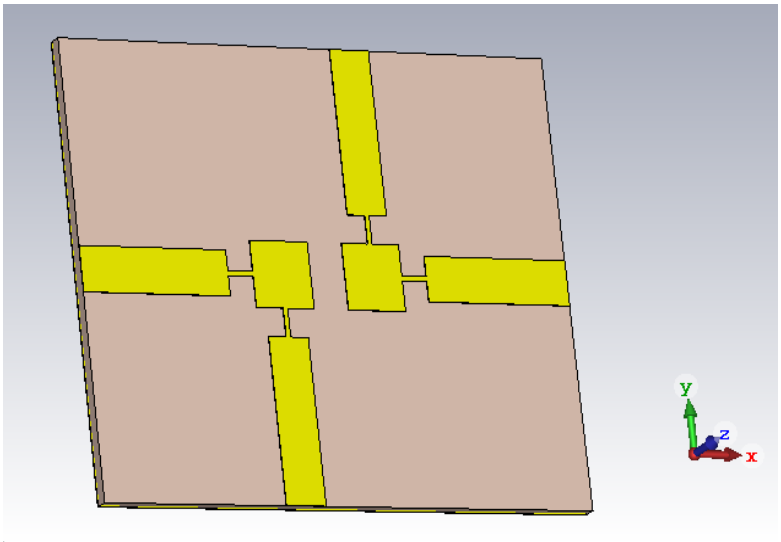


Şekil 4.4. Tek elemanlı üretilebilir antenin *S*-parametreleri

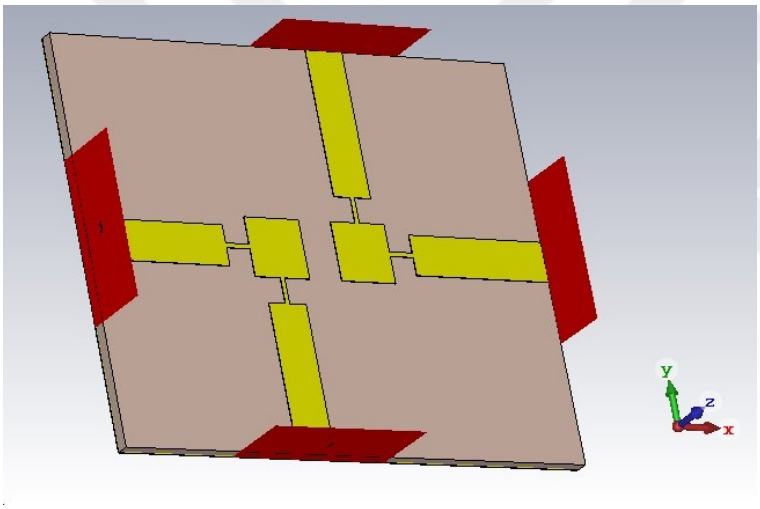
4.2. İki Elemanlı MIMO Anten Tasarımı

İki adet eş özellikli tek elemanlı üretilebilir antenin 0,25 λ mesafeyle yerleştirilmesinin ardından anten boyutları yeniden düzenlenmiş, dielektrik ve toprak yüzey boyutları tekrar ayarlanmıştır. Yenilenen boyutlarda toprak yüzeyin ve alttaş malzemenin genişliği değişmiş, (W_s=*29,58 mm* alınarak) Şekil 4.5'de verilen MIMO anten tasarımı elde edilmiştir.

Elde edilen 4 portlu, MIMO, çift polarizasyonda çalışabilen anten için CST programında simülasyonlar yapılmış ve Şekil 4.6'da verilen eğriler elde edilmiştir. Grafik üzerinde görülen *S*-parametre eğrilerine ait veriler Çizelge 4.2 'de gösterilmiştir.



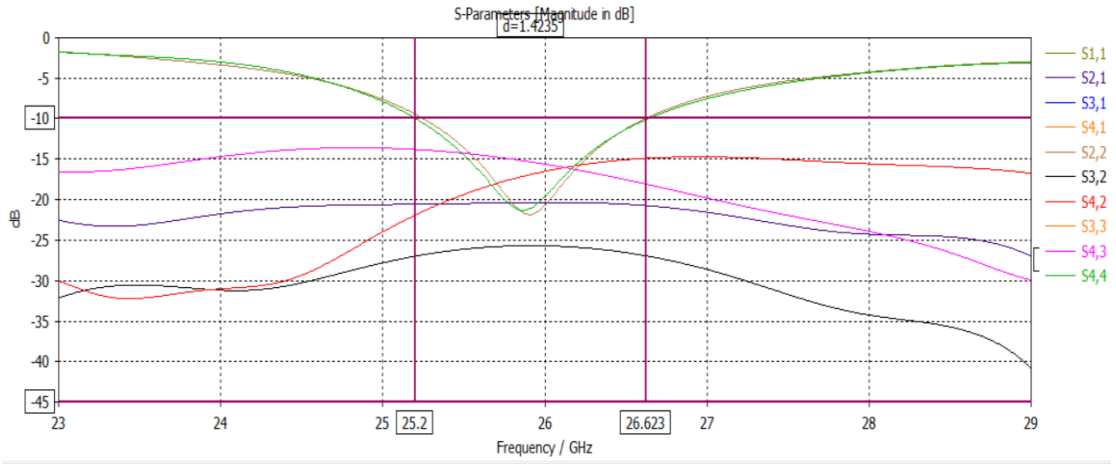
(a)



(b)

Şekil 4.5. İlk tasarlanan MIMO anten; a) Port yerleri işaretlenmemiş görsel, b) Port yerleri işaretlenmiş görsel

Portlar arası izolasyon değerlerinde 25 - 26 GHz aralığının orta noktası olan 25,5 GHz değeri referans alınarak oluşturulan Çizelge 4.2'deki değerler incelendiğine bazı portlar arası etkileşimin -20 dB'nin üzerinde olduğu, bu durumun anten performansını kötü etkileyeceği değerlendirilmiştir. Ayrıca anten bant genişliğinin de istenilen bant aralığını henüz tam olarak kapsamadığı ve bant genişliğinin düşük olduğu da değerlendirilmiştir.

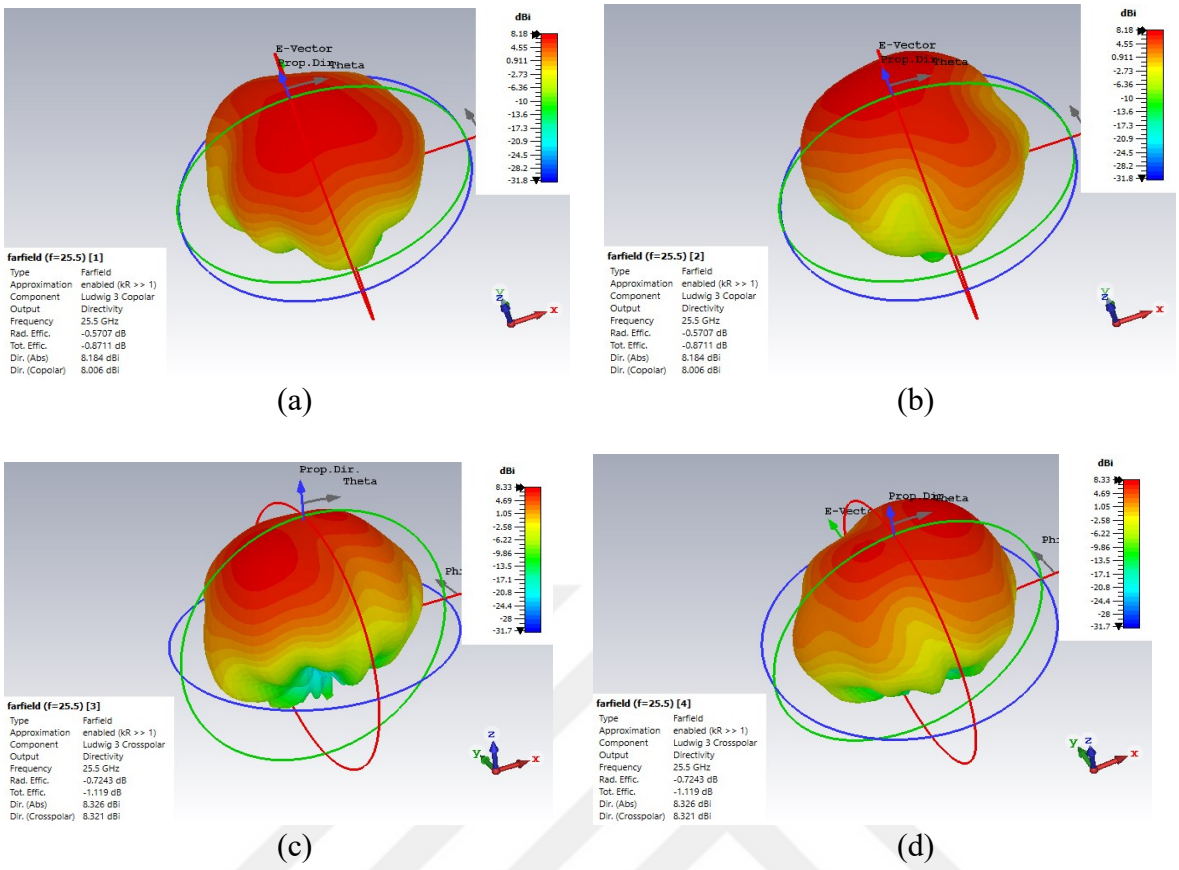


Şekil 4.6. İlk tasarlanan MIMO anten *S*-parametre grafiği

Çizelge 4.2. İlk tasarlanan MIMO anten *S*-parametre değerleri

S Parametresi	Değer	Bant Genişliği	Kazanç
S11	<-10 dB	1,38 GHz	8,18 dBi
S22	<-10 dB	1,38 GHz	8,18 dBi
S33	<-10 dB	1,44 GHz	8,33 dBi
S44	<-10 dB	1,44 GHz	8,33 dBi
S21	-20,48 dB		
S31	-19,35 dB		
S41	-26,12 dB		
S32	-26,12 dB		
S42	-19,35 dB		
S43	-14,28 dB		

Ek olarak Şekil 4.5'de verilen antene ait Şekil 4.7'de ve Çizelge 4.2'de verilen simülasyon kazanç değerleri incelendiğinde anten kazancının tüm portlar için de 8 dBi'dan daha iyi olduğu ve hüzmelerin dağınık durmadığı, anten kazancının belirli bir bölgede toplandığı görülmektedir.



Şekil 4.7. İlk tasarlanan MIMO antenin kazanç simülasyon sonuçları; a) Port 1 kazanç grafiği, b) Port 2 kazanç grafiği, c) Port 3 kazanç grafiği ve d) Port 4 kazanç grafiği

Devam eden tasarım sürecinde anten parametrelerinin iyileştirilmesi kapsamında hem -20 dB'den daha kötü izolasyona sahip portların izolasyonlarının iyileştirilmesi hem de bant genişliğinin olabildiğince arttırılması, ilgili tasarımın 5G sistemlere uygun bir çözüm sunması hedeflenmiştir.

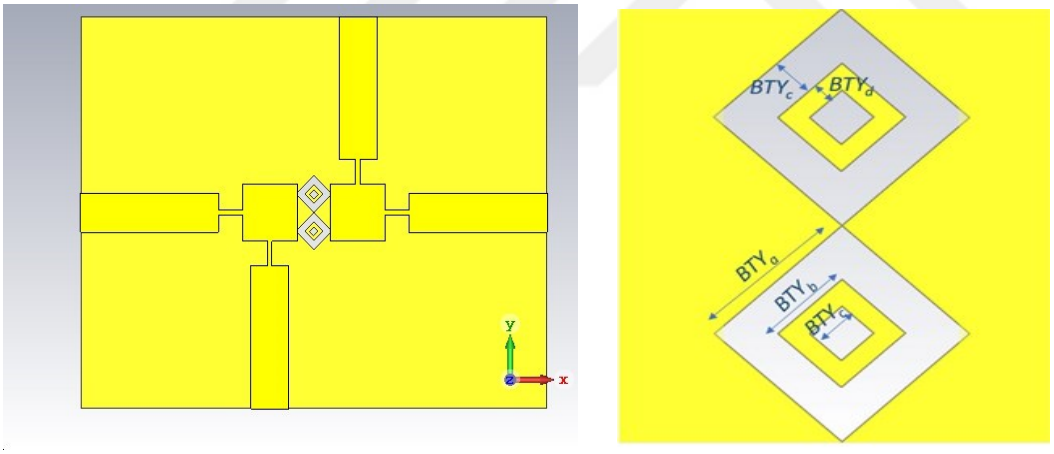
4.3. Tasarlanan MIMO Anten Parametrelerinin İyileştirilmesi

Tasarlanan MIMO antenin bant genişliğinin arttırılması ve portlar arası izolasyonun iyileştirilmesi amacıyla anten üzerine DGS yönteminin ve nötralizasyon hattının eklenmesi gerçekleştirilmiştir.

DGS yöntemi antenin toprak yüzeyine uygulanmaya başlanırken Şekil 3.8'de verilen geometrik şekillerin birçoğu hatta literatürde denenmiş başka karmaşık geometrik şekiller anten parametreleri üzerinde stratejik öneme sahip birçok nokta; örneğin yamaların arka kısımları, besleme hatlarının arka kısımları, besleme hatlarıyla yamaların birleşim noktaları

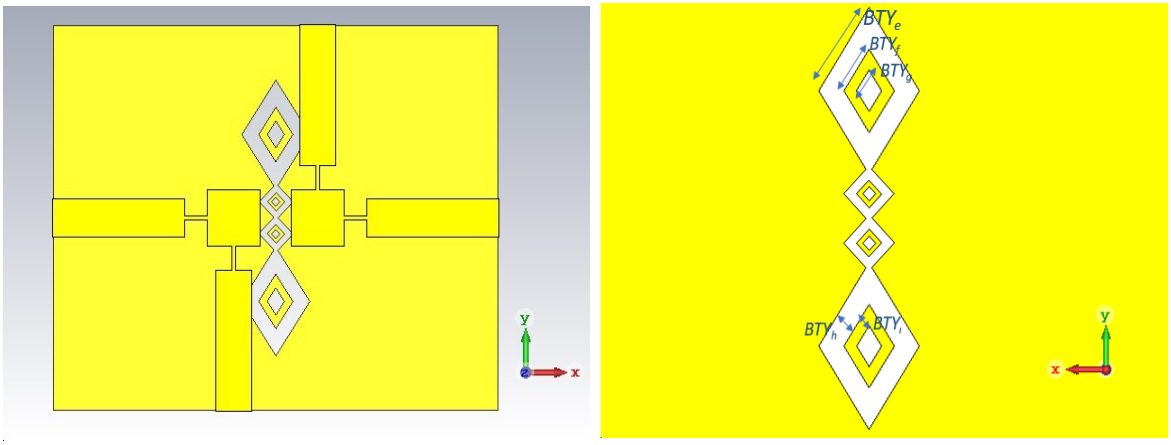
vs. üzerinde denenmiştir. Ancak antenin toprak yüzeyi üzerine oyularak eklenen geometrik desenlerden anten parametreleri üzerinde beklenen etki gözlemlenememiştir. Sonrasında bir diğer stratejik nokta olan iki yama arasında kalan bölgenin toprak yüzeyine izdüşümünün olduğu bölge üzerinde oluşturulan geometrik desenlerin anten parametrelerini değiştirdiği, uygun bir tasarım yapılırsa anten parametrelerine olumlu yönde etki edeceği görülmüştür.

Bu durumda geometrik yapılar arasında seçimler yapılmış ve en uygun şeklin karesel yapıda açılan oyuğun saat yönünde 90 derece döndürülmesiyle oluşan şekil olduğu, boyutlarının ise yapılan parametrik analizler sonucunda BTY_a=1,6 mm, BTY_b=0,8 mm, BTY_c=0,4 mm, BTY_d=0,2 mm olması gerektiği değerlendirilmiştir. Elde edilen DGS yapısı Şekil 4.8'de verilmiştir. Aynı geometrik şekil *y* ekseni boyunca sürdürülmüş, karesel geometriye sahip şeklin farklı kenarları farklı yönlere doğru farklı oranlarda değiştirilerek parametrik analizler yapılmıştır. Sonrasında 50 Ω empedansa sahip besleme hattının uzunluk - genişlik dengesi göz önüne alınarak karesel geometriden biraz uzaklaşılmış ve Şekil 4.9'da verilen yapı elde edilmiştir.



(a) (b)

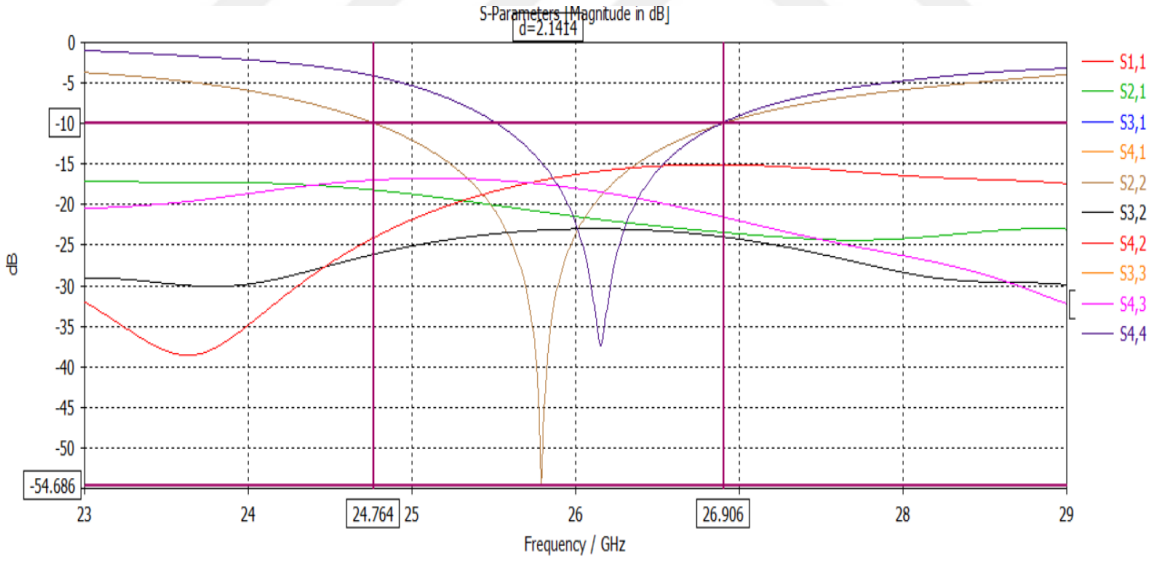
Şekil 4.8. Birinci aşama DGS içeren anten; a) DGS'nin anten elemanlarına göre konumu ve b) DGS'nin yakınlaştırılmış görüntüsü



(a) (b)

Şekil 4.9. İkinci aşama DGS içeren anten; a) DGS'nin anten elemanlarına göre konumu ve b) DGS'nin yakınlaştırılmış görüntüsü

Yeni eklenen yapıdaki değerler ise BTY_e=4,08 mm, BTY_f=2,04 mm, BTY_g=1,02 mm, BTY_h=0,98 mm, BTY_i=0,51 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım için yapılan simülasyon sonucunda elde edilen *S*-parametre grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. İkinci aşama DGS içeren antenin *S*-parametre grafiği

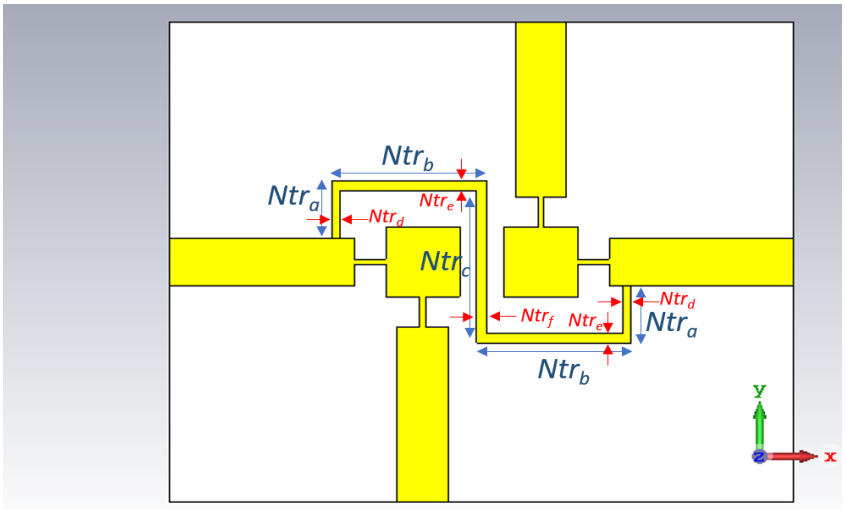
Şekil 4.10'da verilen ikinci aşama DGS içeren antenin *S*-parametre grafiğinde portlar arası izolasyonun belirlenmesi için 25 - 26 GHz aralığının orta noktası olan 25,5 GHz değeri referans alınarak oluşturulan Çizelge 4.3'deki değerler incelendiğine toprak yüzey üzerinde açılan geometrik desenlerin 1. ve 2. portların bant genişliğini arttırdığı, S11 ve S22 değerlerini -50 dB'nin daha altına indirdiği, 3. ve 4. portların bant genişliğini değiştirmese de S33 ve S44 değerlerini -35 dB'nin daha altına indirdiği gözlenmiştir. Buna karşın toprak

yüzeye eklenen bu geometrik desenlerin port izolasyonlarına da herhangi bir etkide bulunmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.3. İkinci aşama DGS içeren antenin *S*-parametre değerleri

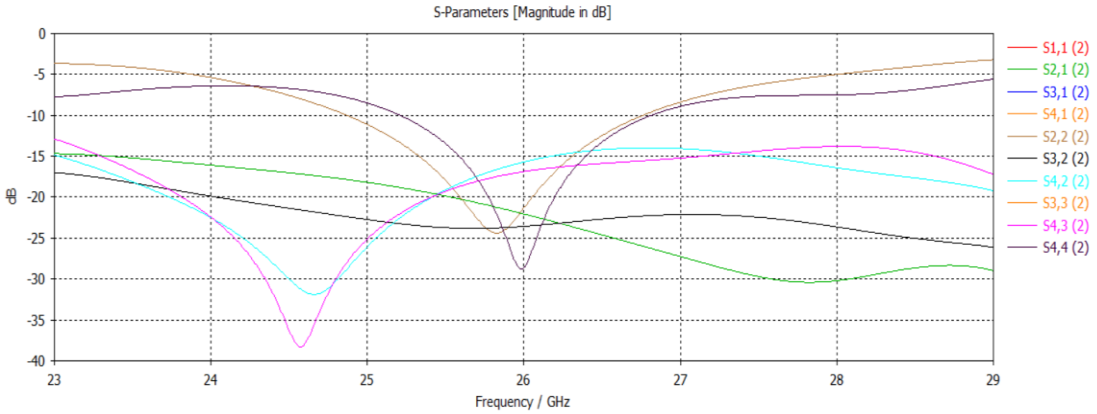
Parametre	Değer	Bant Genişliği
S11	<-10 dB	2,14 GHz
S22	<-10 dB	2,14 GHz
S33	<-10 dB	1,38 GHz
S44	<-10 dB	1,38 GHz
S21	-20,06 dB	
S31	-18,38 dB	
S41	-23,61 dB	
S32	-23,61 dB	
S42	-18,38 dB	
S43	-17 dB	

Çalışmanın devamında 3. ve 4. portların bant genişliğini arttırmak ve portlar arası izolasyon seviyelerini daha aşağı çekebilmek amacıyla tasarıma nötralizasyon hattı eklenmiştir. Eklenen nötralizasyon hattı 3. ve 4. portların 50 Ω empedansa sahip iletim hatlarını birleştirmek üzere tasarlanmıştır. Nötralizasyon hattına ait tüm uzunluk ve genişlik değerleri, ayrıca nötralizasyon hattının 3. ve 4. portların 50 Ω empedansa sahip iletim hatlarına hangi noktadan temas edeceği parametrik analizlerle optimize edilmiştir. Nötralizasyon hattına ait parametreler Ntr_a*=2,85 mm,* Ntr_b*=7,32 mm,* Ntr_c*=7,63 mm,* Ntr_d*=0,375 mm,* Ntr_e*=0,475 mm,* Ntr_f*=0,475 mm* olarak belirlenmiş ve yapılan tasarım Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. İkinci aşama DGS ve nötralizasyon hattı içeren anten

Şekil 4.11'de verilen tasarım için CST programı üzerinde yapılan simülasyon sonucunda elde edilen S-parametre grafiği Şekil 4.12'de, S-parametre grafiğinde portlar arası izolasyonun belirlenmesi için 25 - 26 GHz aralığının orta noktası olan 25,5 GHz değeri referans alındığında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4 incelendiğinde, her ne kadar 25 - 26 GHz aralığında portlar arası izolasyon değerleri çok değişmemiş gibi görünse de eklenen nötralizasyon hattıyla beraber 3. ve 4. portların bant genişliğinin arttığı ve portlar arası izolasyon eğrilerinin aşağı yönelimli olduğu Şekil 4.12'de görülmektedir. Özellikle S42 ve S43 eğrilerinin 24 - 25 GHz frekansları arasında minimum değerlere ulaştığı görülmektedir.

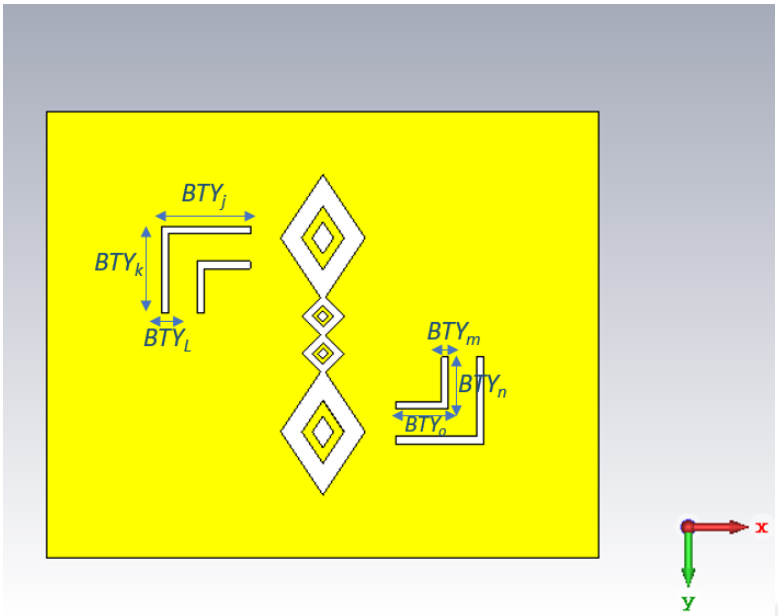


Şekil 4.12. İkinci aşama DGS ve nötralizasyon hattı içeren antenin *S*-parametre grafiği

Çizelge 4.4. İkinci aşama DGS ve nötralizasyon hattı içeren antenin *S*-parametre değerleri

Parametre	Değer	Bant Genişliği
S11	<-10 dB	1,94 GHz
S22	<-10 dB	1,94 GHz
S33	<-10 dB	1,92 GHz
S44	<-10 dB	1,92 GHz
S21	-20,6 dB	
S31	-19,28 dB	
S41	-24,32 dB	
S32	-24,32 dB	
S42	-19,28 dB	
S43	-20,36 dB	

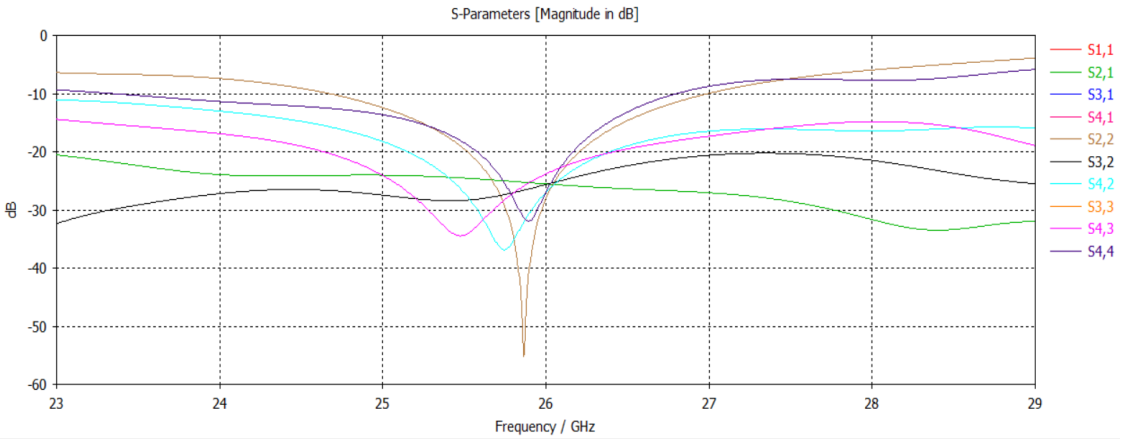
Tasarımın son aşamasına gelindiğinde ise izolasyon değerlerinin 25- 26 GHz aralığında -20 dB değerinden yüksek olan portların -20 dB değerinin altına indirilebilmesi için yeni bir DGS yapısının eklenmesine karar verilmiştir. DGS yapısı eklenmeden önce yine anten için stratejik öneme sahip olduğu değerlendirilen komşu portlar arası bölgenin uygun olduğu değerlendirilmiştir. Yine ilgili bölge üzerinde birçok DGS geometrisi denemesi ve parametrik analizler yapılmıştır. Çalışmalar sonucunca "L" şeklinin andıran yapıların anten parametreleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu gözlenmiş ve yapılan parametrik analizlerle optimum boyutlar belirlenmiştir. "L" şekline benzeyen, komşu portlar arasına eklenen bu yapı Şekil 4.13'de gösterilmiş, boyutları *BTYj=4,75 mm, BTYk=4,64 mm, BTYL=0,375 mm, BTYm=0,375 mm, BTYn=2,74 mm, BTYo=2,85 mm* olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Tasarımın sonlandırıldığı anten

Tasarımın sonlandırıldığı anten ile CST üzerindeki son simülasyonlar yapılmış *S*-parametre eğrileri ve anten kazanç değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.14'de verilen *S*-parametre grafikleri incelendiğinde bant genişliklerinin büyük ölçüde arttığı, portlar arası izolasyonların 25 - 26 GHz aralığında dip değerlere ulaştığı görülmektedir.

Şekil 4.14'de portlar arası izolasyonun belirlenmesi için 25 - 26 GHz aralığının orta noktası olan 25,5 GHz değeri referans alınarak Çizelge 4.5 elde edilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.5'de DGS ve nötralizasyon hattının eklenmediği, ilk tasarlanan MIMO antene ait *S*-parametre değerleri de verilerek karşılaştırma yapılmış, parametreler özelindeki artış oranı yüzdelik değerlerle ifade edilmiştir.



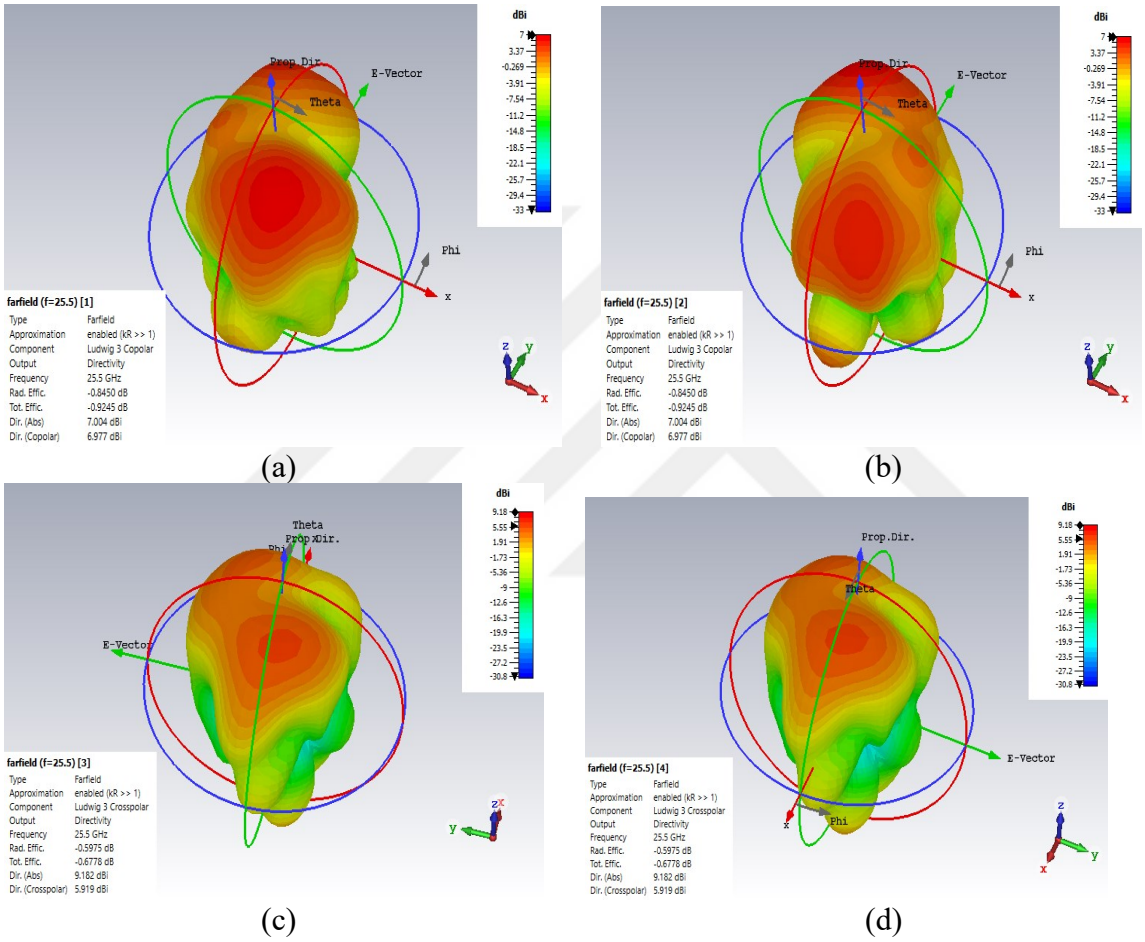
Şekil 4.14. Tasarımın sonlandırıldığı antenin *S*-parametre grafiği

Çizelge 4.5. Tasarımın sonlandığı antenin *S*-parametre sonuçları ve ilk tasarlanan MIMO anten ile karşılaştırma tablosu

Parametre	DGS ve Nötralizasyon Hattının Eklenmediği, İlk Tasarlanan MIMO Anten	DGS ve Nötralizasyon Hattının Eklendiği, Tasarımın Sonlandığı MIMO Anten	Artış Miktarı
S11	<-10 dB, 1,38 GHz Bant Genişliği	<-10 dB, 2,33 GHz Bant Genişliği	%68,84
S21	-20,3 dB	-24,5 dB	%19,63
S31	-14,9 dB	-27,03 dB	%39,7
S41	-25,7 dB	-28,3 dB	%8,34
S22	<-10 dB, 1,38 GHz Bant Genişliği	<-10 dB, 2,33 GHz Bant Genişliği	%68,84
S32	-25,7 dB	-28,3 dB	%8,34
S42	-14,9 dB	-27,03 dB	%39,7
S33	<-10 dB, 1,44 GHz Bant Genişliği	<-10 dB, 3,5 GHz Bant Genişliği	%143,05
S43	-13,8 dB	-34,26 dB	%139,91
S44	<-10 dB, 1,44 GHz Bant Genişliği	<-10 dB, 3,5 GHz Bant Genişliği	%143,05

Çizelge 4.5‘de ilk tasarlanan anten ve tasarımın sonlandığı anten arasında belirgin bir değişim olduğu görülmektedir. 1. ve 2. portlara ait bant genişliklerinin %68’in üzerinde

artarak 2,33 GHz seviyesine çıktığı, 3. ve 4. porta ait bant genişliklerinin %143 civarında bir artışla 3,5 GHz seviyesine çıktığı görülmektedir. Bunlara ek olarak hedeflendiği üzere tüm portlar arası izolasyon değerlerinin -20 dB seviyesinden daha iyi bir noktaya geldiği ve ilk tasarlanan MIMO antenin izolasyon değerlerine göre en az %8,34 en fazla %139,91 oranında iyileşme olduğu gözlenmektedir. CST üzerinde yapılan bir diğer simülasyon olan anten kazanç değerleri Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Tasarımın sonlandığı MIMO antenin kazanç simülasyon sonuçları; a) Port 1 kazanç grafiği, b) Port 2 kazanç grafiği, c) Port 3 kazanç grafiği, d) Port 4 kazanç grafiği

Şekil 4.15'de verilen simülasyon kazanç değerleri incelendiğinde anten kazancının 1. ve 2. port için 7 dBi olduğu, 3. ve 4. port için 9 dBi'dan daha iyi olduğu görülmektedir. Buna karşın tasarımı yapılan antenin üretilebilir olması hedeflendiğinden konektör boyutuna bağlı olarak uzunlukları arttırılan 50 Ω empedansa sahip iletim hatlarının ve anten bant genişliğinin arttırılması için eklenen nötralizasyon hattının da yama kısım kadar ışıma yapmasından kaynaklı olarak anten hüzmelerinin dağınık durduğu gözlemlenmektedir.

İlk tasarlanan MIMO antene ve tasarımın sonlandırıldığı antene ait kazanç değerlerinin kıyaslanabilmesi adına Çizelge 4.6 verilmiştir.

Çizelge 4.6. Tasarımın sonlandığı antenin kazanç değerleri ve ilk tasarlanan MIMO anten ile karşılaştırma tablosu

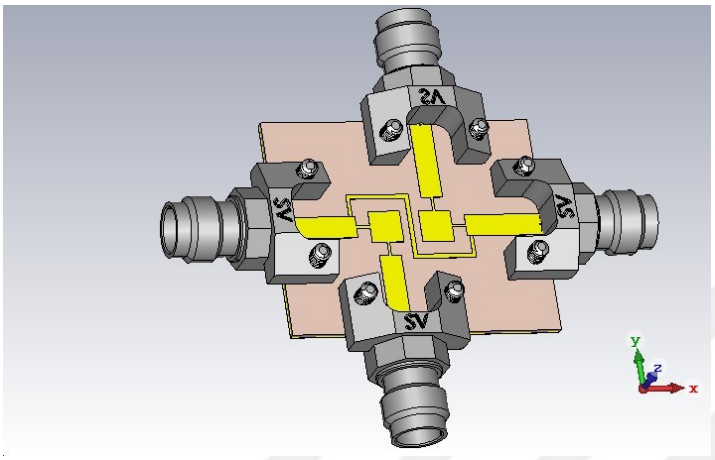
Port Numarası	Kazanç	
	İlk Tasarlanan MIMO Anten	Tasarımın Sonlandığı Anten
Port 1	8,18 dBi	7 dBi
Port 2	8,18 dBi	7 dBi
Port 3	8,33 dBi	9,18 dBi
Port 4	8,33 dBi	9,18 dBi

Çizelge 4.6'da verilen değerler incelendiğinde eklenen DGS ve nötralizasyon hattı sonucunda tasarlanan antendeki port 1 ve port 2 için kazanç değerlerinin 1,18 dBi düşmüş olmasına karşın port 3 ve port 4 için kazanç değerleri 0,85 dBi artmıştır.

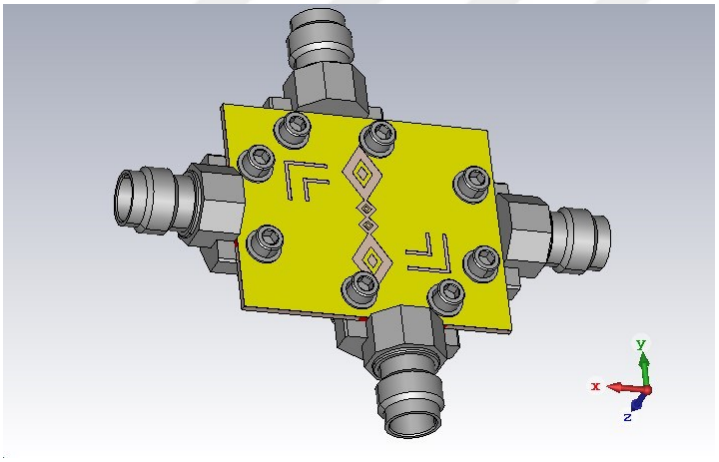
Tasarım ve simülasyonları tamamlanan anten için katman katman gerber dosyaları CST programı üzerinden alınmış ve üretim aşamasına geçilmiştir.

5. ANTEN ÜRETİMİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu tez çalışması kapsamında hedeflenen üretilebilir, 4 portlu, çift polarizasyonda çalışabilen, DGS ve nötralizasyon hattı teknikleriyle iyileştirilmiş bir anten tasarımıdır. Bu kapsamda bir önceki bölümde tasarımı tamamlanan, simülasyon sonuçları elde edilen, son hali Şekil 5.1'de verilen antenin üretimi yapılmıştır.



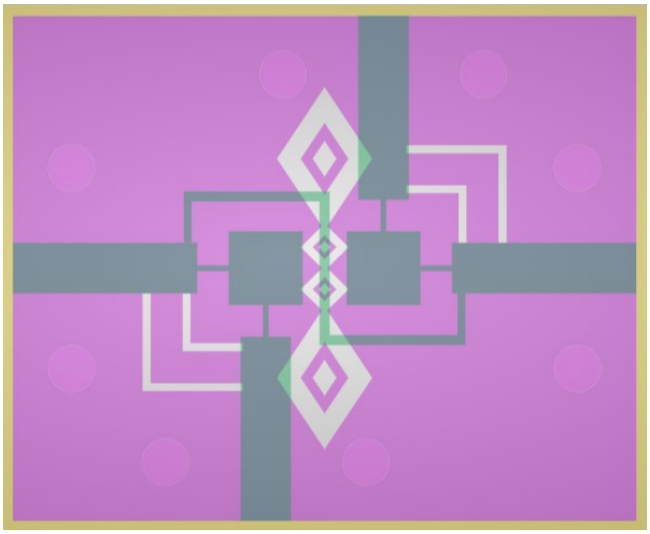
(a)



(b)

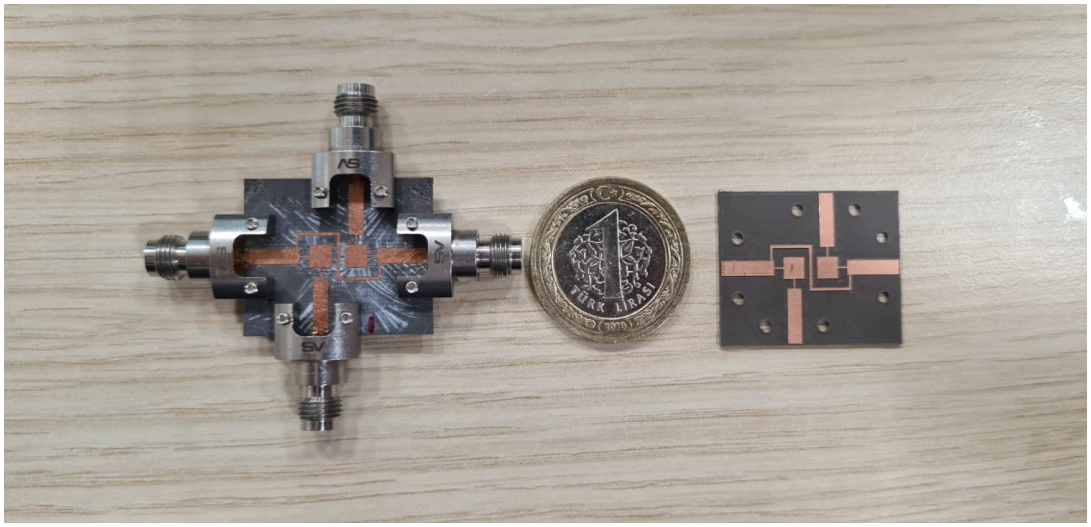
Şekil 5.1. Tasarımın sonlandığı MIMO antenin kazanç simülasyon sonuçları; a) Üretilecek antenin ön yüz görüntüsü ve b) Üretilecek antenin arka yüz görüntüsü

Üretim aşamalarına başlanmadan önce tasarımın ve simülasyonların yapıldığı CST programı üzerinde konektör vidaları için uygun çapta delikler açılmış sonrasında antene ait katmanların gerber dosyaları alınmıştır (Şekil 5.2).

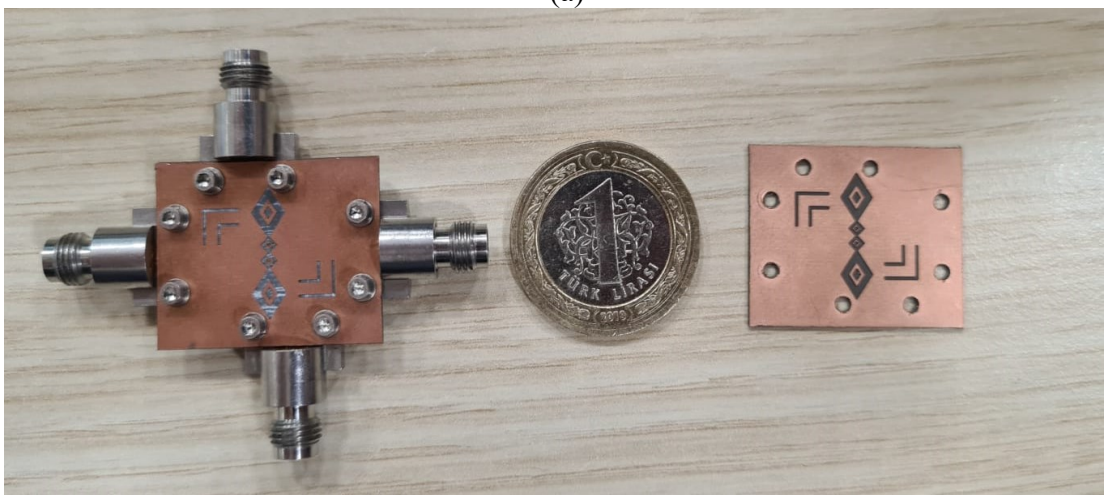


Şekil 5.2. Üretilecek antenin gerber görüntüsü

Üretim ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi bünyesinde bulunan malzeme ve ekipmanlar kullanılarak yapılmış, üretim aşamasında LPKF ProtoLaser S4 ekipmanı kullanılmıştır. Anten üzerine entegre edilecek konektörlerin yerine oturtulabilmesi için gereken delme işlemleri ise LPKF Protomat H100PCB kullanılarak yapılmıştır. Üretim sonucunda elde edilen antene konektörler entegre edilmiş ve ölçümler için hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.3).



(a)



(b)

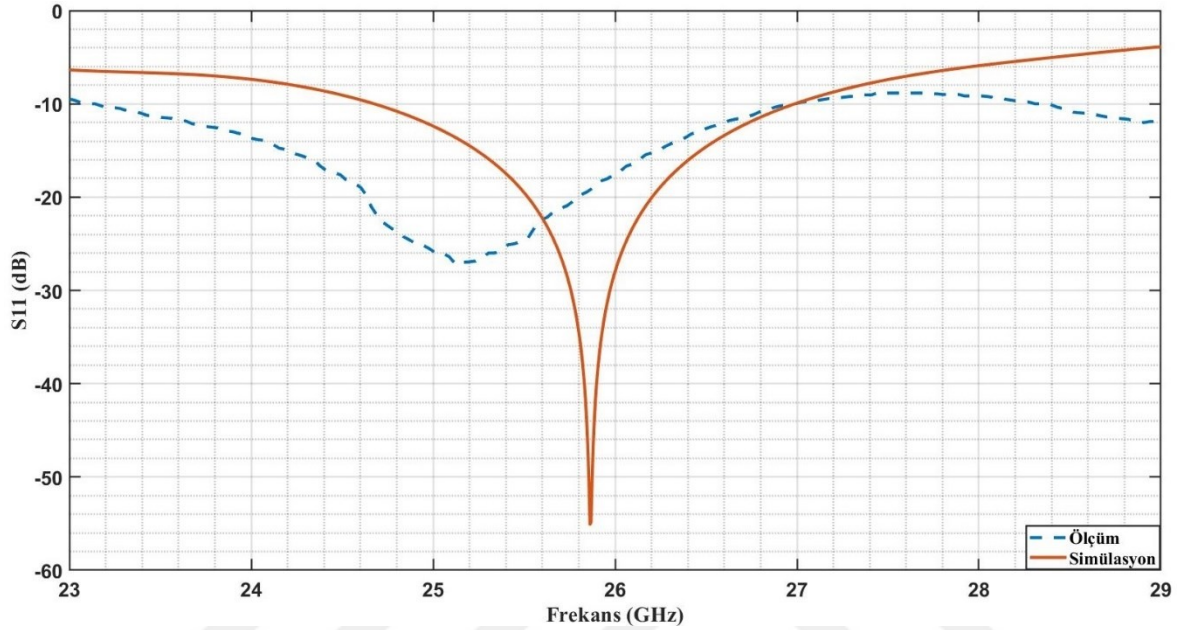
Şekil 5.3. Üretimi tamamlanan anten; a) Üretilen antenin ön yüzü, b) Üretilen antenin arka yüzü

Anten *S*-parametre ölçümleri Şekil 5.4'de gösterildiği üzere KEYSIGHT N5225B PNA Microwave network analizörü ile yapılmıştır. Ölçümler alınmaya başlanmadan uygun kablolar temin edilmiş, simülasyon sonuçlarından beklendiği üzere antenin çalışma aralığına uygun olarak 23 - 29 GHz aralığında kalibrasyonlar yapılmıştır. Network analizör cihazı üzerinde iki adet port mevcut olduğundan tüm anten portlarının ikili kombinasyonlar halinde ölçümleri yapılmış, alınan *S*-parametre ölçümlerine ait ekran görüntüleri EK-1'de verilmiştir

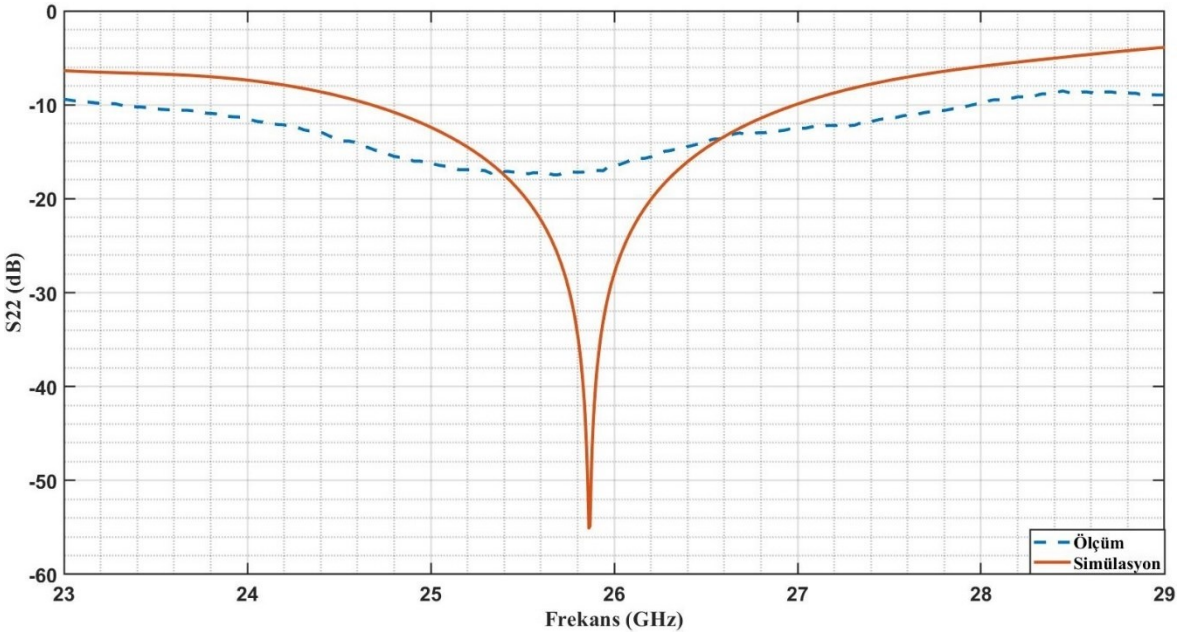


Şekil 5.4. Üretimi tamamlanan anten ölçümleri

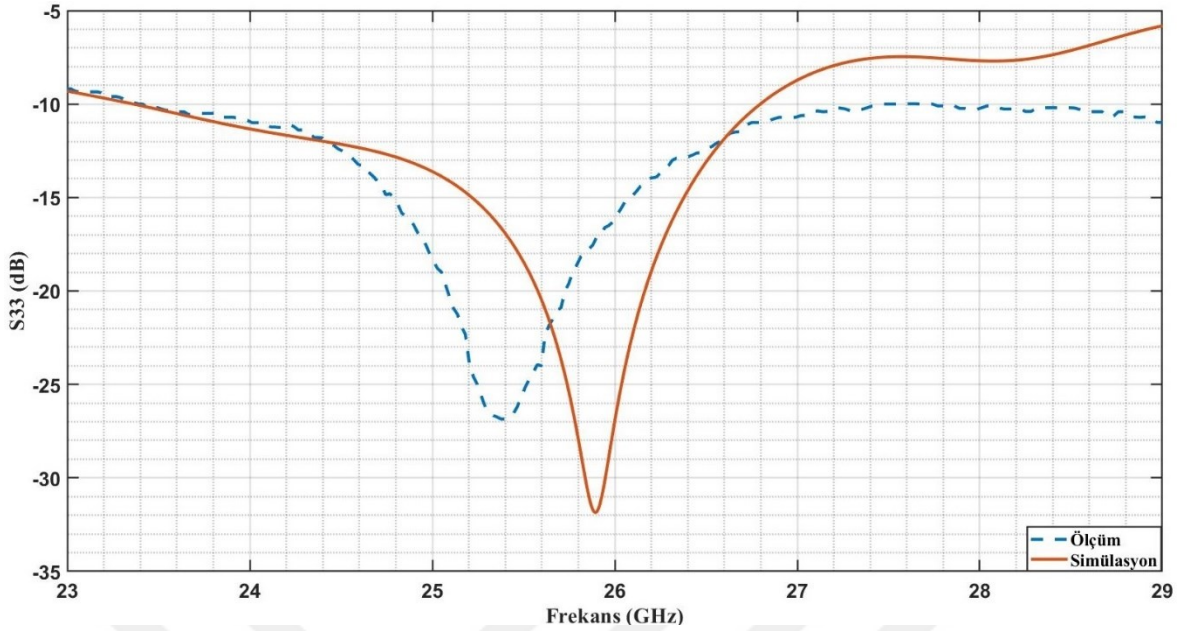
S-parametre ölçümleri esnasında alınan ekran görüntüleriyle beraber ".s2p" dosya formatıyla veri kayıtları da yapılmış olup MATLAB üzerinde ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırma yapabilmek amacıyla birlikte çizdirilmiştir. MATLAB'da elde edilen grafikler Şekil 5.5 - Şekil 5.14'de verilmiştir.



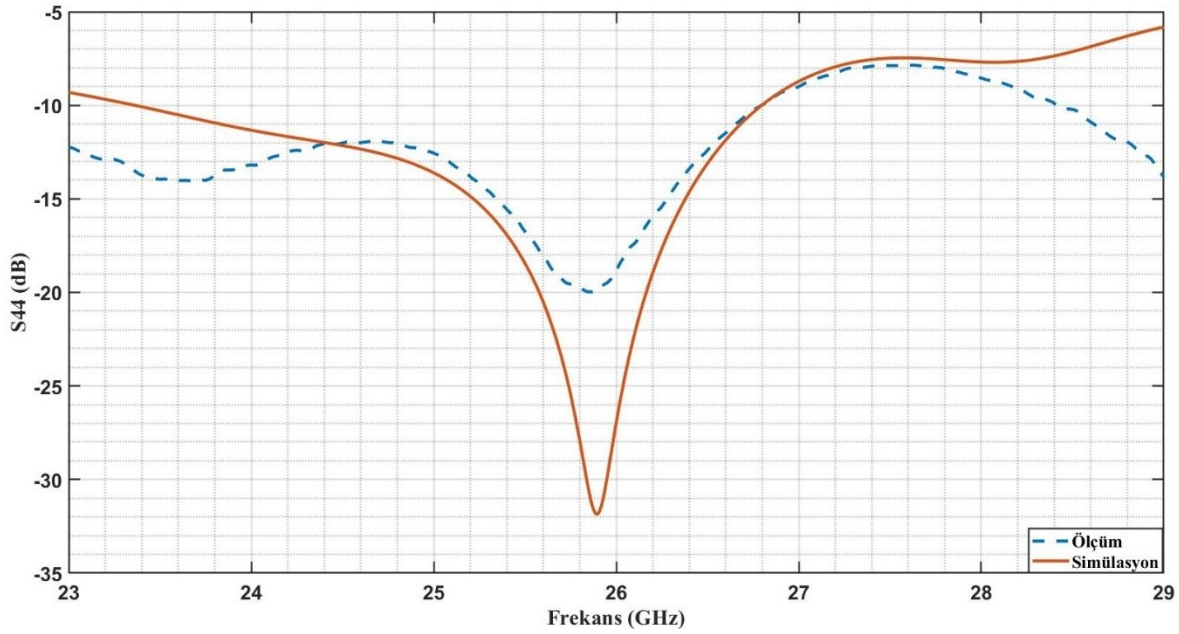
Şekil 5.5. S11 karşılaştırma grafiği



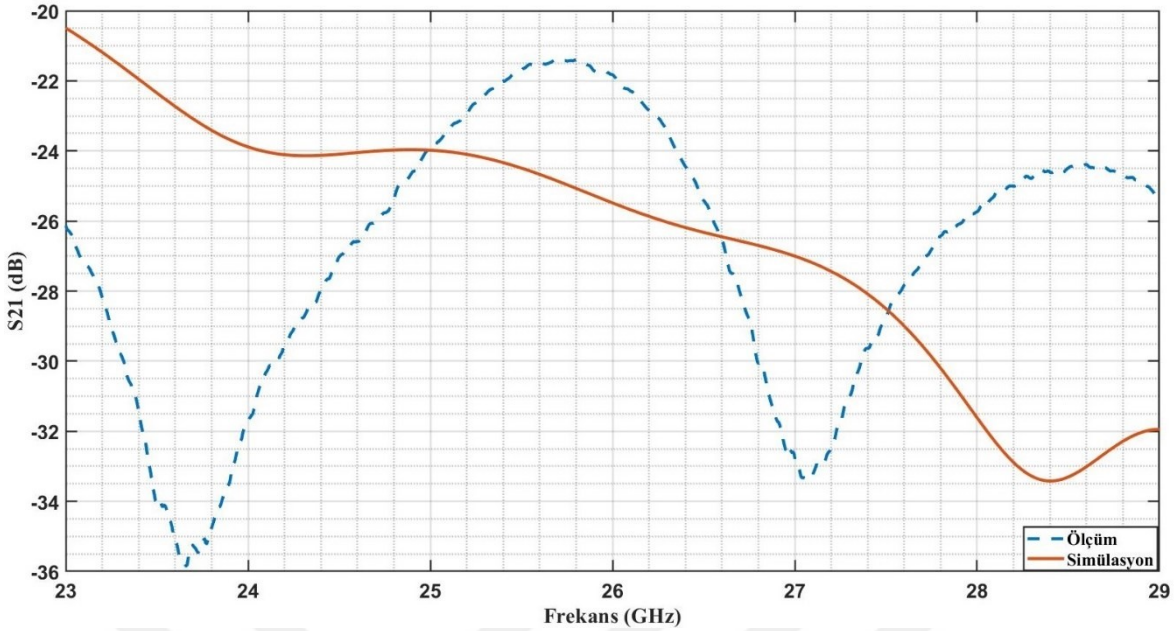
Şekil 5.6. S22 karşılaştırma grafiği



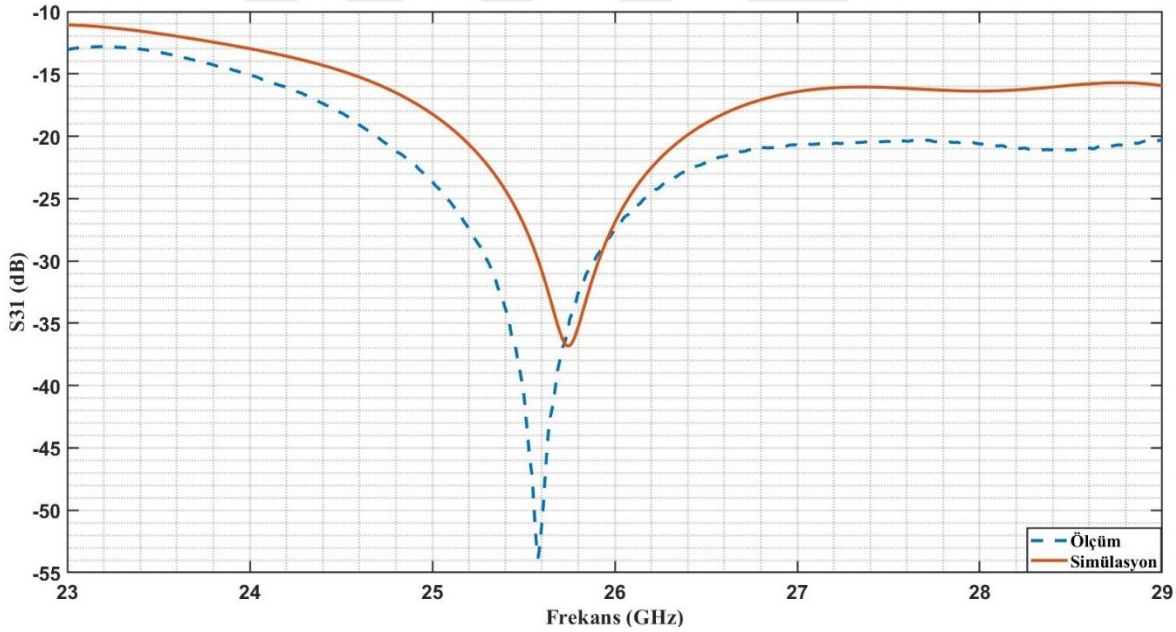
Şekil 5.7. S33 karşılaştırma grafiği



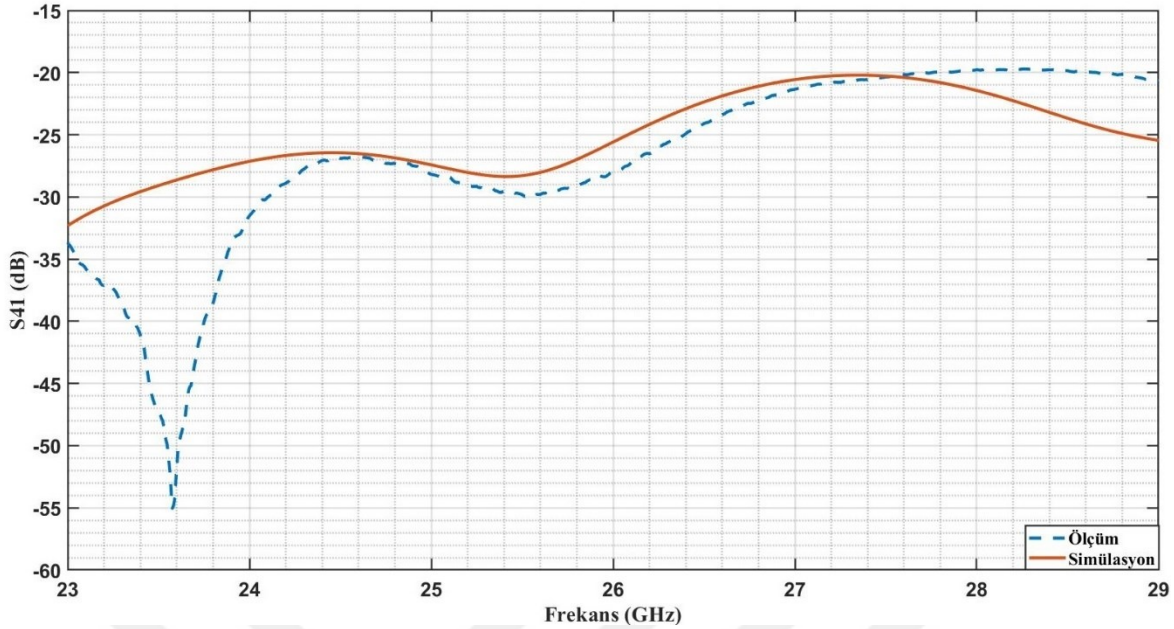
Şekil 5.8. S44 karşılaştırma grafiği



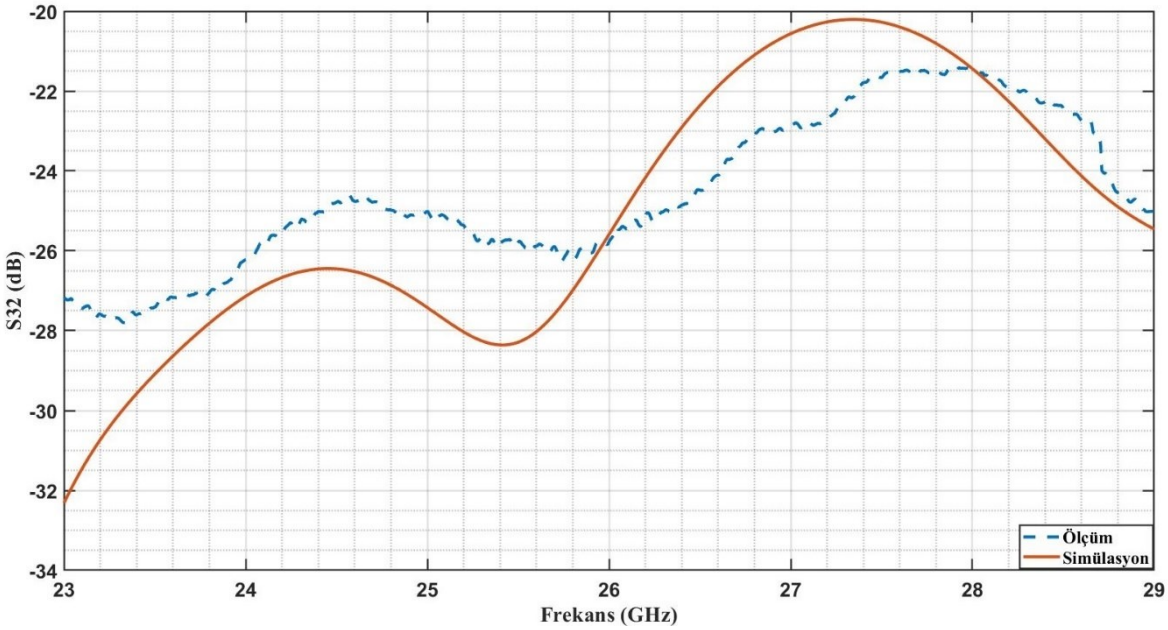
Şekil 5.9. S21 karşılaştırma grafiği



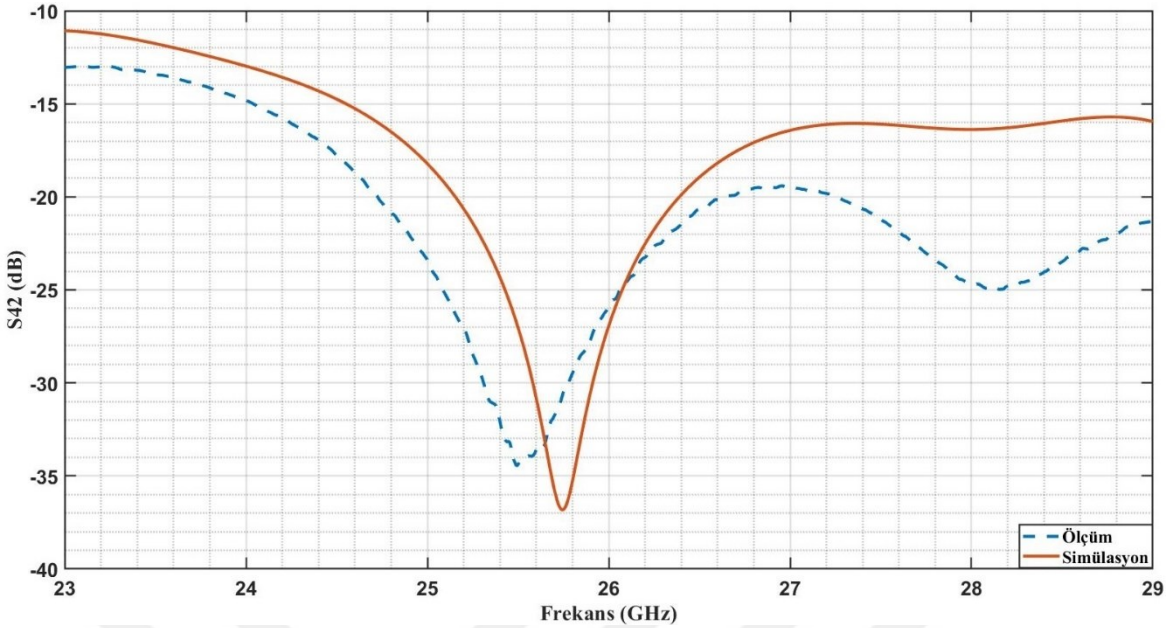
Şekil 5.10. S31 karşılaştırma grafiği



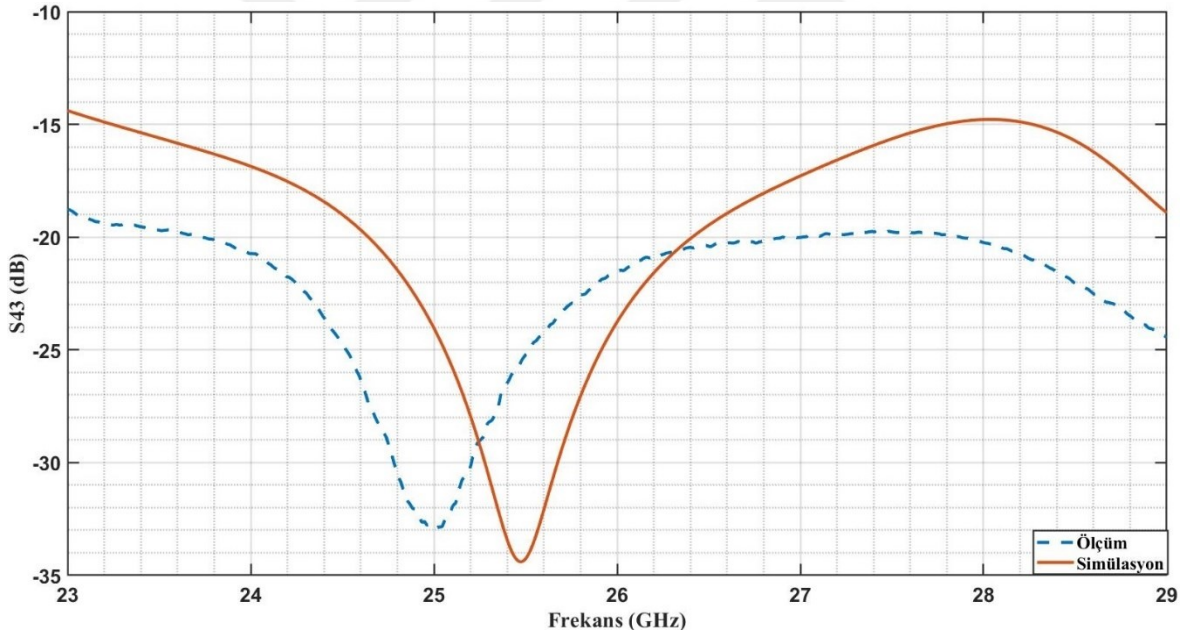
Şekil 5.11. S41 karşılaştırma grafiği



Şekil 5.12. S32 karşılaştırma grafiği



Şekil 5.13. S42 karşılaştırma grafiği



Şekil 5.14. S43 karşılaştırma grafiği

Şekil 5.5 - Şekil 5.14 ‘de verilen grafikler üzerindeki noktalardan ilgili değerler alınmış, Çizelge 5.1‘de ve Çizelge 5.2‘de verilen karşılaştırma tabloları hazırlanmıştır.

Çizelge 5.1. Tasarlanan antene ait S11, S22, S33 ve S44 sonuçlarının karşılaştırma tablosu

Port Numarası	Simülasyonda Gözlenen Merkez Frekans	Ölçüm Sonucundaki Merkez Frekans	Simülasyonda Gözlenen Bant Genişliği	Ölçüm Sonucundaki Bant Genişliği
Port 1	25,87 GHz	25,12 GHz	2,33 GHz	3,89 GHz
Port 2	25,86 GHz	25,33 GHz	2,33 GHz	4,72 GHz
Port 3	25,38 GHz	25,89 GHz	3,5 GHz	>4,35 GHz
Port 4	25,87 GHz	25,9 GHz	3,5 GHz	>3,8 GHz

Çizelge 5.1'de verilen, üretim sonrasında yapılan ölçümlerden elde edilen *S*-parametre sonuçları ve CST üzerinden elde edilen simülasyon sonuçları kıyaslandığında portlara ait merkez frekanslarının en fazla 750 MHz kaydığı gözlenmektedir. Bu farkın üretimde oluşan milimetrik hatalar ve kullanılan konektörün frekans bağımlı değişen karakteristiğinin simülasyon ve ölçüm esnasında büyük fark yaratmasından kaynaklı olduğu değerlendirilmektedir. Buna rağmen antenin hedeflenen 25 - 26 GHz aralığını kapsayan bir bant genişliğine sahip olduğu, simülasyon sonuçlarından beklendiği üzere yüksek bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Üçüncü ve dördüncü portların ölçüm sonucunda ortaya çıkan bant genişlikleri grafiklerden de görüldüğü üzere kalibrasyon yapılan yerin dışında kaldığı için tam olarak tayin edilememiştir. Bu sebeple Çizelge 5.1'de minimum değerleri verilmiştir. Üçüncü ve dördüncü portlara ait bant genişlikleri incelendiğinde ise, üretim sonrasında elde edilen anten portlarının simülasyon sonuçlarına göre 1 GHz civarında daha geniş bir bandı kapsayacak yetenekte olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2. Tasarlanan antene ait S21, S31, S41, S32, S42 ve S43 sonuçlarının karşılaştırma tablosu

S Parametresi	Simülasyon Sonuçları (25,5 GHz için)	Ölçüm Sonuçları (25,5 GHz için)
S21	-24,5 dB	-22,5 dB
S31	-27,03 dB	-43,98 dB
S41	-28,3 dB	-29,71 dB
S32	-28,3 dB	-25,77 dB
S42	-27,03 dB	-34,5 dB
S43	-34,26 dB	-25,27 dB

Çizelge 5.2'de verilen, üretim sonrasında yapılan ölçümlerden elde edilen *S*-parametre sonuçları ve CST üzerinden elde edilen simülasyon sonuçları kıyaslandığında değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Hatta S31, S41 ve S42 ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçlarına göre daha iyi olduğu, daha yüksek izolasyon sağlandığı görülmektedir. Diğer portlar arası izolasyon değerleri incelendiğinde ise, hepsinin hedeflendiği üzere -20 dB'nin altında olduğu, iki anten elemanı arasında 0,25 λ mesafe olmasına rağmen portlar arası izolasyonun hedeflenen şekilde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.3. Literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma tablosu

Referanslar	Rezonans Frekansı	Bant Genişliği	Portlar Arası İzolasyon	Kazanç
[17]	3,6 GHz	0,2 GHz	>25 dB	8,1 dBi
[18]	3,1 – 11 GHz	6,9 GHz	>25 dB	5,67 dBi
[19]	2,6 GHz / 5,4 GHz	0,65 GHz / 0,975 GHz	>19,3 dB	3,8 dBi
[20]	2,45 GHz / 5,45 GHz	0,1 GHz / 0,7 GHz	>15 dB	3 dBi
[5]	27,5 GHz	3 GHz	>15 dB	7,5 dBi
[21]	29 GHz	1 GHz	>20 dB	6 dBi
[22]	26-31 GHz	6 GHz	>21 dB	10 dBi
[23]	30,6 GHz	1,8 GHz	>25 dB	8,6 dBi
[24]	26 GHz	3,56 GHz	-	10 dBi
[25]	28,3 GHz	2,15 GHz	-	8,1 dBi
[26]	28 GHz	0,28 GHz	-	2,2 dBi
[27]	27,91 GHz	0,582 GHz	-	6,69 dBi
[28]	28 GHz	1,38 GHz	-	7,76 dBi
Bu Çalışma	25,5 GHz	4,72 GHz	>22,5 dB	>7 dBi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmanın değerlendirilebilmesi için elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer diğer çalışmalarla Çizelge 5.3'de karşılaştırılmıştır. Çizelgeden bu çalışmada tasarlanarak üretilen antenin 0,25 λ mesafeyle yerleştirilmiş iki anten elemanından oluşmasına rağmen, portlar arası minimum izolasyon değerleriyle literatürdeki diğer tasarımlarla neredeyse aynı olduğu, kazanç ve yüksek bant genişliği değerleriyle birçoğundan iyi olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde kullanımına sınırlı oranda başlanmış olan, standartlaştırılması henüz devam eden 5G haberleşme sistemlerinin temel hedefi kullanıcılar tarafından talep edilen; kullanıcı başına düşen veri hızının ve bant genişliğinin arttırılması, veri transferindeki gecikmenin düşürülmesi, aynı anda çok sayıda kullanıcıya yüksek hızda veri aktarımı desteğinin sunulmasıdır.

Antenler ise haberleşme sistemlerinin olmazsa olmaz yapı taşlarından biridir. Bu sebeple haberleşme sistemlerinde yaşanan her gelişme, oluşan her gereksinim anten tasarımlarındaki gelişimi de zorunlu kılmaktadır. 5G sistemlerinin hedeflediği gereksinimlere ulaşabilmesi için gereken; mevcut sistemlerde kullanılan antenlere nazaran geniş bantta yayın yapabilen, yüksek kazançlı, tasarımı ve üretimi kolay, maliyet etkin anten çözümleridir.

Literatür incelendiğinde, 5G sistemlerine ait gereksinimlerin sağlanabilmesi için MIMO mikroşerit antenlerin tercih edildiği ve bant genişliklerinin arttırılması için geleneksel yöntemler olan kalın alttaş kullanılması veya düşük dielektrik katsayısına sahip alttaşın kullanılması gibi yöntemlerin dışında son zamanlarda DGS yönteminin ve nötralizasyon hattı yönteminin de anten tasarımlarına eklendiği görülmektedir. Aynı zamanda DGS ve nötralizasyon hattı yöntemi MIMO antenlerdeki en büyük sorun olan portlar arası izolasyonun istenilen seviyelerde sağlanması için de kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında 5G sistemlerinin gereksinimlerine uygun bir anten tasarımı yapılmıştır. Öncelikle 5G haberleşme sistemleri ve hayatımıza getireceği yenilikler incelenmiş, gereksinimleri öğrenilmiş ve haberleşme alt sistemlerinden biri olan anten tasarımında tasarımcıyı nelerin beklediği analiz edilmiştir.

Tasarım çalışmalarına başlanırken mikroşerit anten için alttaş malzemeler araştırılmış, dielektrik katsayısının düşük olmasına ve antenin üretiminin hedeflenmesinden dolayı kolay tedarik edilebilir olmasına dikkat edilerek RT/duroId 5880 (0,787 mm) seçilmiştir.

Anten tasarımı için gerekli temel parametreler belirlendikten sonra çift polarizasyonda çalışabilen iki portlu tek elemanlı anten tasarımı yapılmıştır. Yine tasarımın üretilebilir olması hedeflendiğinden, üretim sonrası anten portlarında kullanılacak konektör seçimi

tasarımın henüz başındayken yapılmış, SV Microwave firmasının “SF1621-60036” üretici parça numaralı konektörü seçilmiş, anten boyutları bu konektöre uygun şekilde belirlenmiştir.

Tasarlanan tek elemanlı antene özdeş bir diğer anten 0,25 λ mesafeyle yanına yerleştirilmiş ve MIMO dizi anten yapısı elde edilmiştir. Tasarımı tamamlanan iki elemanlı MIMO antenin bant genişliği ve portlar arası izolasyonun iyileştirilmesi üzerine çalışılmış, geleneksel yöntemlerin dışında son zamanlarda literatürde örnekleri görülen DGS ve nötralizasyon hattı tekniklerinin tasarıma eklenmesi üzerine çalışılmıştır.

DGS’nin tasarıma eklenmesi için birçok geometrik şekil toprak yüzey üzerindeki birçok nokta için çalışılmış ve anten parametrelerine etki eden, anten parametrelerini iyileştiren noktalar keşfedilmiştir. Uygun boyutlarda yapıya eklenen DGS geometrilerinin tasarıma faydası gözlenmiş, bant genişliğinde ve portlar arası izolasyondaki iyileşmeler analiz edilmiştir.

DGS yöntemine ek olarak mikroşerit bir hat kullanılarak iki portun birbirine bağlanmasıyla elde edilen nötralizasyon hattı yöntemi de parametrik çalışmalar ve simülasyonlar ile tasarıma eklenmiştir. İlgili yöntemin bant genişliği ve portlar arası izolasyona olumlu etkisi gözlenmiştir.

Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen tasarımın uygun olduğuna karar verilerek üretim aşamasına geçilmiştir. Üretim sonrasında ortaya çıkacak antenin ölçüm sonuçlarının simülasyonlar sonuçlarına maksimum oranda benzemesi için kullanılacak “SF1621-60036” üretici parça numaralı konektör ile de anten simülasyonları tekrarlanmak istenmiştir, fakat ilgili konektöre ait elektromanyetik özeliklerini içeren modelin bulunamamasından dolayı bu aşama gerçekleştirilememiştir.

Üretim aşamasına gelindiğinde tasarımı yapılan antenin yüksek frekanslarda çalışması nedeniyle uygun bir üretici firma aranmış, üretimin ASELSAN A.Ş.’de yapılabilir olduğu değerlendirilmiş ve antenin prototip üretimi burada gerçekleştirilmiştir.

Yapılan üretim sonrasında anten çalışma frekans aralığını destekleyen bir network analizör ölçüm cihazı bulunmuş ve antene ait *S*-parametre ölçümleri yapılmıştır. Alınan ölçümler kaydedilerek simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonrası

ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçlarına yüksek oranda benzediği, çalışma kapsamında hedeflenen bant genişliğinin ve portlar arası izolasyon değerlerinin sağlandığı gözlenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında 5G haberleşme sistemlerinde kullanıma uygun olarak tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen, dizi yapısında 1x2 elemanlı, düşük profilli, yüksek bant genişliğine sahip, çift polarizasyonda yayın yapabilen ve dört portlu mikroşerit MIMO anten tasarlanmış, üretilmiş ve simülasyon ile üretim ölçümü sonuçları karşılaştırılmıştır. Antenin minimum boyutlara sahip olabilmesi adına yama yapılar 0,25 λ mesafeyle yerleştirilmiş, buna rağmen portlar arası izolasyon değerlerinin -20 dB'nin altında kalması sağlanmıştır. 4 porta sahip olan antenin bant genişlikleri sırasıyla 3,89 GHz, 4,72 GHz, 4,35 GHz, 3,8 GHz olarak ölçülmüştür. Ayrıca yapılan tasarımın değerlendirilebilmesi için elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarımı önerilen anten literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın devamı ve gelişimi için; anten bant genişliğinin arttırılması ve MIMO antenlerde portlar arası izolasyon değerlerinin iyileştirilmesi için "superstrate" malzemelerin değerlendirilip farklı malzemelerle, farklı kalınlık değerleriyle simülasyonların yapılması hatta imkanlar dahilinde prototip antenlerin üretilmesi önerilmektedir. Bunun yanı sıra bu çalışma kapsamında kullanılan mikroşerit besleme yöntemi yerine koaksiyel besleme yönteminin kullanılarak portlar arası izolasyon değerlerinin iyileştirilmesinin denenmesi, anten eleman sayılarının arttırılarak Dev MIMO (Massive MIMO) anten yapıları üzerinde çalışılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Yıldırım, A. ve Tunalı, A. İ. (2022). 5G nedir?. *Aselsan Dergi,* 111, 26-30.

2. Onurlu, O. (2021). *5G Sistemleri İçin Anten Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-23.

3. Cuneray, K., Akçam, N., Okan, T., ve Arican, G. O. (2023, Nisan). 28/38 GHz dual-band MIMO antenna with wideband and high gain properties for 5G applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 162, 154553.

4. Kösem, M. (2021). *5G Haberleşme İçin Geniş Bant Mikroşerit Yama Anten Modellemesi Alttaş Seçimi Ve Gerçeklemesi*, Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 5-14.

5. Su, S. W., Lee, C. T., and Chang, F. S. (2012). Printed MIMO-antenna system using neutralization-line technique for wireless usb-dongle applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* 60(2), 456-463.

6. Liu, R., An, X., Zheng, H., Wang M., Gao Z., and Li, E. (2020). Neutralization line decoupling tri-band multiple-ınput multiple-output antenna design. *IEEE*, 8, 27018-27026.

7. Salgare, D. S., and Mahadik, S. R. (2015). A review of defected ground structure for microstrip antennas. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(6), 150-154.

8. Eryılmaz, E. (2022). 1G'den günümüze hücresel ağlar. *Aselsan Dergi,* 111, 6-14.

9. Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design* (Third edition). New York: Wiley, 811-814.

10. Demirci, M. (2020). *5G Haberleşme Teknolojisi İçin Mikroşerit Yama Anten Tasarımı,* Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, 26-32.

11. Bakır, A. E. (2020). *5G Uygulamaları İçin Dizi Yama Anten Tasarımı Ve Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 9-27.

12. Breed, G. (2008). An introduction to defected ground structures in microstrip circuits. *High Frequency Electronics,* 7, 50-54.

13. Elftouh, H., Touhami N. A., Aghoutane M., Amrani E. S., Tazón A., and Boussouis M. (2014). Miniaturized microstrip patch antenna with defected ground structure. *Electromagnetics Research C,* 55, 25-33.

14. Oskouei, H. D., Forooraghi, K., and Hakkak, M. (2009). Radiation characteristics of a microstrip patch antenna over a periodic defected ground structure substrate. *Electromagnetics*, 29(1), 24–30.

15. Daghari M., Essid C., and Sakli H. (2021). Muli-uwb antenna system design for 5G wireless applications with diversity. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 5, 1-18.

16. İnternet: Rogers Corporation. RT/duroid® 5870-5880 Data Sheet. URL: https://www.rogerscorp.com/advanced-electronic*S*-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880-laminates, Son Erişim Tarihi: 05.05.2024.

17. Ullah, A., Parchin, N. O., Alibakhshikenari, M., Abd-Alhameed, R. A., Amar, A. S. I., and Salem, A. I. (2023). *A circularly-polarized patch antenna design for 3.6 GHz applications in 5G systems*. 2023 International Telecommunications Conference*,* 467-470.

18. Khan, A., Bashir, S., Ghafoor, S., and Qureshi, K. K. (2021). Mutual coupling reduction using ground stub and ebg in a compact wideband MIMO-antenna. *IEEE Access,* 9, 40972-40979.

19. Yang, Q., Zhang, C., Cai, Q., Loh. T.H., and Liu, G. (2022). A MIMO antenna with high gain and enhanced isolation for wlan applications. *Applied Sciences,* 12(5), 2279.

20. Khan, M.S., Shafique, M.F., Naqvi, A., Capobianco, A., Ijaz, B., and Braaten, B.D. (2015). A miniaturized dual-band MIMO antenna for WLAN applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 958–961.

21. Ashfaq, A., Dong-you, C., and Sadiq, U. (2022). A compact two elements MIMO antenna for 5G communication. *Scientific Reports*, 12, 3608.

22. Wani, Z., Abegaonkar, P. M., and Koul, K. S. (2018). 28-GHz antenna for 5G MIMO applications. *Electromagnetics Research Letters,* 78, 73-79.

23. Sharawi, M. S., Podilchak, S. K., Hussain, M. T., Antar, and Y. M. M. (2017). Dielectric resonator based MIMO antenna system enabling millimetre-wave mobile devices. *Antennas Propag. IET Microw.*, 11(2), 287–293.

24. Colaco, J., and Lohani, R. (2020). *Design and implementation of microstrip patch antenna for 5G applications*. 5th International Conference on Communication and Electronics Systems*,* 682-685.

25. Kumar, A., Das, S., and Yadava, R. L. (2018). *DGS and SRR based FSS microstrip antenna for 5G communication*. 4th International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology*,1-5.*

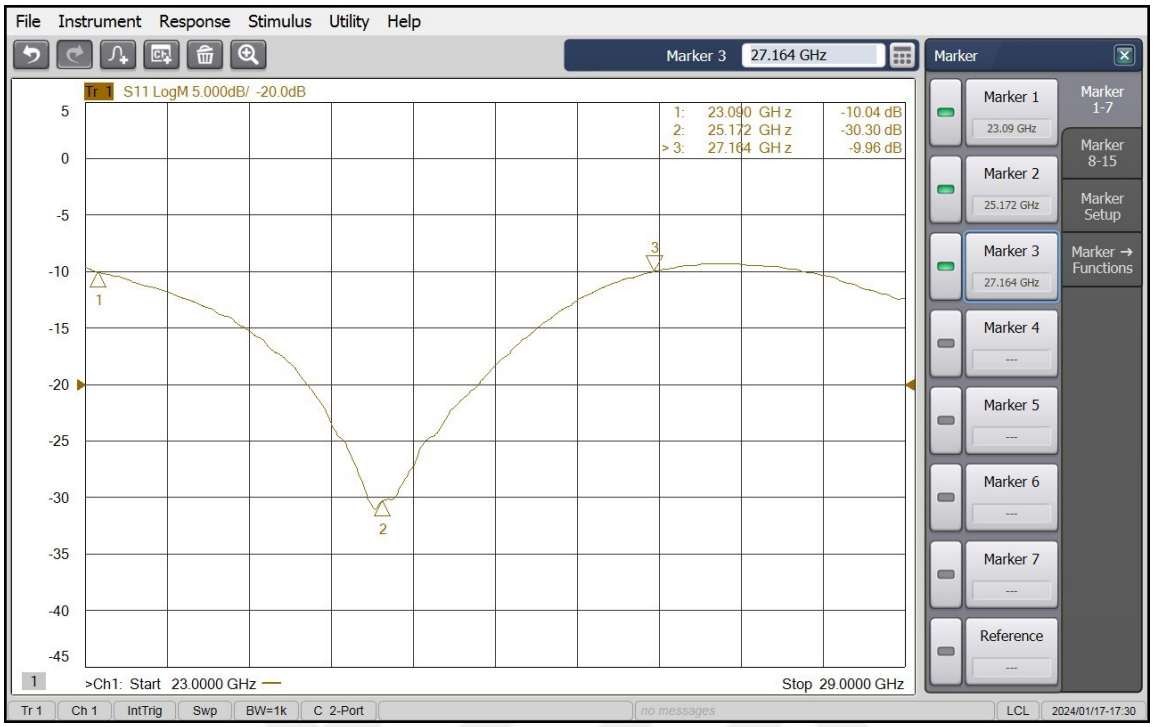
26. Li, Y. (2023). A microstrip patch antenna for 5G mobile communications. *Journal of Physics: Conference Series,* 2850(1), 1-10.

27. Mungur, D., and Duraikannan, S. (2018). Microstrip patch antenna at 28 GHz for 5G application. *Journal of Science Technology Engineering and Management-Advanced Research & Innovation,* 1(1), 20-22.

28. Awan, A. W., Zaidi, A., and Baghdad, A. (2019). *Patch antenna with improved performance using DGS for 28 GHz applications.* International Conference on Wireless Technologies Embedded and Intelligent Systems*,* 1-4.

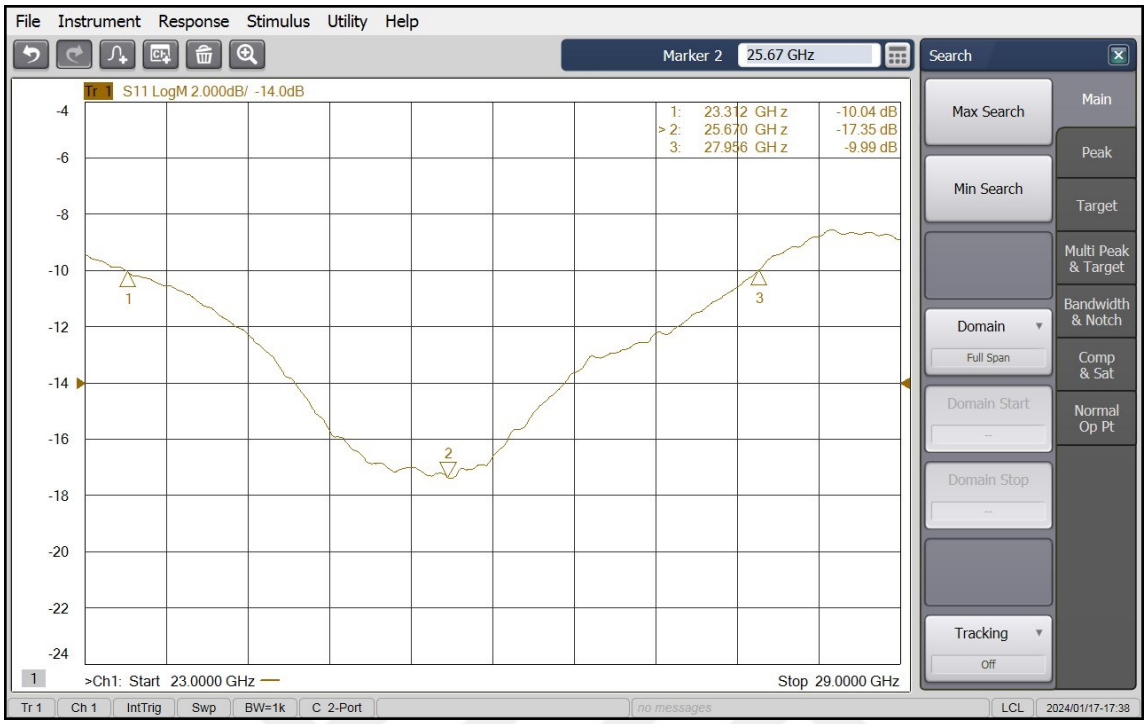
EKLER

EK-1. Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



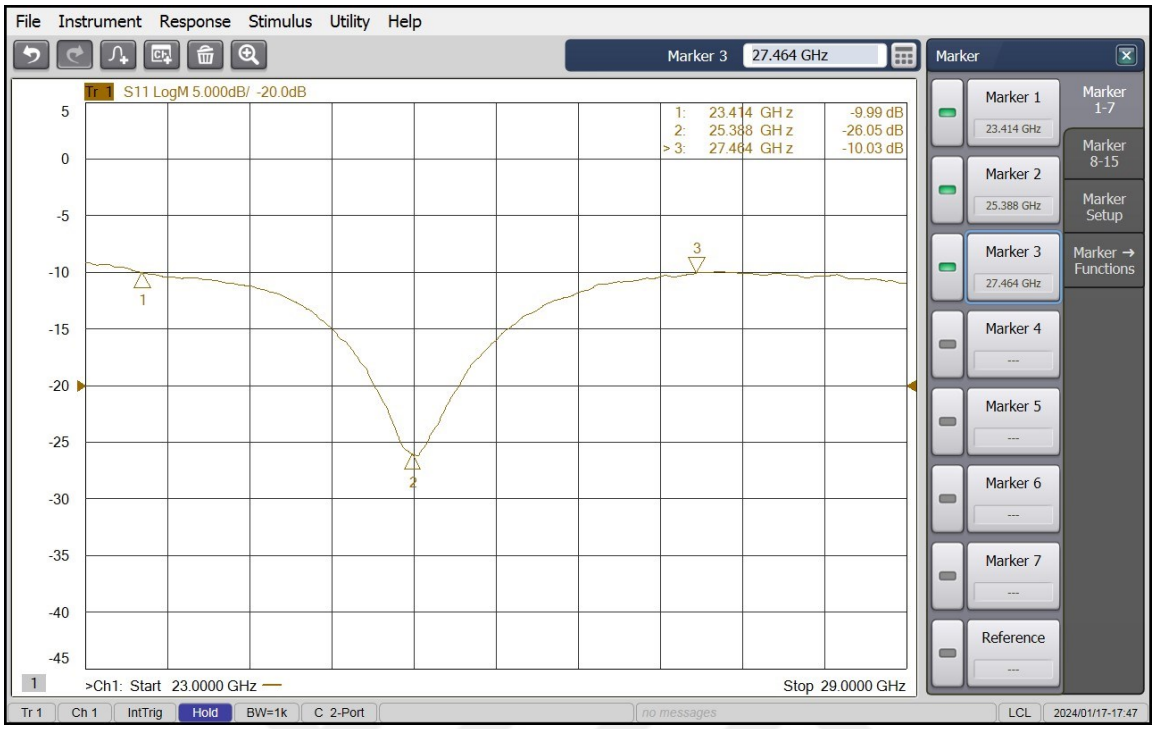
Şekil 1.1. S11 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



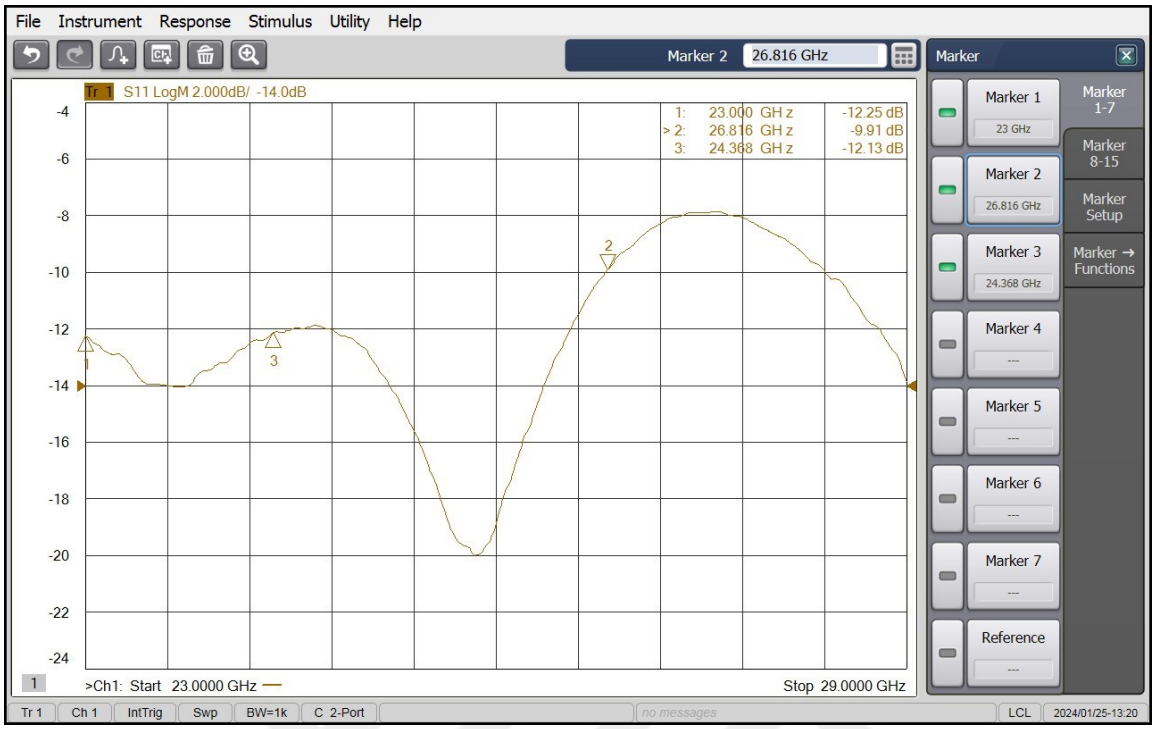
Şekil 1.2. S22 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



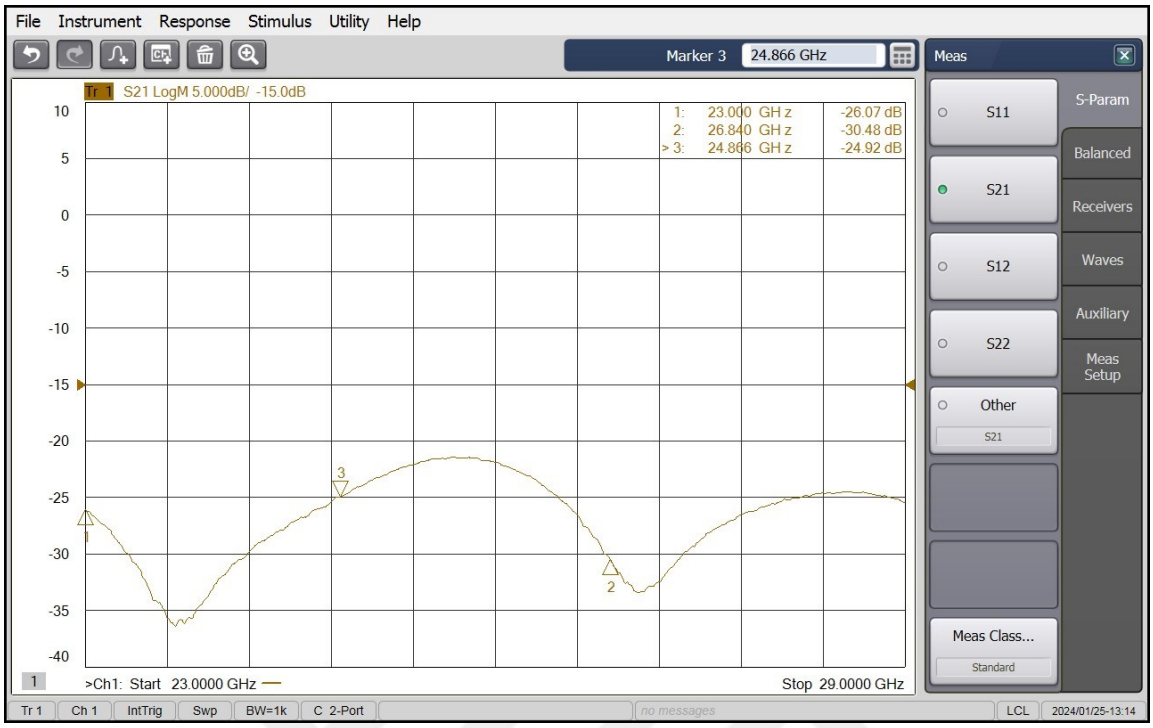
Şekil 1.3. S33 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



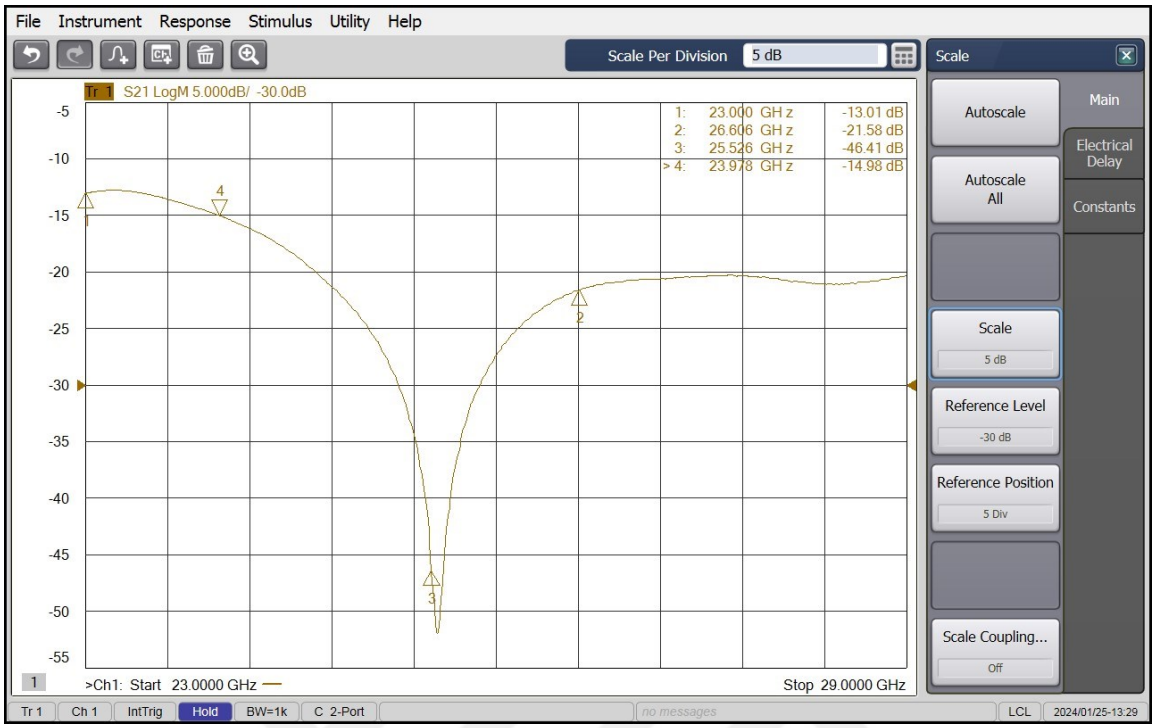
Şekil 1.4. S44 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



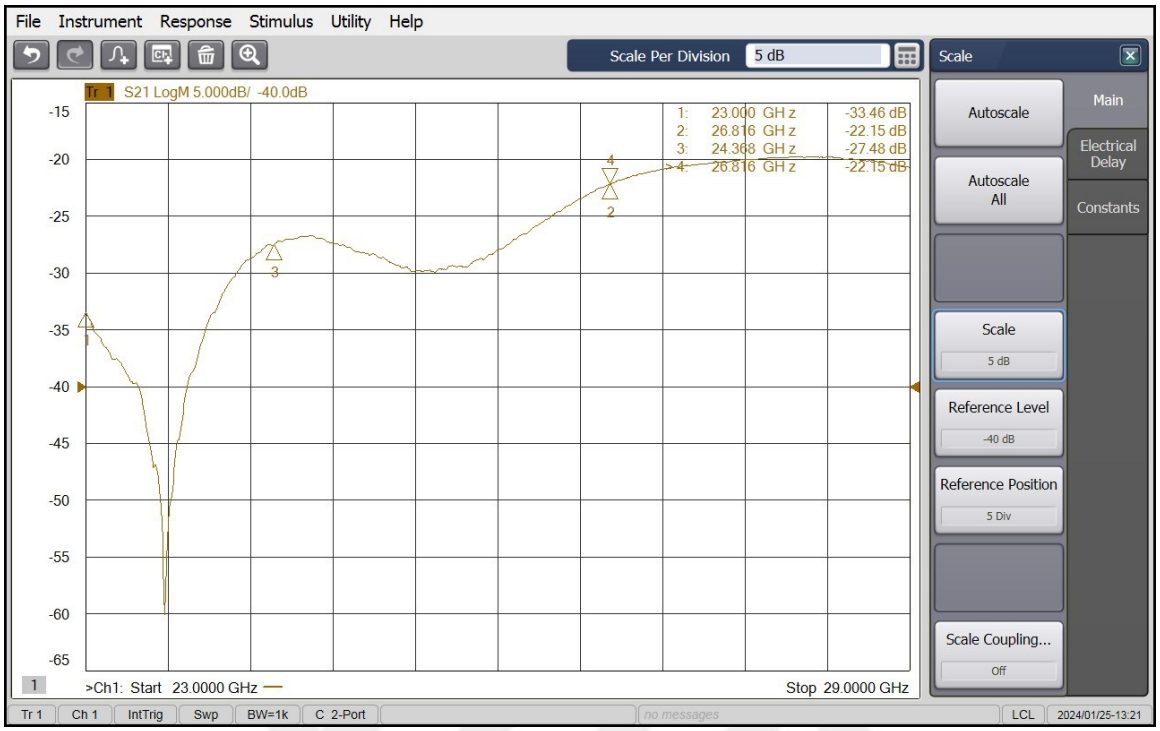
Şekil 1.5. S21 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



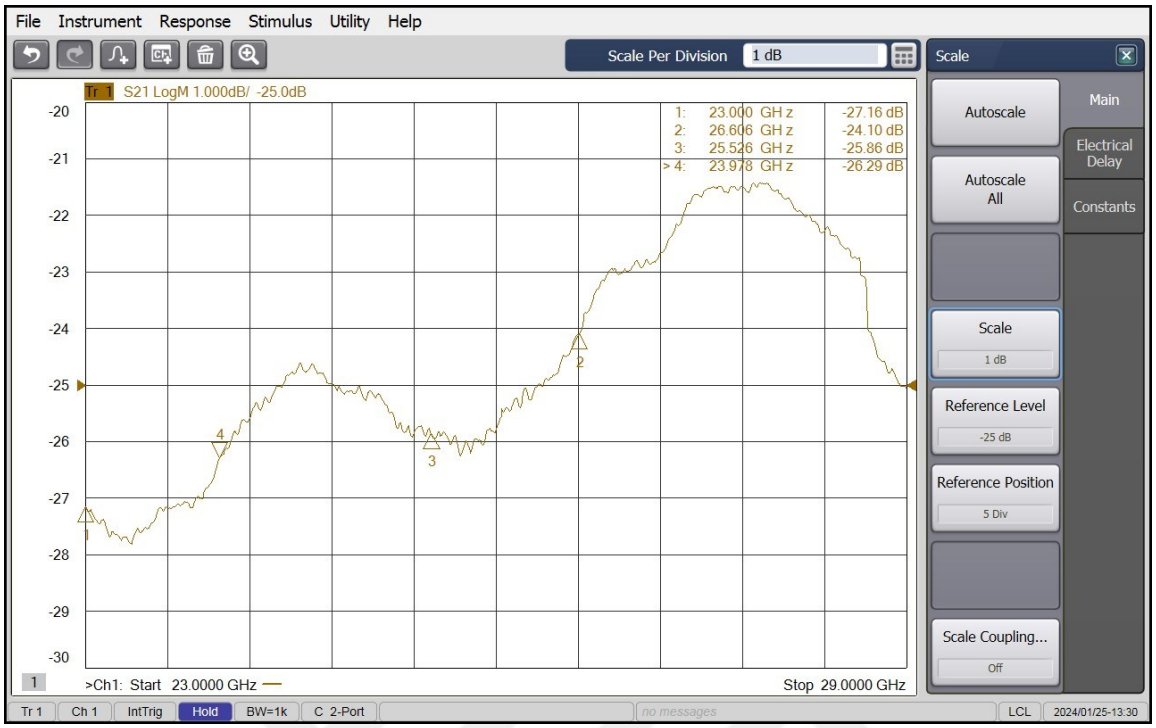
Şekil 1.6. S31 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



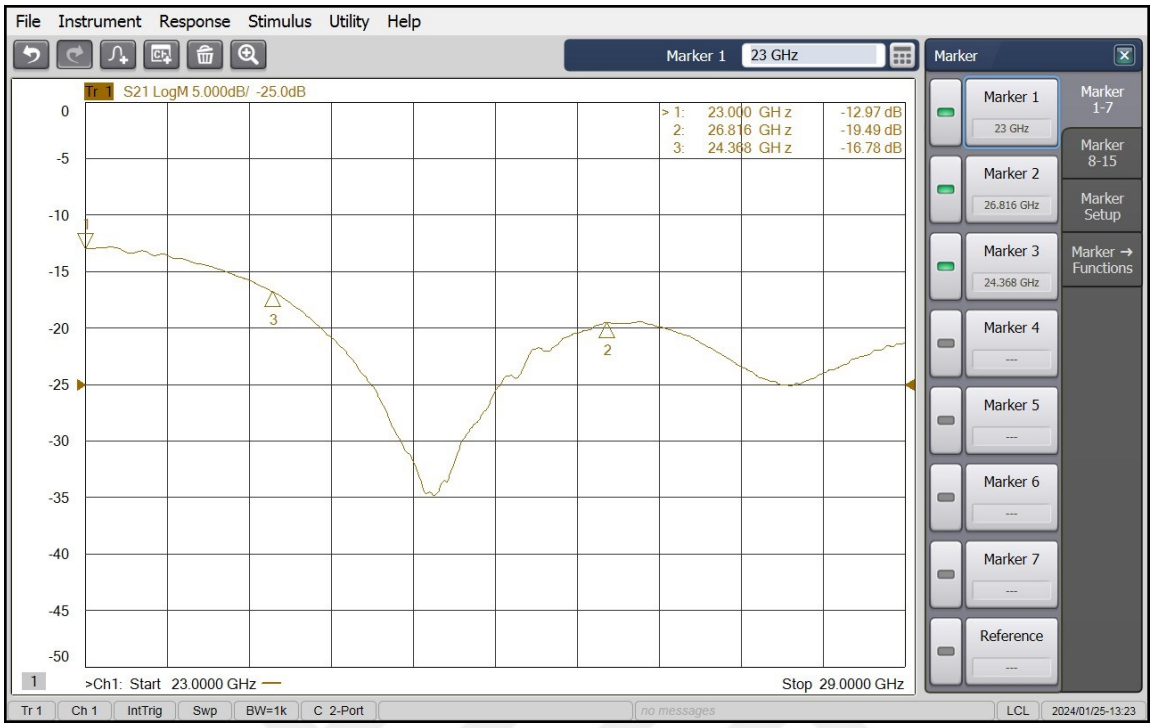
Şekil 1.7. S41 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



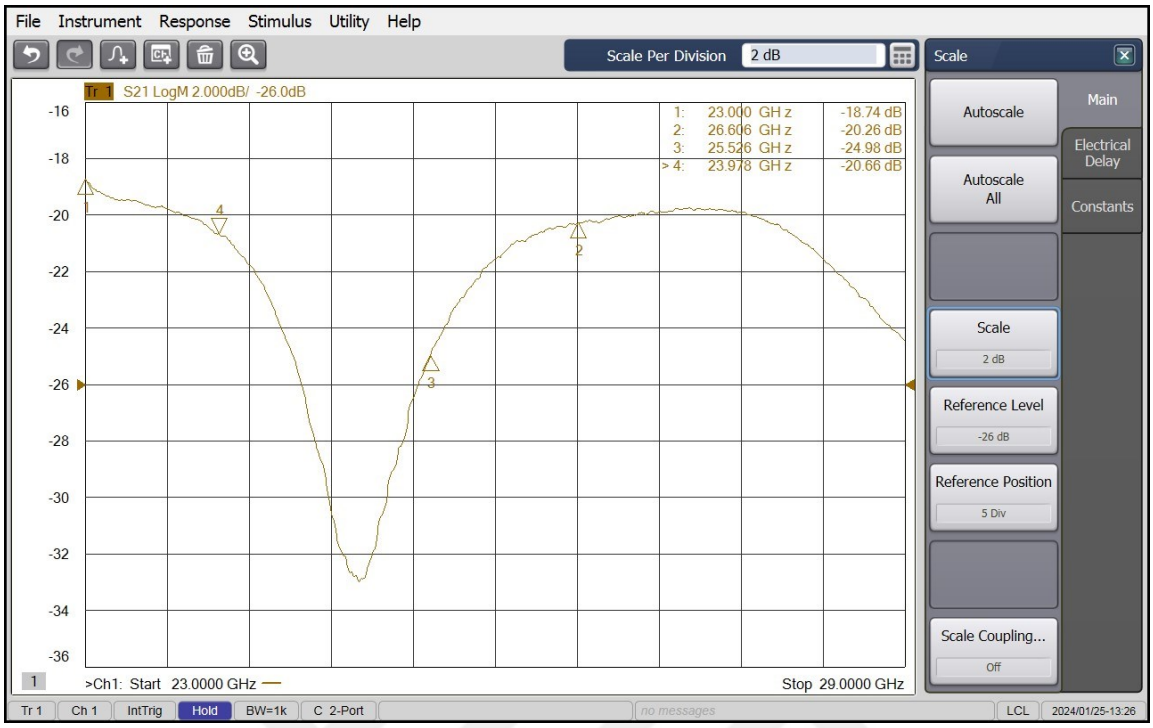
Şekil 1.8. S32 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



Şekil 1.9. S42 ölçüm sonucu

EK-1. (devam) Üretimi tamamlanan anten *S*-parametre sonuçları



Şekil 1.10. S43 ölçüm sonucu

ÖZGEÇMİŞ

Eğ ezuni
ans Gazi ü esi / E ik El ik De
Endüstri Ar m D
Ga niver Elek lektr
Mühendis bölüm



Gazili olmak ayrıcalıktır