28 GHZ FREKANSINDA 5G KABLOSUZ HABERLEŞME İÇİN S-ŞEKİLLİ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

MELİKE KHASIYEV

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

28 GHZ FREKANSINDA 5G KABLOSUZ HABERLEŞME İÇİN S-ŞEKİLLİ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

Melike KHASIYEV
0000-0003-2739-1091

Dr. Öğr. Üyesi Esin KARPAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

28 GHZ FREKANSINDA 5G KABLOSUZ HABERLEŞME İÇİN S-ŞEKİLLİ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

Melike KHASIYEV

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Esin KARPAT

Yaşamımızın en önemli unsurlarından olan kablosuz haberleşme sistemleri son yıllarda hızlı bir şekilde gelişmektedir. Mobil cihazlardaki haberleşme sistemlerinin kökeni olan 1G'den, yeni kullanılmaya başlanılan ve gelecekteki yeni nesil haberleşme sistemlerini oluşturan 5G'e geçiş hızlı gerçekleşmiştir. Mobil haberleşme sistemlerinde kullanılacak antenlerin 5G anten parametre kriterlerini sağlamasının yanı sıra mobil cihazlarında gün geçtikçe küçülmesi ile boyutlarının da uyumlu olması gerekmektedir. Mikroşerit antenlerin üretim maliyeti düşüktür, hafif, küçük hacimli ve bulundukları yüzeye kolayca entegre edilebilmektedir. Bu avantajlar ile mobil cihazlarda tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında 28 GHz rezonans frekansında 5G haberleşme sistemleri için gerekli anten parametrelerini karşılayan mikroşerit antenler tasarlanmıştır. Tasarımlar ANSYS HFSS programı ile tasarlanıp simüle edilmiştir. İlk olarak anten formülleri kullanılarak girintili mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amacı gerçekleştiren anten Rogers RT Duroid 5880 alttaş malzemesi ile tasarlanmıştır. Dikdörtgen mikroşerit anten tasarımından yola çıkarak farklı geometrik yapılar ile özgün S modelli mikroşerit anten tasarlanmıştır. $13 \times 13 \times 0{,}508\, mm^3$ boyutundaki antenin S şeklindeki yama kısmına eklenen 0.4 mm genişliğindeki ve 5 mm uzunluğundaki iki kanat şeklindeki iletim hattı ile özgün kanatlı S modelli mikroşerit anten tasarlanarak 28 GHz frekans bandındaki geri dönüş kaybı ve duran dalga oranı iyileştirilmiştir. Anten performansları incelenirken rezonans frekansı, bant genişliği, duran dalga oranı, geri dönüş kaybı ve kazanç dikkate alınmıştır. 28,00 GHz rezonans frekansında 590 MHz bant genişliği, -23 dB geri dönüş kaybı, 1,13 duran dalga oranı ve 9,07 dB kazanç ile istenilen 5G anten parametrelerini karşılamıştır ve bu tasarım mobil haberleşme sistemleri için önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: 5G, 28 GHz, mikroşerit anten, mikroyama anten
2023, xii +62 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND ANALYSIS OF S-SHAPED MICROSTRIP ANTENNA FOR 5G WIRELESS COMMUNICATION AT 28 GHZ FREQUENCY

Melike KHASIYEV

Bursa Uludağ Üniversity
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Esin KARPAT

Wireless communication systems, which are one of the most significant factors of our lives, have been developing rapidly in recent years. The transition from 1G, which is the beginning of mobile communication systems, to 5G, which is the next generation communication, has been fast. Antennas to be used in mobile communication systems must meet the 5G antenna parameter criteria, as well as being compatible with mobile devices getting smaller and smaller day by day. The production cost of microstrip antennas is low, they are light, small in volume and can be easily integrated into the surface. With these advantages, it is preferred in mobile devices.

In this thesis, microstrip antennas meeting the required antenna parameters for 5G communication systems at 28 GHz resonance frequency are designed. The designs were designed and simulated with the ANSYS HFSS program. Firstly, rectangular microstrip antenna design with recessed microstrip line fed was carried out using antenna formulas. The antenna that fulfills this purpose is designed with Rogers RT Duroid 5880 substrate material. Based on the rectangular microstrip antenna design, a unique S-model microstrip antenna was designed with different geometric structures. The return loss and standing wave ratio in the 28 GHz frequency band were improved by designing a unique winged S-model microstrip antenna with two wing-shaped transmission lines of 0,4 mm wide and 5 mm long, added to the S-shaped patch part of the $13 \times 13 \times 0{,}508\, mm^3$ antenna. While examining antenna performances, resonance frequency, band opacity, voltage standing wave ratio, return loss and gain are taken into account. It meets the desired 5G antenna parameters with 590 MHz bandwidth at 28,00 GHz resonant frequency, -23 dB return loss, 1,13 voltage standing wave ratio and 9,07 dB gain, and this design is recommended for mobile communication systems.

Key words: 5G, 28 GHz, microstrip antenna, micropatch antenna,
2023, xii +62 pages.

TEŞEKKÜR

Yoğun iş hayatı temposunun yanında yürüttüğüm tez çalışmalarımda değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen bana yol gösteren tez danışmanım Sn. Dr. Öğr. Üyesi Esin KARPAT'a, doğduğumdan beri desteğini benden esirgemeyen ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan annem Sn. Nigar TÜRK'e, hayatımın her aşamasında desteğini hissettiren beni motive eden kıymetli eşim Sn. Kanan KHASIYEV'e teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Melike KHASIYEV
15/02/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
SİMGE ve KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. 5.Nesil (5G) Haberleşme Sistemleri	3
2.2. Literatürde Önerilen Mikroşerit Anten Tasarımları	5
2.3. Mikroşerit Antenler	7
2.3.1. Mikroşerit antenlerin genel özellikleri	7
2.3.2. Mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları	8
2.3.3. Mikroşerit antenlerin besleme yöntemleri	9
2.3.4. Anten parametreleri	11
2.3.5. Mikroşerit antenlerin analiz yöntemleri	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. Yüksek Frekanslı Elektromanyetik Simülasyon Programı (HFSS)	22
3.2. Dikdörtgen Mikroşerit Anten Tasarımı ve Analizi	23
4. BULGULAR	33
4.1. Özgün S Modelli Mikroşerit Anten Tasarımı ve Analizi	33
4.2. Özgün Kanatlı S Modelli Mikroşerit Anten Tasarımı ve Analizi	41
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	62

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
ε_r	Malzeme Dielektrik Sabiti
ε_{eff}	Bağıl Dielektrik Sabiti
λ_0	Dalgaboyu
c_0	Boş Uzayda Işık Hızı
Γ	Yansıma Katsayısı
f_r	Antenin Rezonans Frekansı
h	Antenin Alttaş Kalınlığı
t	Antenin Metal Yama Kalınlığı
L	Antenin Yama Uzunluğu
W	Antenin Yama Genişliği
Z_c	Empedans
Y	Admitans
G	Kondüktans
B	Süseptans
P_{rad}	Işıma Gücü
dB	Desibel
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz

Kısaltmalar	**Açıklama**
1G	Birinci Nesil
2G	İkinci Nesil
3G	Üçüncü Nesil
4G	Dördüncü Nesil
5G	Beşinci Nesil
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
HFSS	Yüksek Frekanslı Simülasyon Yazılımı
MA	Mikroşerit Anten
BG	Bant Genişliği
S11	Geri Dönüş Kaybı
VSWR	Gerilim Duran Dalga Oranı
WRC-19	Dünya Radyo Haberleşme Konferansı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Mobil haberleşme sistemlerinin gelişimi..... 3
Şekil 2.2 5G frekans spektrumu..... 4
Şekil 2.3. MA yapısı..... 7
Şekil 2.4. MA geometrileri..... 8
Şekil 2.5. Koaksiyel besleme..... 10
Şekil 2.6. Mikroşerit iletim hattı ile besleme..... 11
Şekil 2.7. Işıma örüntüsü..... 13
Şekil 2.8. Girintili mikroşerit hat besleme..... 20
Şekil 3.1. HFSS arayüzü..... 23
Şekil 3.2. Dikdörtgen MA..... 24
Şekil 3.3. Dikdörtgen MA 3B modeli..... 25
Şekil 3.4. Dikdörtgen MA için dielektrik malzeme seçimi..... 26
Şekil 3.5. Yama ve besleme hattının belirlenmesi..... 27
Şekil 3.6. Işıma kutusunun belirlenmesi..... 27
Şekil 3.7. Dikdörtgen MA VSWR..... 30
Şekil 3.8. Dikdörtgen MA S11 ve BG..... 30
Şekil 3.9. Dikdörtgen MA 3B kazanç..... 31
Şekil 3.10. Dikdörtgen MA polar görünüm kazanç paterni..... 31
Şekil 4.1. Özgün S modelli MA..... 34
Şekil 4.2. Özgün S modelli MA'deki yama genişliğindeki değişimine göre simülasyon sonuçları..... 35
Şekil 4.3. Özgün S modelli MA'deki yama dikey uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 37
Şekil 4.4. Özgün S modelli MA'deki yama yatay uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 38
Şekil 4.5. Özgün S modelli MA'deki S11 ve BG..... 39
Şekil 4.6. Özgün S modelli MA'deki VSWR..... 40
Şekil 4.7. Özgün S modelli MA'deki polar görünüm kazanç paterni..... 40
Şekil 4.8. Özgün S modelli MA'deki 3B kazanç..... 41
Şekil 4.9. Özgün kanatlı S modelli MA..... 42
Şekil 4.10. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama kanat genişliğindeki değişimine göre simülasyon sonuçları..... 44
Şekil 4.11. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sağ ve sol kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 45
Şekil 4.12. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sağ kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 46
Şekil 4.13. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sol kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 47
Şekil 4.14. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama ve kanatlar arası uzaklık değişimine göre simülasyon sonuçları..... 49
Şekil 4.15. Özgün kanatlı S modelli MA'deki S11 ve BG..... 55
Şekil 4.16. Özgün kanatlı S modelli MA'deki VSWR..... 55
Şekil 4.17. Özgün kanatlı S modelli MA'deki polar görünüm kazanç paterni..... 56
Şekil 4.18. Özgün kanatlı S modelli MA'deki 3B kazanç..... 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Teorik olarak hesaplanan yama boyutları..... 24
Çizelge 3.1. Teorik olarak hesaplanan yama boyutları (devamı)..... 24
Çizelge 3.2. Besleme girinti genişliği değişikliğindeki parametreler..... 28
Çizelge 3.3. Besleme girinti genişliği ve yama uzunluğu optimize boyutları..... 28
Çizelge 3.3. Besleme girinti genişliği ve yama uzunluğu optimize boyutları (devamı)..... 29
Çizelge 3.4. Optimize edilen yama boyutları..... 29
Çizelge 3.5. Dikdörtgen MA simülasyon sonuçları..... 32
Çizelge 4.1. Özgün S modelli MA boyutları..... 34
Çizelge 4.2. Özgün S modelli MA'deki yama genişliğindeki değişimine göre simülasyon sonuçları..... 36
Çizelge 4.3. Özgün S modelli MA'deki yama dikey uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 37
Çizelge 4.4. Özgün S modelli MA'deki yama yatay uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 38
Çizelge 4.5. Özgün S modelli MA'deki simülasyon sonuçları..... 41
Çizelge 4.6. Özgün kanatlı S modelli MA boyutları..... 43
Çizelge 4.7. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama kanat genişliğindeki değişimine göre simülasyon sonuçları..... 44
Çizelge 4.8. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sağ ve sol kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 46
Çizelge 4.9. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sağ kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 47
Çizelge 4.10. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sol kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları..... 48
Çizelge 4.11. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama ve kanatlar arası uzaklık değişimine göre simülasyon sonuçları..... 49
Çizelge 4.11. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama ve kanatlar arası uzaklık değişimine göre simülasyon sonuçları (devamı)..... 50
Çizelge 4.12. Özgün kanatlı S modelli MA'deki besleme genişliği değişimine göre simülasyon sonuçları..... 51
Çizelge 4.13. Özgün kanatlı S modelli MA'deki besleme uzunluğu değişimine göre simülasyon sonuçları..... 52
Çizelge 4.14. Özgün kanatlı S modelli MA'deki besleme noktasındaki konum değişimine göre simülasyon sonuçları..... 53
Çizelge 4.15. Özgün kanatlı S modelli MA'deki besleme noktasındaki konum ve besleme genişliği değişimine göre simülasyon sonuçları..... 54
Çizelge 4.16. Özgün kanatlı S modelli MA'deki simülasyon sonuçları..... 56

1. GİRİŞ

Yaşamımızın en önemli unsurlarından olan kablosuz haberleşme sistemleri son yıllarda hızlı bir şekilde gelişmektedir. İletişim teknolojisindeki gelişmeler ile kablosuz kullanıcılar ile uygulamalardaki artış, yüksek veri hızlarındaki ve kanal kapasitelerindeki talepleri gittikçe arttırmaktadır. Kablosuz haberleşmede ilk akla gelen mobil hücresel haberleşme sistemleridir. Mobil haberleşme sistemlerinin başlangıcı olan birinci nesilden (1G), yeni kullanılmaya başlanılan ve gelecekteki yeni nesil haberleşme sistemlerini oluşturan beşinci nesile (5G) geçiş hızlı gerçekleşmiştir. Ayrıca dördüncü nesil (4G) teknolojisinde yüksek işaret gecikmesi sebebiyle cerrahi müdahalelerin uzaktan yapılabilmesi, fabrika otomasyonu ve tamamen insansız araçlar gibi gereksinimlerin kesintisiz olması mümkün değildir. 4G'deki sınırlı bant genişliği ve iletim hızındaki eksiklikler nedeniyle 5G teknolojisi doğmuştur (Stutzmann ve Thiele, 1998). Makineler, insansız hava araçları, otonom ulaşım araçları, akıllı evler, nesleler ve birçok cihazları birbiri ile haberleştirmek için geliştirilmiş yeni ağ tipi ile adlandırılmaktadır. Endüstriyel alan, sağlık hizmetleri, tarım teknolojileri ve uzaktan kontrol ile birçok alanda yardımcı olacaktır (Niu, Li, Jin, Su ve Vasilakos, 2015).

5G'nin başarılı kullanımında ülkeler ortak bant kümelerinde anlaşmak için Dünya Radyo Haberleşme Konferansı (WRC-19)'da kullanılacak frekans kararları alınmıştır. Genel olarak ülkeler 5G teknolojisi için 24 GHz - 30 GHz bandında çalışmaktadır. (Marcus, 2019).

5G kablosuz haberleşme sistemlerinde olduğu gibi mobil haberleşme sistemlerinde de anten en önemli unsurlardandır. Mobil haberleşme sistemlerinde kullanılacak antenlerin 5G anten parametre kriterlerini sağlamasının yanı sıra mobil cihazlarında gün geçtikçe küçülmesi ile boyutlarının da uyumlu olması gerekmektedir. Mikroşerit antenler hafif, küçük hacimli ve bulundukları yüzeye kolayca entegre edilebilirler, üretim maliyeti düşüktür, uçak, füze ve uydu gibi hassas cihazlardaki aerodinamik yapılara zarar vermeden kolay bir şekilde monte edilebilmektedir. Bu avantajlar ile mobil cihazlar başta olmak üzere birçok kablosuz haberleşme sistemlerinde tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı 28 GHz rezonans frekansında 5G haberleşme sistemleri için gerekli anten parametrelerini karşılayan mikroşerit anten tasarlamaktır. Bu kapsamda farklı geometri ve boyut tasarımları ile rezonans frekansı, BG, S11 ve VSWR etkisi incelenmiştir. Bu amacı gerçekleştirmek için ilk olarak anten formülleri kullanılarak girintili mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amacı gerçekleştiren anten Rogers RT Duroid 5880 alttaş malzemesi ile tasarlanmıştır. Dielektrik katsayısı 2,2 olan bu alttaşın kalınlığı 0,508 mm, bakır kalınlığı 0,035 mm olan iki yüzeyi bakır malzeme ile kaplı PCB'dir. Kayıp tanjantı 0,0009 olan alttaş yüksek frekanslardaki düşük kayıp oranı ile tercih edilmiştir.

Dikdörtgen mikroşerit anten tasarımından yola çıkarak Rogers RT Duroid 5880 alttaş malzemesi ile farklı geometrik yapılar kullanılarak özgün kanatlı S modelli mikroşerit anten tasarlanmıştır. Genişliği 0,84 mm ve uzunluğu 2,8 mm olan hatla beslenmektedir. Besleme hattının sonunda antenin ışıma yapısı olan kanatlı S şeklindeki yama 0,9 mm genişliğinde 6,7 mm uzunluğunda ve yamanın kanatları 0,4 mm genişliğinde, 5 mm uzunluğundadır. Antenin S şeklindeki yama kısmına eklenen 0.4 mm genişliğindeki ve 5 mm uzunluğundaki iki kanat şeklindeki iletim hattı ile 28 GHz frekans bandında ışıma yapan antenin S11 ve VSWR iyileştirilmiştir. Tez çalışmasındaki anten tasarımları ve simülasyonları ANSYS HFSS programı ile gerçekleştirilmiştir. Anten parametrelerindeki performanslar incelenirken rezonans frekansı, BG, S11, VSWR ve kazanç göz önüne alınmıştır. 5G frekanslarındaki anten parametrelerini karşılayan bu tez kapsamındaki tasarımlar önerilmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Beşinci Nesil (5G) Haberleşme Sistemleri

Mobil haberleşme sistemlerinin başlangıcı olan 1G'den, yeni kullanılmaya başlanılan ve gelecekteki yeni nesil haberleşme sistemlerini oluşturan 5G'e geçiş hızlı gerçekleşmiştir. 1G teknolojisinin kullanımından sonraki süreçte dönem dönem yeni nesiller geliştirilerek kullanıma sunulmuştur. Mobil haberleşme sistemlerinin gelişimi Şekil 2.1'de verilmiştir. 1970'lerde hücresel konsept ilk uygulamasından sonra, kablosuz iletişim ağları daha fazla yaygınlaşmıştır ve mobil hücresel aboneler her yıl daha da artmaktadır (Rappaport, 2002).



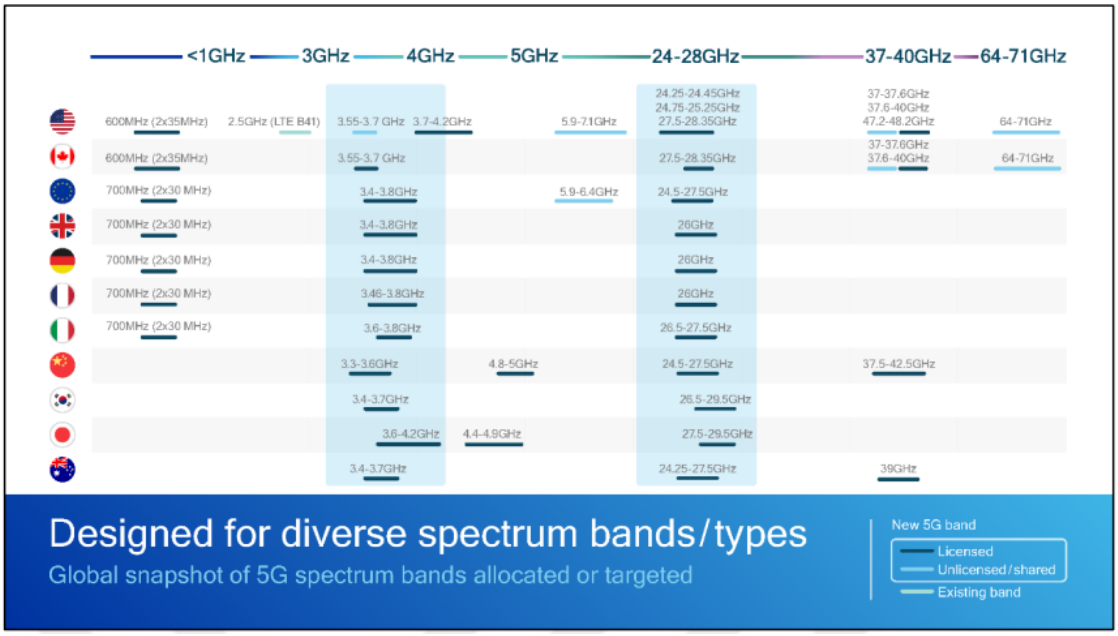
Şekil 2.1 Mobil haberleşme sistemlerinin gelişimi (EC, 2021)

Dünya genelinde kablosuz cihaz sayısının artması ile gelecekteki senelerde, karbondioksit emisyonunun ve enerji tüketiminin hızlı bir şekilde artması beklenmektedir. Kullanılan teknolojilerin yanı sıra enerji verimliliği, spektral verimlilik, karbondioksit emisyonunu azaltma ve operatörlerin maliyetlerini azaltmak için yeni araştırmalara başlanmıştır (Matin ve Sayeed, 2010). Ayrıca 4G teknolojisinde yüksek işaret gecikmesi sebebiyle cerrahi müdahalelerin uzaktan yapılabilmesi, fabrika otomasyonu ve tamamen insansız araçlar gibi gereksinimlerin kesintisiz olması mümkün değildir. Bu nedenle 5G teknolojisi doğmuştur (Stutzmann ve Thiele, 1998).

5G beraberinde birçok alanda hizmet edebilecek olanaklarla gelmektedir. Makineler, ulaşım araçları, nesleler ve birçok cihazları birbiri ile haberleştirmek için geliştirilmiş yeni ağ tipi ile adlandırılmaktadır. Yüksek veri hızı, çok düşük gecikme süresi, ağ genişliği, güvenlik ve daha çok kullanıcıyı aynı zamanda ağa bağlamayı amaçlamaktadır (Jarray, Bouabid ve Chibani, 2015). 5G'nin gelişmesi ile kapsama alanı büyüyecek, hızlanan veri aktarımı ile tüketicilerin bekleme süresi azalacaktır. Endüstriyel alan, sağlık hizmetleri, tarım teknolojileri ve uzaktan kontrol ile birçok alanda yardımcı olacaktır (Niu, Li, Jin, Su ve Vasilakos, 2015).

WRC-19 ile 24 GHz – 28 GHz ve 37 GHz – 40 GHz bantlarındaki uygulamalara destek sağlanmasını ve 5G uygulamalarında gereken koşulların yerine getirilmesini önermiştir. Genelde ülkeler 5G de 24 GHz - 30 GHz kapsamında çalışmaktadır. Bu kapsamda yatırımlar da çoğalacağı için yapılacak tasarımlar günden güne değerlenmektedir (Marcus, 2019).

Şekil 2.2'de Qualcomm tarafından düzenlenen, 5G frekansları verilmiştir. Bu veriler ülkelere göre belirtilmiştir.



Şekil 2.2 5G frekans spektrumu (Qualcomm, 2020)

5G teknolojisindeki antenlerin belirlenen frekanslarda, yüksek bant genişliği ve verimde, maliyeti düşük ve hassasiyette olması gerekmektedir. Böyle gereksinimler ile düşük güç ile çalışabilen, minik boyutlu, kolayca üretilen ve milimetre dalgada iyi performanslı mikroşerit anten (MA) 5G de çok kuvvetli adaydır. Baz istasyonları, mobil telefonlar ve diğer iletişim cihazları için MA yapısı gereği minyatürlüğü ile çok kullanışlıdır. Antenin çok bantlı haberleşmesinde, alıcı-verici iletişiminde ve birden çok uygulamalarda çalışması gerekmektedir. MA'in dezavantajları ise dar BG ve düşük kazanca sahip olmalarıdır. 5G de milimetre dalgadaki yol kaybının önlenmesi için antenin kazancı yüksek olmalıdır (Aboshosha, El-Mashade ve Hegazy, 2019). MA 5G teknolojisinde istenilen gereksinimleri karşılayabilir. Literatürde MA dar BG'ni ve kazancını arttırmak için yapılan çalışmalara değinilmiştir.

2.2. Literatürde Önerilen Mikroşerit Anten Tasarımları

Son yıllarda 5G teknolojisi için farklı MA tasarımları yapılmış ve literatüre kazandırılmıştır. Önerilen bazı anten yapıları aşağıda sunulmuştur.

28 GHz ve 38 GHz frekanslarında çalışan yaprak şeklinde sekiz tane fiyonk anten elemanlarından oluşan anten dizisi (Parchin, Shen ve Pedersen, 2016), 27 GHz, 33 GHz ve 38 GHz frekanslarında üç bantlı olan anten dizisi (Jilani ve Alomainy, 2017), 26,5 GHz ve 28,8 GHz frekanslarında anten dizisi (Rahman ve diğerleri, 2017), 26,5 GHz ve 31 GHz frekanslarında çalışan huzme yönlendirmeli anten dizisi (Zhang, Syrytsin ve Pedersen, 2018), 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında ayarlanabilir anten dizisi (Parchin ve diğerleri, 2018), yakınlık kuplaj besleme tekniği ile 6 × 5 anten dizisi (Diawuo ve Jung, 2018), 28 GHz frekansında 8 elemanlı anten dizisi (Hill ve Kelly, 2019), mobil cihazlar için yagi benzeri ışıyıcılardan oluşan anten dizisi (Parchin ve diğerleri, 2019), mobil cihazlar için 16 elemanlı yonca şeklinde (Özpınar, Aksimsek ve Tokan, 2020), MA dizileri tasarlanmıştır.

25,1 GHz ve 37,5 GHz frekanslarında (Jilani ve Alomainy, 2016), 27,5 GHz ve 35,7 GHz frekanslarında dual band (Apoorva ve Kumar, 2019), 23,8 GHz, 39,4 GHz, 66,2 GHz, 81,9 GHz ve 93,9 GHz frekanslarında multiband (Saeed, Gaid, Aoun ve Sallam, 2021),

29,5 GHz ve 30,5 GHz frekanslarında (Ahmad, Sun, Zhang ve Samad, 2020), 27,6 GHz ve 28,55 GHz frekanslarında (Qayyum ve diğerleri, 2020), küçük yapılı milimetre dalga MA tasarlanmıştır.

28 GHz ve 38 GHz frekanslarında yama üzerine dairesel yarıklar açılarak (Li, Luo ve Liu, 2017), 27,3 GHz ve 39,75 GHz frekanslarında yama üzerine U şeklinde yarık açılarak 16 × 16 anten dizisi (Rafique, Khalil ve Rehman, 2017), 28 GHz frekansında yama üzerine tek ve çift U şekilli yarık açılarak 2 × 2 anten dizisi (Yoon ve Seo, 2017), yama üzerine çift U şeklinde yarık açılarak 4 × 4 anten dizisi (Keum ve Choi, 2018), 28 GHz frekansında yama üzerine U şekilli yarıklar açılarak 8 elemanlı anten dizisi (Ardianto, Lanang, Renaldy ve Yunita, 2018), 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında yama üzerine simetrik yarıklar açılarak anten dizisi (Rahayu, Fitria, Hakiki ve Kurniawan, 2018), 28 GHz frekansında yama üzerine yarık açılarak (Kaeib, Shebani ve Zarek, 2019) MA tasarlanmıştır.

28 GHz ve 38 GHz frekanslarında toprak yüzeyinin kesilmesiyle (Ullah, Tahir ve Khan, 2017), 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında toprak yüzey üzerine H şeklinde yarık açılarak (Marzouk, Ahmed ve Shaalan, 2019), 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında toprak yüzey üzerine simetrik olarak F şeklinde yarıklar açılarak (Mpele, Mbango ve Konditi, 2019), bozulmuş toprak yüzeyi kullanarak MA tasarlanmıştır.

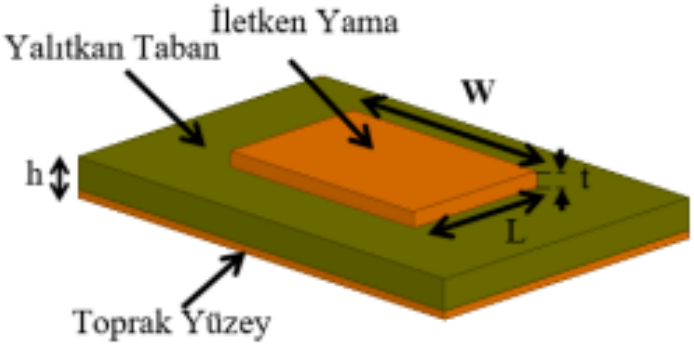
Haraz (2015), Ali (2016) ve Haider (2018) tarafından 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında, farklı dielektrik sabiti ve şekillere sahip MA tasarlanmıştır.

Önerilen antenler 5G anten parametrelerine uygundur, anten parametrelerini iyileştirmek için farklı dielektrik sabitli alttaşlar, farklı besleme yöntemleri ve farklı yapılara sahip anten geometrileri denenmiştir. Tasarımlarda anten uzunluğu arttırılarak rezonans frekansı azalması, anten uzunluğu azaltılarak da rezonans frekansının arttırılması gözlemlenmiştir. Tasarımlarda yama veya toprak üzerine farklı şekillerde yarıklar açılarak ve anten dizisi kullanılarak antenin BG ve kazancı arttırılmıştır.

2.3. Mikroşerit Antenler

2.3.1. Mikroşerit antenlerin genel özellikleri

MA ince metalik yamanın, toprak yüzeyinden h yüksekliğinde ve dielektrik malzemenin metal yamasıyla toprak yüzeyini ayırdığı anten çeşididir.



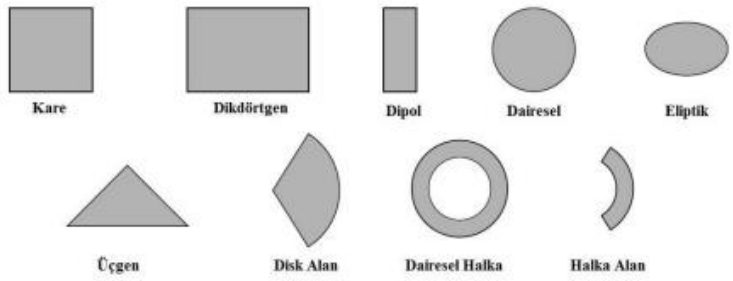
Şekil 2.3. MA yapısı

Şekil 2.3'de metalik yama genişliği (W), uzunluğu (L), yalıtkan tabandaki dielektrik geçirgenliği (ε_r) ve yalıtkan tabandaki malzeme kalınlığı (h) MA'in parametrelerini etkileyen temel etkenlerdir. İletken yama kalınlığı (t) denklem hesaplamalarında genellikle ihmal edilmektedir (Balanis, 2005).

Temel olarak anten boyut kriterleri;

- Metal yama kalınlığı, $t \ll \lambda_0$
- Yalıtkan taban kalınlığı, $h \ll \lambda_0$, $0{,}003\lambda_0 \leq h \leq 0{,}05\lambda_0$
- Yama uzunluğu, $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$
- Dielektrik geçirgenliği, $2 < \varepsilon_r < 12$ ile ifade edilmektedir.

Anten performansının iyi olması için dielektrik geçirgenliği düşük ve kalın olan yalıtkan malzemeler seçilmektedir. Yüksek BG, verimlilik ve ışıma büyük yama boyutuna karşı ışıma yapan alanı daha da az sınırlar. Dielektrik sabiti arttıkça antenin verimliliği ve ışıma örüntüsü azalır. Bu sebeple antenin boyutları ile parametrelerindeki performansı arasında iyi bir bağlantı yakalanmalıdır (Pozar, 1992).



Şekil 2.4. MA geometrileri

Işıma yapan yama farklı geometrilerde olabilir. Şekil 2.4'de dipol, dikdörtgen, kare ve dairesel yamalar en fazla tercih edilenlerdir, analiz ve üretimleri kolaydır. Mikroşerit dipoller dizi anten uygulamalarında tercih edilir (Balanis, 2005).

2.3.2. Mikroşerit antenlerin avantaj ve dezavantajları

MA'ler 100 MHz ile 100 GHz arasındaki uygulamalarda kullanılırlar.

Giderek artan kullanım alanına sahip olan MA'lerin avantajları;

- Hafif, küçük hacimli ve bulundukları yüzeye kolayca entegre edilebilirler.
- Üretim maliyeti düşük ve kolayca üretilebilirler.
- Besleme noktalarındaki değişikliklerle dairesel ve doğrusal ışımalar yapabilirler.
- Mikrodalga tümleşik devrelerine kolayca monte edilebilirler.
- Yassı tasarıma sahip olduklarından, mekanik tasarımlarda kolayca uyumlanabilir.
- Uçak, füze ve uydu gibi hassas cihazlardaki aerodinamik yapılara zarar vermeden kolay bir şekilde monte edilebilmektedir.

MA'lerin avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Örneğin;

- Dar BG ne sahip olması
- Kazançlarının düşük olması
- Güç kapasitelerinin düşük olması
- Yarı düzlem içinde ışıma yapmaları
- Işıma yapan elemanlar ve besleme arasındaki yalıtım zayıflığı
- Besleme ve bağlantılardan istenilmeyen kaçak ışımalar

Yapılan araştırmalar ve geliştirmeler ile farklı teknikler kullanılarak bu dezavantajlar belli oranlarda giderilebilir. Örneğin BG, alttaş kalınlığı ve farklı malzemeler ile dezavantajlar avantaja dönüştürülebilir. Kazancın düşük olması anten dizileri kullanılarak iyileştirilebilir (Garg, Bhartia, Bahl ve Ittipiboon, 2001). MA'lerin kalite faktörü (Q) çok yüksektir. Yüksek kalite faktörü BG'nin dar olmasına ve verimliliğin düşük olmasına yol açar. Yüksek kalite faktörü alttaş kalınlığının artırılması ile azaltılabilir. Fakat kalınlık artırıldığı zaman, kaynaktan sağlanmış olan gücün fazlalığı yüzey dalgalarını meydana getirmektedir ve istenilmeyen güç kaybına sebep olmaktadır (Balanis, 2005).

$$Q = 2 \times \pi \times \frac{depolanan\ enerji}{yayılan\ güç} \tag{2.1}$$

Teknolojinin ilerlemesiyle MA'lerin uygulamasındaki alanlar çoğalmıştır, bunlar;

- Biyomedikal ölçümler,
- Gezgin haberleşme,
- Uydu haberleşmesi,
- Doppler ve diğer radarlar,
- Güdümlü füzeler,
- Nesnelerin interneti gibi sıralanabilir (Balanis, 2005).

2.3.3. Mikroşerit antenlerin besleme yöntemleri

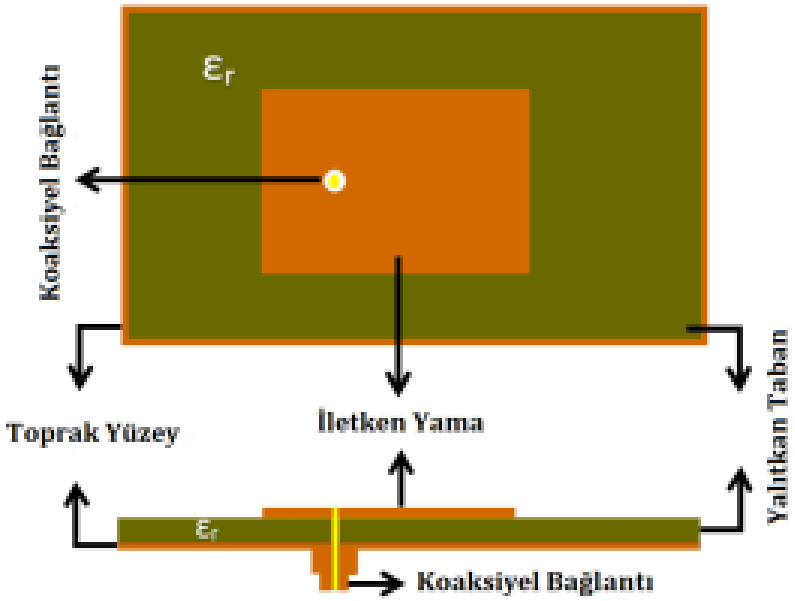
MA'lerin beslenmesi için çeşitli yapılar vardır. Yaygın olarak kullanılanlar;

- Koaksiyel beslemesi,
- Mikroşerit iletim hattı ile beslemesinden içe girintili, çeyrek dalga dönüşümlü, kenar bağlantılı beslemesi,
- Açıklık kuplajlı beslemesi,
- Yakınlık kuplajlı beslemesi,
- Eşdüzlemsel dalga kılavuzlu beslemesi

Besleme yöntemlerinde seçim, parametrelere bağlıdır. En fazla tercih edilenler koaksiyel besleme ve mikroşerit beslemedir.

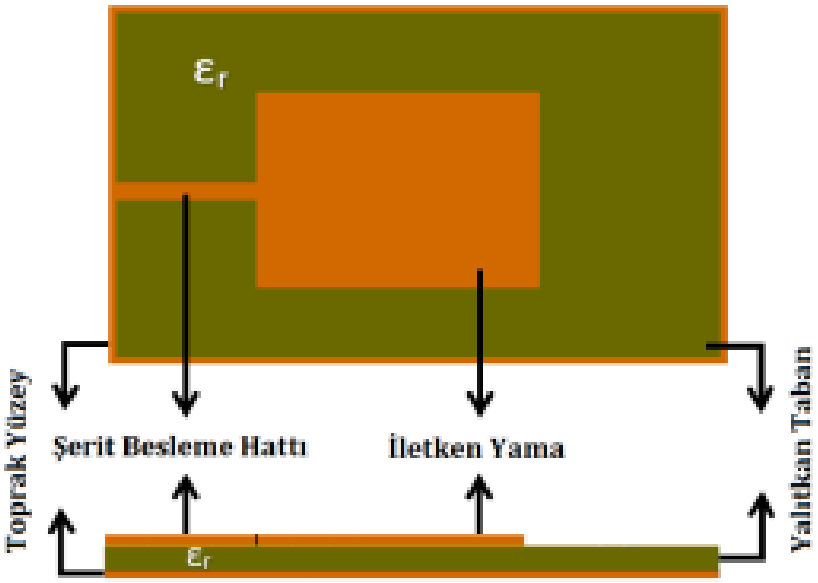
Koaksiyel beslemede, kablonun dış tarafındaki topraklama kısımı antenin toprağına, kablonun iç tarafındaki güç ileten kısımı da antenin yama yüzeyinin alt tarafına bağlanmaktadır. Şekil 2.4'de koaksiyel besleme gösterilmiştir.

Koaksiyel prob şekillendirilmeye uygundur, istenmeyen ışımalar azdır ve üretimi kolaydır. Fakat alttaş malzeme kalın olduğunda ($h > 0{,}02\lambda_0$) koaksiyel besleme BG'ni düşürür ve beslemenin modellenmesi zorlaşır (Balanis, 2005).



Şekil 2.5. Koaksiyel besleme

Mikroşerit hatlı besleme yamaya bağlıdır, iletim hattının genişliği yamadan daha incedir. Mikroşerit besleme hattının modellenmesi ve üretimi çok basittir. Bu besleme yönteminde alttaş malzemenin kalınlığı fazlalaşınca yüzeydeki dalgaları ve istenmeyen ışımaları çoğalır, bu durumda BG'ni yaklaşık olarak yüzde beş oranında düşürmektedir (Balanis, 2005). Şekil 2.5'de mikroşerit besleme gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Mikroşerit iletim hattı ile besleme

Bu tez çalışmasında MA'nin geometri değişimindeki etkiler incelendiği için antenin besleme çeşidi sabit tutulmuştur ve yalnızca mikroşerit iletim hattı ile besleme çeşidi kullanılmıştır.

2.3.4. Anten parametreleri

MA tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken anten parametreleri vardır. Bu parametreler geri dönüş kaybı (S11), gerilim duran dalga oranı (VSWR), bantgenişliği (BG), ışıma örüntüsü, giriş empedansı, kazanç, verimlilik ve yönlülüktür.

- **Geri dönüş kaybı (S11)**

S11, antene gönderilmiş olan yükün ne kadarlık bir kısmının geri döndüğünü ifade etmektedir. Cihazların ya da haberleşme hatların arasındaki eşleşmenin uyum derecesini göstermektedir. S11 yüksek ise eşleşme iyi olmuştur. Birimsiz olan bu büyüklüğü logaritmik çizelgeye indirgemek için dB birimi kullanılır. Anten ve vericinin empedansı uyumlu olmaz ise yansıyan dalgalar, duran dalgaları meydana getirir.

$$RL = -20log|\Gamma| \ (dB) \tag{2.2}$$

$$\Gamma = \frac{V_o^+}{V_o^-} = \frac{Z_p - Z_t}{Z_p + Z_t} \tag{2.3}$$

Yansımanın katsayısı Γ, yansıyan dalga genliği V_o^+, iletilen dalga genliği V_o^-, yük ve empedansın karakteristikliği Z_p & Z_t ile ifade edilmektedir. Anten ile alıcı ve verici arasında çok iyi bir eşleşme olduğunda $\Gamma = 0$ ve $RL = \infty$ olmaktadır. Geri dönen ve yansıyan gücün olmadığını göstermektedir. $\Gamma = 1$ ve $RL = 0$ olduğu zamanda gönderilen gücün ise geri yansıdığını göstermektedir. Teorik kısımda çok iyi bir durumda yansımanın sıfır değerinde olması gerekmektedir ve bu durum pratikte mümkün olmamaktadır. VSWR'nın ikinin altında olması kabul edilmektedir, bu $-9{,}55\ dB$ S11'a karşılık gelmektedir (Norvell ve diğerleri, 1999).

- **Gerilim duran dalga oranı (VSWR)**

İletim hattındaki, maksimum gerilim miktarının minimum gerilim miktarına oranı VSWR'dır. Yansıma katsayısı Γ, maksimum gerilim V_{max} ve minimum gerilim V_{min} değerlerini ifade eder.

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{2.4}$$

VSWR iletim hattının empedans karakteristliği ve antenin giriş empedansının uyumluluğunu göstermektedir. Yansımanın katsayısı 1 ya da -1 olduğunda VSWR sonsuza giden değeri alır ve istenmeyen durumdur.

- **Bantgenişliği (BG)**

BG antenin düzgün bir şekilde yayıldığı veya enerji aldığı frekans aralığıdır. Antenin veriminde $VSWR \leq 2$ ($RL \leq -9{,}55\ dB$) iyi performans sağlar.

$$BW = f_{max} - f_{min} \tag{2.5}$$

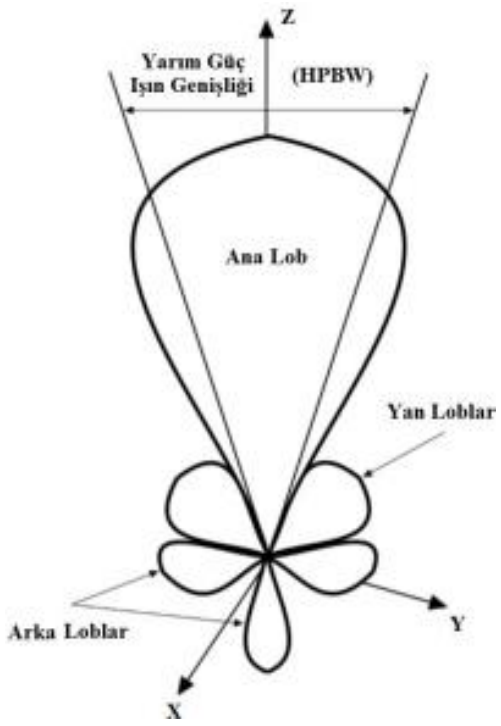
$$BW(\%) = \frac{f_{max}+f_{min}}{f_c} \times 100 \quad (2.6)$$

Antenin f_{max} maksimum frekansı, f_{min} minimum frekansı ve f_c merkez frekansıdır. BG'nin oranına bağlı olarak dar bantlı antenler, geniş bantlı antenler veya ultra geniş bantlı antenler olarak ayrılmaktadır.

- **Işıma örüntüsü**

Işıma örüntüsü, uzaydaki koordinatların matematiksel işlevi ile ifade edilmektedir. "Elektrik akım modeli" (E) veya "manyetik akımı modeli" (H) ile MA'nin ışıma örüntüsü iki veya üç boyutlu çizilebilmektedir (Ghafar, 2005).

Işıma örüntüsü, ana, yan ve arka loblardan oluşmaktadır. Ana lob kısımı antenin maksimum ışıma yapan bölümüdür. Yan loblar, istenenin dışındaki yönlerde ortaya çıkan ışımalardır. Arka loblar ana ışımanın zıt yönündeki ışımalardır. Işıma şekillerine göre yönlü, yönsüz ve tüm yönlü olarak adlandırılır. Şelik 2.6'da ışıma örüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Işıma örüntüsü

- **Kazanç, verimlilik ve yönlülük**

Anten kazancı ve yönlülüğü belirli referansa göre tanımlanan performans parametreleridir. Noktasal bir kaynak her yönlere eşdeğer ışımalar yapmaktadır. Buna izotropik kaynak denir ve bu referans alınmaktadır. İzotropik olan kaynağın her yönlere yaydığı güce eşdeğer olan bir gücü belirli bir yöne doğru yayabilmesine anten yönlülüğü denmektedir. Kayıpsız olan antenlerde yönlülüğü, antenin kazancıdır. Yalnızca kayıplı olan antenlerdeki kazanç, yönlülüğü ve kayıp oranının çarpımıdır ve birimi dB'dir. Anten çok yönlü olduğunda yayılan enerjiye göre bu yönde yayılan enerji miktarı ile oranı, kazancıdır. Antenin yönlülüğü hesaplanabilsede, kazancı referans antendeki ölçümler ile bulunur (Hamieh, 2012).

- **Giriş empedansı**

Antenin giriş empedansı, bir terminaldeki empedans veya bir çift terminalindeki voltajın akıma oranı ile tanımlanır.

$$Z_R = R_A + jX_A \tag{2.7}$$

$$R_A = R_R + R_L \tag{2.8}$$

R_A empedansın reel kısmı, X_A ise sanal kısmıdır. Reel kısmı R_L kayıp direnci ve R_R ışıma direncinde oluşur.

Anten tasarımı yapılırken, antenin empedansının kaynak empedansıyla uyumluluğu en verimli sonuca ulaştırmaktadır. Mikrodalgadaki uygulamaların çoğunluğu 50Ω giriş empedansıyla tasarlanmaktadır, bu sebeple istenilen durum tasarlanacak antenleri 50Ω ile eşleştirmektir.

2.3.5. Mikroşerit antenlerin analiz yöntemleri

MA'lerin analiz modelleri, yama kenarları çevresinde eşdeğer manyetik akım dağılımındadır. Analiz modellerinden en ünlü olanları, boşluk modeli, iletim hattı modeli ve tam dalga modelidir.

Yöntemlerden MA'ler için en basit ve uygulanabilir olan model iletim hattıdır. Bu tezde tasarım özellikleri belirlenirken mikroşerit iletim hattı modeli tercih edilmiştir.

Bu model de L uzunluğunda, W genişliğindeki bir hat ile ışıma yapan iki adet dar yarık dizi vardır. Yalıtkan malzeme kalınlığından başka, alt ve üst tarafında çok ince olan iletken (altın ya da bakır) tabaka vardır ve genelde hesaplamalarda ihmal edilir. Yalıtkan malzemenin ε_r ve kayıp tanjantı ($tan\Upsilon$)'dir. MA, toprak yüzeyi ve besleme hattı ile elektromanyetik enerjiyi alıcı ve verici ile taşıyan iletim hattı olarak davranmaktadır.

- **Yama genişliği**

MA'lerde ışıma yapacak yama W genişliğine, yalıtkanın ε_r dielektrik geçirgenliğine, c_0 boşluktaki ışık hızına ve antenin f_r rezonans frekansına bağlıdır. Yüksek rezonans frekanslarında antenin etkin yama genişliği daralır (Balanis, 2005).

$$W = \frac{c_0}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} \tag{2.9}$$

- **Saçaklanma etkisi**

MA'lerin boyutları sınırlı olduğu için yamanın kenarlarındaki ışıma yapan alanlar toprağa doğru saçaklanırlar. Saçaklanmanın etkisi, yama geometrik boyutları ve yalıtkanın kalınlığı ile değişmektedir. ($L/h \gg 1$) olduğunda elektrik alan çizgilerindeki saçaklanmalarda azalma olur. Bu nedenle tasarım saçaklanmaların rezonans frekansına etkisi değerlendirilerek gerçekleştirilmelidir.

($W/h > 1$) ve ($\varepsilon_r \gg 1$) olduğunda, elektrik alan çizgileri yalıtkandaki katman üzerinde yoğunlaşmaktadır. Yayılan ışımanın bir bölümü havada ve diğer geriye kalan bölümüde yalıtkan katman üzerinde yayıldığı için şerit hattı üzerindeki ışımanın yayılımı ve saçaklanmanın etkisinden dolayı (ε_{eff}) ihtiyaç olur.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[1 + 12\frac{h}{W}\right]^{-1/2} \quad (2.10)$$

ε_r hava ortamı ve yalıtkan katmanın arasında olan mikroşerit hatta $1 < \varepsilon_{eff} < \varepsilon_r$'dir. Işımanın olduğu yamada boşluktaki dalga boyu uzunluğu λ_0, ışığın boşluktaki hızı c_0 ve çalışma frekansı f_r dir (Balanis, 2005).

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_r} \quad (2.11)$$

- **Yama uzunluğu**

MA'de L ışıma yapan yamanın uzunluğu, λ_r rezonans frekansındaki dalga boyu ve Δl saçak alanının uzaklığına bağlıdır.

$$L = \frac{\lambda_r}{2} - 2\Delta l \quad (2.12)$$

$$\lambda_r = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} = \left[\frac{c_0}{f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\right] \quad (2.13)$$

Saçaklanmanın etkisiyle E (x, y) düzlemindeki ışıyan yamanın uzunluğu, kenarlardan Δl artışına sebep olmaktadır. Δl fonksiyonu, ε_{eff} ve yamanın genişliğinin yalıtkan kalınlığının oranı ile tanımlanmaktadır (Balanis, 2005).

$$\Delta l = 0.412h\frac{(\varepsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\varepsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad (2.14)$$

$$L = \left[\frac{C_0}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\right] - 2\Delta l \tag{2.15}$$

- **Giriş direnci, besleme hattı hesabı ve konumu**

Mikroşerit besleme hattı ile ışıma yapan yama, paralel iki admitans Y (G kondüktans ve B süseptans) ile modellenmektedir.

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \tag{2.16}$$

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0}\left[1 - \frac{1}{24}(k_0 h)^2\right] \qquad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \tag{2.17}$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0}[1 - 0{,}636 ln(k_0 h)] \qquad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \tag{2.18}$$

Özdeş Y_1 ve Y_2 admitanslı iki adet yama (ışıma yapan yama ile mikroşerit besleme hattı)

$$Y_2 = Y_1, \quad G_2 = G_1, \quad B_2 = B_1 \tag{2.19}$$

Yamanın kondüktansı (G_1), ışıma gücüne (P_{rad}) bağlı olarak da elde edilir.

$$G_1 = \frac{2P_{rad}}{|V_0|^2} \tag{2.20}$$

Elektrik alan denklemi kullanarak ışıyan güç;

$$P_{rad} = \frac{|V_0|^2}{2\pi\eta_0}\int_0^{\pi}\left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2}\cos\theta\right)}{\cos\theta}\right]^2 \sin^3\theta d\theta \tag{2.21}$$

Böylece eşitlik (2.20)'deki kondüktans eşitlik (2.22)'deki şekilde ifade edilebilir.

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \tag{2.22}$$

$$I_1 = \int_0^{\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \tag{2.23}$$

$$= -2 + \cos(X) + XS_i(X) + \frac{\sin(X)}{X}$$

$$X = k_0 W \tag{2.24}$$

Eşitlik (2.23) ve (2.24) asimptot değerleriyle iletkenlik değeri eşitlik (2.25)'deki değerler ile ifade edilir (Balanis, 2005).

$$G_1 = \begin{cases} \frac{1}{90}\left(\frac{W}{\lambda_0}\right)^2, & W \ll \lambda_0 \\ \frac{1}{120}\left(\frac{W}{\lambda_0}\right), & W \gg \lambda_0 \end{cases} \tag{2.25}$$

Yamadaki toplam admitans yani giriş direnci iletim hattının admitans dönüşümleri ile bulunmaktadır. İdeal durumda ışıma yapan yama ve besleme hattı λ/2 mesafe ile konumlanır "λ dielektrikteki dalga boyu", fakat saçaklanmanın etkisi ile yamaların elektriksel boyu fiziki boyundan daha fazladır. Bu sebeple yamalar arası aralık λ/2'den daha küçüktür. Eğer ki boyundaki azalması eşitlik (2.15)'e uygun seçilir ise (0,48λ<L<0,49λ) besleme hattına aktarılan admitans;

$$Y_2^* = G_2^* + jB_2^* = G_1 - jB_1 \tag{2.26}$$

$$G_2^* = G_1 \tag{2.27}$$

$$B_2^* = -B_1 \tag{2.28}$$

Bu sebeple toplam giriş admitansı gerçeldir;

$$Y_{in} = Y_1 + Y_2^* = 2G_1 \tag{2.29}$$

Toplam giriş admitansı gerçel olduğundan rezonans giriş direnci de gerçeldir;

$$Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}} = R_{in} = \frac{1}{2G_1} \tag{2.30}$$

Yama ve besleme hattı arasındaki karşılıklı direnç;

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \tag{2.31}$$

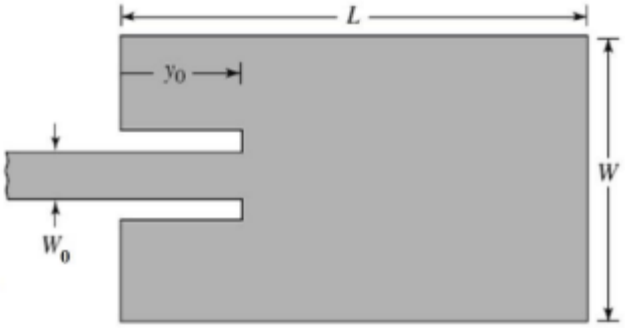
(+) tek (simetrik olmayan) rezonans gerilim dağılımlı modlarda kullanılırken, (-) çift (simetrik) rezonans gerilim dağılımlı modlarda kullanılmaktadır. Uzak bölge alanlarında karşılıklı direnç;

$$G_{12} = \frac{1}{|V_0|^2} Re \iint_S E_1 \times H_2^* \, . \, ds \tag{2.32}$$

E_1 yamadan yayılan elektik alan, H_2 besleme hattından yayılan manyetik alan, V_0 yama ile besleme hattı arasındaki gerilimdir, integral geniş çaplı küre üzerinden alınır;

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^{\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3\theta d\theta \tag{2.33}$$

J_0 sıfırıncı sıranın birinci Bessel fonksiyonu, k_0 ise dalga numarası ile ifade edilmektedir. Eşitlik (2.17) ve (2.31)'deki gibi, giriş direnci alttaş kalınlığından bağımsızdır. Mod açılım analizine göre de giriş direnci h'dan etkilenmez. Eşitlik (2.17), (2.31) ve G_1'in G_{12}'ye empedanstaki etkisine göre W artırılarak giriş direnci düşürülebilir. Bu durum, W/L ikiyi geçmediği sürece geçerli olmaktadır, ikiden sonra antenin açıklık değeri azalır. Giriş direnci, yamadan içeri y_0 kadar girinti yapılması ile değişkenlik gösterebilir ve bu yol besleme hattındaki empedeans uyumlandırması için kullanılabilmektedir.



Şekil 2.8. Girintili mikroşerit hat besleme

Şekil 2.8'deki y_0 girinti ölçüsü değiştirilince girinti açılmadanki duruma kıyasla giriş direnci düşürülebilir. Uyumlandırma devresindeki karakteristik empedans;

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} ln\left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h}\right], & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}\left(\frac{W_0}{h} + 1{,}393 + 0{,}667\, ln\left(\frac{W_0}{4} + 1{,}44\right)\right)}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (2.34)$$

W_0 mikroşerit hattın genişliğidir (Şekil 2.8). Mod açılım analizine göre girintili beslemenin giriş direnci;

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})}\left[cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right) + \frac{G_1^2 + B_1^2}{Y_c^2} sin^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right) - \frac{B_1}{Y_c}\sin\left(\frac{2\pi}{L}y_0\right)\right] \quad (2.35)$$

$Y_c = 1/Z_c$ 'dir. Çoğu mikroşerit için $G_1/Y_c \ll 1\ ve\ B_1/Y_c \ll 1$ olduğu için (2.35) denklemi (2.36) olur ve y_0 girintili mikroşerit besleme için giriş direnci denklemi olur (Balanis, 2005).

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right)$$

$$= R_{in}(y = 0) cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right) \quad (2.36)$$

MA'de beslemenin konumu (xo, yo) hem elektromanyetik dalgayı antenin yüzeyine ulaştırır hemde maksimum ışımayı sağlar. Besleme noktasının pozisyonu aşağıdaki denklemler ile bulunur. Birinci denklem koaksiyel beslemede, ikinci denklem içe girintili beslemede kullanılır (Kumar ve Ray, 2003).

$$x_0 = \frac{W}{2} \tag{2.37}$$

$$x_0 = \frac{c_0}{\sqrt{2\varepsilon_{eff}}} \frac{4{,}65x10^{-12}}{f_r} \tag{2.38}$$

$$y_0 = \frac{L}{\pi} cos^{-1} \sqrt{\frac{50}{Z_c}} \tag{2.39}$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında yapılan MA tasarımları HFSS elektromanyetik simülasyon programı ile tasarlanıp simüle edilmiştir. HFSS ile tasarlanan MA parametrelerinden S11, VSWR, BG, ışıma örüntüsü ve kazanç değerleri incelenerek analiz edilmiştir.

Bu bölümde, ikinci bölümde bahsedilen dikdörtgen MA tasarım formülleri kullanılarak 28 GHz frekansında çalışan girintili mikroşerit beslemeli dikdörtgen MA tasarımı yapılmıştır. Beslemedeki girinti (g) ölçüleri değiştirilerek, giriş bölümünde detaylı ele alınan 5G haberleşme sistemlerini karşılayacak şekilde, 28 GHz frekansı için S11, VSWR ve BG iyileştirilmiştir.

28 GHz frekansında çalışan girintili mikroşerit beslemeli dikdörtgen MA tasarım sonuçlarındaki S11, VSWR ve BG'deki etkiler yeni özgün modelli geometrik tasarımlar için girdi oluşturmuştur.

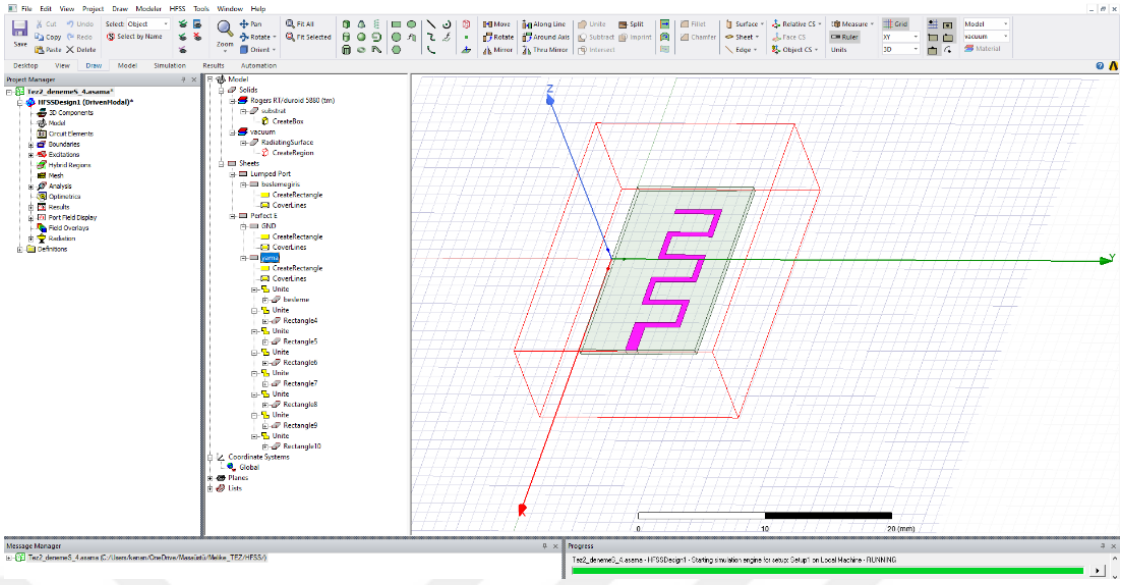
3.1. Yüksek Frekanslı Elektromanyetik Simülasyon Programı (HFSS)

HFSS, 3D olan cihazların modellenmesinde kullanılan yüksek performans gösteren FEM (Finite Element Method / Sonlu Elemanlar Yöntemi) tabanlı elektromanyetik yazılım programıdır.

Program çözüm üretirken hesaplama kaynakları, yakınsamanın bilgileri, S parametreleri, empedanslar, ağ istatistikleri, ışıma örüntüleri çizilebilmekte ve görüntülenebilmektedir ayrıca bunlar dışada aktarılabilmektedir.

HFSS'de görünen paneller aşağıdaki gibi tanımlanabilir ve Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

- Proje yöneticisi
- 3 boyutlu modelleme penceresi
- İşlemlerin yürütüldüğü pencere
- Mesaj yöneticisi penceresi



Şekil 3.1. HFSS arayüzü

Gelişmiş çözüm, hesaplama ve standart doğruluğu, yüksek frekanslı elektronik bileşenleri tasarlayanlar ve özellikle mühendisler için seçilen bir araçtır. Antenlerdeki yüksek frekanslar, mikrodalgaki bileşenler, PCB bağlantıları, IC (entegre devre), çipdeki gömülü devre tasarımları, biyomedikal araç tasarımları gibi geniş alanlarda HFSS programından yararlanılmaktadır.

HFSS tasarımlarda verimliliği arttırmakta ve zamandan tasarruf sağlamaktadır. HFSS, tasarımda iyi başarıyı garanti eder ve yeni sürümleriyle tasarımcılara büyük ölçüde verimlilik kazandırmayı amaçlar (HFSS, 2022).

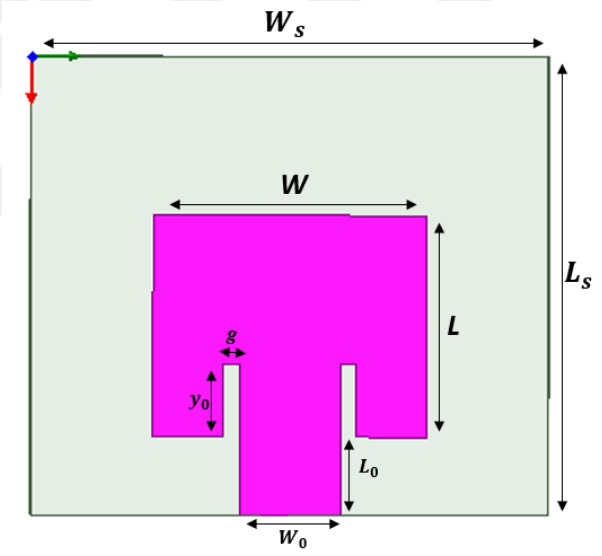
3.2. Dikdörtgen Mikroşerit Anten Tasarımı ve Analizi

Dikdörtgen MA yama uzunluğu L, genişliği W ve alttaş kalınlığı h olan yapıdır. Girintili mikroşerit iletim hatlı besleme, yamayla aynı düzlemde olan besleme hattının yama iç tarafına girinti oluşturması ile tasarlanır.

İkinci bölümde anlatılan dikdörtgen MA'de tasarım formüllerini kullanılarak anten tasarımı yapılmıştır. Anten formülleri için çalışma frekansı, alttaş dielektrik sabiti ve alttaş kalınlığı gerekli olan parametrelerdir. BG'nin yüksek olması için alttaş kalınlığı

arttırılmalı ve alttaş dielektrik sabiti $2 < \varepsilon_r < 12$ aralığında olmalıdır. Alttaş kalınlığının $0{,}003\lambda_0 \leq h \leq 0{,}05\lambda_0$ aralığında olması gerektiği literatürde bilinmektedir (Pozar, 1992). 28 GHz dikdörtgen MA tasarımında düşük kayıp faktörlü $\tan\delta = 0{,}0009$, düşük dielektrik sabitli $\varepsilon_r = 2{,}2$, alttaş kalınlığı $h = 0{,}508\ mm$, bakır kalınlığı t = 0,035 mm çift taraflı bakır ile kaplanmış PCB malzeme olan yüksek frekanslı MA tasarımlarında tercih edilen RT Duroid 5880 alttaşı kullanılmıştır. RT Duroid 5880 alttaşı yüksek frekanslı devre tasarımlarında, milimetre dalga antenlerinde, uzay uygulamalarında ve radar sistemlerinde kullanılmaktadır.

28 GHz dikdörtgen MA tasarımında (2.9)- (2.39) eşitlikleri kullanılarak yama ve besleme boyutları hesaplanmıştır. Girintili mikroşerit beslemeli dikdörtgen MA Şekil 3.2'de ve hesaplanan boyutlar Çizelge 3.1'de yer almaktadır.



Şekil 3.2. Dikdörtgen MA

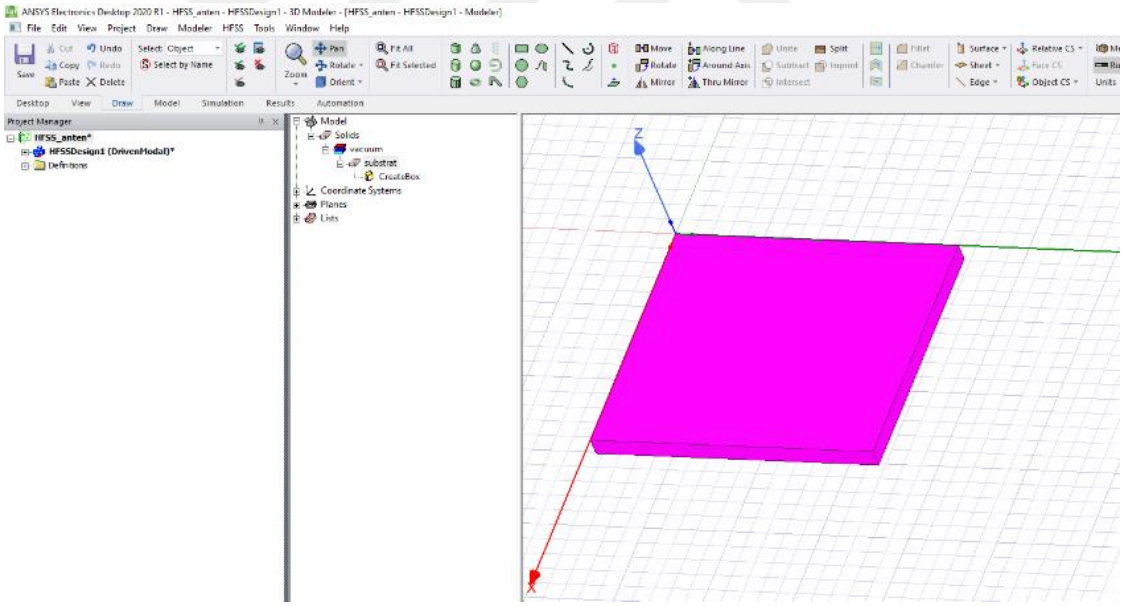
Çizelge 3.1. Teorik olarak hesaplanan yama boyutları

Parametreler	Tanımlar	Boyutlar (mm)
W	Yama Genişliği	4,23
L	Yama Uzunluğu	3,28
h	Alttaş Kalınlığı	0,508
t	Yama Kalınlığı	0,035

Çizelge 3.1. Teorik olarak hesaplanan yama boyutları (devamı)

Parametreler	Tanımlar	Boyutlar (mm)
$W_s = W_g$	Alttaş ile Toprak Düzleminin Genişliği	8
$L_s = L_g$	Alttaş ile Toprak Düzleminin Uzunluğu	7,10
W_0	Besleme Hattının Genişliği	1,58
L_0	Besleme Hattının Uzunluğu	1,212
y_0	Yama İçerisine Girinti Uzunluğu	1,128
g	Yama İçerisine Girinti Genişliği	0,10

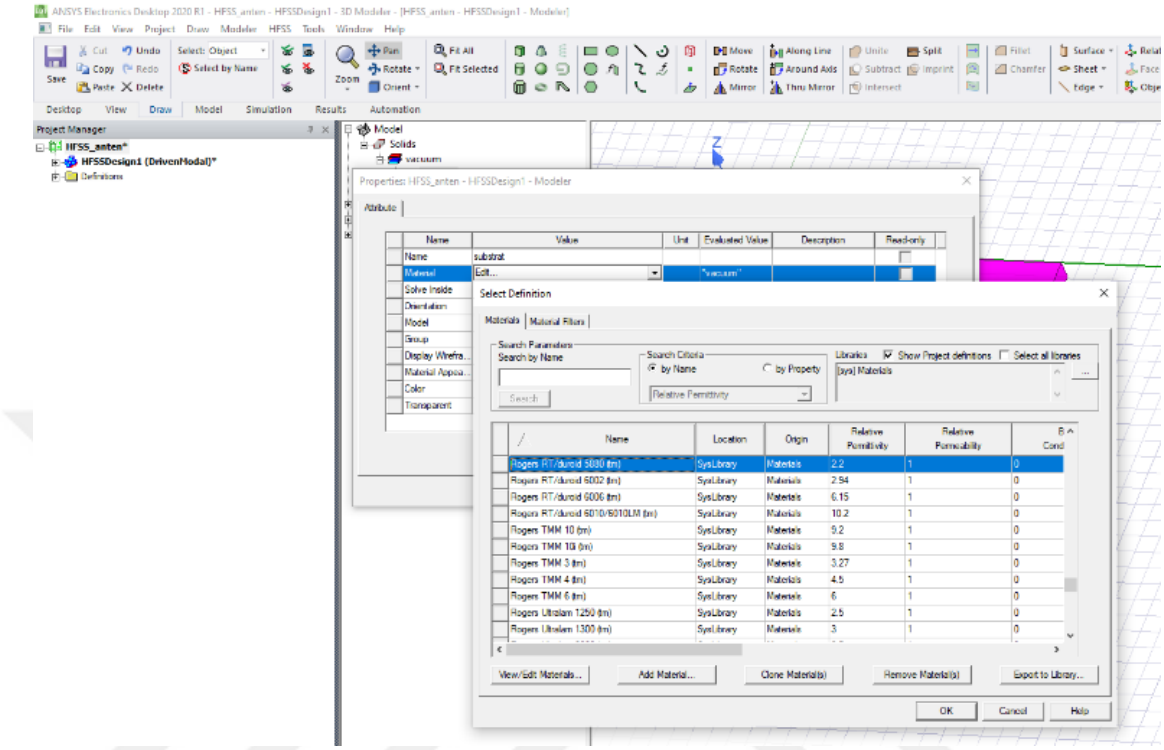
Teorik formüller ile hesaplanan dikdörtgen MA boyutlarında, HFSS de simülasyonu yapılırken 28GHz rezonans frekansının elde edilmesi için yamanın boyutları optimize edilmiştir. HFSS deki tasarım aşamaları aşağıdaki kısımlarda sırayla anlatılmıştır.



Şekil 3.3. Dikdörtgen MA 3B modeli

HFSS ilk olarak proje bölümüyle, ardından HFSS tasarım adımlarıyla açılmıştır. Şekil 3.3'de gösterilen araç çubuğundaki geometrik şekillerden 0,508 mm kalınlığında, 8 mm genişliğinde ve 7,10 mm uzunluğunda olan dikdörtgen kutu çizilmiştir ve alttaş (dielektrik malzeme) olarak kullanmak için dielektrik malzeme türü seçilerek atama

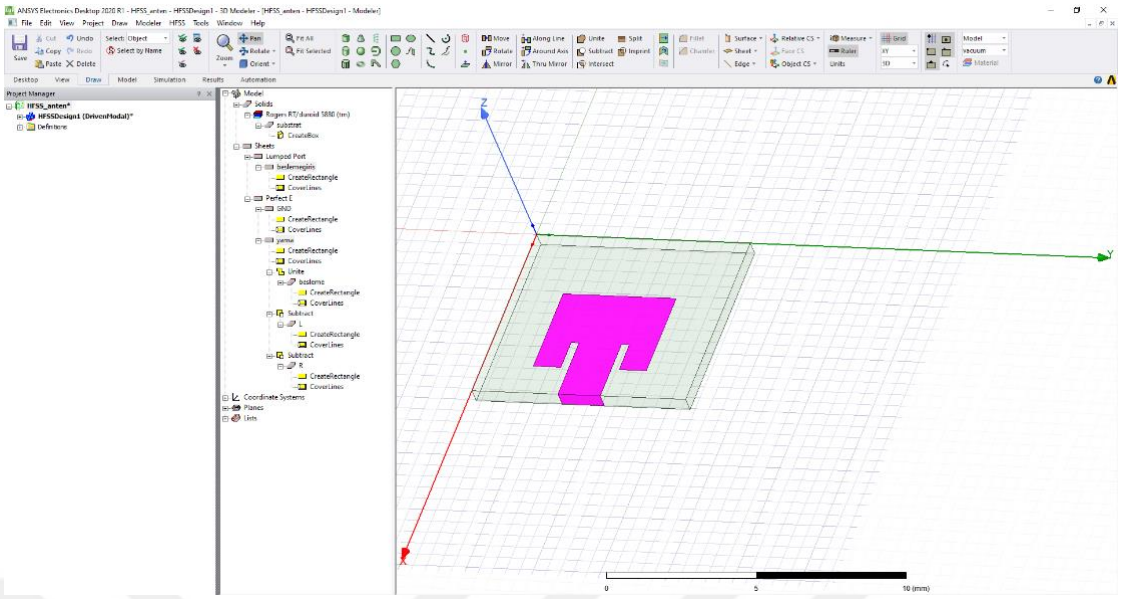
yapılmıştır. Bu tezde 5G anten tasarımları için daha önceden belirtilen RT Duroid 5880 malzemesi kullanılmıştır ve Şekil 3.4'de dielektrik malzeme seçimi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Dikdörtgen MA için dielektrik malzeme seçimi

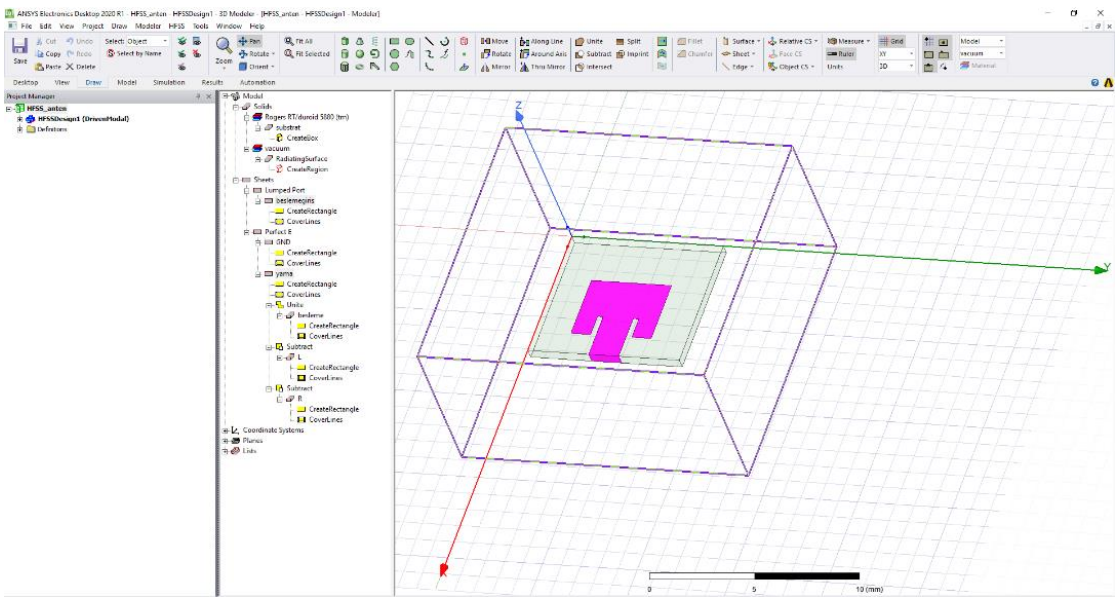
Alttaşın altına, toprak düzleminin kalınlığı 0,035 mm ince bakır malzeme ile 8 mm uzunluğunda 7,10 mm genişliğinde yeni bir kutu oluşturulmuştur. Işıma yapması istenen bakır yama alttaşın üzerinde olacak şekilde yama genişliği 4,23 mm ve yama uzunluğu 3,28 mm olan yama tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Hesaplanan teorik boyutlarda ve aynı düzlemde Şekil 3.5'de gösterildiği gibi yamaya besleme hattı eklenmiştir.



Şekil 3.5. Yama ve besleme hattının belirlenmesi

Tasarlanan antenlerin analizi ışıma kutusu içinde yapılmaktadır. HFSS simülasyon programı tasarlanan antenin frekans ve boyutlarına göre ‘project manager / HFSS design1’ bölümündeki ‘model’ seçeneğinden Şekil 3.6’da gösterildiği gibi otomatik ışıma kutusu oluşturmaktadır. İstenildiği takdirde ışıma kutusu manuel olarak, yeni bir kutu eklenerek de oluşturulabilmektedir.



Şekil 3.6. Işıma kutusunun belirlenmesi

Teorik formüller kullanılarak elde edilen parametrelerden L ve g, 28 GHz rezonans frekansında en iyi S11 ve BG'ni elde etmek için optimize edilmiştir. Yama uzunluğu L'nin ilk değeri 3,28 mm ve besleme girinti genişliği g'nin ilk değeri 0,10 mm olarak analiz yapılmıştır. Rezonans frekansı 29,2 GHz'de S11 -21 dB'dir. Yama uzunluğu L değeri sabit tutularak, besleme girinti genişliği g tahmini değerler ile değiştirilerek rezonans frekansı ve S11 incelenmiştir. Çizelge 3.2'de besleme girinti genişliği değişikliğinde incelenen parametrelerin değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Besleme girinti genişliği değişikliğindeki parametreler

L (mm)	g (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	S11 (dB)
3,28	0,1	29,2	-21
	0,2	28,9	-18
	0,3	28,7	-11
	0,4	28,6	-8
	0,5	28,4	-6
	0,6	28,4	-5

Besleme girinti genişliği değerindeki artışlar rezonans frekansını azaltsa da S11'nı kötüleştirmiştir. Formül hesaplamalarında yama boyu ile rezonans frekansı ters orantılıdır. Yamanın boyu tahmini değerler ile 3,28 mm'den 3,42 mm'e doğru arttırılarak rezonans frekansı 28 GHz'de sabitlenmiştir. Besleme girinti genişliği (g), yama ve besleme hattının arasındaki empedansın uyumluluğunu kontrol eden parametrelerden biri olduğu için g değeri arttırılarak empedans uyumsuzluğu en aza indirilmiştir. Sonuç olarak hem yama uzunluğunun arttırılması hemde besleme girinti genişliğinin artırılması ile frekans 29,2 GHz'den 28 GHz'e doğru azalmıştır ve S11'da iyileştirme sağlanmıştır.

Çizelge 3.3. Besleme girinti genişliği ve yama uzunluğu optimize boyutları

L (mm)	g (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	S11 (dB)
3,42	0,25	28,06	-27
	0,26	28,05	-24

Çizelge 3.3. Besleme girinti genişliği ve yama uzunluğu optimize boyutları (devamı)

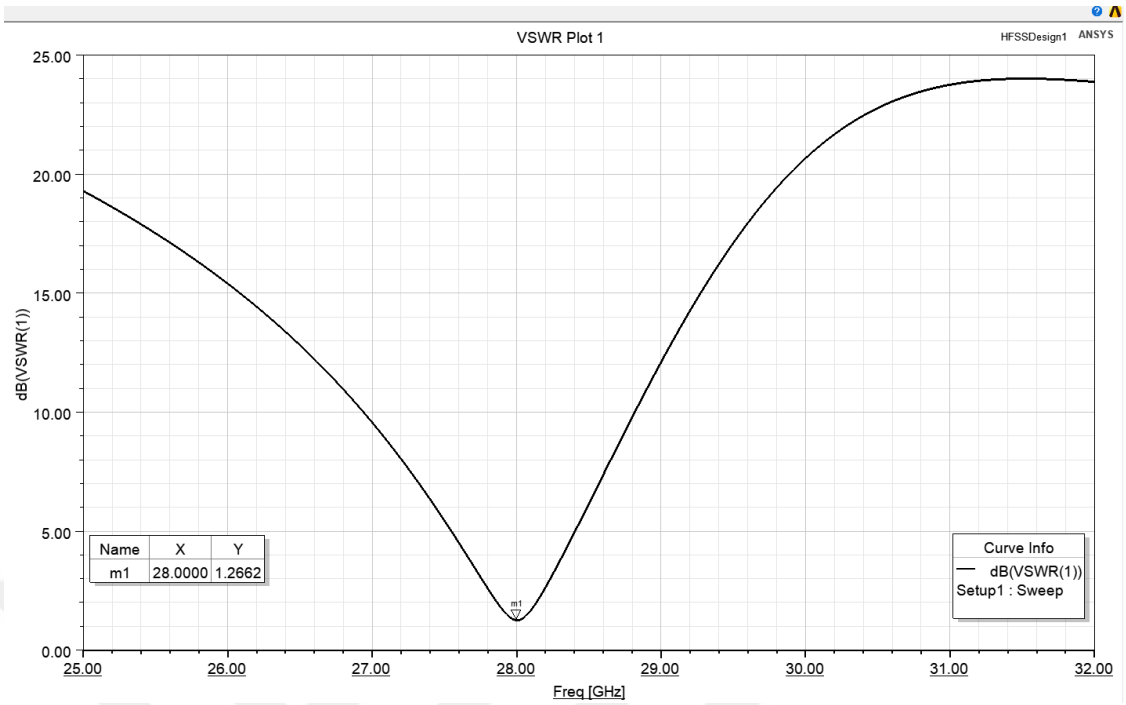
L (mm)	g (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	S11 (dB)
3,42	0,27	28,03	-24
	0,28	28,00	-22
	0,29	28,02	-21
	0,30	28,01	-19

Yama uzunluğu 3,42 mm için frekansın tam 28,00 GHz olduğu g değeri 0,28 mm'dir ve S11 -22 dB'dir. 28 GHz girintili beslemeli mikroşerit yama boyutları Çizelge 3.4'de tablo halinde ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.4. Optimize edilen yama boyutları

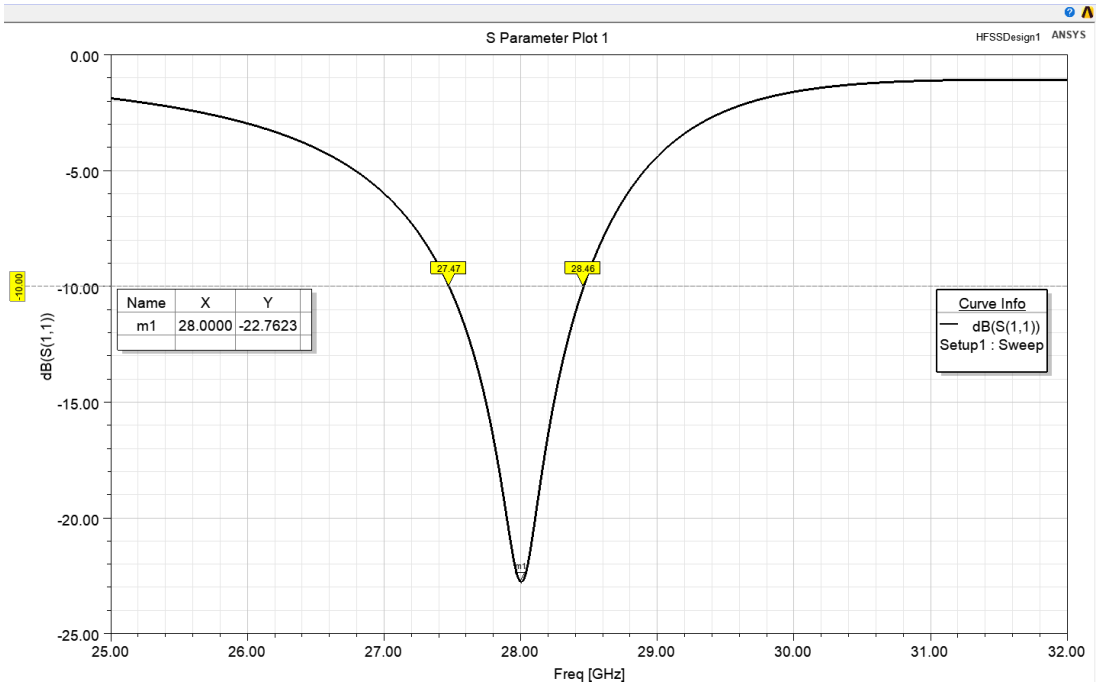
Parametreler	**Tanımlar**	**Boyutlar (mm)**
W	Yama Genişliği	4,23
L	Yama Uzunluğu	3,42
h	Alttaş Kalınlığı	0,508
t	Yama Kalınlığı	0,035
$W_s = W_g$	Alttaş ile Toprak Düzleminin Genişliği	8
$L_s = L_g$	Alttaş ile Toprak Düzleminin Uzunluğu	7,10
W_0	Besleme Hattının Genişliği	1,58
L_0	Besleme Hattının Uzunluğu	1,212
y_0	Yama İçerisine Girinti Uzunluğu	1,128
g	Yama İçerisine Girinti Genişliği	0,28

Şekil 3.7 girintili beslemeli dikdörtgen MA'in VSWR grafiğidir ve VSWR 1,26 olarak bulunmuştur.



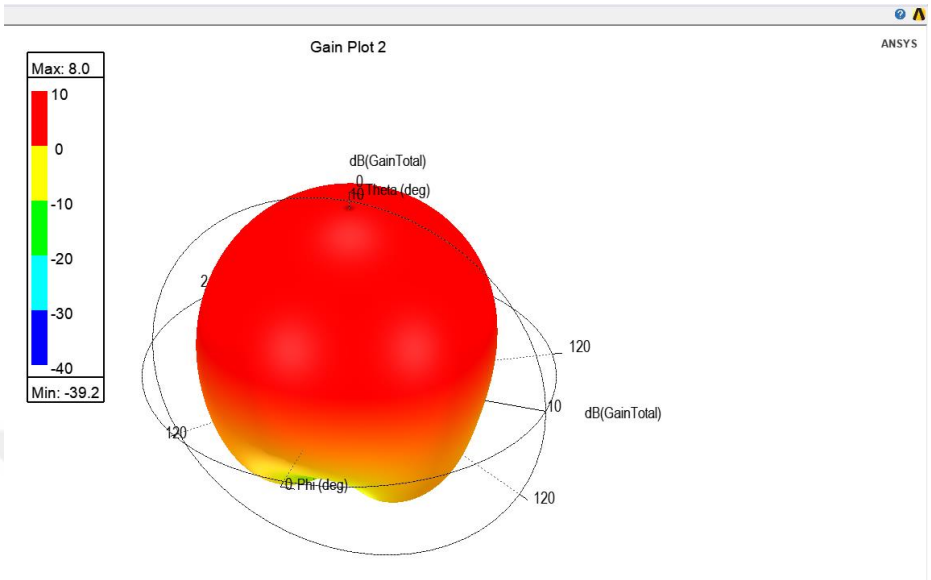
Şekil 3.7. Dikdörtgen MA VSWR

Şekil 3.8 girintili beslemeli dikdörtgen MA'in BG grafiğidir ve BG 990 MHz olarak bulunmuştur.



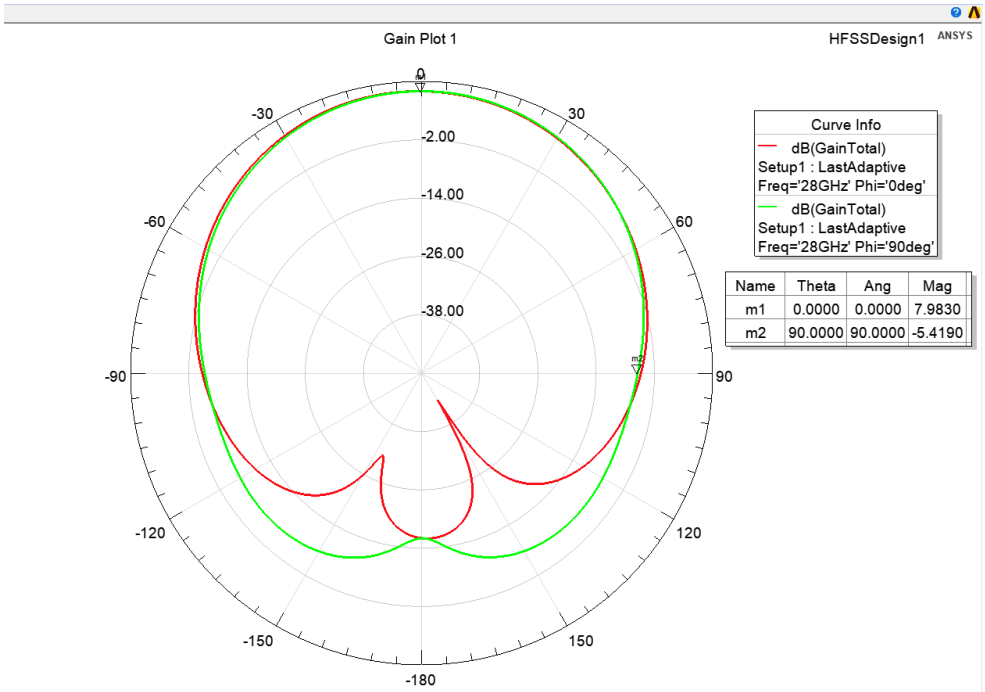
Şekil 3.8. Dikdörtgen MA S11 ve BG

Şekil 3.9 girintili beslemeli dikdörtgen MA'in 3B kazancıdır ve maksimum kazanç 8 dB olarak bulunmuştur.



Şekil 3.9. Dikdörtgen MA 3B kazanç

Şekil 3.10 girintili beslemeli dikdörtgen MA'in 2 boyutlu elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) grafiği ile kazancıdır ve 7,98 dB olarak bulunmuştur.



Şekil 3.10. Dikdörtgen MA polar görünüm kazanç paterni

Çizelge 3.5'de girintili beslemeli dikdörtgen MA'in HFSS simülasyon sonuçları tabloda gösterilmiştir. S11'nın -10 dB ve altında olmadığında antenin iyi bir performans göstermediği kabul edilmektedir. Rezonans frekansı 28 GHz de -22,76 dB iyi bir S11 değeridir. Bu S11, besleme hattından iletilen gücün çok az bir kısmının yama tarafından geri yansıtıldığını anlatmaktadır. VSWR, geri dönüş yansıma kaybının ölçütüdür. Rezonans frekansı 28 GHz de 1,26 ile VSWR iyi bir değerdir.

Çizelge 3.5. Dikdörtgen MA simülasyon sonuçları

Rezonans Frekansı	S11	VSWR	BG	Kazanç
28,00 GHz	-22,76 dB	1,26	990 MHz	7,98 dB

4. BULGULAR

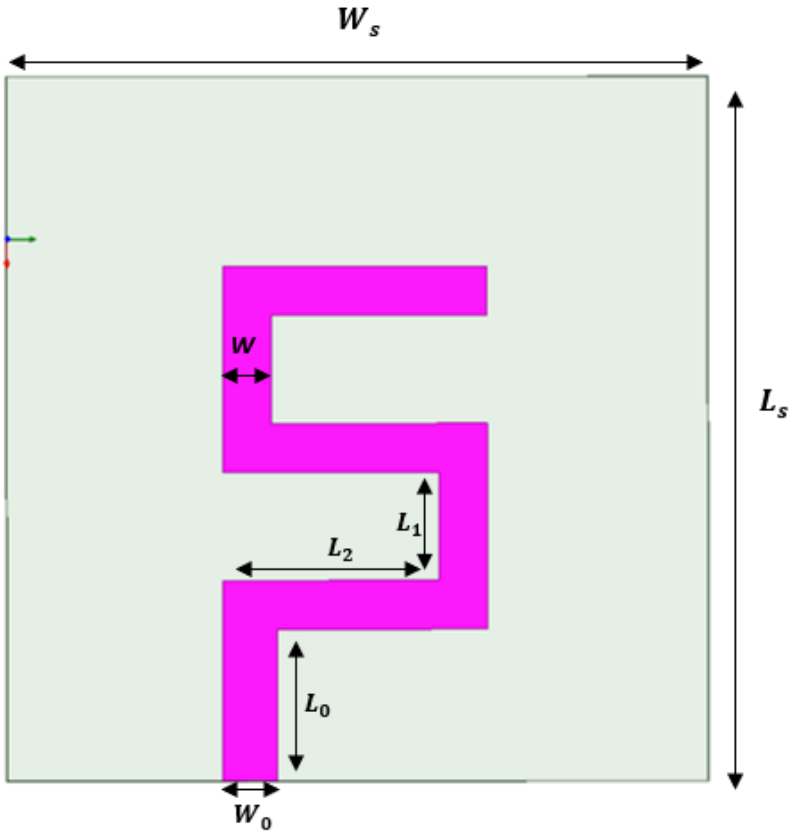
Bu bölümde, üçüncü bölümden yola çıkarak 28 GHz frekansında çalışan özgün S modelli MA tasarlanmıştır. Anten boyutlarındaki geometrik değişimler ile rezonans frekansı, S11, VSWR ve BG'deki etkiler incelenmiştir. Anten parametrelerini iyileştirmek için özgün S modelli MA tasarımının sağ ve sol tarafına kanat şeklinde iletim hattı eklenerek, özgün kanatlı S modelli MA tasarlanmıştır.

4.1. Özgün S Modelli Mikroşerit Anten Tasarımı ve Analizi

Özgün S modelli MA, besleme hattına yatay ve dikey olarak art arda konumlandırılmış dikdörtgen yapıların birleşmesi ile oluşturulmuştur. S modelli MA'in yama genişliği W, yama dikey / yatay uzunlukları L_1 / L_2, yama kalınlığı t, alttaş kalınlığı h, alttaş / toprak düzlemi genişliği W_s / W_g, alttaş / toprak düzlemi uzunluğu L_s / L_g, besleme hattı genişliği W_0 ve besleme hattı uzunluğu L_0 ile ifade edilmiştir. S modelli MA tasarımında düşük kayıp faktörlü $\tan\delta = 0{,}0009$, düşük dielektrik sabitli $\varepsilon_r = 2{,}2$ ve kalınlığı $h = 0{,}508\ mm$ olan üçüncü bölümde bahsedilen RT Duroid 5880 alttaşı kullanılmıştır.

Alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, besleme hattının genişliği ve uzunluğu sabit tutularak, yama geometrisindeki değişiklikler ile anten parametreleri incelenerek 28 GHz rezonans frekansındaki en iyi sonuçlar gözlemlenmiştir.

Özgün S modelli MA tasarımı Şekil 4.1'de ve antenin boyutları Çizelge 4.1'de yer almaktadır.



Şekil 4.1. Özgün S modelli MA

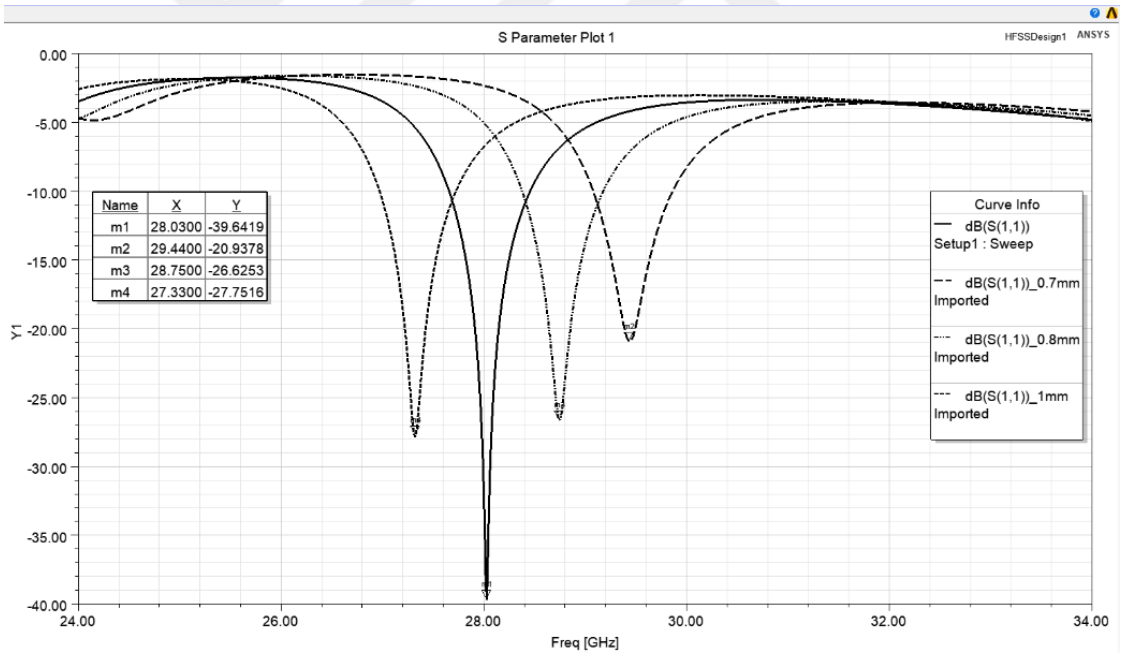
Çizelge 4.1. Özgün S modelli MA boyutları

Parametreler	**Tanımlar**	**Boyutlar (mm)**
W	Yama Genişliği	0,9
L_1	Yama Dikey Uzunluğu	2
L_2	Yama Yatay Uzunluğu	4
h	Alttaş Kalınlığı	0,508
t	Yama Kalınlığı	0,035
$W_s = W_g$	Alttaş ile Toprak Düzleminin Genişliği	13
$L_s = L_g$	Alttaş ile Toprak Düzleminin Uzunluğu	13
W_0	Besleme Hattının Genişliği	1
L_0	Besleme Hattının Uzunluğu	2,8

- **Yama genişliği değişimi**

İlk olarak S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, besleme hattının genişliği ve uzunluğu, yama yatay ve dikey uzunlukları sabit tutularak sadece yama genişliği değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir. Yama genişliği birçok değer ile değiştirilmiştir ve 28 GHz'e en yakın yama genişliğindeki simülasyon sonuçları Çizelge 4.2'de listelenerek Şekil 4.2'de verilmiştir.

İkinci bölümde yer alan yama genişliği formül hesabındaki denklem (2.9)'a göre yama genişliği rezonans frekansı ile ters orantılıdır. Yama genişliği rezonans frekansı ile ters orantılı olduğu için yama genişliği arttıkça rezonans frekansı azalmıştır. Daha geniş yama tasarımı, daha düşük rezonans frekansı anlamına gelmektedir. Yama genişliği 0,9 mm de rezonans frekansı 28 GHz ile istenilen frekansa ulaşılmıştır.



Şekil 4.2. Özgün S modelli MA'deki yama genişliğindeki değişimine göre simülasyon sonuçları

Çizelge 4.2. Özgün S modelli MA'deki yama genişliğindeki değişimine göre simülasyon sonuçları

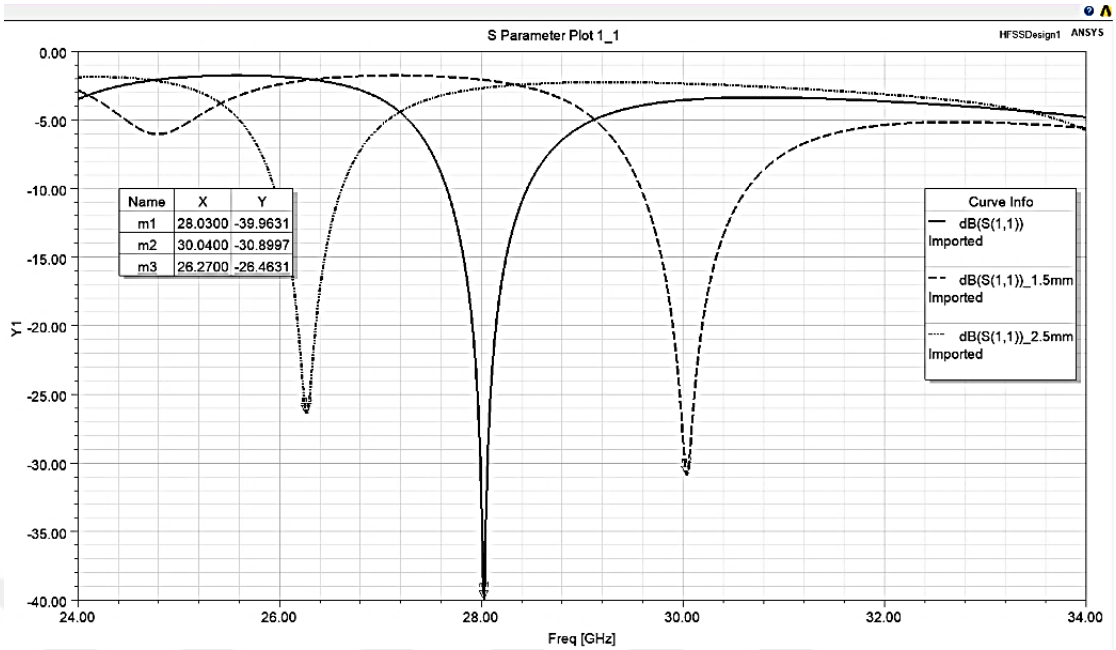
Yama Genişliği (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
0,7	29,44	780	-20	1,6
0,8	28,75	800	-26	0,8
0,9	28,03	800	-39	0,17
1	27,33	760	-27	0,8

- **Yama uzunluğu değişimi**

S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, besleme hattının genişliği ve uzunluğu, yama genişliği sabit tutularak yama yatay ve dikey uzunlukları değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir.

Yama genişliği 0,9 mm olan S modelli yamanın yatay uzunluğu 4 mm'de sabit tutulup dikey uzunluğu değiştirilerek, yama dikey uzunluğunun etkisi incelenmiştir ve 28 GHz'e en yakın yama dikey uzunluğundaki simülasyon sonuçları Çizelge 4.3'de listelenerek Şekil 4.3'de verilmiştir.

Yama dikey uzunluğu arttıkça rezonans frekansı düşmüştür ve BG azalmıştır. İncelenen dikey uzunluk değerlerinde S11 -10 dB değerinin altındadır iyi bir değerdir fakat VSWR çok düşük bir değere sahip olmuştur. Dikey uzunluk değişiminin antene olan etkisinin yanı sıra yatay uzunluk değişiminin de etkileri incelenmiştir.

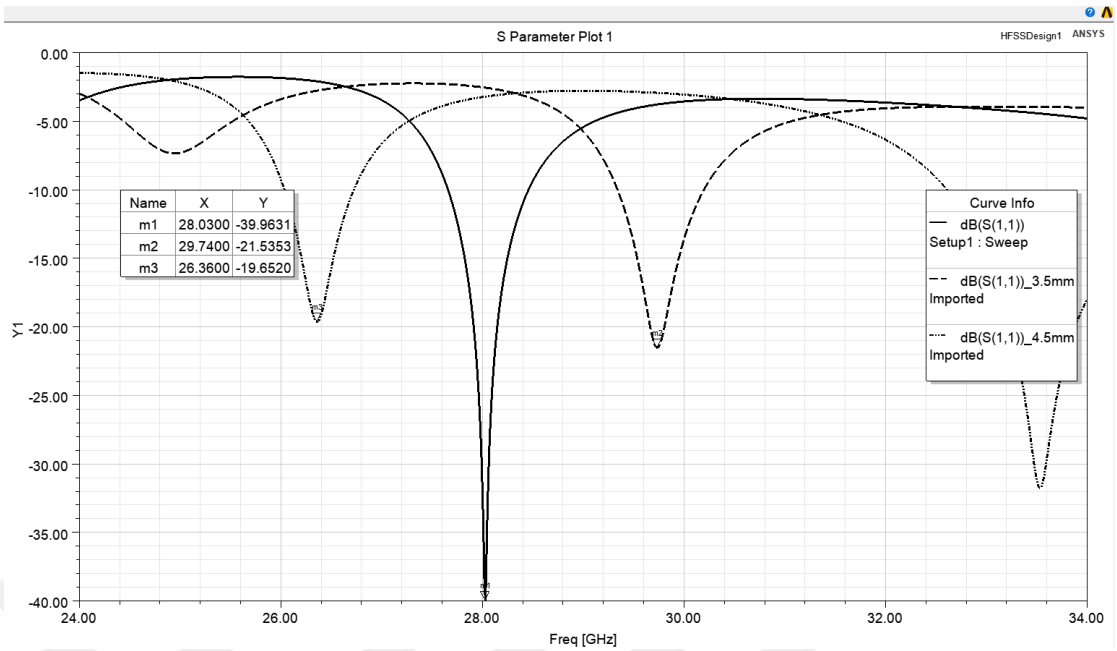


Şekil 4.3. Özgün S modelli MA'deki yama dikey uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

Çizelge 4.3. Özgün S modelli MA'deki yama dikey uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

Yama Dikey Uzunluğu (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
1,5	30,04	1060	-30	0,4
2	28,03	800	-39	0,17
2,5	26,27	670	-26	0,8

Yama genişliği 0,9 mm olan S modelli yamanın dikey uzunluğu 2 mm'de sabit tutulup yatay uzunluğu değiştirilerek, yama yatay uzunluğunun etkisi incelenmiştir ve 28 GHz'e en yakın yama yatay uzunluğundaki simülasyon sonuçları Çizelge 4.4'de listelenerek Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Özgün S modelli MA'deki yama yatay uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

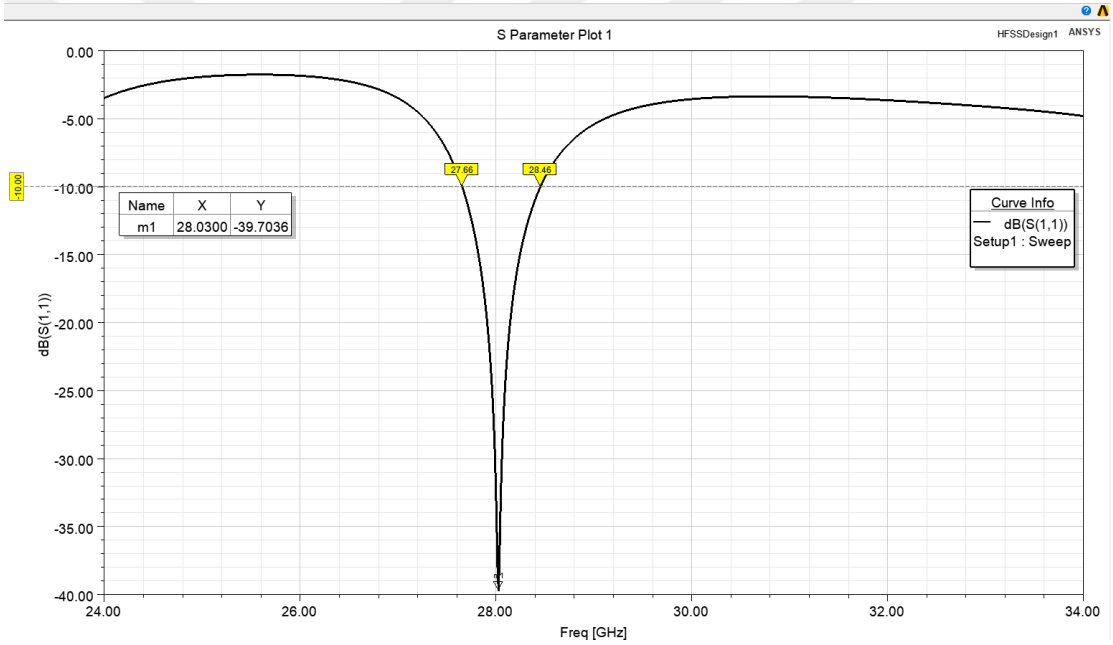
Çizelge 4.4. Özgün S modelli MA'deki yama yatay uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

Yama Yatay Uzunluğu (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
3,5	29,74	860	-21	1,4
4	28,03	800	-39	0,17
4,5	26,36	690	-19	1,8

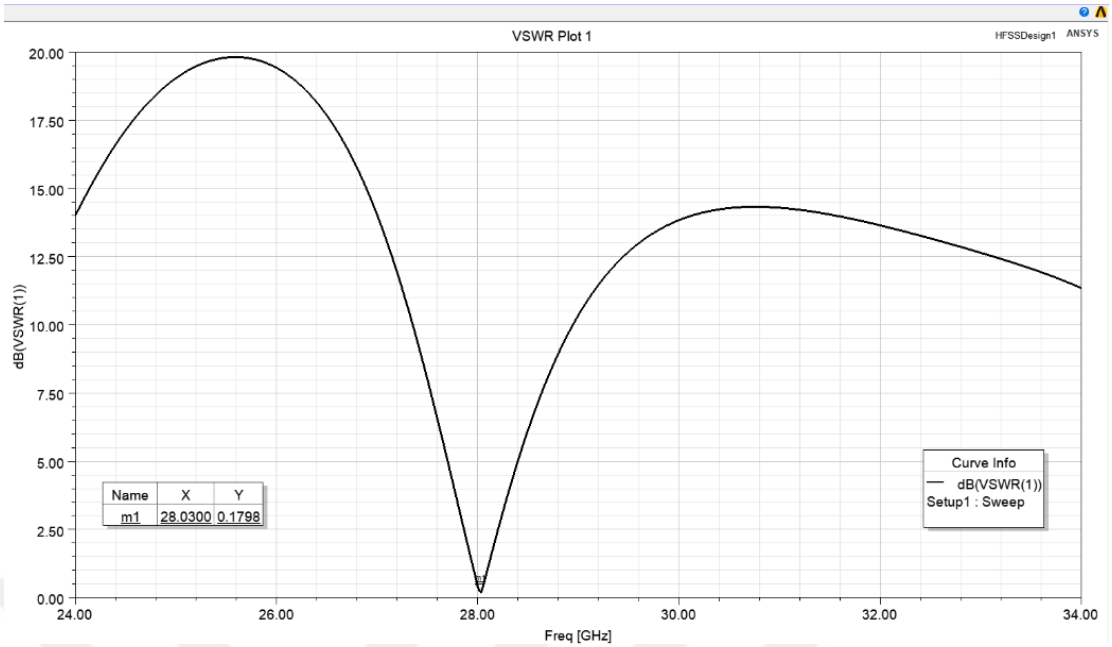
İkinci bölümde yer alan yama uzunluğu formül hesabındaki denklem (2.15)'e göre yama uzunluğu rezonans frekansı ile ters orantılıdır. Daha uzun yama tasarımı, daha düşük rezonans frekansı anlamına gelmektedir. Yama dikey ve yatay uzunlukları arttıkça rezonans frekansı düşmüştür ve BG azalmıştır. İncelenen dikey ve yatay uzunluk değerlerinde S11 -10 dB altındadır ve iyi performans göstererek antenler ışıma yapmaktadır. Yansıma kaybının ölçütü olarak 1 ve 2 aralığındaki VSWR iyi bir değerdir. Yama dikey uzunluğunun 2 mm, yama yatay uzunluğunun 3,5 mm ve 4,5 mm'deki rezonans frekansları 29,74 GHz ve 26,36 GHz, VSWR 1,4 ve 1,8 ile iyi bir değer iken,

yama yatay uzunluğunun 4 mm'deki rezonans frekansı 28,03 GHz ve VSWR 0,17 ile istenilen değerin altındadır. 29,74 GHz ve 26,36 GHz rezonans frekanslarındaki anten parametrelerinden olan BG, S11 ve VSWR kabul edilebilir değerlerdedir fakat bu çalışmada 28 GHz rezonans frekansına odaklanıldığı için gelecek bölümde VSWR'nı iyileştirmek için çalışmalar yapılacaktır.

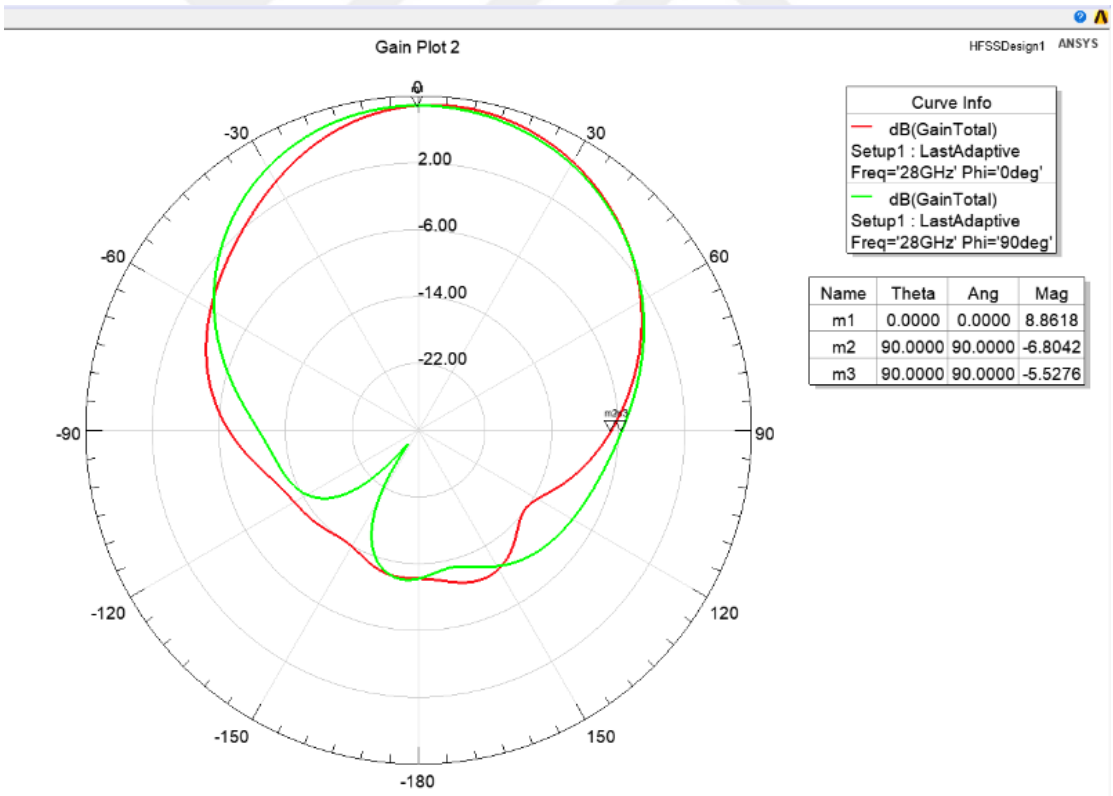
Yama genişliği 0,9 mm, yama yatay uzunluğu 4 mm, yama dikey uzunluğu 2 mm, rezonans frekansı 28,03 GHz olan antenin Şekil 4.5'de S11 ve BG grafiği, Şekil 4.6'da VSWR grafiği, Şekil 4.7'de 2 boyutlu elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) grafiği, Şekil 4.8'de 3B kazanç grafiği verilmiştir.



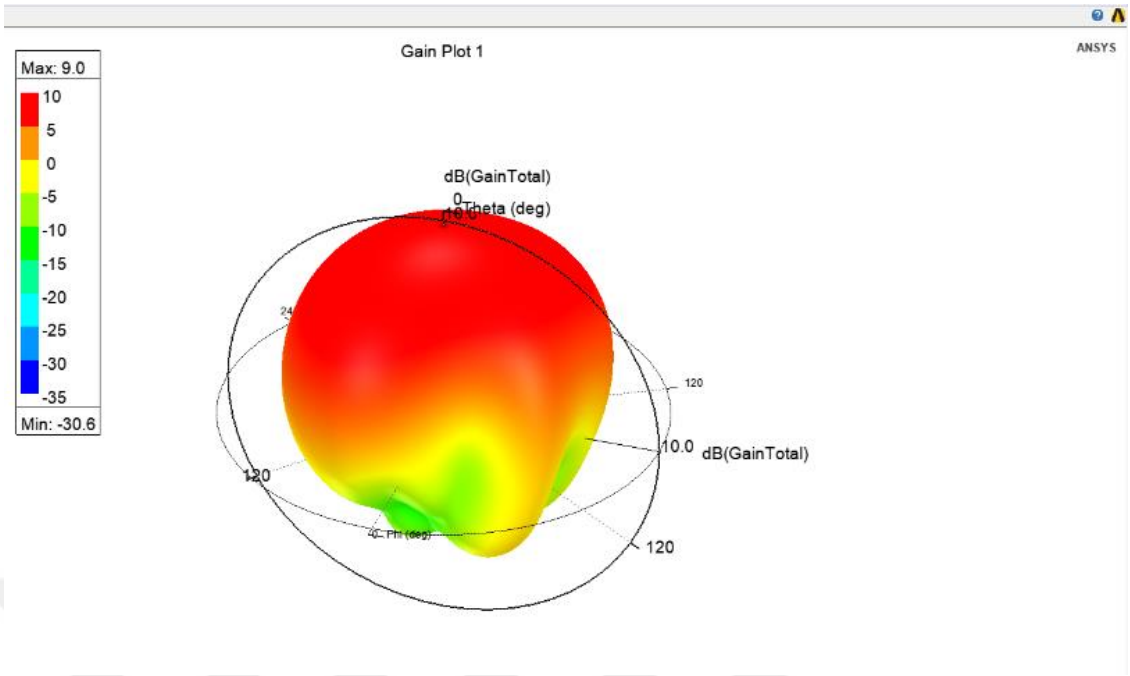
Şekil 4.5. Özgün S modelli MA'deki S11 ve BG



Şekil 4.6. Özgün S modelli MA'deki VSWR



Şekil 4.7. Özgün S modelli MA'deki polar görünüm kazanç paterni



Şekil 4.8. Özgün S modelli MA'deki 3B kazanç

Çizelge 4.5'de özgün S modelli MA'in 28,03 GHz'deki simülasyon sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Özgün S modelli MA'deki simülasyon sonuçları

Rezonans Frekansı	S11	VSWR	BG	Kazanç
28,03 GHz	-39 dB	0,17	800 MHz	8,86 dB

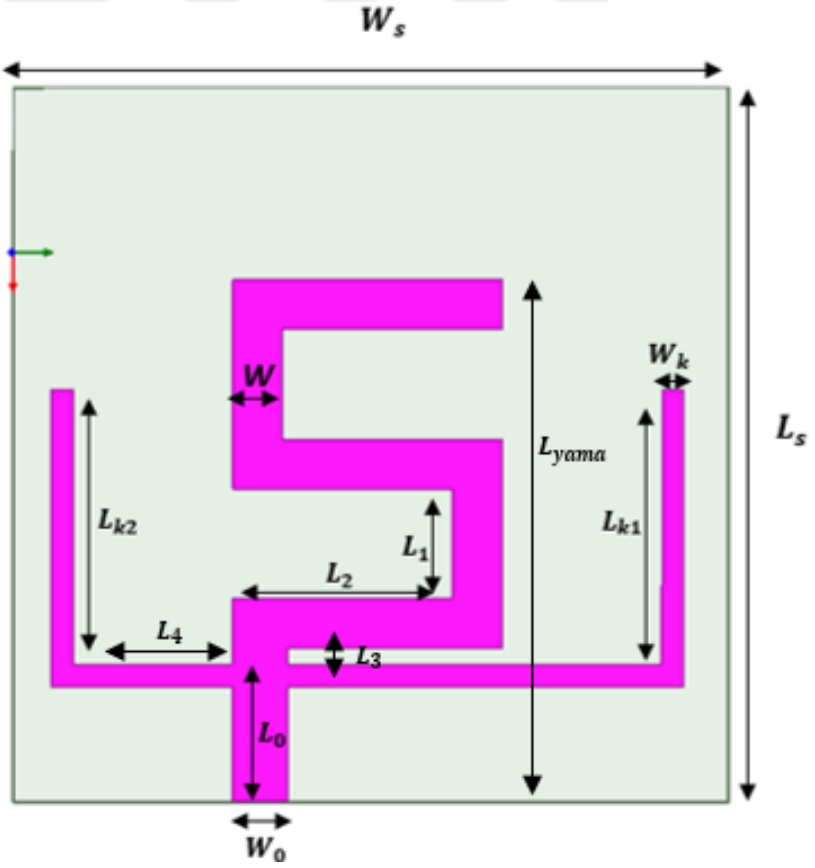
4.2. Özgün Kanatlı S Modelli Mikroşerit Anten Tasarımı ve Analizi

Özgün S modelli MA'e, besleme hattından yatay ve ardından dikey olarak konumlandırılmış dikdörtgen yapıların birleşmesi ile yamanın sağ ve sol tarafına kanat şeklinde iletim hattı eklenerek, özgün kanatlı S modelli MA tasarlanmıştır. S modelli MA'in yama genişliği W, yama dikey / yatay uzunlukları L_1 / L_2, yama kanat genişliği W_k, yama sağ / sol kanat uzunlukları L_{k1}/ L_{k2}, yama kalınlığı t, alttaş kalınlığı h, alttaş / toprak düzlemi genişliği W_s / W_g, alttaş / toprak düzlemi uzunluğu L_s / L_g, toplam yama uzunluğu L_{yama}, kanatların besleme noktasındaki konumu L_3, kanatların yamaya

uzaklığı L_4, besleme hattı genişliği W_0 ve besleme hattı uzunluğu L_0 ile ifade edilmiştir. Kanatlı S modelli MA tasarımında düşük kayıp faktörlü $\tan\delta = 0{,}0009$, düşük dielektrik sabitli $\varepsilon_r = 2{,}2$ ve kalınlığı $h = 0{,}508\,mm$ olan üçüncü bölümde bahsedilen ve bir önceki bölümde S modelli MA tasarımında da kullanılan RT Duroid 5880 alttaşı kullanılmıştır.

Alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, besleme hattının genişliği ve uzunluğu, S modelli yamanın genişliği, yatay ve dikey uzunlukları sabit tutularak, yamanın sadece kanat geometrisindeki değişiklikler ile anten parametreleri incelenerek 28 GHz rezonans frekansındaki sonuçlar iyileştirilmiştir.

Özgün kanatlı S modelli MA tasarımı Şekil 4.9'da ve antenin boyutları Çizelge 4.6'da yer almaktadır.



Şekil 4.9. Özgün kanatlı S modelli MA

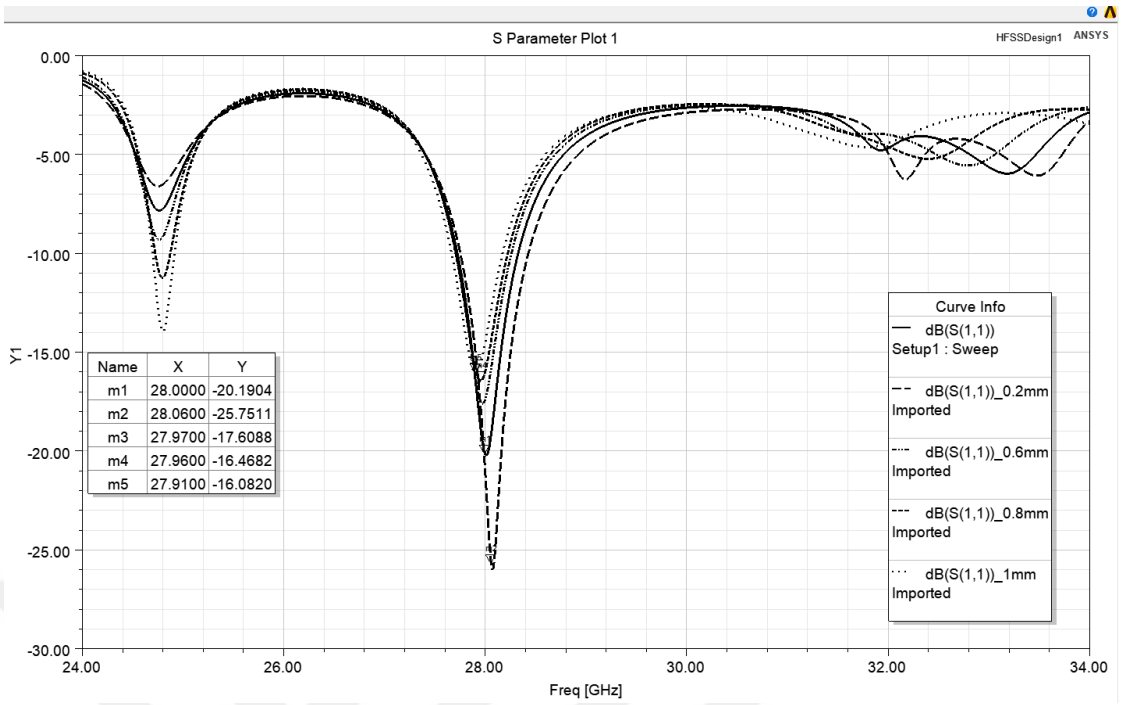
Çizelge 4.6. Özgün kanatlı S modelli MA boyutları

Parametreler	Tanımlar	Boyutlar (mm)
W	Yama Genişliği	0,9
L_1	Yama Dikey Uzunluğu	2
L_2	Yama Yatay Uzunluğu	4
W_k	Yama Kanat Genişliği	0,4
L_{k1}	Yama Sağ Kanat Uzunluğu	5
L_{k2}	Yama Sol Kanat Uzunluğu	5
h	Alttaş Kalınlığı	0,508
t	Yama Kalınlığı	0,035
$W_s = W_g$	Alttaş ile Toprak Düzleminin Genişliği	13
$L_s = L_g$	Alttaş ile Toprak Düzleminin Uzunluğu	13
W_0	Besleme Hattının Genişliği	1
L_0	Besleme Hattının Uzunluğu	2,8
L_{yama}	Toplam Yama Uzunluğu	9,5
L_3	Kanatların Beslemedeki Konumu	0,3
L_4	Kanatların Yamaya Uzaklığı	2,9

- **Yama kanat genişliği değişimi**

Kanatlı S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, besleme hattının genişliği ve uzunluğu, S modelli yamanın genişliği, yatay ve dikey uzunlukları, yama kanat uzunlukları sabit tutularak sadece yama kanat genişliği değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir. Yama kanat genişliği birçok değer ile değiştirilmiştir ve 28 GHz'e en yakın yama kanat genişliğindeki simülasyon sonuçları Çizelge 4.7'de listelenerek Şekil 4.10'de verilmiştir.

Yama genişliği rezonans frekansı ile ters orantılı olduğu için yama kanat genişliği arttıkça rezonans frekansı ve BG azalmıştır. Yama kanat genişliği 0,4 mm de rezonans frekansı tam 28,00 GHz ile istenilen frekansa ulaşılmıştır.



Şekil 4.10. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama kanat genişliğindeki değişimine göre simülasyon sonuçları

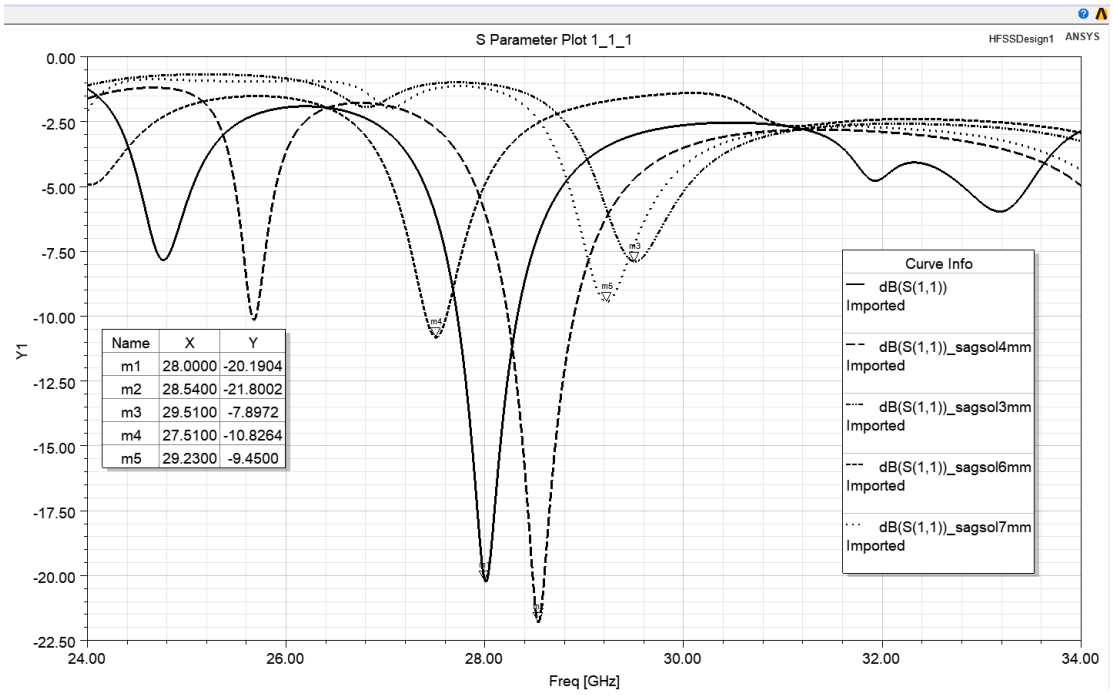
Çizelge 4.7. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama kanat genişliğindeki değişimine göre simülasyon sonuçları

Yama Kanat Genişliği (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
0,2	28,06	680	-25	0,8
0,4	28,00	610	-20	1,7
0,6	27,97	550	-17	2,3
0,8	27,96	510	-16	2,6
1	27,91	500	-16	2,7

- **Yama kanat uzunluğu değişimi**

Kanatlı S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, besleme hattının genişliği ve uzunluğu, S modelli yamanın genişliği, yatay ve dikey uzunlukları, yama kanat genişliği sabit tutularak önce yama sağ ve sol kanat uzunlukları birlikte değiştirilerek, daha sonra yama sol kanat uzunluğu sabit tutulup sağ kanat uzunluğu değiştirilerek ve sonrasında yama sağ kanat uzunluğu sabit tutulup sol kanat uzunluğu değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir.

İlk olarak yama kanat genişliği 0,4 mm olan kanatlı S modelli yamanın sağ ve sol uzunlukları aynı ölçülerde birlikte değiştirilerek etkisi incelenmiştir ve 28 GHz'e en yakın yama kanat uzunluklarının simülasyon sonuçları Çizelge 4.8'de listelenerek Şekil 4.11'de verilmiştir. Yama uzunluğu rezonans frekansı ile ters orantılı olduğu için yama kanat uzunluğu arttıkça rezonans frekansı azalmıştır. Yama kanat uzunluğu 3 mm ve 7 mm'de S11 -10 dB'nin üzerine çıktığından antenin özelliği kaybolmuştur. Yama kanat uzunluğu 5 mm'de rezonans frekansı tam 28,00 GHz ile istenilen frekansa ulaşılmıştır, S11 -20 dB ve VSWR 1,7 ile iyi bir değere sahiptir.

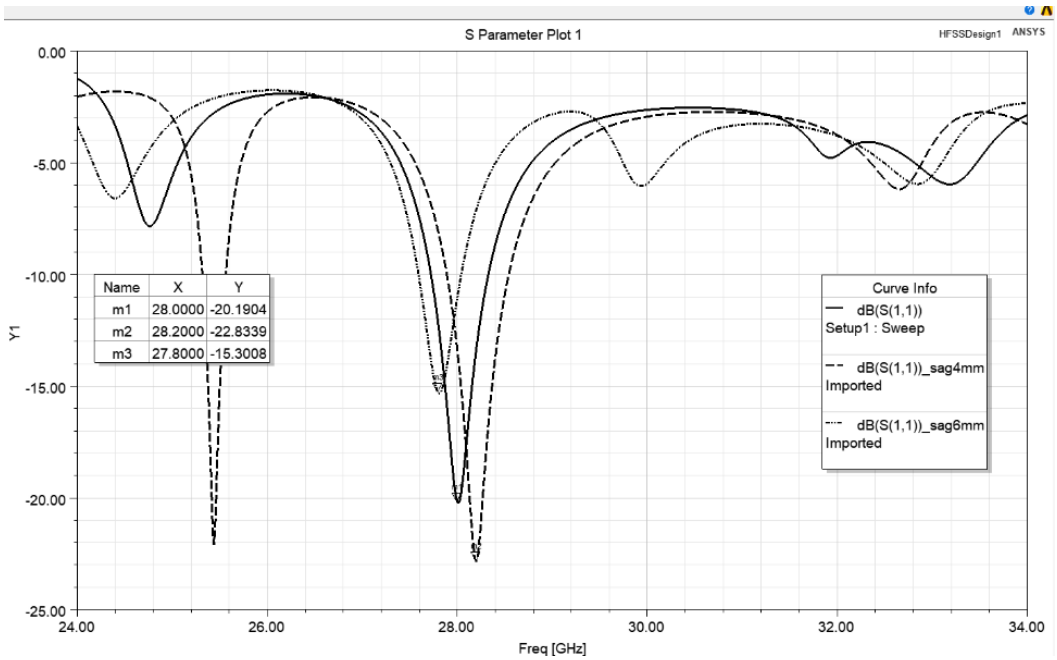


Şekil 4.11. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sağ ve sol kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

Çizelge 4.8. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sağ ve sol kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

Yama Sağ ve Sol Kanat Uzunluğu (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
3	29,51	-	-7	-
4	28,54	670	-21	1,4
5	28,00	610	-20	1,7
6	27,51	200	-10	5,1
7	29,23	-	-9	-

Yama kanat genişliği 0,4 mm olan kanatlı S modelli yamanın sol kanat uzunluğu 5 mm'de sabit tutulup sağ kanat uzunluğu değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir ve 28 GHz'e en yakın yama kanat uzunluklarının simülasyon sonuçları Çizelge 4.9'da listelenerek Şekil 4.12'de verilmiştir. Yama uzunluğu rezonans frekansı ile ters orantılı olduğu için yama kanat uzunluğu arttıkça rezonans frekansı ve BG azalmıştır.

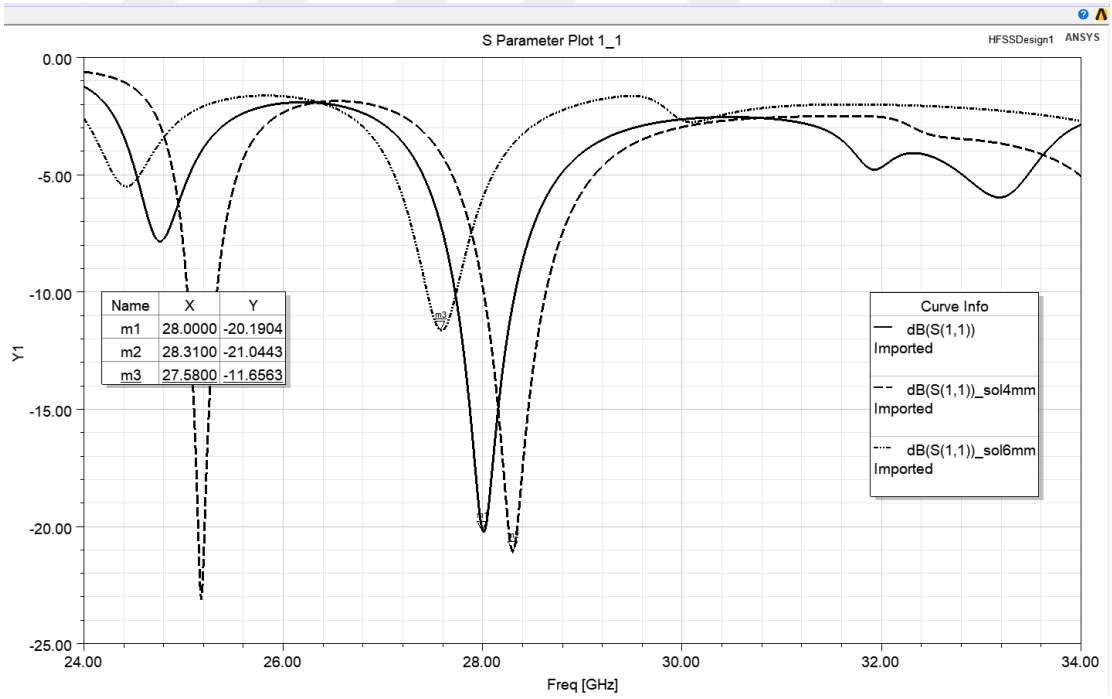


Şekil 4.12. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sağ kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

Çizelge 4.9. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sağ kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

Yama Sağ Kanat Uzunluğu (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
4	28,20	650	-22	1,2
5	28,00	610	-20	1,7
6	27,80	450	-15	3

Yama kanat genişliği 0,4 mm olan kanatlı S modelli yamanın sağ kanat uzunluğu 5 mm'de sabit tutulup sol kanat uzunluğu değiştirilerek etkisi incelenmiştir ve 28 GHz'e en yakın yama kanat uzunluklarının simülasyon sonuçları Çizelge 4.10'da listelenerek Şekil 4.13'de verilmiştir. Yama uzunluğu rezonans frekansı ile ters orantılı olduğu için yama kanat uzunluğu arttıkça rezonans frekansı ve BG azalmıştır.



Şekil 4.13. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sol kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

Çizelge 4.10. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama sol kanat uzunluk değişimine göre simülasyon sonuçları

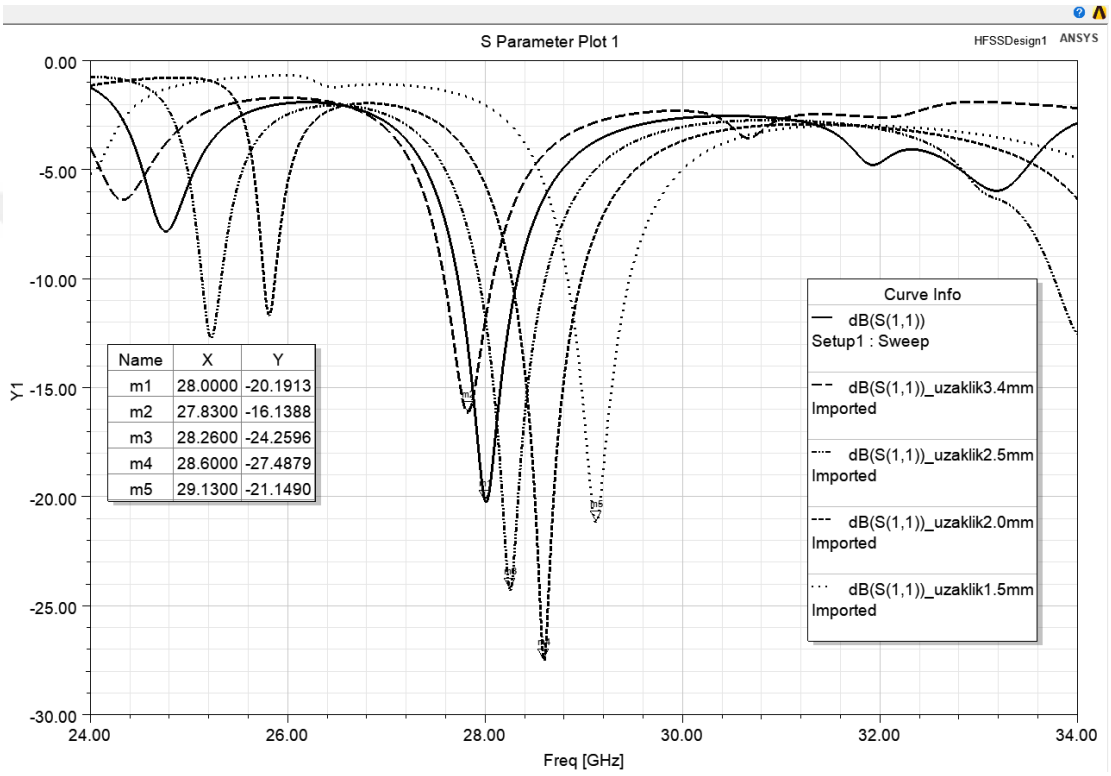
Yama Sol Kanat Uzunluğu (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
4	28,31	620	-21	1,5
5	28,00	610	-20	1,7
6	27,58	300	-11	4,6

Yama kanat uzunluğu incelemelerindeki değerlere göre, yama sağ ve sol kanat uzunluğu 4 mm olan 28,54 GHz rezonans frekansındaki 670 MHz BG, -21 dB S11, 1,4 VSWR, yama sağ kanat uzunluğu 5 mm yama sol kanat uzunluğu 4 mm olan 28,31 GHz rezonans frekansındaki 620 MHz BG, -21 dB S11, 1,5 VSWR ve yama sağ kanat uzunluğu 4 mm yama sol kanat uzunluğu 5 mm olan 28,20 GHz rezonans frekansındaki 650 MHz BG, -22 dB S11, 1,2 VSWR ile anten parametrelerini karşılamaktadır. Bir önceki bölümün devamı olarak bu çalışmada 28 GHz rezonans frekansına odaklanıldığı için sağ ve sol kanat uzunluğu 5 mm olan anten tasarımı dikkate alınmıştır ve 28,00 GHz rezonans frekansındaki 610 MHz BG, -20 dB S11, 1,7 VSWR ile istenilen değerleri karşılamaktadır.

- **Yama ve kanatlar arası uzaklık değişimi**

Kanatlı S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, besleme hattının genişliği ve uzunluğu, S modelli yamanın genişliği, yatay ve dikey uzunlukları, yama kanat genişliği ve uzunlukları sabit tutularak sadece yama ile sağ ve sol kanatlar arasındaki uzaklığı değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir. Yama ve kanatlar arası uzaklık birçok değer ile değiştirilmiştir ve 28 GHz'e en yakın yama kanat genişliğindeki simülasyon sonuçları Çizelge 4.11'de listelenerek Şekil 4.14'de verilmiştir.

S modelli yama ile kanatlar arası uzaklık azaldıkça yani S modelli yamaya kanatlar yaklaştıkça rezonans frekansı ve BG artmıştır. Yama ve kanatlar arasındaki uzaklık 2,9 mm, 2,5 mm ve 1,5 mm için anten parametrelerinden S11 -10 dB'nin altında ve VSWR 1 ve 2 aralığında istenilen değerlerdedir. Bu tasarım kapsamında rezonans frekansı özellikle 28,00 GHz belirlendiği için istenilen anten parametre değerlerine 2,9 mm uzaklık ile ulaşılmıştır.



Şekil 4.14. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama ve kanatlar arası uzaklık değişimine göre simülasyon sonuçları

Çizelge 4.11. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama ve kanatlar arası uzaklık değişimine göre simülasyon sonuçları

Yama ve Kanatlar Arası Uzaklık (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
3,4	27,83	500	-16	2,7
2,9	28,00	610	-20	1,7

Çizelge 4.11. Özgün kanatlı S modelli MA'deki yama ve kanatlar arası uzaklık değişimine göre simülasyon sonuçları (devamı)

Yama ve Kanatlar Arası Uzaklık (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
2,5	28,26	670	-24	1,0
2,0	28,60	700	-27	0,7
1,5	29,13	630	-21	1,5

Yama genişliği 0,9 mm, yama yatay uzunluğu 4 mm, yama dikey uzunluğu 2 mm, yama kanat genişliği 0,4 mm, yama sağ kanat uzunluğu 5 mm, yama sol kanat uzunluğu 5 mm, yama ve kanatlar arasındaki uzaklık 2,9 mm, besleme genişliği 1 mm, besleme uzunluğu 2,8 mm, kanatların besleme noktasındaki konumu 0,3 mm aşağıda iken rezonans frekansı 28,00 GHz, BG 610 MHz, S11 -20 dB ve VSWR 1,7 ile istenilen anten parametrelerine ulaşılmıştır. Fakat VSWR'nı daha fazla iyileştirerek 1'e yaklaşması için yamanın besleme genişliği, besleme uzunluğu ve kanatların besleme noktasındaki konum değişimine göre etkileri incelenmiştir.

- **Yamanın besleme genişliği değişimi**

Kanatlı S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, S modelli yamanın genişliği, yatay ve dikey uzunlukları, yama kanat genişliği ve uzunluğu, besleme uzunluğu sabit tutularak sadece yamanın besleme genişliği değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir. Yamanın besleme genişliği birçok değer ile değiştirilmiştir ve 28 GHz'e en yakın besleme genişliğindeki simülasyon sonuçları Çizelge 4.12'de listelenmiştir.

Yamanın besleme genişliği arttıkça rezonans frekansı artmıştır ve VSWR azalmıştır.

Çizelge 4.12. Özgün kanatlı S modelli MA'deki besleme genişliği değişimine göre simülasyon sonuçları

Besleme Genişliği (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
0,85	27,95	550	-18	2
0,90	27,98	580	-19	1,8
1	28,00	610	-20	1,7
1,10	28,07	630	-20	1,5
1,20	28,10	660	-21	1,4

- **Yamanın besleme uzunluğu değişimi**

Kanatlı S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, S modelli yamanın genişliği, yatay ve dikey uzunlukları, yama kanat genişliği ve uzunluğu, besleme genişliği sabit tutularak sadece yamanın besleme uzunluğu değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir. Yamanın besleme uzunluğu birçok değer ile değiştirilmiştir ve 28 GHz'e en yakın besleme uzunluğundaki simülasyon sonuçları Çizelge 4.13'de listelenmiştir.

Yamanın besleme uzunluğu arttıkça rezonans frekansı ve VSWR azalmıştır. Yamanın besleme uzunluğu 2,8 mm de rezonans frekansı tam 28,00 GHz ile istenilen frekansa ulaşılmıştır.

Çizelge 4.13. Özgün kanatlı S modelli MA'deki besleme uzunluğu değişimine göre simülasyon sonuçları

Besleme Uzunluğu (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
2,5	28,08	580	-18	2,1
2,6	28,08	590	-19	1,8
2,7	28,06	600	-20	1,6
2,8	28,00	610	-20	1,7
2,9	27,98	610	-21	1,4

- **Kanatların besleme noktasındaki konum değişimi**

Kanatlı S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, S modelli yamanın genişliği, yatay ve dikey uzunlukları, yama kanat genişliği ve uzunluğu, besleme genişliği, besleme uzunluğu sabit tutularak sadece kanatların besleme noktasındaki konumu değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir. Kanatların besleme noktasındaki konumu birçok değer ile değiştirilmiştir ve 28 GHz'e en yakın besleme noktasındaki konumunun simülasyon sonuçları Çizelge 4.14'de listelenmiştir.

Kanatların besleme noktasındaki konumu aşağıya doğru ilerledikçe rezonans frekansı artmıştır ve VSWR azalmıştır.

Önceki çalışmada besleme genişliği 1 mm ve kanatların besleme noktasındaki konumu 0,3 mm aşağıda konumlandırıldığında rezonans frekansı 28,00 GHz ve VSWR 1,7 idi, incelenen değerlerle VSWR azaltılarak iyileştirme yapılmıştır.

Çizelge 4.14. Özgün kanatlı S modelli MA'deki besleme noktasındaki konum değişimine göre simülasyon sonuçları

Beslemedeki Konum (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
0,1 mm aşağıda	28,02	590	-18	2,09
0,2 mm aşağıda	28,03	600	-19	1,80
0,3 mm aşağıda	28,00	610	-20	1,70
0,4 mm aşağıda	28,05	610	-20	1,57
0,5 mm aşağıda	28,03	610	-21	1,43
0,6 mm aşağıda	28,01	610	-22	1,29
0,7 mm aşağıda	28,04	620	-23	1,16
0,8 mm aşağıda	28,05	620	-24	1,09
0,9 mm aşağıda	28,05	630	-25	0,95
1 mm aşağıda	28,05	650	-25	0,91

- **Kanatların besleme noktasındaki konum ve besleme genişliği değişimi**

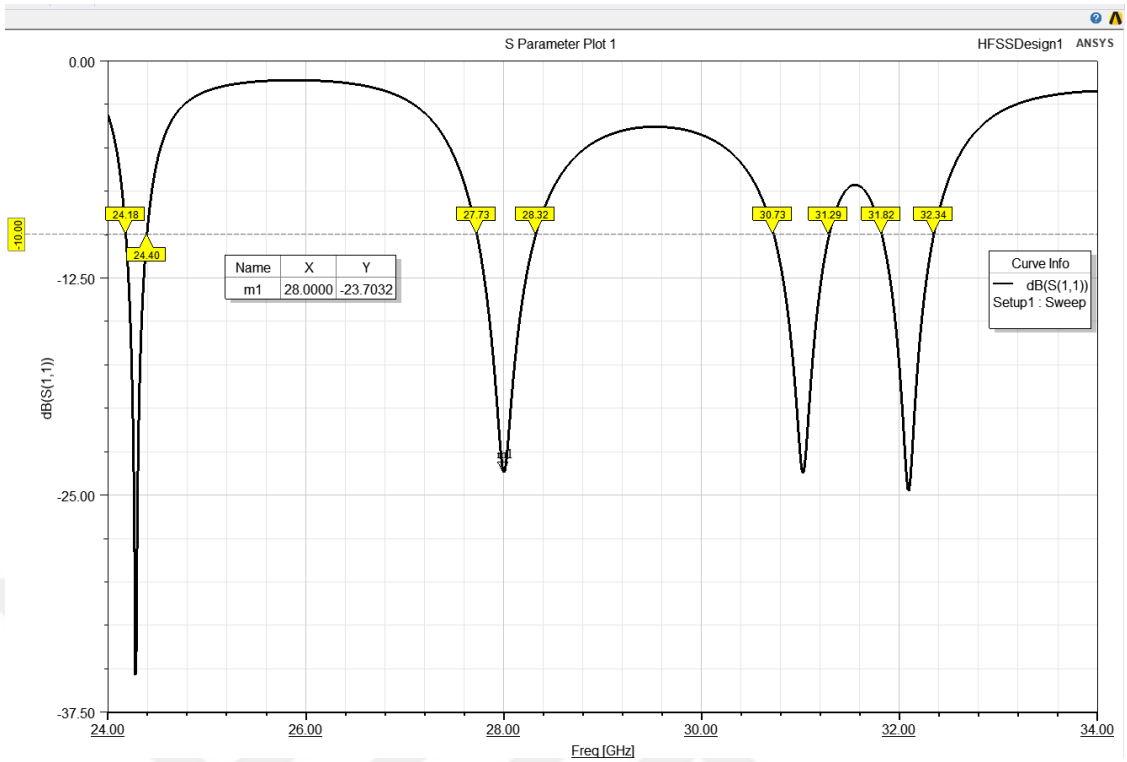
Kanatlı S modelli MA'de alttaş ve toprak düzleminin genişliği, uzunluğu ve yüksekliği, S modelli yamanın genişliği, yatay ve dikey uzunlukları, yama kanat genişliği ve uzunluğu, besleme uzunluğu ve kanatların besleme noktasındaki konumu 1 mm aşağıda sabit tutularak sadece besleme genişliği değiştirilerek anten parametrelerine etkisi incelenmiştir. Besleme genişliği birçok değer ile değiştirilmiştir ve 28 GHz'e en yakın besleme genişliği simülasyon sonuçları Çizelge 4.15'de listelenmiştir.

Kanatların besleme noktasındaki konumu 1 mm aşağıda iken yamanın besleme genişliği arttıkça rezonans frekansı artmıştır ve VSWR azalmıştır. Yamanın besleme genişliği 0,84 mm de rezonans frekansı tam 28,00 GHz ve VSWR 1,13 ile istenilen frekansa ve duran dalga oranına ulaşılmıştır.

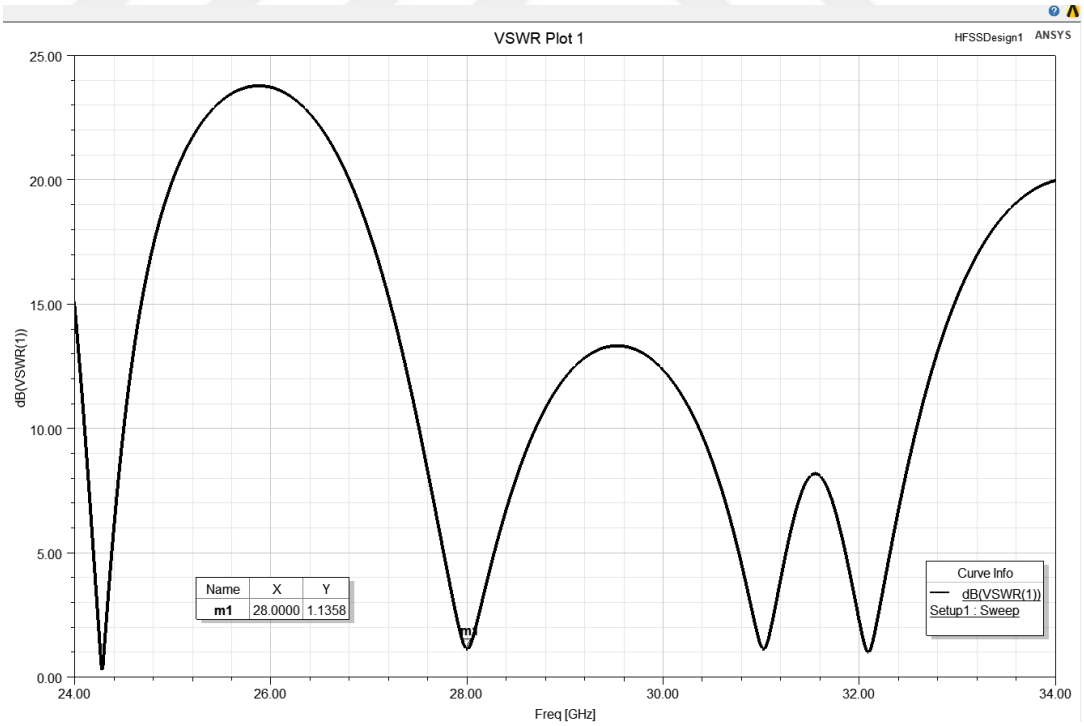
Çizelge 4.15. Özgün kanatlı S modelli MA'deki besleme noktasındaki konum ve besleme genişliği değişimine göre simülasyon sonuçları

Beslemedeki Konum (mm)	Besleme Genişliği (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	BG (MHz)	S11 (dB)	VSWR
1 mm aşağıda	0,75	27,96	570	-22	1,25
	0,80	27,98	580	-23	1,19
	0,84	28,00	590	-23	1,13
	0,85	28,01	600	-23	1,17
	0,90	28,02	620	-24	1,01
	1	28,05	650	-25	0,91

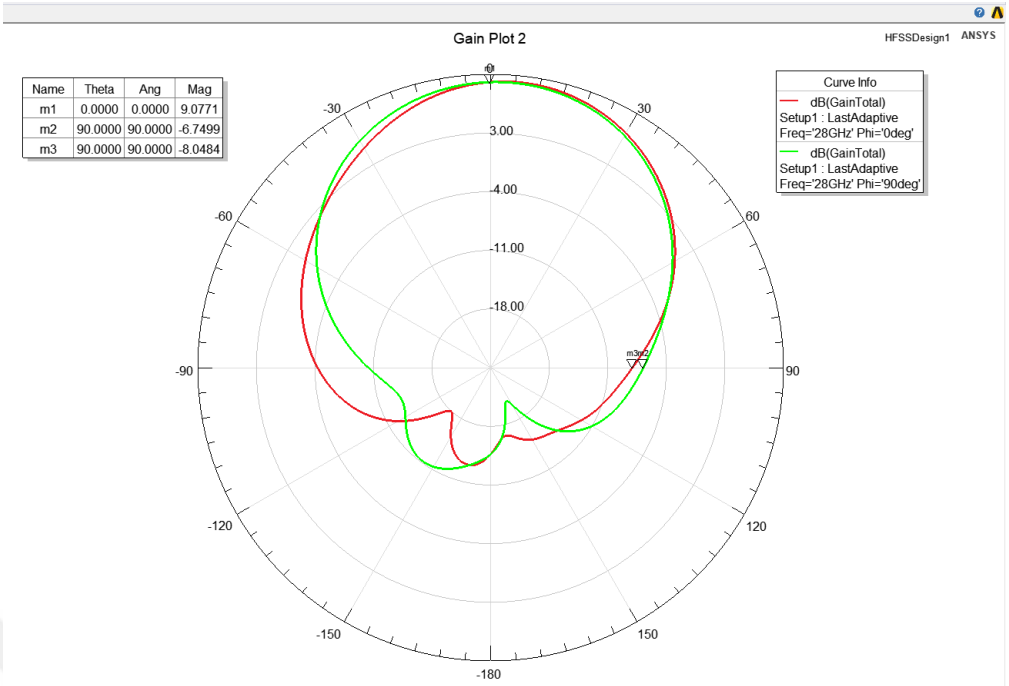
Yama genişliği 0,9 mm, yama yatay uzunluğu 4 mm, yama dikey uzunluğu 2 mm, yama kanat genişliği 0,4 mm, yama sağ kanat uzunluğu 5 mm, yama sol kanat uzunluğu 5 mm, yama ve kanatlar arasındaki uzaklık 2,9 mm, besleme genişliği 0,84 mm, besleme uzunluğu 2,8 mm, kanatların besleme noktasındaki konumu 1 mm aşağıda iken rezonans frekansı 28,00 GHz, BG 590 MHz, S11 -23 dB ve VSWR 1,13 ile istenilen anten parametrelerine ulaşılmıştır. Böylece S modelli anten iyileştirilerek kanatlı S modelli anten tasarımı kabul edilebilir değerler ile tamamlanmıştır. Kanatlı S modelli antenin simülasyon sonuçları Çizelge 4.16'da listelenerek, Şekil 4.15'de S11 ve BG grafiği, Şekil 4.16'da VSWR grafiği, Şekil 4.17'de 2 boyutlu elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) grafiği, Şekil 4.18'de 3B kazanç grafiği verilmiştir.



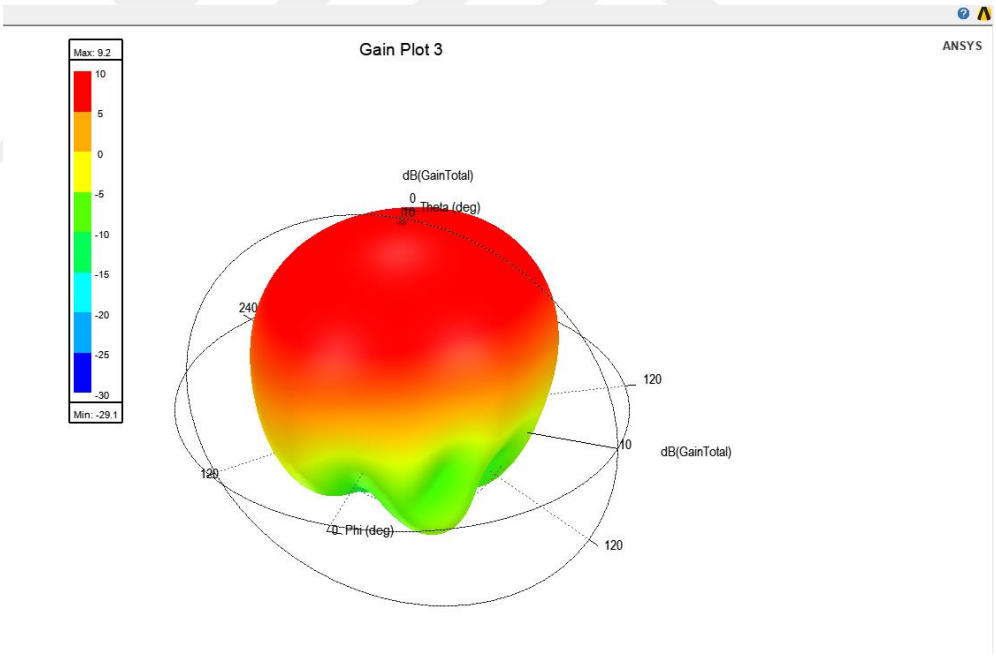
Şekil 4.15. Özgün kanatlı S modelli MA'deki S11 ve BG



Şekil 4.16. Özgün kanatlı S modelli MA'deki VSWR



Şekil 4.17. Özgün kanatlı S modelli MA'deki polar görünüm kazanç paterni



Şekil 4.18. Özgün kanatlı S modelli MA'deki 3B kazanç

Çizelge 4.16. Özgün kanatlı S modelli MA'deki simülasyon sonuçları

Rezonans Frekansı	S11	VSWR	BG	Kazanç
28,00 GHz	-23 dB	1,13	590 MHz	9,07 dB

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında öncelikle kablosuz haberleşme sistemlerindeki sürecin gelişiminden ve 5G haberleşme sistemlerinden bahsedilmiştir. Ardından MA'den, besleme tekniklerinden, parametrelerinden ve analiz yöntemlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra literatür çalışmalarından ilham alınarak, bu tez çalışmasının amacı olan 5G haberleşme sistemleri için gerekli anten parametrelerini karşılayan mikroşerit antenler tasarlanmıştır. Tasarlanan antenlerde Rogers RT Duroid 5880 alttaş malzemesi kullanılmıştır. Dielektrik katsayısı 2,2 olan bu alttaşın kalınlığı 0,508 mm, bakır kalınlığı 0,035 mm olan iki yüzeyi bakır malzeme ile kaplı PCB'dir. Kayıp tanjantı 0,0009 olan alttaş yüksek frekanslardaki düşük kayıp oranı ile tercih edilmiştir. Anten tasarımı ve simülasyonları elektromanyetik yapıları FEM sonlu elemanlar yöntemi ile çözen ANSYS HFSS programı ile yapılmıştır.

İlk olarak dikdörtgen MA tasarım formülleri kullanılarak 28,00 GHz frekansında çalışan girintili mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MA tasarımı yapılmıştır. Besleme girinti genişliği, yama ile besleme hattı arasındaki empedans uyumluluğunu kontrol eden parametrelerden biri olduğu için besleme girinti genişliği değeri arttırılarak empedans uyumsuzluğu en aza indirilmiştir. 5G haberleşme sistemlerindeki anten parametrelerini karşılayacak şekilde değerler iyileştirilmiştir. Tasarlanan antenin 28,00 GHz frekansı için BG 990 MHz, S11 -22,76 dB, VSWR 1,26 ve kazanç 7,98 dB'dir.

Daha sonra dikdörtgen MA tasarımından yola çıkarak farklı geometrik yapılar kullanılarak özgün kanatlı S modelli MA tasarlanmıştır. Anten boyutlarındaki geometrik değişimler ile rezonans frekansı, S11, VSWR ve BG'deki etkiler incelenmiştir. Yama genişliği 0,9 mm yama yatay uzunluğu 3,5 mm ve dikey uzunluğu 2 mm de rezonans frekansı 29,74 GHz için BG 860 MHz, S11 -21 dB ve VSWR 1,4 ve yama genişliği 0,9 mm yama yatay uzunluğu 4,5 mm ve dikey uzunluğu 2 mm de rezonans frekansı 26,36 GHz için BG 690 MHz, S11 -19 dB ve VSWR 1,8 ile istenilen anten parametrelerini karşılamaktadır. Fakat bu tezin amacında 28,00 GHz rezonans frekansına odaklanıldığı için yama genişliği 0,9 mm yama yatay uzunluğu 4 mm ve dikey uzunluğu 2 mm'deki rezonans frekansı 28,03 GHz, BG 800 MHz, S11 -39 dB, VSWR 0,17 ve kazanç 8,86 dB olan antende S11 ve VSWR için iyileştirme yapılmıştır.

Özgün S modelli MA tasarımının sağ ve sol tarafına 0,4 mm genişliğinde 5 mm uzunluğunda, yamaya 2,9 mm uzaklıkta ve yama besleme noktasından 1 mm aşağıda konumlandırılarak eklenen kanat şeklindeki iletim hattı ile, özgün kanatlı S modelli MA tasarlanmıştır. Antenin S şeklindeki yama kısmına eklenen kanatlar ile 28,03 GHz frekans bandında ışıma yapan antenin frekansı 28,00 GHz'e çekilerek S11 ve VSWR iyileştirilmiştir. Rezonans frekansı 28,00 GHz, BG 590 MHz, S11 -23 dB, VSWR 1,13 ve kazanç 9,07 dB ile istenilen değerlere ulaşılarak $13 \times 13 \times 0{,}508\, mm^3$ kompakt boyutlu özgün kanatlı S modelli MA tasarımı 5G anten parametrelerini karşılamaktadır.

Sonuç olarak tasarlanan özgün kanatlı S modelli MA küçük boyutu, yüksek kazancı ve geniş bantta ışıma yapması ile başta 5G mobil cihazlar olmak üzere birçok 5G haberleşme sistemlerinde kullanılabileceği düşünülmektedir. 5G frekanslarındaki anten parametrelerini karşılayan bu tez kapsamındaki tasarımlar önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Aboshosha, A., El-Mashade, M., Hegazy, E. (2019). "Design and Analysis of Rectangular Microstrip Patch Array Antenna on 28 GHz Band for Future of 5G Design and Analysis of Rectangular Microstrip Patch Array Antenna on 28 GHz Band for Future of 5G,"

Ahmad, I., Sun, H., Zhang, Y., Samad, A. (2020). High Gain Rectangular Slot Microstrip Patch Antenna for 5G mm-Wave Wireless Communication. In 2020 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS) (pp. 723-727). IEEE.

Ali, M. M. M., Haraz, O., Alshebeili, S. (2016). "Design of a dual-band printed slot antenna with utilizing a band rejection element for the 5G wireless applications," in 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), pp. 1865–1866

Apoorva, T. S. S., Kumar, N. (2019). Design of mmWave Dual Band Antenna for 5G Wireless. In 2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS) (pp. 1-4). IEEE.

Ardianto, F., Lanang F. F., Renaldy, S., Yunita, T. (2018). Design MIMO Antenna with U-Slot Rectangular Patch Array for 5G Applications.

Balanis, C. A. 2005, Antenna Theory Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. Publication, ISBN: 0-471-66782-X

Diawuo, H. A., Jung, Y. (2018). "Broadband Proximity-Coupled Microstrip Planar Antenna Array for 5G Cellular Applications," IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., vol. 17, no. 7, pp. 1286–1290.

EC (2021). From 1G to 5G Infographic, https://digitalstrategy.ec.europa.eu/en/library/1g-5g-infographic (Erişim tarihi: 27.06.2022).

Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., Ittipiboon, A. (2001). Microstrip Antenna Design Handbook ,Artech House antennas and propagation library, ISBN 0-89006-513-6

Ghafar, A. (2005). Design of a Compact Microstrip Antenna at 2.4 GHz, M.S. Thesis, Department Electrical Engineering, University Teknologi Malaysia

Haider, S. S., Tahir, F. A., Chattha, H. T., Abbasi, Q. H. (2018). "Compact Polarization Diversity Antenna for 28/38 GHz Bands," in 2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), pp. 1–2.

Hamieh, I. A. (2012). A 77 GHz Reconfigurable Micromachined Microstrip Antenna Array, M.S. Thesis, University of Windsor Scholarship, Canada.

Haraz, O. M., Ali, M. M. M., Alshebeili, S., Sebak, A. (2015). "Design of a 28/38 GHz dual-band printed slot antenna for the future 5G mobile communication Networks," in 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 1532– 1533.

HFSS (2022). http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/ High-Performance+Electronic+Design/ANSYS+HFSS: (Erişim tarihi: 09.08.2022).

Hill, T. A., Kelly, J. R. (2019). 28 GHz Taylor feed network for sidelobe level reduction in 5G phased array antennas, Microwave and Optical Technology Letters, 61 (1), 37-43.

Jarray, C., Bouabid, A., Chibani, B. (2015). Enabling and challenges for 5G Technologies. In 2015 World Congress on Information Technology and Computer Applications (WCITCA) (pp. 1-9). IEEE.

Jilani, S. F., Alomainy, A. (2016). Millimetre-wave T-shaped antenna with defected ground structures for 5G wireless networks. In 2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC) (pp. 1-3). IEEE.

Jilani, S. F., Alomainy, A. (2017). A multiband millimeter-wave 2-D array based on enhanced Franklin antenna for 5G wireless systems, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 2983-2986.

Kaeib, A. F., Shebani, N. M., Zarek, A. R. (2019). "Design and Analysis of a Slotted Microstrip Antenna for 5G Communication Networks at 28 GHz," in 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pp. 648–653.

Keum, K., Choi, J. (2018). "A 28 GHz 4 × 4 U-Slot Patch Array Antenna for mmwave Communication," in 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1–2.

Kumar, G., Ray, K. P. (2003). Broadband Microstrip Antennas, Artech House, USA.

Li, J. L., Luo, M. H., Liu, H. (2017). "Design of a slot antenna for future 5G wireless communication systems," in 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), pp. 739–741.

Marcus, M. J. (2019). ITU WRC-19 spektrum politikası sonuçları. IEEE Kablosuz İletişim , 26 (6), 4-5.

Marzouk, H. M., Ahmed, M. I., Shaalan, A. A. (2019). "A Novel Dual-band 28/38 GHz Slotted Microstip MIMO Antenna for 5G Mobile Applications," in 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, pp. 607–608.

Matin, M. A., Sayeed, A. I. (2010). A Design Rule for Inset–Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna. WSEAS Transactions on Communications, vol. 9, no. 1, pp. 63-72.

Mpele, P. M., Mbango, F., Konditi, D. (2019). A Small Dual Band (28/38 GHz) Elliptical Antenna For 5G Applications With DGS.

Niu, Y., Li, Y., Jin, D., Su, L., Vasilakos, A. V. (2015). A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges. Wireless networks, 21(8), 2657-2676.

Norvell, B. R., Hancock, R. J., Smith, J. K., Pugh, M.L., Theis, S.W., Kviatkofsky, J. (1999). Micro Electro Mechanical Switch (MEMS) Technology Applied to Electronically Scanned Arrays for Space Based Radar, IEEE Aerospace Conference Proceedings, 3:1 239-247.

Özpınar, H., Aksimsek, S., Tokan, N. T., (2020). A novel compact, broadband, high gain millimeter-wave antenna for 5G beam steering applications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69 (3), 2389-2397.

Parchin, N. O., Shen, M., Pedersen, G. F. (2016). End-fire phased array 5G antenna design using leaf-shaped bow-tie elements for 28/38 GHz MIMO applications, 2016 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB), 1-4.

Parchin, N. O., Al-Yasir, Y., Abdulkhaleq, A. M., Elfergani, I., Rayit, A., Noras, J. M., Rodriguez, J., Abd-Alhameed, R. A. (2018). Frequency reconfigurable antenna array for mm-Wave 5G mobile handsets, 2018 International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, 438-445.

Parchin, N. O., Alibakhshikenari, M., Basherlou, H. J., A Abd-Alhameed, R., Rodriguez, J., Limiti, E. (2019). Mm-wave phased array quasi-Yagi antenna for the upcoming 5G cellular communications, Applied Sciences, 9 (5), 978.

Pozar, D. M. (1992). Microstrip Antennas, Proceeding of the IEEE, 80:1 79-91.

Rahman, S. U., Cao, Q., Hussain, I., Khalil, H., Zeeshan, M., Nazar, W. (2017). “Design of rectangular patch antenna array for 5G wireless communication,” in 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), pp. 1558–1562.

Rafique, U., Khalil, H., Rehman, S. U. (2017). “Dual-band microstrip patch antenna array for 5G mobile communications,” in 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL), pp. 55– 59.

Rahayu, Y., Fitria, L., Hakiki, Y., Kurniawan, A. (2018). “A new 2×4 array design of dual-band millimeter-wave antenna for 5G applications,” in 2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), pp. 1–4.

Rappaport, T. S. (2002). Wireless Communications. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, New York, 641 pp.

Saeed, A. A., Gaid, A. S., Aoun, A. M., Sallam, A. A. (2021). A low Profile Multiband Microstrip Patch Antenna For 5G Mm-Wave Wireless Applications. In 2021 International Conference of Technology, Science and Administration (ICTSA) (pp. 1-5). IEEE.

Stutzmann, W. L., Thiele, G. A. (1998). Antenna Theory and Design, J. Wiley&Sons, New York, 648 pp.

Ullah, H., Tahir, F. A., Khan, M. U. (2017). “Dual-band planar spiral monopole antenna for 28/38 GHz frequency bands,” in 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 761–762.

Yoon, N., Seo, C. (2017). “A 28-GHz Wideband 2×2 U-slot patch array antenna,” J. Electromagn. Eng. Sci., vol. 17[1] N. Y, pp. 133–137.

Zhang, S., Syrytsin, I., Pedersen, G. F. (2018). Compact beam-steerable antenna array with two passive parasitic elements for 5G mobile terminals at 28 GHz, IEEE transactions on antennas and propagation, 66 (10), 5193-5203.

Qayyum, A., Khan, A. H., Uddin, S., Ahmad, O., Khan, J. S., Bashir, S. (2020). A Novel mmWave Defected Ground Structure Based Microstrip Antenna for 5G Cellular Applications. In 2020 First International Conference of Smart Systems and Emerging Technologies (SMARTTECH) (pp. 28-31). IEEE.

Qualcomm (2020). “Making 5G NR a Commercial Reality”, pp.15