



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**YÜKSEK KAZANÇLI MİKROŞERİT ANTEN
TASARIMINDA FARKLI ÜRETİM
TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI**

Ayşe Özge ÇINAR

YÜKSEK LİSANS

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ayşe Özge ÇINAR tarafından hazırlanan “**Yüksek Kazançlı Mikroserit Anten Tasarımında Farklı Üretim Tekniklerinin Uygulanması**” adlı tez çalışması 27/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER

.....

Üye

Doç. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ayşe Özge ÇINAR

Tarih: 27.06.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

YÜKSEK KAZANÇLI MİKROŞERİT ANTEN TASARIMINDA FARKLI ÜRETİM TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI

Ayşe Özge ÇINAR

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER

2022, 83 Sayfa

Jüri

**Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER
Doç. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN
Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR**

Mikroşerit yama antenler; sahip oldukları geometri, hafiflik, üretim maliyetinin daha düşük olması, daha kolay uygulanabilirliği nedenleriyle, en popüler anten tiplerindedir. Mikroşerit yama antenleri, anten yapıları içinde önemli bir gelişme ve yenilik sağlamıştır. Mikroşerit yama antenler düşük bir profil ve ağırlığa sahiptir. Küçük olmaları ve devre elemanlarıyla aynı dielektrik katmanı paylaşabilmelerinden dolayı kolayca entegre devre yapılarına uyum sağlayabilir ve taşınabilir cihazların boyutlarını büyütmezler. Fakat rezonans frekansı, bant genişliği, geri dönüş kaybı, kazanç ve verim gibi elektriksel parametreleri güncel haberleşme uygulamaları için yetersiz kalabilmektedir. Bu parametrelerin içinde anten kazancı, antenin her yöne eşit olarak yayılan izotropik bir antenle karşılaştırıldığında, ilettiği gücü vermektedir. Örneğin yüksek menzil gerektiren uygulamalarda haberleşme elemanı olarak daima yüksek kazançlı bir antene ihtiyaç vardır bu yüzden kazancın yüksek olması oldukça önem arz etmektedir. Uygun fiziksel koşul ve yapılarda istenilen anten performansını elde edebilmek için günümüzde farklı tasarımlar üzerinde çalışmalar yapılmakta ve performansı yüksek bir anten için optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır.

Anten kazancını arttırmak için literatürde pek çok yöntem yer almaktadır. Bunlar; alt taban üzerine dielektrik üsttaş eklenmesi, yama altında hava boşluğu kullanılması, yüksek kalite ve maliyetli dielektrik malzemelerin kullanılması, yama üzerine yarıklar açılması gibi yöntemlerdir. Bu tezde kazanç arttırma yöntemi olarak birden fazla antenin geometrik olarak yerleştirilmesiyle oluşturulan dizi anten tasarımı, modifiye edilmiş toprak düzlemi, yama üzerine dielektrik üsttaş eklenmesi ve yama üzerine yarık açılması gibi farklı teknikler kullanılmıştır.

Antenlerde kullanılan üretim tekniği antenin verimliliği için oldukça önemli bir etkidir. Birden fazla anten üretim tekniği vardır ve teknolojinin ilerlemesiyle bunlara yenileri de eklenmektedir. Aynı fiziksel yapıya sahip bir anten için bile bu teknikler değişikçe anten verileri değişebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı bu tezde aynı antenin birden fazla teknik kullanılarak üretimi yapılmıştır. Bu teknikler; ütü ile baskı devre yöntemi, yapışkan PVC folyo ile kaplama yöntemi, yapışkan PVC folyo ile maskeleme yöntemi, PCB cihazı kullanılarak anten üretimi yöntemi ve bakır bant ile kaplama yöntemi olmuştur. Sonrasında üretilen antenler ölçülüp sonuçlar değerlendirilerek farklı tekniklerin etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Anten Dizisi, FR-4, RT/Duroid 5880, Yüksek Kazanç, Dielektrik Üsttaş, Modifiye Toprak Düzlemi, Üretim Teknikleri, 5.8 GHz.

ABSTRACT

MS THESIS

APPLICATION OF DIFFERENT MANUFACTURING TECHNIQUES IN HIGH GAIN MICROSTRIP ANTENNA DESIGN

Ayşe Özge ÇINAR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical Electronics Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Dilek UZER

2022, 83 Pages

**Jury
Asst. Prof. Dr. Dilek UZER
Assoc. Prof. Seyfettin Dr. Sinan GÜLTEKİN
Asst. Prof. Dr. Özgür DÜNDAR**

Microstrip patch antennas are one of the most popular antenna types due to their geometry, lightness, lower manufacturing cost and easier applicability. Microstrip patch antennas have provided a significant improvement and innovation within antenna structures. Microstrip patch antennas have a low profile and weight. Since they are small and can share the same dielectric layer with the circuit elements, they can easily adapt to integrated circuit structures and do not increase the size of portable devices. However, electrical parameters such as resonance frequency, bandwidth, return loss, gain and efficiency may be insufficient for current communication applications. The antenna gain from these parameters, gives the power transmitted by the antenna compared to an isotropic antenna that spreads evenly in all directions. For example, in applications requiring high range, a high-gain antenna is always needed as a communication element, so it is very important to have a high gain. In order to achieve the desired antenna performance in suitable physical conditions and structures, studies are carried out on different designs and optimization techniques are used for an antenna with high performance.

There are many methods in the literature to increase antenna gain. These; methods such as adding dielectric superstrate on the substrate, using an air gap under the patch, using high quality and costly dielectric materials, opening slots on the patch. In this thesis, different techniques such as array antenna design created by geometrically placing more than one antenna, modified ground plane, adding dielectric superstrate on the patch and slot on the patch are used as gain enhancement method.

The manufacture technique used in antennas is a very important factor for the efficiency of the antenna. There are more than one antenna manufacturing technique and new ones are added to them as technology progresses. Even for an antenna with the same physical structure, antenna data may change as these techniques change. For these reasons, in this thesis, the same antenna is manufacture using more than one technique. These techniques are printing circuit method with iron, coating method with adhesive PVC foil, masking method with adhesive PVC foil, antenna manufacturing method using PCB device and coating method with copper tape. Afterwards, the manufactured antennas are measured and the results are evaluated, and the effects of different techniques are examined.

Keywords: Antenna Array, FR-4, R/T Duroid 5880 High Gain, Superstrate, Modified Ground Plane, Manufacture Techniques, 5.8 GHz.

ÖNSÖZ

Tezin her aşamasında beni yönlendiren, benden desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, daima tecrübelerini ve bilgilerini paylaşan danışmanım saygıdeğer Dr. Öğr. Üyesi Dilek Uzer'e ve her daim bize fikir veren, yüksek lisans sürecim boyunca değerli yorumlarını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Seyfettin Sinan Gültekin'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yüksek lisans ve tez süresince hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Muhammed Isayev'e, yanımda olan diğer arkadaşlarıma ve desteklerini her zaman hissettiğim aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ayşe Özge ÇINAR
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Mikrodalga Antenlerin Haberleşme Sistemindeki Önemi	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Temel Anten Parametreleri	9
3.1.1. Işıma örüntüsü.....	9
3.1.2. Yönlülük	10
3.1.3. Giriş empedansı	10
3.1.4. Anten verimi	11
3.1.5. Saçılma parametreleri	11
3.1.6. Gerilim duran dalga oranı	12
3.1.7. Kazanç	13
3.1.8. Bant genişliği	13
3.1.9. Kutuplama (Polarizasyon)	14
3.1.10. Yarım güç huzme genişliği	15
3.2. Mikroşerit Antenler.....	15
3.2.1. Mikroşerit antenlerin besleme teknikleri	17
3.2.2. Eliptik mikroşerit yama anten tasarımı	21
3.2.3. Selçuklu Yıldızı mikroşerit yama anten tasarımı.....	23
3.3. Mikroşerit Antenlerde Kazanç Arttırma Yöntemleri.....	24
3.3.1. Mikroşerit dizi antenler	25
3.3.2. Yarıklı yama antenler.....	30
3.4. Mikroşerit Anten Üretim Teknikleri.....	30
3.5. ANSYS Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (HFSS).....	31
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	35
4.1. Mikroşerit Yama Anten Temel Parametreleri	35
4.1.1. Çalışma frekansı	35
4.1.2. Dielektrik sabiti.....	36
4.2. Eliptik Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı.....	36
4.2.1. Yalın EMŞA tasarımı.....	38
4.2.2. 1x2 dizi EMŞA tasarımı	39
4.2.3. 1x4 dizi EMŞA tasarımı	40

4.2.4. Modifiye edilmiş toprak düzlemlili 1x4 dizi EMŞA tasarımı.....	41
4.3. Selçuklu Yıldızı Mikroşerit Yama Anten Tasarımı ve İlave Üsttaş Kullanımı ...	45
4.3.1. Yalın SYMŞA tasarımı	45
4.3.2. SYMŞA üzerine keçe üsttaş ilave edilmesi	47
4.3.3. SYMŞA üzerine FR-4 üsttaş ilave edilmesi	48
4.3.4. SYMŞA üzerine RT/Duroid 5880 LZ üsttaş ilave edilmesi	50
4.4. Eliptik Mikroşerit Yama Anten Üzerine Selçuklu Yıldızı Yarık Açılması	53
4.5. Eliptik Mikroşerit Yama Anten Dizisinin Üretimi	57
4.5.1. Ütü ile baskı devre yöntemi kullanılarak EMŞA üretimi	57
4.5.2. Yapışkan PVC folyo ile maskelenerek EMŞA üretimi	60
4.5.3. Yapışkan PVC folyo ile kaplanarak EMŞA üretimi	62
4.5.4. Profesyonel PCB cihazı kullanılarak EMŞA üretimi	63
4.5.5. Bakır bant kullanılarak EMŞA üretimi	65
4.6. Farklı Üsttaşlar Kullanılan Selçuklu Yıldızı Mikroşerit Yama Anten Üretimi	66
4.7. Selçuklu Yıldızı Yarıklı Eliptik Mikroşerit Anten Üretimi	68
4.8. Mikroşerit Yama Antenlerin Ölçüm Sonuçları.....	69
4.8.1. Ütü ile baskı devre yöntemi kullanılarak üretilen EMŞA ölçüm sonucu	69
4.8.2. Yapışkan PVC folyo ile maskelenerek üretilen EMŞA ölçüm sonucu	70
4.8.3. PCB cihazı ile üretilen EMŞA ölçüm sonucu.....	71
4.8.5. Farklı üsttaşlar kullanılan SYMŞA ölçüm sonuçları	73
4.8.6. SY Yarıklı EMŞA ölçüm sonuçları	74
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
5.1. Sonuçlar	75
5.2. Öneriler	79
KAYNAKLAR	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	: Elektrik Alanı
H	: Manyetik Alanı
λ_g	: Etkin Dalga Boyu
λ_0	: Boşluk Dalga Boyu
h	: Dielektrik Alt Tabanın Yüksekliği
W	: Toprak Düzlemi Genişliği
L	: Toprak Düzlemi Uzunluğu
ϵ_r	: Alt Tabanın Dielektrik Sabiti
ϵ_{reff}	: Etkin Dielektrik Sabiti
f_r	: Antenin Tasarlandığı Rezonans Frekansı
a	: Yarı Büyük Eksen
b	: Yarı Küçük Eksen
a_{eff}	: Etkili Yarı Ana Eksen
e	: Eliptik Yamanın Eksantrikliği
D	: Anten Yönlülüğü
U	: Anten Işıma Şiddeti
G	: Anten Kazancı
e_r	: Anten Verimliliği
e_0	: Antenin Toplam Verimliliği
U_0	: Yön Bağımsız Kaynağın Işıma Şiddeti
P_{rad}	: Antendeki Toplam Işıyan Güç
Z	: Anten Giriş Empedansı
Γ	: Yansıma Katsayısı,
Z_L	: Yük Empedansı,
Z_0	: İletim Hattının Karakteristik Empedansıdır
V_{max}	: Duran Dalga Geriliminin Maksimum Değeri
V_{min}	: Duran Dalga Geriliminin Minimum Değeri
f_r	: Çalışma (Rezonans) Frekansı
f_{max}	: Antenin Etkili Bir Şekilde Çalıştığı Maksimum Frekans
f_{min}	: Antenin Etkili Bir Şekilde Çalıştığı Minimum Frekans
μ	: Manyetik Geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun Manyetik Geçirgenliği

ω	: Radyan Frekansı
v_0	: Serbest Boşluktaki Işığın Hızıdır
$\tan\delta$: Kayıp Tanjantı
σ	: İletkenin İletkenliği
R_r	: Toplam Işıma Direnci
R_L	: Kayıp Direnci
e_{cd}	: İletme-Dielektrik Verimliliği
c	: Işık Hızı

Kısaltmalar

BG	: Bant Genişliği
EBG	: Elektromanyetik Bant Boşluğu
EMC	: Electromagnetic Compatibility; Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	: Elektromagnetic Interference; Elektromanyetik Girişim
EMŞA	: Eliptik Mikroşerit Anten
FEM	: Finite Element Method; Sonlu Elemanlar Yöntemi
GPS	: Global Positioning System; Küresel Konumlama Sistemi
GSM	: Global System for Mobile Communications; Mobil İletişim için Küresel Sistem
HFSS	: High Frequency Structure Simulator; Yüksek Frekanslı Yapı Simülatörü
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers; Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
ISM	: Industrial Scientific Medical; Bilimsel, Endüstriyel ve Tıbbi
MTD	: Modifiye Edilmiş Toprak Düzlemi
RF	: Radyo Frekansı
SMA	: Sub Miniature version A
SYMŞA	: Selçuklu Yıldızı Mikroşerit Yama Anten
HPMW	: Half Power Beam Width; Yarım Güç Huzme Genişliği
VNA	: Vector Network Analyzer; Vektör Ağ Çözümleyicisi
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio; Gerilim Duran Dalga Oranı
Wi-Fi	: Wireless Fidelity; Kablosuz Bağlantı
WiMAX	: Worldwide Interoperability for Microwave Access; Dünya Çapında Birlikte İşleyen Mikrodalga Erişimi
WLAN	: Wireless Local Area Network; Kablosuz Yerel Alan Ağı

1. GİRİŞ

Mikroşerit yama antenler; boyutları, ağırlıkları, geometrileri ve üretim maliyetinin düşüklüğü, cihaz ve devrelere basit bir şekilde uyarlanabilmesi sebebiyle, en çok tercih edilen anten çeşitlerindedir. Mikroşerit yama antenlerin, anten çeşitleri içerisinde önemli bir büyüme ve yenilik meydana getirmesinin ana sebebi genellikle elektriksel olmayan özelliklerinden doğmaktadır. Mikroşerit yama antenler düşük bir ağırlık ve profile sahiptir. Mikrodalga tümleşik devrelerine (MIC) kolaylıkla uyum sağlayabilirler. Basit yapılarından dolayı ve devre elemanlarıyla aynı dielektriği kullanabilmeleri sebebiyle kolay bir şekilde entegre yapılara uyum sağlayabilir, taşınabilir ve cihazların boyutlarını arttırmazlar. Elektriksel performansı, açıklık veya tel antenler gibi geleneksel anten sistemleriyle karşılaştırıldığında temel mikroşerit antenlerin; yüksek besleme hattı, düşük bant genişliği, devre kayıpları, düşük çapraz kutuplama ve düşük güç kontrolü kapasitesi, düşük kazanç gibi dezavantajları vardır(Tansarıkaya, 2007). Bir anten tasarlanırken, antenin geometrik ve fiziki parametrelerinin etkileri yama boyutu, taban yüksekliği, taban yüzeyinin genişliği ve bunların bağlı büyüklükleri gibi özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Mikroşerit antenlerde kazancı yükseltebilmenin yolu ise doğru malzeme kullanma, elektrik ve fiziksel tasarım parametrelerinin optimizasyonu ve çeşitli üretim tekniklerini sağlayabilmektir. Bu tezde yapılan çalışmalarda bu unsurlar göz önünde bulundurulmuştur. Hem kazancın artırılması hem de diğer parametrelerin iyileştirilmesi için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden mikroşerit antenin kazancını arttırmak için anten parametrelerinin optimizasyonu ile birlikte, çoklu dizi anten, modifiye edilmiş toprak düzlemi, yarıklı yama geometrisi, yama üzerine dielektrik üsttaş ilavesi gibi yöntemler kullanılmış ve mikroşerit antenlerin verimliliğinde fazlaca etkisi olan antenin farklı üretim aşamaları incelenmiştir.

1.1. Mikrodalga Antenlerin Haberleşme Sistemindeki Önemi

Verileri kişi ve ekipmanlar arasında iletilmesinde kullanılan bir sisteme iletişim sistemi denir. Sistem genellikle bireysel iletişim ağları, röle istasyonları, iletim sistemi, terminal ekipmanı, ara bağlantı hattı ve entegre bir bütün olarak gerçekleştirilen ara aşamalardan meydana gelmektedir. Antenler, verici ile boş alan arasında veya boş alan

ile alıcı arasında ara bağlantı elemanıdır. Bu bağlantıları sağladıklarından dolayı herhangi bir elektrik devresinin ana bileşenleridir.

İletişim sistemlerinde, antenler, elektronik sinyalleri verimli bir şekilde elektromanyetik dalgalara çevirdiği için belirgin bir görevi vardır. Antenin sınıflandırması, frekans, kutuplama, radyasyon vb. özelliklere göre yapılmaktadır; Mikrodalga frekansında çalıştırılan anten, mikrodalga anteni olarak bilinir. Ev iletişimine dayalı uygulamalar da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda çeşitli türlerde mikrodalga antenleri mevcuttur (Lo ve Lee, 2013).



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İlk kez 1953 yılında Deschamps tarafından mikroşerit yama anten kavramına değinilmiştir. Sonrasında mikroşerit antene patent alan isimler Gutton ve Baissinot olmuştur. 1953 yılında patent alınmasına rağmen iyi dielektrik tabanlar bulunamamıştır. Sonraki yıllarda alt taban için fotograür tekniklerinin, kullanılabilir ısıl ve mekanik özelliklerinin ve düşük kayıp oranlarının geliştirilerek teorik modellerde olduğu kadar pratikte de iyi performansa sahip mikroşerit antenler üretilebilmiştir. Mikroşerit antenlerin hızlı bir gelişim içine girmesi dielektrik tabanların gelişimi ile başlamıştır. Howel ve Munson tarafından 1970 yıllarının başlarında ilk pratik antenler geliştirilmiştir. 1970'lerden bu yana, mikroşerit antenlerin, hafiflik, düşük profil, düşük maliyet, yüzey görünümü, PCB devrelere uyum sağlama gibi çokca avantajı kullanarak yapılan araştırma ve gelişmeler sonucunda mikroşerit yama antenler mikrodalga antenlerin büyük bir alanında bir dal olarak yer edinmiş ve farklı uygulamalara referanslık etmesine öncü olmuştur (Balanis, 2015).

2020 yılında "Design and Analysis of Elliptical Microstrip Patch Antenna at 3.5 GHz for 5G Applications" adlı makalede 5G uygulamaları için yarıklı ve yarıksız eliptik mikroşerit antenlerin performansı karşılaştırılmıştır ve çalışmanın sonucunda yarıklı antenin elektriksel uzunluğu arttığı için daha geniş bir frekans bant genişliği ve daha yüksek bir kazanç sağlamıştır. Bu çalışmada eliptik yama şeklinin tasarım esnekliğinin; dairesel, dikdörtgensel ve kare yamaya göre daha fazla olduğu için tercih edildiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca eliptik yamanın dairesel yamadan daha geniş frekans bant genişliğine sahip olduğu da söylenmektedir.(Hasan ve ark., 2020)

2021 yılında "A Low-Profile Dual-Band Elliptical Patch Antenna Suitable For WIFI With Bandwidth" adlı çalışmada çift kutuplama ve çift frekans bandı ile düşük profilli geniş bant eliptik yama mikroşerit anten önerilmiştir. Bu makalede, dikdörtgen yama ile eliptik yama karşılaştırılmış ve eliptik yamanın antenin bant genişliğini arttırmak için daha fazla mod türüne sahip olduğu belirtilmiştir(Mao ve Zhang, 2021).

"Circular Polarized Planar Elliptical Antenna Array" adlı çalışmada daha öncede eliptik yama antenlerin geniş empedans bant genişliğine sahip olduklarının kanıtlandığından bahsedilmiştir(P. Li ve ark., 2006) ve empedans eşleşmesi ile kazanç arttırımı için çoklu yamalar kullanılarak anten dizisi tasarımı ve eliptik yama üzerine yarık açılması önerilmiştir(Brás ve ark., 2013).

2012 yılında “A Systematic Approach for the Design, Fabrication, and Testing of Microstrip Antennas Using Inkjet Printing Technology” adlı çalışmada, mürekkep püskürtmeli baskı tekniğini kullanarak mikroşerit antenleri üretmek için sistematik bir çalışma yapılmıştır. İlk antenlerini geleneksel kare yama geometrisine dayalı olarak üretmişlerdir. Sistematik üretim süreci, en uygun sayıda basılı katman, kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresini içerir. En yüksek elektriksel iletkenliği, iletken sürekliliğini ve yapısal sağlamlığa ulaşabilmek için bu temel parametrelerin optimize edilmesi gerekmiştir. Anten, DMP-2800 Dimatix FujiFilm malzeme yazıcısı tarafından basılmıştır. Şerit Nanopartikülleri (SNP) iletken mürekkep kullanan Mürekkep Püskürtmeli Baskı Teknolojisi (IJPT) kullanılarak üretilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma anten topluluğuna, mürekkep püskürtmeli baskı teknolojisini kullanarak mikroşerit antenler üretmek için takip etmesi kolay, optimize edilmiş sistematik bir yöntem sağlamıştır(Al-Naiemy ve ark., 2012).

Masihi ve arkadaşlarının makalesinde endüstriyel, bilimsel ve tıbbi (ISM) bant uygulamaları için düzenlenebilir ve kompakt bir mikroşerit antenin tasarımı ve seri bir şekilde üretilmesi sunulmuştur. Lazer işleme, anten imalatı için hızlı ve doğru bir yol olarak tanıtılmıştır. Mikro şerit anten, radyal yama ve yer düzlemi olarak iki esnek bakır bant arasında 3.5 dielektrik sabiti olan esnek bir Kapton poliimid dielektrik malzemesi ile imal edilmiştir. 0003 mm kalınlığındaki bakır bant, sadece kullanım kolaylığı için değil, aynı zamanda anten deneyi sırasında tam simüle edilmiş sonuçlara ulaşmak ve simülasyon ile ölçüm çıkışları arasındaki mutlak farkları yok etmek için anten tepkisini ayarlama esnekliği için de seçilmiştir(Masihi ve ark., 2019).

Mahouti, P. “3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisi ile Bir Mikroşerit Yama Antenin Maliyet Etkin Üretimi” adlı çalışmasında, bugünün mühendislik sorunlarındaki zorlayıcı problemlerinden biri olan, bir antenin hızlı, yüksek hassasiyetle ve düşük maliyetle 3B yazıcı teknolojisi ile üretilmesini ele almıştır. Deneysel çalışma amacı ile tipik bir mikroşerit yama anten tasarımı incelenerek tasarımın 3B elektromanyetik benzetim programı ile analizini yapmıştır. Modelin ilk üretimi 3B yazıcı vasıtası ile gerçekleştirilmiş ve üretilen anten ölçülmüştür. Üretilen anten modelinin 2.45GHz frekansında geri dönüş kaybı -15dB ve kazancı 7dB olarak ölçülmüştür. Önerilen 3B yazıcı teknolojisi ile farklı dielektrik taban katsayısına sahip mikroşerit yama anten üretilbileceği görülmüştür. Bu sayede geleneksel olarak kullanılan bakır eritme perhidrol tuz ruhu kullanımı gibi ve başka bir üretim metodu olarak, makine kazıma veya lazer baskı gibi maliyeti fazla olan yöntemler yerine maliyeti düşük, erişilebilir ve

doğruluğu yüksek bir üretim metodu olarak 3B yazıcı tekniğinin kullanılabilceği gösterilmiştir(P. Mahouti, 2019).

Jung ve arkadaşları, ultraviyole ışını ve femtosecond lazer desenleme tekniğini kullanarak mikroşerit yama antenleri üretmek için bir teknik sunmuşlardır. İlk aşamada hem tek yuvalı hem de çift yuvalı mikroşerit yama antenlerinin fiziksel parametrelerini tasarlamışlar ve optimizasyon için yüksek frekanslı yapı simülatörü kullanarak simüle etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarında, tek yuvalı mikroşerit yama anteni için 22.90 GHz rezonans frekansında -26.00 dB, çift yuvalı mikroşerit yama anteni için 24.03 GHz' de -18.30 dB geri dönüş kaybı çıkmıştır. Ayrıca, mikroşerit yama antenin üretim sonuçlarını göstermişlerdir. Tek yuvalı mikroşerit yama anteni için deneysel sonuç 22.70 GHz' de -21.25 dB dönüş kaybı gösterirken çift yuvalı mikroşerit yama anteni 24.10 GHz' de -27.00 dB dönüş kaybı göstermiştir. Buna ilave olarak, femtosecond lazer destekli teknik ve fotolitografik teknik kullanılarak imal edilen çift yuvalı mikroşerit yama antenin performansı kıyaslanıp femtosecond lazer-imal mikroşerit anteninde daha iyi performans elde edildiği öne sürülmüştür. Önerilen femtosecond lazer tabanlı teknik basit ve yüksek kaliteli mikroşerit antenlerin hassas üretimi için iyi bir sonuç vaat etmiştir(Jung ve ark., 2020).

Uzer ve Gültekin tarafından Selçuklu yıldızı adı verilen yeni bir mikroşerit anten yama geometrisi literatüre kazandırılmıştır (Uzer ve Gultekin, 2012). Tasarlanan antenin performansı, literatürdeki diğer iki popüler yama geometrisi olan kare ve dairesel mikroşerit antenlerin performanslarıyla karşılaştırılmıştır. Dairesel ve karenin yama boyutları, Selçuklu yıldızıyla eşit alınmıştır. Daha sonra antenlerin yama yüzey alanları, Selçuklu yıldız anteni ile eşleştirilmiş ve tasarımlar için yeni yama boyutları hesaplanmıştır. Anten performansları bant genişliği açısından karşılaştırılmıştır. Selçuklu Yıldızı şekilli mikroşerit antenin her rezonans frekansında kare ve daire şekilli antenlere oranla üstün performansa sahip olduğu görülmüştür. Ancak, elde edilen %1.48 bant genişliği sonucuyla, Wi-Fi uygulamaları için gerekli %2.50 bant genişliği kriterleri yakalanamamıştır. Bununla birlikte, ek bant genişliği geliştirme yöntemleri uygulayarak bant genişliğini arttırmanın mümkün olacağı belirtilmiştir (Uzer ve ark., 2016).

Shah ve arkadaşları "Design of 1x2, 1x4, and 2x2 Dual Polarization Microstrip Array Antenna" adlı makalede, mikroşerit yama anteni tipinden üç dizi anten tasarımı yapmışlardır. Dizi antenin 2.4 GHz' de çalışmasını tasarlamak için çeyrek dalga empedans uyumlandırma tekniği kullanılarak iki ve daha fazla yama kombinasyonu yapılmıştır. Tasarım, FR-4 dielektrik malzemesi ile üretilmiştir. 1x2, 1x4 ve 2x2 dizi

antenleri tasarlanmıştır. Simülasyonlar ve ölçümler, dizi antenlerin duran dalga oranı (VSWR), dönüş kaybı (S_{11}) ve anten kazancı açısından tek yamaya göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bir dizideki daha fazla sayıda yama antenin performansını artırdığı gösterilmiştir. Antenler, düşük VSWR ile 2.4 GHz civarında rezonans frekansında çalıştırılır. 2x2 ve 1x4 yamalardan gelen tepkilerin 1x2 dizi anteni ve tekli yama anteni ile kıyaslandığında daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır(Shah ve ark., 2008).

Mondal ve arkadaşlarının çalışmalarında, 2,8 GHz' de 2x2 eliptik yama anten dizisi tasarımı yapılmıştır. Tek yama ile tasarlanan eliptik mikroşerit antenin kazancı düşüktür ve 2.0 dB civarındadır. Bundan dolayı tek beslemeli eliptik yama anten dizisi geliştirilmiştir ve 9.8 dB civarında bir kazanç göstermiştir. Bu çalışma mikroşerit antenlerde anten dizisi uygulamasının anten kazancını hatırı sayılır ölçüde arttırdığı gösterilmektedir (Mondal, 2020).

Modifiye edilmiş toprak düzlemi; çoğu çalışma da bant genişliğini arttırmak için tasarlanmıştır, fakat anten kazancını arttırmada fazla kullanılmamıştır. “A Compact High Gain Microstrip Antenna For Wireless Applications” adlı bu çalışmada, yüksek kazançlı ve çok frekanslı uygulamalar için yeni bir kompakt altıgen yama anteni sunmaktadır. Geleneksel altıgen yama anteninin kazancını arttırmak için modifiye bir toprak yüzeyi kullanılmıştır. Önerilen modifiye edilmiş toprak yüzeyli altıgen mikroşerit yama anteni basit bir antendir. Çok frekanslı ve kompaktlık ile birlikte daha yüksek kazanç elde edilen anten, yamanın altı köşesinin hemen altındaki yer düzleminde altı üçgen yuva kesilerek elde edilmiştir. Sonuç olarak herhangi bir ek katman ve maliyetli taban malzemesi olmadan, önerilen anten başarıyla daha yüksek kazanç elde etmiştir(Mandal ve Sarkar, 2013a).

Modifiye edilmiş toprak düzlemi kullanılan başka bir çalışmada, altı adet mikroşerit anteni üzerinde simüle edilmiş ve deneysel incelemeler sunulmuştur. Burada önerilen tasarım, U şeklindeki yama ve elektriksel olarak ince bir dielektrik malzemeye sahip modifiye toprak düzlemi kullanılarak bant genişliğinin iyi bir şekilde geliştirilmesini ve aynı anda kazanç sağlamasını sağlamıştır(Mandal ve Sarkar, 2013b).

Hussain ve arkadaşları “A High-Gain Microstrip Patch Antenna Using Multiple Dielectric Superstrates for WLAN Applications” adlı çalışmalarında, 5.5 GHz'lik merkezi frekansta çalışan yüksek kazançlı WLAN uygulamaları için bir tasarım sunmuştur ve bir mikroşerit yama antenin karakteristik performansını geliştirmek için birden çok süper taban üsttaşı kullanımını önermiştir. Performansı,

yansıma kaybı ve kazanç açısından anten çoklu yüksek dielektrik sabiti olan malzemeler kullanılarak geliştirilmiştir. Kullanılan yüksek dielektrikli malzeme Taconic CER-10' dur ($\epsilon_r = 10.2$). Sayısal sonuçlar ilk başta yama anteninin -10 dB' e sahip olduğunu göstermiştir %2.54 bant genişliği tekli ve ikili süper taban üsttaş entegre edilmesiyle sırasıyla %8.43 ve %17.43 olmuştur. Tek bir süper taban üsttaş kullanarak Antenin kazancı 6.1 dBi' den 9.5 dBi' ye artmıştır, iki süper taban üsttaş yerleştirerek 13.6 dBi' ye daha yükseltmiştir. Üstelik üsttaşın sayısını daha da artırmak, yama anteninin performansını artırmıştır. Son tasarlanan anten (iki üst tabakalı yama anteni) üretilmiş ve ölçülmüştür. Ölçülen sonuçlar simüle edilmiş sonuçlarla aynı doğrultudadır ve bu anten, yüksek kazançlı WLAN uygulamaları için iyi bir aday olarak önerilmiştir(Hussain ve ark., 2020).

“Dielectric Slab Superstrate Electrically Small Antennas With High Gain and Wide Band” adlı çalışmada dielektrik üsttaş kullanılarak antenin kazanç artışı büyük ölçüde araştırılmıştır. Dielektrik levha süper tabakası, basit yapısı, üretim kolaylığı nedeniyle cazip olmaktadır. Süper tabaka tekniği, anten kazancını geliştirmek için yaygın biçimde uygulanmaktadır(Y.-H. Yu ve ark., 2020).

“A Review On Gain Enhancement Techniques Of Microstrip Antenna” adlı çalışmada anten kazancını artırmak için geçmişte önerilen çeşitli tekniklerden bahsedilmiştir. Bu çeşitli teknikler arasında frekans seçici yüzey, metalik reflektörler, parazitik yamalar, ilave süper tabakalar, pimler ve kısmi dielektrik taban çıkarılması gibi teknikler yer almaktadır. (Kumar ve ark., 2021)

“Highly Miniaturized Microstrip Antenna with Slots and a Superstrate for RFID Applications” adlı çalışmada birden fazla yarık açılan oldukça minyatür bir mikroşerit anten ve yüksek geçirgenlikli malzemeye sahip bir süper tabaka tanıtılmaktadır. 900MHz' deki mikroşerit antenin boyutu, 900MHz' deki geleneksel dikdörtgen mikroşerit yama antenine kıyasla %87.5 oranında azaltılmıştır. Bu çalışmada da süper tabaka (dielektrik üsttaş) antenin minyatürleştirmesinde kullanılmıştır(Y. Yu ve ark., 2019).

“A Robust, Flexible and Frequency Reconfigurable Antenna with Flexible Superstrate and Substrate” adlı çalışmada dielektrik süper tabaka çalışma frekansını ayarlamak ve antenin gerçekleşen kazancını artırmak için kullanılmıştır. Anten, rezonans frekansını değiştirebilmek için yama düzleminden süper tabakaya kadar olan yüksekliğin değişebileceği biçimde tasarlanmıştır. Bu tekniğin antende frekans ayarlama işlemi için basit ve etkili bir yöntem olduğu söylenmiştir. Ayrıca, süper

tabakanın kullanımının antenin kazancını ve verimliliğini arttırdığı da ifade edilmiştir(Sayem ve Esselle, 2021).

Oğuz, 2020 tarihli yüksek lisans tezinde, “Türkiye’ de Mikroşerit Anten Üretimi ve Prototiplemedeki Zorluklar”ı incelemiştir. Dielektrik taban mikroşerit yama anten'in temel elemanıdır. Anten performansının parametreleri ve mikroşerit yama antenlerin boyutları dielektrik malzemenin özellikleri doğrultusunda geliştiğinden ileri seviye dielektrik malzemeler ile çalışabilmek oldukça önem arz etmektedir. İç piyasada bulunan dielektrik malzemeler, çoğu proje için beklentiyi karşılamamaktadır. Yüksek kalitedeki dielektrik malzemeleri genellikle ABD kökenli firmalar üretmekte, geliştirmekte ve sevk etmektedir. Bundan dolayı, dielektrik malzeme tedarik etmede Türkiye ve diğer gelişme aşamasında olan ülkeler ithalata bağımlı kalmaktadır. Döviz kurlarında oluşan beklenmeyen dalgalanmalar, ekonomik kriz ve umulmadık COVID-19 salgını sebebiyle dielektrik malzemelerin tedarik edilmesi daha zorlu bir hal almıştır(Oğuz, 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Temel Anten Parametreleri

Bir antenin performansının belirlenmesi için birden fazla anten parametreleri mevcuttur. Bu anten parametrelerinin bazıları birbiriyle ilişkili olduğu gibi anten performansını tamamen tanımlayabilmek için hepsinin birlikte bilinmesine ihtiyaç yoktur. Tez kapsamında incelenen temel anten parametrelerine bu bölümde yer verilmektedir.

3.1.1. Işıma örüntüsü

“Antenin ışıma karakteristiğinin uzay koordinatlarına göre ifade edildiği grafiksel gösterim ya da matematiksel ifadelere ışıma örüntüsü denir. Işıma özellikleri, güç akı yoğunluğu, ışıma şiddeti, alan genliği, yönlülük, faz veya kutuplanmayı içerir.”(Cheng, 1993)

Genel olarak uzak alan bölgeleri için geçerli olan ışıma örüntüsü bir antenin en temel parametrelerindedir. “Bir antenin yaydığı ışıma alanı, küresel bir yapı olarak düşünüldüğünde birim vektörleri r , θ ve ϕ ’ye bağlı küresel bileşenlerin bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Işıma örüntüsünün çeşitli kısımlarına kulak adı verilirken bunlar ana veya temel, ikincil, yan ve arka kulaklar olarak alt sınıflara ayrılabilirler.” Bir ışıma kulağı, “ışıma örüntüsünün göreceli olarak daha zayıf ışıma şiddetine sahip bölgelerle sınırlanmış parçası”na denir. Ana lop üzerinde oluşan ışıma, antenin istenilen yöne doğru olan ışımasını; yan loplar üzerinde oluşan ışımalar ise, istenmeyen yönlere yapılan ışımaları göstermektedir.

Her yöne eşit şekilde ışıma yapan antene yani ışıma örüntüsü θ ve ϕ ’den bağımsız olan bir antene izotropik ya da yön bağımsız anten denir. İzotropik anten kavramı antenlerin karşılaştırmasında referans değer olarak kullanılır ve pratikte böyle bir anten mevcut değildir. Eğer bir antenin ışıma örüntüsü θ ya da ϕ ’den sadece birine göre değişiyorsa bu antenlere çok yönlü anten denir. Böyle antenlerde bağımlı olmadığı düzlemde alıcının yer değiştirdiğinde aldığı enerji sabit kalır. Işıma örüntüsü hem θ hem de ϕ ’ye bağlı olarak değişiyorsa bu anten sadece belirli bir yönde ışıma yapıyor demektir ve bu anten yönlü bir antendir (Cheng, 1993).

3.1.2. Yönlülük

Yönlülük, “belirli bir yöndeki ışımaya şiddetinin tüm yönlerdeki ortalama ışımaya şiddetine oranıdır. Ortalama ışımaya şiddeti antenden ışıyan toplam gücün 4π ’ye oranıdır. Eğer yön özel olarak belirtilmemişse maksimum ışımaya şiddetinin yönü kullanılır.” (Balanis, 2015). Yönlülük (D), yükselme ve azimut açılarının fonksiyonudur (Saunders ve Aragón-Zavala, 2007). Yönlülük D ile gösterilir, birimi yoktur ve daima için 1’den büyüktür.

Ortalama ışımaya şiddeti antenden ışıyan gücün 4π ’ye oranı olarak hesaplanırsa, yönlülük denklem (3.1)’deki gibi ifade edilebilir (Balanis, 2015).

$$D(\theta, \phi) = \frac{U_{\theta, \phi}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\theta, \phi}}{P_{rad}} \quad (3.1)$$

Burada P_{rad} ışıyan güç ve U ışımaya şiddetidir.

3.1.3. Giriş empedansı

Giriş empedansı “bir antenin terminallerinde gösterdiği empedans, terminallerindeki gerilimin akıma oranı veya bir noktadaki elektrik alanının manyetik alana oranı” olarak tanımlanır (Balanis, 2015).

Anten giriş empedansı denklem (3.2)’te ifade edilir (Drabowitch ve ark., 2010).

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (3.2)$$

Burada R_a terminaller arası direnç, X_a terminaller arası reaktans ve Z_a antenin terminaller arası empedansıdır. R_a direnci iki bileşenden oluşur ve (3.3) eşitliğinde verilir (Balanis, 2015).

$$R_a = R_r + R_L \quad (3.3)$$

Burada R_r antenin ışımaya direncini ve R_L antenin kayıp direncini temsil etmektedir. Birimleri Ohm’dur.

3.1.4. Anten verimi

Anten direnci R_r ve R_L olarak iki bileşenden oluşmaktadır. “iletim dielektrik verimi e_{cd} , ışına direnci R_r ’ ye aktarılan gücün R_r ve R_L ’ ye aktarılan güce oranı ” olarak tanımlanır(Balanis, 2015) . Işıma verimliliği denklem (3.4)’te verildiği gibi ifade edilir.

$$e_{cd} = \frac{R_r}{(R_L + R_r)} = \frac{\text{Işıyan Güç}}{\text{Anten Tarafından Kabul Edilen Güç}} \quad (3.4)$$

3.1.5. Saçılma parametreleri

Haberleşme sisteminde akım ve gerilim iletimi portlar vasıtasıyla yapılmaktadır. S_{11} değeri örneğin anten beslemesi için kullanılan porttan antene güç iletimindeki verimi göstermektedir. Saçılma parametreleri S-parametreleri olarak da ifade edilmektedir. S-parametreleri bir elektrik sistemindeki portlar arasındaki giriş çıkış ilişkisini açıklayan temel anten parametrelerinden birisidir. Özellikle yüksek frekansta, belirli bir ağı gerilim veya akım yerine dalgalarla tanımlamak gerekli hale gelir. Böylece S-parametrelerinde güç dalgaları kullanılmaktadır. Tek bir antenin bulunduğu bir sistemde sadece S_{11} parametresi vardır. Tek antenli sistemdeki eğer S_{11} değeri 0 dB ise antene gelen tüm güç yansıyor. Yani S_{11} değeri anten tarafından kabul edilen gücü ifade eder. Ancak bu ışınan güç anlamına gelmemektedir. Çünkü ışınan güç antenin verimi ile alakalı olup anten tasarımında kullanılan malzemelerin özellikleriyle alakalıdır(Drabowitch ve ark., 2010). Dolayısıyla hem S_{11} değeri hem de VSWR değeri tek başına bir anten tasarımında yeterli değildir. S_{11} , antene iletilen sinyalin ne kadarının geri yansıdığını gösterir. Bu nedenle yansıma katsayısı olarak da adlandırılır ve Γ ile gösterilir. Yansıma katsayısı, denklem 3.5’ e göre hesaplanır.

$$\Gamma = V_r / V_i = (Z_a - Z_s) / (Z_a + Z_s) \quad (3.5)$$

Bu denklemde V_r yansıyan gerilim değerini, V_i de gelen gerilim değerini ifade etmektedir Z_a ve Z_s sırasıyla yük empedansı ve karakteristik empedanstır. İletilen sinyalin tamamının ışıdığı ideal bir sistemde yansıma katsayısı 0 olmakta, böylece geri dönüş kaybı sonsuz olmaktadır.

S-parametreleri ile antenin bant genişliği, ortak etkileşim ve empedans uyumunu gibi ışıma performanslarını verir. İki antenden oluşan bir MIMO sisteminde S_{11} birinci antenin, S_{22} ise ikinci antenin yansıma katsayısını vermektedir. S_{12} ifadesi ise, ikinci antenin birinci anten üzerindeki girişim etkisini ifade eder. Genelde S-parametreleri desibel (dB) olarak ifade edilmektedir.

3.1.6. Gerilim duran dalga oranı

Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR) parametresi, antenin bağlı bulunduğu hat ile empedans uyumunun ne oranda iyi olduğunu sayısal olarak açıklamaktadır. VSWR, antenin yansıyan gücünü verir ve denklem 3.7'da görüldüğü üzere anten yansıma katsayısının bir fonksiyonudur. Güç transferinin maksimum olması için kaynak empedansı olan, $Z_s = R_s + jX_s$ ve antenin giriş empedansı olan $Z_a = R_r + R_L + jX_a$ 'nın karmaşık eşlenik olması gerekmektedir. Eğer uyumsuzluk varsa bu durum yansımaya neden olur ve VSWR ile gösterilir. VSWR hesabı için önce denklem (3.6) ile yansıma katsayısı hesaplanır ve ardından VSWR denklem (3.6) ile elde edilebilir (Saunders ve Aragón-Zavala, 2007).

Burada antenden yansıyan gerilimdir V_r ve antene iletilen gerilim ise V_i ' dir.

$$VSWR = 1 + \frac{|V_r|}{|V_i|} \quad (3.6)$$

Burada Γ yansıma katsayısıdır, S_{11} veya geri dönüş kaybı olarak adlandırılır. Bir anten için VSWR her zaman pozitif değerdedir. İyi eşleşmiş anten için düşük VSWR değeri gerekmektedir. Eğer antenle iletim hattı iyi bir eşleşme sağlamıyorsa iletilen güç yansımakta ve bu durumda iletim hattı boyunca duran dalgaya sebep olmaktadır. VSWR; sonuçta gerilim ilerleyişi boyunca tepe ve vadi görünümlü bir şekil ortaya çıkarmaktadır. Eğer kaynaktan çıkan gerilim maksimum genlikte ve düz bir görünümde antene ulaşmış ise Gerilim Duran Dalga Oranı 1 demektir. (Drabowitch ve ark., 2010).

3.1.7. Kazanç

Antenin performansını tanımlayan önemli ölçülerden biri de kazançtır. Anten kazancının yönlülük ve verim parametreleri ile yakından bir ilişkisi vardır. Bir antenin (verilen bir yöndeki) kazancı “(verilen bir yöndeki) ışıma şiddetinin, güç ışığıyan anten tarafından yönbağımsız olarak toplandığında elde edilecek ışıma şiddetine oranı” olarak tanımlanır. “Yön bağımsız ışığıyan güce karşılık gelen ışıma şiddeti, anten tarafından kabul edilen (giren) gücün 4π ’ ye oranına eşittir.” Anten kazancı denklem (3.7) ile hesaplanır. Yükselme ve azimut açılarının fonksiyonudur. Verimi %100 olan antenin kazanç ve yönlülüğü birbirine eşittir.

$$G(\theta, \phi) = ecd.D(\theta, \phi) \quad (3.7)$$

Verim 0 ile 1 arasında değışeceğinden dolayı kazanç her daim yönlendiricilikten (D) küçük olmak zorundadır. Dielektrik yüksekliği (h) ve antenin genişliği (W) arttıka yönlendiricilik de artmaktadır. Fakat bunun tam tersi olarak bant genişliği de azalmaktadır (Balanis, 2015).

3.1.8. Bant genişliği

Bir antenin bant genişliği “İçerisinde bazı karakteristiklere göre alınan anten performansının tanımlanmış bir standarda uyduğu frekans aralığıdır.” olarak ifade edilir. Bant genişliği (BG), antenin performansını gösterdiği frekans aralığıdır ve anten karakteristiklerinin (giriş empedansı, örüntü, hüzme genişliği, kutuplanma, yan kulak seviyesi, kazanç, hüzme yönü, ışıma verimliliği gibi) kabul edilebilir değerlerde olduğu merkez frekansının yanlarındaki alt frekans (f_a) ile üst frekans (f_u) aralığı olarak da ifade edilmektedir. BG güç kazancının maksimum değerinin -3 dB altındaki iki noktanın arası veya gerilim duran dalga oranının 2:1’ den daha az olduğu aralık olarak tanımlanabilir (Saunders ve Aragón-Zavala, 2007).

BG hesabı yapılırken geniş bantlı antenler için bant genişliği, genellikle kabul edilebilir çalışmanın şartlarının olduğu üst frekansın alt frekansa oranı olarak ifade edilir, dar bantlı antenler için yüzde BG (%BG) ifadesi kullanılır. “Bir antenin karakteristiklerinin (giriş empedansı, örüntü, kazanç, kutuplanma gibi) aynı tarzda

değişmesi gerekmediği hatta frekanstan kritik olarak etkilenmedikleri için bant genişliğinin tek bir karakterizasyonu yoktur.” Yüzde BG denklem (3.8)’ de verilmiştir. Mikroşerit antenler de dar bantlı antenler kategorisindedir bundan dolayı mikroşerit antenlerin bant genişliği hesaplanırken de %BG ifadesi kullanılır (Balanis, 2015).

$$\%BG = \frac{(f_u - f_a)}{f_r} \times 100 \quad (3.8)$$

Burada f_r antenin rezonans frekansıdır.

3.1.9. Kutuplama (Polarizasyon)

Verilen bir yönde bir antenin kutuplanması “anten tarafından yayılan (ışışyan) dalganın kutuplanması” olarak tanımlanır. Alıcı anten ile verici antenin aynı kutuplamaya sahip olması gerekmektedir. Işıyan dalganın kutuplanması ise “Zamanla değişim yönü ve elektrik alanın bağıl büyüklüğünün, özellikle de uzayda sabit bir konumdaki alan vektörü ucunun zamanın bir fonksiyonu olarak izlediği ve bir anlamda yayılma yönü boyunca gözlenen izlenen bu şekil bir elektromanyetik dalga özelliğidir.” olarak tanımlanır. Dolayısıyla kutuplanma ani elektrik alanı ifade eden vektörün ucunun çizdiği eğridir.

Kutuplama elektromanyetik dalganın bir özelliğidir. Kutuplama elektrik alanın yön ve genliğini zamanın bir fonksiyonu biçiminde açıklar. Başka bir ifadeyle kutuplama; elektrik alanın yere göre konumudur denilebilir. Basit bir tel anten, dikey veya düşey kutuplama olmak üzere bir kutuplama sahiptir.

Doğrusal, dairesel ve eliptik kutuplanma olmak üzere üç farklı kutuplanma mevcuttur. Doğrusal kutuplanma, elektrik alan vektörünün zamana bağılı olarak tanımlanması ve sadece bir hat boyunca ilerlemesi ile oluşur. Dairesel kutuplanma alan vektörünün dairesel ilerleyerek her bir dalga boyunda 360° dönmesiyle oluşur. Eliptik kutuplanma elektrik alanın izlediği bu yol bir elips ilerlemesi ile oluşur. Elektrik alanın izlediği yol eğer saat yönündeyse sağ el kutuplanma, eğer saat yönünün tersinde ise sol el kutuplanma olarak ifade edilir (Balanis, 2015).

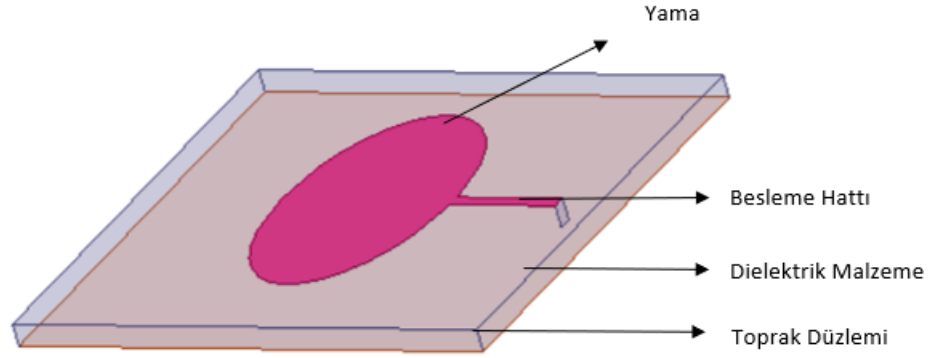
3.1.10. Yarım güç huzme genişliği

Işıma deseninde gücün yarıya düştüğü açılar arasında ki farka yarım güç huzme genişliği (HPMW, Half Power Beam Width) denir. -3 dB güç değerine sahip ışımaya alanıdır. HPBW antenin ana huzmesinin genişliğini ifade eder. Anten tasarımında önemli bir parametre olan HPMW gücün iletildiği huzmeye denir.

3.2. Mikroşerit Antenler

Düzlemsel anten ya da yama anten olarak da adlandırılan mikroşerit antenler, günümüz kablosuz mobil cihazlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Mikroşerit anten kavramı ilk olarak Deschamps (1953) tarafından ortaya atılmıştır. Mikroşerit antenle ilgili ilk patenti ise, Gutton ve Baissinot (1955) “düz (flat) anten” ismi ile almışlardır. Ortaya çıkışının ilk zamanlarında fazla ilgi görmeyen mikroşerit antenlere olan ilgi, PCB üretim tekniğinin geliştirildiği 1970’ li yıllardan sonra giderek fazlalaşmıştır. PCB teknolojisinin ardından mikroşerit antenlerin, ince bir tabaka üzerine ve birçok zemine uyumlu olacak şekilde üretilmesi, küçük boyutu, hafifliği, üretim açısından kolaylığı ve mikrodalga devrelere rahatça uygulanabilir olması gibi çokça avantajları mevcuttur. “İlk evrelerde füze, roket, radar gibi askeri alanlarda uygulanan bu antenler, şimdilerde WLAN, GPS, GSM, LTE, Wi-Fi, WiMAX gibi birçok mobil haberleşme sistemleri, hava araçları, askeri sistemler ve biyomedikal teknolojiler gibi oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir”(Balanis, 2015). Mikroşerit antenlerin dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar düşük bant genişliğine sahip olmaları, kazançlarının çok düşük olmaları, yarım düzlem içinde birçok mikroşerit antenlerin ışımaya yapmaları ve düşük güç kapasitesine sahip olmalarıdır.

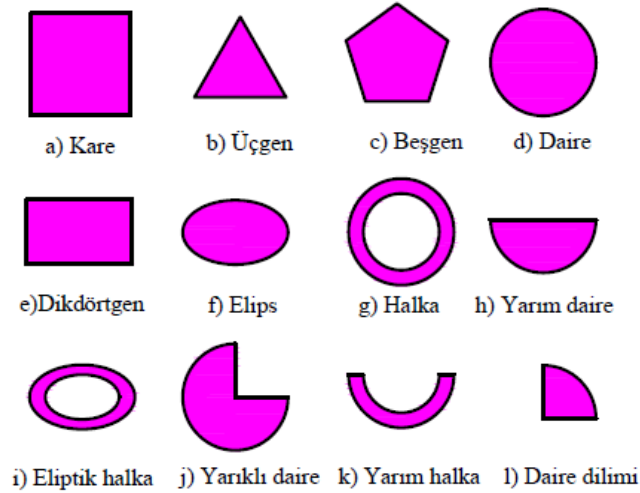
En temel haliyle bir mikroşerit antenin yapısı Şekil 3.1' de gösterildiği gibi bir toprak düzlemi, onun üzerinde aynı alana sahip olan bir yalıtkan taban ve onun üzerinde bir ışımaya alanından oluşmaktadır. Yama genellikle iyi bir iletken olan bakır veya altın gibi malzemelerden yapılır ve herhangi bir geometrik şekli alabilir.



Şekil 3.1 Mikroşerit anten yapısı

Mikroşerit anten performansının maksimum olması için dielektrik tabana ilişkin sabit olan ϵ_r ' nin $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12.0$ olması istenir ama yüksek olan uygulamalarda çokça mevcuttur (Balanis, 2015).

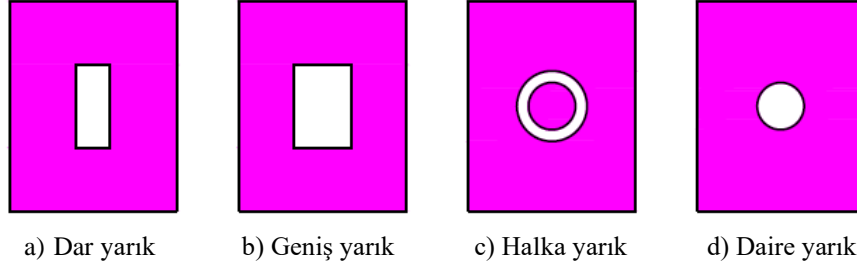
Mikroşerit antende iletken bölge olan yama Şekil 3.2' de görüldüğü gibi farklı geometrik şekillerde seçilebilir. Önemli olan tasarımı istenen ışıma grafiğine uygun olacak şekilde istenen geometride seçilmesidir.



Şekil 3.2. Mikroşerit antenlerde sıkça kullanılan yama geometrileri

Mikroşerit yarık antenleri Şekil 3.3' te gösterildiği gibi toprak düzlemi üzerinde istenilen bir şekilde olan ve bir mikroşerit hat ile beslenen bir yarıktan oluşmaktadır. Mikro şerit yama antenleri diğerlerine göre düşük maliyetlidir, düşük profillidir ve kolayca imal edilir.

Bir mikroşerit iletim hattı tarafından beslenen mikroşerit anteni göz önünde bulundurun. Yama anteni, mikroşerit iletim hattı ve topraklama düzlemi, yüksek iletkenlikli metalden yapılmıştır(Saunders ve Aragón-Zavala, 2007).



Şekil 3.3 Mikroşerit yarıklı antenler

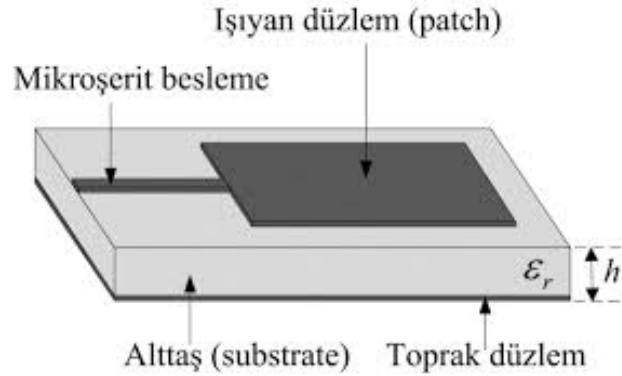
3.2.1. Mikroşerit antenlerin besleme teknikleri

Mikroşerit antenlerin beslenmesinde birçok yapı kullanılmaktadır. Mikroşerit hat, koaksiyel prob, açıklık bağlaşım ve yakınlık bağlaşım en çok kullanılan dört tanesidir. Antenlerde besleme yapılmasındaki esas gaye empedansla uyumluluğu sağlamaktır. Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme teknikleri antenin giriş empedansı ve kutuplaması açısından fazlaca önemlidir. Besleme teknikleri temel olarak bağlantı olup olmaması üzerine ikiye ayrılır. Bağlantı olan besleme şekillerinde güç doğrudan ışımanın yapılacağı yamaya aktarılır. İkinci durumda ise güç, aralarında bağlantı bulunmayan mikroşerit hat ve yama arasında meydana gelen elektromanyetik alan aracılığıyla aktarılmaktadır (Balanis, 2015).

3.2.1.1. Mikroşerit hat besleme

Mikroşerit yama ve yarıklı antenlerdeki en kolay ve sıkça başvurulan besleme tekniği mikroşerit hat beslemesidir. Bu teknikte Şekil 3.4' te gösterildiği üzere besleme hattı mikroşerit yamanın yer aldığı taban malzemesi üzerindedir, mikroşerit besleme hattı iletken bir şerittir ve yamayla karşılaştırıldığında genellikle daha küçük bir genişliğe sahiptir ve yamanın bir devamı gibi düşünülmektedir. Böylece aynı anda üretilebilme avantajı ile birlikte üretimi kolay, içe doğru konumunun kontrolü ile uyumlanması basit ve modellemesi oldukça zahmetsizdir. Bu tekniğin dezavantajı bant genişliğinin dar olmasıdır. Bant genişliğini arttırmak için taban malzemesinin kalınlığı

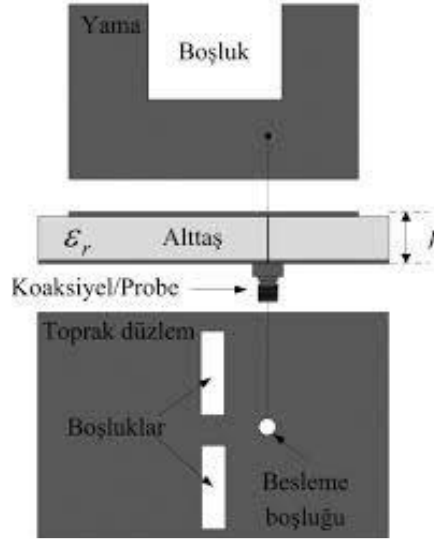
arttırıldığında bant genişliğini sınırlayan yüzey dalgaları ve beslemenin parazit ışımaları da artmaktadır. (Balanis, 2015).



Şekil 3.4 Mikroşerit hat besleme (Toktaş ve Akdağlı, 2015)

3.2.1.2. Koaksiyel prob besleme

Koaksiyel kablo veya konnektör ile besleme de oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır, koaksiyel kablonun iç iletkeni ışıyan yamaya bağlanırken dış iletkeni toprak düzlemine bağlanmaktadır güç koaksiyel kablo vasıtası ile aktarılmaktadır. Bu beslemede koaksiyel kablonun iç iletkeni toprak düzlemi ile bağlantılı değildir, iletken yama kısmına dielektrik taban malzemesi içinden geçerek bağlanmaktadır aynı şekilde dış iletken de toprak düzlemine bağlanmaktadır (Balanis, 2015). Yaygın biçimde kullanılan bu yöntemde diğer besleme tekniklerine kıyasla empedans uyumluluğunu sağlayabilmek için besleme konumu değiştirilerek daha rahat bir biçimde elde edilmektedir. Ama toprak düzlemi ve taban malzemesinin delinmesi, iç iletkenin iletken yama ile lehimlenerek birleştirilmesi gibi adımlar üretim bakımından bu besleme tekniğinin kullanımını güçleştirmektedir. Buna ilaveten bu besleme tekniğine sahip antenlerin bant genişliği sorunu vardır. Bu sorunu çözmek için mikroşerit hat beslemede olduğu gibi dielektrik malzemenin kalınlığı arttırılabilir fakat besleme merkezli parazit ışımlar ve yüzey dalgaları da yine aynı şekilde artmaktadır (Toktas ve ark., 2011).

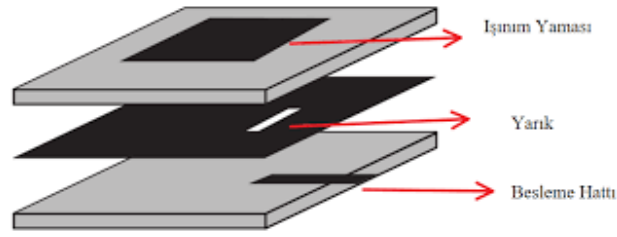


Şekil 3.5 Koaksiyel hat besleme (Toktaş ve Akdağlı, 2015)

3.2.1.3. Açıklık bağlaşımlı besleme

Hem mikroşerit hem de prob doğal olarak asimetriye sahiptir. Bu da çapraz kutuplanma ışınmasına sebep olan yüksek dereceli modlar üretmesine sebep olur. Bu problemlerin bazılarının üstesinden gelmek için temassız açıklık bağlaşımlı tipi beslemeler ortaya çıkmıştır. Bunlar açıklık ve yakınlık bağlaşımlı beslemelerdir. Açıklık bağlaşımlı besleme, temel toprak tabakayla birbirinden ayrılmış, iki alt yüzey kullanılarak meydana gelmektedir. Bu düzenleme, besleme mekanizması ve ışınma elemanının bağımsız olarak optimizasyonuna olanak sağlamaktadır. Mikroşerit hat alttaki yalıtkan tabakanın üstüne yerleştirilmiş ve güç toprak yüzeyde modellenen yarıklar tarafından yamaya aktarılabilmektedir. Genellikle alt taban için dielektrik katsayısı yüksek malzeme ve üst taban için ise dielektrik katsayısı düşük kalın malzeme tercih edilir. Tabanlar arasındaki toprak düzlemi, ışınma elemanından beslemeyi de ayırır, parazit ışınımın örüntü şekline etkisini ve kutuplanma saflığını minimize eder. Açıklık bağlaşımlı beslemenin de bant genişliği oldukça düşüktür ve dört besleme içinde üretimi en zor olanıdır. Ancak modellenmesi biraz daha kolay ve parazit ışınması daha makul boyutlardadır. Bu tekniğin kullanıldığı tasarımlarda taban elektrik parametreleri, besleme hattı genişliği, yarık boyutu ve konumu gibi parametreler tasarımı en iyi hale getirmekte kullanılabilir. Tipik olarak empedans uyumlama besleme hattı genişliği ve yarık uzunluğu kontrol edilerek yapılır (Balanis, 2015).

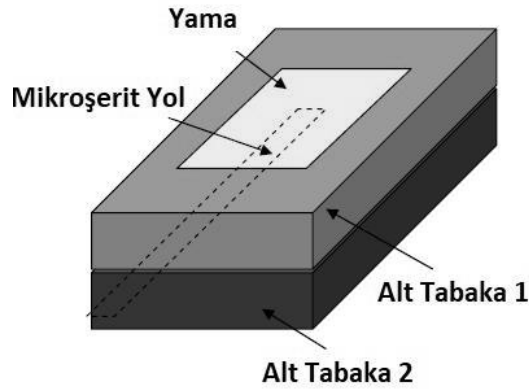
Bu yapı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Açıklık Bağlaşımlı Besleme (Carr ve George, 2012)

3.2.1.4. Yakınlık bağlaşımlı besleme

Bu yapının açıklık bağlaşımlı beslemeden ayrımı Şekil 3.7' de gösterildiği gibi besleme hattının toprak yüzeyinin üzerinde konumlandırılmasıdır. Bu durum bu besleme tekniği kullanılan antenlerin daha geniş bant genişliğine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu besleme tekniği kullanılarak bazı çalışmalarda %13 civarlarında bant genişliği yakalamak mümkün olmuştur(Saunders ve Aragón-Zavala, 2007). Modellemesi kolay ve parazit ışınması düşüktür fakat üretimi biraz daha zordur. Empedans uyumlamasını kontrol etmek için besleme saplamasının uzunluğu ve yamanın genişlik hat oranı kullanılmaktadır (Balanis, 2015).



Şekil 3.7 Yakınlık Bağlaşımlı Besleme (Carr ve George, 2012)

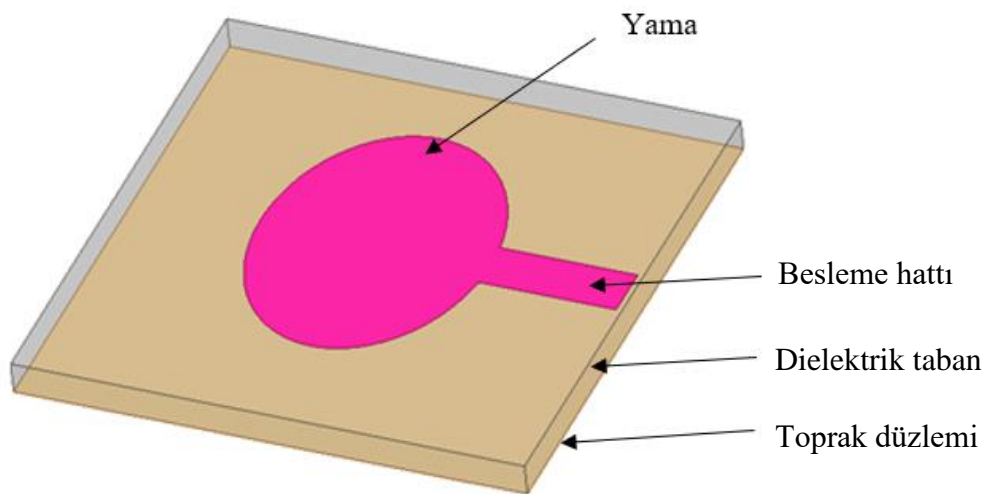
Tablo 3.1' de besleme tekniklerinin karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 3.1. Mikroşerit antenlerin farklı besleme tekniklerinin karşılaştırması (Kütük, 2012)

	Koaksiyel Besleme	Yakınlık Bağlaşımli Besleme	Açıklık Bağlaşımli Besleme	Mikroşerit Hat Besleme
Yapılandırma	Eşdüzlemsel değil	Düzlemsel	Düzlemsel	Düzlemsel
Sahte besleme ışıması	Fazla	Fazla	Fazla	Fazla
Kutuplama saflığı	Zayıf	Zayıf	Çok iyi	Zayıf
Üretim kolaylığı	Delme ve lehimlemeden dolayı zor	Hizalama yeterli	Zor	Hizalama yeterli
Dayanıklılık	Lehimlemeden dolayı zayıf	İyi	İyi	Çok iyi
Güvenilirlik	Zayıf	İyi	İyi	Çok iyi
Empedans uygunluğu	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Bant genişliği	$2 < BG < 5$	$BG < 13$	$BG < 21$	$2 < BG < 5$

3.2.2. Eliptik mikroşerit yama anten tasarımı

Temel olarak eliptik mikroşerit yama anten, yamanın bulunduğu ışıma yapan tabaka, orta kısmında yer alan dielektrik malzeme ve en altta bulunan toprak düzlemi olmak üzere üç katmandan meydana gelir. Genel bir eliptik mikroşerit yama antenin yapıları sırasıyla Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

**Şekil 3.8** Eliptik Mikroşerit Anten

Mikroşerit antenin tek yönlü ışımaya yapmasını sağlamak amacıyla altta bulunan toprak tabakasını bir iletken meydana getirmektedir. Orta tabaka genellikle manyetik olmayan ($\mu_r = 1$), dielektrik malzemedir oluşup bağıl dielektrik sabiti 12'den küçük olarak tercih edilir. Dielektrik tabanın kalınlığı (yüksekliği) ve bağıl dielektrik sabiti, bant genişliği ve ışınım değerleri gibi anten parametrelerini doğrudan etkiler. Yamanın bulunduğu üst tabaka genelde altın, gümüş ya da bakır gibi iyi iletkenlerden yapılmaktadır. Toprak düzleminin ve yamanın meydana getirildiği iletken kısımların kalınlığı genellikle 0.035 mm ile 0.070 mm arasında değişmektedir.

Antenin boyutu verildiğinde rezonans frekansının hesaplanması işlemine analiz işlemi, tersi, yani antenin boyutlarının verilen rezonans frekansından hesaplanmasına sentez işlemi denir (Joson ve ark., 2012).

Eliptik yamayı analiz etmek için Varyasyon yöntemi, Hammerstad formülü, Mathieu'nun ve değiştirilmiş Mathieu'nun işlevi gibi farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Pentagon yöntemi, Corner fed rectangle yöntemi, Variations yöntemleri gibi çeşitli yöntemler dairesel kutuplama elde etmek olmuştur. Shen ve daha sonra Yu, eliptik yama anteninden ana ekseninden 45° bir hat boyunca beslenerek dairesel kutuplama üretilebileceğini göstermiştir (Mythili ve Das, 1998).

Eliptik yamanın kenarındaki saçak alanının ve dielektrik tabanın etkileri hesaplamada (Shen, 1981) tarafından dikkate alınır.

Aggarwal ve Vakule tarafından verilen aşağıdaki denklemler, rezonans frekanslarını bulmak ve eliptik yama antenini analiz etmek için kullanılır (Agrawal ve ark., 2011).

$$a_{\text{eff}} = a \left[1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r a} \left\{ \ln \left(\frac{a}{2h} \right) + 1.41 \epsilon_r + 1.77 + \frac{h}{a} 0.268 \epsilon_r + 1.65 \right\} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (3.10)$$

$$f_{11}^{e,0} = \frac{15}{\pi e a_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{q_{11}^{e,0}}{\epsilon_r}} \quad (3.11)$$

$$q_{11}^e = -0.0049e + 3.7888e^2 - 0.7278e^3 + 2.314e^4 \quad (3.12)$$

$$q_{11}^o = -0.0063e + 3.8316e^2 - 0.1351e^3 + 5.2229e^4 \quad (3.13)$$

- a Yarı büyük eksen,
 h Dielektrik tabanın yüksekliği,
 ϵ_r Dielektrik tabanın izinliliği,
 a_{eff} Etkili yarı ana eksen,
 e Eliptik yamanın eksantrikliği,
 $f_{11}^{e,o}$ Çift Rezonans frekansı,
 $q_{11}^{e,o}$ Baskın olanın yaklaşık Mathieu işlevi TM_{11} mod.

Sentez denklemleri, yani yarı ana eksen uzunluğu “ a ” bulmak için denklemler literatürde mevcut değildir(Agrawal ve ark., 2011). Yukarıda belirtilen analiz denklemleri 3.11-13 “ a ” bulmak için yeniden düzenlenirse, aşağıdaki denklem elde edilir;

$$a = \frac{\left[a_{eff}^2 - \frac{2.82h}{\pi} - \frac{3.54h}{\pi\epsilon_r} - \frac{2h \ln\left(\frac{a}{2h}\right)}{\pi\epsilon_r} \right]}{1 + \frac{0.536h^2}{\pi} + \frac{3.3h^2}{\pi\epsilon_r}} \quad (3.13)$$

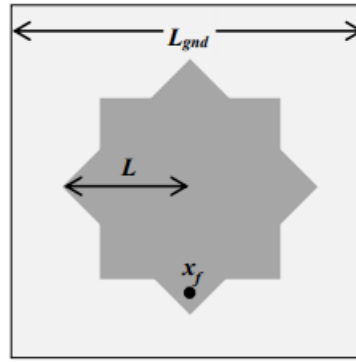
Yukarıda elde edilen 3.13 numaralı denklemde logaritmik terimin “ a ” içinde çözülmesini gerektiren tipik bir denklemdir. Böyle bir denklemi çözmek için geleneksel bir yöntem mevcut değildir(Agrawal ve ark., 2011).

3.2.3. Selçuklu Yıldızı mikroşerit yama anten tasarımı

Selçuklu Yıldızı Mikroşerit Yama Anten (SYMŞA), mikroşerit antenlerin bant genişliğini artırmak amacıyla son yıllarda literatürde performansı değerlendirilen bir anten çeşididir. Selçuklu yıldızı, eşit boyutlu iki karenin birbirine 45° derece farkla yerleştirilip 8 köşeli yıldız oluşturularak kolayca elde edilebilmektedir.

Geleneksel ve literatürde mevcut olan mikroşerit yama anten şekilleri ile Selçuklu Yıldızı olarak isimlendirilen geometrik şekle sahip bir mikroşerit yama anten tasarımı bant genişliği ve diğer anten parametreleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir(Uzer, 2012),(Uzer, 2016).

Selçuklu Yıldızı mikroşerit anten için tasarım parametrelerini belirlemek adına bir tasarım formülü elde edilememiştir. Basit yapısı ve kolay üretimi ile rahatlıkla geniş bant uygulamalarında yer alacak olan bu yeni yama anten şekli, kendine has formüller yardımıyla tasarlandığı frekansta yüksek bant genişliğiyle beraber çalışabilecek hale getirilecektir. Şekil 3.9’ da SYMŞA yama geometrisi verilmiştir. (Uzer ve ark., 2016).



Şekil 3.9 Selçuklu Yıldızı Mikroşerit Yama Anten(Uzer ve ark., 2016)

3.3. Mikroşerit Antenlerde Kazanç Arttırma Yöntemleri

Mikroşerit antenler, özellikle düşük profilli, düşük maliyetli, hafif ve kolay üretilebilirlik açısından avantajlı özelliklerinden dolayı çok çeşitli askeri ve ticari uygulamalarda yaygın olarak yer almaktadır. Bununla birlikte, mikroşerit antenlerle ilişkili iki önemli dezavantaj vardır. Bunlar, düşük kazanç ve dar bant genişliğidir. Literatürde çoğu çalışma bant genişliğini iyileştirmek için yapılmıştır, ancak anten kazancını artırmada bu kadar fazla çalışma mevcut değildir. Bir yama anteninin kazancını artırmak için kullanılacak birkaç yöntem vardır(Mandal ve Sarkar, 2013b).

Bazı kazanç arttırma yöntemlerine örnek olarak, modifiye edilmiş toprak düzlemi ile kazanç arttırma, rezonans kazanç yöntemi; yani alt tabakanın üzerine bir süper tabaka veya kapak katmanı eklenmesi ile kazanç arttırma gibi yöntemler olabilir. Bunlara ilave olarak, yama altında bir hava boşluğu kullanarak kazanç arttırılabilir (Park ve ark., 2010). Bir yama anteninin kazancı, parazitik bir eleman veya

azaltılmış bir yüzey dalgası anteni(Llombart ve ark., 2005), boşluk destekli yuva anteni kullanılarak da artırılabilir(Q. Li ve Shen, 2002). Bu yöntemlerin bazıları anten yüksekliğini aynı anda arttırabilir. Anten performansını arttırmak için elektromanyetik bant boşluğu (EBG) yapısı da kullanılabilir. Elektromanyetik kristal dielektrik gibi yüksek maliyetli dielektrik kullanımının da kazancı arttırdığı söylenmektedir (Boutayeb ve Denidni, 2007). Dielektriğin ve oluklu yer düzleminin çıkarılması gibi farklı tasarım teknikleri de rapor edilmiştir.(Yeap ve Chen, 2010) ancak çoğu yaklaşık 5-7 dBi kazanç sağlamaktadır. Kazanç arttırmak için kullanılan yöntemlerden metamalzeme üstü yüklü bir mikro şerit yama anten dizisi de önerilmiştir. Önerilen kompozit yapı, geleneksel yama anten dizisinin kazancını arttırmış ve ek maliyeti olmadan bant genişliğini de aynı şekilde arttırmıştır(Arora ve ark., 2016). Mikroşerit yama antenin karakteristik performansını geliştirmek, kazancını arttırmak için birden çok süper tabaka üsttaş kullanımı da önerilmiştir(Hussain ve ark., 2020). Bazı uygulamalarda da, kazancın artırılması ve huzme genişliğinin istenilen yöne doğru yoğunlaştırılması amacıyla birden fazla antenin geometrik olarak yerleştirilmesiyle oluşturulan dizi antenler kullanılmıştır. (Pozar ve Schaubert, 1995).

Kazanç arttırma için tasarlanan modifiye edilmiş toprak düzlemi, mikroşerit yama antenlerde boyut küçültme, çok frekanslı çalışma ve bant genişliği geliştirme gibi üç önemli yönü barındırır(Das ve ark., 2014). Bunlarla birlikte bu alanda ne kadar az çalışma olsa da bu yöntem kazanç artırma yöntemlerinden biri olarak kullanılmaktadır(Mandal ve Sarkar, 2013a).

3.3.1. Mikroşerit dizi antenler

Bir anten dizisi iki veya daha fazla anten geometrisinden oluşmaktadır. Antenlerden gelen sinyaller, tek bir antenden daha yüksek performans elde etmek için birleştirilmez. Anten dizisi şu amaçlar doğrultusunda kullanılabilir;

- Genel kazancı arttırmak
- Çeşitlilik alımı sağlamak
- Belirli bir yön grubundan istenmeyen ışınımı yok etmek
- Belirli bir yöne en hassas olacak şekilde yönlendirme yapmak
- Gelen sinyallerin varış yönünü belirlemek

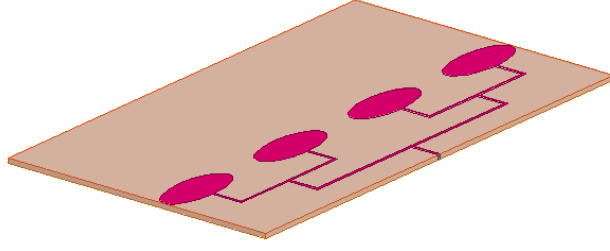
Birçok türde anten mevcuttur. Her anten çeşidinin kendine özgü özellikleri olmasına karşılık, bazı durumlarda tek başına bir anten beklenen performansı karşılayamaz. Genellikle tek bir antenin sağladığı kazanç düşüktür ve huzme genişliği tek bir yöne doğru yoğunlaşır. Bazı uygulamalarda, yüksek kazanç ve istenilen yöne doğru yoğunlaştırılmış huzme genişliği istenir. Bu durumda birden çok antenin geometrik olarak yerleştirilmesiyle oluşturulan anten dizilerine başvurulur. Herhangi bir anten çeşidi seçilerek anten dizileri oluşturulabilir. Anten dizisindeki her bir eleman farklı yapıda, geometride seçilebilir, fakat dizinin toplam alanını ve örüntüsünü rahat hesap etmek için genelde aynı elemanlar tercih edilir. Dizi antende en çok kullanılan anten türleri, birden fazla antenin geometrik olarak üretimini ve tasarımını kolaylaştıran mikroselit antenler olmuştur (Pozar ve Schaubert, 1995).

Dizi antenlerde her bir antenden ışıyan alanların vektörel olarak toplanmasıyla elektrik ve manyetik alanları elde edilir. İstenen yöne doğru bir ışıma deseni oluşturabilmek için, her bir diziden ışıyan alanın istenilen doğrultuda birbirine eklenmesi, istenmeyen doğrultularda ise birbirini yok etmesi sağlanmalıdır.

Dizi antenlerde, dizinin toplam ışıma desenini şekillendirmede başvuru alan kontrol elemanları;

- Anten dizisinin geometrik olarak yerleşimi
- Her bir elemanın ışıma örüntüsü
- Her bir elemanın uyarım genliği
- Dizi elemanları arasındaki mesafe
- Her bir elemanın uyarım fazı

Bir dizideki antenlerin sayısı en az 2 olacak şekilde binlerce de olabilir. Genel olarak, bir anten dizisinin performansı dizideki eleman sayısı ile artar; fakat, artan maliyet, boyut ve karmaşıklık gibi dezavantajları da mevcuttur. Şekil 3.10' da bir anten dizisi verilmiştir.

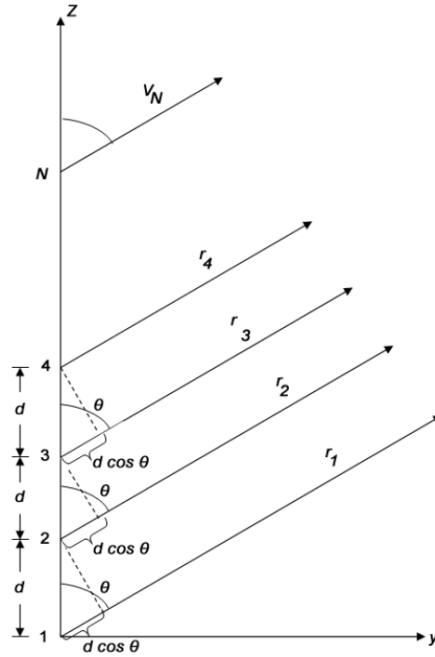


Şekil 3.10 Mikroşerit Anten Dizisi

Bir anten dizisinin ağırlıklarını ve geometrisini doğru seçerek, aşamalı dizi, istenmeyen yönlerden enerjiyi iptal etmek ve diğer yönlerden en hassas şekilde enerji almak için tasarlanabilir.

3.3.1.1. N elemanlı doğrusal anten dizisi

N elemanlı doğrusal anten dizisi, N tane elemanın tek bir doğrultuda yerleştirilmesi ile oluşturulur. Şekil 3.11’ de verilmiştir.



Şekil 3.11 Doğrusal Anten Dizisi (Balanis, 2015)

Doğrusal anten dizisinde bütün elemanın özdeş olduğunu ve uyarım akımı faz farklarının bir yanındakine göre β kadar farkının olduğu düşünülürse, dizi çarpanı (AF), 3.14 ve 3.15 eşitliklerinde olduğu gibi ifade edilir:

$$E_T = a_1 e^{j(\frac{1}{2})kdcos\theta} + a_1 e^{j(\frac{3}{2})kdcos\theta} + \dots + a_N e^{j(\frac{2N-1}{2})kdcos\theta} \quad (3.14)$$

$$E_T = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(\frac{2n-1}{2})kdcos\theta} \quad (3.15)$$

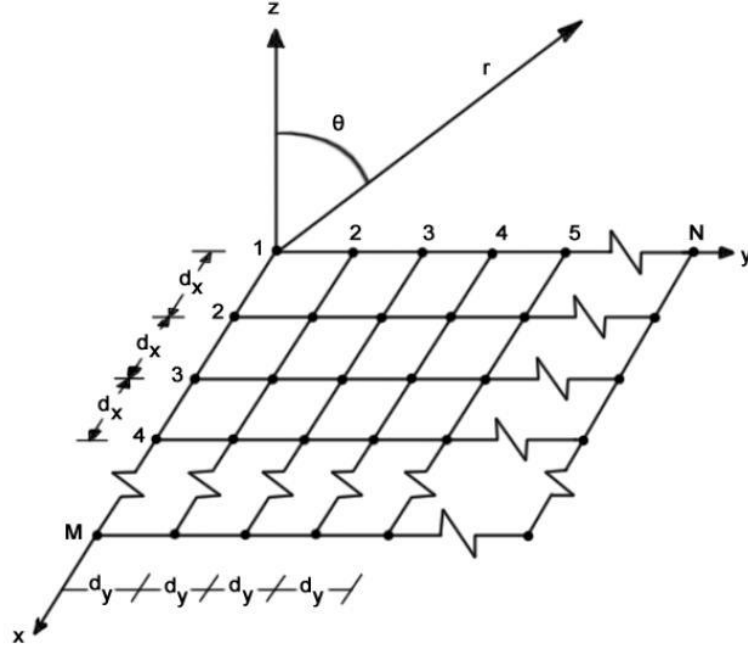
$kd \cos\theta + \beta = \psi$ olarak yerine koyulursa;

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (3.16)$$

şeklinde yazılır. Özdeş elemanlardan oluşan bir dizi için toplam dizi faktörü eksponansiyel çarpanların toplamı olacaktır. Bu durumda dizi çarpanı, her bir elemanın birim genliğinin ve bir önceki elemana göre artan ψ faz değerini ifade eden N fazörünün toplamı olarak düşünülebilir.

3.3.1.2. Düzlemsel anten dizisi

Bir hat boyunca yerleştirilmiş elemanlara (doğrusal bir dizi oluşturmak için) ek olarak, Şekil 3.12' de görüleceği gibi ayrı ayrı ışıyıcıların bir dikdörtgen veya düzlem dizi oluşturacak şekilde bir dikdörtgen ızgara boyunca konumlandırılmasıyla oluşur. Düzlemsel diziler dizinin örüntüsünü şekillendirmede ve kontrolünde kullanılabilen ek değişkenler sağlar. Düzlemsel diziler çok amaçlı olup daha düşük yan kulaklarla daha simetrik örüntüler sağlayabilir. Uygulamaları izleme radarı, arama radarı, uzaktan algılama, haberleşme ve diğer birçok alanı kapsamaktadır.



Şekil 3.12 Düzlemsel Anten Dizisi (Balanis, 2015)

Düzlemsel antenlerin dizi çarpanını elde etmek için, anten dizisinin N adet anten elemanından meydana gelen M adet doğrusal anten dizisinin yan yana getirilmesi ile oluşturduğu düşünülebilir. Doğrusal anten dizisi için denklem 3.17 ile verilen dizi faktörü (AF) ifadesi kullanıldığında;

$$AF = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \quad (3.17)$$

elde edilmektedir.

I_{m1} : Her bir doğrusal dizi için uyarım akımı,

d_x : diziler arası mesafe,

β_x : bir önceki dizi elemanına göre faz farkı, ifadeleri ele alındığında, tüm düzlemsel yüzey için dizi faktörü:

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y)} \quad (3.18)$$

olur (Balanis, 2005).

3.3.2. Yarıklı yama antenler

TM₁₀₀ modunda üretilen rezonans frekansı, yamanın boyutuna bağlıdır. Yüksek permitiviteye sahip bir taban dalga yayılım hızını değiştirerek yamanın elektriksel görünümünü daha büyük hale getiriyorsa, yama boyutunu ayarlamanın diğer bir yolu da yamaya yarıklar açmaktır. Yarık açılan yama da akımın izleyeceği yol uzayacaktır ve rezonans uzunluğu artar. Bu durum rezonans frekansında belli bir küçülmeye sebep olur. Yarıklar akım yolunu değiştirdiğinde herhangi farklı yerlere konumlandırılabilir. Açılan yarıklarda dikkat edilmesi gereken konu, istenilen kutuplama biçimidir. Çapraz olarak yerleştirilen yarıklar, çapraz kutuplamaya sebep olacaktır. Artan çapraz kutuplama, aksel oranda dairesel kutuplamanın zayıflamasına sebep olur.

Yüzey akımının izleyeceği yolun artması, yamanın iki kenarı arasına seri yerleştirilen bir indüktörle benzer etkiler meydana getirerek yamanın rezonans frekansının düşmesine yol çar. Performans üzerinde en büyük etkinin elde edilebilmesi için yarıkların yama yüzeyindeki yüksek akım bölgesine yerleştirilebilir. Yama üzerinde açılan yarıkların şeklinin bant genişliği üzerinde etkisi yoktur. Bazı yama geometrileri beslemenin onumlandırmasında avantaj sağlamaktadır. Frekansı daha fazla düşürmek gerektiğinde yama üzerine birden fazla yarıklar açılabilir(Holland, 2008).

Yama yüzeyine yarık açmak yerine sınırlarda çentik açılarak genişband uygulamaları elde edilebilir. Birden fazla rezonans modunun uyarımı ile çentik ilave edilen yamalarda bant genişliği artmaktadır. Besleme hattı etrafında çentiklerin olması bir kapasitans gibi davranarak empedans uyumunda rol oynar. Antenin performansı bu çentiklerin uzunluğu ve genişliğine bağlı olarak değişir.

3.4. Mikroşerit Anten Üretim Teknikleri

Antenlerde üretim tekniği antenin verimliliği için oldukça önemli bir etkidir. Birden fazla anten üretim tekniği vardır ve buna yenileri de eklenebilir. Aynı fiziksel yapıya sahip bir anten için bile bu teknikler değişikçe anten verileri değişebilmektedir. Bu durum antenin elle üretim aşamaları üzerinden açıklanacaktır. Antende dielektrik malzeme olarak FR-4 kullanıldığını varsayılsa ilk olarak bu alt tabakayı istenilen boyutlara getirmek için elle kesilmekte ve aynı ölçülerin elde edilmesi kolay olmayacağı için hassas bir şekilde zımparalanmaktadır, iki yüzü bakır ve arasında dielektrik olarak FR-4 olan bu malzemenin üzerine ütü ile baskı devre yapılmakta daha

sonra yama yüzeyi ve diğer taraftaki tüm bakır yüzeyi kaplanarak (ör: oje, lazer baskı mürekkebi, asetat kalemi, PVC yapışkanlı folyo, vb.) asit çözeltisi içerisinde atılmaktadır. Çözünmesi istenen kısımlar çözüldükten sonra çözeltilerden çıkarılıp su ile temizlenmektedir. Son adım ise konnektörün lehimlenmesidir. Yani anlaşılacağı üzere eğer bir mikroşerit anteni elle üretmek istersek zahmetli birçok adım mevcuttur ve antenden beklenen verim bu adımların her birine ayrı ayrı bağlıdır. Bir mikroşerit antenin kalitesi bu adımlardan her birinde kullanılan teknik, malzeme, el yatkınlığı; eğer elde üretilmemişse yine aynı şekilde üretiminde nasıl bir yol izlendiği, kullanılan cihaz gibi etkenlere bağlıdır.

PCB cihazı kullanılarak anten üretiminde ise en önemli etken kazıma başlığının ne kadar hassaslıkla bakır düzlemini kazıdığı olacaktır. Yine aynı şekilde dielektrik malzeme olarak FR-4 kullanıldığında varsayılırsa baskı devre cihazı kazıma yaparken FR-4'ün bir kısmını da bakırla birlikte kazır, bu da anten verilerini az da olsa değiştirmektedir.

Bunlara ek olarak 3 Boyutlu Yazıcı (P. Mahouti, 2019), Mürekkep Püskürtme (Al-Naiemy ve ark., 2012), Serigrafi Baskı , Kimyasal aşındırma, Fleksografi(Khaleel ve ark., 2013), Lazer İşleme Esnek Bakır Bant(Masihi ve ark., 2019) ve CNC makinaların kullanımı ile de anten üretimi yapılmaktadır.

3.5. ANSYS Yüksek Frekans Yapı Simülasyonu (HFSS)

HFSS yazılımı, endüstriyel standartlarda kullanılan ve elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemi ile çözen 3 boyutlu yüksek frekanslı bir tam dalga elektromanyetik alan simülatörüdür. HFSS, yüksek hızlı ve yüksek frekanslı tasarımlar için kullanılmaktadır. Modellemeyi, simülasyonu, 3 boyutlu elektromanyetik problemleri çözümlenmeyi sağlayan otomasyonu bütünleştirmektedir. Gömülü sistemler, PCB kart modellemesi, Silikon/ GaAs (spiral indiktörler, transformatörler), Paket modellemesi, EMC/EMI, antenler ve mobil haberleşme gibi yüksek frekans bileşenleri, mikrodalga bileşenleri, biyomedikal cihaz uygulamaları gibi birçok yerde kullanılmaktadır. Güven verici derecede net ve doğru sonuçlar vermektedir. HFSS ile uzak-yakın elektromanyetik alanlar görsel hale getirebilir, matris bileşenlerini ayrılabilir ve devre simülasyonlarıyla ilişkili tam dalga modelleri oluşturulabilir.

HFSS, tasarımda verimliliği artırmakla birlikte tasarım süresinin minimuma indirilmesinde fazlaca rol sunar. Bununla birlikte iyi bir tasarım başarısı sağlamayı

garanti eder ve her yeni sürümü ile kullanıcılara büyük oranda verimlilik sağlamayı hedefler. HFSS, simülasyon sırasında iletim yol kayıpları, empedans uyumsuzluğu gibi sebeplerle oluşan yansıma kayıpları ve ışıma durumlarını hassas bir şekilde değerlendirir (Çetme, 2009).

HFSS, basit bir monopolden, karmaşık dizilerin dizaynına ve radar tertibatlarına kadar geniş bir yelpazede çokça antenin tasarlanması, optimizasyonu ve performans görüntülemesinde çokça kullanılan bir yazılımdır. Antenlerin ışıma desenleri, demet genişliği, uzak-yakın alan istatistikleri, S-parametreleri, VSWR, Smith abağı gösterimleri, dâhili alanları ve daha fazlasını içeren elektriksel performansları doğru bir şekilde tahmin eder ve optimize edilebilir.

HFSS' in temel özellikleri;

Çözüm verileri:

- S parametreleri
- Uzak alan hesaplamaları
- Giriş modu hesaplaması
- Empedans hesaplaması
- Mod dönüştürümü
- Malzeme ve ışıma kayıpları

Sahip olduğu çizdirme tipleri:

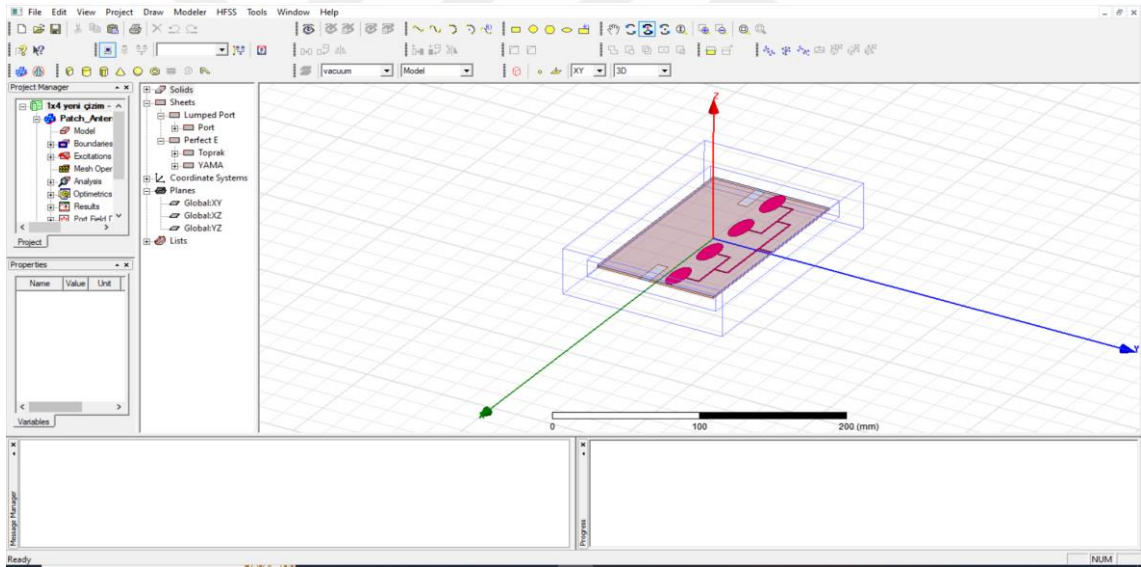
- S, Y, Z parametre matrisi, 2 boyutlu çizimleri
- Dikdörtgensel çizim
- 3 boyutlu dikdörtgensel çizim
- Kutupsal çizim
- 3 boyutlu kutupsal çizim
- Smith abağı
- Port yüzey giriş empedansı
- Farksal S parametresi
- Veri tablosu
- Her yüzey için 3 boyutlu statik ve dinamik alan çizimleri (akım, elektrik ve manyetik alan, ışıma deseni, vektör gösterimi, büyüklük gösterimi)

Optimizasyon ve parametrik çözümler:

- Geometri ve malzeme parametrik tarama sonuçlar için N boyutlu veri çizimleri
- Optimizasyon, hassasiyet ve istatistiksel analizi
- Sınır problemleri, ısıyan yakın ve uzak alanlar için temel elektromagnetik alan belirleyicilerinin çizimi
- Karakteristik port empedansı çizimi
- Yayılma sabitlerinin çizimi
- Genelleştirilmiş S-parametrelerinin çizimi
- Belirli port empedansları için normalize edilmiş S-parametrelerinin çizimi

HFSS gerekli alan çözümleri ile bağlantılı port karakteristiklerini ve S-parametrelerini üretir.

Şekil 3.13'te ANSYS HFSS kullanıcı ara yüzü gösterilmiştir



Şekil 3.13 ANSYS HFSS kullanıcı ara yüzü

ANSYS HFSS elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ederek çözüm sunmaktadır. ANSYS HFSS elektromanyetik problemlerin yaklaşık olarak çözülmesinde sonlu elemanlar methodu (Finite Element Method, FEM) ile analiz yapmaktadır.

Bu yöntemin genel olarak avantajları şu şekildedir;

- Karmaşık elektromanyetik yüzeylerde klasik yöntemlere göre daha seri ve daha güvenilir sonuç sunmaktadır.
- Sınır şartlarının kolay belirlenmesi sayesinde tasarımlarda optimum sonuçlara ulaşarak malzeme seçimi yapılması işlemini kolaylaştırmaktadır.
- Tasarım ve analiz sürecini kısaltarak zaman tasarrufu sağlamaktadır. Ancak güvenilirlik seviyesi yüksek olsa da yaklaşık sonuçlar vermesi FEM için dezavantajlar arasında sayılabilmektedir.
- Anteni üretmeden sonuçlarına ulaşabiliyor olmak maliyet açısından da büyük avantaj sunmaktadır.



4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada gerçekleştirilecek tasarımlarda odak noktası mikroşerit anten kazancını arttırmak için; Eliptik ve Selçuklu Yıldızı geometrilerine sahip mikroşerit anten tasarımları olmuştur. EMŞA (Eliptik Mikroşerit Anten)'e SY (Selçuklu Yıldızı) şeklinde yarık açılması, eliptik yama antenin çoklu dizi haline getirilmesi, karşılıklı dikdörtgen şekilli yarıklar açılarak toprak düzleminin modifiye edilmesi; SYMŞA üzerine farklı dielektrik üsttaşlar eklenmesi gibi yöntemlerin kazanç üzerine etkisi araştırılmıştır. Bununla birlikte mikroşerit anten üretim tekniklerinin anten performansı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Antenleri besleme yöntemi olarak mikroşerit hat besleme tekniği seçilmiştir. Bu tasarımlar HFSS programı aracılığıyla simüle edilmiştir. En yüksek kazanç elde edilen EMŞA parametreleri belirlenerek farklı tekniklerle üretilmiştir ve bu antenlerin ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Farklı dielektrik üsttaş malzemeleri kullanılan SYMŞA ve SY Yarıklı EMŞA da simülasyon ile en yakın sonucu veren üretim tekniğiyle üretilmiştir ve ölçüm ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.1. Mikroşerit Yama Anten Temel Parametreleri

Tezde tasarımları gerçekleştirilen ve üretilen mikroşerit antenlerde; çalışma frekansı, dielektrik sabiti ve dielektrik tabakanın yüksekliği belirlenmesi gereken temel parametrelerdir.

4.1.1. Çalışma frekansı

Antenin kullanılacağı standardın yer aldığı frekans bandının merkezi, antenin çalışma frekansını belirlemektedir. Bir başka söylemle, çalışma frekansı antenin rezonansa gelmesi istenilen frekanstır. Antenin merkez frekansı baz alınarak antenin, entegre edileceği sistemin gereksinim duyduğu frekans bandını kapsayacak bant genişliğini sağlaması ve yeterince verimle ışıma yapması amaçlanmıştır. Bu tezde kullanılan antenlerin çalışma frekansı, belli bir frekansın üzerinde üretim tekniklerinin karşılaştırılmasındaki milimetre mertebesindeki üretim hataları bile sonuçları etkileyebildiği için 5.8 GHz olarak belirlenmiştir.

4.1.2. Dielektrik sabiti

Seçilecek dielektrik malzemenin dielektrik sabiti sistem performansında oldukça etkilidir. Mikroşerit anten tasarımında seçilen dielektrik malzemelerin dielektrik sabitleri genellikle $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığındadır. Burada ϵ_r bağıl dielektrik sabitini temsil etmektedir. Antenin boyutları dielektrik sabitine göre belirlenmektedir, dolayısıyla EMŞA ve SYMŞA'nın boyutları da malzemeye göre belirlenecektir. Yüksek dielektrik sabiti seçimi, antenin boyutlarını küçültür. Fakat boyutları arttırma pahasına, düşük dielektrik sabitine sahip dielektrik malzemeler ile yapılan tasarımlarda daha yüksek verim ve bant genişliği elde edilmektedir (Balanis, 2015). Bu yüzden anten imalatına özel üretilmiş profesyonel dielektrik tabakalar kullanabilmek çok önemlidir. İç piyasadaki dielektrik malzemeler, bazı projeler için yetersiz kalmaktadır. Yüksek kaliteli dielektrik malzemeler genellikle yurtdışı menşeli şirketler tarafından üretilir, geliştirilir ve dağıtılır. Bu nedenle, dielektrik malzeme temininde Türkiye ve diğer gelişmekte olan ülkeler ithalata bağımlı kalmaktadır. Döviz kurlarındaki beklenmedik dalgalanmalar, ekonomik kriz ve beklenmedik COVID-19 pandemisi sebebiyle dielektrik malzemenin temin edilmesi öncekinden daha zorlu hale gelmiştir (Oğuz, 2020). Bu sebeplerden dolayı farklı üretim tekniklerinin karşılaştırılmasının gerçekleştiği bölümde çok sayıda anten üretileceği için dielektrik malzeme olarak bölüm laboratuvarında mevcut olan orta sınıf kalitede bir FR-4 malzemesi kullanılmıştır, diğer tasarımlarda ise RT/Duroid 5880 ve 5880 LZ kullanılmıştır. Mevcut FR-4'e ait herhangi bir katalog bilgisi olmadığı için literatürde en yaygın değer olan 4.4 ile tasarımlara başlanmıştır. Sonrasında dielektrik sabiti iletim hattı dalga kılavuzu yöntemiyle ölçülmüş ve literatürden farklı olduğu görülmüştür. Kayıp tanjantı için literatürdeki 0.02 değeri kabul edilerek tasarımlar güncellenmiştir. Tüm frekanslar için aynı dielektrik yükseklik olan $h=1.6\text{mm}$ olarak alınmıştır. RT/Duroid 5880 LZ'nin değerleri ise $\epsilon_r=1.96$, $\tan\delta = 0.0009$ ve $h=4.75\text{mm}$ olarak alınmıştır.

4.2. Eliptik Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı

Bu bölümde dört aşamada anten tasarımı gerçekleştirilmiş ve tasarım sonuçlarına yer verilmiştir. Bunlar; yalın EMŞA, 1x2 EMŞA, 1x4 EMŞA ve MTD (Modifiye Edilmiş Toprak Düzlemlü) 1x4 EMŞA olmuştur. Eliptik yama geometrisinin tercih edilme sebebi literatürde birçok çalışmada eliptik yamanın daire ve dikdörtgen

yamaya göre parametrelerindeki esneklik ve frekans bant genişliğinin daha fazla olmasıdır (Hasan ve ark., 2020). Yalın mikroşerit antenin kazancını arttırmak için anten dizi haline getirilmiştir. Antenlerin performans ölçülerinden olan ışınma kazancı, antene gelen elektromanyetik sinyalleri ne kadar iyi topladığı veya girişine uygulanan elektriksel işaretleri nasıl bir yoğunlukla hangi yöne odakladığını belirten bir parametredir. Yüksek yönlendiricilik ihtiyacı duyulan uygulamalarda genel olarak bir yerine birden fazla anten yapısının bir arada kullanımı ile yapıya ait kazanç ve ışınma deseni performansları artırılabilir. Bu durum verici antenlerin her birinin ayrı ayrı uygulanan sinyallerin uzak alandaki iz düşümlerinin birbirlerinin üstüne gelmesi, alıcı antenlerde ise daha büyük bir yüzeye sahip olan dizi antenlerin üzerlerine daha fazla elektromanyetik alan gelmesinden dolayı iletilecek elektrik akım miktarının artması ile sağlanmaktadır. Bunun için en önemli parametreler; dizi anten yapısındaki antenlerin sayısı, her bir antenin bireysel olarak performansı, antenlerin dizilimidir (M. Mahouti, 2017). HFSS simülöründe antene ait yama yarıçapı, toprak düzlemi boyutları, besleme hattı boyutları, gömme besleme miktarı, vb. parametreler için sistematik taramalar yapılarak optimum sonucu veren anten parametreleri bulunmuştur. Son olarak antenin toprak düzlemine karşılıklı dikdörtgen yarıklar açılarak modifiye edilmiş toprak düzlemi yöntemi ile kazanç arttırılmıştır. Tasarlanan EMŞA'ların içinde en yüksek kazanç elde edilen anten bir sonraki bölümde farklı tekniklerle üretilerek ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

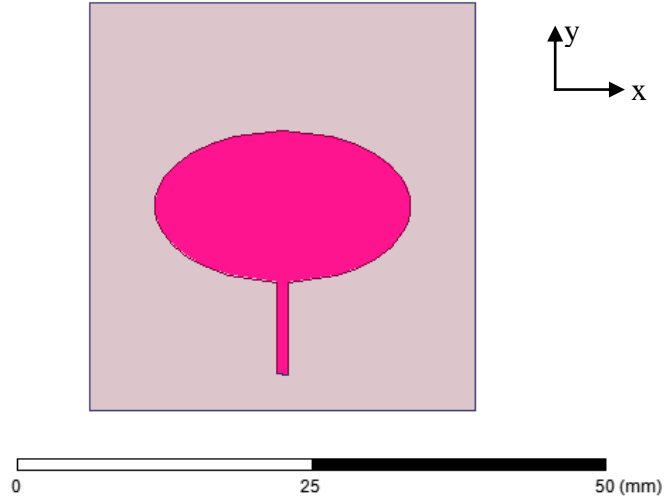
Mikrodalga devre parçalarının veya sistemlerinin oluşturulmasında empedans uyumunun sağlanması oldukça önemlidir. Bir hattın sonuna bağlanmış olan herhangi bir yükün empedans değeri hat empedansına uymazsa veya uç uca eklenen iki hattın empedansları birbirlerine uymazsa gelen enerjinin büyük bir kısmı yansır. İstenen enerjinin, yani bilginin, kayıpsız olarak iletilmesi için empedans uyumlandırma yapılmalıdır. Bir başka tabirle hatta bağlanan yükün veya ikinci hattın empedansının asıl hat empedansına eşit olması gerekir.

Empedans uyumlandırma devresi aşağıdaki nedenlerden dolayı önemlidir;

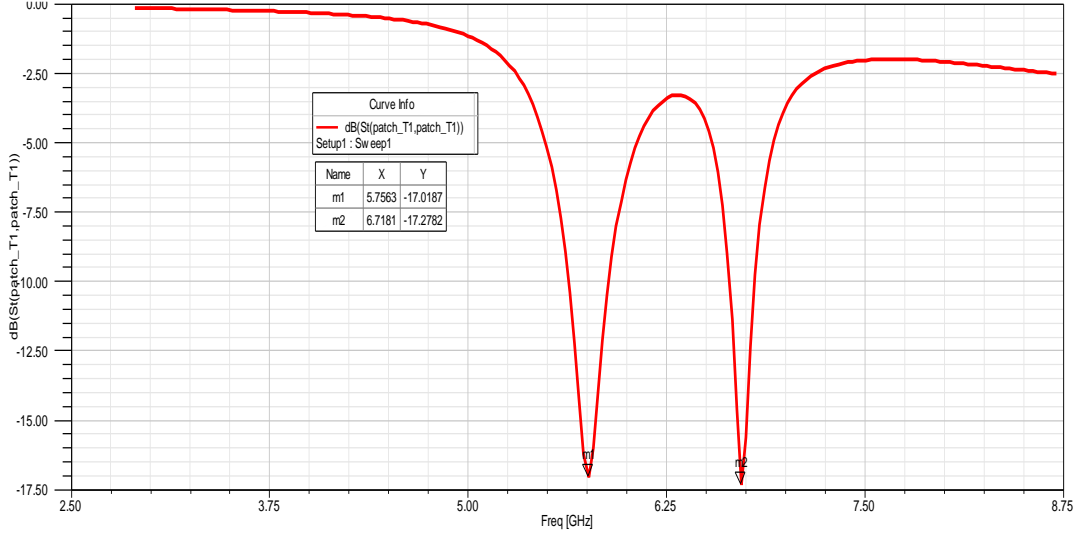
- Yük, hattın empedansına uyumlandırıldığında maksimum güç elde edilir. Bu durumda besleme hattındaki güç kaybı en aza indirilir.
- Empedans uyumu, anten benzeri alıcı devrelerinde sistemin işaret/gürültü oranını artırır.
- Dizi anten besleme devresi gibi güç bölücü devrelerinde empedans uyumu genliği ve faz hatalarını azaltır.

4.2.1. Yalın EMŞA tasarımı

Şekil 4.1’ de gösterildiği gibi yama tasarımında literatürdeki formüller kullanılarak eliptik bir mikroşerit anten tasarlanmıştır. Bu tasarım HFSS programı ile Bölüm 4.1.1 ve 4.1.2’ de verilen özellikler doğrultusunda 5.8 GHz frekansında dielektrik malzeme olarak FR-4 üzerine gerçekleştirilmiştir. Besleme yöntemi olarak ise mikroşerit hat besleme kullanılmıştır. Optimum sonuçların elde edilebilmesi için HFSS simülasyonunda taramalar gerçekleştirilmiştir. Taban boyutları 33.2mm x 35.0mm değerinde, yama boyutları 22mm x 13mm değerindedir. Frekansta 5.8 GHz’ i elde edebilmek için tabanın x-düzlemindeki boyutu 29mm-34mm arasında 0.2mm aralıklarla taranarak sonuçlar alınmıştır ve 33.2mm boyutu için 5.75 GHz frekansında rezonansa girmiştir. Antenin empedans değeri besleme hattı parametrelerine bağlıdır, bu yüzden besleme hattının genişliği 1mm-3mm arasında 0.2mm aralıklarla taranmıştır ve 1mm olarak alındığında 50 Ohm’a en yakın değer olarak 40 Ohm değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.1 EMŞA yalın tasarımı, HFSS görünümü

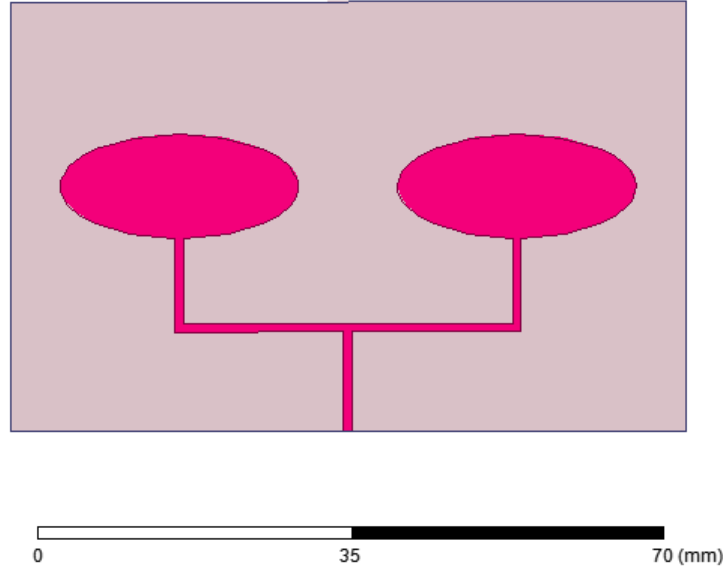


Şekil 4.2. EMŞA yalın tasarımı, S_{11} , HFSS sonucu

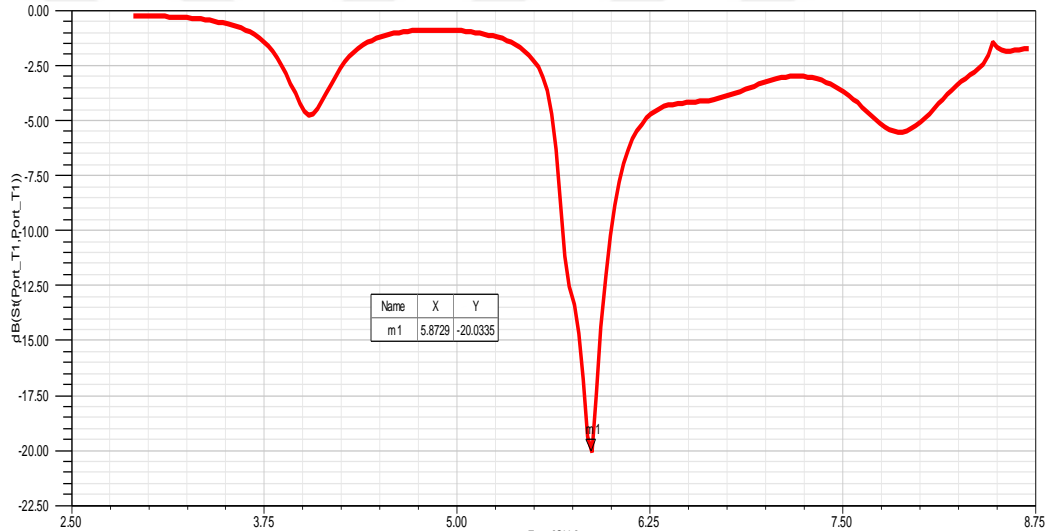
Antenin istenilen aralıkta çalışabilmesi için frekans aralığında geri dönüş kaybının (S_{11}), -10 dB'in altında olması gerekmektedir. Şekil 4.2' ye göre S_{11} değeri 5.75 GHz frekansında -17 dB, 6.71 GHz frekansında -17.27 dB olmak üzere anten iki farklı frekansta ışına yapmaktadır.

4.2.2. 1x2 dizi EMŞA tasarımı

Şekil 4.3 'te 1x2 dizi EMŞA anten geometrisi verilmiştir. Bu geometri HFSS programı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlardan en iyi sonuç veren boyutlar kullanılarak elde edilmiştir. Taban boyutları 76.5mm x 49mm değerinde, yama boyutları 27mm x 12mm değerindedir. Yama boyutu en iyi kazancı elde edebilmek için optimize edilmiştir. Yama sayısının ve boyutunun artmasından dolayı taban boyutları da artmıştır ve gerekli taramalarla optimum sonuç elde edilmiştir. Besleme hattının genişliği değişmemiş olup uzunluğu empedans uyumunu sağlamak için 7.9mm - 9.7mm arasında 0.2mm adımlarla taranmıştır ve 9.5mm' de 50 Ohm değerine en yakın olan 56.82 Ohm değeri elde edilmiştir. Mikroşerit antenlerde kazanç artırma yöntemlerinden biri olarak birden fazla eleman kullanarak antenin dizi haline getirilmesi tekniği kullanılmış olup sonuçlara yer verilmiştir.



Şekil 4.3 EMŞA 1x2 dizi tasarımı, HFSS görünümü



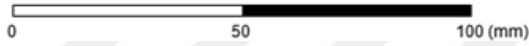
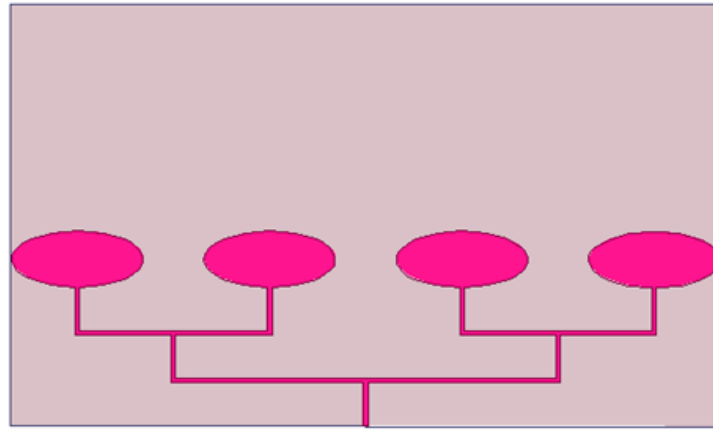
Şekil 4.4. EMŞA 1x2 dizi tasarımı, S_{11} , HFSS sonucu

Şekil 4.4'e göre S_{11} değeri 5.87 GHz frekansında -20.03 dB' dir.

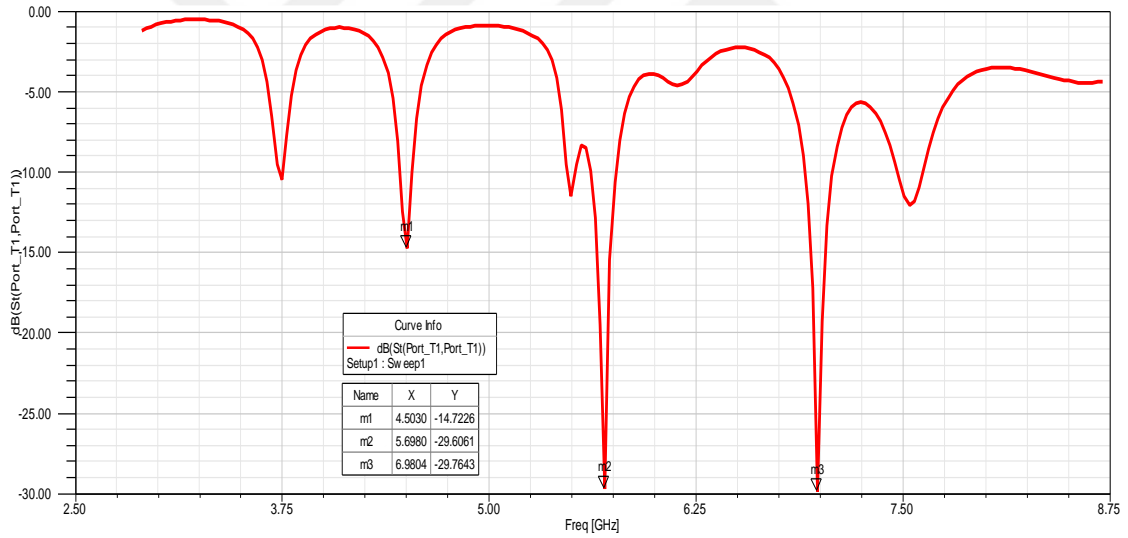
4.2.3. 1x4 dizi EMŞA tasarımı

1x2 dizi antenin ardından Şekil 4.5' te verilen 1x4 diziyeye geçiş yapılmıştır. Genel olarak, bir anten dizisinin performansı doğru tasarım yapılmış ise dizideki eleman sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Taban boyutları 157mm x 93mm değerinde, yama boyutları 27mm x 12mm değerindedir. Yama ve taban boyutları en iyi kazancı elde edebilmek için optimize edilmiştir. Besleme hattının uzunluğu değişmemiştir, dizi

elemanları arasındaki mesafe 14.1mm değerinde olup 0.55λ değerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.5 EMŞA 1x4 dizi tasarımı, HFSS görünümü

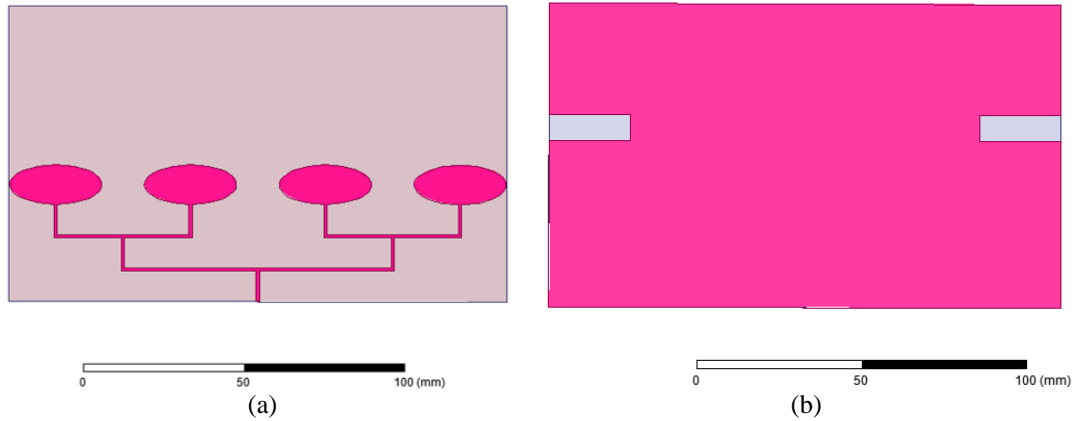


Şekil 4.6. EMŞA 1x4 dizi tasarımı, S_{11} , HFSS sonucu

Şekil 4.6'ya göre S_{11} değeri 4.50 GHz frekansında -14.72 dB, 5.69 GHz frekansında -29.60 dB, 6.98 GHz frekansında -29.76 dB' dir.

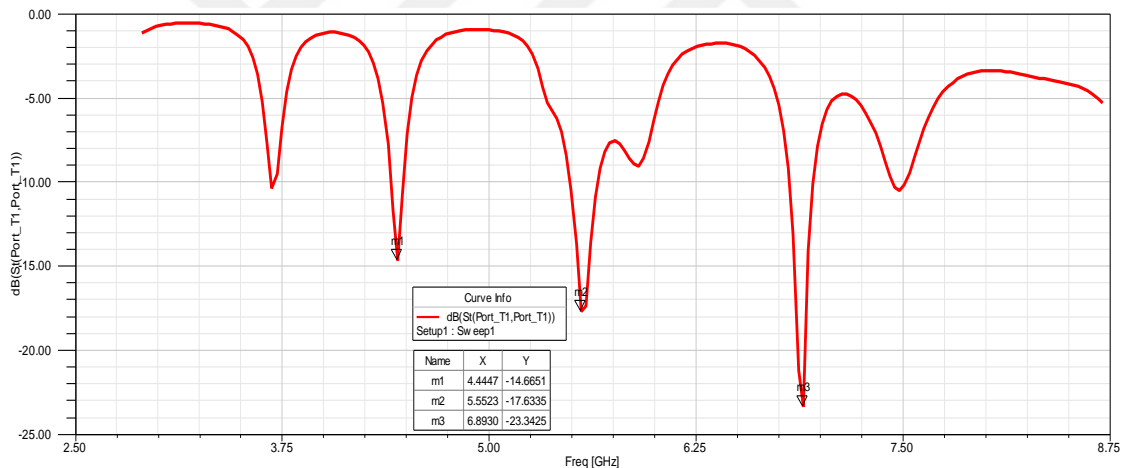
4.2.4. Modifiye edilmiş toprak düzlemlili 1x4 dizi EMŞA tasarımı

Modifiye edilmiş toprak düzlemi, mikroşerit yama antenlerde boyut küçültme, çok frekanslı çalışma aralığı ve bant genişliği geliştirme gibi üç önemli tasarım yönünü kapsamakla birlikte kazanç arttırmada da kullanılmaktadır (Mandal ve Sarkar, 2013a).



Şekil 4.7 MTD 1x4 dizi EMŞA tasarımı, HFSS görünümü, a) Ön yüzü, b) Arka yüzü

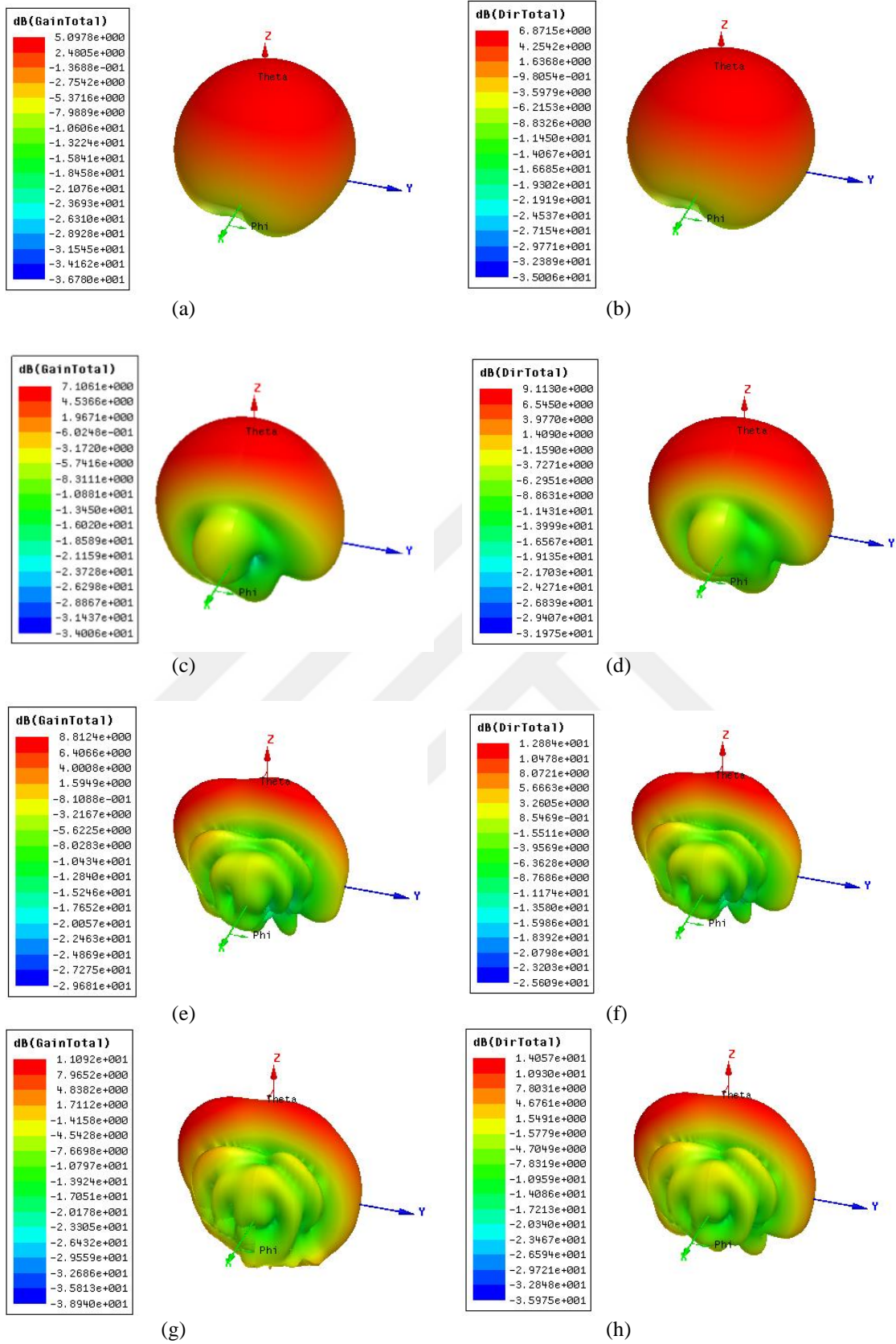
Şekil 4.7’ de verilen MTD 1x4 dizi EMŞA’ nın boyutları 1x4 dizi EMŞA ile aynı olup sadece toprak düzlemine parametrik taramalarla ile elde edilen 25mm x 8mm boyutlarında karşılıklı dikdörtgen yarıklar açılmıştır, bu yarıkların amacı kazancı arttırmaktır.



Şekil 4.8 MTD 1x4 dizi EMŞA, S_{11} , HFSS sonucu

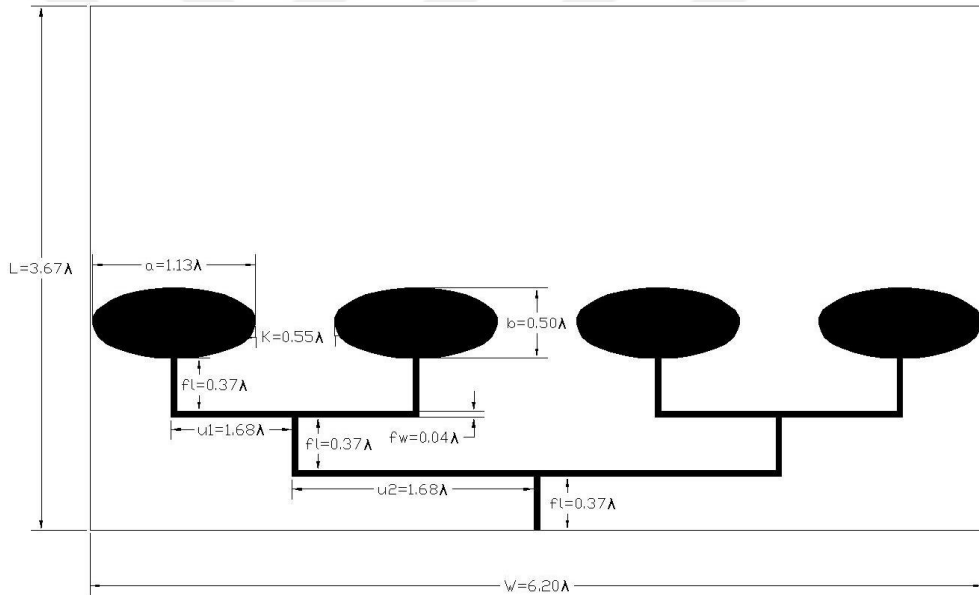
Şekil 4.8’e göre S_{11} değeri 4.44 GHz frekansında -14.66 dB, 5.55 GHz frekansında -17.63 dB, 6.83 GHz frekansında -23.34 dB’ dir.

Farklı yöntemlerle üretimi yapılmak üzere seçilen anten modifiye edilmiş toprak düzlemlili 1x4 dizi EMŞA olmuştur kazancı ve yönlülüğü oldukça artmış ve hedeflenen yüksek kazançlı anten elde edilmiştir. Ayrıca büyük boyutta ve birden fazla ışıma elemanına sahip, ince besleme hatlarını içeren bir anten tasarımının üretimde yalın ve küçük boyutlu bir antene göre ne gibi zorluklar göstereceği de bu sayede incelenmiş olacaktır.



Şekil 4.9 EMŞA'ların kazanç ve yönlülük grafikleri, HFSS sonucu,
a) Yalın EMŞA kazancı, b) Yalın EMŞA yönlülüğü, c) 1x2 EMŞA kazancı, d) 1x2 EMŞA yönlülüğü,
e) 1x4 EMŞA kazancı, f) 1x4 EMŞA yönlülüğü, g) 1x4 MTD EMŞA kazancı, h) 1x4 MTD EMŞA yönlülüğü

Anten kazancı, antenin ne oranda yönlü olduğunun bir göstergesidir. Antenin ortama yaydığı toplam güç anten etkin çıkış gücü olarak adlandırılır. Antenin yönlülüğü, antenin maksimum ışınım yaptığı yöndeki güç yoğunluğunun aynı güçteki bir izotropik antenin aynı uzaklıkta oluşturduğu güç yoğunluğuna oranına denir (Balanis, 2015). Şekil 4.9’da aşamalı olarak tasarımı gerçekleşen MTD 1x4 dizi EMŞA’ nın kazanç ve yönlülük grafikleri verilmiştir. HFSS simülöründe EMŞA yalın antenin kazancı 5.09 dB iken 1x2, 1x4 dizi tasarımı yapılarak sırasıyla 7.10 dB ve 8.81 dB’ e yükselmiştir. Son olarak toprak düzlemine karşılıklı dikdörtgen yarıklar açılarak kazanç 11.11 dB’ e, yönlülük 14.05 dB’ e yükseltilmiştir. Bölüm 4.5’ te farklı teknikler ile yüksek kazançlı 1x4 Modifiye Toprak Düzlemli EMŞA üretimi gerçekleşmiş ve Bölüm 4.8.1 ve Bölüm 4.8.4 arasında bu tekniklerin simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.10 EMŞA 1x4 dizi λ_g cinsinden tasarım ölçüleri, ön yüzü.

Şekil 4.10’ da üretilecek 1x4 EMŞA’ nın tasarım ölçüleri verilmiştir.

λ_g : Etkin dalga boyu

λ_0 : Boşluğun dalga boyu olmak üzere;

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (4.1)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\epsilon_{\text{reff}}} \quad (4.2)$$

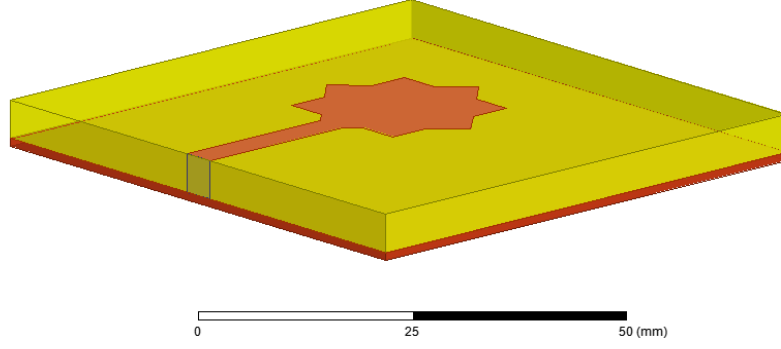
λ_g denklem 4.1 ve denklem 4.2' deki gibi ifade edilmektedir.

4.3. Selçuklu Yıldızı Mikroşerit Yama Anten Tasarımı ve İlave Üsttaş Kullanımı

Bu bölümde anten kazancını arttırmak için yama geometrisi olarak Selçuklu Yıldızı kullanılmış ve sonrasında antene farklı dielektrik üsttaşlar ilave edilerek kazançta olan etkisi incelenerek karşılaştırılmıştır. Dielektrik üsttaş ilavesi, rezonans frekansını ayarlamak ve antenin kazancını arttırmak için kullanılmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda bu tekniğin antende frekans ayarlama işlemi için basit ve etkili bir yöntem olduğu söylenmiştir (Sayem ve Esselle, 2021). Bu çalışmada birçok dielektrik malzeme farklı kalınlıkları ile üsttaş olarak kullanılmış ve anten performansı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Daha önce Uzer ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; tasarlanan Selçuklu Yıldızı yama antenin performansı, literatürdeki diğer iki popüler yama geometrisi olan kare ve dairesel mikroşerit antenlerin performanslarıyla karşılaştırılmış ve Selçuklu Yıldızı yamanın üstünlükleri ortaya koyulmuştur (Uzer, 2012), (Uzer, 2016). Bundan dolayı yama geometrisi olarak Selçuklu Yıldızı tercih edilmiştir.

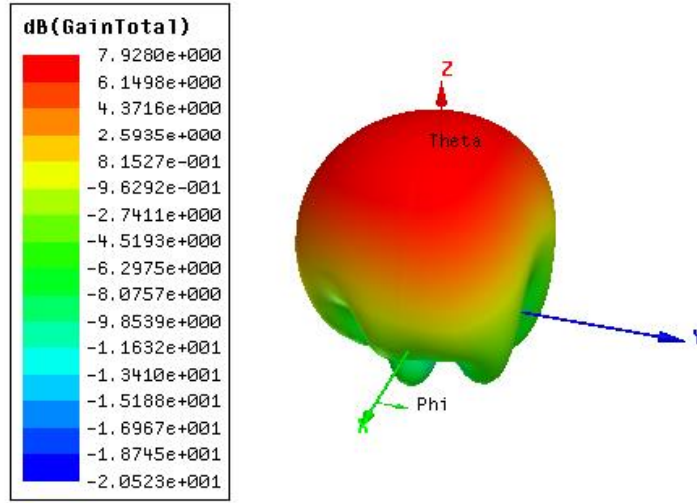
4.3.1. Yalın SYMŞA tasarımı

Şekil 4.11' de gösterildiği gibi yalın halde Selçuklu Yıldızı yama şekli kullanılarak bir anten tasarlanmıştır. Bu tasarım HFSS programı ile Bölüm 4.1.1 ve 4.1.2' de verilen özellikler doğrultusunda 5.8 GHz frekansında ve Rogers firmasına ait RT/Duroid 5880 LZ ($h=4.75\text{mm}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Besleme yöntemi olarak ise mikroşerit hat besleme tercih edilmiştir.



Şekil 4.11 Yalın SYMŞA tasarımı, HFSS görünümü

Şekil 4.11’ de verilen yalın SYMŞA tasarımında Selçuklu Yıldızı geometrisi iki özdeş karenin eşmerkezli olarak çizdirilip birinin 90° döndürülmesiyle elde edilmektedir. Karenin bir kenarının uzunluğu HFSS simülatörü ile 10mm-25mm arasında 1mm’ lik adımlar ile taranmıştır ve 18 mm değeri ile maksimum kazanç elde edilmiştir. Taban boyutları 66mm x 64mm değerindedir.

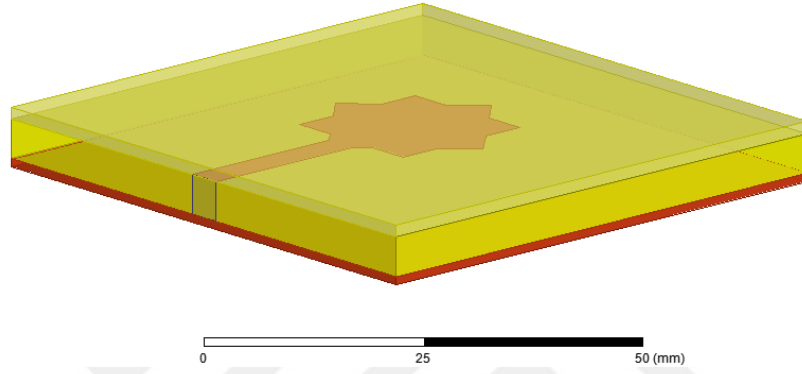


Şekil 4.12 Yalın SYMŞA tasarımı, kazanç, HFSS sonucu

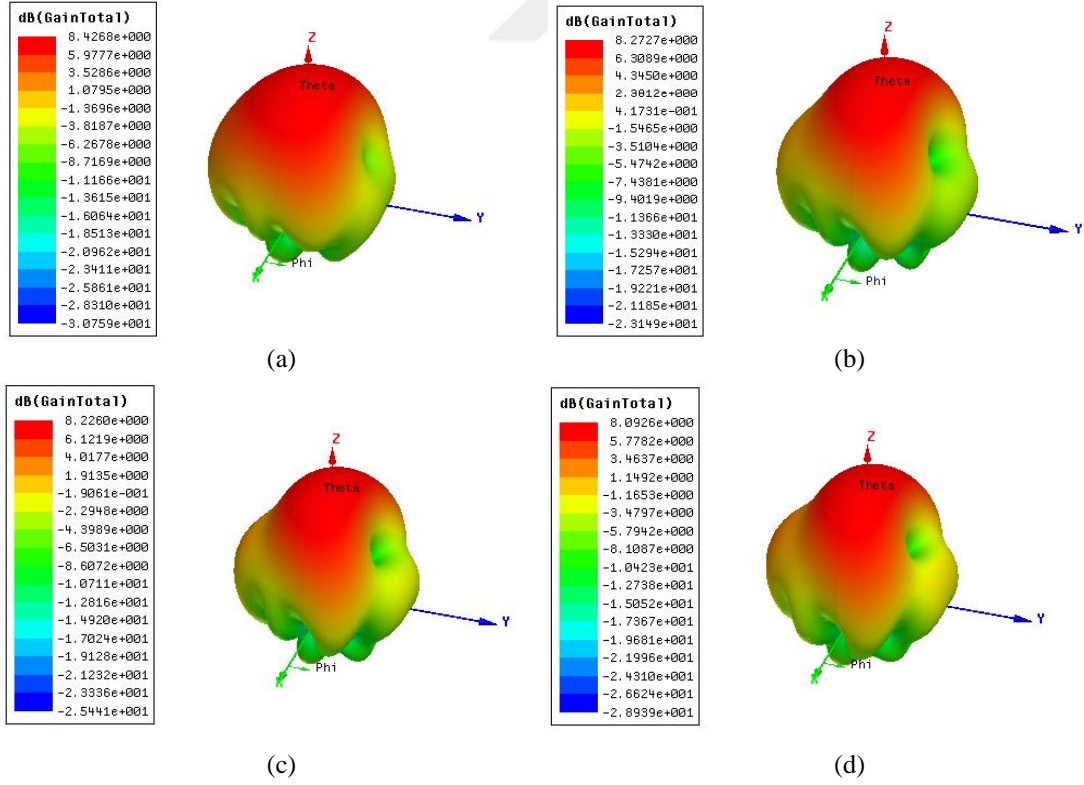
Şekil 4.12’ de yalın SYMŞA’ nın kazancı verilmiştir, optimum sonuçlar ile tasarlanan yalın antenin kazancı 7.92 dB olarak elde edilmiştir. Gelecek bölümlerde farklı dielektrik üsttaşlar ilave edilerek SYMŞA’ nın kazancının yükseltilmesi ve bu üsttaşların SYMŞA üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması hedeflenmiştir.

4.3.2. SYMŞA üzerine keçe üsttaş ilave edilmesi

Bu tasarımda yalın SYMŞA üzerine dielektrik tabakayla aynı boyutlarda olan üsttaş ilave edilmiştir. Şekil 4.13' te verilen tasarımda dielektrik sabiti (ϵ_r) 3 olan, $\tan\delta$ değeri ölçülmemiş olup literatürde geçen değeri (0.044) olarak alınan keçe malzemesi üsttaş olarak farklı yüksekliklerle ($h_2=0.725\text{mm}$, 1.450mm , 2.175mm , 2.900mm) kullanılmıştır. Bu bölümde dielektrik üsttaş (FR-4)' ün yüksekliğinin (h_2), SYMŞA performansı üzerinde oluşturduğu etki incelenmiştir.

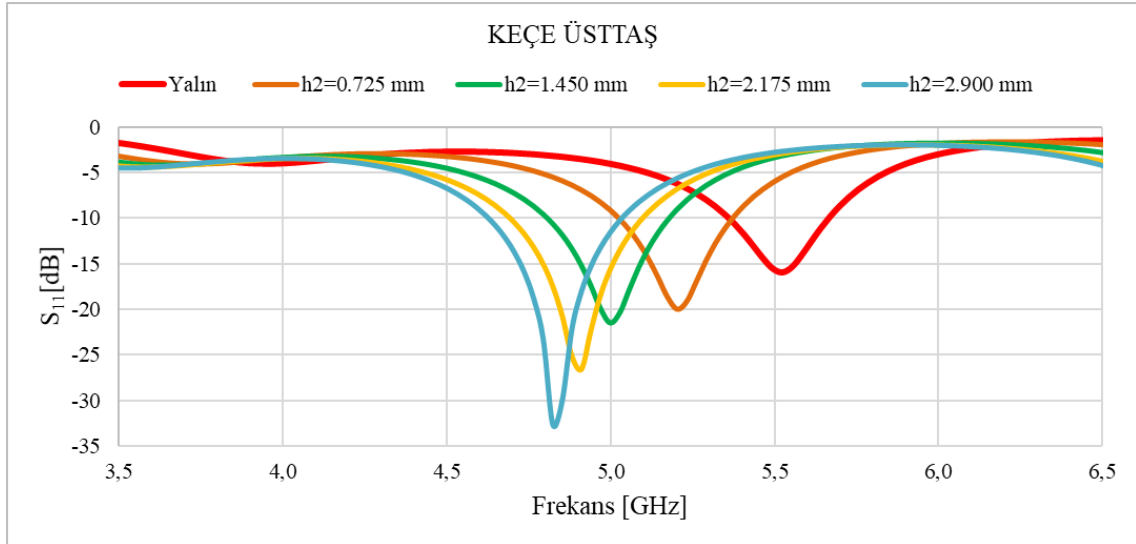


Şekil 4.13 İlave keçe üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, HFSS görünümü



Şekil 4.14 Farklı yüksekliklerde ilave keçe üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, kazançları, HFSS sonucu, a) $h_2=0.725\text{ mm}$, b) $h_2=1.450\text{ mm}$, c) $h_2=2.175\text{ mm}$, d) $h_2=2.900\text{ mm}$

Şekil 4.14' te verilen kazanç grafiklerine bakıldığında keçe malzemesinin genel anlamda kullanımı SYMŞA' nın kazancını arttırdığı halde yüksekliğindeki artış ise kazancı düşürmüştür. Yalın SYMŞA' nın kazancının 7.92 dB iken, $h_2=0.725\text{mm}$ ' de 8.42 dB' e kadar arttığı grafiklerden gözlemlenmektedir.

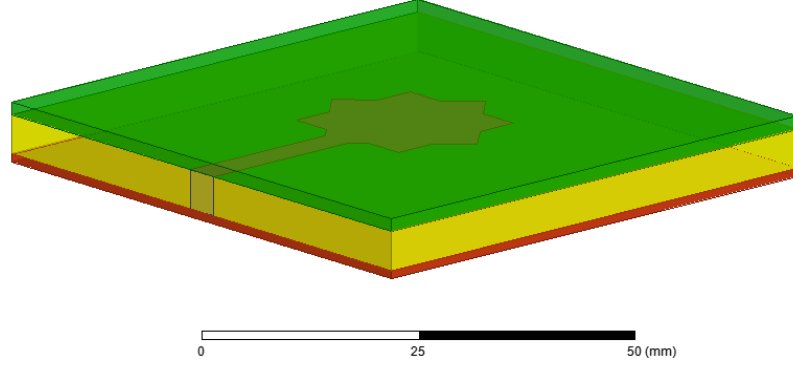


Şekil 4.15 Farklı yüksekliklerde ilave keçe üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, S_{11} , HFSS sonucu

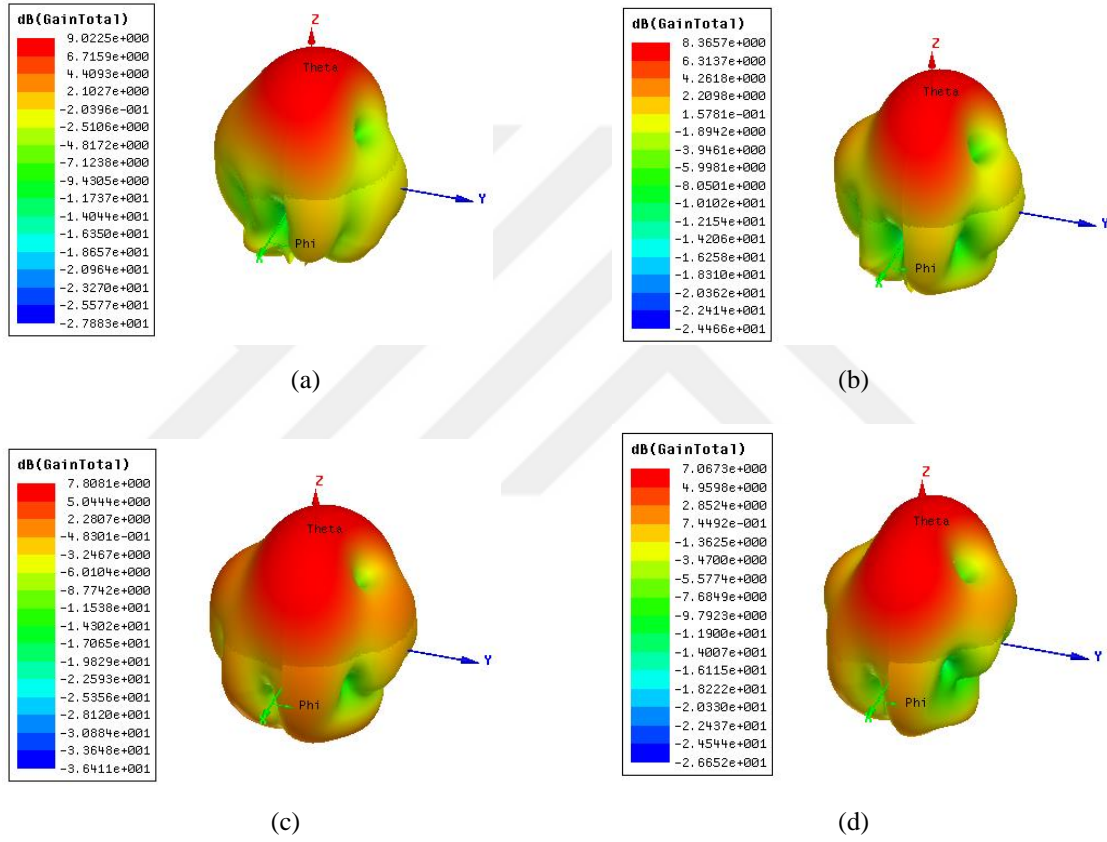
Şekil 4.15' te dielektrik üsttaş yüksekliğinin değişimine bağlı olarak frekans ve S_{11} değerlerinde de değişimler gözlemlenen değişimler gösterilmiştir. Yalın anten 5.5 GHz frekansında -15.94 dB geri dönüş kaybına sahipken üsttaş eklenmesi rezonans frekansını azalan yönde kaydırmıştır ve kalınlıkla doğru orantılı şekilde bu kayma devam etmektedir. Bununla birlikte S_{11} değeri 4.82 GHz' de -32.63 dB' e kadar düşmektedir.

4.3.3. SYMŞA üzerine FR-4 üsttaş ilave edilmesi

Bu tasarımda da aynı şekilde yalın SYMŞA üzerine dielektrik tabakayla aynı boyutlarda olan üsttaş ilavesi yapılmıştır. Şekil 4.16' da verilen tasarımda dielektrik sabiti (ϵ_r) 4.17 olan FR-4 malzemesi farklı yükseklikleri ($h_2=0.8, 1.6\text{mm}, 2.4\text{mm}, 3.2\text{mm}$) alınarak kullanılmıştır. Bu bölümde dielektrik üsttaş (FR-4)'ün yüksekliğinin (h_2), SYMŞA performansı üzerinde oluşturduğu etki incelenmiştir.

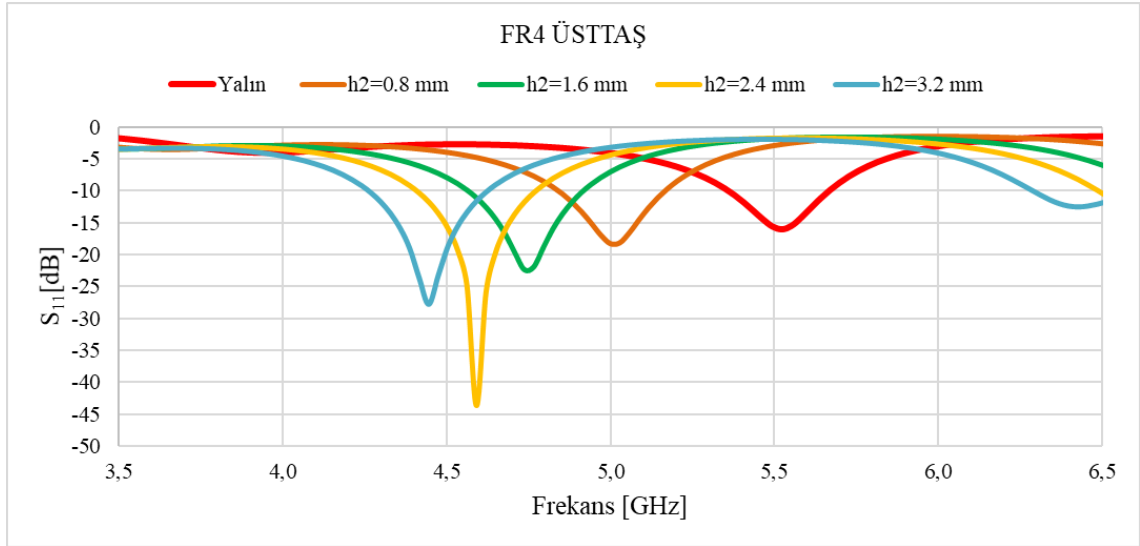


Şekil 4.16 İlave FR-4 üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, HFSS görünümü



Şekil 4.17 Farklı yüksekliklerde ilave FR-4 üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, kazançları, HFSS sonucu, a) $h_2=0.8$ mm, b) $h_2=1.6$ mm, c) $h_2=2.4$ mm, d) $h_2=3.2$ mm

Şekil 4.17' de verilen kazanç grafiklerine bakıldığında üsttaş olarak FR-4 malzemesinin genel anlamda kullanımının SYMŞA' nın kazancını arttırdığı, gibi yükseklikteki artış da keçede olduğu gibi kazancı düşürdüğü görülmüştür. Yalnız SYMŞA' nın kazancı 7.92 dB iken, $h_2=0.8$ mm' de 9.02 dB' e kadar arttığı grafiklerden gözlemlenmektedir.

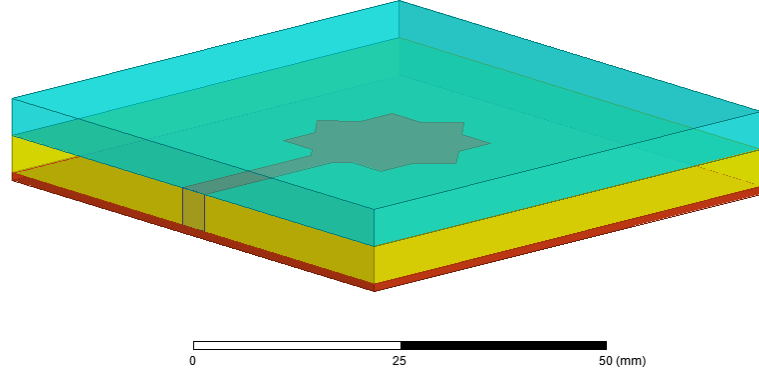


Şekil 4.18 Farklı yüksekliklerde ilave FR-4 üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, S_{11} , HFSS sonucu

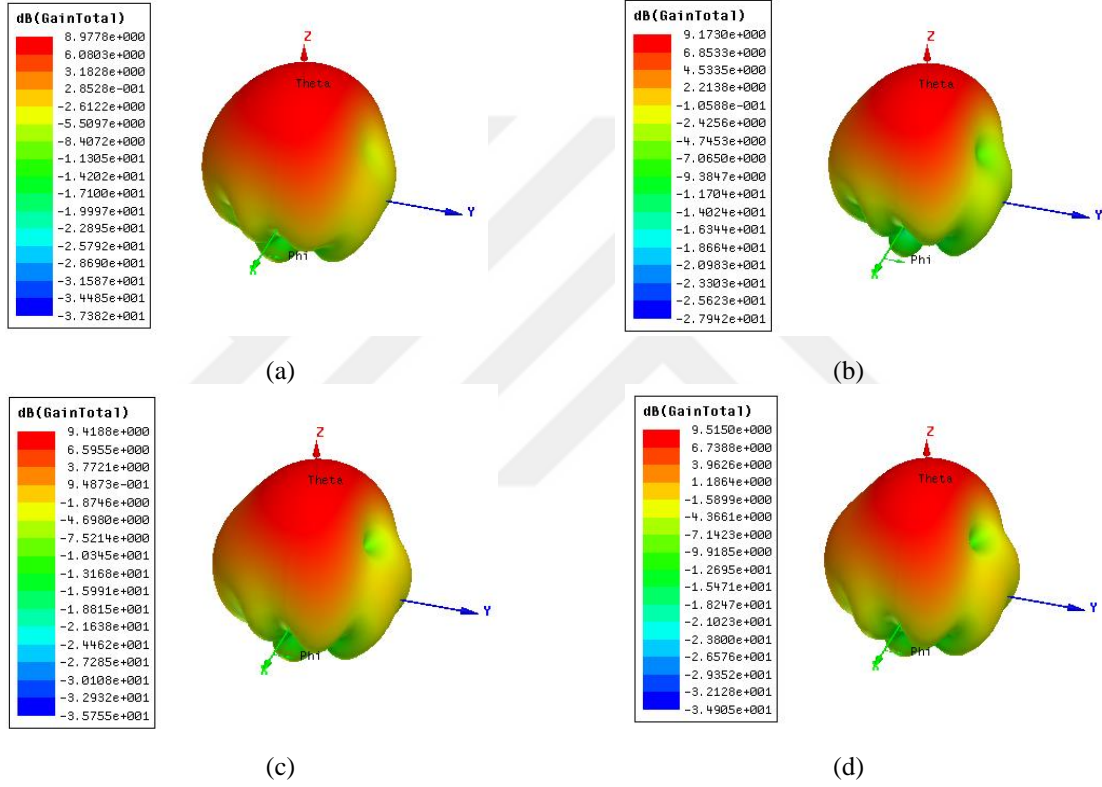
Şekil 4.18’ de dielektrik üsttaşın yüksekliğinin değişimine bağlı olarak frekans ve S_{11} değerlerinde de değişimler gözlemlenen değişimler gösterilmiştir. Yalın anten 5.50 GHz frekansında -15.94 dB geri dönüş kaybına sahipken üsttaş eklenmesi rezonans frekansını azalan yönde kaydırmıştır ve kalınlıkla doğru orantılı şekilde bu kayma devam etmektedir. Bununla birlikte S_{11} değeri 4.59 GHz’ de -43.63 dB’ e kadar düşmektedir.

4.3.4. SYMŞA üzerine RT/Duroid 5880 LZ üsttaş ilave edilmesi

Bu tasarımda yine aynı boyutlarda ilave edilen üsttaş malzemesi tabanla aynı malzeme olan fakat dielektrik sabiti diğerlerine göre daha küçük olan RT/Duroid 5880 LZ malzemesi olmuştur. Şekil 4.19’ da verilen tasarımda dielektrik sabiti (ϵ_r) 1.96 olan RT/Duroid 5880 LZ malzemesi farklı yükseklikleri ($h_2=1.187\text{mm}$, 2.375mm , 3.562mm , 4.750mm) alınarak kullanılmıştır. Bu bölümde üsttaşın (RT/Duroid 5880 LZ) yüksekliğinin (h_2), SYMŞA performansı üzerinde oluşturduğu etki de incelenmiştir.

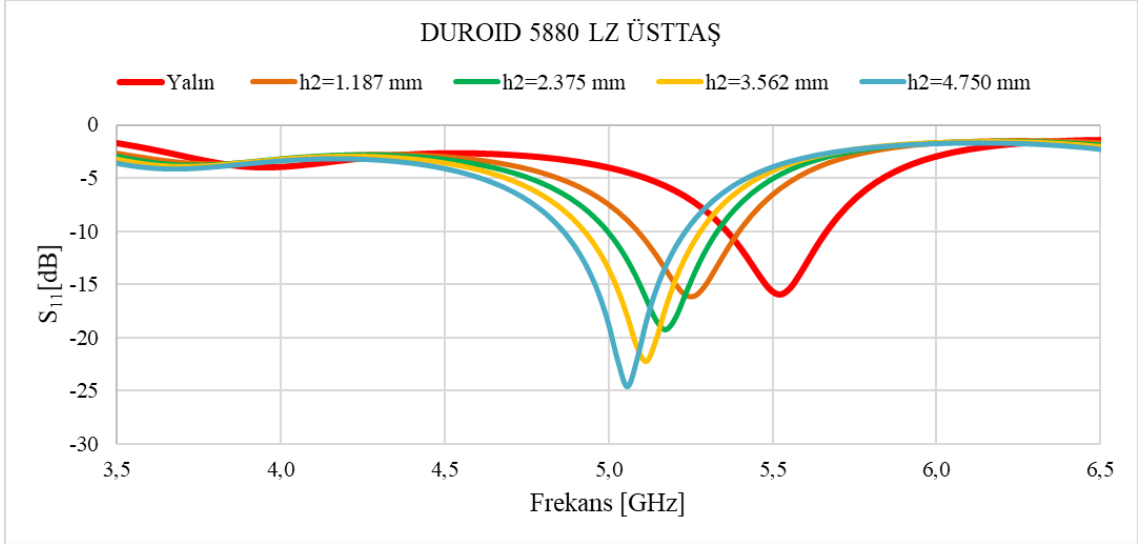


Şekil 4.19 İlave RT/Duroid 5880 LZ üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, HFSS görünümü



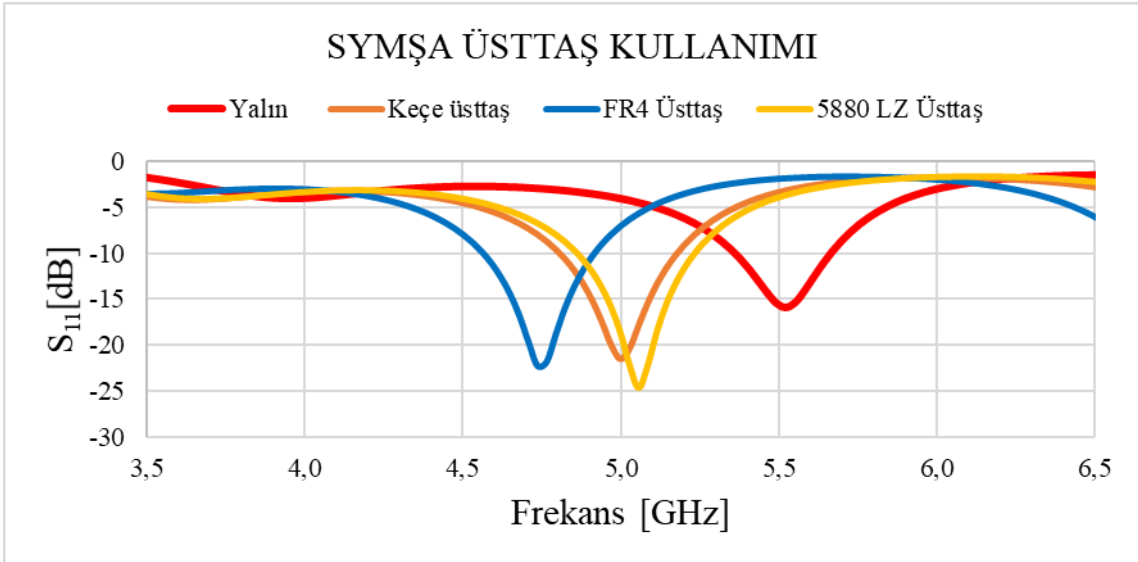
Şekil 4.20 Farklı yüksekliklerde ilave RT/Duroid 5880 LZ üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, kazançları, HFSS sonucu, a) $h_2=1.187$ mm, b) $h_2=2.375$ mm, c) $h_2=3.562$ mm, d) $h_2=4.750$ mm

Şekil 4.20' de verilen kazanç grafiklerine bakıldığında üsttaş olarak RT/Duroid 5880 LZ malzemesinin kullanımının SYMŞA' nın kazancını diğer üsttaşlara oranla daha çok arttırdığı gözlemlenmiştir bununla birlikte diğerlerinden farklı olarak üsttaşın yüksekliğinin artması kazancı arttırmıştır. Yalın SYMŞA' nın kazancı da 7.92 dB iken $h_2=4.75$ mm yüksekliğinde üsttaş kullanıldığında kazancın 9.51 dB' e kadar arttığı grafiklerden gözlenmektedir.



Şekil 4.21 Farklı yüksekliklerde ilave RT/Duroid 5880 LZ üsttaş kullanılan SYMŞA tasarımı, S_{11} , HFSS sonucu

Şekil 4.21’ de dielektrik üsttaşın yüksekliğinin değişimine bağlı olarak frekans ve S_{11} değerlerinde de değişimler gözlemlenen değişimler gösterilmiştir. Yalın anten 5.50 GHz frekansında -15.94 dB geri dönüş kaybına sahipken üsttaş eklenmesi rezonans frekansını azalan yönde kaydırmıştır ve yükseklikle doğru orantılı şekilde bu kayma devam etmektedir fakat diğer dielektriklere kıyasla kayma oranı daha azdır. Bununla birlikte S_{11} değeri 5.05 GHz’ de -24.63 dB’ e kadar düşmektedir.



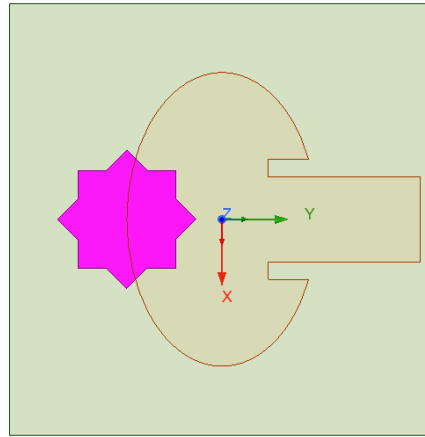
Şekil 4.22 Farklı dielektrik üsttaşlar kullanılan SYMŞA tasarımı, S_{11} , HFSS sonucu

Üretimde kullanılacak üsttaşların kalınlıkları; keçe için $h_2=1.45\text{mm}$, FR-4 için $h_2=1.6\text{ mm}$ ve RT/Duroid 5880 LZ için $h_2=4.75\text{ mm}$ dir. Bu kalınlıklar için yalın ve bu

üsttaşların kullanıldığı antenlerin S_{11} değerleri Şekil 4.22’ de karşılaştırılmıştır. Yalın anten 5.50 GHz frekansında -15.94 dB dönüş kaybı değerine sahipken üsttaş eklenmesi rezonans frekansını azalan yönde kaydırmıştır. FR-4 üsttaş kullanımında 4.73 GHz frekansında S_{11} değeri -22.31 dB, keçe üsttaş kullanımında 4.99 GHz frekansında S_{11} değeri -21.46 dB ve RT/Duroid 5880 LZ kullanımında 5.05 GHz frekansında S_{11} değeri -24.63 dB elde edilmiştir. Kazancı en az arttıran üsttaş keçe olmuştur ve kazancı 7.92 dB’ den 8.27 dB’ e arttırmıştır. En çok arttıran üsttaş ise RT/Duroid 5880 LZ olmuştur ve kazancı 7.92 dB’ den 9.51 dB’ e arttırmıştır. Bununla birlikte frekansta en az kaymanın gerçekleştiği üsttaş da RT/Duroid 5880 LZ olmuştur. Bölüm 4.6’ da SYMŞA’ ların üretim adımları gösterilmiştir ve Bölüm 4.8.5’ te ölçümle simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

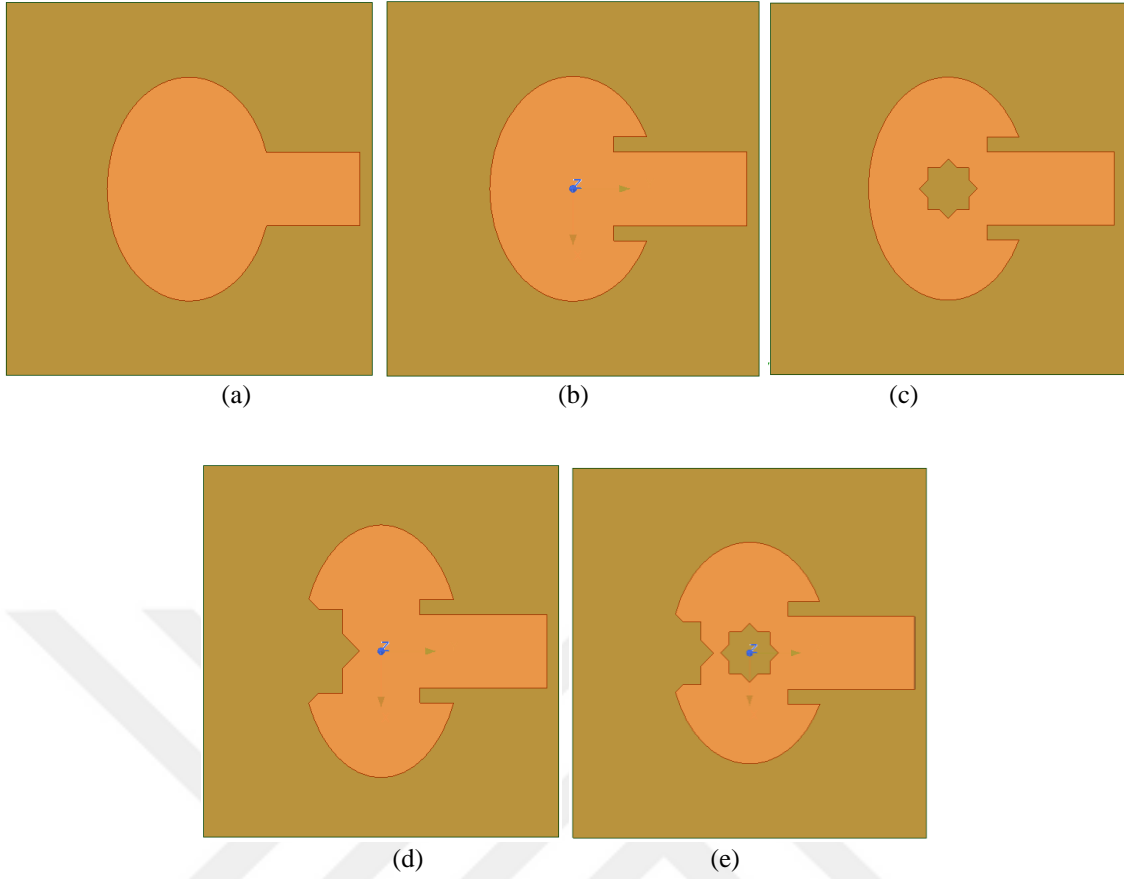
4.4. Eliptik Mikroşerit Yama Anten Üzerine Selçuklu Yıldız Yarık Açılması

Bu bölümde, Rogers firmasına ait RT/Duroid 5880 üzerine hat beslemeli eliptik yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten kazancını arttırmak için yama üzerine farklı boyutlarda ve farklı konumlarda yarıklar açılarak anten performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada yalın mikroşerit hat beslemeli eliptik yama ile tasarıma başlanmış olup sonrasında empedans uyumlandırma için gömme beslemeli hale getirilip yamaya yarıklar açılmıştır.



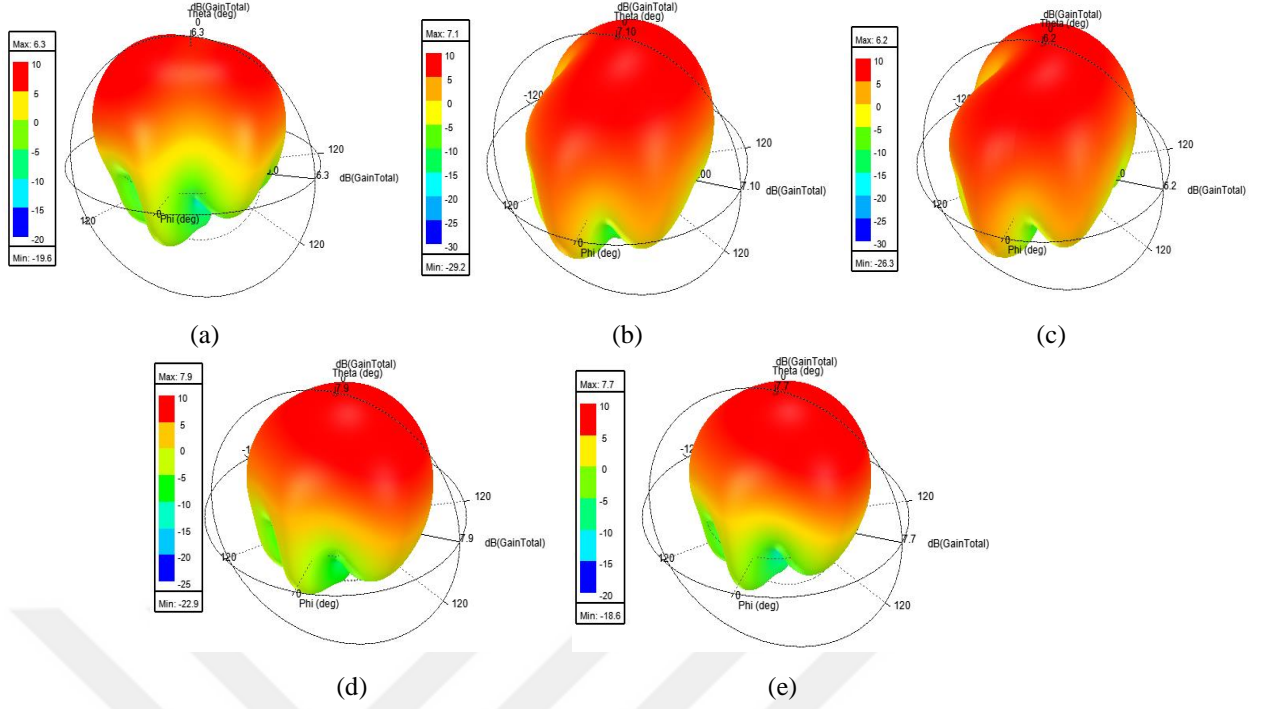
Şekil 4.23 SY Yarıklı EMŞA’ nın elde edilmesi, HFSS görünümü

Şekil 4.23’ te EMŞA’ nın kenarına SY yarığın nasıl açıldığı gösterilmiştir.



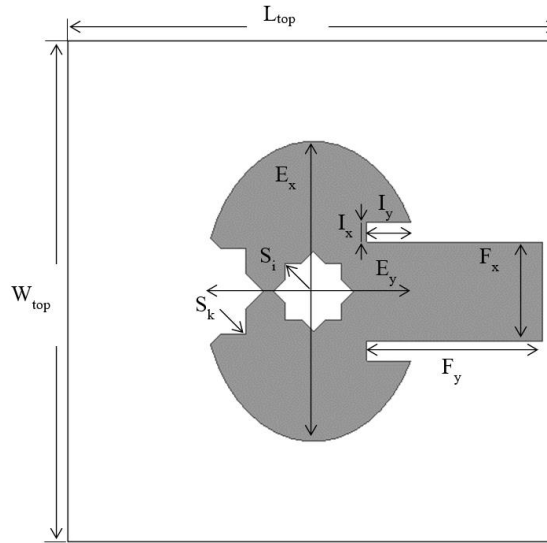
Şekil 4.24 SY Yarıklı EMŞA tasarım adımları, HFSS görünümü, a) Yalın EMŞA, b) Gömme beslemeli EMŞA, c) Merkezine SY yarık açılmış EMŞA, d) Kenarına SY yarık açılmış EMŞA, e) Hem merkez hem kenarına SY yarık açılmış EMŞA

Burada öncelikle yalın antende empedans uyumlandırma amacıyla hat besleme, gömme besleme haline getirilmiştir. Daha sonra anten kazancını iyileştirmek amacıyla; yamanın merkezine SY (Selçuklu yıldızı) şekilli yarık, yamanın kenarına Selçuklu yıldızı şekilli yarık ve son olarak hem merkezde hem de kenarda yarık ilavesi ile tasarımlar denenmiş olup Şekil 4.24' te verilmiştir. Yarık parametreleri simülasyon ortamında taranmıştır. HFSS ortamında ulaşılan en iyi değerlere sahip yarıklı anten üretilerek ölçümler alınmıştır








Şekil 4.25 SY Yarıklı EMŞA kazanç grafikleri, HFSS sonucu, a) Yalın EMŞA, b) Gömme beslemeli EMŞA, c) Merkezine SY yarık açılmış EMŞA, d) Kenarına SY yarık açılmış EMŞA, e) Hem merkez hem kenarına SY yarık açılmış EMŞA

Şekil 4.25’ te tasarımı gerçekleştirilen EMŞA’ ların kazanç grafikleri verilmiştir. Yalın EMŞA’ nın kazancı 6.3 dB, gömme beslemeli hale getirilen EMŞA’ nın kazancı 7.1 dB, merkezine SY yarık açılan EMŞA’ nın kazancı 6.3 dB, kenarına SY yarık açılan EMŞA’ nın kazancı 7.9 dB ve hem kenar hem merkezine SY yarık açılan EMŞA’ nın kazancı 7.7 dB’ dir. Burada en yüksek kazanç kenarına SY yarık açılan EMŞA ile elde edilmiş ve üretimi gerçekleşmiştir.



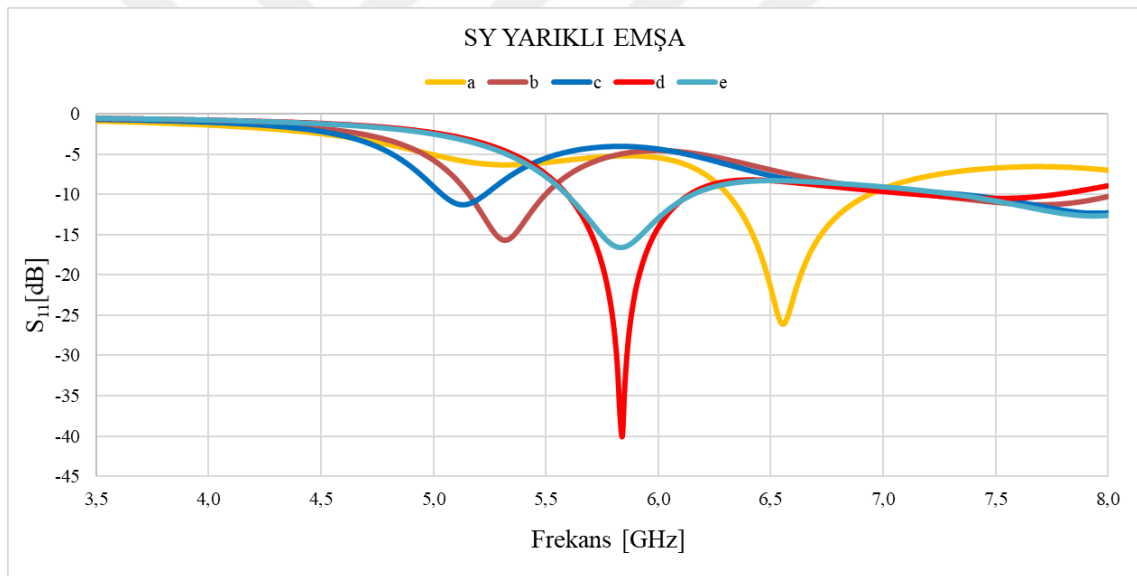
Şekil 4.26 Tasarımı gerçekleşen SY yarıklı EMŞA parametreleri

Tablo 4.1. SY Yarıkli EMŞA' ların aşamalı boyutları

Tasarım	E_x	E_y	L_{top}	W_{top}	S_k	S_i	F_x	F_y	I_x	I_y
	30	22	50	49	-	-	9.86	12.93	-	-
					-	-			-	-
					-	4			-	-
					6	-			-	-
					6	4			-	-

* Tüm boyutlar mm cinsindedir.

Şekil 4.26 ve Tablo 4.1' de tasarımı gerçekleştiren antenlerin parametreleri verilmiştir. Bölüm 4.7' de kenarı SY yarıkli EMŞA' nın üretimi gerçekleştirilmiş, Bölüm 4.8.6' da ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.27 SY Yarıkli EMŞA S_{11} grafikleri, HFSS sonucu, a) Yalın EMŞA, b) Gömme beslemeli EMŞA, c) Merkezine SY yarık açılmış EMŞA, d) Kenarına SY yarık açılmış EMŞA, e) Hem merkez hem kenarına SY yarık açılmış EMŞA

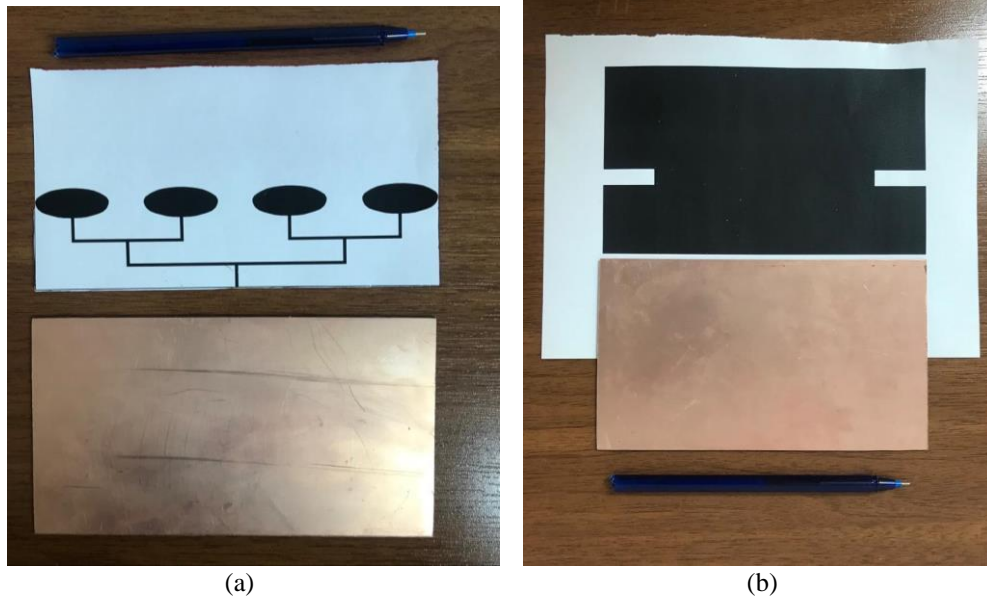
Şekil 4.27' de tasarımı gerçekleştirilen EMŞA' ların S_{11} grafikleri verilmiştir. Yalın EMŞA' nın S_{11} değeri 6.55 GHz frekansında -26.05 dB, gömme beslemeli hale getirilen EMŞA' nın S_{11} değeri 5.32 GHz frekansında -15.74 dB, merkezine SY yarık açılan EMŞA' nın S_{11} değeri 5.30 GHz frekansında -11.30 dB, kenarına SY yarık açılan EMŞA' nın S_{11} değeri 5.84 GHz frekansında -39.99 dB ve hem kenar hem merkezine SY yarık açılan EMŞA' nın S_{11} değeri 5.83 GHz frekansında -16.54 dB' dir.

4.5. Eliptik Mikroşerit Yama Anten Dizisinin Üretimi

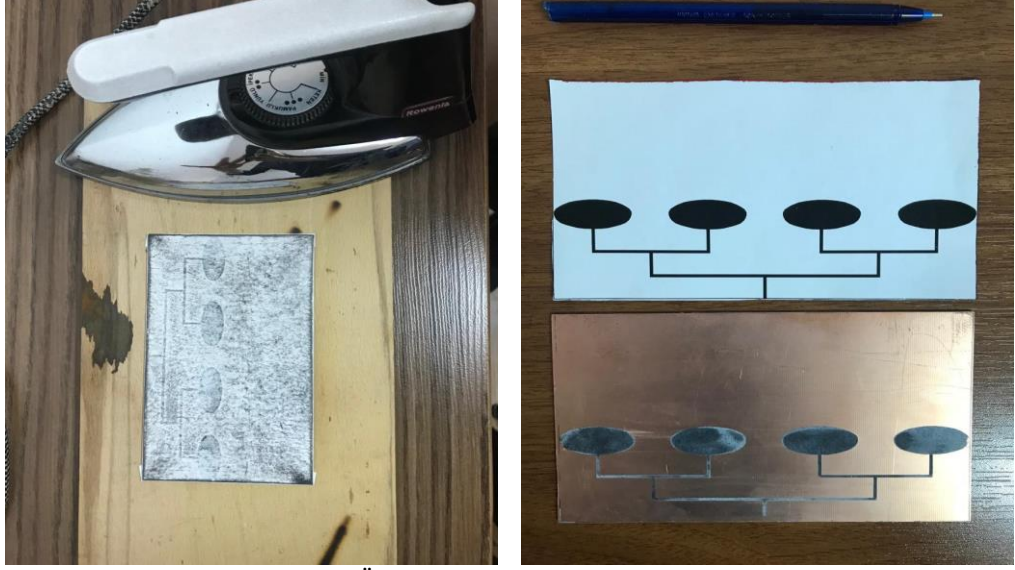
Bu kısımda beş farklı yöntem ve iki farklı konnektör ile toplam 6 adet modifiye toprak düzlemlili 1x4 dizi EMŞA üretilmiştir. Bu tekniklerde Bölüm 4.5.3' te gösterilen teknikle olumlu sonuç alınamamış olup toplamda 5 adet antenin ölçümü yapılabilmektedir. Bu antenlerin üretim aşamaları, birbirlerine göre değerlendirilmesi ve ölçüm sonuçları bu bölümde verilmiştir.

4.5.1. Ütü ile baskı devre yöntemi kullanılarak EMŞA üretimi

Şekil 4.28' de gösterildiği gibi dielektrik malzeme olarak seçilen FR-4 sert bir tabakadır ve basit el aletleri kullanarak mm hassasiyetinde istenilen boyutlara getirilmesi oldukça zor bir işlemdir. İlk aşamada toprak boyutlarına yakın bir ölçüde kesim yapılan FR-4'e daha sonrasında hassas bir şekilde istenilen boyutlara getirebilmek için zımpara işlemi uygulanmıştır. Bu oldukça zaman alan bir uygulamadır fakat anten üretim maliyetleri piyasada oldukça pahalı olduğundan dolayı bu yöntem sıklıkla başvurulmaktadır.



Şekil 4.28 FR-4' ün istenilen boyutlara getirilmesi, a) Ön yüzü, b) Arka yüzü



Şekil 4.29 Ütü ile baskı devre gerçekleştirilmesi

Şekil 4.29’ da EMŞA’ nın ütüleme yöntemi başka bir ifadeyle ısı ile transfer yöntemi ile üretilmesi gösterilmiştir. Isı ile transfer yönteminde, anten şeması, lazer yazıcı veya fotokopi makinesi ile transfer materyaline basılıp, ısı ile bakırlı plakete aktarılmakta ve transfer materyali olarak transfer kâğıdı, kuşe kâğıt veya asetat oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu çalışmada transfer materyali olarak kuşe kâğıdı tercih edilmiştir.



Şekil 4.30 EMŞA’ nın asit karışımına atılması

Şekil 4.30’ da gösterilen asite atma işleminde, baskı sonrası mürekkeple kaplanan yama ve toprak düzlemi hariç kalan bakırı eritmek için hidrojen peroksit

(H_2O_2) ve hidroklorik asit (HCl) karışımı kullanılmıştır. İstenilen çözücülüğü elde etmek için bu malzemelerin oranı üçe bir olacak şekilde karıştırılmıştır. Hidrojen peroksit (perhidrol) bir, hidroklorik asit (tuz ruhu) üç oranında karıştırılmakta ve bu şekilde çok kısa sürede karışıma atılan plakadaki bakır erimektedir tuz ruhunun oranı arttıkça tepkime yavaşlamaktadır. Yine kullanılan perhidrolün yoğunluğu da işlem süresini etkileyen bir faktördür. Başka bir yöntem olarak $FeCl_3$ (*demir-klorür*) de kullanılabilir fakat eritme süresi çok uzundur.



Şekil 4.31 Ütü ile baskı devre yöntemi kullanılarak üretilen EMŞA' nın görünümü, a) Ön yüzü, b) Arka yüzü

Şekil 4.31' de verilen EMŞA görüntüleri asit içerisinde çıkarılan antene konnektör lehimlenmesi sonucu elde edilmiştir. Asit karışımı içerisinde çıkarılan EMŞA su iletemizlenmiştir ve 90° SMA tip konnektör lehimlenmiştir. Bu teknikte yüksek ısıdan dolayı üretilen antenin bakır yüzeylerinde (yama ve toprak) bozulmalar oluşmuştur, bu durum antenin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bölüm 4.8.1' de üretilen antenlerin ölçülmesi kısmında bu durumdan dolayı simülasyon ve ölçüm sonuçları arasındaki fark incelenmiştir.

Bu bölümdeki tüm aşamalar, antenin istenilen boyutlara getirilmesi, baskı yapılması, asite atılması ve son olarak konnektör lehimlenmesi tarafımda gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.8.1' de üretimi gerçekleşen antenin ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.5.2. Yapışkan PVC folyo ile maskelenerek EMŞA üretimi

Şekil 4.32’ de gösterilen Cameo Plotter Cihazı ile EMŞA üretiminde kullanılan yapışkanlı PVC folyo, FR-4 plakanın asit içerisinde çözünmesi istenmeyen (yama, toprak) kısımların açıkta kalacağı şekilde EMŞA’ nın bire bir ölçüsünde kesilmiş ve plakanın üzerine hassas bir şekilde hizalanarak yapıştırılmış ve böylelikle plaka maskelenmiştir.



Şekil 4.32 EMŞA üretimi için yapışkan PVC folyo kesimi



(a)



(b)

Şekil 4.33 EMŞA’ nın yapışkan PVC folyo ile maskelenmesi a) Ön yüzü, b) Arka yüzü

EMŞA’ nın yapışkan PVC folyo ile maskelenme amacı yama ve toprağın asit karışımı içerisinde çözünmesini engellemek için o kısımların sınırlarını net bir şekilde oluşturup, asit içerisinde çözünmeyecek herhangi bir madde (oje, asetat kalemi vs.) ile kaplanmasını sağlamaktır.



Şekil 4.34 EMŞA' nın toprak ve yama kısımlarının ojenmesi a) Ön yüzü, b) Arka yüzü

Şekil 4.34' te yama ve toprak yüzeylerin oje ile kaplanması gösterilmiştir. Bu aşamalar gerçekleştirildikten sonra EMŞA Şekil 4.30' da da gösterildiği gibi asit karışımının içerisine atılmıştır. Asite atıldığında oje olan yerler hariç diğer bakır kısımlar çözülmüştür dolayısıyla sadece yama ve toprak düzlemi çözünmeden kalmıştır, daha sonra ojeli yerler asetonla temizlenip EMŞA konnektör lehimlenmesi için hazır hale getirilmiştir (Dündar, 2017).



Şekil 4.35 Yapışkan PVC folyo ile maskelenerek üretilen EMŞA' nın görünümü a) Ön yüzü, b) Arka yüzü

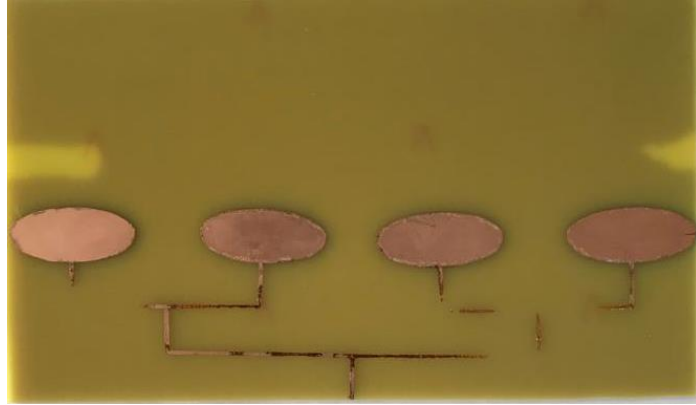
Şekil 4.35' te yapışkan PVC folyo ile maskelenerek üretilen anten verilmiştir. Bu üretim tekniğinde ısı kullanılmamıştır ve üretilen antende bakır yüzeylerinin ısı işlem kullanılan antene göre daha pürüzsüz olduğu gözlemlenmiştir, fakat yapışkan PVC' nin hizalanması oldukça dikkat gerektirmektedir. Bölüm 4.8.2' de üretimi gerçekleşen antenin ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.5.3. Yapışkan PVC folyo ile kaplanarak EMŞA üretimi

Şekil 4.36' da yama ve toprak kısımlarının nasıl kaplandığı gösterilmiştir. Şekil 4.32' de gösterilen Cameo Plotter Cihazı ile EMŞA üretiminde kullanılan yapışkan PVC folyo, EMŞA' nın yama ve modifiye toprak yüzeyinin bire bir ölçülerinde kesilmiştir. Bu tekniğin Bölüm 4.5.2' deki teknikten farkı ışıma alanlarının oje ile değil de doğrudan yapışkan PVC folyo ile kaplanmasıdır. Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra EMŞA Şekil 4.30' daki gibi kalan bakırların çözünmesi için asit içerisine atılmıştır.



Şekil 4.36 EMŞA' nın yapışkan PVC folyo ile kaplanması, a) Ön yüzü, b) Arka yüzü

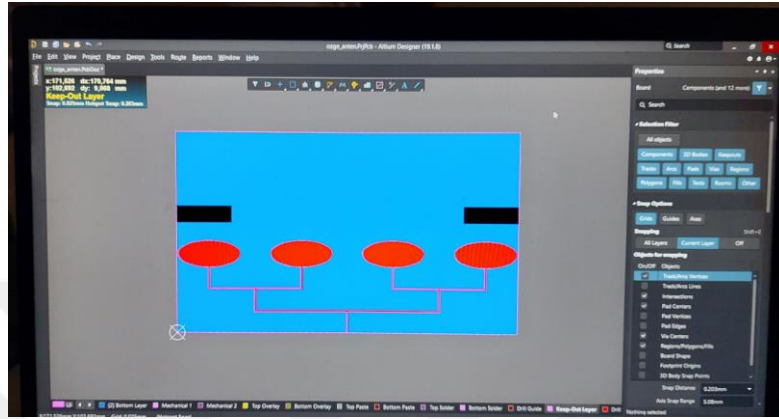


Şekil 4.37 Yapışkan PVC folyo ile kaplanarak üretilen EMŞA' nın görünümü

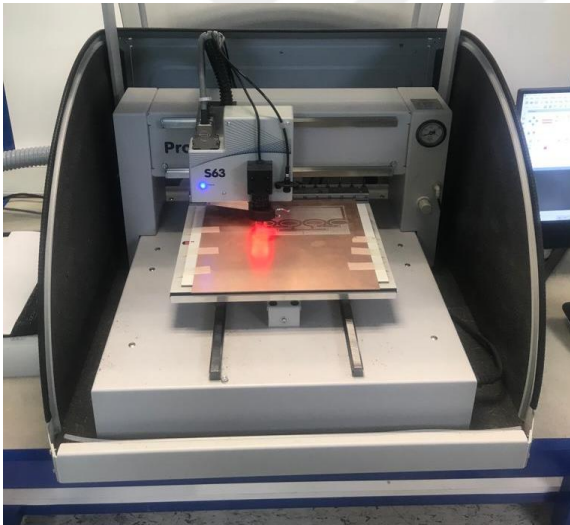
Bu yöntem başarılı olmayarak besleme hattında yer yer istenmeyen erimeler gözlenmiş, besleme genişliği boyutları bu yöntem için fazla ince (1mm) kalmıştır. Yapışkanlı PVC folyo asit içerisindeyken plaka üzerinden kalkıp Şekil 4.37' de gösterildiği gibi besleme hattındaki bakır erimiştir, bu yüzden ölçüm sonuçlarına yer verilmemiştir.

4.5.4. Profesyonel PCB cihazı kullanılarak EMŞA üretimi

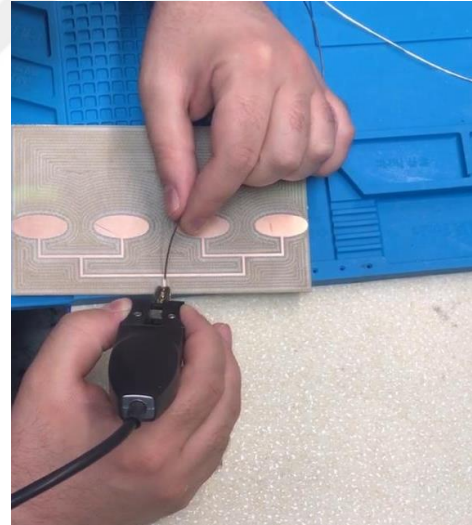
EMŞA toprak boyutu üzerinden Şekil 4.38’ de gösterildiği gibi Altium PCB devre programı ile gerber dosyaları hazırlanmış, PCB kesim makinesi ile kesilmiş ve bakırı kazınmıştır.



Şekil 4.38 EMŞA’ nın Altium PCB devre şeması



(a)



(b)

Şekil 4.39 PCB cihazı ile profesyonel EMŞA üretimi a) Bakırın kazınması, b) Konnektör lehimli

Şekil 4.39’ da *PCB* kesimi ve kazınmasından sonra EMŞA’ ya bu konuda profesyonel bir kişi tarafından 180° ve 90° iki farklı SMA (SubMiniature version A) tip RF Konnektör lehimlenmesi gösterilmiştir. Burada ayrıca, aynı antenler için farklı konnektör kullanımının anten performansına etkisi gösterilmek istenmiştir.

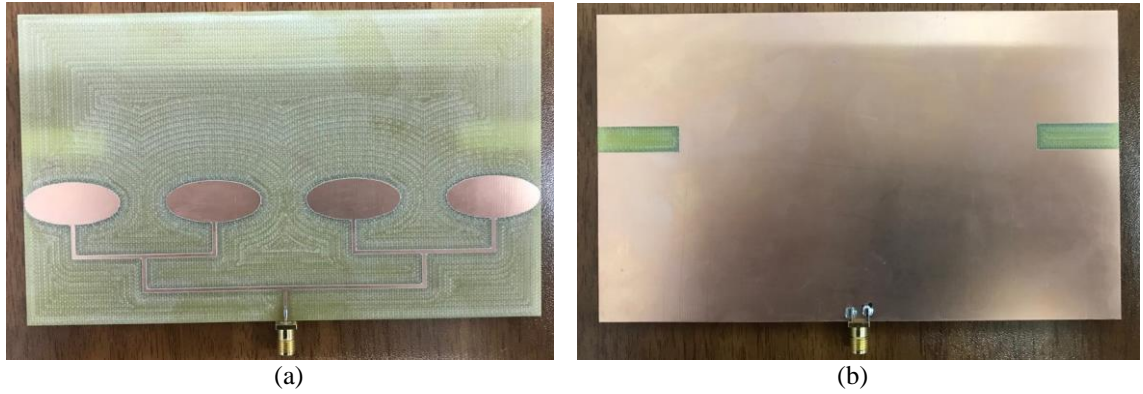
SMA konnektörü minyatür bir koaksiyel kablo konnektörüdür ve adını Sub-Miniature A konnektörü kelimelerinden almaktadır. Koaksiyel bağlantıların gerekli

olduğu ekipmanlarda RF montajları için bağlantı sağlamak için birçok uygulama bulunmaktadır.

SMA, 1 GHz' den yaklaşık 16 GHz' e kadar yüksek frekanslı uygulamalar için standart dişli anten konektörleridir. En yaygın olarak taşınabilir radyo ve cep telefonu antenleri gibi mikrodalga sistemlerinde, aynı zamanda Wi-Fi anten sistemlerinde kullanılırlar. Bağlayıcılar, altıgen bir şekle sahip dişli bir dış kavrama arayüzüne sahiptir ve bir anahtarla sıkılmasını sağlar. Doğru sızdırmazlığa sıkışmalarını sağlamak için özel tork spanners mevcuttur ve aşırı sıkmadan iyi bir bağlantı yapılmasına izin verir. Gereken tork tipik olarak 8 inç pound'dur. SMA konektörleri, konektör boyunca sabit bir 50 Ohm empedansa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.40 PCB cihazı ile üretilen 90° SMA konektör kullanılan EMŞA' nın görünümü a) Ön yüzü, b) Arka yüzü



Şekil 4.41 PCB cihazı ile üretilen 180° SMA konektör kullanılan EMŞA' nın görünümü a) Ön yüzü, b) Arka yüzü

Şekil 4.40 ve Şekil 4.41' deki antenler tamamen profesyonel yöntemlerle üretilmiştir herhangi bir ısıtma, kaplama ve asite atma gibi işlemler olmadığı için bakır yüzeylerin en pürüzsüz olduğu anten bu üretim tekniği sonucunda elde edilmiş fakat

PCB cihazında kazıma yapılırken yeterli hassasiyette derinlik ayarı verilemediği için bakır yüzeyi kazıyarak yok ederken dielektrik malzemenin de belli bir oranını bakırla birlikte kazınmıştır. Bölüm 4.8.3' te bu teknik ile üretilen antenin simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.5.5. Bakır bant kullanılarak EMŞA üretimi

Şekil 4.32' de gösterilen Cameo Plotter Cihazı ile EMŞA üretiminde kullanılan iletken bakır istenilen boyutlarda ve geometride kesilmiştir. İletken gereksinimi bakır bant ile sağlandığı için artık zımpara ve kesici yardımı ile istenilen boyutlara getirilen FR-4 plakanın her iki yüzeyindeki bakıra ihtiyaç kalmamıştır bundan dolayı FR-4 plakanın yüzeylerindeki bakır, asit çözeltisi (perhidrol + tuz ruhu) içerisine atılıp üzerinde hiç bakır kalkmayacak şekilde çözünmesi sağlanmıştır. Daha sonra kesilen bakır bant yama kısmı ve toprak kısmı olmak üzere temiz plaka üzerine dikkatli bir şekilde hizalanarak yapıştırılmıştır. Son olarak konnektör olarak 90° SMA konnektör lehimlenmiştir.



Şekil 4.42 Bakır bant ile üretilen EMŞA' nın görünümü a) Ön yüzü, b) Arka yüzü

Şekil 4.42' deki antenin üretimi; ütü ile, PVC maskeleye ile, PVC kaplama ile üretilen antenlerde olduğu gibi yine fazlaca el işçiliğine dayanmaktadır. Isıl işleme maruz kalmaması bir avantaj sağlarken mevcut antenin besleme hattı oldukça ince (1mm) olduğu için kesilen bakır bant yapıştırılırken oldukça zorlanılmıştır ve besleme hattında hafif bükülmeler meydana gelmiştir. Bölüm 4.8.4' te bu teknik ile üretilen antenin simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

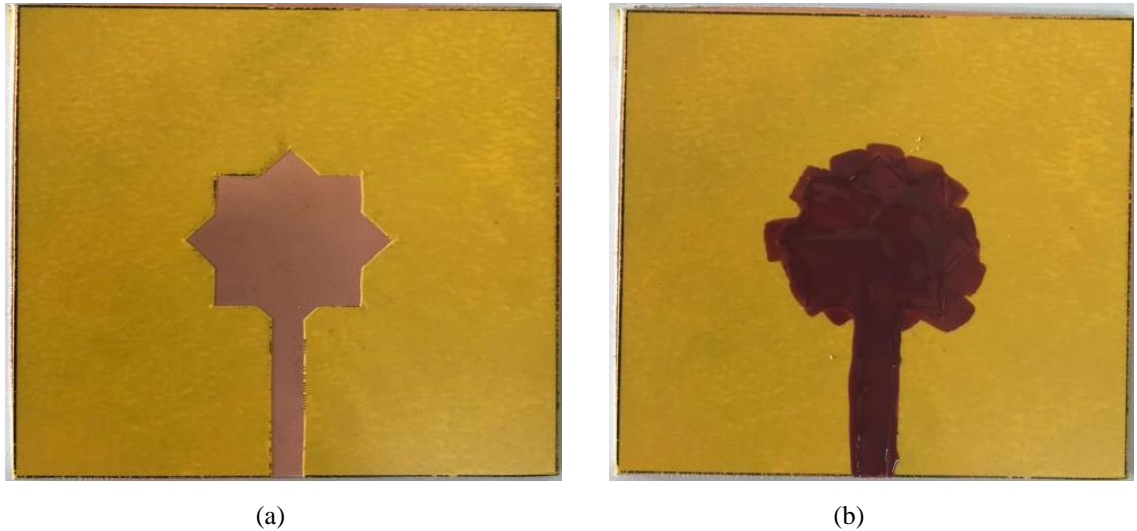
4.6. Farklı Üsttaşlar Kullanılan Selçuklu Yıldızı Mikroserit Yama Antenin Üretimi

Bölüm 4.5'te farklı üretim teknikleri karşılaştırılmış ve simülasyon ile ölçüm arasında en az fark olan üretim tekniği Tablo 5.4' te gösterilmiş olup yapışkanlı PVC folyo ile maskelenerek üretilen EMŞA olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yüzden Bölüm 4.3' te tasarlanan farklı üsttaşlar kullanılan SYMŞA' lar bu yöntem kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 4.43 SYMŞA' nın tabanının istenilen boyutlara getirilmesi

Şekil 4.43' te SYMŞA de kullanılan RT/Duroid 5880 LZ dielektrik malzemesi üzerine eklenen şablon yardımıyla kesici ve zımpara kullanılarak istenilen boyutlara getirilmiştir.

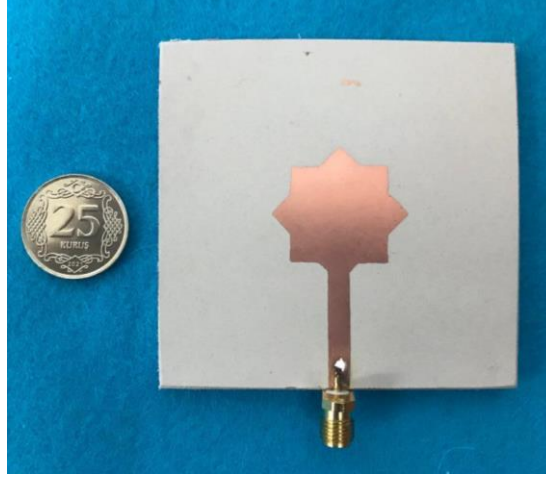


(a)

(b)

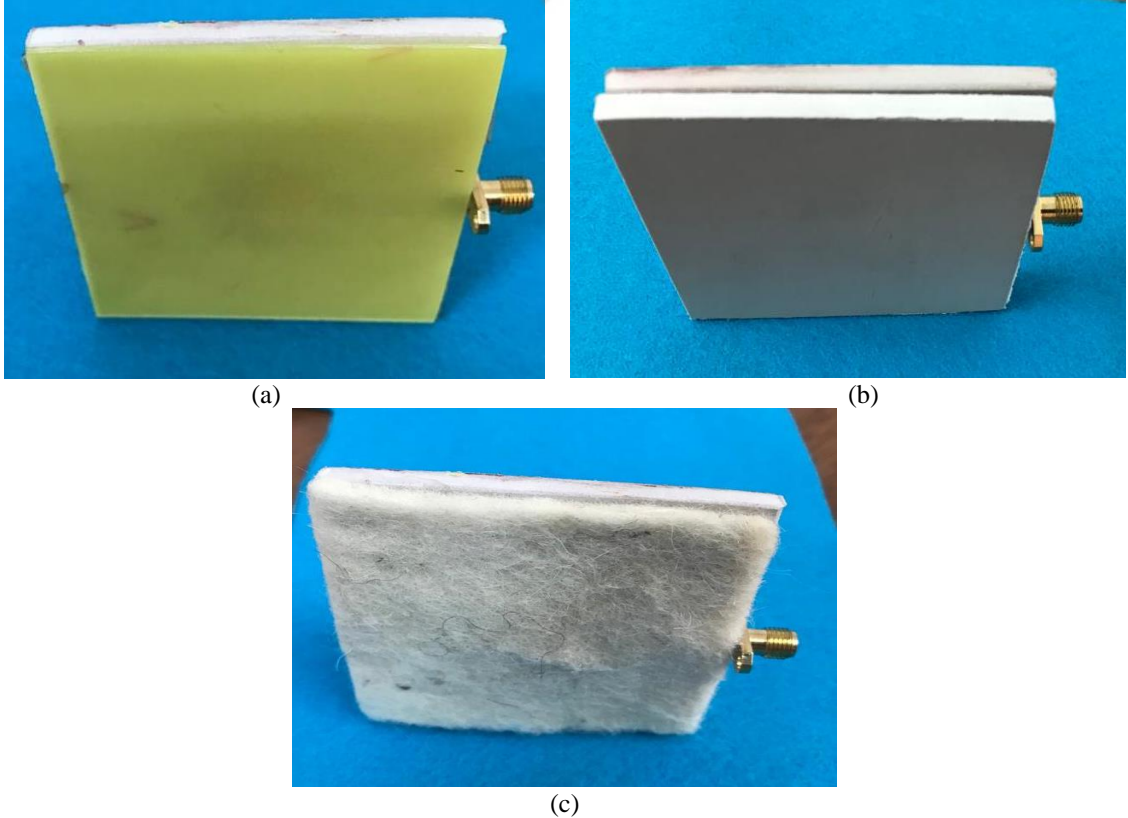
Şekil 4.44 SYMŞA' nın yapışkan PVC folyo ile a) Maskelenmesi, b) Yamannın kaplanması

Şekil 4.44' te yapışkan PVC folyo ile maskelenmesi ve yama yüzeyinin kaplanması gösterilmiştir. Bölüm 4.5.2' de bu tekniğin detaylarına yer verilmiştir.



Şekil 4.45 Üretimi tamamlanan yalın SYMŞA'nın görünümü

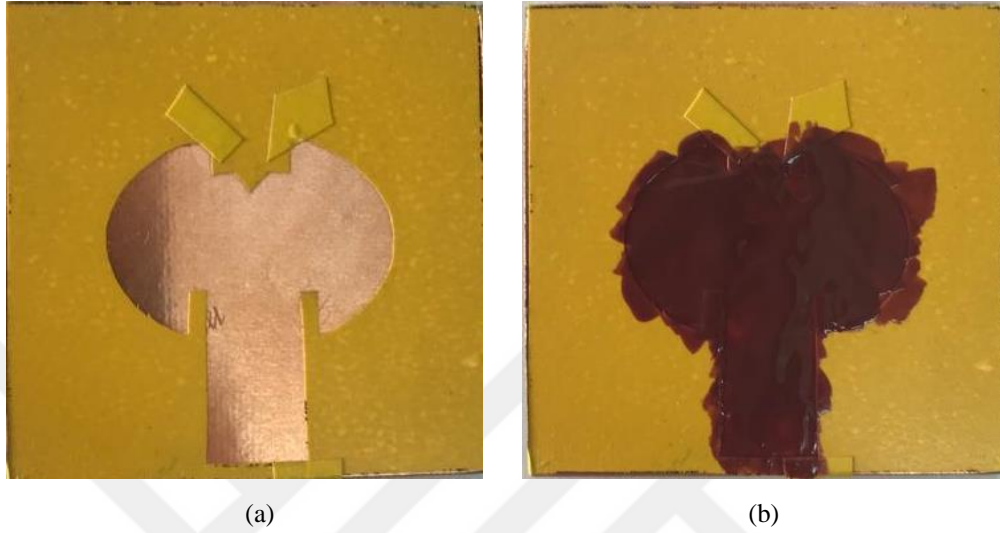
Üretimi gerçekleştirilen antenin yalın hali Şekil 4.45' te verilmiştir. Bu bölümde belirtildiği üzere farklı dielektrik malzemeler üsttaş olarak antene çift taraflı bant kullanılarak monte edilmiştir fakat Şekil 4.46' dan da görüleceği üzere üsttaş ve yalın SYMŞA arasında konektör pininden dolayı bir hava boşluğu oluşmaktadır, simülasyonlarda bu boşluk göz önünde bulundurulmadığı için üsttaş ilave edilen antenlerin ölçüm sonuçlarının bu durumdan etkilenebileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.46 Üsttaş kullanılan SYMŞA'ların görünümü a) FR-4 üsttaş, b) RT/Duroid 5880 LZ üsttaş, c) Keçe üsttaş

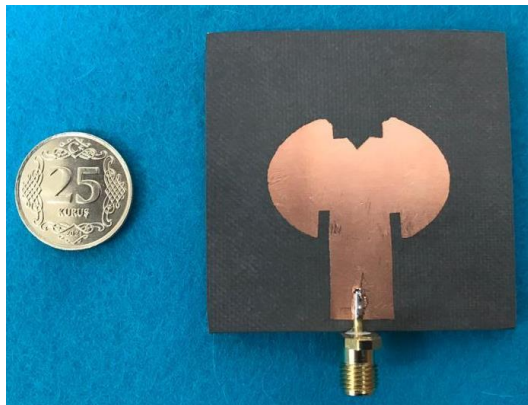
4.7. Selçuklu Yıldızı Yarıkli Eliptik Mikroşerit Anten Üretimi

Bölüm 4.4' te tasarlanan SY Yarıkli EMŞA, yine en iyi performansı sergileyen PVC folyo ile maskeleyme ymntemi kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 4.44 SYMŞA' nın yapışkan PVC folyo ile a) Maskelenmesi, b) Yamanın kaplanması

Şekil 4.44' te yapışkan PVC folyo ile maskelenmesi ve yama yüzeyinin kaplanması gösterilmiştir. Bölüm 4.5.2' de bu tekniğin detaylarına yer verilmiştir.

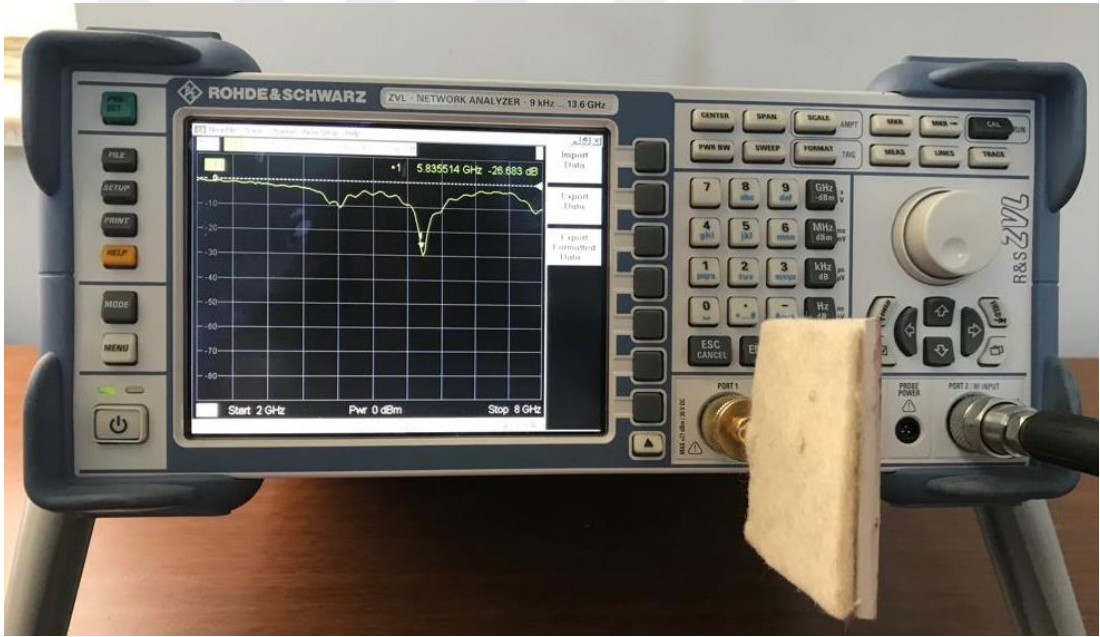


Şekil 4.45 Üretimi tamamlanan SY Yarıkli EMŞA' nın görünümü

Üretimi gerçekleştirilen SY Yarıkli EMŞA Şekil 4.45' te verilmiştir.

4.8. Mikroşerit Yama Antenlerin Ölçüm Sonuçları

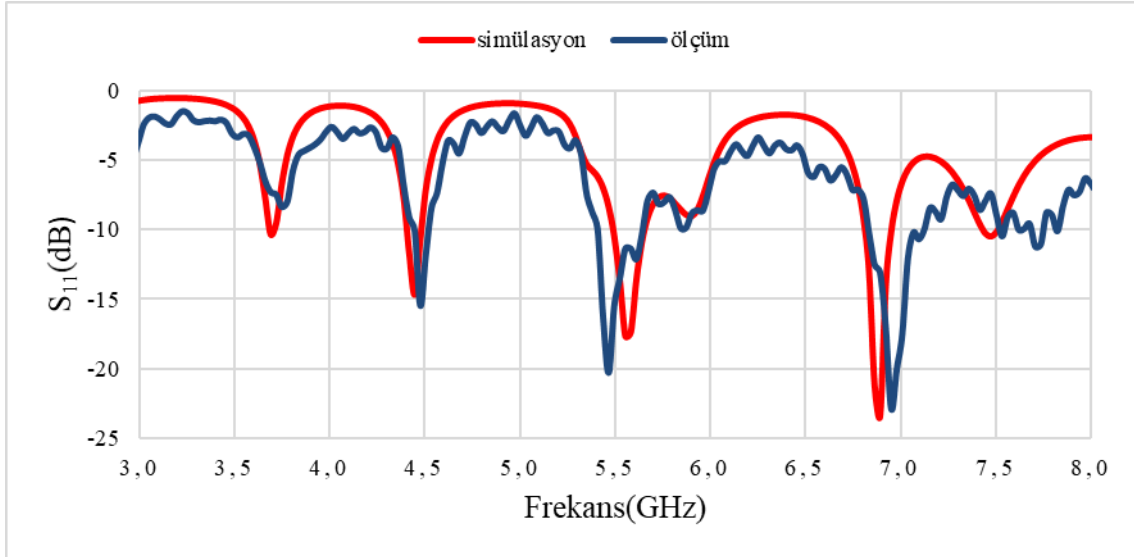
Mikroşerit yama antenlerin ölçülmesinde, kısaltması VNA olarak bilinen Vektör Ağ Analizörü kullanılmıştır. VNA (Vektör Network Analyzer), elektronik bir cihaz ya da sistemin RF performansını ölçmeye yarayan bir cihazdır. Filtre ve anten gibi bir RF devre elemanlarının VNA ile analizinde, belirlenen frekans aralığında S-parametreleri, VSWR değeri, empedans, kazanç ve kayıp ölçümleri yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında üretilmiş anten prototiplerinin ölçülmesinde Rohde Schwarz ZVL network analizörü kullanılmış ve Şekil 4.47’ de verilmiştir. Kullanılan ZVL-13 network analizörünün 2 portu vardır ve 9.0 KHz ile 13.6 GHz aralığında ölçüm yapabilmektedir. Üretilen antenlerin S_{11} ve Z_{11} ölçümleri normal laboratuvar şartlarında Rohde Schwarz ZVL13 VNA ile yapılmıştır.



Şekil 4.47 Rohde & Schwarz ZVL 13 network analizörü

4.8.1. Ütü ile baskı devre yöntemi kullanılarak üretilen EMŞA ölçüm sonucu

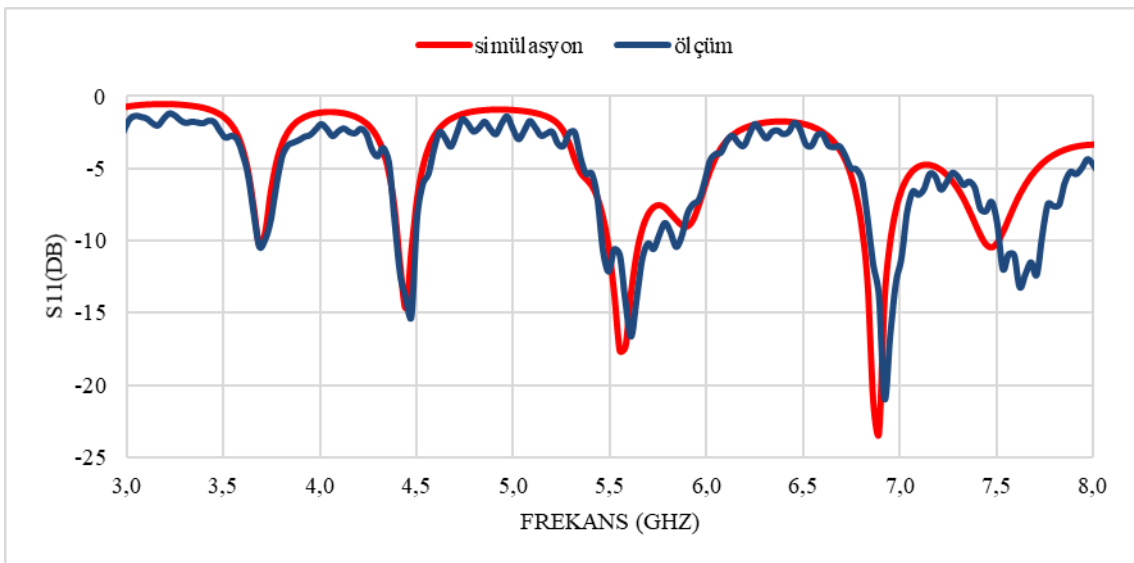
Şekil 4.48’ de simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. EMŞA, HFSS ile yapılan simülasyonda rezonans frekansı olarak 5.55 GHz frekansında -17.63 dB S_{11} değerine sahip iken ütü ile baskı devre yöntemi kullanılarak üretildiğinde ölçüm sonucu olarak, rezonans frekansı 5.45 GHz frekansında S_{11} değeri -20.33 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.48 Ütü ile baskı devre yöntemi kullanılarak üretilen EMŞA'nın simülasyon ve ölçüm sonuçları grafiği

4.8.2. Yapışkan PVC folyo ile maskelenerek üretilen EMŞA ölçüm sonucu

Şekil 4.49' da simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. EMŞA, HFSS ile yapılan simülasyonda rezonans frekansı olarak 5.55 GHz frekansında -17.63 dB S₁₁ değerine sahip iken yapışkan PVC folyo kaplama ve ojeleme ile üretildiğinde ölçüm sonucu olarak, rezonans frekansı 5.59 GHz frekansında S₁₁ değeri -16.62 dB olarak ölçülmüştür.



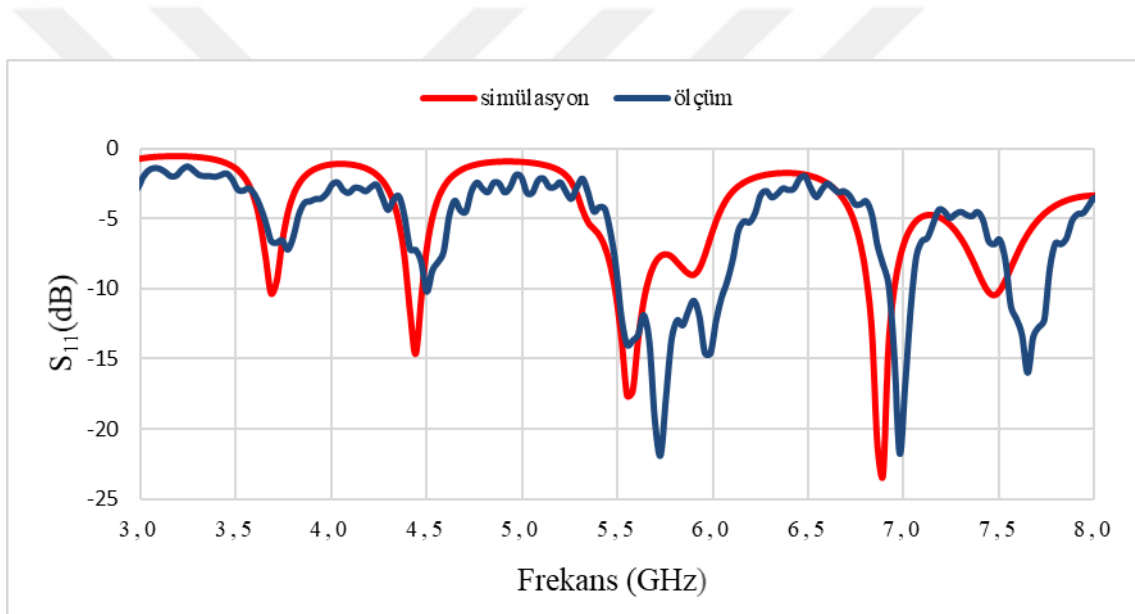
Şekil 4.49 Yapışkan PVC folyo ile maskelenerek üretilen EMŞA'nın simülasyon ve ölçüm sonuçları grafiği

4.8.3. PCB cihazı ile üretilen EMŞA ölçüm sonucu

Burada Bölüm 4.5.4' te bahsedildiği gibi biri 90° diğeri 180° olmak üzere 2 farklı SMA tip konnektör kullanılmıştır. Bunların ayrı ayrı sonuçları incelenmiştir.

4.8.3.1. PCB cihazı ile üretilmiş 90° konnektör kullanılmış EMŞA ölçüm sonucu

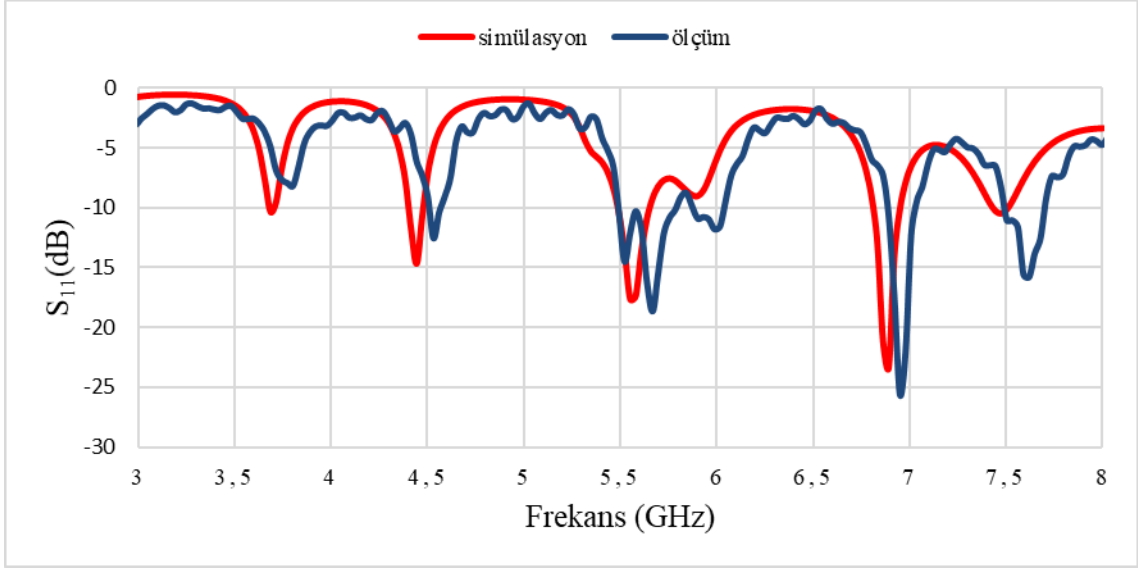
Şekil 4.50' de simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. HFSS ile yapılan simülasyonda rezonans frekansı olarak 5.55 GHz frekansında ve -17.63 dB S_{11} değerine sahip iken 90° konnektör kullanıldığında ve PCB cihazı ile üretildiğinde ölçüm sonucu olarak, rezonans frekansı 5.71 GHz'de S_{11} değeri -21.86 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.50 90° konnektör ve PCB cihazı ile üretilen EMŞA'nın simülasyon ve ölçüm sonuçları grafiği

4.8.3.2. PCB cihazı ile üretilmiş 180° konnektör kullanılmış EMŞA ölçüm sonucu

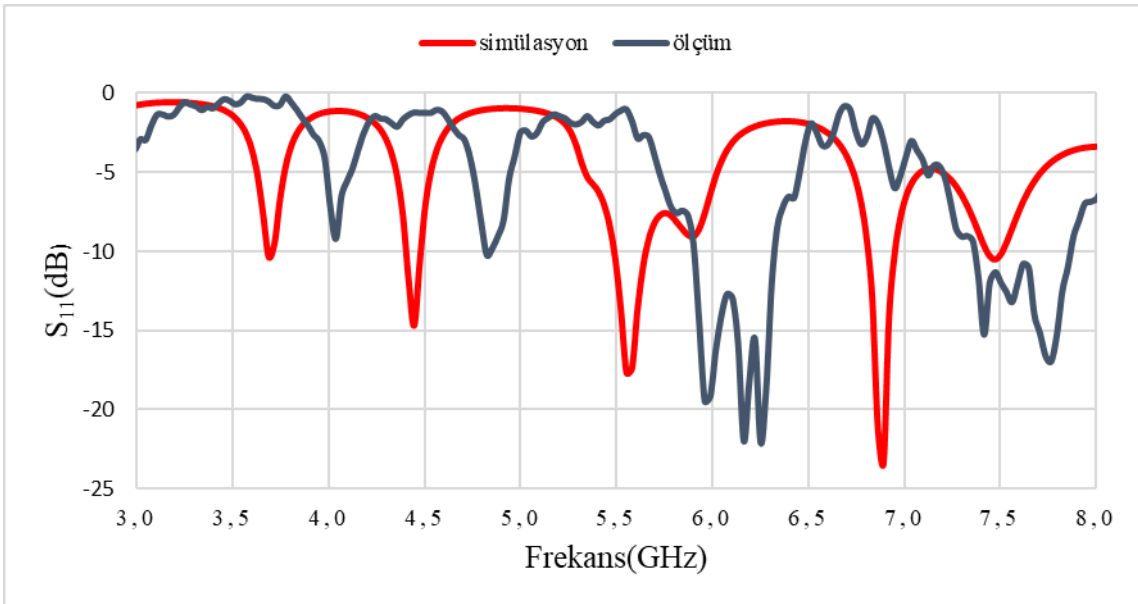
Şekil 4.51' de simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. HFSS ile yapılan simülasyonda rezonans frekansı olarak 5.55 GHz frekansında ve -17.63 dB S_{11} değerine sahip iken 180° konnektör kullanıldığında ve PCB cihazı ile üretildiğinde ölçüm sonucu olarak, rezonans frekansı 5.65 GHz frekansında S_{11} değeri -18.68 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.51 180° konnektör ve PCB cihazı ile üretilen EMŞA' nın simülasyon ve ölçüm sonuçları grafiği

4.8.4. Bakır bant kullanılarak üretilen EMŞA ölçüm sonucu

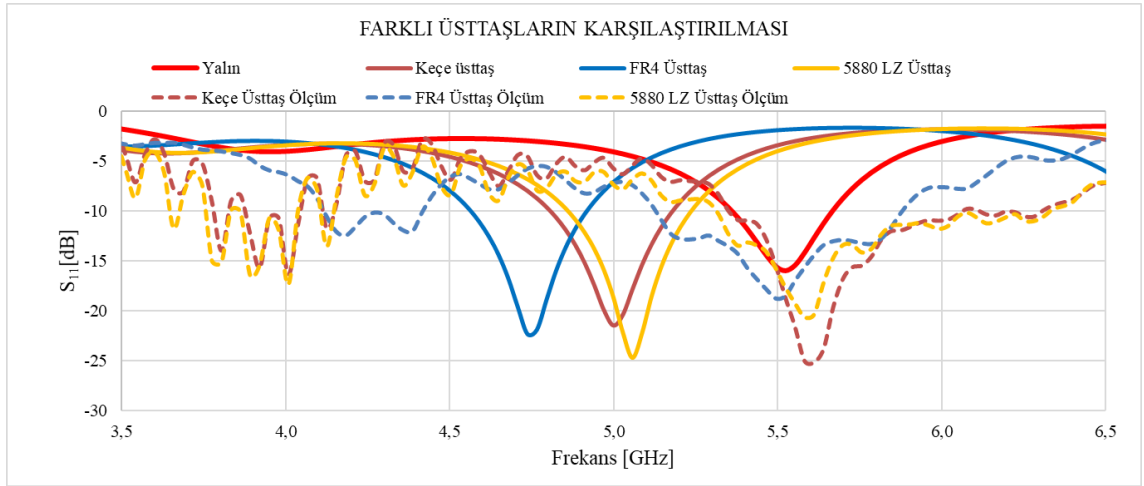
Şekil 4.52' de simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. HFSS ile yapılan simülasyonda rezonans frekansı olarak 5.55 GHz frekansında -17.63 dB S_{11} değerine sahip iken bakır bant ile üretildiğinde ölçüm sonucu olarak, rezonans frekansı 5.96 GHz frekansında S_{11} değeri -19.16 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.52 Bakır bant kullanılarak üretilen EMŞA' nın simülasyon ve ölçüm sonuçları grafiği

4.8.5. Farklı üsttaşlar kullanılan SYMŞA ölçüm sonuçları

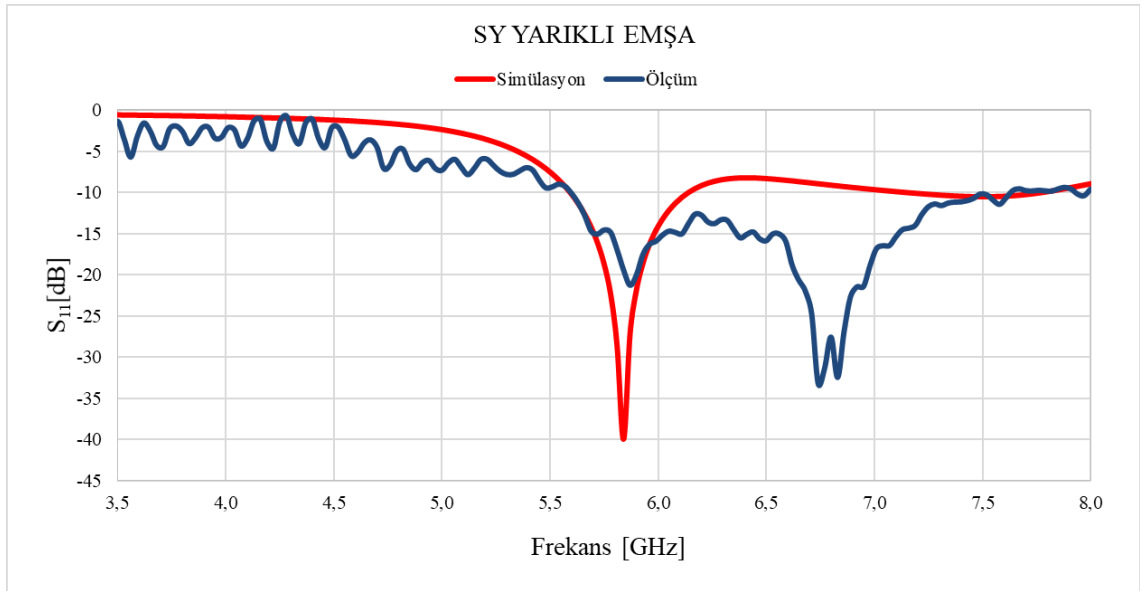
Şekil 4.53' te SYMŞA' ların simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Bölüm 4.3' te SYMŞA' ların tasarımları, Bölüm 4.6' da SYMŞA' ların üretimi verilmiştir. Bu adımlarda da bahsedildiği gibi üretilen antende üsttaş ile yama arasında simülasyonlarda hesaba katılmayan bir hava boşluğu kalmıştır ve simülasyon ile ölçüm sonuçları arasında bu hava boşluğundan dolayı fark olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.53 SYMŞA' ların simülasyon ve ölçüm sonuçları grafiği

4.8.6. SY Yarıkli EMŞA ölçüm sonuçları

Şekil 4.54' te tasarlanan antenin simülasyon ve ölçüm S_{11} değerleri birlikte çizdirilerek karşılaştırılmıştır. S_{11} değeri simülasyonda 5.83 GHz frekansında -16.54 dB, ölçümde 5.87 GHz frekansında -21.27 dB' dir.



Şekil 4.54 SY Yarıkli EMŞA' nın simülasyon ve ölçüm sonuçları grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tezde anten kazancını arttırmak amacıyla bazı yöntemlere başvurulmuştur. Bunlar; birden fazla yamanın uygun konum ve sayıda yerleştirilmesi ile oluşturulan dizi tasarımı, dizi antenin toprak düzlemine farklı boyut, konum ve geometrilerde yarıklar açılarak elde edilen modifiye edilmiş toprak düzlemi, eliptik yama üzerine Selçuklu Yıldızı şekilli yarık açılması ve Selçuklu yıldızı yama antene farklı çeşit ve yüksekliklerde dielektrik üsttaş eklenmesidir.

Dizi anten tasarımında yalın EMŞA ilk aşamada 1x2 ve 1x4 dizi haline getirilmiş, sonrasında 1x4 dizi EMŞA' nın toprak düzlemine yarıklar açılarak kazancın artması sağlanmıştır. Farklı bir EMŞA' nın kenarına Selçuklu Yıldızı şeklinde yarık açılarak kazanç yine arttırılmıştır. Son olarak SYMŞA üzerine keçe, FR-4, RT/Duroid 5880 LZ dielektrik malzemelerinin üsttaş olarak ilave edilmesiyle kazancı en çok arttıran dielektrik üsttaşın, taban malzemesiyle aynı olan, RT/Duroid 5880 LZ olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak yukarıda sıralanan yöntemlerin kazanç arttırmada kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Antenlerde üretim tekniği antenin verimliliği için oldukça önemli bir etkidir. Anten üretiminde kullanılabilecek birden fazla teknik vardır ve gelişen üretim teknikleriyle bunlara yenileri de eklenebilir. Aynı fiziksel yapıya sahip bir antenin farklı tekniklerle üretilmesi anten parametrelerini değiştirebilmektedir. Özellikle tasarım frekansının yükselmesiyle boyutlardaki mm' lik değişimler bile sonucu etkileyebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı bu tezde karşılaştırma amacıyla aynı anten farklı tekniklerle üretilmiştir, bunlar; ütü ile baskı devre, yapışkan PVC ile maskeleme, yapışkan PVC ile kaplama, profesyonel PCB cihazı ve iletken yüzeyler için yapışkanlı bakır bant kullanımı olarak sıralanabilir. Ayrıca PCB cihazıyla üretilen iki eş antene farklı tipte konnektörler (90°, 180° SMA) lehimlenerek, konnektör değişikliğinin anten verilerine etkisinin belirlenmesi için ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Kazanç arttırmak için tasarımları gerçekleştirilen ve farklı yöntemlerle üretilen EMŞA' ların ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.1. EMŞA tasarım sonuçları

	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	Z_{11} (ohm)	VSWR	Kazanç(dB)	Kazanç Artışı	Yönlülük (dB)	Boyut (mm)
<i>Yalın EMŞA</i>	5.75	-17.00	40.22	1.32	5.09	ref.	6.87	33.2 x 35.0
<i>1x2 EMŞA</i>	5.87	-20.03	56.82	1.22	7.10	39%	9.11	76.5 x 49.0
<i>1x4 EMŞA</i>	5.69	-29.60	51.76	1.06	8.81	73%	12.88	157.0 x 93.0
<i>Modifiye toprak düzlemi + 1x4 EMŞA</i>	5.55	-17.63	58.00	1.20	11.11	118%	14.05	157.0 x 93.0






Tablo 5.1’ de kazancı arttırmak için Bölüm 3.3’ te verilen kazanç arttırma yöntemlerinden bazıları kullanılarak tasarlanan EMŞA’ ların sonuçları verilmiştir. Burada en yüksek kazanç, modifiye toprak düzlemlili 1x4 dizi EMŞA ile sağlanmıştır.

Tablo 5.2. SYMŞA simülasyon ve ölçüm sonuçları

	f_r (GHz) simülasyon	f_r (GHz) ölçüm	S_{11} (dB) simülasyon	S_{11} (dB) ölçüm	Kazanç(dB)	Kazanç Artışı
<i>Yalın SYMŞA</i>	5.52	*	-15.94	*	7.92	ref.
<i>SYMŞA+ Keçe üsttaş</i>	4.99	5.61	-21.46	-25.18	8.27	4%
<i>SYMŞA+ FR-4 üsttaş</i>	4.73	5.49	-22.31	-18.72	8.36	5%
<i>SYMŞA+ 5880 LZ üsttaş</i>	5.05	5.58	-24.63	-20.58	9.51	20%

Kazanç arttırmak için başka bir teknik olarak SYMŞA üzerine farklı dielektrik üsttaşlar eklenmiş olup Tablo 5.2’ de sonuçlar karşılaştırılmış olup 5880 LZ üsttaş ile en yüksek kazanç artışı sağlanmıştır. Sonraki tasarımlarda besleme pininin sebep olduğu hava boşluğunu giderecek şekilde bir üretim ya da bu hava boşluğunun da simülasyonda modellenerek gerçeğe en yakın sonuçların alınması planlanmaktadır.

Tablo 5.3. SY Yarıkli EMŞA simülasyon ve ölçüm sonuçları

	f_r (GHz) simülasyon	f_r (GHz) ölçüm	S_{11} (dB) simülasyon	S_{11} (dB) ölçüm	Kazanç(dB)	Kazanç artışı
	6.55	*	-26.05	*	6.3	ref.
	5.32	*	-15.74	*	7.1	12.70%
	5.13	*	-11.30	*	6.2	-1,59%
	5.84	5.87	-39.99	-21.27	7.9	25.40%
	5.84	*	-16.54	*	7.7	22.22%

Tablo 5.3' te, Bölüm 4.4' te tasarımı gerçekleşen antenlerin sonuçları tablo halinde verilmiştir. Burada kazanç arttırmak için EMŞA üzerine SY yarık açılmıştır. Bu yarığın konumu ve boyutuna göre sonuçlar karşılaştırılmış olup en iyi sonuç veren anten kenarına SY yarık açılan anten olup üretimi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak anten kazancı birden çok yöntemle artırılmış olup bu yöntemlerin amaca uygun olduğu gösterilmektedir.

Tablo 5.4 Üretim tekniklerine göre simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

	Simülasyon		Yöntem 1		Yöntem 2		Yöntem 3.a		Yöntem 3.b		Yöntem 4	
	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	f_r (GHz)	S_{11} (dB)
3-4 GHz	3.68	-10.34	3.74	-8.39	3.68	-10.39	3.77	-7.17	3.79	-8.19	4.03	-9.20
4-5 GHz	4.44	-14.66	4.46	-15.49	4.46	-15.22	4.49	-10.17	4.52	-12.57	4.81	-10.21
5-6 GHz	5.55	-17.63	5.45	-20.33	5.59	-16.62	5.71	-21.86	5.65	-18.68	5.96	-19.44
6-7 GHz	6.89	-23.34	6.93	-22.93	6.90	-20.93	6.96	-21.72	6.93	-25.66	5.24	-22.06
7-8GHz	7.47	-10.48	7.55	-10.51	7.59	-13.21	7.62	-15.96	7.59	-15.83	7.40	-15.25

Dipnot:**Yöntem 1:** Ütü ile baskı devre yöntemi kullanılarak üretilen EMŞA,**Yöntem 2:** Yapışkan PVC folyo ile maskelenerek üretilen EMŞA,**Yöntem 3a-b:**Profesyonel PCB cihazı kullanılarak(a-90°konnektör ile, b-180° konnektör ile) üretilen EMŞA,**Yöntem4:** Bakır bant kullanılarak üretilen EMŞA.

Tablo 5.4'te üretilen EMŞA' ların simülasyon ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Burada antenin geri dönüş kaybında -10dB' in altına düşen tüm

frekansların verilmesindeki amaç kullanılan üretim tekniklerini daha rahat kıyaslanması içindir. Bu tabloda Şekil 5.4' teki değişimler % olarak verilmiştir.

Tablo 5.5. Üretim tekniklerine göre simülasyon ve ölçüm arasındaki frekans ve S_{11} değerlerinde % değişim

	<i>Yöntem 1</i>	<i>Yöntem 2</i>	<i>Yöntem 3.a</i>	<i>Yöntem 3.b</i>	<i>Yöntem 4</i>
<i>Frekans değişimi (%)</i>	1.80	0.72	2.88	1.80	7.38
<i>S₁₁ değişimi (%)</i>	15.31	5.72	24.00	5.95	10.26

Tablo 5.5' e bakıldığında simülasyon ve ölçüm arasında en az fark olan üretim tekniğinin Yöntem 2 olduğu gösterilmektedir. Yöntem 1' de FR-4 malzeme yüksek ısıya maruz kalmıştır bundan dolayı bakır yüzeyler deformasyona uğramıştır. Bu sebeple üretilen anten ile simülasyon arasında daha büyük bir fark olduğu düşünülmektedir. Yöntem 3a ve Yöntem 3b' de ise en önemli nokta cihazın bakır yüzeyi kazırken derinlik ayarının yeterli hassasiyette yapılamaması ve dielektrik tabakada küçük de olsa bir miktar kazıma yapılmasıdır. Bundan dolayı ölçüm ile simülasyon sonuçları arasında fark oluştuğu düşünülmektedir. Bu teknikle üretilen iki eş anten arasında tek farklılık kullanılan konnektörlerden birinin 90° SMA, diğerinin 180° SMA olmasıdır ve 180° SMA kullanılan antenin ölçüm sonuçları simülasyonla daha uyumlu olarak elde edilmiştir. Yöntem 4' e bakıldığında besleme hattı gibi ince yerlerde bantta katlanma meydana gelebilmesi, bant ile dielektrik arasında hava boşluğu kalabilmesi, bant yüzeyinin kırılmalara uğrayabilmesi gibi sebeplerden dolayı sonuçların etkilendiği düşünülmektedir.

Buradan anlaşılacağı üzere aynı anten tasarımı; her farklı üretim tekniğinde boyutlardaki küçük farklılıklardan veya malzemelerdeki kalite farklarından dolayı sonuçlar değişiklik gösterebilmektedir, bu sebeple antenin tasarlanması kadar hangi teknikle üretildiği ve nasıl malzemeler tercih edildiği de önem arz etmektedir.

5.2. Öneriler

Tez kapsamında birden çok kazanç artırma yöntemi ve üretim tekniği kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler ile kazancı arttırmanın mümkün olduğu gösterilmiştir. Kazancın en fazla arttığı tasarım %118 kazanç artışı ile yalın antenin 1x4' lük dizi haline gelmesi ve toprak düzleminin modifiye edilmesi olmuştur. Bu tekniklerin yanı sıra daha kaliteli, profesyonel dielektrik malzeme kullanımı ile daha yüksek kazançlı antenlerin tasarlanabileceği de gösterilmiştir FR-4 ile tasarlanan antenin yalın haline göre; RT/Duroid ve RT/Duroid 5880 LZ ile tasarlanan antenlerin yalın hali daha yüksek kazançlı olmuştur.

Tezde kullanılan üretim teknikleri maliyet, el işçiliği ve zaman bakımından karşılaştırıldığında anten üretimine özel taban dielektrik malzemelerinin; lazer; PCB kazıma cihazlarıyla düzgün şekilde işlenebilme zorunluluğu maliyeti arttırmaktadır. Bir PCB cihazını satın almanın maliyeti oldukça fazla olacağı gibi, anteni bir firmaya yaptırmak de küçük boyutlar için bile oldukça maliyetlidir. Yapışkan PVC ile maskelenerek ve bakır bant kullanılarak gerçekleşen üretimde ise malzemenin istenilen boyutlara getirilmesi için kullanılan kesici cihaz daha az ilave bir maliyet oluşturmaktadır, yine de aralarında maliyet açısından en uygun olan üretim şekli ütü ile baskı devre yöntemidir; fakat bununla birlikte üretimi daha zahmetlidir ve anten yüksek ısıya maruz kaldığından dolayı bakır yüzeylerde bozulmalar meydana gelebilmekte bu da antenin performansını etkilemektedir. El işçiliği ve zaman açısından en kolay ve hızlı üretilen anten PCB cihazı kullanılarak üretimi gerçekleşen anten olmuştur, ama kazıma derinliğinin ayarlanamaması simülasyon ve ölçüm sonuçlarını etkilemiştir. Aralarında simülasyon ile en benzer ölçüm sonucuna sahip olan üretim tekniği yapışkan PVC ile maskelenerek üretilen anten olmuştur.

Malzemelerin yurt dışından ithal edilmesinden dolayı döviz kurundan etkilenmesi bununla birlikte tez sürecinin büyük bir kısmının pandemi sürecine denk gelmesi ve tedariklerde yaşanan aksamalardan dolayı, anten üretiminde farklı kalitede ve maliyet bandında dielektrik tabakaların ve konektörlerin kullanılmasının antenin performansını ne derece etkilediğine değinilememiş olup ilerdeki çalışmalarda bu konuların ele alınması planlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Agrawal, A., Vakula, D., & Sarma, N. (2011). Design of elliptical microstrip patch antenna using ANN. *PIERS Proceedings*.
- Al-Naiemy, Y., Elwi, T. A., Khaleel, H. R., & Al-Rizzo, H. (2012). A systematic approach for the design, fabrication, and testing of microstrip antennas using inkjet printing technology. *International Scholarly Research Notices*, 2012.
- Arora, C., Pattnaik, S. S., & Baral, R. (2016). Metamaterial superstrate for performance enhancement of microstrip patch antenna array. *2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*.
- Balanis, C. A. (2015). Antenna theory: analysis and design: *John wiley & sons*.
- Boutayeb, H., & Denidni, T. A. (2007). Gain enhancement of a microstrip patch antenna using a cylindrical electromagnetic crystal substrate. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 55(11), 3140-3145.
- Brás, L., Carvalho, N. B., & Pinho, P. (2013). Circular polarized planar elliptical antenna array. *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*.
- Carr, J. J., & George, W. (2012). Practical antenna handbook. McGraw-Hill Education.
- Cheng, D. K. (1993). Fundamentals of engineering electromagnetics.
- Çetme, E. (2009). Yarıklı Mikroşerit Yama Anten Dizaynı.(Yüksek Lisans). *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Das, S., Chowdhury, P., Biswas, A., Sarkar, P. P., & Chowdhury, S. K. (2014). Analysis of a miniaturized multiresonant wideband slotted microstrip antenna with modified ground plane. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 60-63.
- Drabowitch, S., Papiernik, A., Griffiths, H., Encinas, J., & Smith, B. L. (2010). Modern antennas. *Springer Science & Business Media*.
- Dündar, Ö. (2017). Dizi yama anten tasarımında yapay sinir ağları kullanarak anten parametrelerinin hesaplanması. (Doktora). *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Hasan, M. M., Rahman, Z., Shaikh, R., Alam, I., Islam, M. A., & Alam, M. S. (2020). Design and Analysis of Elliptical Microstrip Patch Antenna at 3.5 GHz for 5G Applications. *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)*.
- Holland, S. (2008). Miniaturization of Microstrip Patch Antennas for GPS Applications. *University of Massachusetts Amherst, Amherst, Massachusetts*.

- Hussain, N., Azimov, U., Jeong, M., Rhee, S., Lee, S. W., & Kim, N. (2020). A high-gain microstrip patch antenna using multiple dielectric superstrates for WLAN applications. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 187-193.
- Josan, S. K., Sohal, J., & Dhaliwal, B. S. (2012). Design of elliptical microstrip patch antenna using genetic algorithms. *2012 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*.
- Jung, Y.-J., Choi, H.-K., Yu, B. A., Kim, J., Lee, C., Ahsan, M. S., & Sohn, I.-B. (2020). Femtosecond laser-assisted fabrication of microstrip patch antenna. *Optical Engineering*, 59(9), 096103.
- Khaleel, H. R., Al-Rizzo, H. M., Abbosh, A. I., & Kishk, A. (2013). Design, fabrication, and testing of flexible antennas. *Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications*, 363-383.
- Kumar, A., Khandelwal, R., Singh, S., Kumar, A., & Makhdumi, A. (2021). A review on gain enhancement techniques of microstrip antenna. *2021 2nd International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*.
- Kütük, H., (2012). 3.3GHz Mikro şerit Anten Tasarımı ve Farklı Besleme Yöntemleri için Analiz.(Yüksek Lisans Tezi). *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Li, P., Liang, J., & Chen, X. (2006). Study of printed elliptical/circular slot antennas for ultrawideband applications. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 54(6), 1670-1675.
- Li, Q., & Shen, Z. (2002). Inverted microstrip-fed cavity-backed slot antennas. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 1, 98-101.
- Llombart, N., Neto, A., Gerini, G., & de Maagt, P. (2005). Planar circularly symmetric EBG structures for reducing surface waves in printed antennas. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 53(10), 3210-3218.
- Lo, Y. T., & Lee, S. W. (2013). *Antenna Handbook: theory, applications, and design*. Springer Science & Business Media.
- Mahouti, M. (2017). Seramik Malzeme Tabanlı Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi). *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Mahouti, P. (2019). 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisi İle Bir Mikroşerit Yama Antenin Maliyet Etkin Üretimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 473-479.
- Mandal, K., & Sarkar, P. P. (2013a). A compact high gain microstrip antenna for wireless applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 67(12), 1010-1014.

- Mandal, K., & Sarkar, P. P. (2013b). High gain wide-band U-shaped patch antennas with modified ground planes. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 61(4), 2279-2282.
- Mao, T., & Zhang, M. (2021). A Low-Profile Dual-Band Elliptical Patch Antenna Suitable For WIFI With Bandwidth. *2021 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*.
- Masihi, S., Panahi, M., Bose, A., Maddipatla, D., Hanson, A., Narakathu, B., . . . Atashbar, M. (2019). Rapid prototyping of a tunable and compact microstrip antenna by laser machining flexible copper tape. *2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*.
- Mondal, P. (2020). Design of High Gain Circularly Polarized 2×2 Single Feed Elliptical Patch Antenna Array. *2020 URSI Regional Conference on Radio Science (URSI-RCRS)*.
- Mythili, P., & Das, A. (1998). Simple approach to determine resonant frequencies of microstrip antennas. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 145(2), 159-162.
- Oğuz, G. K. (2020). Türkiye'de Yama Anten Üretimi ve Prototiplemedeki Zorluklar. *İstanbul Ticaret Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*.
- Park, S., Kim, C., Jung, Y., Lee, H., Cho, D., & Lee, M. (2010). Gain enhancement of a microstrip patch antenna using a circularly periodic EBG structure and air layer. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 64(7), 607-613.
- Pozar, D., & Schaubert, D. (1995). *Microstrip antennas*, IEEE Press. *New York*.
- Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. (2007). *Antennas and propagation for wireless communication systems: John Wiley & Sons*.
- Sayem, S. M., & Esselle, K. P. (2021). A Robust, Flexible and Frequency Reconfigurable Antenna with Flexible Superstrate and Substrate. *2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*.
- Shah, M. M., Suaidi, M., Aziz, M. A., Rose, M. C., Kadir, M. A., Ja'afar, A., & Rahim, M. (2008). Design of 1×2 , 1×4 , and 2×2 Dual Polarization Microstrip Array Antenna. *2008 6th National Conference on Telecommunication Technologies and 2008 2nd Malaysia Conference on Photonics*.
- Shen, L. (1981). The elliptical microstrip antenna with circular polarization. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 29(1), 90-94.
- Tansarııkaya, İ. (2007). Geniş Bantlı Yama Anten Tasarımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Toktas, A., Bicer, M., Akdaglı, A., & Kayabasi, A. (2011). Simple formulas for calculating resonant frequencies of C and H shaped compact microstrip antennas

obtained by using artificial bee colony algorithm. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 25(11-12), 1718-1729.

- Toktaş, A., & Akdağ, A. (2015). Designs of Multiple Input Multiple Output Antennas for GSM, LTE, WIMAX and WLAN Standards. *International Journal of Scientific and Technological Research ISSN 2422-8702 Vol 1, No.1, 2015*
- Uzer, D. ve Gültekin, S. S., (2012). A New Seljuk Star Shape Microstrip Antenna Design, *Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (Piers 2012)*, 574-577.
- Uzer, D. (2016). Geniş band mikroşerit yama anten tasarımları için uygun yöntemlerin araştırılması. (Doktora). *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Uzer, D., Gültekin, S. S., Top, R., Uğurlu, E., & Dündar, Ö. (2016). A Comparison of Different Patch Geometry Effects on Bandwidth. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*(Special Issue-1), 421-423.
- Yeap, S. B., & Chen, Z. N. (2010). Microstrip patch antennas with enhanced gain by partial substrate removal. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 58(9), 2811-2816.
- Yu, Y.-H., Zong, Z.-Y., Wu, W., & Fang, D.-G. (2020). Dielectric slab superstrate electrically small antennas with high gain and wide band. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 19(9), 1476-1480.
- Yu, Y., Zhang, H., & Shamim, A. (2019). Highly Miniaturized Microstrip Antenna with Slots and a Superstrate for RFID Applications. *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting.*