

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OPTİKSEL SAYDAM ANTENLERİN TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU

Yasemin DEMİRHAN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2019**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Yasemin DEMİRHAN tarafından hazırlanan “Optiksel Saydam Antenlerin Tasarımı ve Karakterizasyonu” adlı tez çalışması 06/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Hamza KURT
TOBB Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ
Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

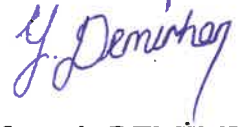
Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdür Vekili

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

06/09/2019



Yasemin DEMİRHAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİKSEL SAYDAM ANTENLERİN TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU
Yasemin DEMİRHAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Bu çalışmada güneş hücrelerinde, akıllı saat ve dokunmatik ekran gibi alanlarda kullanılmak üzere çeşitli saydam antenler tasarlanmıştır. 5.8 GHz çalışma frekansında saydam alttaşı yama anten CST Studio Suite ve Ansys HFSS benzetim programlarında tasarlanarak anten karakteristik özellikleri hesaplamalı olarak elde edildikten sonra Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Mikrodalga İleri Araştırma Laboratuvarında fotolitografi yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen antenin deneysel ölçümleri alınarak simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca bakır yerine ITO (Indium Tin Oxide) kullanılarak 5.9 GHz frekansında optiksel saydam yama anten tasarlanmış ve elektron demeti püskürtme yöntemiyle büyütülerek üretilmiştir. Üretilen antenin geri dönüş kaybı ve voltaj dalga oranı ölçümü alınarak simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Daha sonra UV-VIS-NIR Spektrofotometre ile optiksel geçirgenlik analizi yapılmıştır. Diğer bir saydam anten çalışması olarak, 3 GHz çalışma frekansında çeyrek dalga dönüşümlü mikroşerit yama antenin bakır yama düzlemi metalik ızgaralar haline getirilerek % 95 optiksel saydam elde edilmiştir. Aynı şeffaf alttaş (akrilik) ve boyutta olan sıradan mikroşerit yama anten ve optiksel saydam ızgara anten, CST Studio Suite ve Ansys HFSS benzetim programlarında geri dönüş kaybı, bant genişliği, voltaj dalga oranı, kazanç, verimlilik gibi anten karakteristikleri simüle edilerek karşılaştırılmıştır. Daha sonra 5.8 GHz çalışma frekansında çalışan 200 nm ITO kalınlıklı kuvars saydam alttaşı tek katmanlı saydam anten tasarlanmıştır. Gümüş kalınlığı sabit kalmak suretiyle farklı ITO kalınlıklarda çok katmanlı ITO-10 nm gümüş-ITO yapısı tasarlanarak CST Studio Suite programında anten karakteristik sonuçlarına, OptiLayer yazılım programında ise geçirgenlik, yansıma, soğurma gibi optik karakteristiklerine bakılarak ITO için en uygun kalınlık belirlenmiştir. 40 nm ITO kalınlığı uygun görülerek tek katmanlı saydam anten ile anten ve optik karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Saydam antenlerin anten ve optik karakteristik sonuç grafikleri incelenmiştir.

Eylül 2019, 87 sayfa

Anahtar Kelimeler: Iızgara anten, mikroşerit yama anten, optiksel saydam, bant genişliği, anten kazancı

ABSTRACT

Msc. Thesis

DESIGN AND CHARACTERIZATION OF OPTICALLY TRANSPARENT ANTENNAS

Yasemin DEMİRHAN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Barış AKAOĞLU

In this study, various transparent antennas are designed to be used in solar cells, smart watch and touch screen areas. Transparent substrate patch antenna at 5.8 GHz operating frequency is designed in CST Studio Suite and Ansys HFSS simulation programs and the antenna characteristics are calculated computatively and then produced by photolithography method in the Microwave Advanced Research Laboratory of the University of Ankara. Experimental measurements of the produced antenna are compared with the simulation results. In addition, ITO (Indium Tin Oxide) instead of copper optically transparent patch antenna is designed and produced by electron beam spraying method. The return loss and voltage wave ratio measurement of the produced antenna is measured and compared with the simulation results. Then, the optical transmittance analysis is performed with UV-VIS-NIR Spectrophotometer. As another transparent antenna study, the copper patch plane of the quarter wave transform microstrip patch antenna at 3 GHz operating frequency is transformed into metallic grids to obtain 95% optical transparency. Ordinary microstrip patch antenna and optical transparent grid antenna, which are the same transparent substrates (acrylic) and size, are compared by simulating antenna characteristics such as return loss, bandwidth, voltage standing wave ratio, gain, efficiency in CST Studio Suite and Ansys HFSS simulation programs. Then, a single layer transparent antenna with 200 nm ITO thickness quartz transparent substrate is designed which operates at 5.8 GHz operating frequency. The ITO-10 nm silver-ITO structure of different ITO thicknesses are designed by keeping the silver thickness constant and the optimum characteristics for ITO are determined by considering antenna characteristic results in CST Studio Suite program and optical characteristics such as transmittance, reflection, absorption in OptiLayer software program. The ITO thickness of 40 nm is considered appropriate and the single layer transparent antenna was compared with the antenna and optical characteristics. The antenna and optical characteristic result graphs of the transparent antennas is examined.

September 2019, 87 pages

Key Words: Mesh antenna, microstrip patch antenna, optically transparent antenna, bandwidth, antenna gain

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda bana öncülük eden ve fikir veren danışman hocam Prof.Dr. Barış AKAOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), tez çalışmam için saydam anten üretimini sağlayan Selçuk SEYHUN'a, çalışmalarına yardımcı olan hocalarım Prof.Dr.S.Tülay SERİN (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), Dr. Sultan CAN'a (Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı), arkadaşlarım E.Uzay KARAKAYA ve M.Suphi GÜLSU'ya, benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve bu süreç boyunca zor zamanlarımda destek olan dayım Kemal ULUTAŐ'a ve ağabeyim Mustafa Oğuzhan DEMİRHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yasemin DEMİRHAN

Ankara, Eylül 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1Antenler.....	5
2.2 Anten Çeşitleri.....	8
2.3 Anten Parametreleri	12
3. MİKROŞERİT ANTEN BESLEME TEKNİKLERİ	20
3.1 Mikroşerit Besleme	20
3.2 Koaksiyel Besleme.....	21
3.3 Yakınlık Kuplajlı Besleme.....	22
3.4 Açıklık Kuplajlı Besleme	23
4. MİKROŞERİT YAMA ANTEN YAPILARI VE ÖZELLİKLERİ	24
4.1 Temel Karakteristikleri	24
4.2 Analiz Yöntemleri	27
5. ANTEN TASARIMI VE ANALİZİNDE KULLANILAN BENZETİM PROGRAMLARI.....	33
5.1 Ansoft HFSS Programı (Ansoft Yüksek Frekans Yapı Simülatörü)	33
5.2 CST Studio Suite Programı (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi).....	34
5.3 OptiLayer.....	35
6. OPTİKSEL SAYDAM ANTENLER	36
6.1 Optiksel Saydam Antende Kullanılan Malzemeler.....	39
6.2 Optik Saydam Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları.....	41
6.3 İndiyum Kalay Oksit (ITO)	41
6.4 Fresnel Eşitlikleri	43
6.6 Fotolitografi Yöntemi.....	47

7. BULGULAR VE TARTIŞMA	50
7.1 Mikroşerit Yama Anten ve Optiksel Saydam Izgara Anten Tasarımı	50
7.2 Tek ve Çok Katmanlı Optiksel Saydam Mikroşerit Yama Antenlerin Tasarımı	66
8. SONUÇ.....	81
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ.....	87



SİMGELER DİZİNİ

AgHT	Polyester film katkılı gümüş
c	Boşlukta ışık hızı
E	Elektrik alan vektörü
H	Manyetik alan siddeti
L	Anten yama uzunluğu
S	Poynting vektörü
S ₁₁	Geri dönüş kaybı
Z _a	Antenin giriş empedansı
Z ₀	Anten iletim hattının karakteristik empedansı
Z _L	Yük empedansı
W	Anten yama genişliği
λ	Dalga boyu
ε	Dielektrik sabiti

Kısaltmalar

CST	Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi (Computer Simulation Technology)
EM	Elektromanyetik
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)
HFSS	Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (High Frequency Structural Simulator)
IEEE	Elektrik Ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
ITO	İndium Kalay Oksit (Indium Tin Oxide)
MM	Metal Örgü (Metal mesh)
nm	Nanometre
RL	Geri Dönüş Kaybı (Return Loss)
SI	Uluslararası Standart
SnO ₂	Kalay Oksit
SPR	Yüzey Plazma Rezonansı (Surface Plasmon Resonance)
TCO	Saydam İletken Oksit (Transparent Conductive Oxide)
TE	Enine Elektrik (Transverse Electric)
TM	Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
VSWR	Voltaj Dalga Oranı (Voltage standing wave ratio)
VNA	Vector Network Analyzer (Vektör Ağ Analizör)
ZnO	Çinko Oksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Bir geçiş cihazı olarak anten	7
Şekil 2.2 Antenin iletim hattının Thevenin eşdeğeri modellenmesi	8
Şekil 2.3 Tel antenler	8
Şekil 2.4 Açıklık anten çeşitleri	9
Şekil 2.5 Dikdörtgen ve dairesel mikroşerit yama antenler	10
Şekil 2.6 Mikroşerit yama ve yarık dalgı kılavuzu dizisi antenler	10
Şekil 2.7 Tipik yansıtıcı anten konfigürasyonları	11
Şekil 2.8 Çeşitli mercek antenler	12
Şekil 2.9 Işıma deseninin küresel koordinatlarda gösterimi	17
Şekil 2.10 Işıma lobları	17
Şekil 2.11 Verici moddaki anten ve Thevenin eşdeğeri.....	19
Şekil 3.1a) Mikroşerit beslemeli çeyrek dalgı dönüşümlü anten b) İçerden beslemeli anten.....	21
Şekil 3.2 Koaksiyel besleme	22
Şekil 3.3 Yakınlık kuplajlı besleme	23
Şekil 3.4 Açıklık kuplajlı besleme yöntemi	23
Şekil 4.1 Mikroşerit anten ve koordinat sistemi.....	25
Şekil 4.2 Mikroşerit antenin yama çeşitleri.....	26
Şekil 4.3 Mikroşerit hat, elektrik alan, efektif dielektrik sabiti	28
Şekil 4.4 Mikroşerit dikdörtgen yama antenin fiziksel ve efektif uzunlukları.....	29
Şekil 5.1 Ansys HFSS programının kullanıcı ara yüzü.....	34
Şekil 5.2 CST Studio Suite programının Mikrodalgı Modülü kullanıcı ara yüzü.....	34
Şekil 5.3 OptiLayer yazılım programının ara yüzü.....	35
Şekil 6.1 Cubesat.....	37
Şekil 6.2 Optiksel saydam anten entegre edilmiş akıllı saat (Hong,2017).....	38
Şekil 6.3 Sol-jel daldırma tekniğı ile kaplanmış ITO ince filmi	42
Şekil 6.4 İki farklı ortamda ışığın kırılması	44
Şekil 6.5 Ara yüzeye gelen elektrik alan vektörleri	44
Şekil 6.6 Yüzey plazma rezonansı	47
Şekil 6.7 Pozlanma için kullanılan laboratuvarındaki cihazlar	48
Şekil 6.8 Çeker ocakta bakırın kimyasal ile çözünmesi.....	49
Şekil 7.1 Cst programında tasarlanan bakırlı yama antenin önden ve arkadan görünüşü	50
Şekil 7.2 Şeffaf akrilik alttaş.....	51
Şekil 7.3 Üretilen yama antenin önden ve arkadan görünüşü.....	51
Şekil 7.4 Ölçümü alınan Network Analizör aleti	52
Şekil 7.5 Bakırlı yama anten S11 sonuçları	52
Şekil 7.6 Bakırlı yama anten VSWR sonuçları.....	53
Şekil 7.7 Bakırlı yama antenin CST programındaki üç boyutlu grafiğı	53
Şekil 7.8 Antenin boyutu	54
Şekil 7.9 Maskeleyen bataryası.....	55
Şekil 7.10 Kaplama işleminden sonraki hali.....	55

Şekil 7.11 Üretilen optiksel saydam anten	56
Şekil 7.12 Direnç ölçümü yapılan cihaz	56
Şekil 7.13 Üretilen saydam antenin S11 ölçüm sonucu.....	57
Şekil 7.14 Üretilen saydam antenin VSWR ölçüm sonucu.....	57
Şekil 7.15 Saydam antenin Cst programında tasarlanan 3 boyutlu kazanç grafiği	58
Şekil 7.16 Optiksel saydam antenin geçirgenlik grafiği	59
Şekil 7.17 HFSS programında tasarlanan mikroşerit yama antenin a) önden ve b) arkadan görünüşü	60
Şekil 7.18 CST programında tasarlanan mikroşerit yama antenin a) önden ve b) arkadan görünüşü	61
Şekil 7.19 HFSS programında tasarlanan optiksel saydam antenin a)önden ve b) arkadan görünüşü	61
Şekil 7.20 CST programında tasarlanan optiksel ızgara antenin önden görünüşü.....	61
Şekil 7.21 Optiksel saydam ızgara antenin boyutu	62
Şekil 7.22 CST veHFSS programlarında tasarlanan mikroşerit yama anten ve optiksel saydam ızgara antenin S_{11} sonuçları	62
Şekil 7.23Mikoşerit yama anten ve optiksel saydam antenin CST v e HFSS programındaki VSWR sonuçları	63
Şekil 7.24CST programında tasarlanan mikroşerit yama anten üç boyutlu kazanç grafiği	64
Şekil 7.25CST programında tasarlanan Optiksel saydam ızgara anten üç boyutlu kazanç grafiği	65
Şekil 7.26 Tek katmanlı ITO anten yapısı	67
Şekil 7. 27 Tek katmanlı ve çok katmanlı saydam antenin boyutu.....	68
Şekil 7.28CST programında tasarlanan tek ve çok katmanlı antenin a) önden veb) arkadan görünüşü	68
Şekil 7.29 Çok katmanlı anten yapısı.....	69
Şekil 7.30 Çok katmanlı optiksel saydam antenlerin optiksel geçirgenlik grafikleri	70
Şekil 7.31Çok Katmanlı optiksel saydam antenlerin yansıma grafikleri	70
Şekil 7.32 Çok katmanlı optiksel saydam antenlerin soğurma grafikleri	71
Şekil 7.33Çok katmanlı saydam antenlerin S_{11} grafikleri	72
Şekil 7.34Çok katmanlı saydam antenlerin VSWR grafikleri	73
Şekil 7.35 Tek Katmanlı ve çok katmanlı ITO optiksel saydam antenlerin S_{11} grafikleri	74
Şekil 7.36Tek Katmanlı ve çok katmanlı ITO optiksel saydam antenlerin VSWR grafikleri	75
Şekil 7.37 Tek katmanlı ITO optiksel saydam antenin üç boyutlu kazanç grafiği	76
Şekil 7.38 40 nm ITO kalınlıklı optiksel saydam antenin üç boyutlu kazanç grafiği	76
Şekil 7.39Tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenlerin optiksel geçirgenlik grafikleri	78
Şekil 7.40Tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenlerin optiksel geçirgenlik grafikleri	78
Şekil 7.41Tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenlerin soğurma grafikleri	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 7.1 Bakırlı yama antenin sonuç tablosu	54
Çizelge 7.2 Üretilen saydam antenin sonuçları	58
Çizelge 7.3 Mikroşerit yama anten ve optiksel saydam anten karakteristik sonuçları ...	65
Çizelge 7.4 Tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenlerin karakteristik sonuçları	77



1. GİRİŞ

Anten teknolojisinin belirli bir olgunluğa erişmesi tasarımlarda küçük boyut, yüksek verimlilik, sistemlere entegre edilebilirlik, saydamlık gibi bir çok özelliğin aranmasına sebebiyet vermiş ve bu gereksinimler son yıllarda optiksel saydam antenlere olan ilginin artmasına sebep olmuştur. Uydular, dokunmatik ekranlar, güneş panelleri, giyilebilir cihazlar gibi sivil ve askeri uygulamalarda sistemlere entegre edilebilirlik, verimliliği artırma ve/veya sabit kalmasını sağlama gibi avantajları sebebi ile saydam antenlere gereksinim duyulmuştur. Saydam antenleri sözü geçen avantajları sebebi ile gelecek yıllarda kablosuz iletişim sistemleri için temel yapı taşlarından biri olması öngörülmektedir. Tablet, PDA (personal digital assistant) , akıllı telefonlar gibi otonom cihazların günümüzdeki kullanım sıklığı da düşünüldüğünde saydam antenlerin kendilerine birçok uygulama alanı bulması kaçınılmazdır. Bu günlerde, şeffaf cihazlardaki en büyük gelişme, akıllı ekran camı gibi donanımlar için teknolojinin gelişimi olmuştur. Buna göre, araştırmacılar daha şeffaf ve iletken malzemelerle daha fazla ilgilenmeye başlamışlardır. Şeffaf elektrotlar, saydam elektronik alanında da dikkat çekmiştir. Optik olarak şeffaf cihazların avantajı, ekran panelleri, akıllı pencereler ve akıllı gözlükler gibi temiz yüzeylere entegre edilebilir olmasıdır. Bu nedenle, şeffaf mobil aygıtlara uygulamak için, saydam bileşenlere ihtiyaç duyulmuştur.

Optiksel saydam antenlerin optiksel geçirgenliklerinin ve mikrodalga bölgesinde iletkenliklerinin yüksek olması istenilir. Bu nedenle yapılan uygulamalardan biri görünür bölgede şeffaf olmayan sıradan mikroşerit antenlerin bakırlı yama düzleminin metalik ızgaralar şeklinde tasarlanmasıdır. Metalik ızgara antenler yüksek iletkenlik, düşük direnç gösterir. Elektriksel özelliğinden dolayı şeffaf antenler için uygun olduğu öngörülmüştür. Alttaşı saydam olan akrilik, kuvars ve PET gibi malzemeler kullanılarak mikroşerit yama antenin bakırlı yama yüzeyi ince ızgaralar haline getirilerek hem şeffaflık hem de bakır miktarı azaltılarak hafiflik sağlanmaktadır. Uzay araştırmaları için kullanılan Cubesat gibi küçük uydulara entegre edilen optiksel saydam ızgara antenler uydu yükünü azaltmak için hafiflik istenilen bir durumdur. Küçük uyduların güneş panellerine entegre edilerek kullanılan optiksel saydam ızgara antenler hem enerji hasatlamakta hem de kablosuz iletişim sağlamaktadır. Saydam antenler bu hasatlamayı

bozmamaktadır. Aynı zamanda askeri alanda elektromanyetik parazitliği, EM radyasyon tehlikelere ve kızılötesi camlarda istenmeyen ışımalara karşı korumak için de kullanılmaktadır (Kang, 2017). Literatürde sunulan bu antenler ızgara boyutları ve ızgaralar arası mesafeler üretime yönelik optimize olmamakta beraber çok geniş veya yüksek hassasiyet gerektirecek şekilde küçük bırakılmıştır.

Bu tez kapsamında 5.8 GHz çalışma frekansında bakırlı yama anten Ansys HFSS ve CST Studio Suite benzetim programlarında tasarlanarak simülasyonu yapılmıştır. Alttaş olarak saydam ve elastik olan akrilik bant, iletken olarak 0.07 kalınlığında bakır bantlı yama anten fotolitografi yöntemiyle Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Mikrodalga İleri Araştırma Laboratuvarında üretilmiştir. Üretilen anten Rohde & Schwarz VNA (Vector Network Analyser) Network Analizör cihazı ile geri dönüş kaybı ve voltaj dalga oranı ölçümü alınarak simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Topraklama düzlemi ve saydam alttaş arasına güneş hücreleri yerleştirildiğinde enerji hasatlama ve kablosuz iletişim sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra 5.9 GHz çalışma frekansında CST Studio Suite benzetim programında ITO filmlili optiksel saydam anten tasarlanmıştır. Elektron demeti püskürtme yöntemiyle temiz odada Roketsan A.Ş tarafından kaplanarak üretilmiştir. Üretilen antenin geri dönüş kaybı ve voltaj dalga oranı Rohde & Schwarz VNA (Vector Network Analyser) Network Analizör cihazı ölçülerek simülasyon sonucuyla karşılaştırılmıştır. Optiksel geçirgenliği ise UV-3600 UV-VIS-NIR Spektrometre cihazı ölçüm sonucunda % 82 olarak ölçülmüştür.

Diğer bir bakırlı anten çalışması olanızgara yamalı saydam anten tasarımı yapılmıştır. Tasarımda alttaş olarak saydam ve esnek olan akrilik seçildi ve her bir ızgaranın genişliği 30μ olacak şekilde tasarlanarak %95 optiksel geçirgenlik elde edilmiştir. Böylece hem saydamlık hem hafiflik sağlanmıştır. 3 GHz (WLAN bandı) çalışma frekansında tasarlanan aynı malzeme ve boyutta olan çeyrek dalga dönüşümlü sıradan mikroşerit yama anten ile metalik ızgaralar haline getirilen optiksel saydam ızgara antenler Ansys HFSS ve CSTStudio Suite benzetim programlarında tasarlanarak simülasyonu yapılan anten karakteristik sonuçları karşılaştırılmıştır. Optiksel saydam ızgara antenin geçirgenliği literetürdeki benzer çalışmalardaki formül ile teorik olarak hesaplanmıştır.

Şeffaf iletken oksitler (TCO- (Transparent Conductive Oxide) güneş pilleri için şeffaf kontaklar, optoelektronik cihazlar, düz panel ekranlar, sıvı kristal cihazlar, dokunmatik ekranlar, OLED, EMI ekranlama ve otomobil camı buz çözme ve buğulanmayı içeren çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler bir asırdan beri kullanılmasına rağmen 1970'lerin sonlarından bu yana yoğun bir şekilde geliştirilmiştir. Kullanım alanları açısından geniş yelpazeye sahiptir. Optiksel saydam antenler gibi şeffaf saydam elektronik bileşenlerin gelişimi için önemli içerik olarak ortaya çıkmıştır. Bu konuda ITO(İndium Tin Oxide) önemli rol oynamaktadır.

ITO filmi kalay oksitle katkılandırılmış İndium Oksittir. İndiyum kalay oksit (ITO) en yaygın kullanılan ve geliştirilen şeffaf iletken oksit malzemedir ve hala TCO'ların "altın standardı"dır. İnce film ITO uygulamaları bir dizi ekran için şeffaf elektrotlar, fotovoltaik ve sensör uygulamaları, saydam ısıtıcılar ve saydam elektronik uygulamalar içerir (Porch,2004). ITO filminin elektriksel iletkenlik ve optiksel saydamlığı diğer yarıiletkenlere nazaran daha yüksektir. Görünür bölgede optiksel geçirgenliğinin yüksek olması saydam antenler için tercih sebebidir. 8×10^5 siemens/m iletkenliğe %80'in üzerinde optiksel iletme sahiptir. Son zamanlarda ITO ince filmlili optiksel saydam antenlere rağbet artmıştır.

Tezin diğer bir çalışması olan ITO ince filmlili tek ve çok katmanlı saydam antenler 5.8 GHz (WLAN) çalışma frekansında tasarlanarak CST Studio Suite programlarında anten karakteristikleri simüle edilmiştir. Alttaşı saydam ve sıcaklığa dayanıklı olan kuvars ve iletken olan yama, besleme hattı ve topraklama yüzeyleri ITO filminden oluşmaktadır. Tek katmanlı saydam anten için yüzey katman etkisini azaltmak adına ITO kalınlığı 200 nm seçilerek yüksek çalışma frekansında tasarlanmıştır. Seçilen malzemelerin özelliklerine ve kalınlıklarına bağlı olarak iyi anten karakteristiği ve yüksek optiksel iletim elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede görünür bölgede şeffaflık, aynı zamanda kablosuz iletişim sağlanmaktadır. Çok katmanlı saydam anten olarak ITO- gümüş- ITO sandiviç yapısı tasarlanmıştır. Literatürdeki çok katmanlı saydam anten çalışmaları referans alınarak 10 nm gümüş kalınlığı sabit kalmak şartıyla 40 nm, 45 nm, 50 nm farklı ITO kalınlıkları tasarlanarak optik ve anten karakteristik sonuçları karşılaştırılmıştır. Görünür bölgede yüksek geçirgenlik, düşük yansıma ve soğurma

gösteren saydam anten tasarlamak amaçlanmıştır. Bu nedenle çok katmanlı saydam anten için 40 nm ITO kalınlığı uygun bulunmuştur. Tek katmanlı saydam anten ile çok katmanlı 40 nm ITO- 10 nm gümüş- 40 nm ITO yapılı saydam antenin Optilayer programında optik parametreleri, CST Studio Suite programında anten parametreleri analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tek katmanlı antende anten parametreleri, çok katmanlı antende ise optik özellikleri daha iyi olan tasarımlar yapılmıştır.

Katmanlı yapı ile gelen ışığın etkileşmesi sonucu yüzey plazma rezonansı ile görünür bölge spektrumun belli dalga boylarında, kritik kalınlıklarda optiksel iletim maksimum olmaktadır. Belirli kritik kalınlıklar sayesinde optiksel iletim % 90'ın üzerine çıkmaktadır. Literatürde buna benzer anten ve optoelektronik çalışmaları mevcuttur. Her iki anten için optiksel iletim % 90'ın üzerindedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Antenler

Antenler, elektromanyetik dalgaları yayan veya alan cihazlardır. Kaynaktan aldığı gücü çevresine elektromanyetik dalga olarak ileten antenlere verici anten denir. Çevresindeki elektromanyetik dalgaları ile uyarılarak sisteme güç aktaran antenlere ise alıcı anten denir. 1857-1894 yıllarında Alman Fizikçi Heinrich Rudolf Hertz tarafından bilinen ilk anten deneyi yapılarak antenlere yönelik çalışmalar başlanmış ve çalışmalarda geçen frekans birimi ise bu deneylerden sonra SI birim sisteminde (Uluslararası Standart) Hertz adını almıştır. 1887'de radyo dalgalarını üretmek ve tespit etmek için bir sistem kurmuştur. Onun orjinal deneyinin amacı elektromanyetik dalgalarının varlığını göstermektir. Hertz laboratuvarında çevreye elektromanyetik dalga yayacak şekilde bir rezonans devresi tasarlamıştır. Devreden yayılan elektromanyetik dalga, uzak mesafede bulunan diğer ikinci devreyi uyardığını göstermiştir.

Vericide, değişken bir gerilim kaynağı iki iletken toplu bir dipol kaynak ile bağlanmıştır. Toplar arasındaki boşluk, devre rezonansının yanı sıra kıvılcım oluşumu için ayarlanabilmektedir. Voltaj belirli bir değere yükseldiğinde kıvılcım veya deşarj bozulması oluşmuştur. Alıcı, özdeş iki iletken toplu basit bir ildir. Toplar arasındaki boşluk etkili bir kıvılcım almak için dikkatli olarak ayarlanmıştır. Cihazı daha net bir kıvılcım görebilmek için karanlık bir kutunun içine yerleştirilmiştir. Yaptığı deneyde, vericide bir kıvılcım oluştuğunda alıcı boşluğunda da kıvılcım oluştuğunu gözlemlemiştir. Böylece bilginin, A bölgesinden (verici) B bölgesine (alıcı) kablosuz olarak elektromanyetik dalgalar ile iletildiğini kanıtlamıştır.

Hertz'in deneyindeki bilgiler aslında kıvılcım oluşup oluşmaması ile meydana gelen çift dijital formdaydı. Bu deney ilk dijital kablosuz sistem olarak kabul edilmiştir. Bu sistemde en iyi bilinen dipol ve döngü antenden oluşmaktadır. Bunun nedenle dipol anten Hertz anten olarak da adlandırılmaktadır. Heinrich Hertz laboratuvarında deneylerinin yaparken uygulamada hangi radyo dalgalarının kullanabileceğini tam

olarak bilmiyordu. İtalyan mucit Guglielmo Marconi 1874-1937 yılları arasında telsiz telefon ve telgrafla tanışılmasıyla kablosuz iletişim geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir.

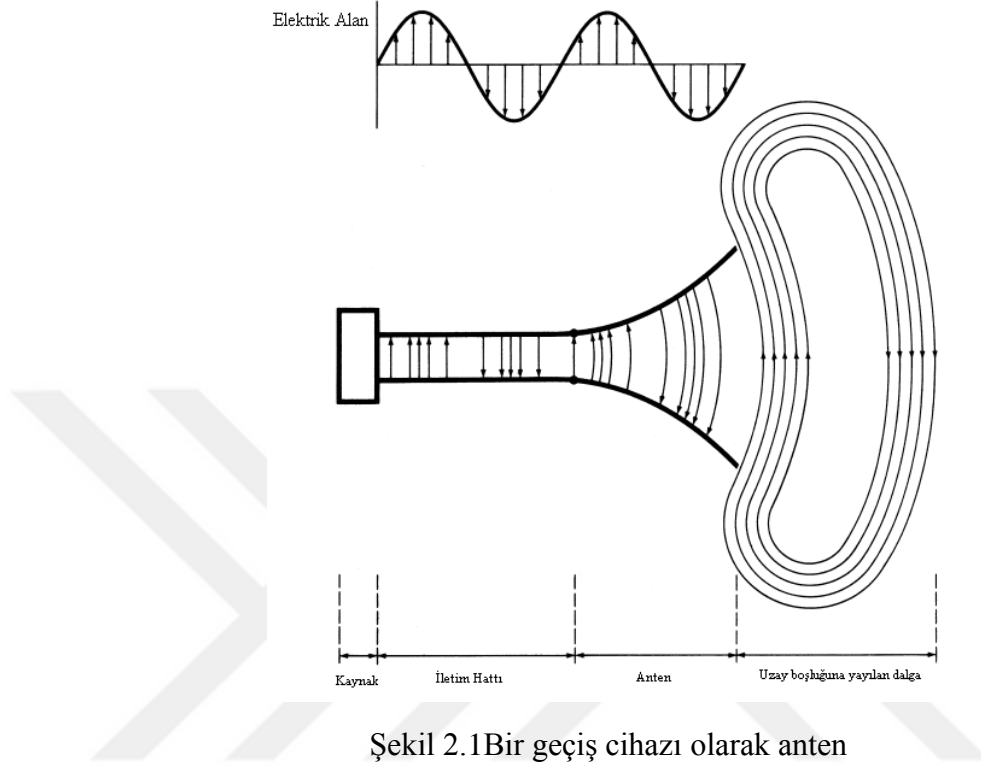
Dünya çapında çok sayıda bağlı şirketlerin kurulması için vakfa hizmet etmiş. Onun en büyük deneyi 1901 yılında okyanuslar ötesine Poldhu,UK' dan St Johns Kanada'daki Newfoundland'e akortsuz sistemi sağlamak olmuştur. 1909 yılında kablosuz telgraf sisteminin gelişiminin tanıtılmasında Nobel Fizik Ödülü'nü Karl Ferdinand Braun ile paylaşmıştır. Monopol antenler Marconi'nin deneylerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu nedenle dikey monopol antenler Marconi antenler de denilmektedir.

II. Dünya Savaşı sırasında düşman hava taşıtlarını, gemileri, denizaltını tespit eden taraf savaşı kazanmıştır. Müttefiklere üstünlük sağlamak amacıyla İngiliz ve Amerikalı bilim adamları gece bile yüzlerce mil uzaklıktaki hedefleri tespit etmek için radar teknolojisini geliştirmiştir. Sadece daha uzun olmayan tel antenler ve yüksek frekanslı radar antenlerin hızlıca gelişmesiyle bu araştırma sonuçlanmıştır. Bazı açıklık antenler, yansıtıcı ve koni antenlerde geliştirilmiştir.

Geniş bant, dairesel polarize antenler ve diğer birçok anten tipleri daha sonra çeşitli uygulamalar için geliştirilmiştir. Bir anten herhangi bir radyo yayın ve iletişimi ve radar sistemi için gerekli cihaz olduğundan, her zaman uygun olan ve geliştirilen uygulamalar için yeni ve daha iyi antenlere ihtiyaç duyulmuştur. Antenlerin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bazı sistemlerde, anten sadece basit bir alıcı ya da verici değil aynı zamanda iyi performans elde edebilmek için sistemin diğer parçalarıyla birleşmiş bir cihazdır.

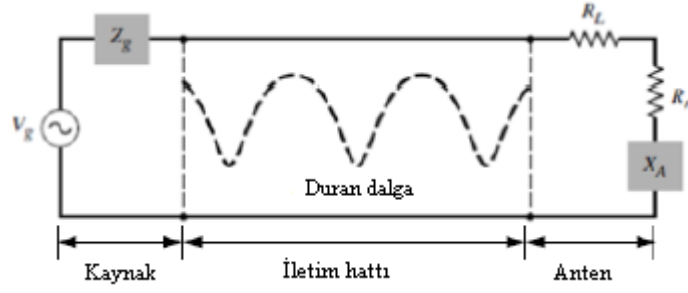
İşlevi bakımından verici modda çalışan anten kılavuzlanmış dalgayı serbest dalgalara dönüştürürken alıcı modda çalışan antenserbtest dalgaları kılavuzlanmış dalgalara dönüştürmektedir. Alıcı ve verici antenler yapı olarak birbirlerine benzemektedir. Radarlarda olduğu gibi bir anten çift yönlü olduğu için hem alıcı hem de verici olarak çalışabilmektedir. Anten, kaynak ve iletim hattından oluşan bir sistemden oluşmaktadır. Aşağıdaki şekilde bu sistem gösterilmektedir. Kaynaktan iletim hattı üzerinden geçerek

antene ulaşan sinyal anten aracılığıyla elektromanyetik dalgaya dönüştürülmüş ve serbest uzaya yayılmıştır (Balanis 2005).



Şekil 2.1 Bir geçiş cihazı olarak anten

Bu sistem Thevenin eşdeğer devresiyle gösterilebilmektedir. Şekil 2.2’de eşdeğer devre gösterilmektedir. Devreye baktığımızda kaynak, iletim hattı ve antenin direnç ve empedansları görülmektedir. Kaynak, karakteristik empedansı Z_c olan bir iletim hattına bağlıdır. Anten iletim hattına bağlı ve Z_A ’lık empedansa sahip yük ile gösterilmektedir. Anten empedansı reel ve sanal kısımdan oluşan karmaşık bir ifadedir. Empedansın reel kısmı yük direnci olan R_L ve dielektrik, iletim kayıplarından oluşan R_r ’den oluşmaktadır. Karmaşık kısmı ise X_A ışımaya reaktansıdır. İdeal durumda kaynaktan üretilen gücün tamamı yüke ışımaya direnci R_r ’ye aktarılması istenir. Fakat pratikte bu durum mümkün değildir. Anten ile iletim hattının yapısından kaynaklanan kayıplar meydana gelmektedir. Empedans uyumluluğu sağlandığı takdirde kayıplar ihmal edilerek ve kaynaktan yüke maksimum güç transfer edilebilmektedir.

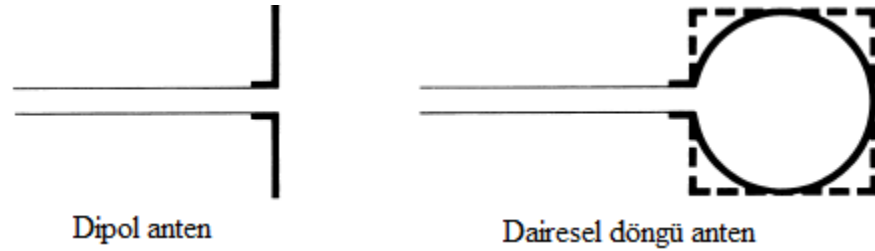


Şekil 2.2 Anten iletim hattının Thevenin eşdeğeri modellemesi

2.2 Anten Çeşitleri

2.2.1 Tel antenler

Kare, dikdörtgen, elips veya başka şekillerde de tasarlanabilen tel antenlerde dipololma şartı aranmamaktadır. Daire döngü antenler üretim kolaylığından dolayı daha sık olarak görülmektedir. Otomobillerde binalarda, gemilerde, uçaklarda, uzay araçlarında, radyo ve televizyon alıcılarında, vericilerinde ve buna benzer alanlarda tel antenler kullanılmaktadır. Döngü, heliks gibi farklı şekillerde tel antenler mevcuttur. Döngü antenin daire olma şartı aranmamaktadır. Şekil 2.3’de tel antenler gösterilmiştir.

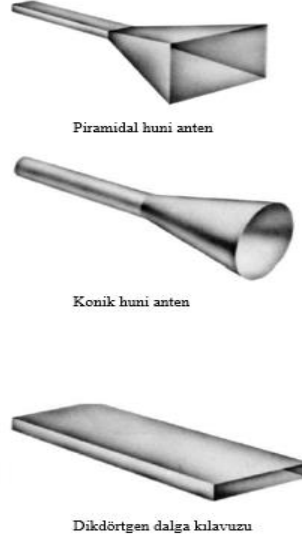


Şekil 2.3 Tel antenler

2.2.2 Açıklık antenler

Yüksek frekanslarda kullanması ve antenlerin daha karmaşık durumları için geçmişten günümüze kadar açıklık antenler talep görmüştür. Çünkü bu anten tipleri uçaklar, uzay araçları için daha çok kullanışlı olmaktadır. Parabolik, konik, dikdörtgen dalga kılavuzu açıklık antenler uzay ve uçak araçlarının gövdelerine kolaylıkla entegre edilebildiğinden bu alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Üstelik açıklık antenler tehlikeli

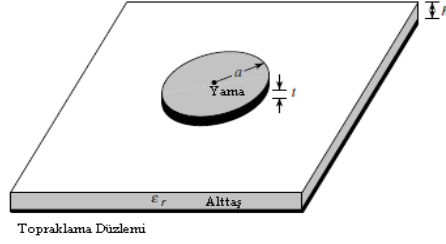
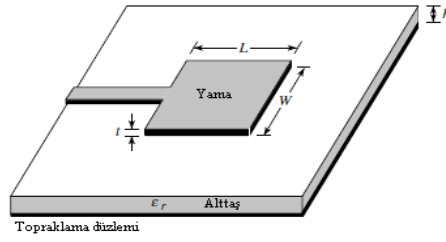
çevre koşullarından korunmak için dielektrik malzeme ile kaplanabilmektedir. Açıklık anten çeşitleri Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Açıklık anten çeşitleri

2.2.3 Mikroşerit antenler

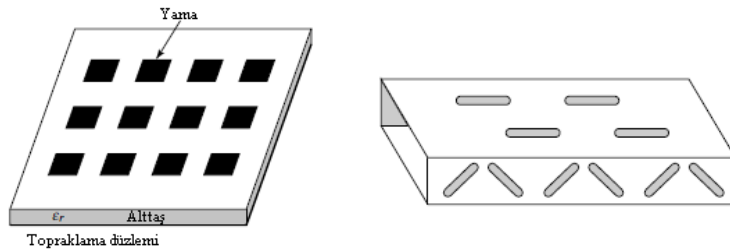
Mikroşerit antenler 1970’li yılların başında uzay uygulamalarında rağbette olmuştur. Bugün kamu, ticari ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek performanslı uçak, uzay araçlarına, uydulara, füzelere, arabalara hatta mobil cihazlara entegre edilebilmektedir. Radarlarda, uydu haberleşmesinde, güdümlü mermi gibi birçok askeri alanda ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu antenler, dielektrik altaş üzerinde bulunan metalik yama ve topraklama kısımlarından oluşmaktadır. Metalik yama kısımları farklı konfigürasyonlarda olabilmektedir. Mikroşerit yama antenler Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Ama genellikle analiz ve üretim kolaylığı açısından iyi ışımaya karakteristiği ve özellikle düşük çapraz polarizasyon ışımaya sahip olduğundan tercih edilmektedir. Mikroşerit antenler hafif, yüzeysel ve yüzeysel olmayan yüzeye uygun, devre baskı teknolojisiyle üretimi ucuz olan antenlerdir. Rezonans frekansı, polarizasyonu, ışımaya deseni ve empedans bakımından çok yönlüdür. Bu avantajların yanında dar bant genişliğine sahip ve parazit oranı diğer antenlere nazaran daha yüksektir.



Şekil 2.5 Dikdörtgen ve dairesel mikroşerit yama antenler

2.2.4 Dizi antenler

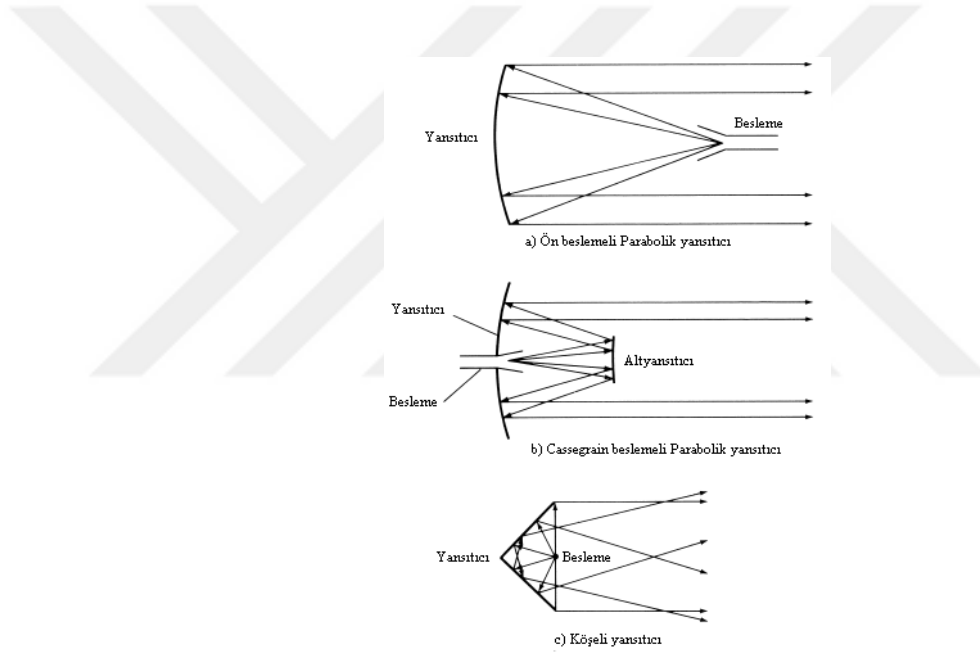
Bazı uygulamalarda tek elemanlı antenlerin ışıma karakteristiği, kazanç, yönlülük gibi parametreler açısından gereksinimleri karşılayamadığı durumlarda dizi antenler kullanılmaktadır. Elektriksel ve geometrik dizilerin ışıma elemanlarının istenilen ışıma karakteristiği elde etmek için dizi haline getirilerek bir araya toplanmaktadır. Bu düzenleme, belirli bir yönde veya yönlerde maksimum ışıma elde etmek için elemanların eklenmesiyle elde edilmektedir. Dizi anten çeşitleri Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Genellikle bu dizi ifadesi bireysel ışıma elemanların ayrılmasıyla oluşan düzenlemelerle isimlendirilmiştir. Fakat aynı terim devam eden yapılarla ışıma elemanların eklenmesiyle tanımlanmıştır.



Şekil 2.6 Mikroşerit yama ve yarıkli dalga kılavuzu dizi antenler

2.2.5 Yansıtıcı antenler

Çok büyük mesafelere iletişim kurmaya ihtiyacımız olduğundan antenlerin karmaşık formları alıcı ve verici sinyallerin milyonlarca kilometreye ulaşması gerektiğinden yansıtıcı antenleri kullanmaya gerek duymuşlardır. Gök cisimlerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Bunun gibi benzer uygulamalarda parabolik yansıtıcı antenler sık kullanılmaktadır. Parabolik antenlerin yanı sıra köşe yansıtıcı antenler de bulunmaktadır. Bu anten çeşitleri 305 metre hatta daha fazla büyüklükte çaplarda inşa edilmektedir. Yüksek kazanç gerektiren ve benzer büyüklükteki çaplarda milyonlarca kilometre mesafelerden sinyal alıp vermek için kullanılmaktadır.

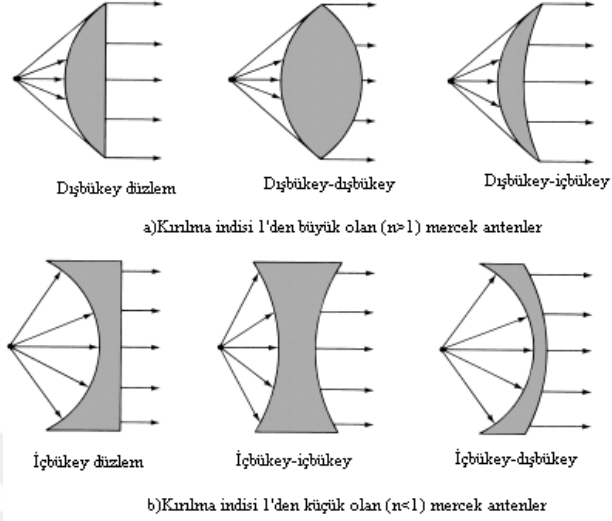


Şekil 2.7 Tipik yansıtıcı anten konfigürasyonları

2.2.6 Mercek antenler

Mercek antenler istenilmeyen yönlere ışınları engellemek için başka bir enerjiyi ayarlanmasıyla kullanılmaktadır. Uygun geometrik şekildeki konfigürasyonlar ve malzemeler seçilmektedir. Mercek antenler yüzey dalgaları içinde değişken formdan farklı enerjiye dönüştürür. Aynı uygulama parabolik antenlerde, özellikle düşük frekanslarda boyutları ve ağırlıkları fazlasıyla büyük olduğundan yüksek frekanslarda

kullanılmaktadır. Mercek antenler üretildikleri malzemenin çeşidine ve geometrik şekline göre sınıflandırılmaktadır. Bazı mercek anten çeşitleri Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Çeşitli mercek antenler

2.3 Anten Parametreleri

2.3.1 Geri dönüş kaybı

Antende, kaynaktan yüke güç transferi yapılırken kayıplar meydana gelmektedir. Yükten kaynağa yansıma olmaktadır. Buna geri dönüş kaybı denir. Bu kayıp istenilen bir durum değildir. Geri dönüş kaybı bize antenin ne kadar empedans uyumluluğu olduğunu gösterir. Gücün tamamının yüke aktarılması için $\Gamma = 0$, RL’inde ∞ olması gerekir. Fakat bu pratikte mümkün değildir. Empedans uyumluluğu için RL’nin -10 dB’nin altında olması istenilmektedir. Geri dönüş kaybı ile voltaj dalga oranı (VSWR) birbiri ile bağlantılı anten parametreleridir. Anten karakteristiği için önemli parametrelerinden biri olan geri dönüş kaybı RL, dB cinsinden formülize edilerek ifade edilmektedir.

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (2.1)$$

2.3.2 Bant Genişliği

Bant genişliği, ilgilenen frekansta antenin en iyi çalıştığı frekans aralığıdır. Geri donüş kaybı grafiğinde - 10 dB'nin altında kalan maksimum (f_{mak}), minumum (f_{min}) ve merkez frekansa (f_0) göre hesaplanmaktadır. Mikroşerit antenler dar genişliğine sahiptir ve yüzdelik cinsinden ifade edilmektedir. Maksimum, minumum ve merkez frekans cinsinden bant genişliği yüzdelik olarak denklemin 2.2 verilmektedir.

$$BG = \frac{f_{mak} - f_{min}}{f_0} \times 100 \quad (2.2)$$

Mikroşerit yama antenler diğer antenlere göre daha dar bant genişliğine sahiptirler. Bant genişliğini arttırmak için düşük dielektrik sabitli alttaşlar kullanılarak yapılan bazı uygulamalar bulunmaktadır.

2.3.3 Voltaj duran dalga oranı

Antende empedans uyumu olmadığı takdirde yüke gelen ve yansıyan dalgalar girişim oluşturmasıyla duran dalgalar oluşmaktadır. Voltaj duran dalga oranı, dalganın maksimum değeri V_{mak} , dalganın minumum değeri V_{min} ve yansıma katsayısı Γ ile formülize edilir.

$$VSWR = \frac{V_{mak}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.3)$$

Duran dalga oranı 1 ile ∞ arasında değişmektedir. Duran dalga oranının 1 olması kaynaktan yüke gücün tamamının aktarıldığını ve yansımanın hiç olmadığını gösterirken ∞ olması tamamının yansıdığını göstermektedir. VSWR'nin 1 olması istenilir ama pratikte mümkün olmadığı için empedans uyumu sağlamak adına 2'nin altında olması arzu edilmektedir.

2.3.4 Yönlülük

Antenin sabit bir yönde yaptığı ışıma şiddetinin bütün yönlerde yapmış olduğu ışıma şiddetinin ortalamasına oranı yönlülüğünü vermektedir. Işıma şiddetinin ortalaması, antenin yaymış olduğu ışıma şiddetinin 4π 'ye bölünmesiyle elde edilir. Eğer yön belli değilse maksimum ışıma şiddetinin yönü belirlenir. Daha basit ifadeyle, izotropik olmayan kaynağın yönü, izotropik kaynağa göre belirli bir yöndeki ışıma şiddetinin oranına eşittir. Matematiksel olarak aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

Maksimum yönlülüğü:

$$D_{mak} = \frac{U_{mak}}{U_0} = \frac{4\pi U_{mak}}{P_{rad}} \quad (2.5)$$

İzotropik kaynak için, her bir U_{mak}, U_0, U değerleri eşit olduğundan yönlülüğü bütündür. İzotropik olmayan antenlerde ışıma yönü, ana lobun maksimum değeri olarak kabul edilmektedir.

2.3.5 Kazanç

Anten performansının başarı ölçütü olarak tanımlanan anten kazancı, kazanç yönlülük ile yakından ilişkili olmasına rağmen, yön kabiliyetlerinin ile birlikte verimliliği dikkate alan bir ölçüdür.

Antenin kazancı izotropik olarak yayılan anten tarafından kabul edilen güç, elde edilecek radyasyon yoğunluğu verilen yöndeki ışıma yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Kazanç, ışıma yoğunluğunun toplam giriş güce oranının 4π ile çarpımına eşittir. Bu eşitlik şöyle yazabilir:

$$G = \frac{4\pi.U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (2.6)$$

Toplam ışıma gücünü (P_{rad}) toplam giriş gücüne ve anten ışıma verimliliğine (boyutsuz) bağlı olarak yazabilmektedir.

$$P_{rad} = e_{cd} \cdot P_{in} \quad (2.7)$$

P_{rad} ifadesini formülde yerine yazarsak, kazancı verimliliğe ve yönlülüğe bağlı olarak ifade edebilmektedir.

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[\frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.8)$$

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \cdot D(\theta, \phi) \quad (2.9)$$

Uygulama alanına göre yüksek ya da düşük kazançlı anten tasarlanmaktadır. Antenin yüksek kazançlı olması daha iyi olduğunu düşünülse de kullanım amacına göre tasarlanmaktadır. Kazanç antenin ne kadar yönlü olduğunu göstermektedir. Yüksek kazançlı antenlerin yönlülüğü daha yüksektir. Belirli bir yönde güçlü bir yayın yapılmak isteniliyorsa kazancın büyük olması gerekir. Daha az güçte fakat her yöne yayın yapılmak isteniliyorsa kazanç düşük olmaktadır.

2.3.6 Gerçekleşmiş Kazanç

Diğer bir anten parametresi olan gerçekleşmiş kazanç, kazançtan farklı olarak iletim hattıyla anten elemanının bağlantısından dolayı empedans ve polarizasyon uyumsuzluğundan kaynaklanan kayıpları hesaba katmaktadır. Bağlantıdan kaynaklanan kayıplar yansımaya katsayısı ile ilişkili olan yansımaya verimliliği e_r ile açıklanabilir.

$$G_{re}(\theta, \phi) = e_r \cdot G(\theta, \phi) = (1 - |\Gamma|^2) \cdot G(\theta, \phi) \quad (2.10)$$

Eğer anten iletim hattı ile uyumlu ise ($\Gamma = 0$), antenin giriş empedansı Z_{in} hattın karakteristik empedansı Z_c birbirine eşit olmaktadır. Bu durumda kazanç ile gerçekleşmiş kazanç eşit olur. ($G_{re} = G$)

2.3.7 Verimlilik

Toplam anten verimliliği e_0 , anten yapısıyla ve giriş bağlantılarındaki kayıpları dikkate almak adına kullanılmaktadır. Antenden ve dielektrik malzemesindeki kayıplardan dolayı yansımalar olmaktadır. Toplam verimlilik, yansıma verimliliği $e_r = (1 - |\Gamma|^2)$, iletken verimliliği e_c , dielektrik verimliliği e_d hesaba katılarak ifade edilmektedir.

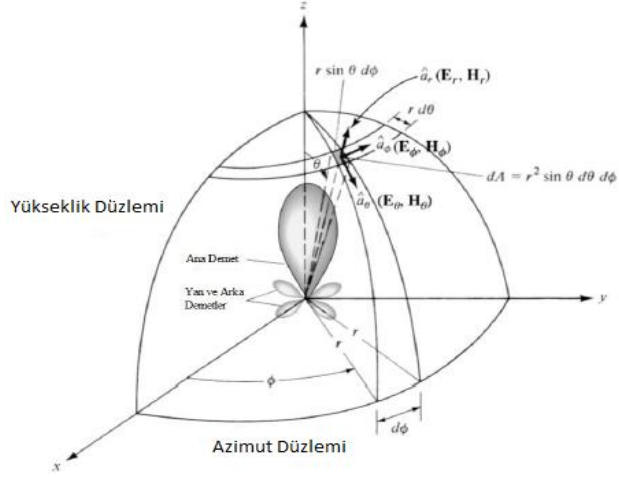
$$e_0 = e_r \cdot e_c \cdot e_d \quad (2.11)$$

$$e_{cd} = e_c \cdot e_d \quad (2.12)$$

$$e_0 = e_r \cdot e_{cd} = (1 - |\Gamma|^2) \cdot e_{cd} \quad (2.13)$$

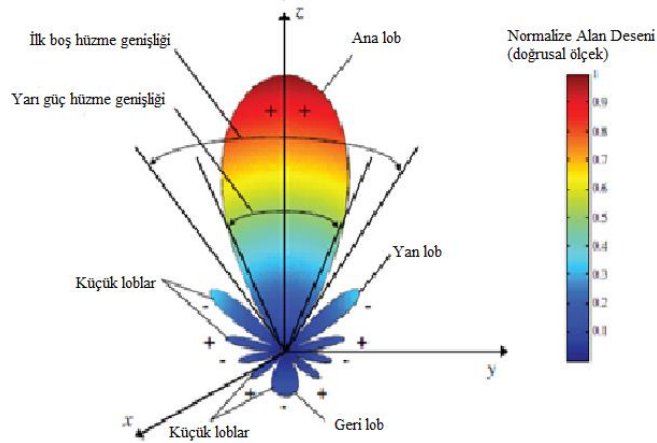
2.3.8 Işıma Deseni

Işıma deseni, uzaysal koordinatlarının fonksiyonu olarak gösterilen anten ışıma özelliklerinin matematiksel işlevi veya grafiği olarak tanımlanmaktadır. Uzak alan bölgesinde hesaplanarak ve yön koordinatlarının bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Işıma özellikleri, yönlülük, polarizasyon, güç akı yoğunluğu, ışıma yoğunluğu, faz, alan kuvveti gibi parametreler içermektedir. Alan ve güç desenleri maksimum değerlerine göre normalize edilmektedir. Ayrıca güç deseni genellikle logaritmik bir ölçekte veya daha sık olarak kullanılan dB cinsinden çizilmektedir. Logaritmik hesaplanması ışıma deseninin düşük olduğu değerlerin ayrıntılı olarak görülmesi daha kolay olduğundan tercih edilmektedir. Antenin hangi yönde ışıma yaptığını gösterir. Bu yüzden önemli bir parametredir. Anten uygulamalarında ışıma deseni kullanım alanı açısından belirleyicidir. Küresel koordinatlarda r, θ, ϕ cinsinden ifade edilir. Radyal yönde bir değişkeni bulunmadığından θ, ϕ değişkenleri içerir. İki veya üç boyutlu olarak ışıma deseni gösterilebilmektedir. İki boyutta göstermek için θ, ϕ değişkenlerinden birini sabit tutmak gerekir. Küresel koordinat sisteminde antenin ışıma deseni şekilde 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Işıma deseninin küresel koordinatlarda gösterimi

Işıma deseni ana, küçük ve arka loblardan oluşmaktadır. Ana lob, $\theta = 0^\circ$ de maksimum ışınım yaptığı lobdur. Eğer anten izotropik bir değilse ışınım yönünü göstermektedir. Küçük lob ana lobun dışındaki herhangi bir lobdur. Arka lob antenin ana lobun 180° lik açı yapacak şekilde zıt yönündedir. Küçük lob olarak da adlandırılabilir. Bu loblar istenmeyen ışınmaları gösterdiği için azaltılması gerekmektedir. Küçük ve arka loblar alttaştan topraklama düzlemine doğru oluşan saçak etkisinden dolayı kaynaklanmaktadır. Yönlülüğü yüksek olan antenlerde ana lob daha dar ve uzun olmaktadır. Bununla birlikte yan loblar daha fazla oluşmaktadır.



Şekil 2.10 Işıma lobları

Antenler elektromanyetik dalganın uzaya yaydığı şekline göre izotropik, tüm yönlü, yönlü olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. İzotropik anten, her yöne eşit

miktarda kayıpsız olarak ışına yapan antenler olarak tanımlanmaktadır. İdeal bir anten tipi olmasına rağmen fiziksel olarak bu mümkün değildir. Gerçek antenlerin yol gösterici özelliklerini ifade etmek için referans alınmaktadır. Yönlü antenler, diğer yönlere bir yönde daha etkili olarak ışına yapma özelliğine sahiptirler. Bu terim genellikle, yarım dalga dipoldeki gibi maksimum yönlülüğün önemli olduğunda uygulanmaktadır. Diğer bir anten deseni olan tüm yönlü anten, verilen bir düzlemde aslında belirli bir yönü olmayan ve herhangi bir ortogonal düzlemde yönlü desen olarak tanımlanmaktadır. Tüm yönlü desen yönlü desenin bir türü olmaktadır.

2.3.9 Polarizasyon

Bir antenin belirli bir yöndeki polarizasyonu “iletile dalganın polarizasyonu” olarak tanımlanmaktadır. Eğer yön belirtilmediyse polarizasyon maksimum kazanç yaptığı yön alınmaktadır. Uygulamada, antenin merkez noktasından diğer yönlere doğru polarizasyon değişebilmektedir. Bu yüzden ışına deseninin farklı bölgelerinde farklı ışımalar olabilir. Polarizasyon elektromanyetik dalganın bir özelliği hakkında bilgi verir. Yayılan bir dalganın polarizasyonu, elektromanyetik dalganın zamana göre değişen elektrik alanının yönü, göreceli elektrik alan vektörünün büyüklüğü olarak tanımlanmaktadır. Bir dalganın polarizasyonu, verilen yöndeki anten tarafından alınan veya iletilen dalga cinsinden tanımlanabilmektedir. Uzak alandaki bir noktada yönü belli bir anten tarafından bu noktada yayılan dalgayı temsil eden düzlem dalganın polarizasyonu olarak ifade edilmektedir. Bir antenin uzak alandaki herhangi bir noktadaki yayılan dalga, antenden radyal yönde olan yayılım yönü ve elektrik alan kuvvetiyle aynı olan düzlem dalga ile temsil edilebilmektedir.

Polarizasyon doğrusal, dairesel ve eliptik olarak sınıflandırılır. Doğrusal polarizasyonda elektrik alanının doğrultusu zaman içinde değişmez. Genel olarak tanımlanırsa, elektromanyetik dalganın ilerleme yönü z ve bu eksene dik elektrik alan bileşenlerinin x ve y düzlemi ile açıklanacak olursa; $E_x = 0, E_y \neq 0$ veya $E_x \neq 0, E_y = 0$ elektrik alan bileşenleri ve aralarındaki faz farkı 0 veya π olduğunda doğrusal kutupludur. $E_x = E_y$ bileşenleri eşit ve aralarındaki faz farkı $\pi/2$ kadar ise dairesel kutupludur.

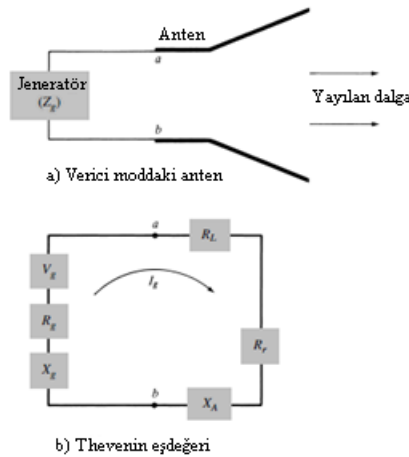
Dairesel kutupluluk sağ ve sol kutupluluk olmak üzere iki çeşittir. Doğrusal ve dairesel polarizasyon eliptik polarizasyonun özel bir türüdür. Eliptik polarizasyonu açıklarsak; elektrik alan bileşenleri $E_x \neq E_y$ ve faz farkı $\pi/2$ 'dir. Eliptik kutupluluk dairesel polarizasyon gibi sağ ve sol olmak üzere ikiye ayrılır. Kutupluluk çeşitleri uygulama alanlarına göre tercih edilmektedir.

2.3.10 Giriş Empedansı

Antenin giriş empedansı gerilimin akıma oranı olarak tanımlanmaktadır. Reel ve sanal kısımdan oluşmaktadır. Sanal kısmı olan giriş reaktansı X_a 'dır. Reel kısmı olan R_a anten direnci, ışıma direnci R_r ve kayıp direnci R_L 'den oluşmaktadır. Birimi ohm ile ifade edilmektedir. Antenin direnci ve giriş empedansı denklem 2.14 ve 2.15'de gösterilmektedir.

$$R_a = R_r + R_L \quad (2.14)$$

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (2.15)$$



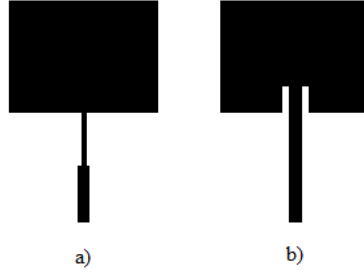
Şekil 2.11 Verici moddaki anten ve Thevenin eşdeğeri

3. MİKROŞERİT ANTEN BESLEME TEKNİKLERİ

Mikroşerit antenleri beslemek için bazı yöntemler bulunmaktadır. Antenin besleme teknikleri antenin giriş empedansı ve kullanım amacı açısından önemlidir. İletken ve dielektrik malzemeden oluşan yapısı ile farklı besleme türlerine uygun olmaktadır. Mikroşerit antenleri beslemek için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en sık kullanılan mikroşerit besleme, koaksiyel besleme, yakınlık kuplajlı besleme, açıklık kuplajlı beslemedir.

3.1 Mikroşerit Besleme

Mikroşerit besleme yöntemi, mikroşerit hat yapılan bir besleme tekniğidir. Mikroşerit besleme hattı iletken şeritten oluşmaktadır. Besleme hat genişliği genellikle yama genişliğine kıyasla çok daha küçüktür. Besleme hattı antenle aynı düzlemde bulunur, yama genişliğinden daha dar ve aynı kalınlıktadır. Aynı alttaş üzerinde bulunduğundan üretimi kolaylaştırmaktadır. Besleme hattı kolay üretilebilir, yerleşik pozisyon kontrolü ile empedans eşleştirmesi oldukça kolay bir modeldir. Parazit yayılımı fazla olmasına rağmen mikroşerit besleme daha çok tercih edilmektedir. Diğer besleme tekniklerine göre bu besleme tekniği dizi oluşturmaya daha müsaittir. Avantajlarının yanında dezavantaj olarak dar bant genişliğine sahiptir. Dielektrik kalınlığı arttığında, yüzey dalgaları ve yapay besleme ışıması artmaktadır. Bu yüzden pratik uygulamada bant genişliğini sınırlanmaktadır. Mikroşerit antenlerde dielektrik alttaşın kalınlığı arttıkça yüzey dalgaları ve parazitlik arttığından pratikte bant genişliği %2 ile %5 değerleri arasında kalmasına sebep olmaktadır. Kalın dielektrik alttaş için giriş empedansı oldukça endüktif olduğundan zayıf empedans uyumuna sebep olmaktadır. Bu besleme tekniği diğerlerine göre daha iyi polarizasyon sağlamaktadır. Mikroşerit beslemeli anten çeşitleri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 a) Mikroşerit beslemeli çeyrek dalga dönüştürücü anten b) İçerden beslemeli anten

Bir iletim hattı karakteristik empedansından farklı bir yük empedansı ile sonlandırıldığında yükten kaynağa doğru yansıma olur. Yansıyan güç nedeniyle sistem verimsiz çalışır. Yüksek frekanslarda üzerinden minimum yansıma olması yani düşük duran dalga oranlarında çalışılması istenir. Bu nedenle yük empedansı ile iletim hattı arasında bir empedans uyumlama devresi yerleştirilmektedir. Işıma yapan yama, besleme hattı ve topraklama düzlemi bakır olan antenlerde çeyrek dalga boylu dönüştürücü kullanılarak empedans uyumu sağlanmaktadır. Çeyrek dalga boylu dönüştürücüsünün uzunluğu L , tasarım frekansına f_0 karşılık gelen λ_0 cinsinden eşitliği aşağıda verilmektedir.

$$L = \lambda_0 / 4 \quad (3.1)$$

$$\lambda_0 = c / f_0 \quad (3.2)$$

Boyu L olan dönüştürücünün karakteristik empedansı Z_{01} , giriş empedansı Z_g ve yük empedansı Z_y ile ifade edilir.

$$Z_{01} = \sqrt{Z_g \cdot Z_y} \quad (3.3)$$

Empedans eşleşmesi için giriş empedans değerinin karakteristik empedansa eşit olması gerekmektedir.

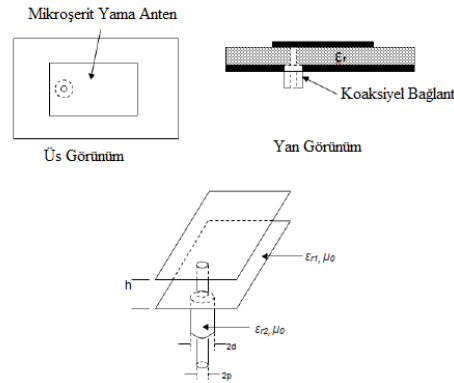
$$Z_g = Z_0 \quad (3.4)$$

3.2 Koaksiyel Besleme

Mikroşerit antenleri beslemede kullanılan en sık tekniklerden biri koaksiyel beslemedir. Koaksiyel besleme, dış iletken topraklama kısmına bağlanırken iç iletken ise ışınım yama kısmına bağlanarak oluşturularak sıkça kullanılan besleme yöntemidir. Dielektrik

kalınlığı daha düşük olduğu için bant genişliği dardır. Bu yüzden pratik uygulamalarda bant genişliği sınırlanmaktadır. (Genellikle 2-5%). Koaksiyel besleme kolay üretilebilir ve eşleştirebilir olmakla birlikte düşük yapay ışıma sahiptir. Fakat dar bant genişliğinde ve modellemesi özellikle dielektrik kalınlığı $h > 0.02\lambda_0$ 'da zordur.

Koaksiyel besleme tekniğinde, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, anteni bir boşluktan besleyen koaksiyel hattın iç iletkeni antene güç iletirken, dış iletkeni toprak yüzeyine bağlanır (Can, 2010). En iyi empedans uyumu sağlamak için antenin yama kısmında en uygun besleme noktası belirlenir. Mikrodalga uygulamalarında esnek ve şekillendirilebilir bir yapıya sahip besleme hattıdır. Koaksiyel besleme tekniği, mikroşerit besleme tekniğine nazaran kayıp daha azdır, daha yüksek frekanslarda ve güçlerde kullanılmaya uygundur.

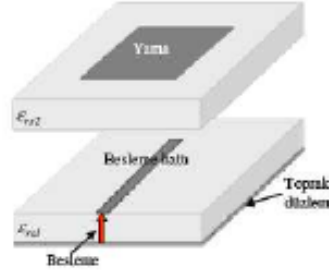


Şekil 3.2 Koaksiyel besleme

3.3 YakınlıkKuplajlı Besleme

Yakınlık kuplajlı besleme, besleme hattının antene direk dokunmayan farklı düzlemlerdeki anten ve besleme hattından meydana gelmektedir. Besleme hattı iki dielektrik alttaş arasında konularak yama anten altında açık olarak sonlandırılmaktadır. Bu nedenle besleme hattı ile yama arasında oluşan kuplajlanma kapasitif etki göstermektedir. Yakınlık kuplajlı besleme daha kalın bir alttaş ile sağlandığından bant genişliğinin artmasına neden olmaktadır. %13'ün üstünde bir bant genişliği sağlamak için bu besleme tekniği kullanılmaktadır. Yakınlık kuplajlı besleme yöntemi en büyük bant genişliğine sahiptir. Düşük yapay ışıması olan biraz daha kolay modellenebilir

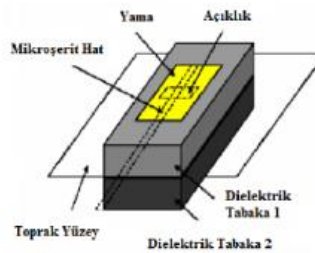
besleme tekniğidir. Ama üretimi daha zordur. Besleme hattının uzunluğu ve genişliğine bağlı olarak empedans eşleşmeyi kontrol edilebilmektedir. Yakınlık kuplajı elektromanyetik kuplajlı besleme olarak da bilinmektedir.



Şekil 3.3 Yakınlık kuplajlı besleme

3.4 Açıklık Kuplajlı Besleme

Açıklık kuplajı topraklama yüzeyinin mikroşerit hat ile yama arasına yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Bu yapı şekilde gösterildiği gibi yakınlık kuplajındaki gibi iki tane dielektrik alttaştan oluşmaktadır. Hat altındaki dielektrik alttaş üzerine yerleştirilmiştir, enerji topraklama düzleminde açılan yarıklık vasıtasıyla yamaya iletmektedir. Bu yarıklık herhangi bir şekilde olabilir. Yarığın boyutları değiştirilerek bant genişliği iyileştirilebilmektedir. Yamanın altında bulunan dielektrik alttaş kalın ve düşük dielektrik sabitine, mikroşerit hat üzerindeki dielektrik alttaş ise ince ve yüksek dielektrik sabitli olacak şekilde malzemeler seçilerek tasarlanmaktadır. Topraklama yüzeyi besleme hattı ile yama arasında yalıtım oluşturarak polarizasyon saflığı artırılmakta ve istenmeyen ışınlar azaltılmaktadır. Açıklık kuplajlı beslemelerin modellenmesi kolayken, üretimi mikroşerit ve koaksiyel beslemeye göre daha zordur. Besleme hattının genişliğinin ve yarığın uzunluğunun değiştirilmesiyle empedans uyumu sağlanmaktadır.



Şekil 3.4 Açıklık kuplajlı besleme yöntemi

4. MİKROŞERİT YAMA ANTEN YAPILARI VE ÖZELLİKLERİ

Yüksek teknolojide uçak, uzay aracı, uydu ve füze uygulamalarında boyut, ağırlık ve fiyat performansı için kolay entegre edilebilen, aerodinamik profile sahip, düşük profilli antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Hala birçok devlet ve ticari uygulamalarda mobil radyo, GPS, radar, kablosuz iletişim (Wi-Fi) gibi benzer alanlarda kullanılmaktadır. Bu ihtiyaçları karşılamak için mikroşerit antenler kullanılmaktadır. Mikroşerit antenler hafif, düzlemsel ve düzlemsel olmayan yüzeylerle uyumlu modern baskı devre teknolojisi kullanarak üretmek basit ve kolaydır. Mekanik olarak sağlam olduğundan sert yüzeylere montaj edilebilmektedir. MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) dizaynı ile uyumlu ve özel yama şekli ve mod seçildiğinde rezonans frekansı, kutupluluk, ışıma deseni ve empedans bakımından çok yönlüdür. Üstelik yama ve topraklama yüzey arasına yük eklenerek pin, varaktör diyot gibi değişken rezonans frekansı, empedans, kutupluluk ve desen uyarlanabilir elemanlar dizayn edilebilmektedir.

Mikroşerit antenlerin en büyük dezavantajları; düşük verim, düşük güç, yüksek kalite faktörü (bazen 100'den fazla) zayıf polarizasyon saflığı, zayıf tarama performansı, parazit besleme radyasyonu ve çok dar frekans bant genişliği, genellikle %1-%3 kadardır. Devlet güvenlik sistemi gibi bazı uygulamalarda dar bant genişliği istenmektedir. Bunun için bazı yöntemler bulunmaktadır. Alttaş yüksekliğini arttırmak gibi bu da verimliliği (yüzey dalgaları olmadığında % 90 kadar büyüktür) ve bant genişliğini (yaklaşık % 35 kadar) arttırmaktadır. Fakat alttaşın yüksekliği arttırıldığında yüzey dalgaları oluşmaktadır. Bu genellikle istenilmeyen bir durumdur. Çünkü doğrudan ışıma için toplam mevcut alana güç aktarımı yapılmaktadır.

4.1 Temel Karakteristikleri

Mikroşerit antenler 1953 yıllarında keşfedilip 1955'de patenti alınmasına rağmen 1970'li yılların başlarında alıcı mikroşerit antenler oldukça ilgi görmüştür. Mikroşerit anten aşağıdaki Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Anten ışıma yapan iletken yama,

topraklama düzlemi ve arasında bulunan dielektrik malzemeden oluşmaktadır. Mikroşerit antenler çalıştıkları frekansla fiziksel boyutu farklıdır.

t: İletken yama kalınlığı

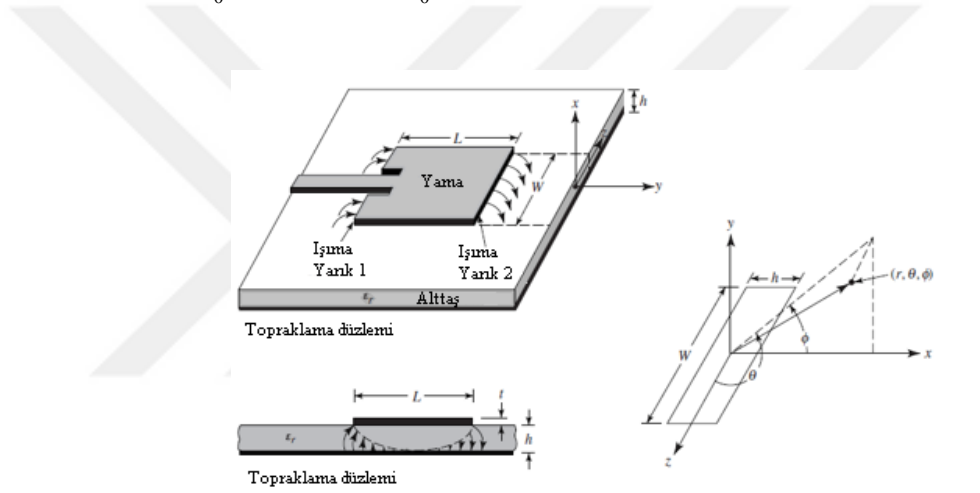
λ_0 : Boş uzaydaki dalga boyu

h: Dielektrik malzeme kalınlığı

Dielektrik alttaşın kalınlığı:

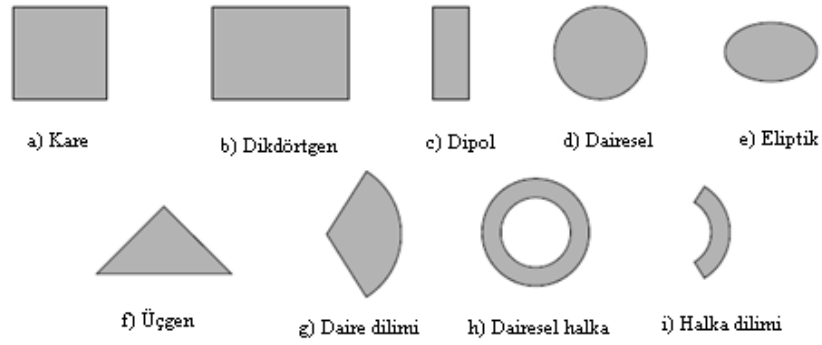
$$0.03\lambda_0 \ll h \ll 0.05\lambda_0$$

(4.1)



Şekil 4.1 Mikroşerit anten ve koordinat sistemi

Mikroşerit antenlerin iletken yama kısımları kare, dikdörtgen, dipol, dairesel, eliptik, üçgen, disk dilimli, dairesel halka, yüzük dilimli gibi farklı geometrik şekillerde tasarlanabilmektedir. Mikroşerit antenlerde matematiksel analiz hesaplamaları daha kolay olduğu için genellikle kare ve dikdörtgen yama tercih edilmektedir.



Şekil 4.2 Mikroşerit antenin yama çeşitleri

Mikroşerit yama deseni enine ışına maksimum olacak şekilde tasarlanmaktadır. Yama altında uyarı ile seçilen uygun modla sağlanmaktadır. Uçtan ışına uygun mod seçilerek başarılabilmektedir. Dikdörtgen yama uzunluğu genellikle $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ 'dir. Yama ve topraklama düzlemi dielektrik levha (alttaş) ile ayrılmaktadır. Mikroşerit yama antenlerde genel olarak dielektrik sabiti $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ olan alttaşlar kullanılmaktadır. İyi verim, geniş bant aralığı gibi iyi anten performansı için düşük dielektrik sabitli kalın alttaşa sahip olmalıdır. Fakat bu anten boyutunu arttırmaktadır. Daha yüksek dielektrik sabitli ince alttaşlar mikrodalga devreler için istenilen bir durumdur. Çünkü istenmeyen ışınmayı en aza indirmek, kuplaj ve daha küçük anten boyutu için dar sınır alanı gerekmektedir. Daha büyük kayıp olduğundan düşük verimli, nisbeten daha dar bant genişliğine sahiptir. Mikroşerit antenler mikrodalga devrelere sık entegre edildiğinden anten performansı ile devre tasarımı arasında uyum sağlamalıdır. Tasarım yapılırken gerekli optimizasyon yapılmalıdır.

Mikroşerit antenler genellikle yama şekilleriyle isimlendirilmektedir. Işıma elemanları ve besleme hattı dielektrik malzeme üzerine montaj edilmektedir. Işıma yaması kare, dikdörtgen, dipol, daire, eliptik, üçgen veya başka konfigürasyonlarında olabilmektedir. Analizin ve üretimin kolay olması iyi ışınma karakteristiği özellikle de düşük çapraz polarizasyondan dolayı kare, dikdörtgen, dipol ve daire konfigürasyonları sıkça kullanılmaktadır. Mikroşerit antenler dizi antenler olarak tasarlanabildiği için ilgi görmektedir. Doğrusal ve dairesel polarizasyonlar ya mikroşerit dizi ya da tek elemanla gerçekleştirilebilmektedir.

4.2 Analiz Yöntemleri

Mikroşerit antenler için birçok analiz yöntemleri bulunmaktadır. En yaygın olanlar; iletim hat, kavite, tam dalga modelleridir. İletim hat modeli bunların arasında en kolay olan yöntemdir. İyi fiziksel anlayışı olan fakat daha az doğru ve kuplaj modeli daha zordur. İletim hat modeli ile kavite modelini kıyaslırsak kavite modeli daha doğru aynı zamanda da daha karmaşıktır. Fiziksel olarak iyi kavranabilen kuplaj modelinde oldukça zor olan bir yöntem olmakla beraber başarıyla kullanılmaktadır. Genelde uygulamalarda tam dalga modeli çok doğru, çok yönlü ve tek elemanlı, sonlu, sonsuz diziler, yığın elemanlar, sıradan şekilli elemanlar ve kuplaj davranabilmektedir. Fakat kompleks modellerdir. Genellikle fiziksel kavraması daha zordur.

Dikdörtgen yama en çok kullanılan konfigürasyondur. Bu konfigürasyonu kullanarak iletim hat ve kavite modeliyle analiz etmek kolaydır. İnce yüzeyler için en doğru sonuçlar vermektedir. Tasarlanmış olunan mikroşerit yama antenlerde gösterimi ve hesaplaması daha kolay olduğundan iletim hat modeli kullanılmıştır.

4.2.1 İletim hat modeli

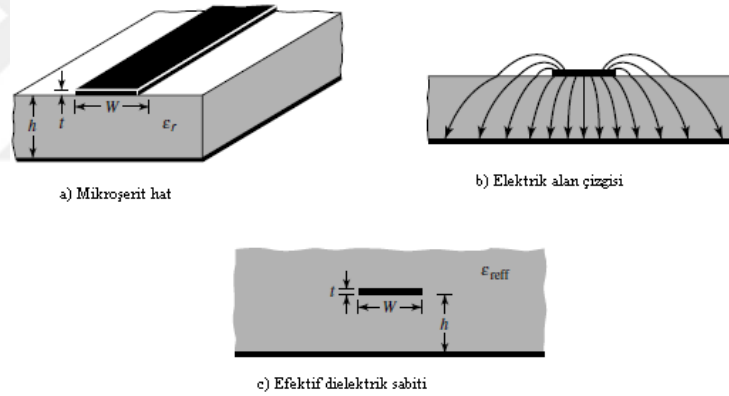
İletim hat modeli, analiz yöntemlerin içinde en kolay olduğu belirtilmiştir. Fakat en az doğru sonuçlar verir, yönlülüğü eksiktir. Diğer taraftan fiziksel kavraması en kolay analiz yöntemidir.

4.2.1.1 Saçak etkisi

Yamanın boyutlarından dolayı saçaklanma uzunluk ve genişlik boyunca sonludur. Şekilde mikroşerit antenin iki ışması yarıklar içinde ve uzunluk boyunca saçaklanma şekilde gösterilmiştir. Aynı uygulama genişlik için de gösterilmektedir. Saçak miktarı alttaşın yüksekliği ve yamanın boyutunun bir fonksiyonudur. Elektrik alan prensibi için xy yüzeyinde saçak, yamanın uzunluğunun alttaşın dielektrik sabiti ve (L/h) alttaşın yüksekliğinin oranının bir fonksiyonudur. Mikroşerit antenlerin $L/h \gg 1$ olduğundan

saçak azalmaktadır. Ama antenin rezonans frekansından etkilendiği dikkate alınmalıdır. Yama genişliği için de aynısı geçerli olmaktadır.

Mikroşerit hat için elektrik alan çizgileri şekilde gösterilmektedir. Bu iki dielektriklerin homojen olmayan çizgisidir. Altaşdaki elektrik alan çizgilerin çoğu ve havadaki çizgilerin bir kısmı görülebilmektedir. $W/h \gg 1$ ve $\epsilon_r \gg 1$ için, elektrik alan çizgilerin büyük kısmı dielektrik de yoğunlaşmıştır. Saçak bu durumda, mikroşerit hattının fiziksel boyutlarından elektriksel olarak daha büyük görünmesini sağlamaktadır. Dalgaların bir bölümü altaşda ve havada yayıldığından saçak oluşması ile hat boyunca dalga yayılım ile tanımlanır. Efektif dielektrik sabitini tanımlamak için, orjinal boyutlarda merkez iletken varsayarsak ve topraklama üzerinde yüksekliği olan mikroşerit hattın birdielektrik üzerindedir.



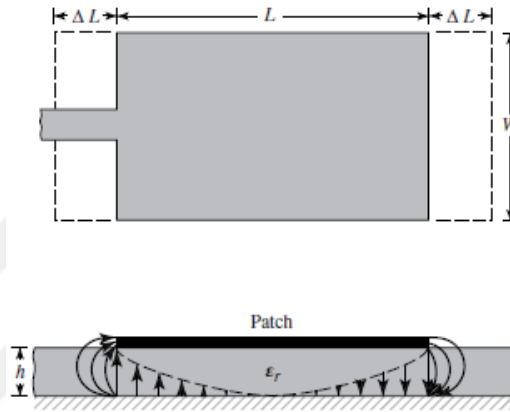
Şekil 4.3 Mikroşerit hat, elektrik alan, efektif dielektrik sabiti

Efektif dielektrik sabiti aynı dielektrik malzemenin sabitine bağlı olarak tanımlanmaktadır. Bu yüzden şeklin hattı aynı elektriksel karakteristiklere, özellikle yayılım sabitine, Şekil 4.4' deki gibi gerçek hatta sahiptir. Efektif dielektrik sabiti $1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r$ oranında değerlere sahiptir. Uygulamaların çoğunda altaşın dielektrik sabiti birden çok daha büyük $\epsilon_r \gg 1$, efektif değeri ise altaşın gerçek dielektrik sabitine yakındır. Efektif dielektrik sabiti ayrıca frekansın bir fonksiyonudur. Çalışma frekansı arttığında, elektrik alan çizgilerinin büyük kısmı altaşta yoğunlaşmaktadır. Efektif dielektrik sabiti altaşın dielektrik sabiti değerine yaklaşmaktadır.

Düşük frekanslarda efektif dielektrik sabiti aslında aynı sabittir. Orta frekanslardaki değeri yavaş bir şekilde artar ve sonunda alttaşın dielektrik sabitinin değerine yaklaşır. Yama genişliği W , dielektrik alttaş kalınlığı h olan antenin W/h oranı ve efektif dielektrik sabitinin formülü aşağıda verilmektedir.

$$W/h > 1 \quad (4.2)$$

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



Şekil 4.4 Mikroşerit dikdörtgen yama antenin fiziksel ve efektif uzunlukları

4.2.1.3 Efektif uzunluk, rezonans frekansı ve efektif genişlik

Saçak etkisinden dolayı mikroşerit antenin yama uzunluğu elektriksel olarak fiziksel boyutundan daha büyüktür. Yama uzunluğu ΔL kadar uzamaktadır. ΔL efektif dielektrik sabitinin ve yama genişliği ile boyunun oranının (W/h) bir fonksiyonudur. Saçılmış alan uzunluğu olan ΔL 'nin yaklaşım bağıntısı:

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

Yamanın uzunluğu her bir tarafı üzerinde ΔL kadar uzadığından, yamanın efektif uzunluğu ($L = \lambda / 2$ saçaksız baskın TM_{010} mod)

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (4.5)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (4.6)$$

$$L \approx (0.47 - 0.49) \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_R}} = (0.47 - 0.49) \lambda_d \quad (4.7)$$

λ_d : Dielektrik içindeki dalga boyu

Baskın TM_{010} mod için mikroşerit antenin rezonans frekansı yama uzunluğu birbiriyle ilişkilidir. Rezonans frekansı aşağıda verilmektedir.

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.8)$$

c boş uzaydaki ışık hızı, eşitlikte saçak hesaba katılmamaktadır. Saçakları hesaba katmaz, kenar efektlerini içerecek şekilde modifiye edilerek denklem 4.9'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$(f_{rc})_{010} = \frac{1}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{2(L + \Delta L) \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = q \frac{1}{2L \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = q \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.9)$$

$$q = \frac{(f_{rc})_{010}}{(f_r)_{010}} \quad (4.10)$$

Denklem 4.10'daki q saçak faktörü olarak bilinir. Alttaş yüksekliği arttığında saçak da artmakta ve ışınma uçları arasında ayrılmanın genişlemesine ve daha düşük rezonans frekansına sebep olmaktadır. Rezonans frekansında tasarlanmış saçığa dayanan daha küçük yamadaha uzun görünmektedir. Rezonans frekansı saçaktan dolayı %2-6 arasında azalmaktadır.

Yama genişliği:

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (4.11)$$

Mikroşerit yama antenin admintansı Y reel kısım G_1 ve sanal kısım olan B_1 ile denklem 4.12'de gibi ifade edilmektedir. G_1 denklem 4.13, B_1 denklem 4.14'deki gibidir.

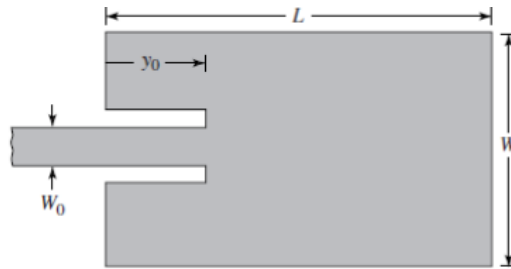
$$Y_1 = G_1 + jB_1 \quad (4.12)$$

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (4.13)$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0.636 \ln(k_0 h)] \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (4.14)$$

Uzak alan bölgesindeki ortak iletkenlik eşitlik 4.15'de verilmiştir.

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right] J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta \quad (4.15)$$



Şekil 4.5 Mikroşerit antenin yama ve besleme hattı

Besleme hattı genişliği W_0 olan antenin karakteristik empedans Z_c denklem 4.16 ve denklem 4.17'da gösterilmektedir.

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right] \frac{W_0}{h} \leq 1 \quad (4.16)$$

$$Z_c = \sqrt{\epsilon_{reff}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right] \frac{W_0}{h} \leq 1 \quad (4.17)$$

İç besleme için giriş direnci yaklaşık olarak eşitlik 4.18'de verilmiştir.

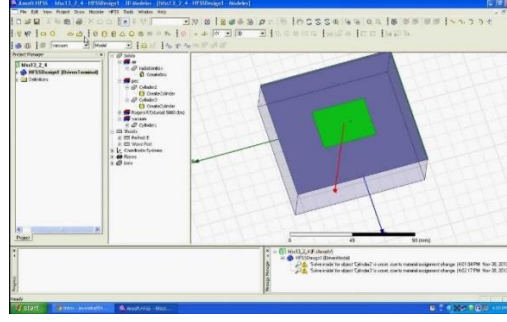
$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) = R_{in}(y = 0) \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (4.18)$$

5. ANTEN TASARIMI VE ANALİZİNDE KULLANILAN BENZETİM PROGRAMLARI

5.1 Ansoft HFSS Programı (Ansoft Yüksek Frekans Yapı Simülatörü)

Ansys HFSS programı antenler, dizi antenler, RF veya mikrodalga bileşenleri yüksek hızlı ara bağlantılar, filtreler, konektörler ve baskı devre kartları gibi yüksek frekanslı elektronik ürünleri tasarlamak ve simüle etmek için kullanılan üç boyutlu elektromanyetik (EM) simülasyon yazılımıdır. Programın üreticisi Corporation olan ticari yazılım programıdır. Bileşenlerin elektriksel davranışı analiz eder, yakın ve uzak alanda üç boyutta elektromanyetik dalga'nın davranışını inceler. Anten karakteristiği olan S parametreleri, kazanç, yönlülük, ışınım deseninin yanında elektrik ve manyetik alan dağılımlarını analiz edebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemiyle FEM (Finite Element Method) yapıları çözen simülatördür. FEM, karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için çok güçlü bir araçtır. Bu yöntemin yaklaşımı, karmaşık bir yapıyı elemanlar olarak bilinen sonlu küçük bölümlere bölmektir. Bu elemanlar birbirlerine düğüm adı verilen eklemeler aracılığıyla bağlıdır. Her benzersiz eleman çözüm karmaşıklığını önemli ölçüde azaltacak şekilde diğerlerinden bağımsız olarak çözülür. Son çözüm daha sonra tüm elemanları yeniden bağlayarak ve çözümleri birleştirerek hesaplar. Sonlu elemanlar yöntemi sadece elektromanyetik uygulamalarda değil aynı zamanda aerodinamiği ve ısı transferi gibi diğer mühendislik uygulamalarında da kullanılmaktadır.

Bu yöntem HFSS'deki simülasyonun temelini oluşturmaktadır. HFSS, büyük dörtyüzlü elemanların sayısı biçiminde geometrik modele böler. Her dört yüzlü sonlu eleman dört yüzlü eşkenar üçgen ve örgü olarak bilinen dört yüzlü biçimlerin toplanmasıyla oluşmaktadır. Maxwell'in eşitliği alan miktarıyla formülize edilmektedir. Matris eşitliğindeki son dönüşümler geleneksel nümerik tekniklerin kullanılmasıyla çözümlenmektedir. Ansys HFSS benzetim programının ara yüzü Şekil 5.1'de verilmektedir.

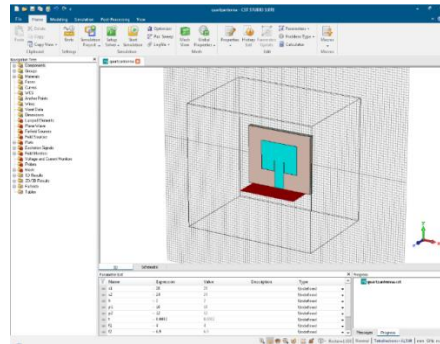


Şekil 5.1 Ansys HFSS programının kullanıcı ara yüzü

5.2 CST Studio Suite Programı (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi)

CST Studio Suite, elektromanyetik (EM) bileşen ve sistemleri tasarlamak, analiz etmek ve optimize etmek için kullanılan birçok alt modülden oluşan yüksek performanslı üç boyutlu tasarım yapabilen benzetim programıdır. EM spektrumundaki uygulamalar için elektromanyetik alan çözümler, CST Studio Suite'deki tek bir kullanıcı arayüzü içinde bulunur. Frekans ve zaman domain çözümleri bulunmaktadır.

Düşük frekansdan yüksek frekanslara kadar tüm elektromanyetik yapıları, optik, termal ve bazı mekanik problemleri çözebilen ve simüle edebilen bir yazılım programıdır. Yüksek performansı ile etkili ve hızlı çözüm sağlamaktadır. Anten, metamateryel yapılar, filtre, radar uygulamalarında, düzlemsel ve çok katmanlı yapılarda, biyomedikal tasarım gibi birçok alanlarda etkili ve hızlı çözüm sağlar. CST Studio Suite programı sonlu entegrasyon yöntemini kullanarak analiz yapar. Anten tasarımlarında CST Studio Suite Mikrodalga Modülü kullanıldı. CST Studio Suite programının kullanıcı ara yüzü Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

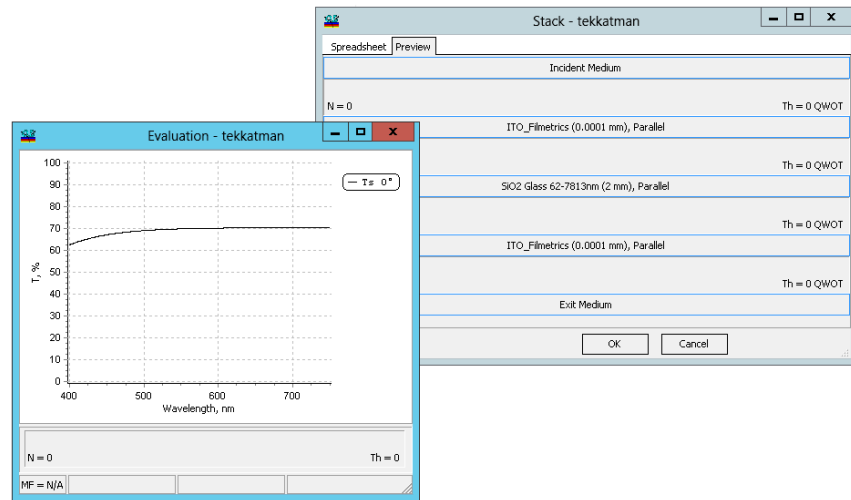


Şekil 5.2 CST Studio Suite programının Mikrodalga Modülü kullanıcı ara yüzü

5.3 OptiLayer

OptiLayer programı her türlü optiksel kaplamanın tasarlanmasına izin verir. Tek veya çok katmanlı yapılar, yansıtıcı önleyici kaplamalar: dar bant, geniş bant, tek veya çoklu bant. Yüksek yansıtıcı, aynalar, her türlü filtreler, polarizörler, renkli kaplamalar, kırışık ve yarı kırışık kaplamalar gibi birçok alanlarda kullanılmaktadır. OptiLayer yazılım programı herhangi bir spektral ve açısal aralıkta çalışır. Kolaylık sağlayan spektral ve açısal mod olmak üzere iki ana moda sahiptir. Her iki modda amaçlar ve ölçüm verileri hem spektral parametrelerle hem de açısal alanlar üzerinden belirlenebilir. Spektral parametreler mikrometre, nanometre, angstrom, elektron volt, terahertz veya gigahertz biriminde belirlenebilir. Açısal parametreler ise ya derece ya da radyan cinsinden belirtilmektedir.

OptiLayer optiksel kaplamaların birçok çeşitli özelliklerini incelemektedir. İstenilen dalga boyunda yansıtma, geçirgenlik, soğurma gibi optiksel parametrelerini analiz edebilmektedir. Alttabakanın ön ve arkasına bir veya daha fazla kaplama yapılarak tüm özellikleri değerlendirilebilir. Ayrıca bu programda yansıtma ve iletme bağlı diferansiyel faz kaymaları, iletilen ve yansıyan ışık için grup gecikmesi dağılımı, elipsometrik açılar ve kaplama içindeki elektrik alan dağılımı gibi birçok özelliği analiz etmek için de farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. OptiLayer programının ara yüzü Şekil 5.3'de gösterilmektedir.



Şekil 5.3 OptiLayer yazılım programının ara yüzü

6. OPTİKSEL SAYDAM ANTENLER

Optik saydam antenler; iletken yama, besleme hattı ve topraklama düzlemleri metalik ızgara veya saydam iletken oksit olan TCO'lardan ve saydam dielektrik katmandan oluşan görünür bölgede şeffaf olan antenlerdir. Geleneksel mikroşerit yama antenlerden farklı alttaşlardan oluşmaktadır. FR-4, Rogers serisi gibi dielektrik malzeme olan alttaşlardan farklı olan PET, polimid akrilik, kuvars, cam, alümina gibi şeffaf alttaşlar kullanılmaktadır. Saydam antenler mikroşerit, döngü, ızgara, metamalzemeli farklı anten çeşitlerinde tasarlanabilmektedir. Optiksel saydam antenler gelecekte kablosuz iletişim sistemi için çok büyük rol oynaması ve 5G teknolojisinde kullanılması öngörülmektedir. Günümüzde saydam antenler hem optiksel özellik hem de anten özelliği gösterdiğinden sivil ve askeri alanlarda kullanılmaktadır. Son yılların çalışması olan bu antenler görünür bölgede şeffaf olması birçok avantajı getirdiğinden geniş kullanım alanına sahiptir. Çevre üzerindeki görsel etkiyi arttırmak için bazı kampanyalar başlatılmıştır. Örneğin US'deki yarım milyondan fazla baz istasyonu ve 1.5 milyonun üzerinde buna hizmet eden antenler bulunmaktadır. Bu yüzden çevresel estetikliği arttırmak için saydam antenlere ihtiyaç duyulmuştur. Binaların içine, kilise kulesine, bayrak direğine, heykelsi sanatlara, bazı farklı çeşitlerdeki ağaçlara ve diğer doğal özellikteki yapılara montaj edilerek estetikliği bozulmamıştır. Bu tip cihazlar uzun binaların büyük camlarına da montaj edilebilmektedir. Özellikle kentsel bölgelerde efektif kullanılan büyük antenleri gizlemek sorun olmaktadır. Bu nedenle ince ve saydam antenler tasarlanmaktadır.

Diğer bir çalışma NASA polyester film kaplı gümüş olan AgHT iletken kaplama ile şeffaf mikroşerit yama anten üretmiştir. Daha sonra saydam antenlerin destekçilerinden biri olan Saber'in optiksel saydam anteni küçük uydularda kullanmıştır. Saydam antenlerin optiksel geçirgenliklerinin ve mikrodalga bölgesinde iletkenliklerinin yüksek olması istenilmektedir. Bu nedenle uygulanan methodlardan biri görünür bölgede şeffaf olmayan sıradan mikroşerit yama antenlerin metalik ızgara şeklinde tasarlanmasıdır. Anten tasarımı yapılırken boyutu küçük, hafif ve sağlam olmaları geometrik yapıları sayesinde montaj kolaylığı ve daha kolay üretilebildiği için mikroşerit antenler şeklinde yaygın olarak görülmektedir.

Uydular (örneğin CubeSat) uzayda önemli bir rol oynamaktadırlar. Maliyet ve ağırlık her zaman başarılı bir uydu tasarlamak için kilit noktası olmuştur. Bazı araştırma grupları daha az maliyetli ve düşük profilli antenler üretmek için çözüm sunmuştur. Çözüm olarak güneş hücrelerine metalik ızgara antenlerin saydamlaştırılarak montaj edilmesidir.



Şekil 6.1 Cubesat

Uydularda enerji hasatlamak için kullanılan güneş hücrelerine saydam metalik ızgaralar entegre edilerek hem kabloluz iletişimi sağlamakta hem de güneş panelleri ışığı kolayca soğurarak enerji hasatlamayı sağlamaktadır. Son yıllarda uydu iletişimi ve güneş panellerinde metalik ızgara antenler sık görülmektedir. TCO'lu şeffaf antenlerle kıyaslandığında bakırın iletkenliği daha yüksektir. Bu durum anten karakteristiğini etkilemektedir. Optiksel saydam ızgara antenlerde elektriksel iletkenliği ve optiksel geçirgenliği yüksektir.

Diğer bir uygulama olan TCO'lu saydam antenler yüksek optiksel geçirgenliği sağlamak, giyilebilir cihazlara ve temiz yüzeylere entegre edilebilmek için saydam iletken oksit filmler kullanılarak tasarlanmıştır. Saydam iletken oksit filmler olarak katkılanmış yarıiletkenler kullanılmaktadır. ITO (İndiyum Kalay Oksit), FTO (Flor Kalay Oksit), ZnO (Çinko Oksit), IZTO (İndiyum Çinko Kalay Oksit), galyum katkılı GZO gibi yarıiletken malzemelerle tasarlanabilmektedir. Yukarıdaki iletken oksit filmleri arasında elektriksel iletkenliği en yüksek olan olan ITO malzemesidir. Fakat

indiyum doğada sık bulunmadığından maliyet açısından diğer katkıli yarıiletkenler kullanarak tasarlanan anten çalışmaları da mevcuttur.

Son yıllarda optiksel geçirgenliği arttırmak için ince film oksit antenler geliştirilmektedir. Optiksel saydam antenler bazı giyilebilir araçlarda örneğin; CCD (Yük Bağlı Cihaz) kameralara, OLED (Organik Işık Yayan Diyot) dokunmatik ekranın içine entegre edilerek ışınım özellikleri karakterize edebiliyor. Yapılan çalışmalar üretilen prototiplerin Şekil6.2'deki gibi akıllı saat uygulaması Wİ-Fİ ve Bluetooth bağlanabilirliği mikrodalga ve görüntü teknolojisi geniş bir şekilde yayılmaktadır. Uçak camlarına entegre edilerek istenmeyen ışılardan korunmayı sağlamaktadır. Ayrıca UHF ve VHF bantlarında askeri araçlar içerisinde kara iletişim sağlamak için askeri araçlara yerleştirilmek üzere optiksel saydam antenler tasarlanabilmektedir. Böylece tek yönlü ışımayı sağlayarak araç sinyallerini ve diğer istenmeyen etkileri azaltmaktadır. Bu parametrelere bağlı olarak anten tasarımı yapılırken istenilen ışıma performansını, yüksek optiksel geçirgenliği ve en az kayıp (yansımalar) olacak şekilde tasarlanmalıdır. Günümüz teknolojisinde saydam antenler birçok alanlarda kullanılmak üzere tasarlanıp geliştirilmektedir.



Şekil 6.2 Optiksel saydam anten entegre edilmiş akıllı saat (Hong 2017)

Bilişim teknolojisinin hızlı ilerlemesi sayesinde kablosuz ortam sistemleri artarak yayılmıştır. Son yıllarda, Google Glass ve Apple Watch gibi giyilebilir cihazlarda da

popüler olmuştur. Giyilebilir gözlük ve saatlerin yaygınlaşan iletişim toplumunda önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Ayrıca kablosuz iletişimi destekleyici ürünler olan Google Glass ve Apple Watch gibi cihazların iletişim için antene ihtiyaç duyulmaktadır. Saydam ve esnek antenler cihazın şeffaf kısımları olan cam ve ekranlara entegre edilebilmektedir. Saydam iletken oksitler ekran endüstrisinde yaygındır. Şeffaf elektrotlar arasındaki başarı ölçütü, optiksel saydamlık ve elektriksel iletkenlik arasında bir seçimi barındırır, bu nedenle temiz ve iyi iletkenli ekran gerçekleştirmek için önemlidir (Hong,2016).

Günümüzde metalik ızgara antenlerin yanında saydam iletken oksit filmlerden oluşan nanometre kalınlıklarında tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenler üretilmektedir. Son zamanların çalışması olan çok katmanlı saydam antenler iki iletken oksit filmlerin arasına gümüş yerleştirilerek hem elektriksel iletme hem de optiksel iletme katkı sağlamaktadır. İki filmin arasına konulan gümüş iletim bandına katkı sağlayarak iletkenliği arttırmaktadır. İletken oksit filmlerin kalınlıkları 40 nm-50 nm arasında değişirken gümüş kalınlığı 9-15 nm kalınlığı arasında değişmektedir. Genellikle 10 nm kalınlığında gümüş kullanılmaktadır. Çok katmanlı antenler yüzey plazma rezonansı etkisinden dolayı sandviç şeklinde tasarlanmaktadır. Gelen ışık, katmanlı yapıdaki serbest elektronlarla girişim oluşturarak (yüzey plazmonu) görünür bölgenin belli dalga boylarında optiksel geçirgenlik maksimum olmaktadır. Kullanılan malzemeye ve kalınlığa göre dalga boyu değişmektedir. Saydam antenler için birçok iletken oksit filmler ve alttaşlar kullanılmaktadır.

6.1 Optiksel Saydam Antende Kullanılan Malzemeler

Optiksel saydam antenlerde diğer antenlerden farklı alttaşlar kullanılmaktadır. Görünür bölgede şeffaf ve elastik olan akrilik, polimid, PET gibi dielektrik malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler elastik olmaları nedeniyle akıllı saatlere ve dokunmatik ekranlara montaj edilmek için anten tasarımlarında kullanılmaktadır. Optiksel saydam antenlerde en sık kullanılan alttaşlardır.

Bunun yanı sıra cam, bk7, alümina ve kuvars gibi şeffaf alttaşlar da kullanılmaktadır. Kuvars ve alümina akrilik, polimid ve PET kadar elastik malzeme olmamasına rağmen yüksek sıcaklığa dayanıklı olması nedeniyle yüksek sıcaklıkta kaplama gerektiren yöntemlerde avantaj sağlamaktadır.

6.1.1 Saydam iletken malzemeler

- Indiyum Titanyum Oksit (ITO) elektriksel iletkenliği en yüksek olan iletken oksittir. Aynı zamanda görünür bölgede optiksel iletimi de yüksek olması saydam anten tasarımında kullanılması avantajdır. Termal ve basınç stabiliteye sahiptir. Oda sıcaklığında kristal yapıda bulunmaktadır. Bu yüzden eğrilme çapı küçüktür. Doğada nadir bulunduğu için pahalı iletken bir malzemedir.
- Flor Titanyum Oksit (FTO) saydam ve iletken olmakla birlikte yüksek sıcaklığa dayanıklı ve doğada sık bulunduğu için ITO'dan daha ucuz bir malzemedir.
- ZnO Aliminyum (Al), Gümüş (Ag), Galyum(Ga) gibi malzemelerle katkılandırılarak veya çok katmanlı yapı olarak kullanılmaktadır. Optiksel iletimi % 80'in üzerine çıkabilmektedir.
- Yüksek elektriksel iletkenliğe ve dayanıklılığa sahip grafenkullanılarak tasarlanan anten çalışmaları mevcuttur.
- Baryum Kalay Oksit ($BaSnO_3$) çok katmalı yapı olarak optoelektronik uygulamalarda kullanılmış ve saydam antenler için kullanılmaya aday olan iletken oksitlerden biridir. Saf halde veya mobilitesini arttırmak için Lantanla (La) katkılandırılarak kullanılmaktadır. Yüksek optiksel geçirgenliğe ve iletkenliğe sahip bir malzemedir.
- Baryum Titanyum Oksit ($BaTiO_3$) bu malzemedeki anten çalışmasına kullanılmamış. Fakat optiksel saydam antenler tasarlamak için kullanılacak iletkenoksit filmlerden biridir. Saf halde veya katkılandırılarak kullanılmaktadır. Yüksek optiksel geçirgenliğe sahiptir.

6.2 Optik Saydam Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları:

- Çevre dostu
- Görünür bölgede şeffaf.
- Hafif
- Cam ve dokunmatik ekranlar gibi temiz yüzeylere kolay entegre edilebilir.
- Elastik

Dezavantajları:

- Diğer bakırlı yama antenlere nazaran iletkenliği ve kazancı düşüktür.

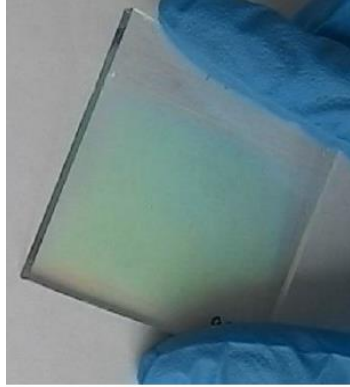
6.3 İndiyum Kalay Oksit (ITO)

ITO filmi kalay oksitle (SnO_2) katkılandırılmış İndiyum Kalay Oksittir. ITO malzeme biliminde yapısından ve bileşiminden kaynaklı olarak saydam iletken oksitler sınıfındadır (Güzeller,2016).İndiyum Kalay Oksit n tipi yarıiletkenidir, $2 - 4 \times 10^{-4} \Omega cm$ değerleri arasında düşük dirence sahiptir. Taşıyıcı yoğunluğunun yüksek olması düşük dirence neden olmaktadır. Çünkü Fermi enerjisi seviyesi (E_F) iletim seviyesinin (E_C) üzerinde yer almaktadır. ITO ince filmlerin dirençleri indiyum kalay yoğunluğuna göre değişmektedir. Yüksek iletkenlikteki ITO filmlerin taşıyıcı yoğunlukları $10^{20} - 10^{21} cm^{-3}$ arasındadır. Ayrıca $3.5eV - 4.3eV$ arasında geniş banda sahiptir. Görünür bölgede kırılma indisi 1,8 ile 2,1 arasındadır. Kırılgan, pahalı, temiz yüzeylere kolay kaplanabilen ve saydam iletken oksit filmleri arasında oldukça yüksek iletkenliğe sahiptir. Bu yüzden diğer iletken oksitlere göre tercih edilme sebebidir.

Malzeme yapısına bakacak olursak tavlama işleminden önce amorf yapıya sahip ve yapısal kusurlar bulunmaktadır. Amorf yapıda indiyum ve kalay arasında herhangi bir yer değiştirme tepkimesi bulunmadığından dolayı taşıyıcı yoğunluğu düşüktür. Kristal yapıya sahip olmadığından bant aralığı dar ve oksijene doymamış alt oksit fazları içerdiğinden optiksel ve elektriksel iletkenliği düşüktür. Tavlama işleminden sonra kristal yapıya geçmektedir. Böylece yapısal kusurlar azalmakta, bant genişliği

artmaktadır. İndiyum ile oksijen arasındaki zayıf bağlar koparak taşıyıcı yoğunluğunun artmasıyla iletkenlik de artmaktadır. Yapısal kusurlardan kaynaklanan optik saçılmalar azalarak optiksel geçirgenliğe de katkı sağlamaktadır. Tavlama sonrasında elektriksel iletkenliği ve optiksel geçirgenliği yüksektir.

ITO ince filmi, iki ana özelliği nedeniyle en yaygın olarak kullanılan şeffaf iletken oksitlerden biridir. Bunlar elektrik iletkenliği, optik saydamlığı ve ayrıca ince bir film olarak büyütülebilmek kolaylığıdır. Tüm şeffaf iletken filmlerde olduğu gibi, iletkenlik ve şeffaflık arasında bir optimum bir seçim yapılmalıdır. Çünkü kalınlık arttığında yük taşıyıcı konsantrasyonun da artar ve malzemenin elektriksel iletkenliğide artmış olur, ancak diğer taraftan optiksel iletimi azalır. Görünür ile yakın kızılötesi bölgesinde optiksel geçirgenliği % 80' in üzerindedir. İndiyum kalay oksit ince filmleri ITO ince filmler, genellikle Doğru Akım Magnetron Püskürtme (DC Sputtering), Radyo Frekanslı Püskürtme (RF Spttering), Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), Sol-jel, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), Elektron Demeti Püskürtme gibi kaplama yöntemleriyle üretilebilmektedir. Aşağıdaki Şekil 6.3'de Sol-jel daldırma tekniği ile kaplanmış ITO ince filmi gösterilmektedir.



Şekil 6.3 Sol-jel daldırma tekniği ile kaplanmış ITO ince filmi

ITO araştırma ve endüstride sıkça kullanılan optoelektronik malzemedir. Elektromanyetik spektrumun görünür ve yakın IR bölgelerinde benzersiz özellikleri nedeniyle geniş kullanım yelpazesine sahiptir. ITO ince filmi saydam antenler, düz panel

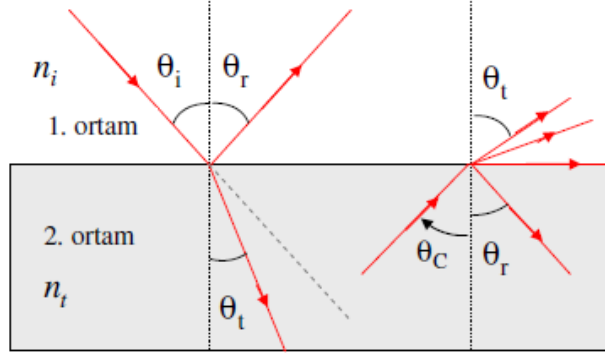
ekranlar, akıllı pencereler, ince film fotovoltaikler, süpermarket dondurucularının cam kapıları ve mimari pencereler gibi birçok uygulama alanı mevcuttur.

ITO ince filmler yansıtıcı olmayan kaplamalar ve ince filmlerin iletken, şeffaf elektrotlar olarak kullanıldığı sıvı kristal ekranlar (LCD'ler) ve genellikle elektrolüminesans, sıvı kristal ekranlar, düz panel ekranlar, plazma ekranlar, dokunmatik paneller ve elektronik mürekkep uygulamaları gibi ekranlar için şeffaf iletken kaplama yapmak için kullanılır. ITO ince filmler ayrıca organik ışık yayan diyotlarda, güneş pillerinde, çeşitli optik kaplamalar özellikle otomotiv için kızıl ötesi yansıtan kaplamalar (sıcak aynalar), organik ışık yayan diyotlarda (OLED), ön camlara eklenerek uçak ön camlarının buzunu çözmek için kullanılır. Diğer kullanımları arasında gaz sensörleri, yansıma önleyici kaplamalarda bulunmaktadır.

Son zamanlarda optiksel saydam antenlerde elektriksel ve optiksel özelliklerinden dolayı tercih nedeni olmuştur. Nanometre mertebesinde şeffaf alt tabanlara kaplanarak anten haline getirilmektedir. Farklı kalınlıklarda tek veya çok katmanlı şeffaf antenler tasarlanıp üretilebilmektedir. Saydamlık ve hafiflik gerektiren uygulama alanlarında önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada tek ve çok katmanlı saydam antenlerde saydam iletken oksit olan ITO malzemesi kullanılarak tasarlanmıştır.

6.4 Fresnel Eşitlikleri

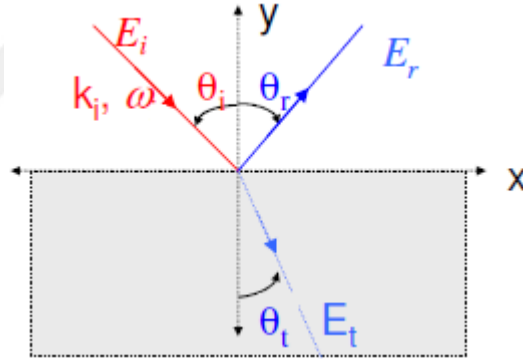
Fresnel eşitlikleri geçen ve yansıyan dalgaların genliği, fazı ve polarizasyonu ile ilgilidir. Homojen bir ortamda doğrusal olarak aynı yönde ilerleyen ışık farklı ortamın ara yüzeyine geldiğinde doğrultusu değişir. Farklı ortama gelen ışık ara yüzeye geldiğinde yansıma, kırılma, saçılma ve soğurma gibi olaylar meydana gelir. Ara yüzeye gelen dalgaların parametreleri Fresnel eşitlikleriyle türetilmektedir. Optiksel yüzeylerde ışığın davranışı Maxwell denklemleriyle tanımlanmaktadır. Snell yasası ve iki ortam arasındaki ara yüzeyin elektrik alan ve manyetik alan ilişkilerinden oluşmaktadır. Snell yasası, kırılma indisleri farklı olan bir ortamın ara yüzeyine geldiğinde kırılmaya uğrayan bir ışığın hareketini tanımlar. Farklı ortamın ara yüzeyine gelen ve kırılmaya uğrayan ışığın normalle yaptığı açı Şekil 6.4' de gösterilmektedir.



Şekil 6.4 İki farklı ortamda ışığın kırılması

Birinci ortamın normalle yaptığı açı θ_i , kırılma indisi n_i , ikinci ortamın normalle yaptığı açı θ_t ve kırılma indisi n_t 'den oluşan Snell yasası denklem 6.1 ile ifade edilir.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (6.1)$$



Şekil 6.5 Ara yüzeye gelen elektrik alan vektörleri

Ara yüzeye gelen, yansıyan ve geçen ısıık için sırasıyla elektrik alan vektörleri denklem 6.2, 6.3, 6.4'deki gibi gösterilebilir:

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (6.2)$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_r)} \quad (6.3)$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_t)} \quad (6.4)$$

Dielektrik ortamın ara yüzeyine ışık geldiğinde fazları farklı olan iki tane titreşim oluşur. Biri alan vektörünün geliş düzlemine dik olan s kutuplu ışık diğeri ise alan vektörü gelme düzlemine paralel olan p kutuplu ışıktır. Elektrik alan vektörünün geliş düzlemine dik, manyetik alan vektörünün geliş düzleminde olduğunda ise enine elektrik (TE mod) veya polarizasyonun s bileşeni denir. Manyetik alan vektörü geliş düzlemine dikse enine manyetik (TM mod) veya polarizasyonun p bileşeni denir (Güzeller,2016).

S kutuplu ışık için yansıyan ışığın gelen ışığa oranı, geçen ışığın gelen ışığa oranı aşağıdaki denkleme 6.5, 6.6'deki gibidir.

$$\frac{E^s_{or}}{E^s_{oi}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (6.5)$$

$$\frac{E^s_{ot}}{E^s_{oi}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (6.6)$$

P kutuplu ışık için yansıyan ışığın gelen ışığa oranı, geçen ışığın gelen ışığa oranı aşağıdaki denklemlerle gösterilmektedir:

$$\frac{E^p_{or}}{E^p_{oi}} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (6.7)$$

$$\frac{E^p_{ot}}{E^p_{oi}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (6.8)$$

S-kutuplu ışık için Fresnel katsayıları olan yansıma ve geçirgenlik katsayıları denklem 6.9, 6.10'da verilmiştir.

$$r_s = \frac{E^s_{or}}{E^s_{oi}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (6.9)$$

$$t_s = \frac{E^s_{ot}}{E^s_{oi}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (6.10)$$

P kutuplu ışık için Fresnel katsayıları olan yansıma ve geçirgenlik katsayıları denklem 6.11, 6.12'de verilmiştir.

$$r_p = \frac{E^{p_{0r}}}{E^{p_{0i}}} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (6.11)$$

$$t_p = \frac{E^{p_{0t}}}{E^{p_{0i}}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (6.12)$$

Poynting vektörü olan S eşitlik 6.13'deki gibidir.

$$S = \frac{c}{4\pi} [E \times H] = \frac{c}{4\pi} n |E|^2 \quad (6.13)$$

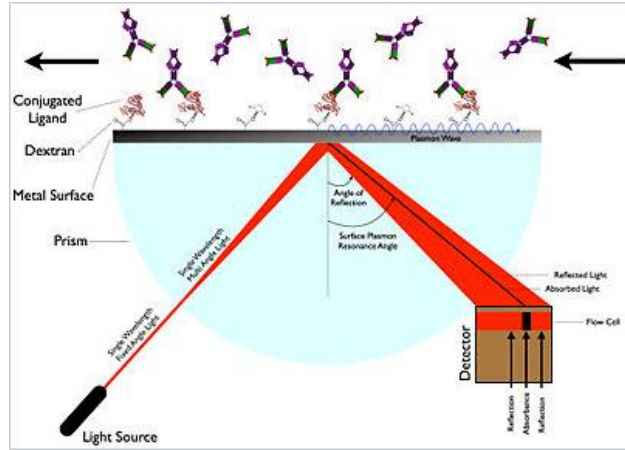
İzotropik ortamda normalle yaptığı açıya göre yansıma ve geçirgenlik katsayıları kırılma indislerine bağlı olarak yazılabilir:

$$R_s = R_p = \left| \frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} \right| \quad (6.14)$$

$$T_s = T_p = \frac{4n_i n_t}{(n_t + n_i)^2} \quad (6.15)$$

6.5 Yüzeysel Plazma Rezonansı

Yüzeysel plazmon rezonansı (SPR), ara yüzeye gelen ışık ileten yüzeydeki serbest elektronları uyularak rezonans salınımı oluşturması olayına denir. SPR, metal düzlemi veya yarıiletken malzemelerin yüzeyine malzemenin adsorpsiyonunu ölçmek için birçok standart aracın temelini oluşturmaktadır. Farklı renk tabanlı biyosensör uygulamasının, çip üzerindeki çeşitli laboratuvar sensörlerinin ve diatom fotosentezinin arkasındaki temel ilkedir. Çok katmanlı saydam anten tasarımlarında yüksek optiksel iletimi oluşturmaya sağlayan etkileşimdir. Görünür bölgenin belli dalga boylarında, belli iletken kalınlıklarda optiksel geçirgenlik maksimum olması bu ilkeye dayanmaktadır. Gelen ışık, katmanlı yapıdaki iletkenin serbest elektronlarını uyularak rezonans salınımına ile girişim oluşturmaktadır. Girişimin olduğu dalga boyu aralığında geçirgenlik maksimum olurken yansıma minimum olmaktadır. Görünür bölge ve kızılötesi bölgesi spektrumunda yüksek optiksel iletim sağlamak için çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüzeysel plazma rezonansın gösterimi Şekil 6.6'da verilmektedir.



Şekil 6.6 Yüzey plazma rezonansı

6.6 Fotolitografi Yöntemi

Anten, devre kartları ve metamalzeme gibi yapılarındielektrik malzemelerin üzerine çıkartmak için kullanılan yöntemdir. Fotolitografi yöntemi bazı üretim adımlarıyla gerçekleştirilmektedir. Üretim aşamaları aşağıda sırasıyla anlatılmaktadır. Tez çalışması kapsamında bakırlı yama anten fotolitografi yöntemi kullanılarak Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Mikrodalga İleri Araştırma Laboratuvarında üretilmiştir.

1. Negatif fotoresist filmin kaplama aşamasıdır. Kaplanacak olan devre kartı yüzeyi temizlendikten sonra üzerine karanlık ortamda fotoresist hava kabarcığı kalmayacak düzgün bir şekilde kaplanır.
2. Bakırlı devre kartı üzerine fotoresist ince film kaplandıktan sonra, Laminasyon cihazı açılarak $120^{\circ}C$ sıcaklığa gelene kadar beklenir. fotoresistin devre kartına tam olarak yapışmasını sağlamak için Laminasyon cihazı kullanılır. Cihaz $120^{\circ}C$ sıcaklığa geldikten sonra negatif fotoresist kaplı bakır katman birkaç kez cihazdan geçirilerek iyi yapışması sağlanır.
3. Simülasyon çalışmasında elde edilen anten geometrisi, bakır üzerine çıkarmak için geometrik yapı saydam asetat kağıdı üzerine printer yardımıyla basılır. Pozlama ünitesi içerisine negatif fotoresist kaplı bakır katmanlı yapı yerleştirilir. Daha sonra düzgün bir şekilde baskı elde edebilmek için asetat kağıdı fotoresist kaplı olan baskı devresi üzerine yerleştirildikten sonra asetat ile

fotorezist kaplı baskı devre arasında hiç hava kalmaması için saydam cam blok üzerine konulur. Pozlama işlemine başlatılır. Pozlama ünitesi içerisinde üretilen UV ışığı, asetat kağıdı üzerinde yer alan karanlık bölgeden geçemez ve karanlık olmayan bölgelerden geçerek negatif fotorezist film üzerine düşer. UV ışığı, negatif fotorezist ince filmi üzerinde belirli bölgelerin kimyasal yapısını değiştirerek plastik özelliği kazanılmış desen oluşturur. Pozlama süresi kullanılan negatif fotorezistin kalitesine bağlı olmaktadır. Kullandığımız negatif fotorezist film için en uygun pozlamasüresi 180 saniyedir.



Şekil 6.7 Pozlanma için kullanılan laboratuvardaki cihazlar

Pozlanmamış kısımlar negatif fotorezist film üzerinden atılması için, geliştirici olarak adlandırılan Sodyum Karbonat çözeltisinde bir süre bekletilir. Sodyum Karbonat çözeltisi, çözücü olarak 100 mililitresu, çözünenolarak da1gram Sodyum Karbonat atılarak elde edilir.

4. Pozlanılmamış negatif fotorezist filmin kısmını geliştirici yoluyla atılarak açığa çıkan bakır katmanın çeşitli asit karışımı yardımıyla eritilerek atılması işlemidir. Eritme işlemi için oluşturulan çözelti Hidroklorik Asit ve Hidrojen Peroksit asitlerinden oluşmaktadır. Hidroklorik Asit, Hidrojen Peroksit karışımı 1:2 oranında hazırlanıldı. Hazırlanan asitli karışımın içerisine diğer adımlardan geçen anten yapıları atılarak, fotorezist film ile kaplı olmayan kısımlarda bulunan bakır katman çözeltide eritildi. Üretimi yapılan bakırlı yama antenin çeker ocakta çözeltide eritilme işlemi Şekil 6.8' deki gibi gerçekleşmektedir.



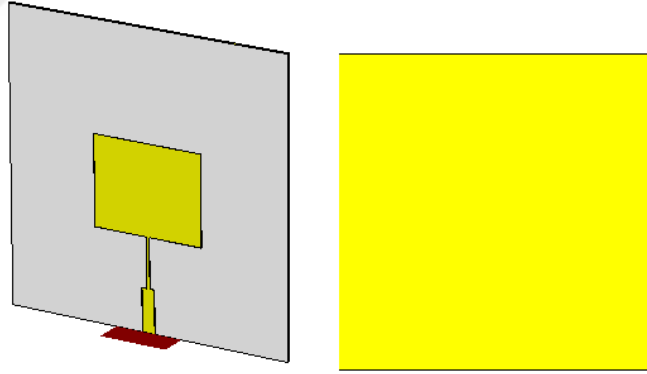
Şekil 6.8 Çeker ocakta bakırın kimyasal ile çözünmesi

5. Eritme işleminden sonra bakır katmanı korumak için kullanılan plastikleşmiş negatif fotoresist filmin çıkartılması işlemi için Sodyum Hidroksit çözeltisi kullanıldı. 100 mililitre suya 2 gram Sodyum Hidroksit çözeltisi ile atılma işlemiyle elde edilmektedir. Bakır katman üzerinde yer alan plastikleşen ince film katmanı bakır üzerinden hızlı bir şekilde uzaklaştırılarak anten yapısının ortaya çıkması sağlanır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1 Mikroşerit Yama Anten ve Optiksel Saydam Izgara Anten Tasarımı

5.8 (WLAN) çalışma frekansında alttaşı saydam ve elastik olan akrilik bant (ϵ_r :2.3, kayıp tanjantı $\tan \delta$:0.002), yama, besleme hattı ve topraklama düzleminde bakır bant kullanılan mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Dielektrik katman 88mm x 88 mm x1mm, yama 34 mm x 27 mm x0.07 mm boyutundadır. 50 ohmluk besleme hat boyutu 4 mm x 13 mm çeyrek dalga dönüştürücü ise 1mm x 15mm, boyutundadır. Çeyrek dalga dönüştürücü mikroşerit yama anten CST Studio ve Ansys HFSS yazılım programlarında tasarlanarak simüle edilmiştir. Mikrodalga İleri Araştırma laboratuvarında fotolitografi yöntemiyle üretilerek Network Analizör aletinde geri dönüş kaybı ve voltaj dalga oranı ölçüm sonuçları alınmıştır. Alınan ölçüm ve simülasyon sonuçları kıyaslanmıştır. CST Studio Suite ve üretilen antenin önden ve arkadan görünüşü Şekil 7.1’de gösterilmektedir.



Şekil 7.1 Cst programında tasarlanan bakırlı yama antenin önden ve arkadan görünüşü

Üretimde kullanılan şeffaf ve elastik olan akrilik bant Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

Abstract—This paper presents the design and fabrication of a wideband, optically transparent armor embedded antenna for ground communication in military vehicles at UHF and VHF bands. This unique design allows for multidirectional radiation and helps reduce the vehicle's signature and other undesirable effects, such as air drag and cosine interference, while improving the gain. As a starting point, a horn-shaped monopole antenna is placed in the window and is optimized to achieve the highest bandwidth possible. Monopole architecture is chosen to minimize the antenna size and tilt the beam to the horizontal plane for a limited windshield. The geometry of the antenna is then modified by introducing stublike extensions and bent sections to achieve an octave bandwidth starting at 275 MHz. A special mesh compatible with nonuniform surface is cut out directly on the antenna to use for minimal antenna opacity. With this method, a 40% reduction in opacity compared with a uniformly meshed antenna is achieved. A prototype armor embedded antenna with multidirectional radiation pattern is fabricated and shown to provide 5–7 dBd gain in the desired bandwidth as well as excellent optical functionality.

Index terms—Military communication, mobile antennas, monopole antennas, UHF antennas.

1. INTRODUCTION

RECENT investments in infrastructures, such as cell phone towers, routing, and networking devices, have greatly enhanced wireless communication. Conversely, ad hoc communication networks cannot rely on such infrastructures and are susceptible to the adverse effects of the communication channel, such as multipath fading, attenuation, and nonlinearity. As the frequency of operation decreases, the aforementioned effects become less prominent, since radio waves with longer wavelengths can penetrate through obstacles more easily than those with shorter wavelengths. In view of this fact, multiple antennas can result in cosine interference due to their omnidirectional radiation pattern.

In wireless mesh systems, the focus has shifted toward finding methods of conducting radio and communication antennas within or around the body of the platform. The window use of particular interest for antenna placement, because they cover a relatively large surface area and are well above the ground level. However, for a window embedded antenna, optical transparency becomes an important constraint. A transparent conducting layer can be fabricated by depositing a very thin layer of metal, oxide, or semiconductor on a transparent substrate and has been used to fabricate transparent antennas at frequencies above 2 GHz [3]–[5]. In addition to the antenna application, the conducting film can be etched to achieve a certain filtering behavior while maintaining optical transparency [6]–[8]. Increasing the thickness of the conductive layer increases the conductivity but reduces the optical transparency; hence, there is a trade-off between the two [9]. In order to achieve an optical transparency of 85% or higher, the thickness of the conductive layer has an upper limit of a few angstroms, which is three orders of magnitude less than the skin depth of conductivity at VHF and UHF bands. For this reason, transparent conductors are not effective at the frequency range of interest. The limitations of using transparent conductors for antenna fabrication have been studied rigorously in recent years [10]–[13].

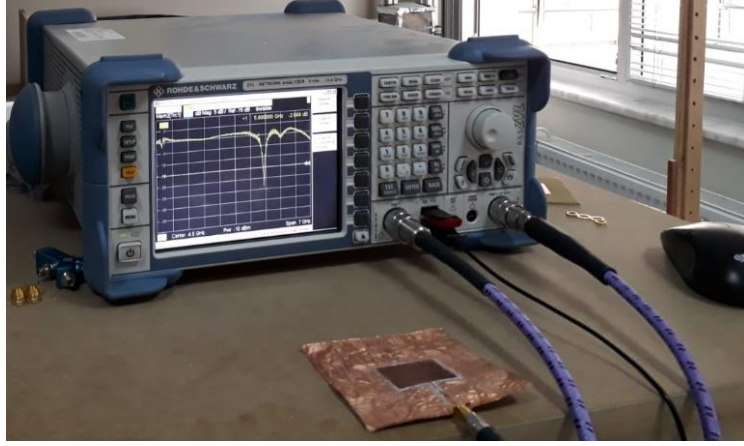
Alternatively, wire antennas can be used to provide the desired optical transparency. Window embedded wire antennas have been introduced at FM frequencies for low power or receive-only applications [14]–[17]. The power transmitted by the military radios at VHF and UHF frequencies

Şekil 7.2 Şeffaf akrilik alttaş

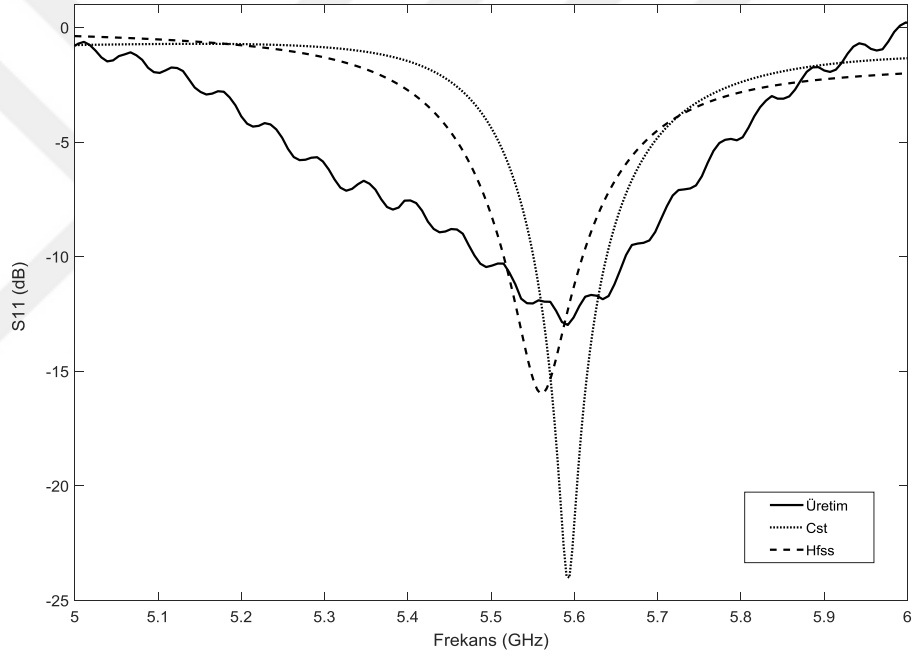


Şekil 7.3 Üretilen yama antenin önden ve arkadan görünüşü

Şeffaf ve elastik olan akrilik dielektrik malzeme ile topraklama düzlemi arasında güneş hücreleri yerleştirilerek hem güneşten gelen ışığı depolarken aynı zamanda kablosuz iletişim sağlanmaktadır. Sıradan mikroşerit antenlere nazaran çok daha hafiftir. Anten fotolitografi yöntemiyle üretildikten sonra geri dönüş kaybı ve voltaj dalga oranı 3 kHz ile 13.6 GHz frekanslarına kadar ölçüm alan Rohde & Schwarz VNA Network Analizör ile ölçümü yapılmıştır. Antenin ölçümü yapılan cihaz Şekil 7.4’de gösterilmektedir.

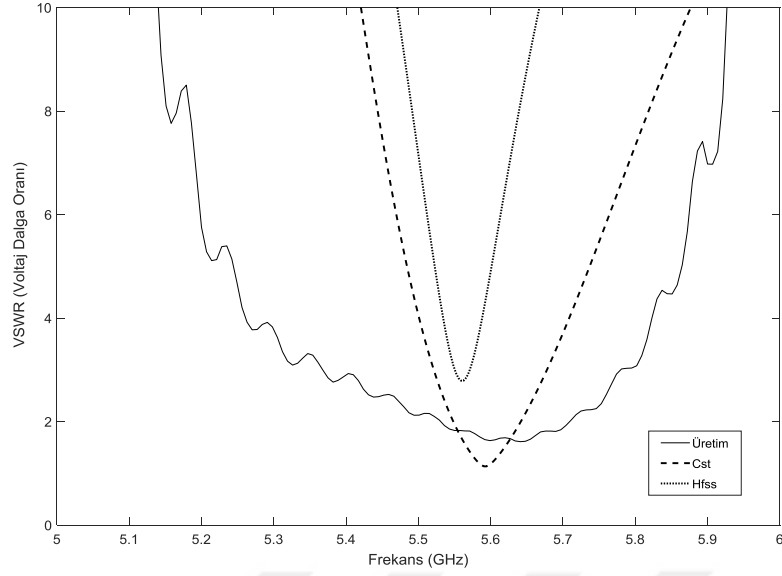


Şekil 7.4 Ölçümü alınan Network Analizör aleti



Şekil 7.5 Bakırlı yama anten S11 sonuçları

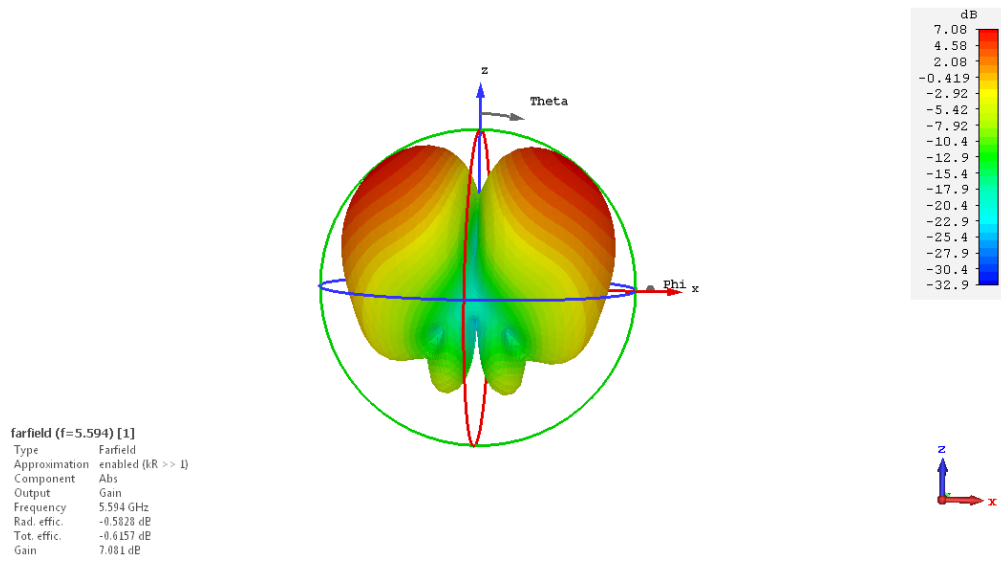
Geri dönüş kaybı olan S_{11} grafiğine baktığımızda CST programında 5.8 GHz çalışma frekansında tasarlanan bakırlı mikroşerit yama anten 5.6 GHz frekansında rezonansa girerek geri dönüş kaybı -23 dB'dir. HFSS programında tasarlanan yama anten 5.56 GHz frekansında rezonansa girmekte olup geri dönüş kaybı -15 dB'dir. Üretim sonucu ise 5.59 GHz frekansında -12 dB'dir. Simülasyon ve üretim sonuçları yakın olduğu görülmektedir. Aradaki fark üretim hatalarından kaynaklanmaktadır. -10dB'nin altında bant genişliği 5.48-5.66 frekans aralığında %3'dir.



Şekil 7.6 Bakırlı yama anten VSWR sonuçları

CST programında tasarlanan bakırlı mikroşerit yama antenin 5.6 GHz frekansında VSWR değeri 1.34, HFSS programında tasarlanan yama antenin 5.56 GHz frekansında VSWR değeri 2.7'dir. Üretim sonucu 5.59 GHz frekansında VSWR 1.13'dir. Üretim ve CST sonucu istenildiği gibi VSWR değeri 2'nin altındadır.

CST Studio Suite programlarında tasarlanan antenlerin üç boyutlu kazanç grafikleri Şekil 7.7'da gösterilmiştir.



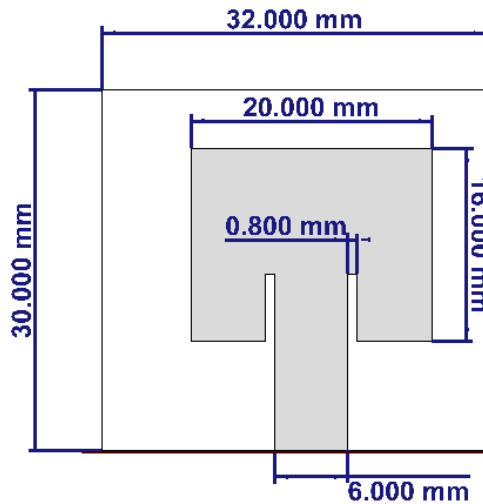
Şekil 7.7 Bakırlı yama antenin CST programındaki üç boyutlu grafiği

Bakırlı yama antenin 5.59 GHz frekansında kazancı 7 dB'dir. Yüksek kazançlı anten elde edilmiştir. Simülasyon sonucunda iki farklı frekansta rezonans olurken üretim sonrasında alınan ölçüm sonucunda 5.59 GHz frekansında geri dönüş kaybı -10 dB'nin altına düşerken 3.01 GHz frekanslarında -10 dB'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu yüzden 5.59 GHz frekansındaki sonuçlar ele alınmıştır.

Çizelge 7.1 Bakırlı yama antenin sonuç tablosu

Anten Karakteristikleri	Bakırlı Yama Anten
Rezonans Frekansı (GHz)	5.59
S_{11} (dB)	-12
Bant Genişliği (%)	3
VSWR	1.13
Kazanç (dB)	7
Yönlülük (dBi)	7.6
Işıma Verimliliği (%)	87

5.9 GHz ITS (Intelligent Transportation Systems) bandı çalışma frekansında alttaşı saydam olan bk7 (ϵ_r :2.2, kayıp tanjantı $\tan\delta$:0.0054), yama, besleme hattı ve topraklama düzleminde ITO kullanılan optiksel saydam yama anten tasarlanmıştır. Dielektrik katman 30mm x 32 mm x 2 mm, yama da 20 mm x 16 mm x 200 nm boyutundadır. Topraklama düzlemi dielektrik katman ile aynı boyutta ve 200 nm ITO kalınlığındadır. Besleme hattı ise 6 mmx 8.4 mm, besleme girintisi 0.8 mm x 5.6 mm boyutlarındadır. Antenin boyutu Şekil 7.8'de gösterilmiştir.



Şekil 7.8 Antenin boyutu

Bk7 üzerine ITO kaplama Elektron Demeti Püskürtme (Electron Beam Sputtering) yöntemiyle Roketsan A.Ş.'de temiz odada büyütülerek üretilmiştir. Kaplama yama şeklini alabilmesi için maskeleme yoluyla büyütülme işlemi yapılmıştır. Maskeleme için Autocad üç boyutlu tasarım programında 2 inç çapında daire ortasına antenin yama boyutunda açıklık verilerek çizilmiştir. Çizimi yapılan batarya (şablon) lazer kesim yöntemiyle çelik 304 malzemesine kestirilmiştir. Kestirilen maskeleme bataryası Şekil 7.9'da gösterilmiştir.



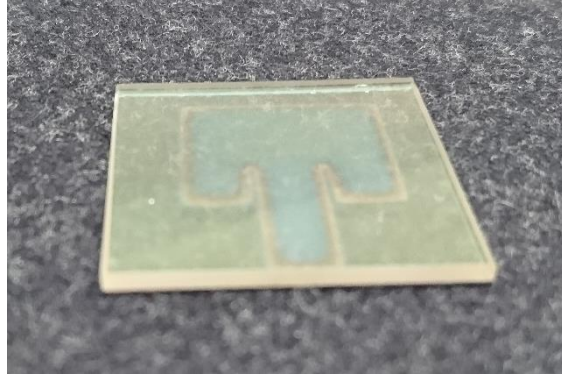
Şekil 7.9 Maskeleme bataryası

Ön yama düzlemi kaplandıktan sonra alttaşın arka düzlemi olan topraklama kısmı tamamen ITO filmi ile kaplanmıştır. Bu işlem tamamlandıktan sonraki hali Şekil 7.10'daki gibidir.



Şekil 7.10 Kaplama işleminden sonraki hali

Elektron demeti püskürtme yöntemiyle yüksek kalitede kaplanarak saydam anten üretilmiştir. Üretilen ITO filmli optiksel saydam antenin görüntüsü Şekil 7.11'de gösterilmiştir.



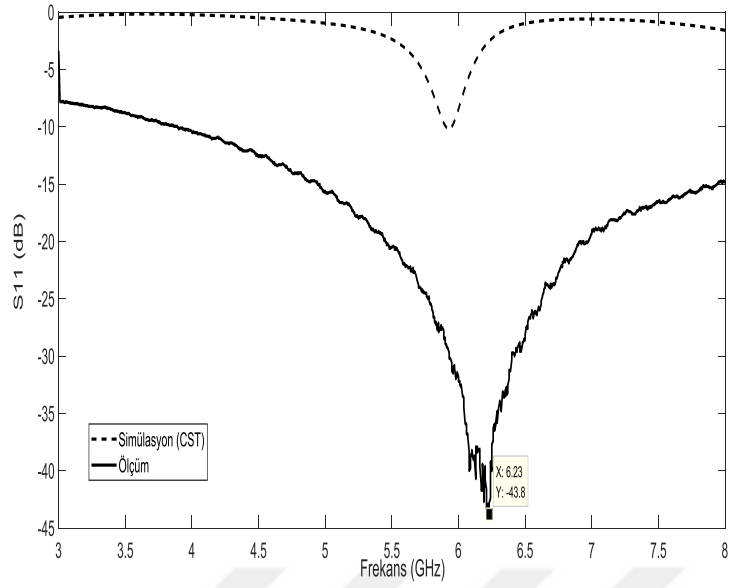
Şekil 7.11 Üretilen optiksel saydam anten

Son hale getirildikten sonra ITO iletken filmi Şekil 7.12’de gösterilen Signatone Pro - 4 Four Point Resistivity System cihazıyla direnç ölçümü alınmıştır. Ölçüm sonucunda ITO direnci 30 ohm/sq değerinde çıkmıştır.



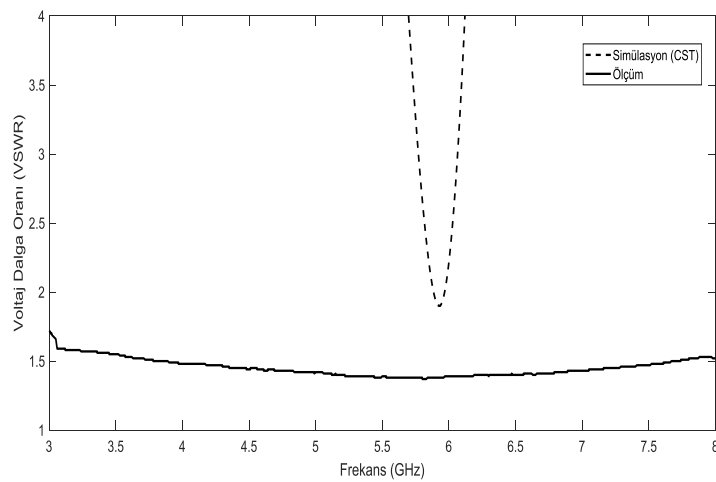
Şekil 7.12 Direnç ölçümü yapılan cihaz

Antenin geri dönüş kaybı ve voltaj dalga oranı Rohde & Schwarz VNA Network Analizör ile ölçümü yapılmıştır.



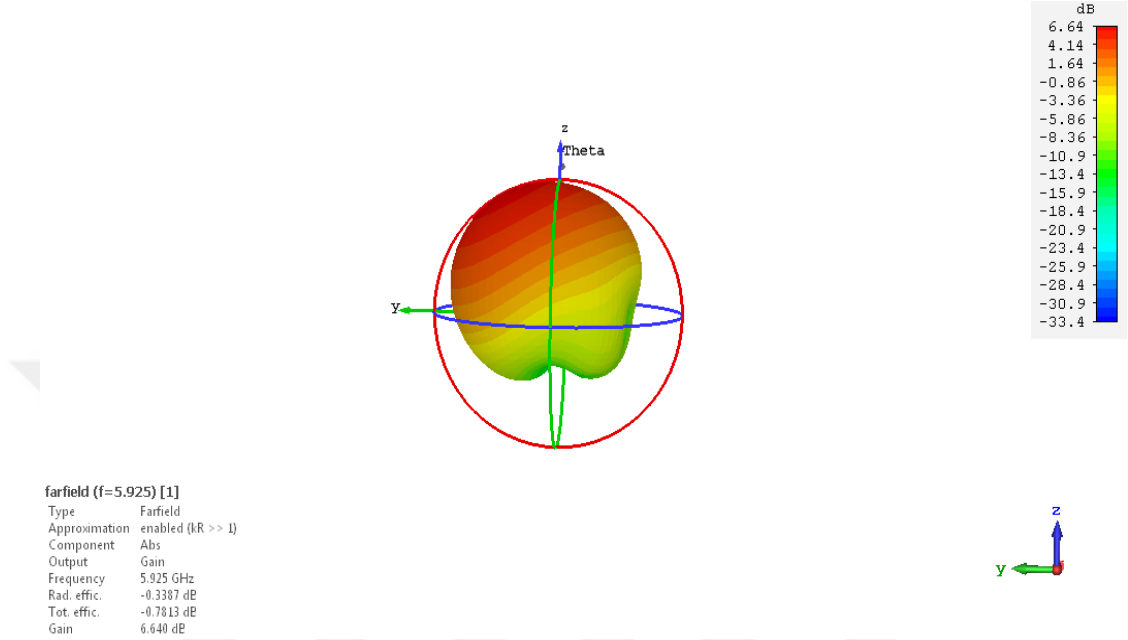
Şekil 7.13 Üretilen saydam antenin S11 ölçüm sonucu

Geri dönüş kaybı olan S_{11} grafiğine baktığımızda 5.9 GHz çalışma frekansında CST programında tasarlanan ITO filmlili saydam mikroşerit yama anten 5.92 GHz frekansında rezonansa girerek geri dönüş kaybı -10.16 dB'dir. Ölçüm sonucunda ise 6.2 GHz frekansında rezonansa girerek geri dönüş kaybı -43 dB'dir. UWB bant aralığına sahiptir. Literatürdeki TCO'lu saydam anten çalışmalarına baktığımızda sonuçlar yaklaşık olarak benzer çıktığı görülmektedir (Hong, 2016).



Şekil 7.14 Üretilen saydam antenin VSWR ölçüm sonucu

CST sonucu 5.92 GHz frekansında VSWR değeri 1.9'dur. Ölçüm sonucunda ise 6.2 GHz'de 1.14'dür. Voltaj dalga oranı 2'nin altında çıkmıştır. 5.92 GHz'de kazanç değeri 6.64 dB değerindedir. Zy yönünde güçlü ışıma yapmaktadır.

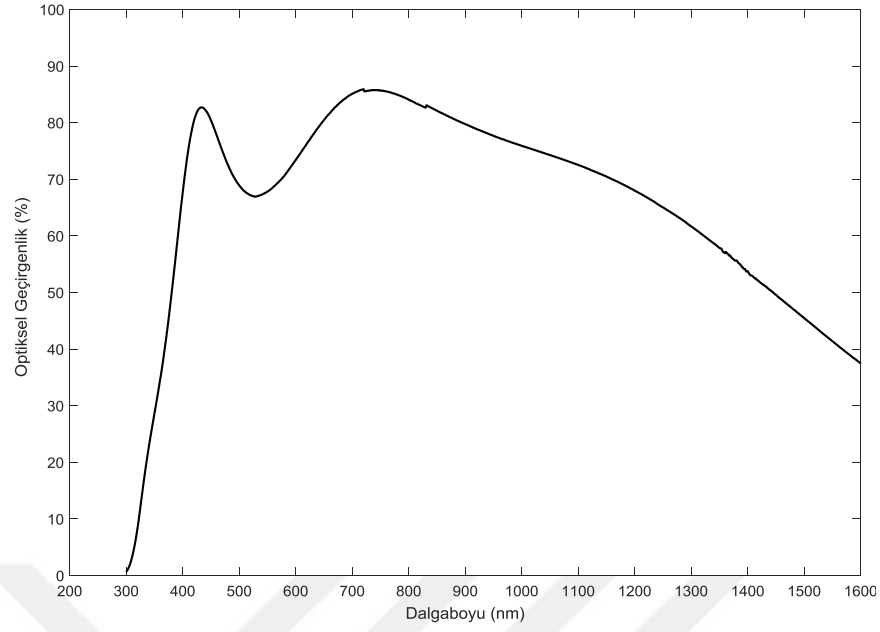


Şekil 7.15 Saydam antenin Cst programında tasarlanan 3 boyutlu kazanç grafiği

Çizelge 7.2 Üretilen saydam antenin sonuçları

Anten Karakteristikleri	Optiksel Saydam Anten
Rezonans Frekansı (GHz)	6.2
S_{11} (dB)	-43
Bant Genişliği (%)	UWB
VSWR	1.4
Kazanç (dB)	6.64
Yönlülük (dBi)	6.9
Işıma Verimliliği (%)	91
Optiksel Geçirgenlik	% 86

Antenin optiksel geçirgenliği Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Yarıiletken Araştırma Laboratuvarında UV-3600 UV-VIS-NIR Spektrometre cihazı ile 300 nm ile 1600 nm dalga boyları arasında geçirgenlik ölçümü yapılmıştır. Analizi yapılan geçirgenlik grafiği Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.16 Optiksel saydam antenin geçirgenlik grafiği

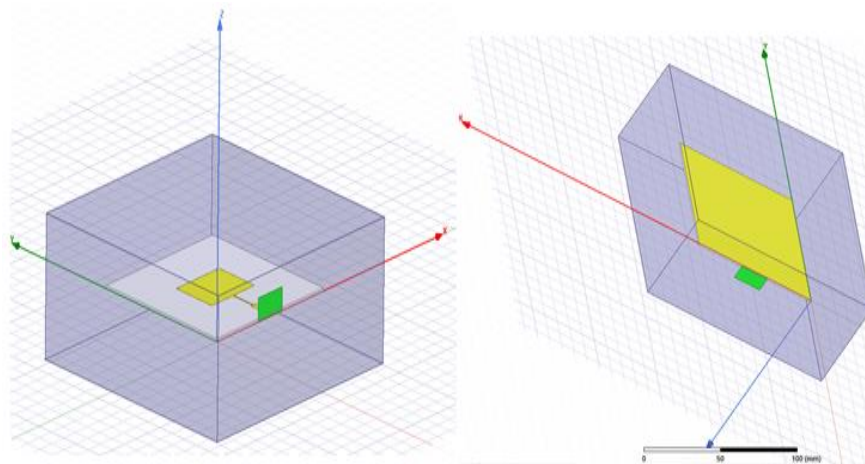
Ölçüm sonucunda görünür bölgenin 434 nm dalga boyunda % 82, 720 nm dalga boyunda ise % 86 maksimum geçirgenliğe sahiptir. 800 nm dalga boyundan sonra geçirgenlik azalmıştır. Görünür bölgede % 70'in üzerinde geçirgenlik sağlanarak istenilen sonuç elde edilmiştir.

Genel olarak anten karakteristik sonuçları literatürdeki üretilen saydam antenlere göre daha iyi çıkmıştır. Bu da anten tasarımı ve üretim kalitesinden kaynaklanmaktadır. Alttaş olarak kullanılan bk7 mercek ve lens yapımında da kullanılmaktadır. 200 nm ITO kalınlığı seçilerek hem anten karakteristiği hem de optiksel geçirgenlik için optimum değer sağlanmıştır. Üretilen saydam anten cam, dokunmatik ekran ve akıllı saat gibi temiz ekranlara kolay entegre edilebilir. Aynı zamanda bu tip antenler istenmeyen ışımadan korunmak için tanklara ve uçak ön camlarına montaj edilerek kullanılabilir.

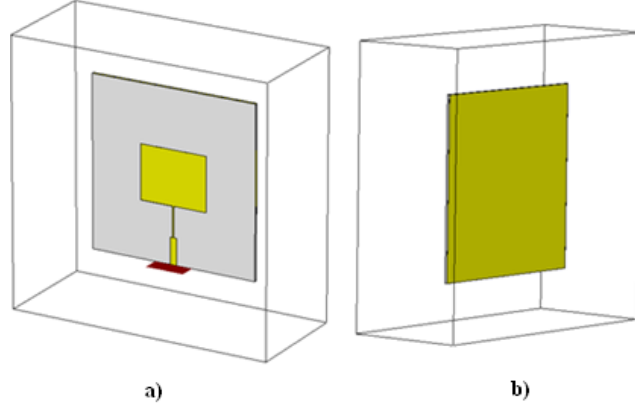
Simülasyon çalışmaları olan diğer bir bakırlı mikroşerit yama anten çalışması 3 GHz (WLAN) rezonans frekansında ve aynı antenin bakırlı yama düzlemi ızgara haline getirilerek elde edilen optiksel saydam olmak üzere iki anten tasarlanarak karşılaştırılmıştır. Alttaşı elastik ve saydam olan akrilik, ışıma yapan iletken kısımlar da

ise bakır kullanılmıştır. Alttaş ve yama boyutu aynı olan çeyrek dalga dönüştürücü mikroşerit yama anten, yüksek optiksel geçirgenliği sağlamak için her bir metalik ızgaraların genişlikleri 0.03mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece görünür bölgede % 95 optiksel geçirgenlik sağlanmıştır. Alttaş olarak kullanılan akriliğin dielektrik sabiti ϵ_r :2.8, kayıp tanjantı $\tan \delta$:0.002'dir. İki anten için dielektrik katman 90 mm x 90 mm x1.25 mm, yama da 35.970 mm x 28.746 mm x 0.035 mm boyutundadır. Optiksel saydam ızgara anten için 50 ohmluk besleme hat boyutu 2.90 mm x14mm, çeyrek dalga dönüştürücü ise 0.770 mm x 17.453 mm boyutundadır. Yama anten için 50 ohmluk besleme hat boyutu 3.28 mm x14 mm, çeyrek dalga dönüştürücü ise 0.77 mm x 16.27 mm boyutundadır. İki antenin besleme hat boyutu en iyi empedans eşlemesi sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

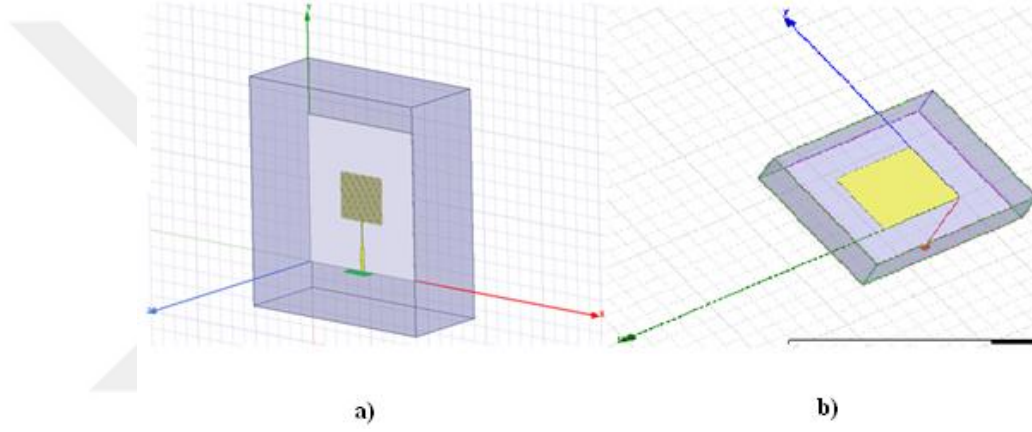
Optiksel saydam ızgara antenler güneş hücrelerinde kullanılmaktadır. Bu antenler alttaş ile topraklama arasına güneş hücreleri yerleştirilerek güneşten gelen ışığı depolayarak enerji hasatlamakta hem de kablosuz iletişim sağlamaktadır. Araya yerleştirilen güneş hücresi iletken olduğu için anten parametrelerinde herhangi bir kayıp oluşturmamaktadır. Antenler CST Studio Suite ve Ansys HFSS programlarında tasarlanarak simülasyonları yapılmıştır. Ansys HFSS ve CST Studio Suite programlarında tasarlanan mikroşerit yama anten ve optiksel saydam ızgara antenin ön yama ve arka topraklama yüzeyleri aşağıda gösterilmiştir.



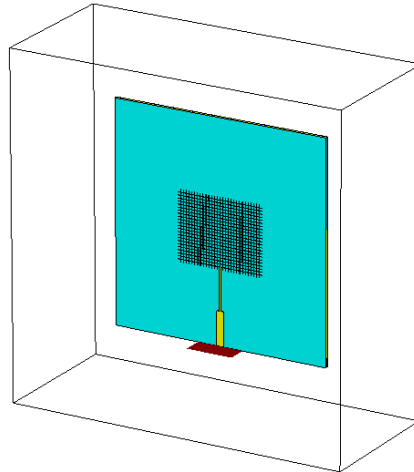
Şekil 7.17 HFSS programında tasarlanan mikroşerit yama antenin a) önden ve b)arkadan görünüşü



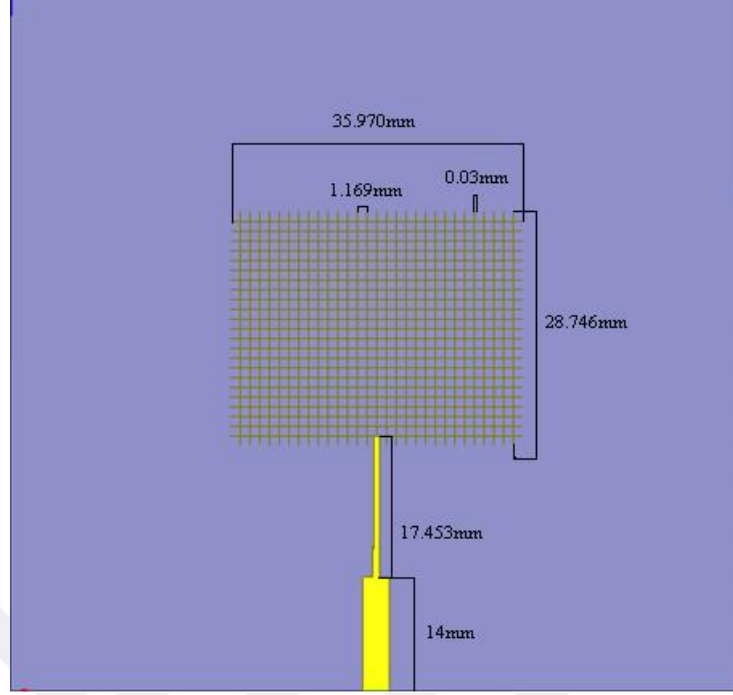
Şekil 7.18 CST programında tasarlanan mikroşerit yama antenin a) önden ve b) arkadan görünüşü



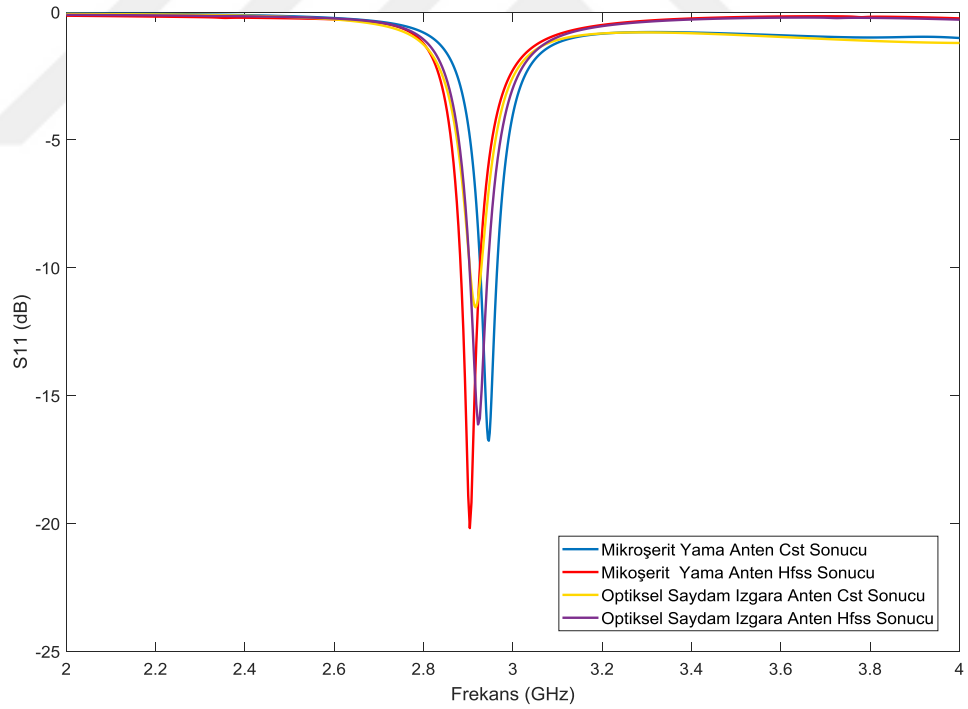
Şekil 7.19 HFSS programında tasarlanan optiksel saydam antenin a)önden ve b) arkadan görünüşü



Şekil 7.20 CST programında tasarlanan optiksel ızgara antenin önden görünüşü



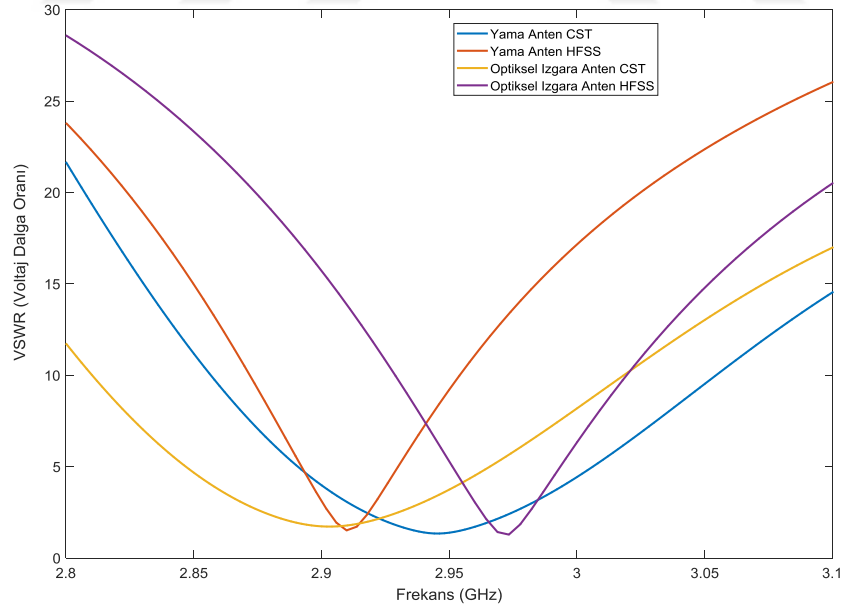
Şekil 7.21 Optiksel saydam ızgara antenin boyutu



Şekil 7.22 CST veHFSS programlarında tasarlanan mikroşerit yama anten ve optiksel saydam ızgara antenin S_{11} sonuçları

Geri dönüş kaybı olan S_{11} grafiğine baktığımızda CST programında tasarlanan mikroşerit yama anten 2.94 GHz frekansında rezonansa girerek geri dönüş kaybı -16.71

dB'dir. HFSS programında tasarlanan yama anten 2.90 GHz frekansında rezonansa girmekte olup geri dönüş kaybı -20.177 dB'dir. CST programında tasarlanan optiksel saydam ızgara anten 2.91 GHz frekansında rezonansa girerek geri dönüş kaybı -11.55 dB'dir. HFSS programında tasarlanan optiksel saydam ızgara anten ise 2.92 frekansında rezonansa girmekte olup geri dönüş kaybı -16.12 dB'dir. İki program arasındaki fark farklı çözüm yönteminde analiz yapmasından kaynaklanmaktadır. CST Studio Suite programı sonlu entegrasyon yöntemiyle çözümlerken, Ansys HFSS programı ise sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenmektedir. İki programın farklı çözüm yöntemi yanında ızgara antenin ızgara genişliklerinin 30μ olması mesh hatalarına ve frekans kaymasına neden olmaktadır. Mikroşerit antenin bakır miktarı optiksel saydam ızgara antene göre daha fazla olduğundan iletkenliği de daha büyüktür. Sıradan mikroşerit antende akım yama üzerinde doğrudan akarken ızgara antende her bir ızgara arasında dolaylı olarak akmaktadır. Bu da anten karakteristik sonuçlarını etkilediğinden mikroşerit yama antenin geri dönüş kaybı daha düşüktür. -10 dB'nin altında bant genişlikleri sırasıyla 2.92 GHz- 2.96 GHz aralığında % 1.3, 2.90-2.93 frekans aralığında % 1'dir.

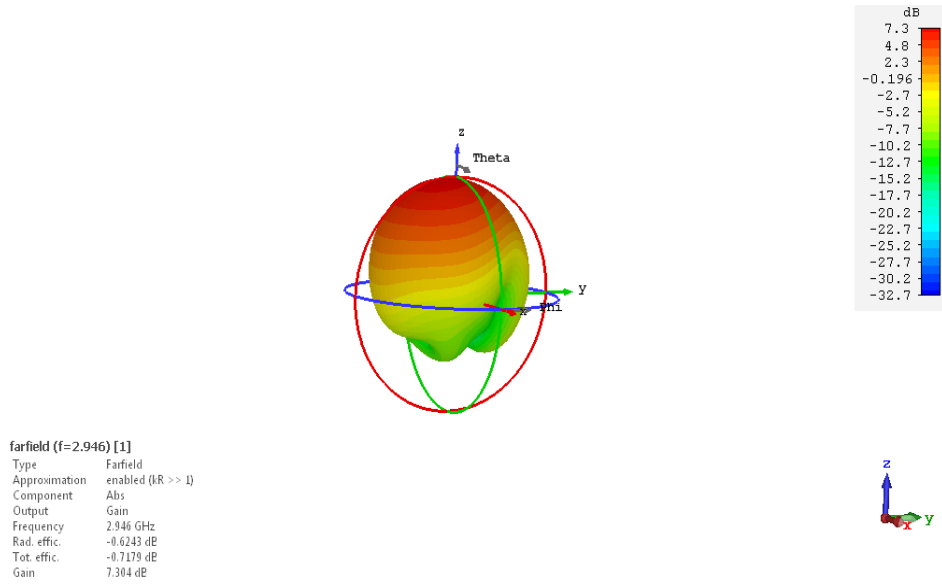


Şekil 7.23 Mikroşerit yama anten ve optiksel saydam antenin CST ve HFSS programındaki VSWR sonuçları

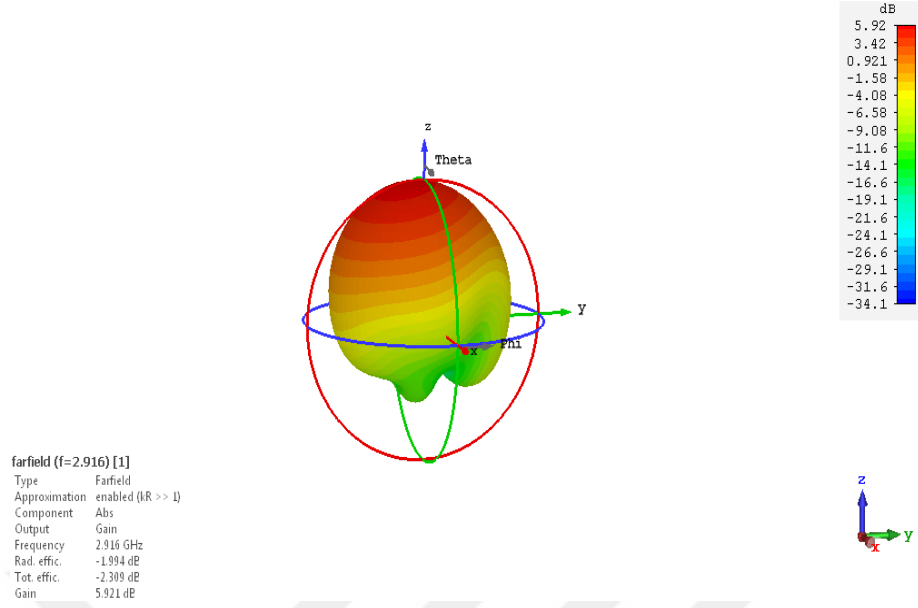
Geri dönüş kaybıyla bağlantılı olan voltaj dalga oranı iletkenliği daha yüksek olan mikroşerit yama antende daha düşüktür. CST programında tasarlanan mikroşerit yama

antenin 2.94 GHz frekansında VSWR değeri 1.34, HFSS programında tasarlanan yama antenin 2.90 GHz frekansında VSWR değeri 1.7'dir. CST programında tasarlanan optiksel saydam ızgara antenin 2.91 GHz frekansında VSWR değeri 1.72 HFSS programında tasarlanan ızgara antenin 2.92 frekansında VSWR değeri ise 2.73'dir. HFSS programında çıkan VSWR değeri mesh hatasından kaynaklanmaktadır. Anten karakteristiği açısından VSWR'nin ikinin altında olması istenilen bir durumdur. İki anten de VSWR ikinin altındadır. Empedans eşleşmesi sağlamak için iki antenin besleme hattının genişliği ve uzunluğu farklıdır. Bu durum geri dönüş kaybı ve VSWR değerine etkisi olmuştur.

Anten karakteristiğinin önemli parametresi olan ışınım desenlerinin üç boyutlu grafikleri verilmiştir. Mikroşerit yama anten ve optiksel saydam ızgara antenin kazançları sırasıyla 7.30 dB, 5.92 dB'dir. İki antende z yönünde daha yoğun ışınım yapılmıştır. Bakır miktarına bağlı olarak optiksel saydam ızgara antenin kazancı daha düşüktür. CST Studio Suite programlarında tasarlanan antenlerin üç boyutlu kazanç grafikleri Şekil 7.24'de gösterilmiştir.



Şekil 7.24 CST programında tasarlanan mikroşerit yama anten üç boyutlu kazanç grafiği



Şekil 7.25 CST programında tasarlanan Optiksel saydam ızgara anten üç boyutlu kazanç grafiği

İki antenin anten karakteristiği ve optiksel geçirgenliği çizelge 7.3’de verilmiştir. Optiksel saydam ızgara antenin mikroşerit yama antene göre kazancı, yönlülüğü ve verimliliği daha düşük, bant aralığı ise daha geniştir. TCO’lu (Transparent Conductive Oxide) antenlere göre optiksel saydam antenin kazancı daha yüksek olduğu için uyduların güneş hücreleriyle kullanmak avantaj sağlamaktadır.

Çizelge 7.3 Mikroşerit yama anten ve optiksel saydam anten karakteristik sonuçları

Anten Karakteristikleri	Mikroşerit Yama Anten	Optiksel Saydam Iızgara Anten
Rezonans Frekansı (GHz)	2.946	2.916
S_{11} (dB)	-16.71	-11.55
Bant Genişliği (%)	2	1.9
VSWR	1.34	1.72
Kazanç (dB)	7.30	5.92
Yönlülük (dBi)	7.928	7.915
Işıma Verimliliği (%)	86	63
Optiksel Geçirgenlik	% 0	% 95

Optiksel saydam ızgara antenin optiksel geçirgenliği yama boyutuna göre hesaplanmaktadır. Yama iletken alanının, yama boyutuna oranı olarak tanımlanır. W yama genişliği, L yama uzunluğu, q her bir ızgaranın genişliği, N yamanın genişliğine

paralel olan ızgara sayısı, M ise yamanın boyuna paralel olan ızgara sayısıdır. Bu ifadelerle ilgili olarak antenin saydamlığı eşitlik 7.1 ile hesaplanmaktadır (Turpin,2009).

$$\text{Saydamlık} = \left[1 - \frac{A_{iletken}}{A_{yama}} \right] \cdot 100\% = \left[1 - \frac{q(NL + MW) - q^2 NM}{WL} \right] \cdot 100\% \quad (7.1)$$

Yama ve ızgara boyutları:

$$W=35.970\text{mm}, L=28.746\text{mm}$$

$$M=29, N=23, q=0.03\text{mm}$$

Verilen parametrelere göre optiksel saydam ızgara antenin saydamlığını hesapladığımızda yaklaşık olarak % 95 optiksel geçirgenliğe sahiptir. Mikroşerit yama antenin yama boyutu tamamen bakır olduğu için yansıtıcıdır. Aynı saydam dielektrik malzeme ve boyutlu antenin bakırlı yama düzlemi her bir genişliği 30 μ olacak şekilde metalik ızgaralar haline getirilerek % 95 optiksel geçirgenlik elde edilmiştir. Izgara sayısı artırılarak anten karakteristiği iyileştirilirken ızgara genişliği 30 μ olacak şekilde tasarlanarak istenilen saydamlık sağlanmıştır. Böylece optimum değer elde edilmiştir.

Tasarlanmış olan antenin her bir ızgara arası mesafe 1.169 mm'dir. Izgara genişliğinin milimetre mertebesinde olması optimum değeri yakalamayı zorlaştırırken ızgaralar arasındaki mesafenin mikrometre olması anten simülasyonunu ve üretimini zorlaştırdığı için tercih edilmemektedir. Tasarlanmış olan metalik ızgara anten ideal ve lazer fotolitografi ile kolaylıkla üretilebilir. Optiksel saydam ızgara antenler CubeSat gibi küçük uydulara kolaylıkla entegre edilerek uydu iletişimini sağlamaktadır. Bu küçük uydularda hafiflik ve boyut önemlidir. Optiksel saydam ızgara anten bakır miktarı ve dielektrik malzeme olarak akrilikten oluşması hafifliği sağlamaktadır. Ayrıca güneş panellerinin olduğu alanlarda kablosuz iletişimi sağlamak için de kullanılabilir.

7.2 Tek ve Çok Katmanlı Optiksel Saydam Mikroşerit Yama Antenlerin Tasarımı

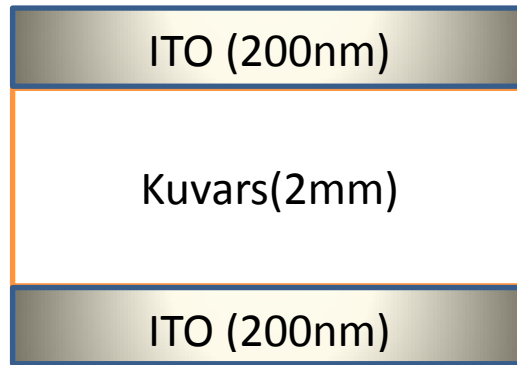
Saydam antenlerin diğer bir tasarımı olan TCO'lu mikroşerit yama antenler şeffaf alttaşlar ile saydam iletken oksit filmlerden oluşmaktadır. Saydam iletken oksitten oluşan tek ve çok katmanlı olan iletken oksit-metal-iletken oksit sandviç yapısından

oluşan antenler tasarlanmıştır. Anten tasarımı yapılırken iletken tipi, dielektrik malzeme direk olarak rezonans frekansı, bant genişliği, kazanç ve ışınma örüntüsü gibi karakteristik işlemlerini etkilemektedir. Bu nedenle malzeme seçimi yapılırken anten karakteristiği göz önünde bulundurulmuştur.

Alttaş olarak saydam ve yüksek sıcaklığa dayanıklı, mor ötesi bölgesine doğru yüksek optiksel iletim gösteren kuvars dielektrik malzeme seçildi. Kuvars dielektrik sabiti:3.75 loss tanjant $\tan \delta$: 0.0004'dir. Yama ve topraklama düzleminde iletken olarak elektriksel iletkenliği 8×10^5 Siemens/m (Saberin,2010), dielektrik sabiti ϵ_r : 4 olan ITO (İndiyum Kalay Oksit) iletken oksit kullanılmıştır. Aynı zamanda görünür bölgede yüksek optiksel geçirgenliğe sahip olması şeffaf antenler için tercih sebebidir.

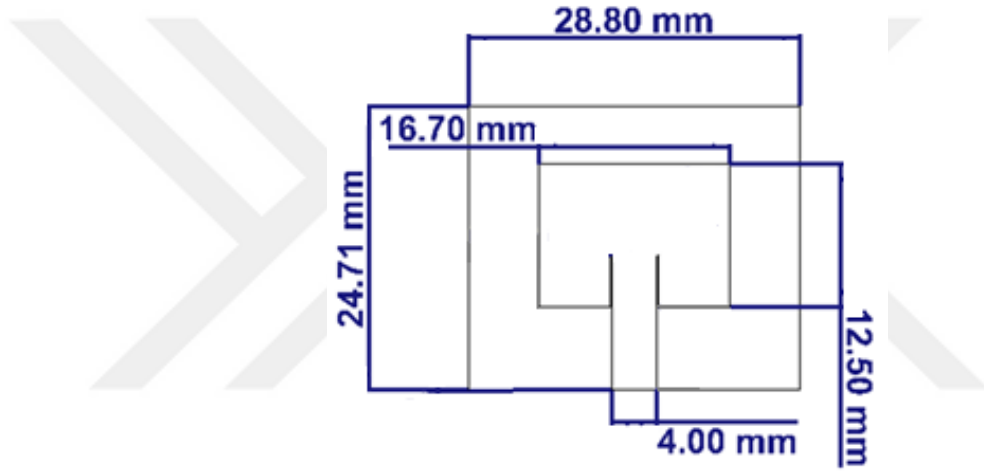
Aynı alttaş ve anten boyutunda ITO iletken ile tek ve çok katmanlı saydam antenler CST Studio Suite yazılım programında tasarlanarak simülasyonu yapılmıştır. Topraklama, yama ve besleme hattı ITO'dan oluşan tek katmanlı anten ile aynı boyut ve alttaşda ITO-gümüş-ITO sandviçli yapı tasarlanarak anten ve optiksel karakteristikleri kıyaslanmıştır.

Tek katmanlı optiksel saydam antenin yama ve topraklama iletken kalınlığı 200 nm topraklama düzlemi 28.80 mm x 24.71 x 2 mm boyutunda, yama 16.70 mm x 12.50 mm boyutlarındadır. Besleme hattı 4 mm x 7.16 mm, empedans eşleşmesi için yamaya açılan besleme girintisi 0.09 mm x 4.54 mm boyutlarında olmaktadır. Tek katmanlı saydam anten yapısı şekilde 7.26'da gösterilmiştir.

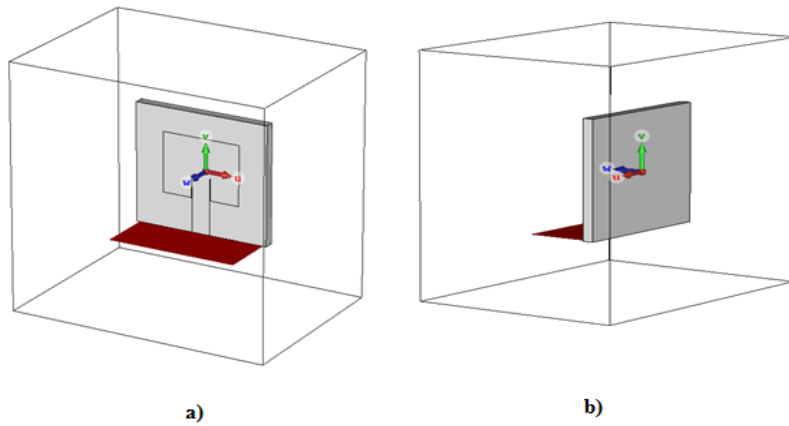


Şekil 7.26 Tek katmanlı ITO anten yapısı

Antenler 5.8 GHz çalışma frekansında CST programında tasarlanmıştır. Akımın yüzeyden homojen olarak akması için iletken kalınlığı cilt derinliğinden (δ) çok daha büyük olması gerekmektedir. Bu yüzden yüksek frekansta 200 nm ITO kalınlığında tasarlanmıştır. ITO kalınlığı arttıkça anten parametrelerini olumlu olarak etkilemektedir. Tek ve çok katmanlı saydam antenlerde ITO kalınlığı arttıkça anten kazancı artarken optiksel geçirgenlik azalmaktadır. Tek katmanlı saydam antenin ve çok katmanlı saydam antenin boyutları Şekil 7.27’de verilmektedir. İletken kalınlıklarına bağlı olarak empedans eşleşmeyi sağlamak için besleme girintisi ve besleme hat uzunluğu farklıdır. CST Studio Suite programında tasarlanan tek ve çok katmanlı saydam antenlerin ön yama ve arka topraklama görüntüsü aşağıda Şekil 7.28’de gösterilmektedir.



Şekil 7.27 Tek katmanlı ve çok katmanlı saydam antenin boyutu



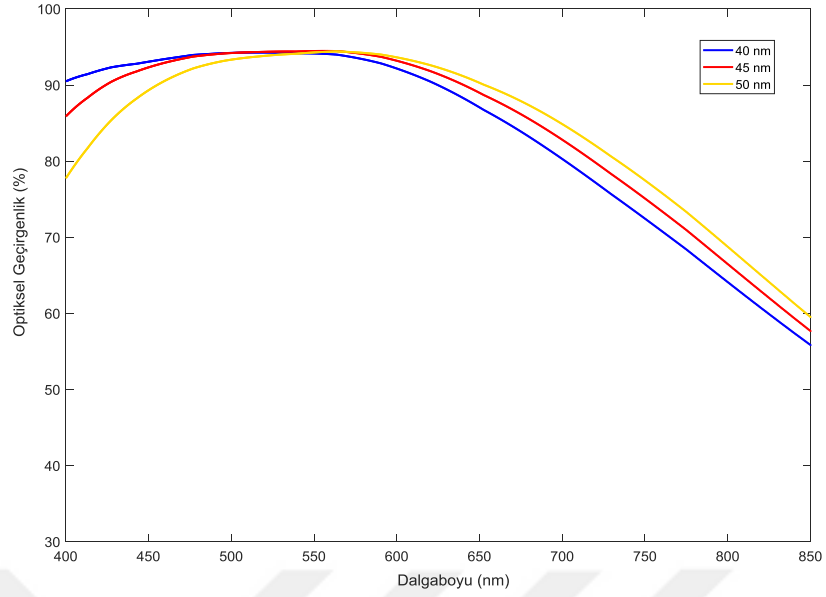
Şekil 7.28 CST programında tasarlanan tek ve çok katmanlı antenin a) önden ve b) arkadan görünüşü

Tek katmanlı saydam yama antenle aynı alttaş ve boyutta olan çok katmanlı saydam yama antenin empedans eşleşmesini sağlamak için besleme girintisi 0.08 mm x 4.55

mm boyutundadır. Çok katmanlı saydam antenler literatürdeki yapılan benzer çalışmalara dayanarak 10nm gümüş kalınlığı sabit kalmak şartıyla 40, 45, 50 nm ITO kalınlıklarında antenler tasarlanarak simüle edilmiştir. Optiksel karakteristikleri OptiLayer yazılım programında analizi yapılarak en uygun ITO kalınlığında anten seçilmiştir. Çok katmanlı anten yapısı Şekil 7.29 'da verilmektedir.

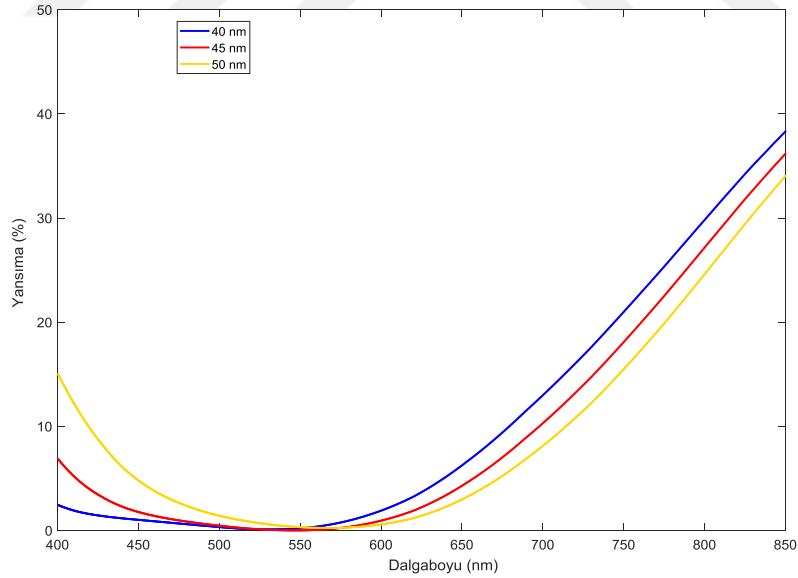


OptiLayer yazılım programında analizi yapılan çok katmanlı antenlerin optiksel geçirgenlik, yansımaya, soğurma grafikleri Şekil 7.30, Şekil 7.31, Şekil 7.32'de verilmektedir.



Şekil 7.30 Çok katmanlı optiksel saydam antenlerin optiksel geçirgenlik grafikleri

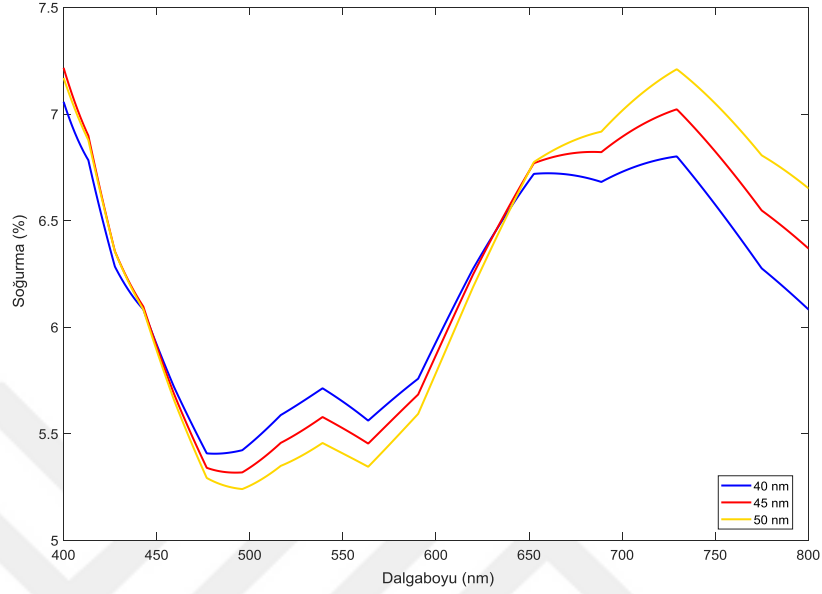
Yukarıdaki optiksel geçirgenlik grafiğine baktığımızda 400 nm dalga boyunda 40 nm ITO kalınlıklı anten % 90, 45 nm kalınlıklı %85, 50 nm kalınlıklı % 77 geçirgenliğe sahiptir. 500 nm dalgaboyunda ise sırasıyla %94, %94, %93'dür. Tüm çok katmanlı antenler yaklaşık olarak 550 nm dalgaboyunda geçirgenlikleri maksimum olmaktadır.



Şekil 7.31 Çok Katmanlı optiksel saydam antenlerin yansımaya grafikleri

Farklı ITO kalınlıklarındaki çok katmanlı saydam antenlerde 400 nm- 600 nm dalga boyları arasında yansımaya azalmaktadır. 400 nm dalga boyunda yansımaları sırasıyla yaklaşık olarak %2, %6, %15'dir. Bu aralıkta en düşük yansımaya 40 nm ITO kalınlıklı

optiksel saydam antende görülmektedir. 550 nm dalga boyunda tüm çok katmanlı saydam antenler minimum yansımaya göstermektedir. 600 nm dalga boyundan sonra tüm antenlerde yansımaya artmaktadır.



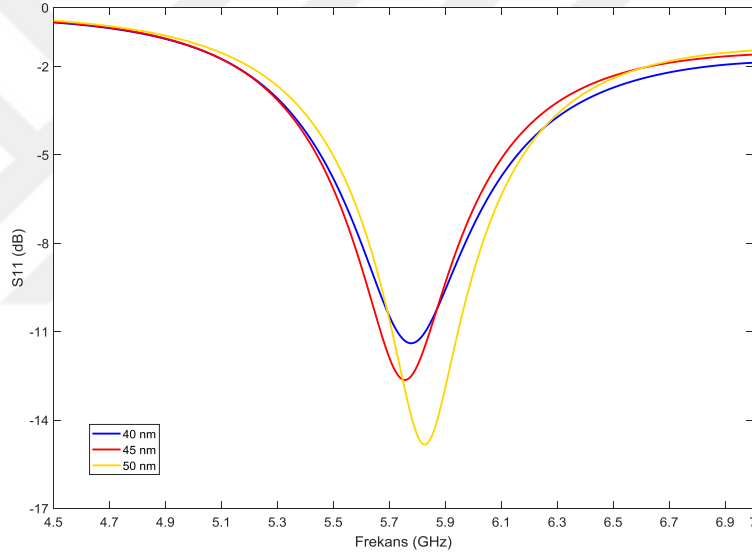
Şekil 7.32 Çok katmanlı optiksel saydam antenlerin soğurma grafikleri

Soğurma grafiğine baktığımızda 400 nm dalga boyunda tüm çok katmanlı antenler için soğurma maksimumdur. Antenlerin 400 nm dalga boyunda soğurma değerleri sırasıyla yaklaşık olarak % 7.05, %7.21, %7.169'dur. 400 nm-500 nm dalga boyu aralığında soğurma azalarak minimum değere ulaşmaktadır. 500 nm dalga boyundan sonra soğurma artarak ve azalarak devam etmektedir. Maksimum soğurma %7-%7.5 değerleri arasında değişmektedir.

Genel olarak ifade edilirse optiksel geçirgenliğin arttığı dalga boylarında yansımaya ve soğurma azalmaktadır, azaldığında da ise artmaktadır. 10 nm gümüş kalınlığı sabit kalarak farklı ITO kalınlıklarda (40 nm, 45 nm, 50 nm) çok katmanlı antenlerin optiksel karakteristiklerine baktığımızda 40 nm ITO kalınlık anten 400 nm – 550 nm dalga boyu arasında % 90'ın üzerinde optiksel geçirgenliğe sahiptir. Aynı zamanda yansımaya ve soğurma grafiklerinde görünür bölge arasında düşük yansımaya ve soğurma olduğu görülmektedir. Görünür bölgede istenilen şeffaflığı sağladığından çok katmanlı saydam antenler arasında 40 nm ITO kalınlıklı anten uygun bulunmuştur.

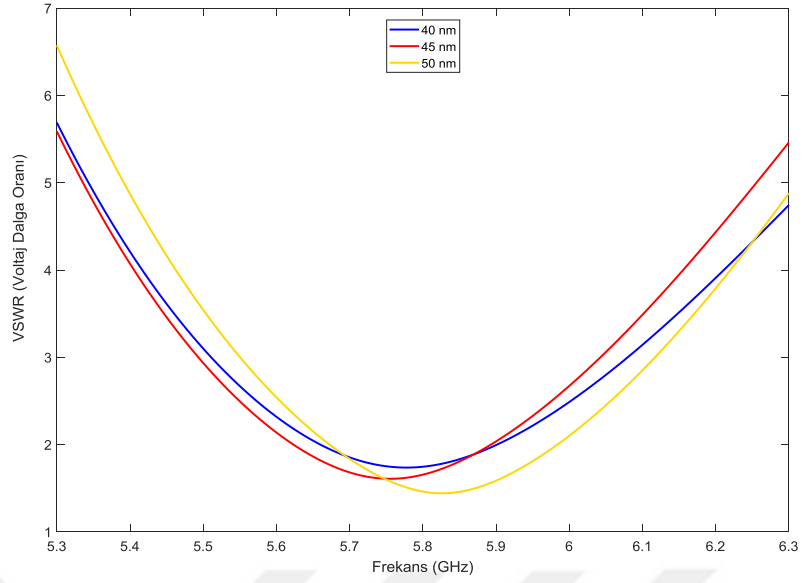
Çok katmanlı saydam anten karakteristiklerine baktığımızda ITO kalınlığı arttıkça iletkenliğin artmasına bağlı olarak anten parametrelerini olumlu olarak etkilemektedir. ITO-gümüş-ITO katmanlı yapı ile hem optiksel hem de anten karakteristiklerini iyileştirmek amaç edilmiştir. Ara katmanda bulunan gümüş iletim bandına katkı sağlayarak iletkenliği arttırmaktadır. Bu da anten kazancı arttırarak, geri dönüş kaybını azaltmaktadır.

Çok katmanlı optiksel saydam antenler CST Studio Suite programında anten karakteristiklerinin simülasyonu yapılarak grafikler üst üste çizilmiştir. Çok ince nanometre kalınlıklı katmanlardan oluşan saydam antenler fazla mesh ataması nedeniyle Ansys HFSS programında analiz edilememiştir.



Şekil 7.33 Çok katmanlı saydam antenlerin S_{11} grafikleri

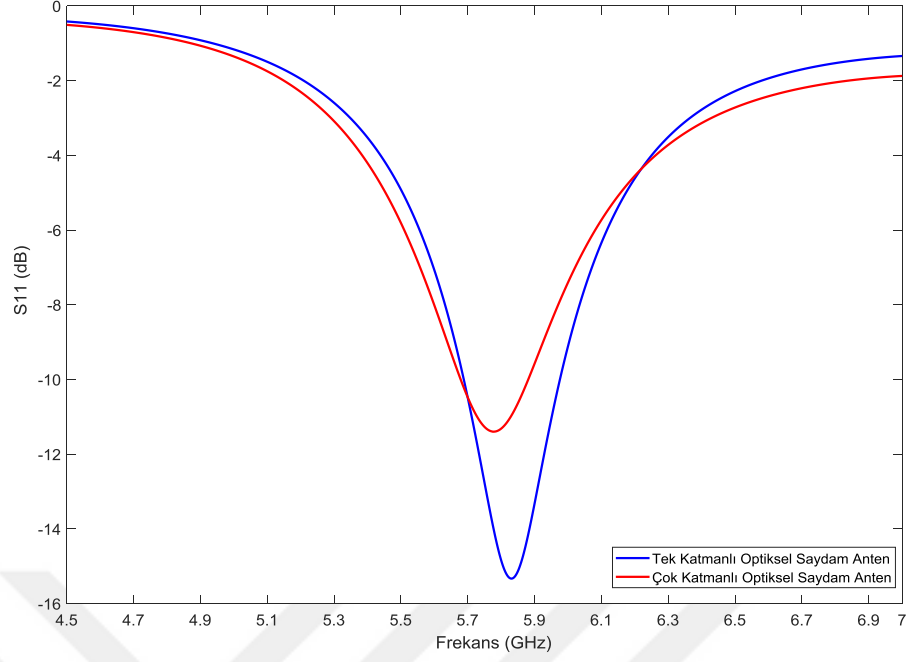
S_{11} geri dönüş kaybı grafiğine baktığımızda iletken kalınlığının artmasına bağlı olarak geri dönüş kaybı azalmaktadır. 40 nm ITO kalınlıklı optiksel saydam anten, 5.77 frekansında rezonansa girerek geri dönüş kaybı değeri -11.39 dB'dir. 45 nm kalınlıklı anten 5.75 GHz frekansında geri dönüş kaybı-12.64 dB, 50 nm kalınlıklı antenin ise 5.82 GHz frekansında geri dönüş kaybı -14.83 dB'dir. 5.8 GHz'de tasarımı yapılan antenler rezonansa yaklaşmıştır.



Şekil 7.34 Çok katmanlı saydam antenlerin VSWR grafikleri

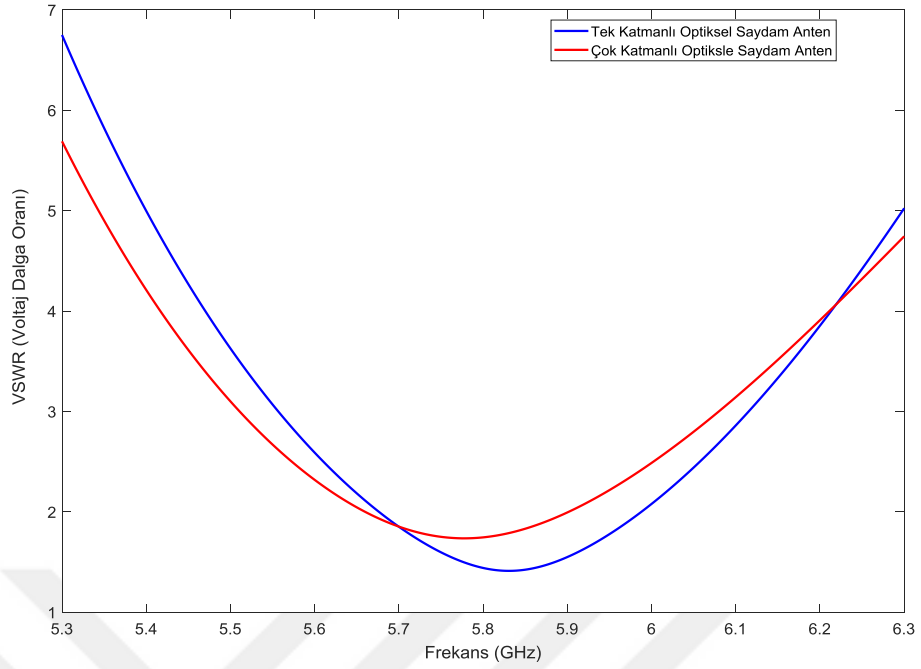
Diğer önemli anten parametresi olan VSWR bütün çok katmanlı antenler için 2'nin altındadır. 40 nm ITO kalınlıklı çok katmanlı anten için 5.77 GHz frekansında VSWR değeri 1.73 'dür. 45 nm ITO kalınlıklı anten için 5.75 GHz 1.6 iken 50 nm kalınlıklı anten için 5.82 GHz frekansında 1.44 'dür.

Genel olarak anten parametrelerine baktığımızda ara katmandaki gümüş kalınlığı sabit kalmak koşulu ile iletken oksit kalınlık artışı anten karakteristiğini etkilemektedir. Fakat 40nm ITO kalınlıklı anten çok katmanlı saydam anten için yeterli anten karakteristiğine sahiptir. Optiksel saydamlığı en iyi sağlayan çok katmanlı 40 nm ITO kalınlıklı saydam anten ile 200 nm ITO kalınlıklı tek katmanlı saydam antenin optiksel ve anten karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Anten parametreleri aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir.



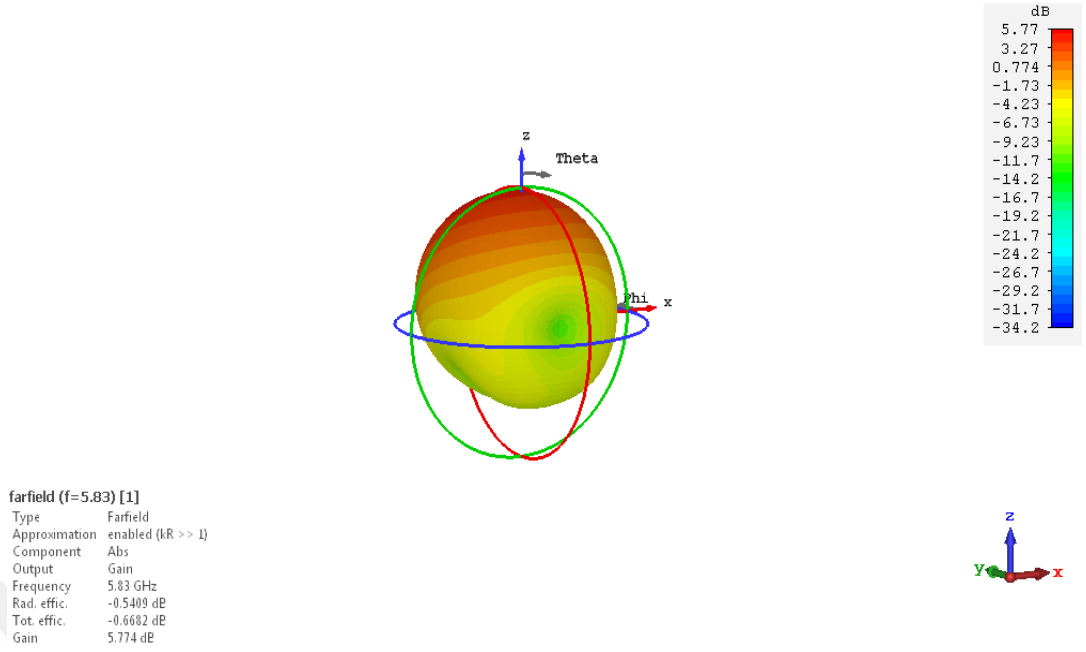
Şekil 7.35 Tek Katmanlı ve çok katmanlı ITO optiksel saydam antenlerin S_{11} grafikleri

İki antenin iletken kalınlıklarının farklı olması geri dönüş kaybına etkisi olmuştur. Tek katmanlı saydam anten 5.83 frekansında rezonansa girerek geri dönüş kaybı -15.32 dB, çok katmanlı saydam antenin ise 5.77 frekansında rezonansa girerek geri dönüş kaybı -11.39 dB'dir. -10 dB'nin altında tek ve çok katmanlı saydam antenin bant genişlikleri sırasıyla % 4.74, % 3.48'dir. Tek katmanlı saydam antenin bant aralığı daha geniştir.



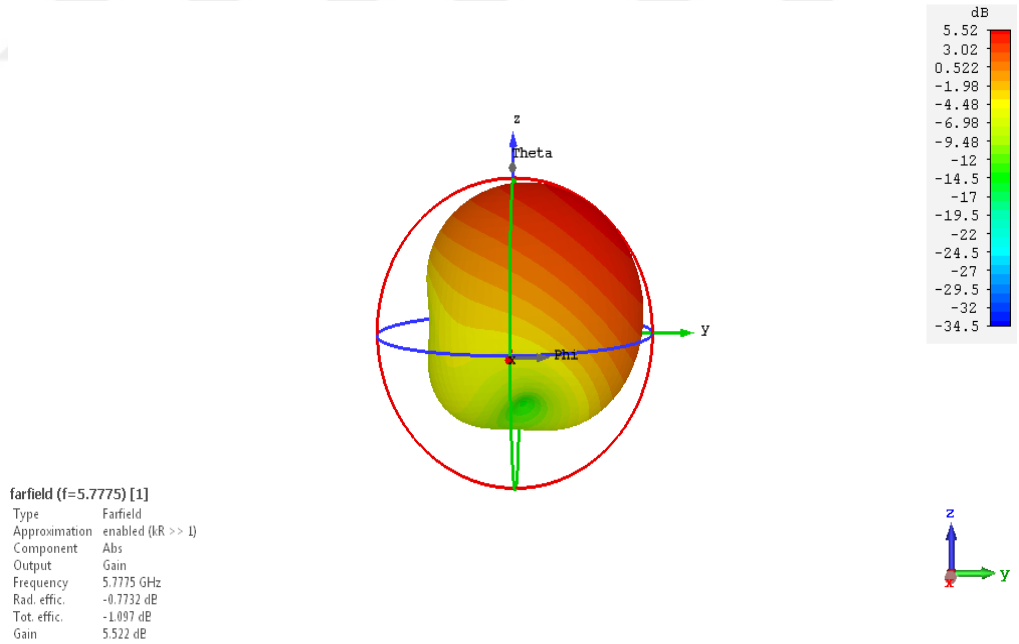
Şekil 7.36 Tek Katmanlı ve çok katmanlı ITO optiksel saydam antenlerin VSWR grafikleri

Tek katmanlı saydam antenin VSWR değeri 5.83 GHz frekansında 1.41, çok katmanlı saydam antenin ise 5.77 GHz frekansında 1.73'dir. Tek katmanlı ve çok katmanlı antenin VSWR değeri ikinin altındadır. ile ilişkili olan VSWR parametresi tek katmanlı saydam antende daha düşüktür. Tek katmanlı antenin iletkenliğinin daha büyük olmasından dolayı empedans eşleşmesi daha iyidir. Besleme hattı ve anten dizayn ile duran dalga oranı minimum değere ulaşması sağlanmıştır. Aşağıdaki grafiklerde sırasıyla tek ve çok katmanlı saydam antenlerin üç boyutlu kazanç grafikleri Şekil 7.37, Şekil 7.38'de verilmiştir.



Şekil 7.37 Tek katmanlı ITO optiksel saydam antenin üç boyutlu kazanç grafiği

5.83 frekansında rezonans olan tek katmanlı saydam antenin maksimum kazanç değeri 5.77 dB'dir. Z yönünde güçlü ışınım yapmaktadır.



Şekil 7.38 40 nm ITO kalınlıklı optiksel saydam antenin üç boyutlu kazanç grafiği

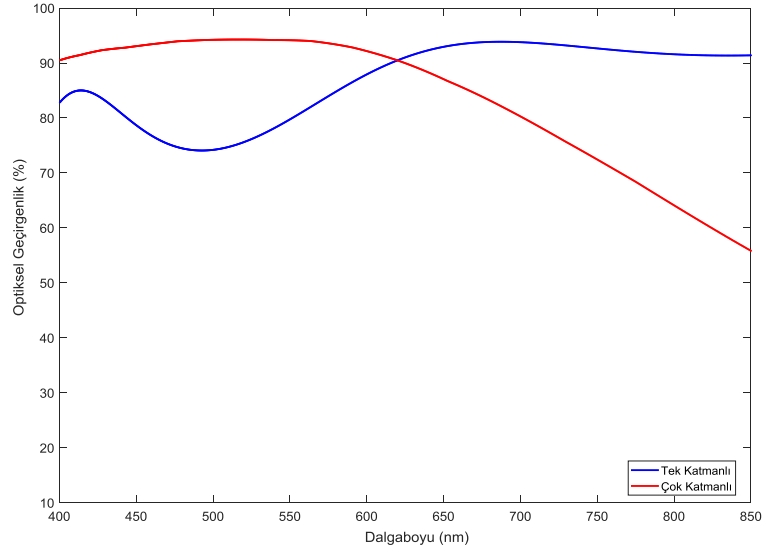
5.77 GHz' de rezonans olan çok katmanlı saydam antenin maksimum kazancı 5.52'dir. Zy yönünde daha güçlü ışınım yapmaktadır.

Anten karakteristik değerleri ve optiksel geçirgenlik değerleri izelge 7.4’de verilmiştir. Her bir ITO kalınlığı 200 nm olan tek katmanlı saydam anten, 40 nm ITO-10 nm gümüş-40 nm ITO olmak üzere toplamda 90 nm kalınlığındaki çok katmanlı antene göre kazanç, yönlülük ve verimlik değeri beklenildiği gibi daha yüksektir. Literatürdeki çok katmanlı saydam anten çalışmalarıyla (Hong,2016),(Hong,2017) kıyasladığımız zaman yama, besleme hattı ve topraklama düzleminde kullanılan ITO ile yüksek kazançlı ve verimli anten elde edilmiş oldu. Alttaş olarak 3.75 dielektrik sabitli saydam malzeme olan kuvars seçilmesi ve tasarımı en iyi empedans eşleşmesi sağlayacak şekilde dizayn edilmesi anten karakteristiği açısından önemli rol oynamıştır.

Çizelge 7.4 Tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenlerin karakteristik sonuçları

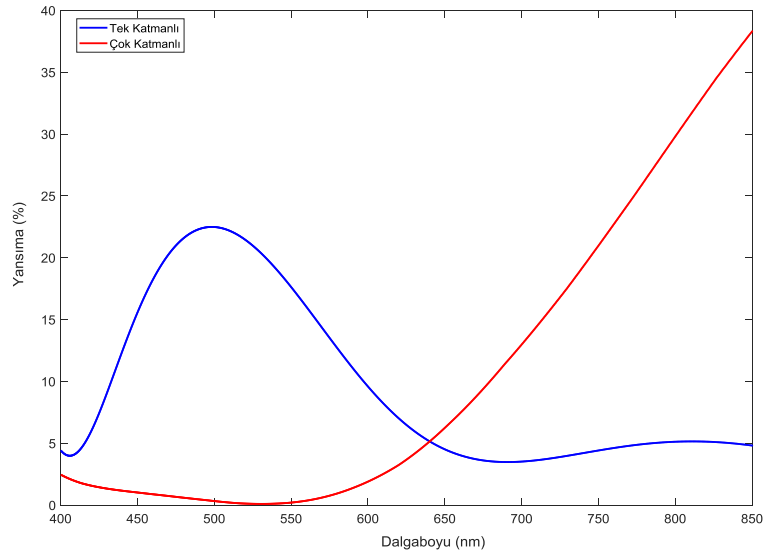
Anten ve Optik Sonuçları	Tek Katmanlı Anten	ok Katmanlı Anten
Rezonans Frekansı (GHz)	5.83	5.77
S_{11} (dB)	-15.32	-11.39
Bant Genişliği (%)	4.74	3.48
VSWR	1.41	1.73
Kazanç (dB)	5.77	5.52
Yönlülük (dBi)	6.31	6.29
Verimlilik (%)	88	83
Optiksel Geçirgenlik (500 nm) (%)	%74	%94

Genel olarak ifade edilirse tek katmanlı saydam antenin sonuçları daha iyi olduğu görülmektedir. Çok katmanlı saydam anten de ise yüksek kazanç sağlanmıştır. OptiLayer programında her iki antenin optiksel karakteristikleri olan geçirgenlik, yansımaya, soğurma parametreleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Geçirgenlik, yansımaya, soğurma parametreleri şekil 7.39, şekil 7.40, şekil 7.41’de gösterilmektedir.



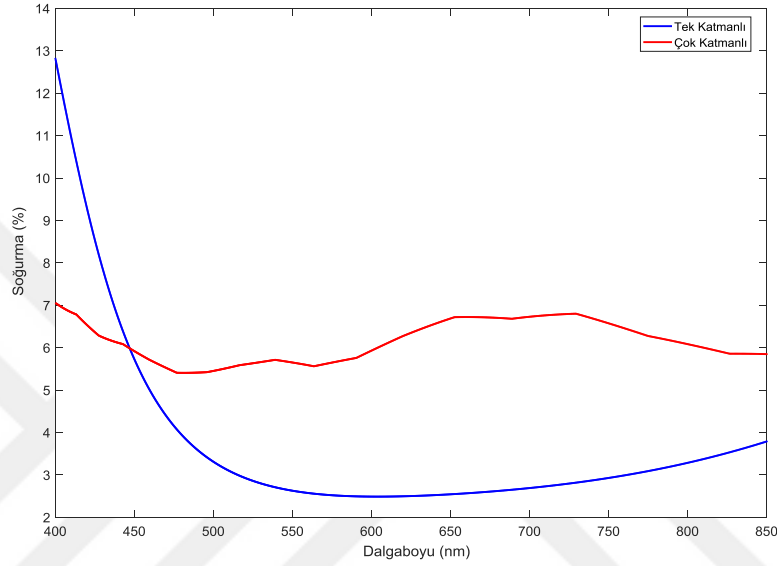
Şekil 7.39 Tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenlerin optiksel geçirgenlik grafikleri

Tek katmanlı saydam anten 400 nm'de % 80'in üzerinde optiksel geçirgenlik gösterirken çok katmanlı saydam anten % 90'ın üzerindedir. 500 nm dalgaboyunda tek katmanlı saydam antenin optiksel geçirgenliği % 74, çok katmanlı saydam antenin ise % 94 tür. 600 nm dalga boyundan sonra tek katmanlı antenin geçirgenliği arttıktan sonra sabit kalırken, çok katmanlı saydam antenin azalmaktadır. Çok katmanlı saydam anten geniş spektrumda yüksek optiksel geçirgenlik göstermektedir. Bu durum saydam antenler için avantaj sağlamaktadır.



Şekil 7.40 Tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenlerin optiksel geçirgenlik grafikleri

400 nm ile 550 nm arasında çok katmanlı saydam antende yansımaya minimum iken tek katmanlı saydam antende yansımaya artarak maksimum değere ulaşmaktadır. Çok katmanlı saydam antende 600 nm'den sonra yansımaya maksimum olmaktadır. Tek katmanlı antende ise yansımaya azalmaya başlamaktadır. Görünür bölgede (400 nm-700 nm) tek katmanlı saydam antenin maksimum yansımaya değeri %22 iken çok katmanlı antenin ise %12'dir.



Şekil 7.41 Tek ve çok katmanlı optiksel saydam antenlerin soğurma grafikleri

Tek katmanlı saydam antenin maksimum soğurması yaklaşık olarak % 13, çok katmanlı saydam antenin ise yaklaşık olarak % 7'dir. Çok katmanlı saydam antenin soğurması 400 nm'den sonra azalır ve tekrar artarak aynı şekilde devam etmektedir. Tek katmanlı saydam antende 400 nm'den sonra azalarak 550 nm ile 750 nm arasında yaklaşık olarak stabil devam etmektedir. 700 nm dalga boyundan sonra soğurmada artış gözlenmektedir.

Tek katmanlı saydam antende cilt derinliği δ etkisini azaltmak için yüksek frekansta (5.8 GHz), 200 nm iletken kalınlığında tasarlanarak optimum sonuç elde edilmiştir. Aynı boyuttaki çok katmanlı saydam anten 40 nm ITO-10 nm gümüş- 40 nm ITO sandviç yapısı ile tasarlanmıştır. Görünür bölgede optiksel geçirgenliği fazla olan çok katmanlı saydam antende sandviç yapısı ile yüzey plazma rezonansı ile yüksek optiksel iletim sağlanmıştır. Gelen ışık, katmanlı yapının serbest elektronlarıyla rezonans

salınımı yaparak girişim oluşturmaktadır. Böylece görünür bölgenin belli dalga boylarında optiksel geçirgenlik maksimum olmaktadır. Çok katmanlı saydam anten bu prensip göz önünde bulundurularak belirli kalınlıklarda tasarlanmaktadır. Literatürde buna benzer anten çalışmaları mevcuttur (Kim,2014).

Aynı zamanda anti yansıtıcı kaplamalara da benzetilebilir. Gelen ışık, katmanlı yapıdan yansdıktan sonra aralarındaki faz farkı sonucunda sönümlenmektedir. Böylece yansıma minimum olmaktadır. Çok katmanlı saydam antende kalınlık ve malzeme seçimi önemlidir. Her kalınlık maksimum geçirgenlik sağlamamaktadır. Bu yapı için 40 nm ITO saydam iletken oksit ve 10 nm kalınlığında gümüş seçilerek % 90'ın üzerinde optiksel iletim sağlanmıştır. Başka iletken oksitler için bu değer değişmektedir.

8. SONUÇ

5.8 GHz frekansında bakırlı yama anten Mikrodalga İleri Araştırma Laboratuvarında saydam ve elastik olan akrilik bant kullanılarak fotolitografi yöntemiyle üretilmiştir. CST Studio Suite ve Ansys HFSS programlarında tasarlanan antenin simülasyonu yapılmıştır. Rohde & Schwarz VNANetwork Analizör ile geri dönüş kaybı ve voltaj dalga oranının ölçüm sonuçları alınarak simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve ölçüm sonuçları birbirleriyle uyumlu çıkmıştır. Aralarındaki fark üretim hatalarından kaynaklanmaktadır. Üretim sonucu 5.59 GHz frekansında geri dönüş kaybı -12 dB, VSWR değeri ise 1.6'dır. Geri dönüş kaybı -10 dB'nin, VSWR değeri ise 2'nin altındadır. Bakırlı antenin yanında ITO filmlili 5.9 GHz çalışma frekansında optiksel saydam elektron demeti püskürtme yöntemiyle yüksek kalitede kaplamayla üretilmiştir. Geri dönüş kaybı -10 dB'den düşük, voltaj dalga oranı 2'nin altında geniş bantlı (UWB) anten elde edilmiştir. Literatürdeki üretilen saydam antenlere nazaran anten karakteristik sonuçları daha iyi elde edilmiştir. Rezonansa yaklaşarak voltaj dalga oranı 2'nin altında elde edilmiştir. Görünür bölgede optiksel geçirgenliği % 82, 720 nm dalgaboyunda ise maksimum geçirgenlik göstererek % 86 değerine ulaşmaktadır. 800 nm dalgaboyundan sonra soğurma artarak geçirgenlik azalmaktadır. Yüksek iletkenlik ve optiksel iletme sahip ITO iletken oksit kullanılması anten kazancına ve geçirgenliğe olumlu katkı sağlayarak anten karakteristiği ve geçirgenlik adına en uygun sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak akıllı saat, camlara ve dokunmatik ekranlara kolay entegre edilebilecek saydam bir anten üretilmiştir.

Diğer bir bakırlı yama anten çalışması olarak 3 GHz çalışma frekansında çeyrek dalga dönüşümlü geleneksel mikroşerit yama anten ve antenin yama düzlemi metalik ızgaralar haline getirilerek optiksel saydam ızgara anten tasarlanmıştır. Her bir metalik ızgara genişliği 30μ molacak şekilde tasarlanarak görünür bölgede %95 optiksel geçirgenlik elde edilmiştir. Her iki anten CST Studio Suite ve Ansys HFSS programlarında anten karakteristikleri simüle edilerek karşılaştırılmış, saydamlığı teorik olarak formülle hesaplanmıştır. Anten karakteristik sonuçlara baktığımızda sıradan yama antenin yama kısmının tamamen bakır olmasından dolayı geri dönüş kaybı, voltaj dalga oranı daha düşük anten kazancı ve verimliliği daha yüksektir. Yama antenin anten kazancı 7.30

dB, optiksel saydam ızgara antenin kazancı 5.92 dB'dir. Verimlilikleri sırasıyla % 86, % 63'dür. Anten verimliliği %60-%90 arasında olması anten uygulamaları için kabul edilebilir bir değerdir. Tasarlanan antenler için bu değer sağlanmıştır.

Duran dalga oranı iyi bir empedans uyumu için arzu edilen VSWR oranı 2 veya daha altıdır. Her iki antende bu oran 2'nin altındadır. Optiksel karakteristiklerine baktığımızda yama antenin yama düzlemi tamamen bakır olduğu için yansıtıcıdır. Optiksel saydam antenin her bir ızgara genişliği mikrometre mertebesinde tasarlanarak yüksek optiksel iletim, ızgara sayısı artırılarak ise anten karakteristik sonuçları iyileştirilmiştir. Böylece en uygun sonuç elde edilmiştir. Diğer saydam antenlere göre anten kazancı büyük olan metalik ızgara antenler CubeSat gibi küçük uydulara entegre edilmektedir. Enerji hasatlamada kullanılan güneş hücreleri altta ve topraklama arasına yerleştirilerek üretilmektedir. Başka bir uygulama alanı olarak istenmeyen ışımalardan korunmak için de metalik ızgara antenler kullanılmaktadır.

Diğer bir çalışma olarak 5.8 GHz çalışma frekansında TCO'lu saydam antenler tasarlanmıştır. Görünür bölgede şeffaf ve iletkenliği (8×10^5 siemens/m) yüksek olan ITO malzemesi kullanılmıştır. ITO iletken kalınlığı 200 nm'dir. Yama ve topraklama yüzeylerinde ITO iletken oksit kullanılmıştır. Çok katmanlı saydam antende yama ve topraklama düzleminde ITO-gümüş-ITO sandviç yapısı kullanılmıştır. Ara katmanda bulunan gümüş kalınlığı 10 nm kalmak koşuluyla 40, 45, 50nm ITO kalınlıklarda antenler dizayn edilerek anten ve optik parametreleri karşılaştırılmıştır.

Bunun sonucunda 40 nm ITO kalınlıklı çok katmanlı saydam anten en uygun sonuçları vermiştir. Optiksel iletimi yüksek, yansıma ve soğurma değerleri düşük olan antenler tasarlanmıştır. Tek katmanlı saydam anten ile 40 nm ITO-10 nm gümüş-40 nm ITO sandviç yapılı çok katmanlı saydam antenin optik ve anten parametreleri karşılaştırılmıştır. Optiksel parametreleri OptiLayer programında analizi yapılmıştır. Tek ve çok katmanlı saydam antenler CST Studio Suite programında tasarlanarak simülasyonları yapılmıştır. Tek katmanlı saydam antenin anten karakteristik sonuçları iletken kalınlığına bağlı olarak çok katmanlı saydam antenin sonuçlarından daha iyi

çıkıştır. Anten kazancı sırasıyla 5.77 dB, 5.52 dB'dir. Verimlilik değerleri %88,%83'dür.

Antenler rezonansa yaklaşarak VSWR değeri ikinin altındadır. Doğru malzeme seçimi ve iyi tasarım sonucunda empedans eşleşmesi her iki anten için sağlanmıştır. Tek katmanlı saydam antende iletken kalınlığının cilt derinliğinden çok daha büyük olması için yüksek frekansta 200 nm iletken kalınlığında tasarlanmıştır. Çok katmanlı saydam antende sandviçli yapı ile optik ve anten karakteristik sonuçlarını iyileştirilmiştir. Ara katmanda bulunan gümüş iletim bandına katkı sağlayarak iletkenliğin artmasına sebep olduğu görülmektedir. Katmanlı sandviç yapısı ile belirli kalınlıklarda yüzey plazma rezonansı etkisiyle ile görünür bölgenin belli dalga boylarında geçirgenlik maksimum olmaktadır. Çok katmanlı saydam antende bu etki göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Tek katmanlı ve çok katmanlı saydam antenleri kıyaslırsak tek katmanlı anten daha kolay üretilmektedir. Bu amaçla tek katmanlı saydam anten tasarlanmış ve çok katmanlı antenin optik ve anten parametreleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Tek ve çok katmanlı saydam antenlerin optiksel özelliklerini değerlendirdiğimizde 500 nm dalgaboyunda geçirgenlikleri sırasıyla % 74, %94'dür. Çok katmanlı anten görünür bölgede geniş spektrumda yüksek geçirgenliğe sahiptir. Görünür bölgede maksimum yansımaları sırasıyla % 22, % 12'dir. Tek katmanlı anten 500 nm'de maksimum yansıma gösterirken daha sonra yansıma değeri azalmaktadır. Çok katmanlı anten de ise 400 nm ile 550 nm dalga boyları arasında minimum yansıma gösterirken 550 nm'den sonra yansıma değeri artmaktadır. Soğurma grafiklerine baktığımızda tek katmanlı saydam antenin görünür bölgede maksimum soğurma değeri % 12, çok katmanlı saydam antenin soğurma değeri ise % 7'dir. Genel olarak ifade edilecek olursa optiksel karakteristikleri olan geçirgenlik, yansıma ve soğurma grafiklerine baktığımızda çok katmanlı saydam antenin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalara ek olarak, ileriki olası çalışmalarda, saydam antenlerin bant genişliği artırılarak küçük boyutlu giyilebilir cihazlarda kullanılmak üzere antenler minyatürleştirilebilir. Ayrıca, metamatzemeli TCO'lu saydam antenler tasarlanarak verimlilik ve kazanç gibi anten parametreleri iyileştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Balanis, C. A., 2005: Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Fawwaz T. Ulaby Umberto Ravaioli (n.d.) Fundamentals of Applied Electromagnetics, Seventh edn., 2015, 2010 Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458:
- Huang, Y., & Boyle, K. (2008). Antennas: from theory to practice. John Wiley & Sons.
- Topuz.E, Işık.C., Şimşek.S., 2015. Mikrodalga Tekniği Papatya yayıncılık No:11/3.,Ankara.
- Anand, S., Kumar, D. S., Wu, R. J., & Chavali, M. (2014). Analysis and design of optically transparent antenna on photonic band gap structures. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 125(12), 2835-2839.
- C, M.S. 2010.Faz Dizili Dairesel Mikroşerit Antenlerin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi.Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Güzeller, S. 2016. Yaş Yöntemle ITO İnce Filmlerin Üretimi, Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi.Ankara Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hasan, M., Abdullah, S., Kanon, F. M., & Lakra, M. (2017). Transparent microstrip patch antenna using indium tin oxide for telecommunication applications (Doctoral dissertation, BRAC Univeristy).
- Hong, S., Kang, S. H., Kim, Y., & Jung, C. W. (2016). Transparent and flexible antenna for wearable glasses applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 64(7), 2797-2804.
- Hong, S., Kim, Y., & Jung, C. W. (2017). Transparent microstrip patch antennas with multilayer and metal-mesh films. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 772-775.
- Hong, W., Lim, S., Ko, S., & Kim, Y. G. (2017). Optically Invisible Antenna Integrated Within an OLED Touch Display Panel for IoT Applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 65(7), 3750-3755.
- Hong, S., Kim, Y., & Jung, C. W. (2016). Transparent UWB antenna with IZTO/Ag/IZTO multilayer electrode film. International Journal of Antennas and Propagation, 2016.
- <http://www.acikders.org.tr>
- <https://materion.com>
- Kang, S. H., & Jung, C. W. (2018). Transparent patch antenna using metal mesh. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 66(4), 2095-2100.

- Kim, Y., Lee, C., Hong, S., Jung, C. W., & Kim, Y. (2014). Design of transparent multilayer film antenna for wireless communication. *Electronics Letters*, 51(1), 12-14.
- Liu, X., Jackson, D. R., Chen, J., Liu, J., Fink, P. W., Lin, G. Y., & Neveu, N. (2017). Transparent and Nontransparent Microstrip Antennas on a CubeSat: Novel low-profile antennas for CubeSats improve mission reliability. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 59(2), 59-68.
- Lin, K. M., Lin, R. L., Hsiao, W. T., Kang, Y. C., Chou, C. Y., & Wang, Y. Z. Effects of the structural properties of metal oxide/Ag/metal oxide multilayer transparent electrodes on their optoelectronic performances. *Journal of Materials Science:Materials in Electronics*, 28(16), 12363-12371.2017.
- Liu, X., Jackson, D. R., Chen, J., Liu, J., Fink, P. W., Lin, G. Y., & Neveu, N. (2017). Transparent and Nontransparent Microstrip Antennas on a CubeSat: Novel low-profile antennas for CubeSats improve mission reliability. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 59(2), 59-68.
- Mekimah, B., Messai, A., & Belhedri, A. (2015, December). A circular patch antenna using two-dimensional Photonic Crystal Substrate. In *2015 27th International Conference on Microelectronics (ICM)* (pp. 111-113). IEEE.
- Paul, L. C., & Sultan, N. (2013). Design, simulation and performance analysis of a line feed rectangular micro-strip patch antenna. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 4(2), 117-126.
- Porch, A., Morgan, D. V., Perks, R. M., Jones, M. O., & Edwards, P. P. (2004). Electromagnetic absorption in transparent conducting films. *Journal of applied physics*, 95(9), 4734-4737.
- Saberin, J. R. *Optically transparent antennas for small satellites*. The University of Utah.2010.
- Tansarıkkaya, İ. 2007. *Geniş Bandlı Yama Anten Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Turpin, T. W. (2009). *Meshed patch antennas integrated on solar cell-a feasibility study and optimization*.
- Uzun, Ş. 2012. *Sol-gel Yöntemiyle Büyütülen İndiyum Katkılı Çinko Oksit Filmlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yalçın, D.2015.4. *Nesil Mobil Haberleşme Sistemlerinin Performans Kriterlerinin İncelenmesine Yönelik Anten Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yasin, T. 2011. *Optically transparent multifunctional patch antennas integrated with solar cells for small satellites*.
- Yasin, T., Baktur, R., & Furse, C. (2011, July). A study on the efficiency of transparent patch antennas designed from conductive oxide films. In *2011 IEEE*

International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI) (pp. 3085-3087). IEEE.

Yıldız, S. 2011. Bir Mikrodalga Antenin Işıma Ana Hüzmesinin Ayarlı Bir Toprak Düzlemiyle Yönlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yasemin DEMİRHAN

Doğum Yeri : Malatya

Doğum Tarihi : 05.04.1992

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : İzmit Mimar Sinan Lisesi (2010)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği (2016)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği
Anabilim Dalı (Eylül 2016 – Eylül 2019)