

Substrat Tümlleşik Dalga Kılavuzu Temelli Çift Bantlı Anten Tasarımı

Ersin ASLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2023

Substrate Integrated Waveguide Based Dual Band Antenna

Ersin ASLAN

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Electrical-Electronics Engineering

June 2023

Substrat Tümlęşik Dalga Kılavuzu Temelli Çift Bantlı Anten Tasarımı

Ersin ASLAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Manyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Gökhan ÇINAR

Haziran 2023

ONAY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Ersin ASLAN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Substrat Tümlşik Dalga Kılavuzu Temelli Çift Bantlı Anten Tasarımı” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğın ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliğı ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Gökhan ÇINAR

İkinci Danışman :

Yüksek Lisans /Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Gökhan ÇINAR

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Faruk DİRİSAĞLIK

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN

Üye:

Üye:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Gökhan ÇINAR danışmanlığında hazırlamış olduğum “Substrat Tümlleşik Dalga Kılavuzu Temelli Çift Bantlı Anten Tasarımı” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 19/06/2023

Ersin ASLAN

ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte son yıllarda kablosuz haberleşmenin önemi artmaktadır. Her alanda olduğu gibi kablosuz haberleşmedeki bu artış farklı teknolojilerin kullanılmasına olanak sağlamıştır. Günümüzde 4G haberleşme sistemi ne kadar yaygın olsa da hızı ve verimi daha yüksek olan 5G haberleşme sistemi hayatımızda önemli bir rol oynamaktadır. Mevcut olan altyapı ve haberleşme sistemlerinin olanağı doğrultusunda hem 4G hem de 5G haberleşme teknolojisi kullanılabilir.

Bu tezde, 4G ve 5G haberleşme sistemlerin çalışma frekanslarda aynı anda çalışabilecek çift bantlı anten tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarımda Substrat Tümlşik Dalga Kılavuzu – Substrated Integrated Waveguide (SIW) ve Slot teknolojisi kullanılmıştır. Bu teknolojiler sayesinde iki farklı frekansta çalışabilen yüksek verimli ve diğer teknolojilere kıyasla daha küçük boyutlara sahip anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımı, optimizasyonu ve simülasyonu için CST Microwave Studio kullanılmıştır. Bu tasarım, günümüz teknolojisinde yer alan tüm 4G ve 5G tabanlı sistemlerde kullanılabilir. Simülasyon ve analiz sonuçları karşılaştırılarak en optimum sonuç elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Substrat Tümlşik Dalga Kılavuzu, Anten, Slot, 4G Haberleşme Sistemleri, 5G Haberleşme Sistemleri, Kablosuz Haberleşme

SUMMARY

With the development of technology, the importance of wireless communication has increased in recent years. As in all areas, this increase in wireless communication has allowed for the use of different technologies. Although the 4G communication system is widespread today, the 5G communication system, which is faster and more efficient, plays an important role in our lives. Both 4G and 5G communication technologies can be used in accordance with the opportunities provided by the existing infrastructure and communication systems.

In this thesis, a dual-band antenna design and analysis that can operate at the same time in the operating frequencies of 4G and 5G communication systems have been realized. Substrate Integrated Waveguide (SIW) and Slot technologies were used in the design. Thanks to these technologies, a high-efficiency antenna design that can operate at two different frequencies and has smaller dimensions compared to other technologies has been achieved. CST Microwave Studio was used for antenna design, optimization, and simulation. This design can be used in all 4G and 5G-based systems available in today's technology. The simulation and analysis results were compared, and the most optimal result was obtained.

Keywords: Substrated Integrated Waveguide (SIW), Slot, 4G Communication System, 5G Communication System, Wireless Communication

TEŞEKKÜR

Öncelikle, bu çalıőmam sırasında değerli tavsiyeleri ve sürekli desteği için danıőmanım Prof. Dr. Gökhan ÇINAR'a teőekkürlerimi sunarım. Yüksek bilgisi ve deneyimi, akademik araőtırmam ve günlük yaőamımın her anında beni cesaretlendirmiőtir.

Ayrıca, lisans ve yüksek lisans derslerimde öğrettiği bilgiler ve verdiği destek için Dr. Hayrettin ODABAŐI'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
2.1. Anten ve Dalga Kılavuzu Temelleri	11
2.2. SIW Teknolojisi ve Anten Tasarımındaki Yeri	28
2.3. Slot Teknolojisi ve Anten Tasarımındaki Yeri	35
3. MATERYAL VE YÖNTEM	38
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR DİZİNİ	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Kablosuz haberleşmenin tarihçesi	1
1.2 Haberleşme teknolojileri (Hihonor, 2018).....	2
1.3 4G ve 5G anten	3
1.4 Mikrodalga bileşenleri.....	6
1.5 Anten çeşitleri.....	8
1.6 SIW yapısı (Nwajana & Obi, 2022)	9
1.7 Dikdörtgen dalga kılavuzunda SIW yapısı (Nwajana & Obi, 2022).....	10
2.1 Şerit iletim hattı (Pozar , 2011)	12
2.2 Mikro şerit iletim hattı (Pozar , 2011)	13
2.3 Alıcı ve verici antenlerin temel işleyişi (Pozar , 2011)	14
2.4 Işıma deseni (Balanis, 2016)	15
2.5 Hüzme genişliği (Balanis, 2016)	16
2.6 Verimlilik a) Anten terminalindeki b) Yansıma, iletim ve dielektrik kayıpları (Balanis, 2016).....	17
2.7 Polarizasyon (Balanis, 2016).....	19
2.8 Giriş empedansı (Balanis, 2016)	20
2.9 Sonsuz küçük dipol anten (Balanis, 2016)	21
2.10 Küçük dipol anten (Balanis, 2016)	22
2.11 Yarım dalga boyu dipol anten (Balanis, 2016).....	23
2.12 Açıklık antenler (Balanis, 2016).....	24
2.13 Dikdörtgen açıklık anten (Balanis, 2016).....	25
2.14 Dairesel açıklık anten (Balanis, 2016).....	26
2.15 Dikdörtgen mikro şerit anten (Balanis, 2016)	27
2.16 Dairesel mikro şerit anten (Balanis, 2016)	28
2.17 Reflektör anten (Balanis, 2016).....	28
2.18 SIW yapısı (Bozzi vd. 2011)	29
2.19 Metalik silindirik yapıların yerleştirilmesi (Aparna vd. 2022).....	30

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.20 Tek substrat boşluk destekli slot ve patch osilatör anten (Bozzi vd. 2011).....	34
2.21 Kublaj osilatör anten dizileri (Bozzi vd. 2011)	35
2.22 L desenli slot anten (Srivastava vd. 2013).....	36
2.23 U desenli slot anten (Astuti & Rahardjo, 2018)	37
2.24 C desenli slot anten (Srivastava vd. 2017)	37
3.1 Tasarımda yer alan slot yapısının ölçüleri	44
4.1 Tasarımda yer alan SIW yapısı.....	45
4.2 Optimize S11 grafiği	45
4.3 Silindirik yapıların çapına göre gerçekleştirilen parametrik çalışma	46
4.4 Sağ ve sol SIW yapılarının merkezden merkeze olan uzaklığı	47
4.5 Alt ve üst SIW yapılarının merkezden merkeze olan uzaklığı	47
4.6 Boşluklara göre gerçekleştirilen parametrik çalışma.....	48
4.7 Özdeş boşlukların yataydaki uzunluklarına göre gerçekleştirilen parametrik çalışma .	48
4.8 Slot yapısının topraklanmış metalik yüzeyin üst kenarına olan uzaklığına göre parametrik çalışma	49
4.9 Dikeyde yer alan slot yapısının uzunluğuna göre parametrik çalışma	49
4.10 Yatayda yer alan slot yapısının uzunluğuna göre parametrik çalışma	50
4.11 Yatayda yer alan slot yapısının kalınlığına göre parametrik çalışma	50
4.12 Anten verimliliği	51
4.13 2.6 GHz'de uzak alan yayılım karakteristiği.....	51
4.14 3.6 GHz'de uzak alan yayılım karakteristiği.....	51
4.15 Phi açısı 90 derece iken uzak alan yayılım modeli.....	52
4.16 Theta açısı 90 derece iken uzak alan yayılım modeli	52
4.17 2.6 GHz'de ön yüzeydeki manyetik alan yayılımı.....	53
4.18 2.6 GHz'de arka yüzeydeki manyetik alan yayılımı	53
4.19 3.6 GHz'de ön yüzeydeki manyetik alan yayılımı.....	53
4.20 3.6 GHz'de arka yüzeydeki manyetik alan yayılımı	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.21 2.6 GHz'de ön yüzey akımı	54
4.22 2.6 GHz'de arka yüzey akımı.....	54
4.23 3.6 GHz'de ön yüzey akımı	54
4.24 3.6 GHz'de arka yüzey akımı.....	55
4.25 Portta yer alan elektrik alan modeli	55
4.26 Tasarımın son hali	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

1.1 Haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması (Ezhilarasan & Dinakaran, 2017)..... 4

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
AMPS	Gelişmiş Cep Telefonu Sistemi
BDMA	Hüzme Bölmeli Çoklu Erişim
CDMA	Kod Bölmeli Çoklu Erişim
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
GSM	Mobil Erişim için Küresel Sistem
IoT	Nesnelerin İnterneti
IP	İnternet Protokolü
LAN	Yerel Ağ Bağlantısı
LBS	Lokasyon Tabanlı Hizmet
LTE	Uzun Süreli Gelişim
MC-CDMA	Çok Taşıyıcılı Kod Bölmeli Çoklu Erişim
MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
MMIC	Monolitik Mikrodalga Tümüleşik Devre Teknolojisi
MU-MIMO	Çoklu Kullanıcılı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
OFDMA	Ortogonal Frekans Bölümü Çoklu Erişimi
PAN	Kişisel Ağ Bağlantısı
PANW	Palo Alto Ağ BAğlantısı
PEC	Mükemmel Elektriksel İletken
PTSN	Anahtarlamalı Telefon Ağı
RF	Radyo Frekansı
RWG	Geleneksel Dikdörtgen Dalga Kılavuzu
SIW	Substrat Tümüleşik Dalga Kılavuzu
SiP	Paket İçindeki Sistem
SoS	Substrat Üzerindeki Sistem
TE	Enine Elektrik
TEM	Enine Elektromanyetik

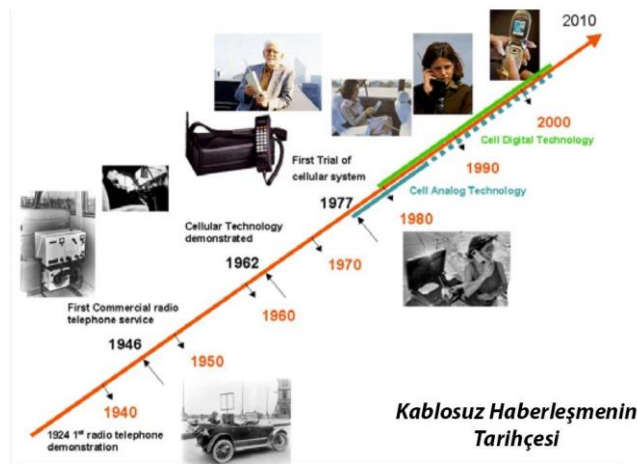
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
TM	Enine Manyetik
TV	Televizyon
WAN	Geniş Ağ Bağlantısı
WCDMA	Geniş Bant Kod Bölmeli Çoklu Erişim
WLAN	Kablosuz Yerel Ağ Bağlantısı
Wi-Fi	Kablosuz Bağlantı Alanı
WWW	Dünya Çapında Ağ

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Haberleşme ilk çağlardan beri insanlık için önemli bir unsur olmuş ve teknolojik gelişmeler ile önemini artırarak günümüz hayatında kritik bir role sahip olmuştur. Haberleşme ilk olarak duman, ışık gibi unsurlarla yapılırken günümüzde teknolojinin etkisi ile hem kablolu hem de kablosuz bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Teknoloji sayesinde ses, görüntü, veri gibi yapılar kolaylıkla bir yerden başka bir yere aktarılabilir. Bunun ilk örneği 1837 yılında Samuel Mors tarafından yapılan elektro mıknatıslı telgraf sayesinde bilginin bir yerden başka bir yere taşınması, kablolu bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında 1876 tarihinde İskoç bilim insanı Alexander Graham Bell'in telefonu icat etmesiyle kablo yardımıyla sesin bir yerden başka bir yere iletilmesi sağlanmıştır. Bu gelişmenin sonrasında Guglielmo Marconi'nin çalışmaları ile radyo dalgaları sayesinde verinin aktarılabilceği kanıtlanmıştır. Bu sayede kablosuz haberleşmenin temelleri atılmıştır. İlerleyen yıllarda yapılan teknolojik ve bilimsel çalışmalar sayesinde, 1970'li yıllarda mobil telefonlar ortaya çıkmış ve günümüzde bu yenilik ile tüm insanlar kolaylıkla haberleşme imkânı bulabilmektedir. Kullanılan ilk mobil telefonlar sadece ses iletimi yapabilirken günümüzde internetin bu cihazlara uyarlanması ile hemen hemen tüm cihazlar birbirleri ile haberleşebilmekte ve hayatı ciddi bir oranda kolaylaştırmaktadır.



Şekil 1.1 Kablosuz haberleşmenin tarihçesi

Mobil cihazlar, gündelik hayata girmesiyle günümüzde haberleşme için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İlk ortaya çıkışlarından bugüne kadar mobil cihazların haberleşme kabiliyetlerinde ciddi bir ilerleme görülmüştür. Bu gelişmeler ilk olarak 1G teknolojisi ile başlamış ve günümüze dek 2G, 3G, 4G ve 5G teknolojilerini takip ederek ilerlemiştir. Ayrıca günümüzde 6G haberleşme teknolojisinin temelleri atılmakta olup ciddi çalışmalar yapılmaktadır. “G” harfi İngilizcedeki “generation” kelimesinden gelmekte olup sayıların büyüklüklerine göre kapsam ve kabiliyetlerindeki artışı temsil etmektedir.

1G olarak isimlendirilen haberleşme teknolojisi ile mobil cihazlarda sadece sesin kablosuz bir şekilde taşınmasını sağlamıştır. Bu teknoloji mobil cihazların ilk bulunduğu zamanlardan 1990’ların başına dek kullanılmıştır. Bu teknolojinin ardından 2G temelli mobil cihazlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu cihazlar, sayısal haberleşme temelli olup sadece ses iletimi yapmamaktadır. İletilen sesin kalitesi 1G’ye göre daha fazla olup daha büyük kapasiteli veri imkânı 2G teknolojisi ile insanların hayatına girmiştir. Ayrıca iletilen verilerin daha güvenli bir şekilde bir yerden başka bir yere kablosuz olarak taşınmasına imkân sağlamıştır. Ek olarak 2G teknolojisi ile haberleşme alanına kısa mesaj özelliği eklenebilmiştir. Bu teknoloji ileriki dönemlerde gelişerek 3G olarak isimlendirilecek ve haberleşmede ciddi ilerlemeler sağlanmış olmaktadır. Bu gelişmelerden en önemlisi akıllı sistemlerin mobil cihazlara entegrasyonudur. Bu özellikle birlikte mobil cihazlara internet erişimi tanımlanabilmiş ve haberleşme alanında ciddi ilerlemeler kaydedilmiştir. İlk defa 3G teknolojisi ile görüntülü konuşma gündelik hayata girmiş ve veri iletim kapasitesinde ve hızında ciddi bir artış yaşanmıştır. Ayrıca GPS, LBS ve mobil TV gibi özelliklerde yine 3G teknolojisi ile insanların gündelik hayatlarına girmiştir.



Şekil 1.2 Haberleşme teknolojileri (Hihonor, 2018)

4G, kendisinden önce tasarlanan 3G teknolojisine göre daha yüksek ve hızlı veri aktarımına izin veren bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknolojinin getirdiği en büyük yeniliklerin başında herhangi bir yer veya zamanda mobil kullanıcılara güvenli bir şekilde video ve sesli arama gibi multimedya verilere ulaşmayı sağlamasıdır (Gobjuka, 2009). Bu teknoloji ile haberleşme alanına OFDMA, MIMO, MU-MIMO ve LTE gibi özellikler girmektedir (Ezhilarasan & Dinakaran, 2017). OFDMA İngilizcedeki “The Orthogonal Frequency Division Multiple Access” ifadesinin baş harflerinden ortaya çıkmaktadır. Frekans modülasyonunun bir varyantı olan bu yapı, frekans düzleminde çoklu taşıyıcı modülasyonunun bir uygulamasıdır (Carlson & Crilly, 2010). OFDM, birbirleriyle ortogonal olan çoklu taşıyıcılar kullanır ve sadece frekans alanında değil faz alanında da haberleşme sistemlerine çokluma imkânı vermektedirler (Carlson & Crilly, 2010). MIMO ile haberleşme sistemlerinde birden fazla alıcı ve verici yapılar aynı sistemlerde kullanılabilir. MIMO teknolojisi özellikle anten yapılarında akıllı antenler konseptini geliştirerek haberleşme sinyallerinde hüzmeme konseptinde ciddi ilerlemelere ön ayak olmuştur (Ezhilarasan & Dinakaran, 2017). LTE özelliği ile de 4G teknolojisinin sağladığı veri aktarım hızının artırılması sağlanmıştır. Günümüzde 4G halen birçok uygulamada kullanılan bir haberleşme yapısıdır.



Şekil 1.3 4G ve 5G anten

4G haberleşme teknolojisinin ilerleyen yıllarda bazı sıkıntıları ortaya çıkmış ve bu sıkıntılar 5G'nin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bunların başında mobil veri trafiğinde ciddi olumsuzluklar yaratmasıdır (Ezhilarasan & Dinakaran, 2017). 5G ile 4G'nin sunduğu kapasite 1000 kat daha fazla artırılabilmiştir. 5G haberleşme teknolojisi ile 7-24 cihaz bağlantısı merkezi bir kullanıcı aracılığıyla birbirleri ile kesintisiz bir şekilde haberleşme imkânı bulabilmektedir. Bu da 5G ile gündelik hayata giren en büyük özelliktir. Ayrıca

merkezi bir hizmet sağlayıcı ile akıllı sistemler ve sensörler gibi yapıların güvenli, verimli ve ölçeklenebilir bir şekilde kullanılabilmesi sağlanmaktadır. Günümüzde 5G haberleşme teknolojisi birçok alanda kullanılmaktadır. Akıllı şehir ve evlerden navigasyon sistemlerine kadar birçok alanda 5G teknolojisi ile sıklıkla karşılaşılmaktadır. Ayrıca sağlık, sanal gerçeklik, endüstriyel üretim ve IoT gibi alanlarda da 5G haberleşme teknolojisi kullanılmaktadır.

Çizelge 1.1 Haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması (Ezhilarasan & Dinakaran, 2017)

Özellikler	1G	2G	3G	4G	5G
İlk Çıkış	1984	1999	2002	2010	2015
Standartlar	AMPS	GSM	WCDMA, CDMA2000	OFDMA, MC-CDMA	CDMA, BDMA
Ağ Mimarileri	Analog hücreli teknoloji	Dijital hücreli teknoloji	IP teknolojisi ve geniş bantlı CDMA	IP, LAN,WAN, WLAN, PAN	IP, LAN,WAN,PANW LAN, WWW
Veri Hızı	2 Kbps	64 Kbps	2 Mbps	2 Mbps to 1Gbps	1 Gbps & higher
Frekans	150-900 MHz	1.8 GHz	1.8 to 2.5 GHz	2-8 GHz	3-300 GHz
Çekirdek Tipi Ağ	PTSN	PTSN	Ağ paketi	Tüm IP ağları	Düzleştirilmiş IP ağı ve 5G ağı arayüzü (5G-NI)
Antenli Yayılım Tipi	Dikey	Dikey	Dikey	Dikey, Yatay	Dikey, Yatay

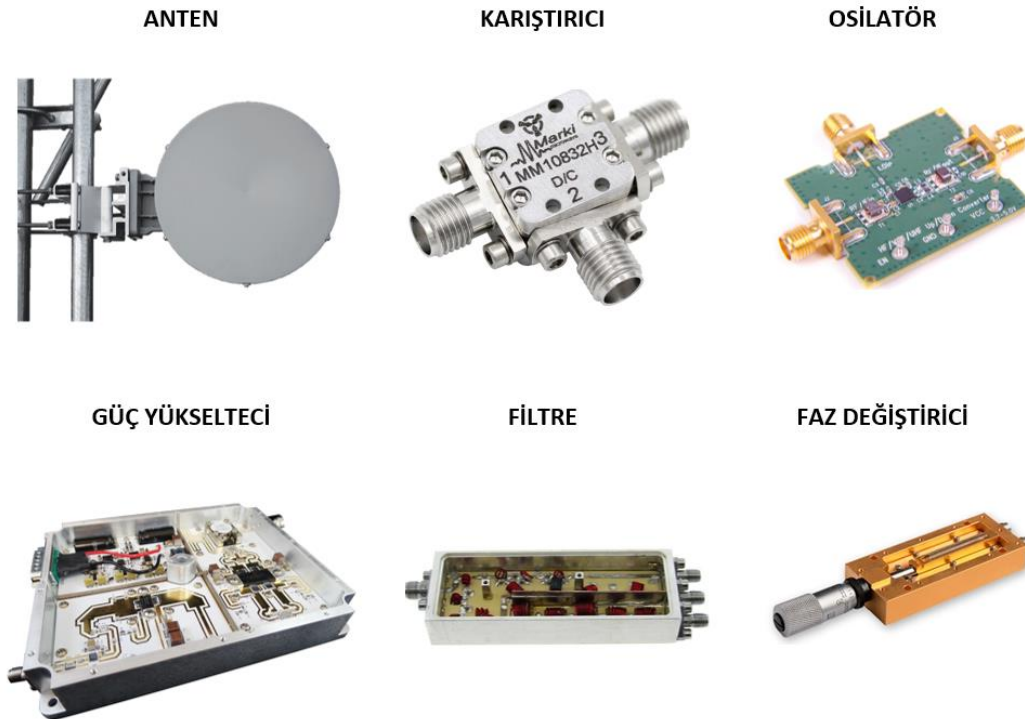
Günümüzde 5G haberleşme teknolojisi geliştirme aşamasında olduğundan yaygın bir kullanılabilirliği bulunmamaktadır. Bundan dolayı hibrit bir şekilde 4G ve 5G teknolojilerinin birlikte kullanılabildiği cihazlar görülmektedir. Kullanılan bu hibrit yapı, 4G teknolojisinin uzun mesafelerde haberleşebilme özelliğini kullanırken 5G teknolojisinin 4G'ye göre daha az gecikmesinde daha hızlı veri aktarım özelliğini kullanmaktadır. Ayrıca

bu hibrit yapının cihazlarda kullanılması 5G sinyalinin zayıf olduğu durumlarda otomatik olarak 4G ağına bağlamasına olanak sağlamaktadır. Bu şekilde bu hibrit yapıyı kullanan cihazlarda kesintisiz olarak veri aktarımı sağlanabilmektedir. 5G sinyallerinin desteklenmediği veya zayıf olduğu bölgelerde bu haberleşme teknolojisi daha da yaygın ve kullanılabilir hale geldikçe bu hibrit sistem 5G haberleşme için geçiş aşaması olarak da kullanılabilir olacaktır.

Kablosuz olarak veri aktarımı RF sinyaller ile taşınabilmektedir. Bu sinyallerin bir yerden başka bir yere aktarılması ve anlamlandırılabilmesi mikrodalga bileşenler ile mümkün kılınmaktadır. Bu bileşenler birçok frekans aralığında yüksek hızlı veri aktarımı için tasarlanmış ve kablosuz haberleşme imkânı sunan 4G ve 5G sistemlerde önemli bir yere sahiptir. Kullanılacak haberleşme sistemine ve işlevine göre birçok farklı tip ve özellikte mikrodalga bileşen bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bileşenlerin bazılarında aşağıda bahsedilmektedir.

- 1) **Anten:** Elektromanyetik enerjinin belirlenen şekilde etkili olarak yayılmasını sağlayan yapılara anten denir. Bu yapılar olmadan elektromanyetik enerji uzak mesafelere iletilemez ve bu sebeple kablosuz haberleşme imkânsız hale gelmektedir (Cheng D. K., 1989).
- 2) **Karıştırıcı:** İçerisinde doğrusal olmayan veya zamanla değişen bir eleman kullanılan 3 portlu bu cihaz kablosuz haberleşme sistemlerindeki frekans dönüştürme işlemini gerçekleştirmektedir. İdeal bir karıştırıcıda çıkış sinyallerinin frekansı, giriş sinyallerinin frekanslarının toplamı ve farkına eşit olmaktadır (Pozar , 2011).
- 3) **Osilatör:** RF ve mikrodalga osilatörleri, frekans sinyallerini dönüştürme ve taşıyıcı üretiminde sinyal kaynağı sağlamak amacıyla uzaktan algılama, radar sistemleri ve kablosuz haberleşmede kullanılmaktadır (Pozar , 2011).
- 4) **Güç yükselteci:** Güç yükselteçleri, radar ve radyo vericilerinin son aşamalarında yayılan güç seviyesini artırmak için kullanılır (Pozar , 2011).

- 5) **Filtre:** Mikrodalga filtre, haberleşme sisteminde belirli bir frekansın tepkisini kontrol etmek için kullanılan iki portlu bir bileşendir. Bu kontrol bir porttan diğer porta sinyalin iletimini veya sönümlenmesini sağlar. Filtrelerin kullanım alanı radar sistemleri, RF veya mikrodalga iletişimi ve test ölçüm sistemleridir (Pozar , 2011).
- 6) **Faz değıştirci:** Faz değıştirciler, sinyalin polarizasyon alanını değıştirerek faz kaydırma işlemini sağlayan iki portlu bileşenlerdir. En önemli kullanım alanlarından birisi elektronik olarak kontrol edilen faz kaydırıcılar ile faz dizili anten sistemleridir (Pozar , 2011).
- 7) **Dalga kılavuzu:** Dalga kılavuzları, temel olarak elektromanyetik enerjiyi bir bölgeden başka bir bölgeye taşımak için kullanılmaktadır. Genellikle içi boş metal tüplerden oluşan dalga kılavuzları, enerjiyi, ihtiyaç duyulan yere hassas bir şekilde yönlendirebilir, yüksek miktarda gücü işleyebilir ve filtre olarak işlev görebilmektedir (Antenna Theory, 2011).



Şekil 1.4 Mikrodalga bileşenleri

Bu bileşenler içerisinde haberleşme sistemlerinde en önemlilerinden birisi antenlerdir. Antenler, kablosuz olarak veri iletiminde sinyallerin havaya yayılımını veya yayılmış durumdaki sinyalin algılanmasını sağlamaktadır. Fiziksel olarak kablolu haberleşme, uzak mesafelerde çok zor veya imkânsız iken antenler sayesinde kablosuz olarak veri iletimi uzak mesafelerde kolayca gerçekleştirilebilmektedir. Kablolu haberleşmede aktarılan kaliteli veriye rağmen gün geçtikçe artan mesafeler ve maliyet etkenleri göz önünde bulundurularak, antenlerle yapılan kablosuz haberleşmenin kullanımı artmaktadır.

Anten kullanımındaki bu artış teknoloji ve bilimsel çalışmalarla yeni daha etkin antenlerin geliştirilmesine sebebiyet vermiştir. Uygulamadaki gereksinimine göre farklı yapıdaki anten tipleri seçilmekte ve tasarlanmaktadır. Kullanılacak alana göre anten tipleri; Tel Anten (Wire Antenna), Açıklık Anten (Aperture Antenna), Mikroşerit Anten (Microstrip Antenna), Dizi Anten (Array Antenna), Yansıtıcı Anten (Reflector Antenna) ve Lens Antenlerdir (Balanis, 2016).

Tel antenler, içerisinde uzun bir tel içererek sinyallerin yayılımını ve algılanmasını sağlar. İletilecek elektromanyetik sinyalin frekans ve yapısına göre çeşitli tel anten varyasyonları mevcuttur. Bu varyasyonlara dipol, döngü (loop) ve helix antenler örnek olarak verilebilir.

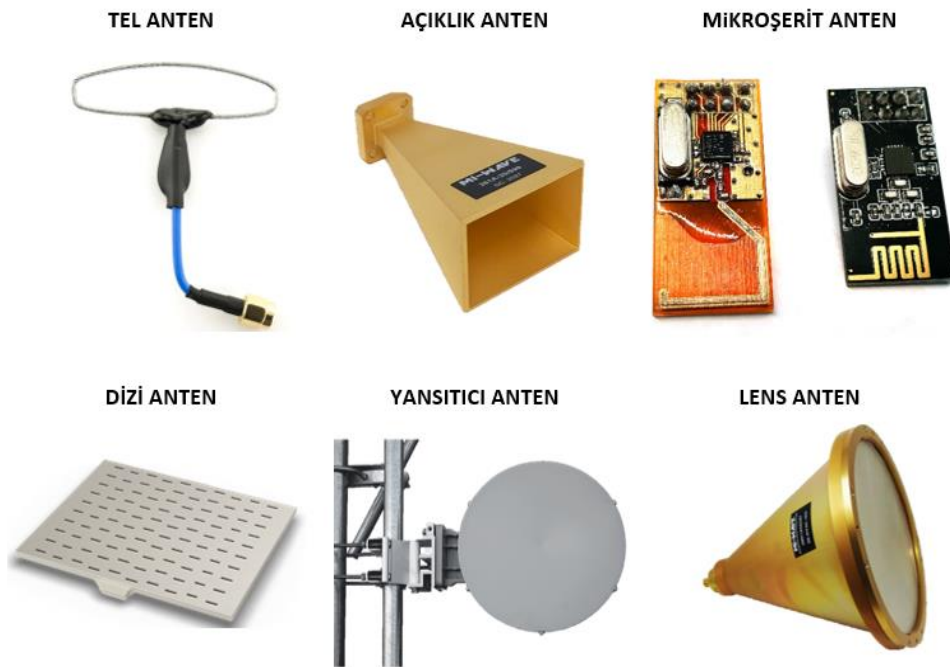
Açıklık (Aperture) antenler, mikrodalga frekanslarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. birçok farklı geometrik yapıda açıklık antenler mevcuttur. Bu anten tipleri, bir yüzeye monte edilerek uzay uygulamaları gibi uzak mesafe iletişimde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Kullanılacak sisteme göre açıklık antenler çevresel ve elektriksel korunma açısından kaplanabilmektedirler.

Günümüzde boyut, ağırlık, maliyet ve performans gibi birçok etmenden dolayı mikroşerit antenler sıklıkla tercih edilmektedirler. Baskı devre teknolojisinin de gelişmesi ile bu antenler düz veya düz olmayan yüzeylere kolaylıkla monte edilebilir. Ayrıca çalışma frekansı, polarizasyon ve empedans gibi anten özelliklerinin uyumlandırılmasında farklı teknolojilerin bu antenlere entegrasyonu kolaydır.

Hüzmeleme ve sinyal yoğunluğunun artırılması için dizi anten tasarımlarının önemi her geçen gün artmaktadır. Dizi antenler, içerisinde birçok küçük anten yapılarının bütünleşik bir şekilde olduğu antenlerdir. Bu sayede birden fazla antenin oluşturduğu dizi antenler, yüksek hüzmeleme kabiliyeti, yüksek performans ve yüksek kazanç gibi avantajlar sağlamaktadırlar.

Yansıtıcı antenler içerisinde bir besleme kaynağı ve bir tane de yansıtıcı materyal içermektedir. Bu yapı ile yayılması veya algılanması sağlanacak olan elektromanyetik sinyalin hüzme genişliği ve yönlendirilebilmesi daha iyi bir şekilde sağlanmaktadır. Günümüzde çoğunlukla uzay çalışmalarında kullanılsa da son kullanıcı çeşitli ürünlerde de reflektör anten görmek mümkündür.

Lenster yapı itibariyle dağılmış durumdaki enerjinin toplanmasını sağlamaktadırlar. Bu dağınık olan enerji kullanılacak alana göre farklı bir biçimlerde lenster aracılığıyla toplanabilmektedirler. Özellikle yüksek frekanslı sistemlerde parabolik reflektörlerle aynı uygulamalarda kullanılabilirler. Ancak boyut ve ağırlık gibi özellikler lens sistemlerinde frekans arttıkça dezavantaj oluşturabileceğinden kullanım alanları sınırlı olabilmektedir (Balanis, 2016).

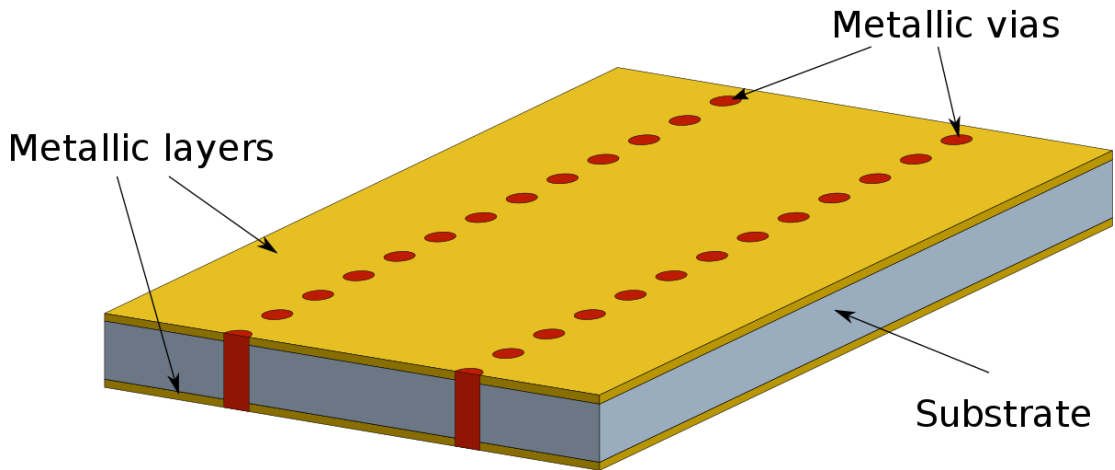


Şekil 1.5 Anten çeşitleri

Kablosuz haberleşme sistemlerinde iletilen sinyalin kalitesini, gücünü ve yayılabileceği mesafeyi artırmak için antenler vazgeçilmez bileşenlerdir. Bu doğrultuda haberleşme sisteminin gereksinim ve yapısına göre uygun anten tipinin seçilmesi kritiktir. Wi-Fi gibi kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan çift bantlı olarak çalışabilen antenler, haberleşme sistemlerinin gereksinimlerine göre anten seçiminin en iyi örneklerinden biridir.

Çift bantlı olarak çalışabilen antenler isminden de anlaşılacağı gibi belirlenen her iki frekansta yayın yapabilmektedir. Hibrit haberleşme sistemlerinde yer alan birbirinden farklı cihazların farklı frekanslarda iletişim kurması çift bantlı antenler vasıtasıyla sağlanır. Örneğin, Wi-Fi sistemlerinde kullanılan 5 GHz bandı daha hızlı veri aktarımı sağlarken 2.4 GHz bandı ise daha geniş bir kapsama alanına imkân sunmaktadır. Bu her iki bandın avantajları, çift bantlı anten kullanımı ile sağlanmaktadır.

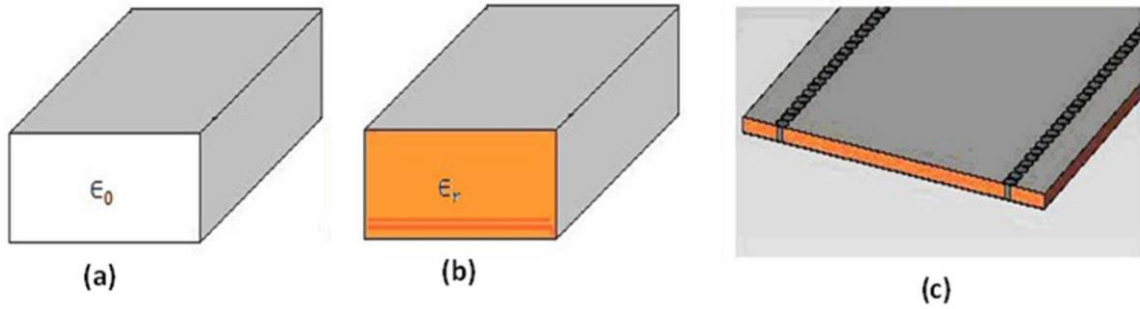
Gelişen teknoloji ile birlikte kablosuz haberleşme sistemlerinde çift bantlı antenin kullanımı birçok uygulamada yaygınlaşmıştır. Bu gelişme çift bantlı antenlerin tasarımında yenilikçi metotları ve teknolojileri beraberinde getirmiştir. Bu metotlar arasında kompakt ve maliyet etkin bir çözüm olduğu için Substrat Tümlşik Dalga Kılavuzu (SIW: Substrate Integrated Waveguide) metodu yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.6 SIW yapısı (Nwajana & Obi, 2022)

SIW yapısı mikrodalga ve RF sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Birçok uygulamada SIW yapısı kullanılırken mikroşerit devre ve antenlerde

uygulanabilirliği kolay olduğunda oldukça sık görülmektedir. Metal yapılardan oluşan SIW, alt tabakayı özel şekillerle üst tabakaya bağlamaktadır. Elektromanyetik dalgaları yönlendirerek ileten bu yapı yüksek verimlilikte iletimi gerçekleştirmektedir. Bu yapının RF ve mikrodalga sistem bileşenlerinden olan sensör, filtre, anten, karıştırıcı, osilatör, güç bölücü ve birleştirici ve çoklayıcı gibi yapılarda oldukça sık kullanılmaktadır. SIW yapısının bahsedilen yapılarda kullanılması birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Yüksek frekanslı sistemlerde kullanılan bileşenlerin birçok dezavantajı bulunmaktadır. Bunların başında maliyet, boyut, performans ve üretilebilirlik gibi kısıtlar gelmektedir (Nwajana & Obi, 2022). SIW, entegre edildikleri bileşenlere bahsedilen bu özellikleri kolay bir şekilde sağlayan yapılardır. SIW teknolojisini yapısının dikdörtgen dalga kılavuzuna nasıl entegre edilebileceği aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. SIW yapısı metalik silindirik yapılar (vias), bileşen içerisindeki iletken materyalleri birbirlerine bağlayarak etkin bir çözüm ortaya koymaktadır.



Şekil 1.7 Dikdörtgen dalga kılavuzunda SIW yapısı (Nwajana & Obi, 2022)

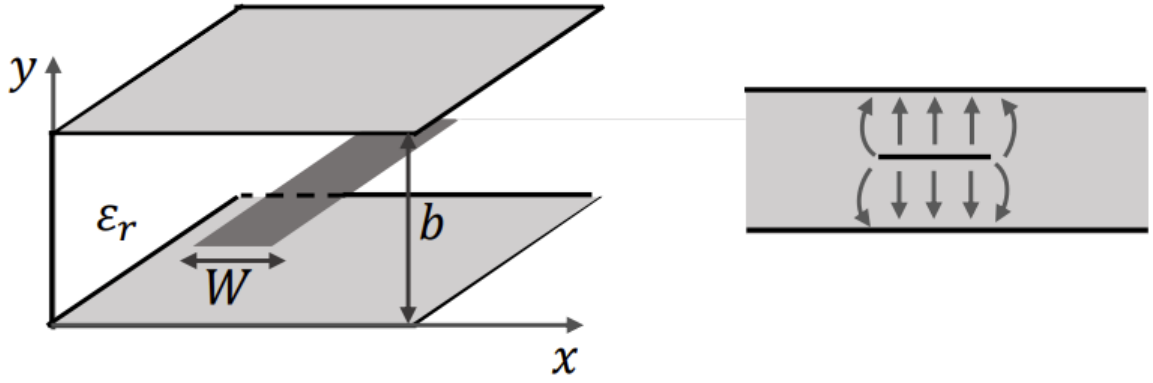
Bu çalışmada SIW teknolojisini mikroşerit antenlere entegrasyonu ile çift bantta çalışan anten tasarımı elde edilerek incelenmesi sağlanmıştır. 4G ve 5G frekans bantlarında ortak çalışabilecek bu anten SIW yapılarının da entegrasyonu ile boyut ve performans başta olacak şekilde birçok avantaj sağlanmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan anten 4G sistemlerinin kullandığı 2.6 GHz ve 5G sistemlerinin kullandığı 3.6 GHz bandında aynı anda çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda boyut, performans, çift bantta çalışabilirlik gibi konular çalışmada detaylı bir şekilde incelenerek avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Anten ve Dalga Kılavuzu Temelleri

Dalga kılavuzları, elektromanyetik dalgaların yayıldığı ve elektromanyetik dalgaların bir noktadan başka bir noktaya verimli bir şekilde iletildiği yapısal elemanlardır (Cheng D. K., 1989). Elektromanyetik sinyaller TE, TM ve TEM dalga yapılarında bulunabilmektedirler. TE dalgalarının, yayılma yönünde herhangi bir elektrik alan bileşeni bulunmamaktadır (Cheng D. K., 1989). TM dalgalarının ise herhangi bir manyetik alan bileşeni, sinyalin yayılma yönünde bulunmamaktadır (Cheng D. K., 1989). Sinyalin yayılma yönünde herhangi bir elektrik ve manyetik alan bileşeninin bulunmadığı dalga tipi TEM dalgalarıdır (Cheng D. K., 1989). Bu dalga tipleri, içerdiği özellikler itibariyle birçok farklı dalga kılavuzu ve iletim hatları ile bir yerden başka bir yere taşınmaktadırlar. Dikdörtgen plaka dalga kılavuzu ve paralel plaka dalga kılavuzu en bilinen tiplerden bazılarıdır. Ayrıca coaxial iletim hattı gibi yapılarla da sinyal transferi sağlanabilmektedir.

Elektromanyetik sinyaller bir yerden başka bir yere iletim hatları sayesinde taşınmaktadır. Böylece RF ve mikrodalga cihaz tasarımlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Birçok iletim hattı tipi bulunurken şerit ve mikro şerit iletim hatları en yaygın olanlarıdır. İletim hatlarında sıklıkla kullanılan tiplerden birisi şerit hatlardır. Şerit iletim hatları, düzlemsel bir iletim hattı türü olup küçültme ve fotolitografik üretimleri kolaydır (Pozar , 2011). Pratikte topraklanmış dielektrik alt tabakaya kazıma ile ve daha sonrasında başka bir topraklanmış alt tabaka ile kaplanarak oluşturulmaktadırlar (Pozar , 2011). TEM dalgalarını desteklerler (Pozar , 2011). Yüksek mertebedeki dalga kılavuzu modlarını da destekleyebilirler. Şekil 2.1’de şerit iletim hattı dalga kılavuzu örneği ve analiz için gerekli fonksiyonlar denklem 2.1, 2.2 ve 2.3’te verilmektedir. Belirtilen formüllerde β simgesi yayılma sabitini, v_p faz hızını, Z_0 ise karakteristik empedansı ifade etmektedir.



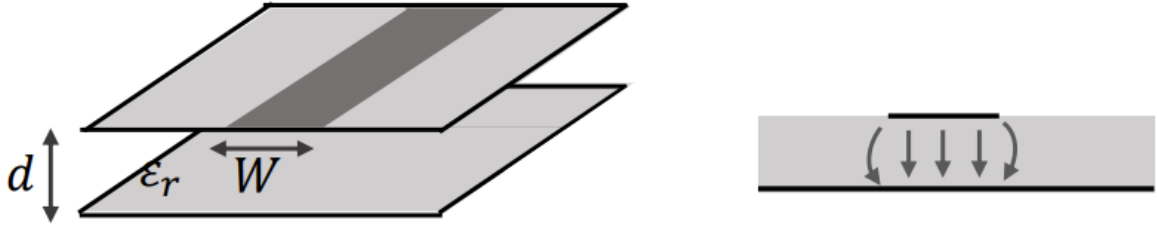
Şekil 2.1 Şerit iletim hattı (Pozar , 2011)

$$\beta = k = w\sqrt{\epsilon_r\epsilon_0\mu_0} = \sqrt{\epsilon_r\mu_0} \quad (2.1)$$

$$v_p = \frac{w}{\beta} = \frac{wc_0}{w\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{v_p C} \quad (2.3)$$

Mikro şerit hatlar, elektromanyetik sinyallerin iletiminde sıklıkla karşılaşılan bir bileşendir. Fotolitografik süreçler ile üretilebilmeleri, aktif ve pasif mikrodalga cihazlarla kolayca küçültülebilmeleri ve kolay entegrasyonları, iletim hatlarında sıklıkla kullanılmalarını sağlamaktadır (Pozar , 2011). Bu iletim hatlarında homojen bir dielektrik alan bulunmamaktadır. Mikro şerit hatların bir kısmı şerit iletken ile toprak düzlemi arasında dielektrik bölgede ve bir kısmı da substratın üzerinde hava bölgesinde olduğundan TEM dalgaları desteklenemez. Dielektrik tabakanın da elektriksel olarak çok ince olması gibi nedenlerle quasi-TEM dalgaları mikro şerit hatlar tarafından desteklenmektedirler. Şekil 2.2’de yer alan görselde bir mikro şerit iletim hattı örneği verilmektedir. Ayrıca analiz için gerekli denklemler denklemler 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7’de yer almaktadır. Denklemlerde kullanılan ϵ_e efektif elektrik geçirgenliği ifade etmektedir.



Şekil 2.2 Mikro şerit iletim hattı (Pozar , 2011)

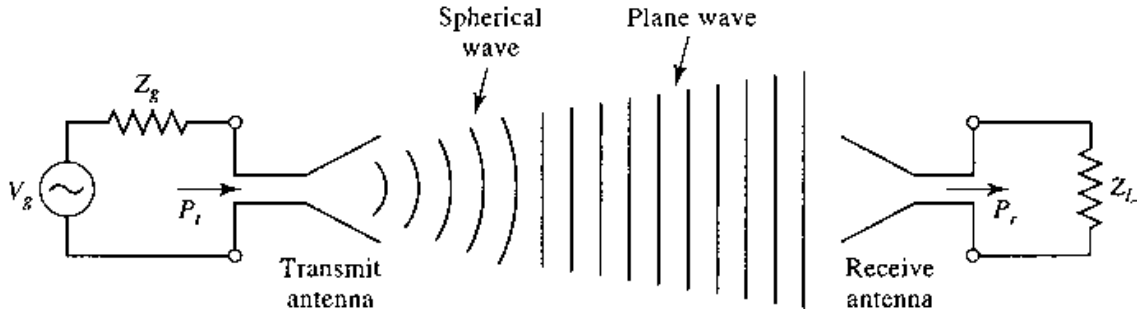
$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (2.4)$$

$$v_p = \frac{w}{\beta} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}} \quad (2.6)$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & \text{for } \frac{W}{d} < 1 \\ \sqrt{\epsilon_e} \left[\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.444 \right) \right] & \text{for } \frac{W}{d} > 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

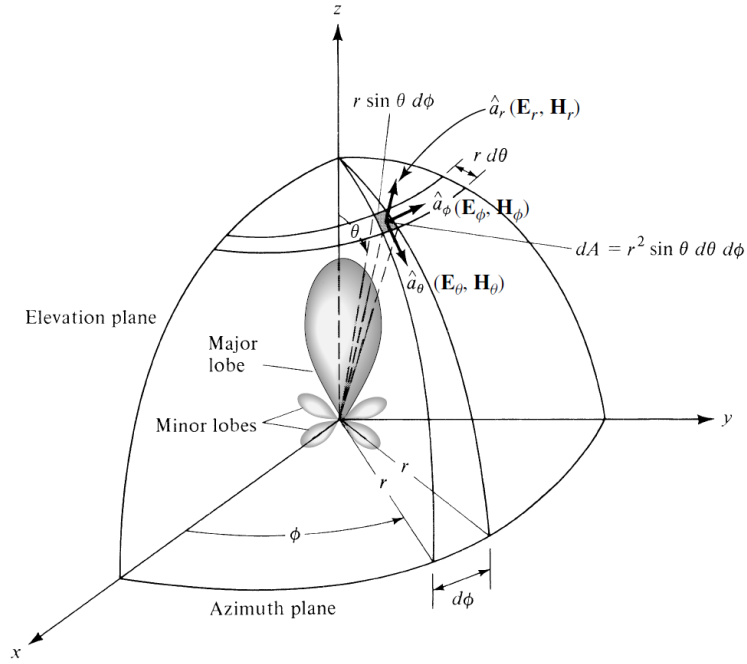
Antenler, elektromanyetik enerjiyi etkili olarak belirli bir şekilde yayma amacıyla tasarlanmış yapılardır (Cheng D. K., 1989). Kablosuz haberleşme ve radar sistemlerinin önemli bir bileşeni olan antenler, alıcı ve verici olmak üzere çift yönlüdür. Verici antenler, bir iletim hattındaki yönlendirilmiş elektromanyetik dalgayı, serbest uzayda yayılan düzlemsel dalgaya dönüştüren bir cihazdır (Pozar , 2011). Alıcı antenler ise, serbest uzayda yayılmış şekilde bulunan düzlemsel dalganın bir yakalayıp iletim hattına aktaran bir cihaz olarak nitelendirilebilir (Pozar , 2011). Kablosuz sistemlerde alıcı ve verici antenler ayrı ayrı kullanılacağı gibi aynı anten hem alıcı hem de verici işlevi görebilmektedir. Şekil 2.3’de yer alan görselde alıcı ve verici antenlerin temel işleyişi basit bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Alıcı ve verici antenlerin temel işleyişi (Pozar , 2011)

Antenin performansını ve karakteristik davranışını tanımlamak için spesifik parametreler mevcuttur. Bu parametrelerden aşağıda bahsedilmektedir.

- 1) **Işıma deseni:** Bir anten ışıma deseni koordinatlara bağlı olarak antenin ışıma özelliklerinin matematiksel bir fonksiyonu veya grafiksel bir temsili olarak tanımlanır. Genellikle ışıma deseni, uzak alan bölgesinde belirlenir ve yönelim koordinatlarına bağlı bir fonksiyon olarak temsil edilmektedir. Işıma özellikleri, güç akısı yoğunluğunu, ışıma yoğunluğunu, alan kuvvetini, yönlülüğü, fazı veya polarizasyonu içermektedir. En çok ilgilenilen ışıma özelliği ise yüzey boyunca gözlemcinin konumuna bağlı olarak yayılan enerjinin iki veya üç boyutlu dağılımıdır. Bu özellik için uygun koordinat şekli Şekil 2.4’de gösterilmektedir. Sabit bir yarıçap boyunca manyetik alanın izi, genlik alan deseni olarak adlandırılır. Eğer sabit bir yarıçap boyunca güç yoğunluğunun değişim deseni elde edilirse, bu desene genlik güç deseni denir (Balanis, 2016).



Şekil 2.4 Işıma deseni (Balanis, 2016)

- 2) **Işıma güç yoğunluğu:** Elektromanyetik dalgalar, veriyi kablosuz bir ortam veya yapı aracılığıyla bir noktadan diğerine taşımak için kullanılır. Bu sebeple güç ve enerjinin elektromanyetik alanlarla ilişkili olması doğal bir sonuç haline gelmektedir. Bir elektromanyetik dalga ile ilişkili gücü tanımlamak için kullanılan miktar, aşağıdaki formül ile hesaplanan anlık Poynting vektörüdür ve W simgesi ile ifade edilmektedir (Balanis, 2016). Formülde yer alan E anlık elektrik alan yoğunluğunu ifade ederken, H anlık manyetik alan yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$W = E \times H^* \quad (2.8)$$

Poynting vektörü bir güç yoğunluğu olduğundan, kapalı bir yüzeyden geçen toplam güç, Poynting vektörünün normal bileşeninin tüm yüzey üzerinde integrali alınarak elde edilebilir (Balanis, 2016). Denklem 2.9'da yer alan P simgesi anlık toplam gücü, \hat{n} yüzeye dik birim vektörü, da kapalı yüzeyin sonsuz küçük alanını ifade etmektedir.

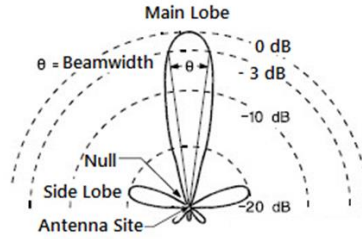
$$P = \oint_S W \cdot ds = \oint_S W \cdot \hat{n} da \quad (2.9)$$

Antenler kullanılacak sistemin gereksinimlerine göre farklı tiplerde olabilirler. Temel olarak anten tiplerine tel, açıklık, mikro şerit, reflektör ve dizi antenler örnek verilebilir (Balanis, 2016).

- 3) **Işıma şiddeti:** Belirli bir yöndeki birim açı başına bir antenden yayılan güce ışınım şiddeti denir. Bu parametre uzak alan bölgesindeki ışınım ile ölçülür ve aşağıdaki matematiksel formül ile elde edilir (Balanis, 2016). U simgesi ışınım şiddetini, W_{rad} ışınım yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.10)$$

- 4) **Hüzme genişliği:** Hüzme genişliği, antende gücün çoğunun yayıldığı bölgesi olan ana hüzmeyin açısal açıklığıdır (Balanis, 2016). Aşağıda hüzme genişliğinin gösterildiği görsel yer almaktadır.



Şekil 2.5 Hüzme genişliği (Balanis, 2016)

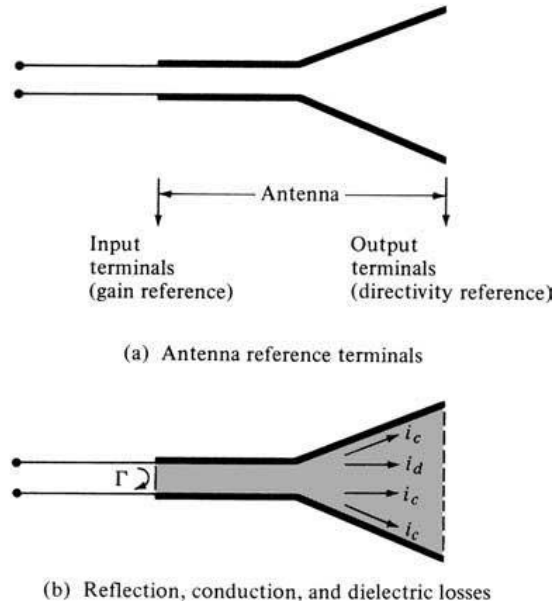
- 5) **Yönlülük:** Bir antenin yönlülüğü belirli bir yöndeki ışınım şiddetinin, tüm yönlerdeki ortalama ışınım şiddetine oranı olarak tanımlanmaktadır. (Balanis, 2016). Yönlerin belirtilmediği durumlarda maksimum ışınım şiddetinin olduğu yön baz alınmaktadır. (Balanis, 2016). Matematiksel olarak aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır. D simgesi yönlülüğü, D_0 simgesi maximum yönlülüğü, U simgesi ışınım şiddetini, U_{max} simgesi maximum ışınım şiddetini, U_0 simgesi izotropik kaynak durumunda ışınım şiddetini ve P_{rad} ise gücü ifade etmektedir.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.11)$$

Belirli bir yönün belirtilmediği durumda ise;

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.12)$$

6) **Verimlilik:** Bir antenle ilişkilendirilen verimlilik aşağıdaki şekil üzerinden tanımlanabilmektedir.



Şekil 2.6 Verimlilik a) Anten terminalindeki b) Yansıma, iletim ve dielektrik kayıpları (Balanis, 2016)

Toplam verimlilik ise e_0 olarak adlandırılmaktadır. Girişteki ve anten yapısı içindeki kayıplar hesaba katılarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Balanis, 2016). e_r simgesi uyumsuzluktan kaynaklı yansımanın etkisini, e_d dielektrik etkisini, Γ yansıma katsayısını ve Z_{in} anten giriş empedansını ifade etmektedir.

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.13)$$

7) **Kazanç:** Bir antenin performansını açıklayan bir başka açıklayıcı ölçü de kazançtır. Antenin kazancı yönlülük ile yakından ilişkili olmakla birlikte, antenin yön kabiliyeti kadar verimini de dikkate alan bir parametredir. Bu parametre, belirli bir yöndeki ışınma

şiddetinin, antenin toplam giriş gücüne oranı ile bulunmaktadır (Balanis, 2016). Denklem 2.14'de matematiksel formülü yer almaktadır.

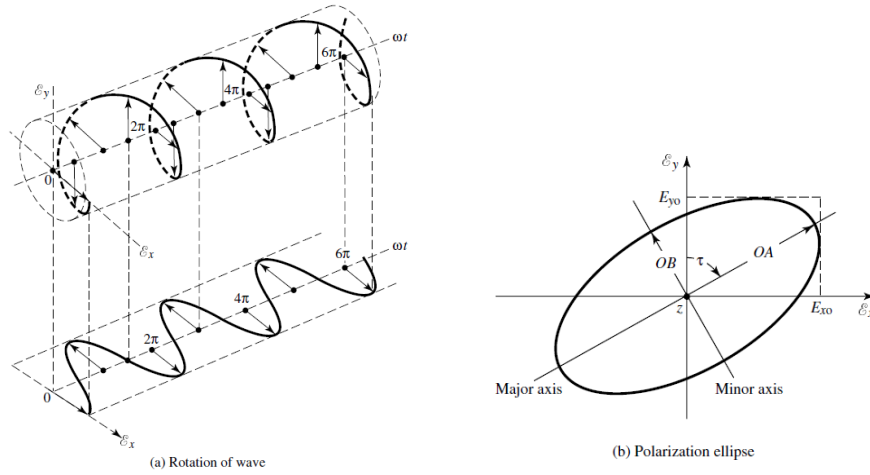
$$\begin{aligned} Gain &= 4\pi \frac{\text{Işıma Şiddeti}}{\text{Toplam Giriş Gücü}} \\ &= 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \text{ (boyutsuz)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

- 8) **Hüzme verimliliği:** Verici ve alıcı antenlerin kalitesini ölçebilen bir diğer parametre hüzme verimliliğidir. 4. Maddede belirtilen resimde gösterildiği gibi, ana lobu z-ekseni ($\theta = 0$) boyunca yönlendirilmiş bir anten için hüzme verimliliği (BE) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$BE = 4\pi \frac{\theta_1 \text{ açısı ile iletilen güç}}{\text{Anten tarafından iletilen güç}} \quad (2.15)$$

$$BE = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi} \text{ (boyutsuz)} \quad (2.16)$$

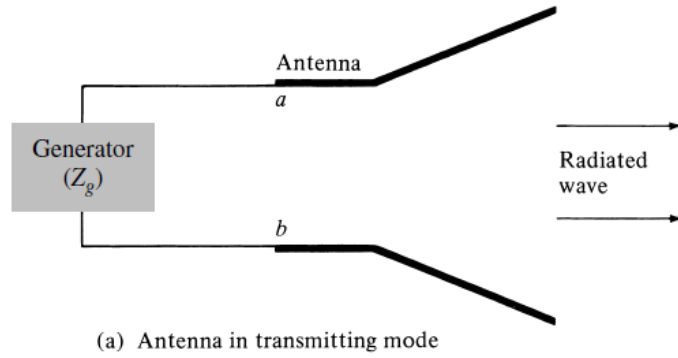
- 9) **Polarizasyon:** Yayılanın sinyalin polarizasyonu, bir elektromanyetik dalganın, elektrik alan vektörünün zamanla değişen yönünü ve göreceli büyüklüğünü tanımlayan özelliktir. Polarizasyon anlık elektrik alanı temsil eden vektörün bitiş noktası tarafından izlenen eğrisidir. Zamanın bir fonksiyonu olarak tipik izlenen eğri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Balanis, 2016).



Şekil 2.7 Polarizasyon (Balanis, 2016)

10) **Bant genişliği:** Bir antenin bant genişliği, antenin önemli performans parametrelerinin standart olarak belirlenmiş sınırlar içinde kaldığı frekans aralığı olarak tanımlanmaktadır (Balanis, 2016). Geniş bant antenlerde, bant genişliği genellikle standartlarda kabul edilebilir özelliklerin üst-alt frekanslarının oranı olarak ifade edilir. Örneğin, 10:1 bant genişliği, üst frekansın alt frekanstan 10 kat daha büyük olduğunu ifade etmektedir. Dar bant antenler için ise, bant genişliğinin merkez frekansı üzerinden frekans farkının (üst frekans – alt frekans) yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin, %5'lik bir bant genişliği, standartlarda kabul edilebilir özelliklerin frekans farkının, bant genişliğinin merkez frekansının %5'i olduğunu göstermektedir.

11) **Giriş empedansı:** Bir anten tarafından terminallerinde sunulan empedans veya bir çift terminalde voltajın akıma oranı veya bir noktadaki uygun elektrik bileşenlerinin manyetik alanlara oranı giriş empedansı olarak tanımlanmaktadır (Balanis, 2016). Aşağıdaki resimde gösterilmiş olan a-b terminallerindeki gerilim akıma oranı, antenin giriş empedansı vermektedir. Z_A simgesi anten terminallerindeki empedansı R_A ise anten terminallerindeki direnci ve X_A anten terminallerindeki reaktansı ifade etmektedir.



Şekil 2.8 Giriş empedansı (Balanis, 2016)

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.17)$$

12) **İşıma verimliliği:** Bir antenin iletim ve dielektrik kayıplarını teoride hesaplamak zor olduğu için, ışıma verimliliği genellikle ölçüm sonuçları ile elde edilmektedir. Bu sonuçların temeli denklem 2.18'e dayanmaktadır (Balanis, 2016). e_{cd} ışıma verimliliğini ifade etmektedir.

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_L + R_r} \right] \quad (2.18)$$

Tel antenler, doğrusal veya kavisli bir biçimde olacak şekilde, birçok uygulama için en eski, basit, ucuz ve birçok durumda çok yönlü olarak kullanılabilirler. Doğrusal tel antenler sonsuz küçük dipol (Infinitesimal Dipole), küçük dipol (Small Dipole), sonlu uzunlukta dipol (Finite Length) ve yarım dalga boyu dipol (Half-Wavelength Dipole) gibi yapılarda bulunabilirler (Balanis, 2016).

Anten uzunluğunun dalga boyuna göre çok küçük olduğu bu anten çeşidine sonsuz küçük dipol adı verilir. Sonsuz küçük dipoller pratikte pek kullanışlı değildir, ancak kondansatör plakası antenlerin temsil edilmesinde kullanılırlar (Balanis, 2016). Ayrıca bu antenlerin kalınlıkları dalga boyuna göre çok küçüktürler. Ek olarak bu anten tipleri daha karmaşık geometrilerin yapı taşı olarak da kullanılabilirler. Şekil 2.9'da sonsuz küçük dipol anten örneği yer almaktadır. Uzak alan için küresel koordinatlardaki elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$E_r = 0 \quad (2.19)$$

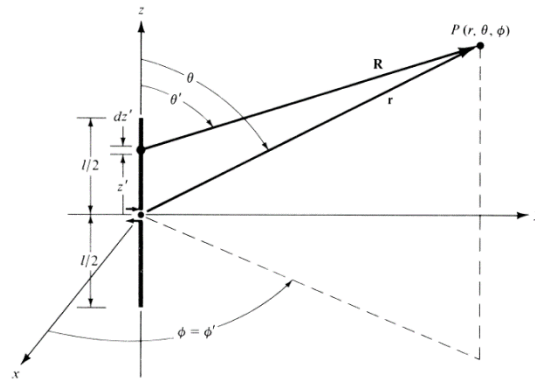
$$E_\theta = j\eta \frac{kl_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (2.20)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.21)$$

$$H_r = 0 \quad (2.22)$$

$$H_\theta = 0 \quad (2.23)$$

$$H_\phi = j \frac{kl_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (2.24)$$



Şekil 2.9 Sonsuz küçük dipol anten (Balanis, 2016)

Uzunluğu genellikle $\lambda/50 < l \leq \lambda/10$ arısında olan yapılar küçük dipol antenler olarak nitelendirilir (Balanis, 2016). Sonsuz küçük dipol antenlere göre daha kullanışlı olan küçük dipoller bir örneği Şekil 2.10'da yer almaktadır. Uzak alan için küresel koordinatlardaki elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$E_r \cong 0 \quad (2.25)$$

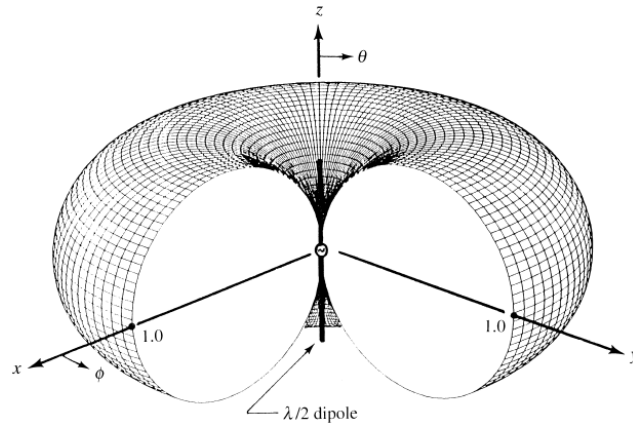
$$E_\theta = j\eta \frac{kl_0 l e^{-jkr}}{8\pi r} \sin \theta \quad (2.26)$$

$$E_{\phi} \cong 0 \quad (2.27)$$

$$H_r = 0 \quad (2.28)$$

$$H_{\theta} = 0 \quad (2.29)$$

$$H_{\phi} = j \frac{kl_0 l e^{-jkr}}{8\pi r} \sin \theta \quad (2.30)$$



Şekil 2.10 Küçük dipol anten (Balanis, 2016)

Kullanımı oldukça yaygın olan yarım dalga boyu dipoller, uzunluğun dalga boyunun yarısına eşit olan anten tipleridir. Yayılım empedanslarının 73 ohm değerine eşit olduğundan iletim hatlarına kolayca entegre edilebilirler ve empedans uyumlanmaları kolaydır (Balanis, 2016). Şekil 2.11’de anten görseli yer almaktadır. Uzak alan için küresel koordinatlardaki elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$E_r \cong 0 \quad (2.31)$$

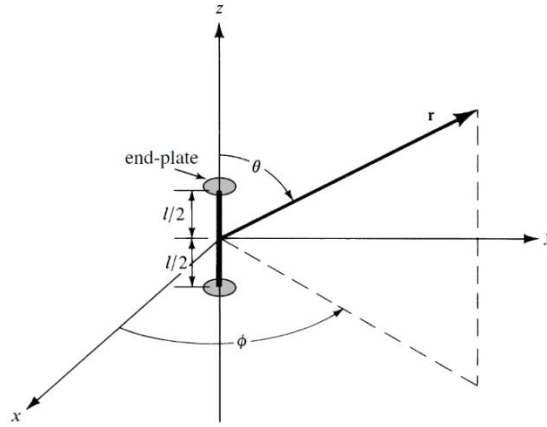
$$E_{\theta} \cong j\eta \frac{l_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.32)$$

$$E_{\phi} \cong 0 \quad (2.33)$$

$$H_r = 0 \quad (2.34)$$

$$H_\theta = 0 \quad (2.35)$$

$$H_\phi \cong j \frac{l_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.36)$$



Şekil 2.11 Yarım dalga boyu dipol anten (Balanis, 2016)

Açıklık antenler, mikrodalga frekanslarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Yapılarına göre birçok tipte açıklık anten bulunabilir. Açıklık anten tiplerinden bazıları aşağıdaki görselde verilmektedir. Dikdörtgen ve dairesel açıklık antenler oldukça sık kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.12 Açıklık antenler (Balanis, 2016)

Dikdörtgen açıklık antenler mikrodalga uygulamalarda en yaygın kullanılan antenlerdir. Konfigürasyonları nedeniyle, dikdörtgen koordinat sistemi, açıklıktaki alanı belirleme ve entegrasyonu için en uygun sistemdir (Balanis, 2016). Uzak alan için küresel koordinatlardaki elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri denklem 2.37, 2.38, 2.39, 2.40, 2.41, 2.42 ve 2.43'de hesaplanmaktadır. Ayrıca Şekil 2.13'de bu yapıya ait görsel yer almaktadır.

$$E_r \cong 0 \quad (2.37)$$

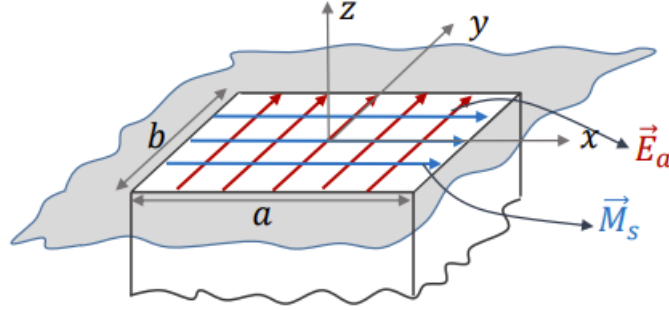
$$E_\theta \cong j\eta \frac{l_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.38)$$

$$E_\phi \cong 0 \quad (2.40)$$

$$H_r = 0 \quad (2.41)$$

$$H_\theta = 0 \quad (2.42)$$

$$H_{\phi} \cong j \frac{l_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.43)$$



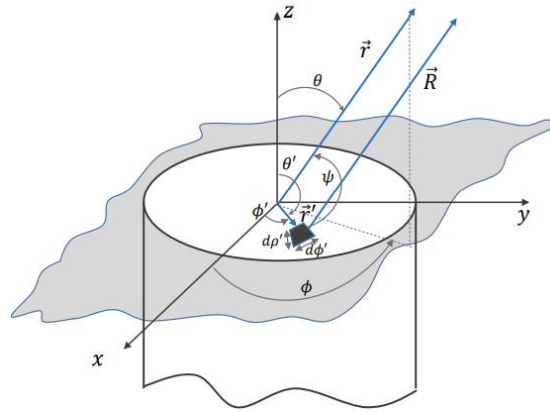
Şekil 2.13 Dikdörtgen açıklık anten (Balanis, 2016)

Dairesel açıklık antenler mikrodalga uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yaygın kullanımın en önemli sebeplerinden biri kolay üretilebilmeleridir (Balanis, 2016). Ayrıca, açıklık üzerinde olabilen tüm modlar kapalı bir form biçiminde elde edilebilmektedir. Denklem 2.44, 2.45 ve 2.46'da elektrik alan formülleri yer almaktadır. Şekil 2.14'de dairesel açıklık anten örneği yer almaktadır.

$$E_r \cong 0 \quad (2.44)$$

$$E_{\theta} \cong j\eta \frac{l_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.45)$$

$$E_{\phi} \cong 0 \quad (2.46)$$



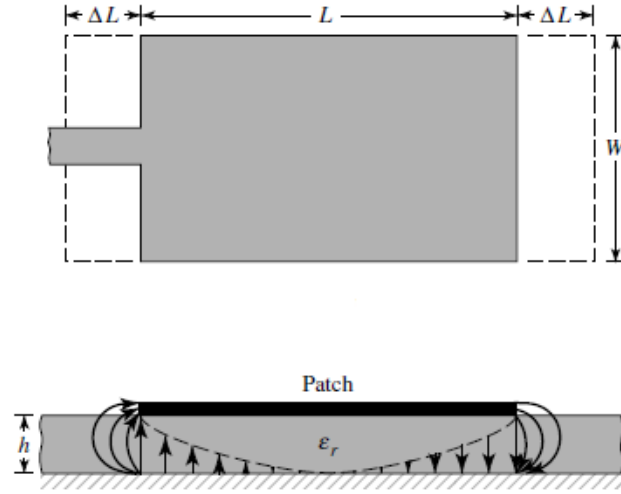
Şekil 2.14 Dairesel açıklık anten (Balanis, 2016)

Düzlemsel ve düz olmayan yüzeylere kolaylıkla entegre edilebilen mikro şerit antenler, kablosuz iletişim sistemleri, uydu, uzay, uçak ve füze uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar (Balanis, 2016). Bu anten tipinin sıklıkla tercih edilmesini sağlayan birçok özelliği bulunmaktadır. Düşük profilli, modern baskı devre teknolojisi kullanılarak basit ve ucuz üretilebilir olması mekanik sağlamlık ve MMIC tasarımlarına uyumlu olması bu özelliklerden bazılarıdır (Balanis, 2016). Ayrıca çalışma frekansı, polarizasyon, desen ve empedans açısından da entegre edildikleri sisteme birçok avantaj sağlamaktadırlar (Balanis, 2016). Bu anten tipinin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da mevcuttur. Çok dar frekans genişliğine sahip olmaları, düşük güç, düşük verimlilik ve zayıf polarizasyon saflığı gibi durumlar mikro şerit antenlerin dezavantajları olarak sıralanabilir (Balanis, 2016). Birçok şekilde mikro şerit antenler ile karşılaşılabilmekte olup temelde dikdörtgen ve dairesel mikro şerit anten olmak üzere iki tiptedir.

Dikdörtgen mikro şerit antenler en yaygın kullanılan konfigürasyondur. Doğru iletim hattı ile beslenildiğinde kolaylıkla analiz edilebilmektedirler. Bu anten tipi mikro şerit hat, koaksiyel besleme, açıklık ve yakınlık kuplajı gibi farklı besleme teknikleri ile kullanılmaktadır. Aşağıdaki görselde dikdörtgen mikro şerit anten örneği yer almaktadır (Balanis, 2016). Tasarlanacak olan antenin uygun frekans ve geri yansıma kaybı için şerit antenin uzunluğu (L), genişliği (W) denklem 2.47 ve 2.48'deki formüller ile hesaplanmaktadır.

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.47)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.48)$$

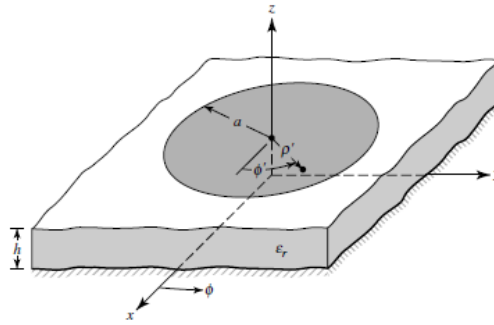


Şekil 2.15 Dikdörtgen mikro şerit anten (Balanis, 2016)

Dikdörtgen mikro şerit antenlerden sonra yaygın bir şekilde kullanılan bir diğer anten tipi dairesel mikro şerit antenlerdir. Bu anten tipleri yama kısmı dairesel şekildedir. Bu anten tipinin örneği Şekil 2.16'da ve tasarımı için gerekli fonksiyonlar denklem 2.49 ve 2.50'de verilmektedir. a simgesi dairesel mikro şerit antenin yarıçapını ifade ederken, F simgesi dielektrik sabiti ve çalışma frekansına göre değişim sağlayan bir sabiti ifade etmektedir.

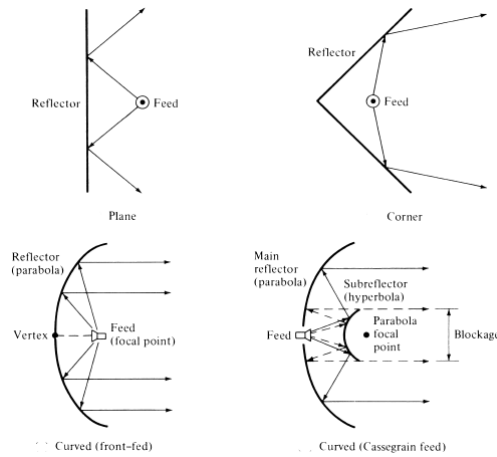
$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (2.49)$$

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.50)$$



Şekil 2.16 Dairesel mikro şerit anten (Balanis, 2016)

Sinyallerin uzak mesafelere iletilmesi, anten tiplerinin geliştirilmesine ve reflektör antenlerin kullanılmasına sebep olmuştur. Özellikle uzay ve uydu sistemlerinde sıklıkla kullanılan bu anten tipi, yansıtıcı yüzeyler eklenerek sinyallerin çok uzak bölgelere iletimini sağlamaktadır. Birçok yansıtıcı çeşidi bu anten tipinde kullanılmaktadır. Yaygın olarak düzlemsel, köşeli, kavisli ve Cassegrain yansıtıcı antenler çeşitli sistemlerde kullanılmaktadır.



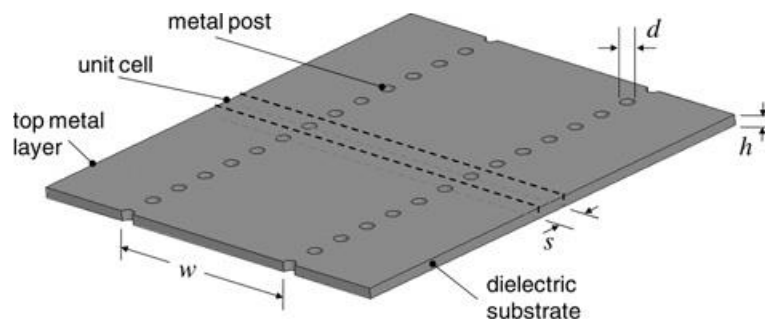
Şekil 2.17 Reflektör anten (Balanis, 2016)

2.2. SIW Teknolojisi ve Anten Tasarımdaki Yeri

İhtiyaçların değişip artmasıyla kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan bileşenlerin de geliştirilmesi gerekmektedir. RF ve mikrodalga uygulamalarda birçok gereksinim bileşenlerin iyileştirilmesi ile sağlanabilmektedir. Tasarlanacak sistemlerin ve bu sistemleri oluşturan bileşenlerin seri üretime uygunluğu, düşük maliyetli ve etkin çözüm olabilmeleri ciddi bir başarı kriteridir (Bozzi vd. 2011). Ayrıca boyut olarak da en iyi

çözümler, oluşturulacak sisteme kompakt bir yapı sunması günümüzde de ciddi bir ister haline gelmektedir (Bozzi vd. 2011). Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda RF ve mikrodalga tabanlı kablosuz sistemlerin başarılı olabilmeleri için, tasarlanacak sistemin performansı yüksek, maliyeti az ve güvenilir bir yapı oluşturulması gerekmektedir (Bozzi vd. 2011).

Tasarlanacak RF ve mikrodalga bileşenlerin belirtilen özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılan “Substrat Tümlşik Dalga Kılavuzu” teknolojisi yaygın bir şekilde görülmektedir. SIW, paralel iki metal levhayı elektriksel olarak birbirine bağlayan, bir dielektrik alt tabakaya gömülü, iki sıra iletken silindir veya yarık kullanılarak üretilen entegre dalga kılavuzu benzeri yapılardır. Aşağıdaki resimde örnek bir SIW yapısı gösterilmektedir. Bu yapının entegrasyonu ile düzlemsel olmayan dalga kılavuzları uyumlu düzlemsel biçimde yapılabilmektedir (Bozzi vd. 2011).



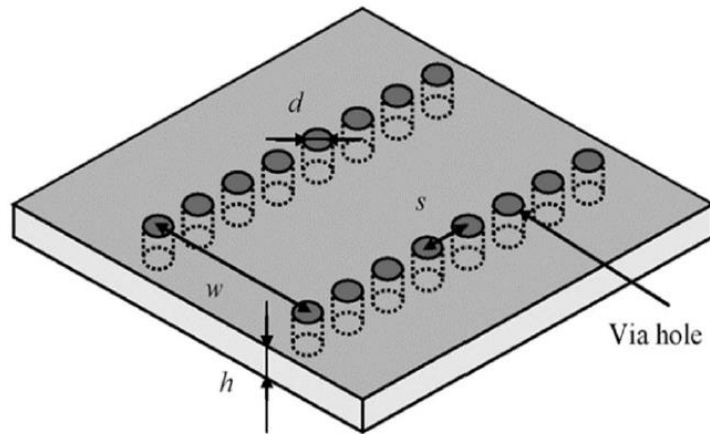
Şekil 2.18 SIW yapısı (Bozzi vd. 2011)

SIW yapıları, elektromanyetik sinyallerin elektrik ve manyetik alan ve sinyal yayılım özellikleri dahil klasik dikdörtgenel dalga kılavuzlarına benzer özelliktedirler (Bozzi vd. 2011). Ayrıca SIW yapıları, geleneksel metalik dalga kılavuzlarının çoğu avantajını korumaktadır. Yüksek kalite faktörü ve yüksek güç taşıma kapasitesine sahip olurken aynı zamanda kendi kendini koruyan bir elektriksel yapı, koruduğu özelliklerinden bazılarıdır (Bozzi vd. 2011). Bu teknolojinin en önemli avantajlarından bir diğeri ise pasif bileşenler, aktif elemanlar ve antenler gibi birçok RF ve mikrodalga bileşenlere aynı tabaka üzerinde entegre olabilme özelliğidir (Bozzi vd. 2011). Ayrıca, aynı alt tabaka üzerine bir veya birden fazla yonga seti monte edilebilme olasılığı da vardır (Bozzi vd. 2011). Farklı teknolojilerle üretilmiş elemanlar arasında geçişe gerek olmadığından kayıp ve parazitlerde SIW yapısı sayesinde azalmalar bulunmaktadır (Bozzi vd. 2011). Bu sayede SiP yapısı yerine SoS

yapıları ortaya çıkmaktadır (Wu, 2006). SoS, uygun maliyetli, üretimi kolay ve yüksek performanslı RF, mikrodalga ve milimetre dalga tabanlı sistemlerin geliştirilmesinde ideal bir platformdur (Bozzi vd. 2011).

Anten dizilerini beslemede kullanılan hatlar için “laminated waveguide” veya “post-wall waveguide” adıyla tasarlanıp geliştirilen SIW teknolojisi, birçok mikrodalga bileşene entegre edilmektedir (Hirokawa & Ando, 1998 ; Uchimura vd. 1998). Osilatörler, güç yükselteçleri, antenle, circulatorler ve filtreler örnek olarak verilebilmektedir (Bozzi ve diğerleri, 2011). SIW bileşenleri bazı istisnalar haricinde 30 GHz’e kadar çalışma gösterebilmektedir (Hirokawa & Ando, 2000 ; Choi vd. 2004 ; Stephens vd. 2005 ; Moldovan vd. 2006). Bu özellikleri, SIW bileşenlerinin fiziksel kısıtlamalarından değil, mm dalga aralığında SIW yapılarının tasarlanması ve üretilmesinde karşılaşılan artan teknolojik zorluklardan, yani minyatür boyutlar, daha yüksek kayıplar ve malzemeyi dikkatli bir şekilde seçme ihtiyacından kaynaklanmaktadır (Bozzi vd. 2011). SIW teknolojisi bu sayede halen geliştirilmekte ve RF ve mikrodalga uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar.

SIW yapısı, aşağıdaki şekilde de gösterildiği üzere iletken plakalar olarak işlev gören üst ve alt duvarlara sahip dielektrik bir alt tabakaya yerleştirilmiş iki sıra metalik silindirik yapılardan oluşmaktadır (Aparna vd. 2022).



Şekil 2.19 Metalik silindirik yapıların yerleştirilmesi (Aparna vd. 2022)

İki sıradan oluşan silindirik yapılar SIW yapısının dar duvarları olarak davranır. Geleneksel Dikdörtgen Dalga Kılavuzu yapısının çoğu avantajı SIW yapısında korunmaktadır. Sınır İntegral Rezonans Modu Genişletmesi (Boundary Integral Resonant Mode Expansion) yöntemi ve Floquet teoremi, SIW yapısının dağılım özelliklerini

incelemek ve etkili genişliğin geleneksel RWG ile eşit olduğu varsayımıyla SIW'nin geleneksel RWG ile benzer dağılım özelliklerine sahip olduğunu sonuçlandırmak için bir kullanılmıştır. SIW yapısının etkin genişliği (w_{eff}) aşağıdaki matematiksel formül ile elde edilmektedir (Aparna vd. 2022).

$$w_{eff} = w - \frac{d^2}{0.95 \times s} \quad (2.51)$$

w_{eff} SIW'ler arası etkin genişliği, d metalik silindirik yapının çapını, w iki SIW'in merkezleri arasındaki uzaklığı, s ise bitişik yapıların merkezlerinin arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Yukarıdaki denklem d/w 'nin etkisini dikkate almadığı için nümerik olarak aşağıdaki denklem elde edilmektedir (Aparna vd. 2022).

$$w_{eff} = w - \frac{1.08 \times d^2}{s} + 0.1 \times \frac{d^2}{w} \quad (2.52)$$

SIW yapısının yayılma karakteristiği Method of Lines tekniği kullanılarak aşağıdaki şekilde elde edilmektedir (Aparna vd. 2022).

$$w = \left(\xi_1 + \frac{\xi_2}{\frac{s}{d} + \frac{\xi_1 + \xi_2 - \xi_3}{\xi_3 - \xi_1}} \right) \text{ for } TM_{x0n} \text{ modes} \quad (2.53)$$

ξ_1, ξ_2, ξ_3 değerleri ise aşağıdaki şekilde belirlenmektedir.

$$\xi_1 = 1.0198 + \frac{0.3465}{\frac{w}{s} - 1.0684} \quad (2.54)$$

$$\xi_2 = -0.1183 - \frac{1.2729}{\frac{w}{s} - 1.2010} \quad (2.55)$$

$$\xi_3 = 1.0082 - \frac{0.9163}{\frac{w}{s} + 0.2152} \quad (2.56)$$

SIW yapısındaki bitişik tollardan radyoysan sızıntısını önlemek için SIW'in efektif genişliğinin hesaplandığı denklemde aşağıdaki koşulları sağlamalıdır. λ_0 , çalışma frekanslarındaki dalga boyunu ifade ederken, λ_c kesme frekansındaki dalga boyunu ifade etmektedir (Aparna vd. 2022).

$$d < \frac{\lambda_g}{5}, s \leq 2d \quad (2.57)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (2.58)$$

Son yıllarda SIW tabanlı antenlere artan ilgi ile birlikte klasik slotlu yapıdaki dalga kılavuzu antenlerinden başlayarak çeşitli konfigürasyonlara sahip pasif antenler SIW yapısı ile birlikte kullanılmıştır. İlk SIW anten yapısı 4'e 4 slotlu yapıda SIW array antendir (Yan vd. 2004). Bu anten 10 GHz'de çalışmakta ve metal silindirik yüzeylerine slot yapısının uzunlamasına aşındırılması ile elde edilmiştir (Yan vd. 2004). Besleme ağı ise mikro şerit güç bölücüler ile sağlanmıştır (Yan vd. 2004). Farklı bir topoloji ise, sızdıran dalga antenlerdir (leaky-wave antenna) (Deslandes, 2005). Bu anten SIW'ın temel özelliklerinden birini, yani metal yolların uzunlamasına aralığının yeterince büyük olmasından faydalanmaktadır.

Klasik dalga kılavuzu tabanlı antenlerin yanı sıra (üst veya yan duvarda delikler bulunan), literatürde başka anten konfigürasyonları yer almaktadır. Cheng vd. (2008) makalesinde Vivaldi yayıncı anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu anten V-tipi lineer konik slotlu bir yapıya sahiptir. Ayrıca boşluk-destekli (cavity-backed) antenler geliştirilmiş ve test edilmiştir (Luo vd. 2008 ; Awida & Fathy, 2009). En basit yapı Luo vd. (2008)'de geliştirilmiştir. Bu yapı eş düzlemlerle bir dalga kılavuzu tarafından beslenmekte ve boşluklu slotlu bir yapıya sahip SIW'den oluşmaktadır. Tüm anten tek bir dielektrik alt tabaka üzerine kolayca entegre edilebilir. Başka bir çözüm Bohórquez vd. (2009)'da bahsedilmiştir. Boşluklu SIW yapısına ve senkronize çizgiler ile oluşan (meander line) slotlu bir yapıya sahiptir. Mikro şerit iletim hattı ile beslenmektedir. Tüm anten ve besleme sisteminin tek bir alt tabaka üzerinde entegrasyonunun yanı sıra, bu tasarım, antenin kompakt bir yapıda

olmasını sağlamaktadır. Son zamanlarda ise H-plane horn anten SIW yapısı kullanılarak tasarlanmıştır (Wang vd. 2009). Bu anten ayrıca hem E düzleminde hem de H düzleminde yüksek kazanç ve dar bir hüzmeye genişliğine sahiptir.

Pasif antenlerin yanı sıra SIW tabanlı taramalı ve çoklu hüzmeye antenler geliştirilmiştir. Bu antenlerin amacı bir RF ağındaki antenin çıkış bağlantı noktasında istenen genlik ve faz katsayılarının dağılımını elde etmek ve istenen uzak alan modelini elde etmektir. Bu antenleri geliştirmenin basit yolu, bir parabolik reflektör anten kullanmaktır. Reflektörü mekanik olarak hareket ettirmeden, bu reflektör üzerinden üretilen ışın, reflektör odak noktasının beslemesini hareket ettirerek sınırlı bir açıda yönlendirebilmektedir (Bozzi vd. 2011).

37.5 GHz'de parabolik reflektör prensibine dayanan SIW tabanlı çoklu hüzmeye anten tasarımı gerçekleştirilmiştir (Cheng vd. 2008). Bu anten, bileşik giriş bağlantı noktaları birbirine karşılık gelen bir çıkış üretir ve parabolik reflektör, metalik silindirik yapı dizisi ile düzlemsel bir formdan oluşmaktadır.

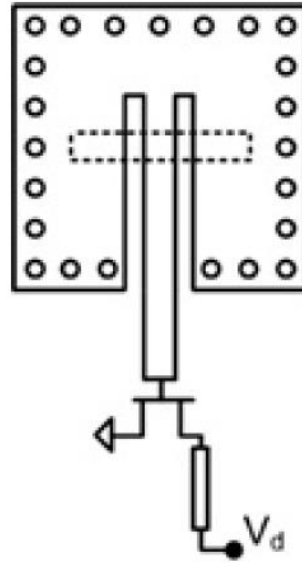
Rotman lens yöntemi basit tasarımı ve kompakt boyutu nedeniyle çoklu hüzmeye antenlerinin oluşturulması için tercih edilen diğer bir yöntemdir (Bozzi vd. 2011). Bu yöntem ile yedi giriş bağlantı noktası ve dokuz lineer SIW'den oluşan ve 28.5 GHz'de çalışabilen anten tasarımı gerçekleştirilmiştir (Cheng vd. 2008)

SIW teknolojisine dayanan Blass matrisi çoklu hüzmeye anten tasarımında kullanılmıştır (Chen P. vd. 2009). 16 GHz'de çalışan bu anten, 4×16 çapraz bağlantılardan oluşan çift katmanlı bir yapıya sahiptir. Geleneksel dalga kılavuzu yapısıyla karşılaştırıldığında, daha düşük maliyet ve daha kolay imalat özelliklerine sahiptir (Bozzi vd. 2011).

Son olarak çoklu hüzmeye anten tasarımı SIW tabanlı Nolen matrisi kullanılmıştır (Bozzi vd. 2011). Nolen matrisi, sonlandırma yüklerinin bastırıldığı blass matrisinin özel bir durumudur. 12.5 GHz'de çalışan çoklu hüzmeye anteni 4×4 Nolen matrisi temeline dayanarak tasarlanmıştır (Djerafi vd. 2010).

Aktif antenlerde gelişen teknoloji ile birlik SIW yapısı kullanmaya başlanmıştır. Aktif anten terimi “devre-anten modülü” olarak tanımlanmaktadır. Aynı substrat üzerine entegre edilen aktif devre ve anten devreleri bir kuvazi-optik dizisindeki elementi de içermektedir. Buna ek olarak, bu devrelerde yer alan anten elemanları ışın yönü, polarizasyon veya bant genişliği gibi anten özelliklerini değiştirmek veya yeniden yapılandırmak için kullanılır (Bozzi vd. 2011).

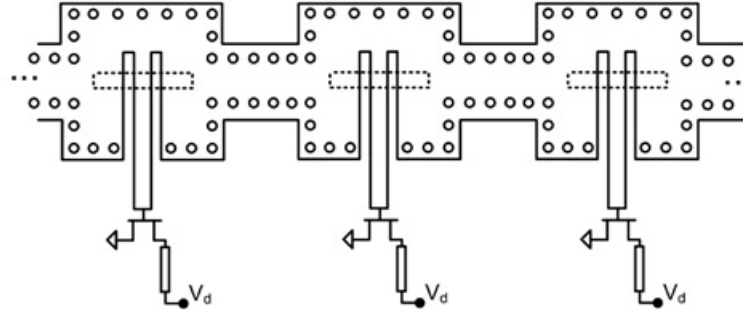
Kompakt, tek-substrat boşluk destekli slot ve patch osilatör anten tasarımları gerçekleştirilmektedir (Giuppi vd. 2010 ; Giuppi vd. 2010) Bu yapıya ait şematik aşağıdaki resimde gösterilmiştir. Bu yapıda bir kare SIW boşluğu kullanılmış olup, anten alt substratın bir tarafındaki metal tabakaya kazınmış ve anten besleme ağı ile aktif cihazın diğer tarafına yerleştirilmiştir (Bozzi vd. 2011). Böylece antenin ışınma desenine istenmeyen etkiler en aza indirilmiştir (Bozzi vd. 2011). Boşluk tabanlı anten, osilatörün rezonatör yapısı olarak hizmet etmektedir (Bozzi vd. 2011).



Şekil 2.20 Tek substrat boşluk destekli slot ve patch osilatör anten (Bozzi vd. 2011)

Kublaj osilatör anten dizileri, güç birleştirme ve iletişim sistemleri uygulamalarında yoğunlukla kullanılmaktadır (Meadows vd. 2002). Kublaj osilatör anten dizilerinin tasarımında SIW tabanlı boşluklu yapı kullanılmıştır (Georgiadis vd. 2009). Her dizi elemanı boşluk destekli aktif osilatör anten olmak ile beraber dizi elemanları arasındaki bağlantı, tek

veya çift açıklık kullanılarak bireysel SIW boşlukları arasındaki bağlantının uygun şekilde ayarlanması ile kontrol edilir. Bu yapıya uygun mimari aşağıdaki görselde yer almaktadır.



Şekil 2.21 Kublaj osilatör anten dizileri (Bozzi vd. 2011)

Yeniden yapılandırılabilir dairesel polarizasyona sahip bir boşluk destekli anten tasarımı, dairesel SIW boşluğu ele alınarak ve simetrik çapraz slotlar boşluğun merkezine, alt substratın bir tarafındaki metal tabakaya kazınarak gerçekleştirilmiştir (Luo & Sun, 2009). SIW teknolojisinde kullanılarak tasarlanan aktif anten dizilerinin de çeşitli verici ve alıcı modüllerinin de entegre edildiği tek veya çoklu katmanlı tasarımlarda görülmüştür. (Samanta vd. 2007 ; Gatti vd. 2011 ; Chen J. X. vd. 2006)

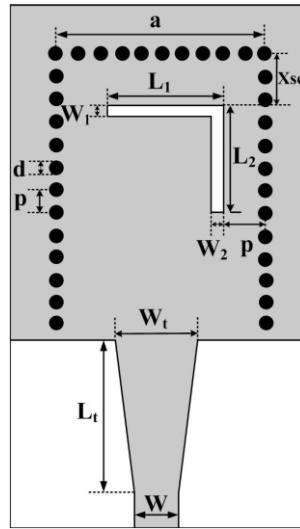
2.3. Slot Teknolojisi ve Anten Tasarımındaki Yeri

Slot, anten tasarımında kullanılan teknolojilerden birisidir. Bu yapı antende bulunan metalik yüzeyin tasarlanan şekle göre kazınması ile elde edilmektedir. Slot, dipol anten özelliği göstererek elektromanyetik dalgaların yayılmasını sağlamaktadır. Anten üzerine kazınacak slot yapısının şekline göre yayılım şekli değişim göstermektedir (Chinchole & Khade, 2020). Slot antenlerin yapılarının karmaşık olamaması, basit yapı ile geniş bant özellik gösterebilmeleri, iletim kayıplarının daha az olmaları ve antenlerde izolasyonlarının daha iyi olmaları bu yapının avantajlarından bazılarıdır (Akhavan & Mirshekar, 1997 ; Ren vd. 2006). Ayrıca bu antenlerin düşük maliyetli ve hafif olmaları entegre edildikleri sisteme ciddi bir kazanç sağlamaktadır (Shen vd. 2011 ; Lu vd. 2009)

SIW tabanlı antenlere slot eklenmesi, mikrodalga bileşenlere geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. Bu anten tipi ilk olarak. Bu sayede birden fazla çalışma bandına sahip antenlerin tasarımı gerçekleştirilebilmektedir. Anten tasarımlarında, basit bir slot yapısına

sahip bir anten belirli bir frekans bandı içerisinde yayıldığı bilinmektedir. Bu nedenle birden fazla slot yapısı antenlere entegre edilerek antenlerin birden fazla frekansta çalışmaları sağlanmaktadır. Ayrıca dar bantlı olması, düşük kazanç ve tasarlanacak antenin boyutunda azaltma imkânı sunmaktadır (Srivastava vd. 2017).

SIW tabanlı antenlere eklenecek slot yapısının şekli değişik formlarda olabilmektedir. Bu formlardan birisi de L desenli slot yapısıdır. L deseninde slot yapısı SIW tabanlı antenlere entegre edildiklerinde, çift bantta elektromanyetik sinyallerin yayılması gerçekleştirilmektedir. Enine ve boyuna göre açılacak iki slotun konumları yüzey akımını etkileyen faktörlerden birisidir. Ayrıca oluşturulacak slot yapısının uzunlukları antenin çalışma frekansına etki etmektedir. Bu tip bir antenin örneği Şekil 2.22’de gösterilmektedir (Srivastava vd. 2013).



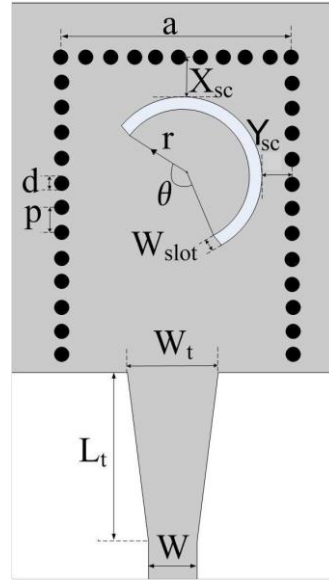
Şekil 2.22 L desenli slot anten (Srivastava vd. 2013)

U desenli slot, SIW tabanlı antenlere entegre edilen bir diğer yapı örneğidir. Bu yapı topraklanmış metalik yüzeye de entegre edilebilmektedir. Alt metalik yüzeye entegre edilmiş U slot yapısı, SIW antenlerle beraber kullanıldıklarında boyut olarak ciddi bir küçülme sağlanmış olmaktadır. Bu tip antenler boyutun da küçültülmesi ile endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamalar gibi birçok alanda kullanılabilir (Astuti & Rahardjo, 2018). SIW tabanlı, U desenli slot anten örneği aşağıdaki resimde verilmektedir.



Şekil 2.23 U deseni slot anten (Astuti & Rahardjo, 2018)

SIW tabanlı antenlere entegre edilen bir diğer slot C desenlidir. Bu desen L deseni slot örneğinin değiştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu sayede antenlere çift bantlı çalışma imkânı sunmaktadır. Ayrıca C deseni sayesinde entegre edildikleri SIW tabanlı antenlere daha büyük bant genişliği ve çapraz polarizasyon gibi özellikler kazandırmaktadır. C deseninin yarı çapı, kalınlığı, konumu ve boşluk kısmının açılma değeri optimizasyon için kullanılan parametreler arasındadır. Bu tip anten örneği aşağıdaki görselde yer almaktadır. (Srivastava vd. 2017)



Şekil 2.24 C deseni slot anten (Srivastava vd. 2017)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Dielektrik malzemeler, yalıtkan olarak işlev görmektedir. RF bileşenlerde elektromanyetik sinyallerin iletilmesi için önemli bir rol oynamaktadır. Tasarımın ilk aşamasında kullanılacak dielektrik malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda Rogers RT5880 dielektrik malzemesi kullanılmıştır ve bu malzemenin ϵ_r değeri 2.2'dir.

Rogers RT5880, Rogers Corporation firması tarafından üretilmektedir ve yüksek frekanslı laminat malzemesidir. Birden fazla katmana sahip olan bileşenlerde de sıklıkla kullanılmaktadır. Üretiminde cam elyaf takviyesi kullanılır. Üretim aşamasında tipik olarak, cam elyaf takviyeler arasına bir polimer reçine impregne edilir ve daha sonra ısı ve basınç altında sertleştirilir. Bu süreç, malzemenin istenen mekanik ve elektriksel özelliklere sahip olmasını sağlar.

RT5880, düşük dielektrik kaybı ve düşük yayılım kaybı özellikleri sayesinde yüksek frekanslı uygulamalar için çok uygundur. Bu malzeme, mikrodalga devrelerinde, anten sistemlerinde, telsiz iletişim ekipmanlarında ve diğer yüksek frekanslı uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

ROGERS RT5880 dielektrik malzemesinin seçilmesinde avantajları önemli rol oynamaktadır. Aşağıda bu avantajlarından bahsedilmektedir.

- 1) **Düşük kayıp:** RT5880, düşük frekanslarda çalışırken çok az bir kayıp faktörüne sahip bir malzemedir. Yüksek frekanslarda çalışırken bile elektromanyetik sinyallerini az kayıpla iletebilir. Bu, iletim hattında performansı artırır ve daha iyi elektromanyetik sinyal kalitesi sağlar.
- 2) **Yüksek hızlı elektromanyetik sinyal iletimi:** RT5880, yüksek hızlı sinyallerin iletilmesi için üretim malzemesi ve üretim aşamasında optimize edilmiş, bir malzemedir. Bu durum hem yüksek bant genişliği gerektiren hem de yüksek frekansta çalışan uygulamalarda önemli bir avantajdır.

- 3) **Mekanik dayanıklılık:** RT5880, cam elyaf takviyeli bir dielektrik malzeme olarak üretildiği için mekanik dayanıklılık ve termal stabilite açısından diğer malzemelere kıyasla daha dayanıklıdır. Devrelerde genellikle problem olan, termal genleşme sorunlarını azaltır ve daha güvenilir bir performans sağlar.
- 4) **Yüksek frekans performansı:** RT5880, yüksek frekanslarda çalışmak üzere tasarlandığı için, bu frekanslarda istikrarlı bir performans göstermektedir. Günümüzde yüksek frekanslı uygulamaların artması ile mikrodalga ve RF uygulamalarında RT5880 malzemesinin sıkça tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir.
- 5) **Yüksek dielektrik sabiti:** RT5880'nin yüksek dielektrik sabiti, daha kompakt devre tasarımlarının mümkün olmasını sağlar. Bileşenlerin tasarımlarında boyut olarak avantaj sağlamak günümüz tasarımlarında çok dikkat edilen bir özelliktir. RT5880 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen tasarımlar, daha küçük boyutlu ve daha hafif RF ve mikrodalga cihazlarının yapılabilmesini sağlar.

Bu özellikler, RF ve mikrodalga sistemlerinde daha iyi performans ve verimlilik sağladığı için anten tasarımında RT5880 malzemesi tercih edilmiştir. Bu malzemenin üreticisi tarafından belirlenmiş özellikleri aşağıda paylaşılmıştır.

- Dağılım faktörü 0.0009'dur.
- Düşük nem emme özelliğine sahiptir.
- İzotropik bir yapıya sahiptir.
- Geniş frekans aralığında sabit ve aynı performansında elektriksel özellikler sunmaktadır.
- Şekillendirmek için kolayca işlenebilmektedir. Bu sebeple üretim kolaylığı sağlar.
- Düşük elektrik kaybı sağlamaktadır.

Entegrasyon kolaylığı, kolay üretim ve iyi iletim özellikleri göz önünde bulundurularak tasarımda mikro şerit iletim hattı kullanılmıştır. Tasarlanan besleme hattının

genişliği sinyalin yayılma performansını ve karakteristik empedansını etkilemektedir. Dielektrik malzemenin kalınlığı ise beslenme hattında elektromanyetik dalga yayılımını ve dağılımını etkilerken dielektrik sabiti iletilecek olan sinyalin hızını, frekans bağımlılığını ve empedansı etkilemektedir. Aşağıdaki formül ile tasarlanan mikro şerit besleme hattının empedans değeri (Z_0) optimize edilmiştir.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right), & \frac{W}{d} < 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} \left[\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.44 \right) \right]}, & \frac{W}{d} \geq 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

Tasarlanan Substrat Tümlęşik Dalga Kılavuzu Temelli Çift Bantlı Anten tasarımında elektriksel olarak iletken yüzeylerde PEC malzemeler seçilmiş ve buna göre simülasyon çalışmaları yapılmıştır. PEC, doğada bulunmayan ancak mükemmel şekilde elektrik iletimini sağlayan malzemelerdir.

Elektrik iletimini mükemmel bir şekilde gerçekteşiren PEC malzemeler, sahip oldukları elektrik alan içerisinde herhangi bir empedans bulunmamaktadır. Bu sayede PEC malzemeler kayıpsız bir ortam sunmaktadırlar. Kayıpsız ortam oluşturmalarından dolayı kayıp faktörleri de sıfır kabul edilmektedirler.

PEC malzemeler içerdikleri özellikler baz alınarak ve simülasyon ortamlarında kazandırdıkları bazı avantajlardan dolayı seçilmiştir. Bunların başında kayıpsız ve dirençsiz malzemeler olmalarıdır. Bu sayede iletim kaybı yapılan tasarımda ihmal edilmektedir. Ayrıca PEC malzemeler ideal bir ortam sunmaktadırlar. Doğal bir şekilde bulunmayıp simülasyon ortamlarında ideal davranışları sayesinde analitik ve nümerik çözümlelerde kolaylık sağlamaktadırlar. Yapılan tasarımlarda PEC malzemelerin kullanılmasının bir diğer nedeni ise, bu malzemelerin elektrik akımını tamamen yansıtma özelliklerindedir. Böylece doğru modelleme imkânı yapılacak tasarıma sunmakta ve anten ve iletim hattı gibi tasarımlarda analiz kolaylığı sağlamaktadırlar. PEC malzemeler belirtilen avantajları sayesinde hızlı bir tasarım yapılarak değerlendirme ve analiz imkânı sunmaktadır. Doğal bir şekilde bulunmadıklarından dolayı ise yapılacak tasarımda sadece varsayımsal bir ortam sunarlar.

Patch anten tipi yapılan tasarımda kullanılmıştır. Bu anten tipi bazı avantajlar göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Bu avantajlar aşağıda belirtilmektedir:

- Boyut, malzeme ve farklı şekillerle kolayca tasarlanarak tasarım esnekliği sunmaktadır.
- Geniş frekans aralığında çalışmalarından dolayı birden fazla uygulama ve birden çok bant gereksinimlerine uygundur.
- Entegre edildikleri sistemlere yönlü kazanç sağlamaktadırlar. Böylece, belirli bir yöne sinyal iletimini rahatlıkla gerçekleştirmektedirler.
- Patch antenler, farklı teknolojilerin rahatlıkla entegre edilebileceği anten tipidir. Bu sayede antenlerin daha küçük ve verimli bir biçimde tasarlanması sağlanmaktadır.

Tasarlanan antende PEC malzeme kullanıldığından herhangi bir üretimsel faaliyet söz konusu değildir. Ancak patch antenlerin elektriksel olarak iletken bölümlerinde PEC yerine bakır veya aktif bir şekilde anten üretiminde kullanılan herhangi bir malzeme kullanılarak üretilebilirler. Böylece kayıplı bir ortam olduğundan üretime uygun analiz çalışmaları tekrar yapılarak kolaylıkla üretilebilirler. Patch antenlerin bir diğer avantajı ise üretim faaliyetlerinde görülmektedir. Düşük maliyetli ve kolay üretim teknolojileri sayesinde entegre edildikleri sisteme ciddi avantaj kazandırmaktadır. Ayrıca hafif olmaları da bir diğer avantajı olarak gösterilmektedir.

Patch antenlerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Bunların başında düşük bant genişliği ve verimliliklerinin olmasıdır. Ayrıca yüzey dalgalarında oluşan kayıp, polarizasyon duyarlılıklarının yüksek olmaları ve çevresel etkilerden rahatlıkla etkilenmeleri diğer dezavantajları arasında sıralanabilir.

Bu antenin tasarımında Substrat Tümlleşik dalağa Kılavuzu yapısı kullanılmıştır. SIW yapısında yer alan metalik silindirik yapıların yayılım kayıplarını en aza indirmek için aşağıdaki denklemler baz alınmıştır. SIW yapısı tasarımda hem alt ve üst kısımda hem de yanlarda kullanılmıştır. s değeri iki silindirik yapının merkezleri arasındaki mesafeyi, d

değeri ise metalik silindirik yapıların çapını ifade etmektedir. λ_0 , boş uzayın dalga boyuna eşittir ve ışık hızının, çalışma frekansına bölünmesi sonucu elde edilir.

$$s \leq 2d \quad (3.2)$$

$$0.5s \leq d \leq 0.1\lambda_0 \quad (3.3)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_c} \quad (3.4)$$

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{2.6 \times 10^9} \cong 0.115 \text{ m} = 115 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Tasarımda d değeri 1 mm, s değeri ise 1.667 mm olarak seçilmiştir. Method of Lines yönetimi kullanılarak yanalarda kullanılan metalik silindirik yapıların çapları arasındaki mesafe w ile ifade edilmektedir. Bu yöntem ile aşağıdaki matematiksel formüller ile hesaplanabilmektedir.

$$w_{eff} = w - \frac{1.08 \times d^2}{s} + 0.1 \times \frac{d^2}{w} \quad (3.6)$$

$$w = \left(\xi_1 + \frac{\xi_2}{\frac{s}{d} + \frac{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3}{\xi_3 - \xi_1}} \right) \quad (3.7)$$

ξ değerleri birer sabittir ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\xi_1 = 1.0198 + \frac{0.3465}{\frac{w}{s} - 1.0684} \quad (3.8)$$

$$\xi_2 = -0.1183 - \frac{1.2729}{\frac{w}{s} - 1.2010} \quad (3.9)$$

$$\xi_3 = 1.0082 - \frac{0.9163}{\frac{W}{s} - 0.2152} \quad (3.10)$$

w_{eff} değerinin hesaplanmasının akabinde rezonans frekansı ile alt ve üst alanda kullanılan metalik silindirik yapıların arasındaki mesafe L_{eff} ile ifade edilmektedir.

$$f_r = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{1}{w_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_{eff}}\right)^2} \quad (3.11)$$

$$W_{siw} = W_{eff} + \frac{d^2}{0.95 \times s} \quad (3.12)$$

$$W_{siw} = 64.4 + \frac{1^2}{0.95 \times 1.667} \quad (3.13)$$

$$W_{siw} = 65.04 \text{ mm} \quad (3.14)$$

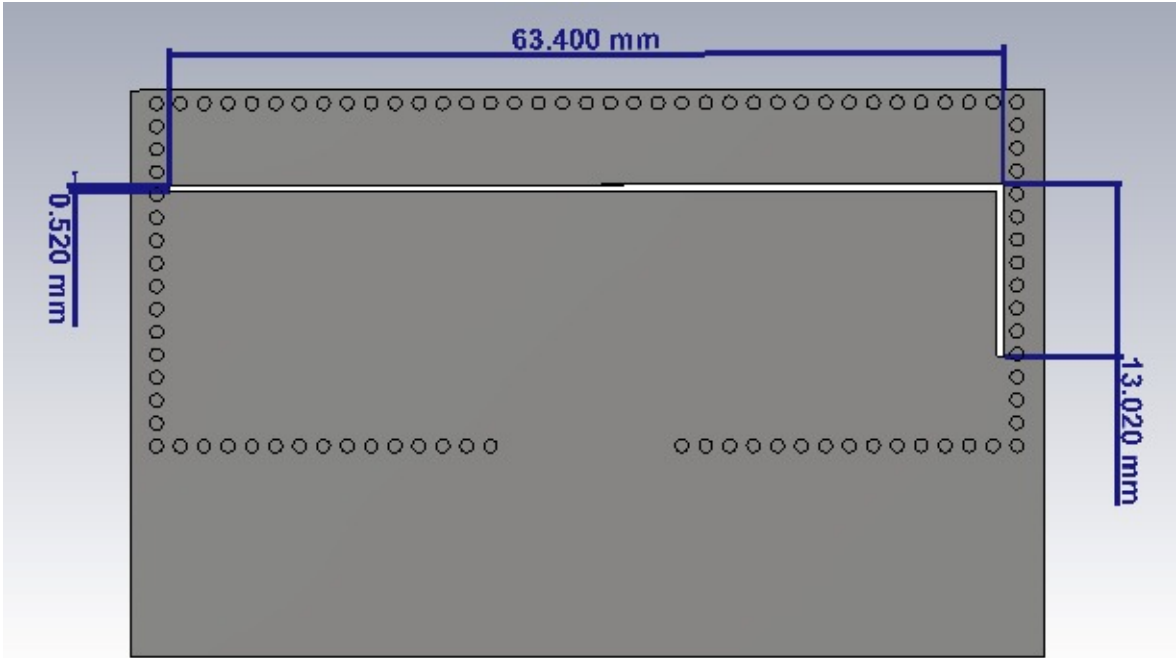
$$L_{siw} = L_{eff} + \frac{d^2}{0.95 \times s} \quad (3.15)$$

Çift bantlı anten tasarımında SIW haricinde slot teknolojisi de kullanılmıştır. Slot, patch antenlerde yüzeyindeki oluşturulan açıklıktır. L şekilli slot, patch antende topraklanmış elektriksel yüzeye kazınarak eklenmiştir. Slot, eklendikleri patch antenlerin indüktif, kapasitif ve empedans özelliklerinde değişiklikler meydana getirmektedir. Eklenen slotun uzunluğu ve genişliği indüktif özelliğinde değişiklikler meydana getirmektedir. Buna göre slotun uzunluğu arttıkça indüktif reaktans artar ve antenin çalışma frekansı düşer. Slotun genişlik ve derinliği ise antenin kapasitif özelliğini etkileyen parametrelerdir. Slot genişliği arttıkça kapasitif reaktans artar ve böylece antenin çalışma frekansında artış meydana gelir. Ayrıca slotun boyut ve konumu, antenin empedansı etkilemektedir. Buna göre antenlerde slotların konumuna göre uygun bir empedans eşleme yapılarak daha iyi anten tasarımı gerçekleştirilebilmektedir.

Tasarlanan antenin topraklanmış metalik yüzeyine slot eklenerek birden fazla frekansta antenin çalışması sağlanmıştır. Bu sayede çift bantlı çalışma yapısı elde edilerek

ayrıca yüksek verimlilikte tasarlanan antene sağlanmıştır. Ancak tasarlanan antene slot yüzünden ek parametreler eklendiğinden tasarımda az da olsa karmaşıklık oluşmuştur. Ayrıca slot teknolojisinin karakteristik özelliklerinden dolayı bant genişliği de etkilenmiştir.

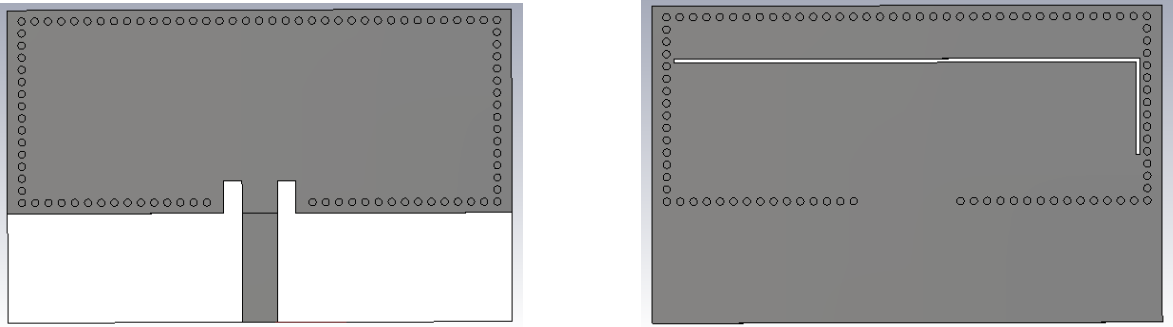
Yapılan Substrat Tümlleşik Dalga Kılavuzu Temelli Çift Bantlı Anten tasarımında slot teknolojisi kullanılarak iki farklı çalışma frekansı elde edilmiştir. Yapılan tasarımda optimizasyon için slotun boyutları ve konumlarında parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki resimde tasarlanan antenin topraklanmış metalik yüzeyine entegre edilmiş slot ve içerdiği parametrelerin değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Tasarımda yer alan slot yapısının ölçüleri

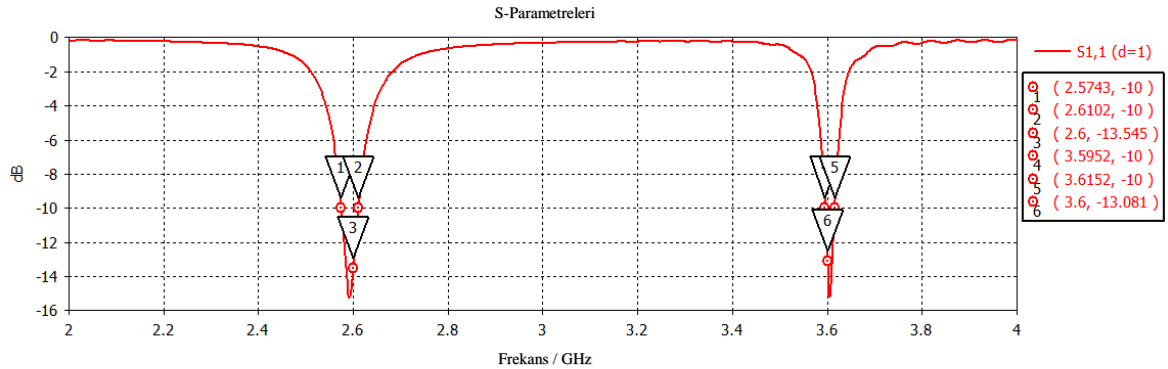
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen substrat tümleşik dalga kılavuzu temelli 2.6 GHz ve 3.6 GHz’de çalışabilen anten tasarımının nihai versiyonu aşağıdaki görsellerde yer almaktadır. İlk görsel antenin üst yüzeyini, ikinci görsel ise alt yüzeyini göstermektedir. Üst yüzeyde SIW yapısı yer almakta iken, alt yüzeyde SIW ve slot yapısı yer almaktadır.



Şekil 4.1 Tasarımda yer alan SIW yapısı

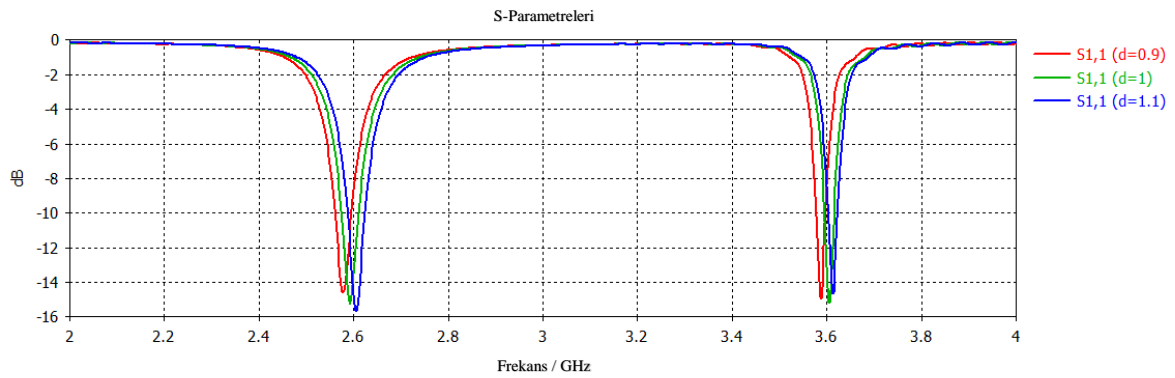
Bu nihai çalışmaya ait S_{11} grafiği aşağıda verilmektedir. Bu grafikte de görüldüğü üzere antenin çalışmaya başladığı ilk frekans bant genişliği 2.5743 GHz ve 2.6102 GHz arasındadır. İkinci frekans bandı ise 3.5952 GHz ve 3.6152 GHz arasındadır. Bir antenin çalışma frekans aralıkları literatürdeki birçok çalışmada -10 dB baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Burada istenilen ilk çalışma frekansı 2.6 GHz’de -13.545 dB, ikinci çalışma frekansı 3.6 GHz’de ise -13.081 dB elde edilmiştir. Yapılan tüm parametrik çalışmalar arasında en optimize sonuç bu değerler ile elde edilmiştir.



Şekil 4.2 Optimize S_{11} grafiği

Tasarımda gerçekleştirilen parametrik çalışmalar sırası ile aşağıda bahsedilmiştir ve bu çalışmalara göre görüşler belirtilmiştir.

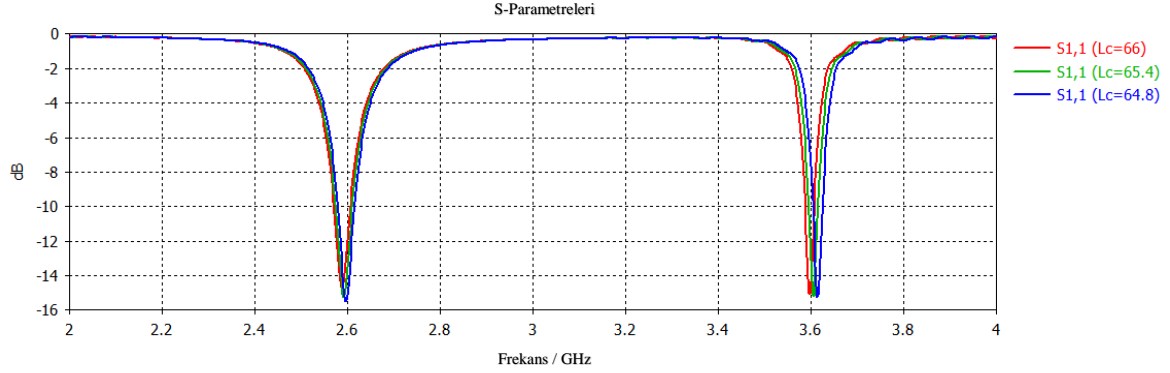
d parametresine yani metalik silindirik yapıların çapına göre gerçekleştirilen parametrik çalışmada çapın artışının kesim frekanslarında da artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada en optimize çap 1 mm olarak elde edilmiştir.



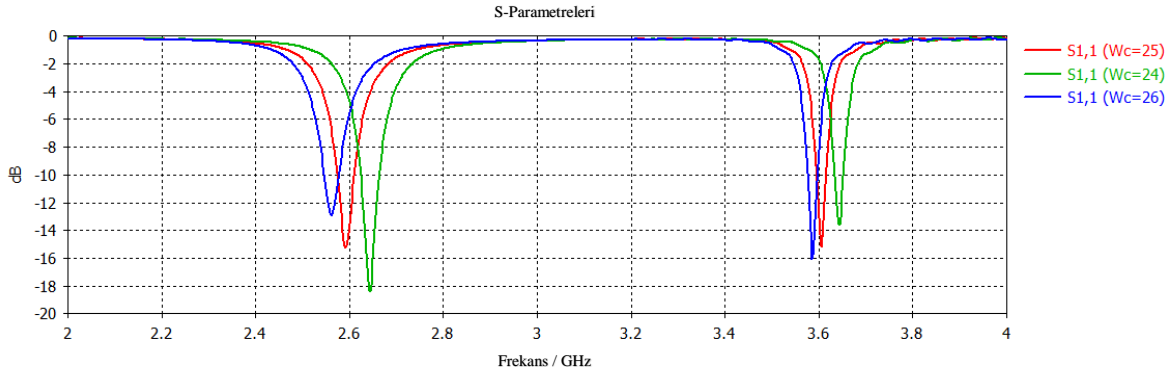
Şekil 4.3 Silindirik yapıların çapına göre gerçekleştirilen parametrik çalışma

Tasarlanan anten üzerinde üst kenarda 37 ve yan kenarlarda ayrı ayrı 16 tane eş substrat tümleşik dalga kılavuzu yapısı bulunmaktadır. Ayrıca tasarlanan şeritin alt kenarında sağ ve solda ayrı ayrı 15'er tane de SIW yapısı bulunmaktadır. Bu SIW yapıları tasarlanırken adet sabit tutularak arasındaki mesafenin etkisi görülmüştür. Şeritin üst kenarında bulunan en sol ve en sağ SIW'lerin merkezleri arasındaki mesafe en iyi durumda 65,4 mm olarak görülmüştür. Bu değer tasarımda L_c olarak isimlendirilmektedir. Bu değer artışı ile beraber yüksek frekanstaki çalışma frekansında düşüş görülmektedir. Tam tersi olacak şekilde azaldığında da yüksek çalışma frekansında artış görülmektedir. Bu değer ise geri yansımaya kaybına herhangi bir etkisi de sonuçlar çerçevesinde görülmemektedir. Bu parametrik çalışma yapılırken anten boyutları ile kesişme yaşanmaması için küçük adımlar seçilmiş ve etki de bu doğrultuda küçük olmaktadır. Yapılan bir diğer çalışmada aynı yan kenarda bulunan en üst ve en alttaki SIW arasındaki mesafenin (W_c) değişimi ile bazı etkileri de görülmektedir. Bu etki doğrultusunda, belirtilen mesafenin artması hem o kenardaki SIW'ler arasındaki mesafenin artmasına neden olmaktadır. Bu artış iki çalışma frekansını da artırmaktadır. Ayrıca düşük çalışma frekansı arttıkça geri yansımaya kaybı da bir miktar azalmakta ve daha düşük S11 sonucu elde edilmektedir. Bu durum yüksek çalışma frekansında ise tam tersi olacak şekilde görülmektedir. Frekans arttıkça geri yansımaya kaybı

az da olsa artmakta ve S_{11} değeri de artış görülmektedir. Bu uzunlukların sonuçları Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de yer almaktadır.

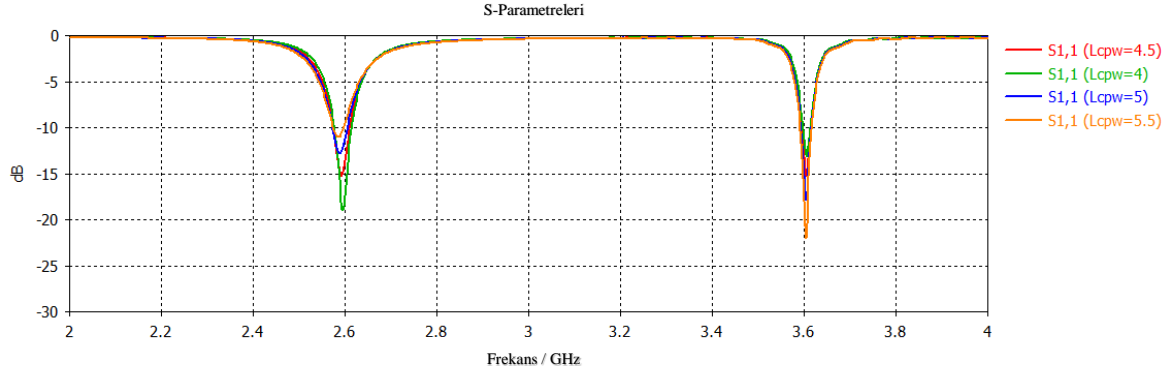


Şekil 4.4 Sağ ve sol SIW yapılarının merkezden merkeze olan uzaklığı



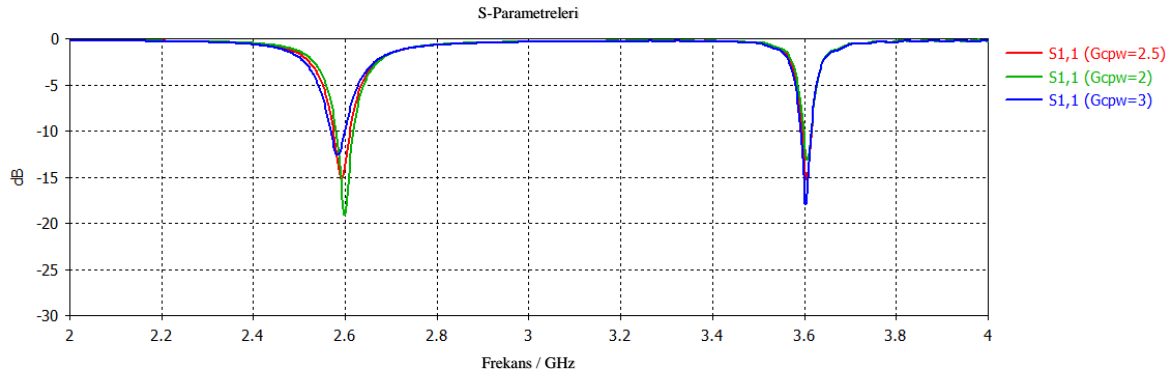
Şekil 4.5 Alt ve üst SIW yapılarının merkezden merkeze olan uzaklığı

L_{cpw} parametresi yani besleme hattı ile mikro şerit plakanın birleştirdiği yerdeki oluşturulan iki özdeş boşlukların (gap) dikeydeki uzunluklarına göre gerçekleştirilen parametrik çalışmanın S_{11} grafiği Şekil 4.6’da paylaşılmaktadır. Bu grafiğe göre oluşturan boşluğun dikeydeki uzunluğu sadece geri yansımaya kaybına etki etmektedir. Ancak tasarlanan antenin çalıştığı iki farklı frekansta eşit bir etkisi yoktur. Bu durumda frekansa göre farklı empedans uyumlama oluştuğu görülmektedir. En optimize sonuç L_{cpw} parametresinin 4.5 mm olduğu durumda gözlemlenmiştir.



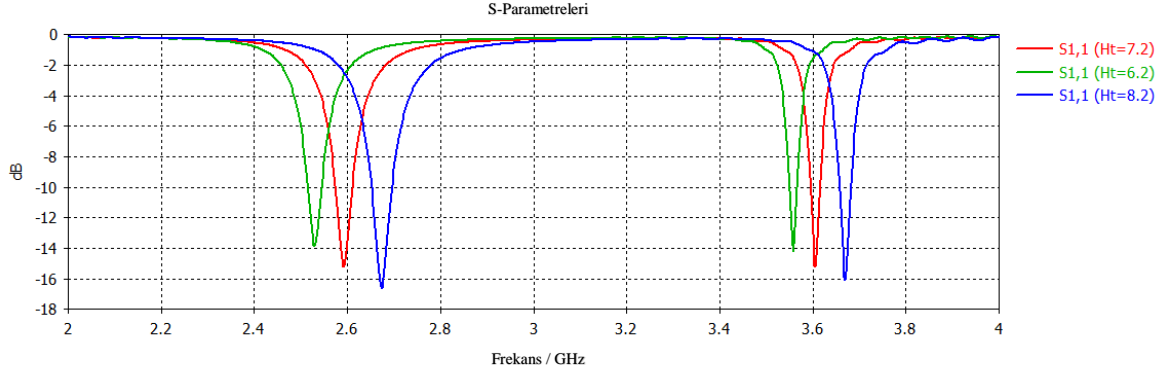
Şekil 4.6 Boşluklara göre gerçekleştirilen parametrik çalışma

G_{cpw} parametresi yani bahsedilen iki özdeş boşlukların (gap) yataydaki uzunluklarına göre gerçekleştirilen parametrik çalışmanın S_{11} grafi aşağıda paylaşılmaktadır. Bu grafiğe göre oluşturan boşluğun yataydaki uzunluğu, dikeydeki uzunlukta olduğu gibi sadece geri yansıma kaybına etki etmektedir. Çalışma frekanslarında eşit derecede etki göstermemektedir. Bu durumda frekansa göre farklı empedans uyumlama olduğu görülmektedir. En optimize sonuç G_{cpw} parametresinin 2.5 mm olduğu durumda gözlemlenmiştir.



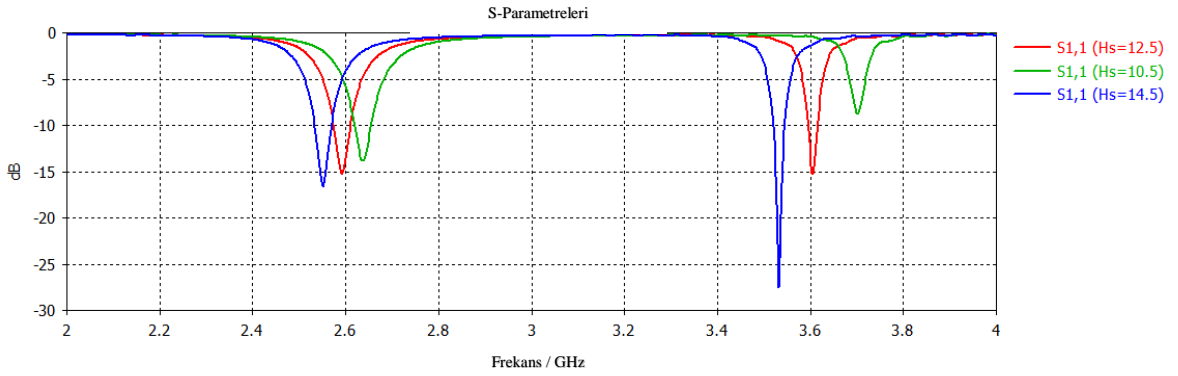
Şekil 4.7 Özdeş boşlukların yataydaki uzunluklarına göre gerçekleştirilen parametrik çalışma

H_t parametresi yani yatayda yer alan slot yapısının topraklanmış metalik yüzeyin üst kenarına olan uzaklığına göre parametrik çalışma çalışmaya ait S_{11} grafiği Şekil 4.8'de paylaşılmaktadır. Burada gözlemlenen sonuç; uzaklık arttıkça çalışma frekanslarında da artış meydana gelmektedir. Ayrıca bu frekans artışının yanı sıra uzaklık artışı geri yansıma kaybında da azda olsa etki etmektedir. Frekans artışı gerçekleştikçe, geri yansıma kaybı bir miktar azalmaktadır. İstenilen çalışma frekansları için en optimize sonuç H_t parametresi 7.2 mm iken elde edilmiştir.



Şekil 4.8 Slot yapısının topraklanmış metalik yüzeyin üst kenarına olan uzaklığına göre parametrik çalışma

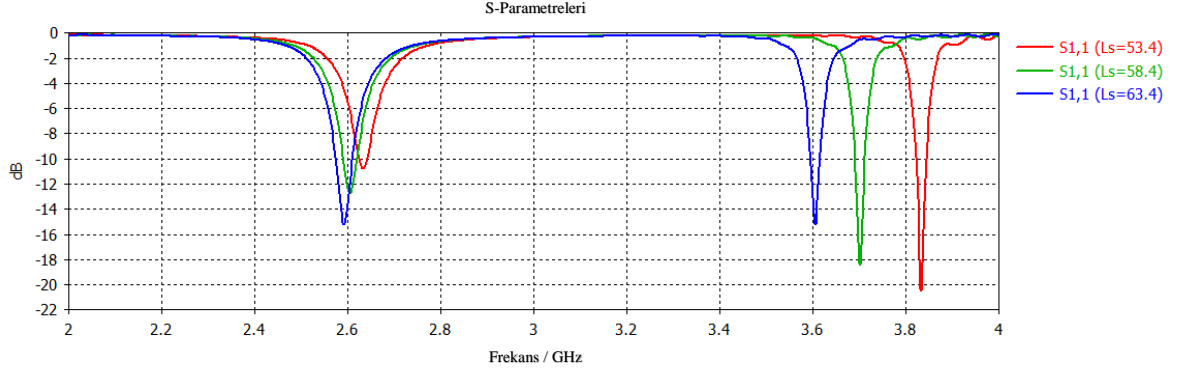
H_s parametresi yani dikeyde yer alan slot yapısının uzunluğuna göre parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya ait S_{11} grafiği aşağıda paylaşılmaktadır. Burada gözlemlenen sonuç; uzunluk arttıkça çalışma frekanslarında azalma meydana gelmektedir. Ayrıca bu uzunluk düşük çalışma frekansında geri yansımaya kaybına etki etmez iken, yüksek çalışma frekansında geri yansımaya kaybını epeyce iyileştirmiştir. İstenilen çalışma frekansları için en optimize sonuç H_s parametresi 12.5 mm iken elde edilmiştir.



Şekil 4.9 Dikeyde yer alan slot yapısının uzunluğuna göre parametrik çalışma

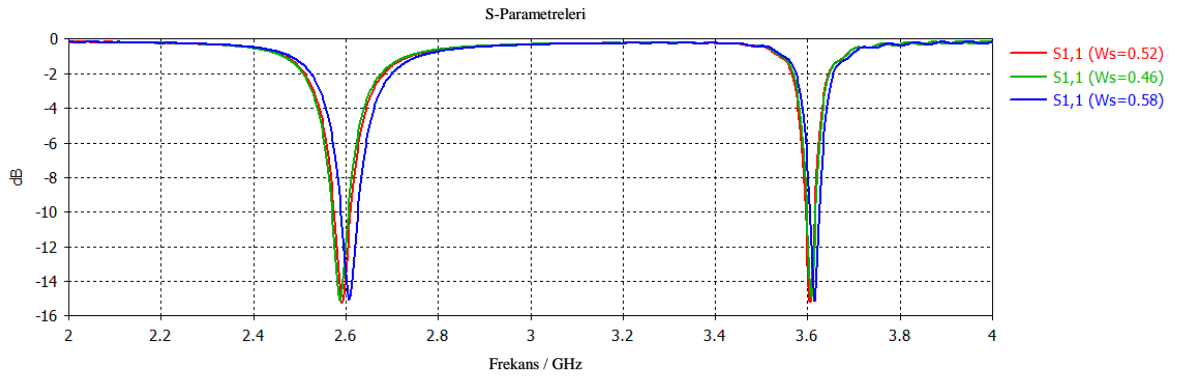
L_s parametresi yani yatayda yer alan slot yapısının uzunluğuna göre parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya ait S_{11} grafiği Şekil 4.10'de paylaşılmaktadır. Burada gözlemlenen sonuç; uzunluk arttıkça düşük çalışma frekansında azalma meydana gelmiştir. Ancak yüksek frekans çalışma bandı gözlemlendiğinde düşük frekans bandına göre frekansta daha fazla bir azalma meydana gelmektedir. Bu duruma ek yine düşük çalışma frekansında geri yansımaya kaybı uzunluk arttıkça azalmaktadır. Bu azalama frekanstaki değişim gibi, yüksek çalışma frekansında daha fazladır. Yüksek çalışma frekansını L_s

parametresi, düşük çalışma frekansını ise H_s parametresi daha çok etkilemektedir. İstenilen çalışma frekansları için en optimize sonuç L_s parametresi 63.4 mm iken elde edilmiştir.



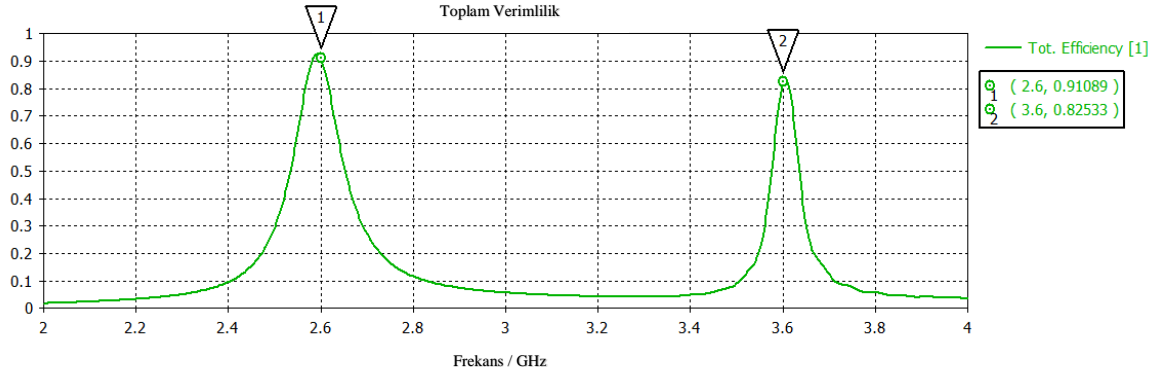
Şekil 4.10 Yatayda yer alan slot yapısının uzunluğuna göre parametrik çalışma

W_s parametresi yani yatayda yer alan slot yapısının kalınlığına göre parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya ait S_{11} grafiği aşağıda paylaşılmaktadır. Burada kalınlığın etkisinin diğer çalışmalara göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek çalışma frekansında etki yok denecek kadar az iken düşük çalışma frekansında kalınlığın artırılması frekansta azda olsa artış sağlamaktadır. İstenilen çalışma frekansları için en optimize sonuç W_s parametresi 0.52 mm iken elde edilmiştir.



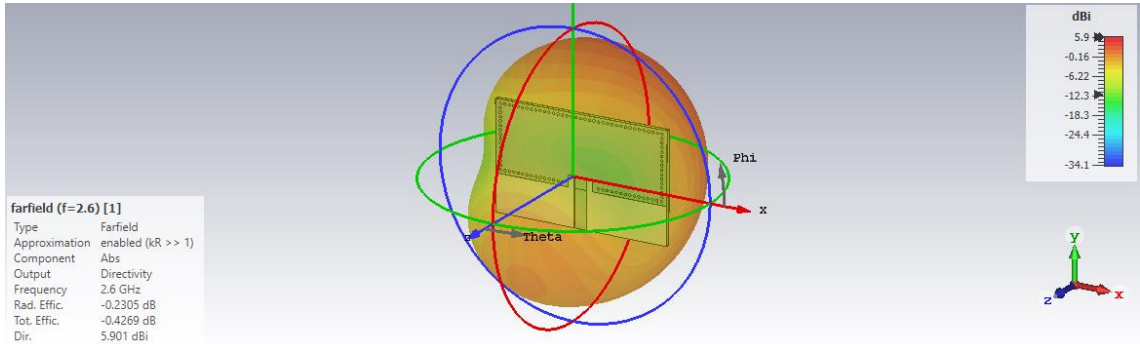
Şekil 4.11 Yatayda yer alan slot yapısının kalınlığına göre parametrik çalışma

Antenin verimliliğini gösteren grafik Şekil 4.12'da yer almaktadır. Burada istenilen ilk çalışma frekansı olan 2.6 GHz'de %91 verimlilik elde edilirken, ikinci çalışma frekansı olan 3.6 GHz'de %82,5 verimlilik elde edilmiştir.

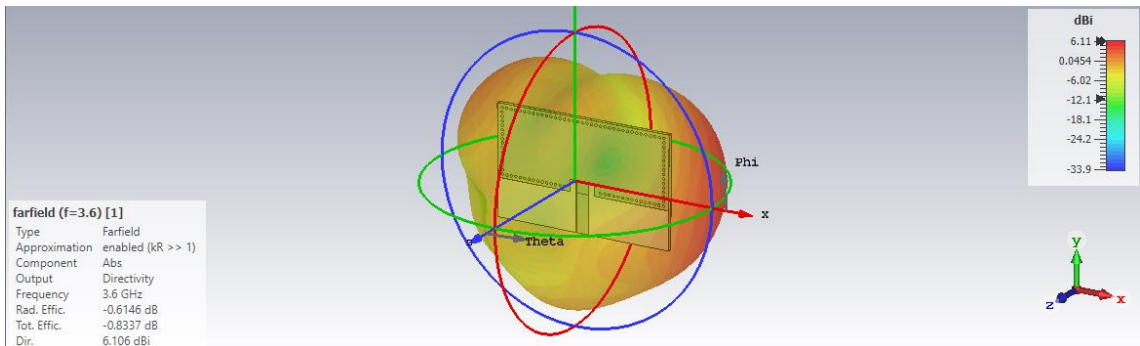


Şekil 4.12 Anten verimliliği

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de tasarlanan antenin 2.6 GHz ve 3.6 GHz'de uzak alan yayılma karakteristiği yer almaktadır. 2.6 GHz'de ki yayılma bakıldığında topraklanmış metalik yüzeye doğru yayılım daha güçlü iken, 3.6 GHz'de tasarlanan antenin kenarlarından yayılım daha güçlüdür. 2.6 GHz'de yönlülük değeri 5.901 dBi olarak gözlemlenirken, 3.6 GHz'de bu değer 6.106 dBi'dir.

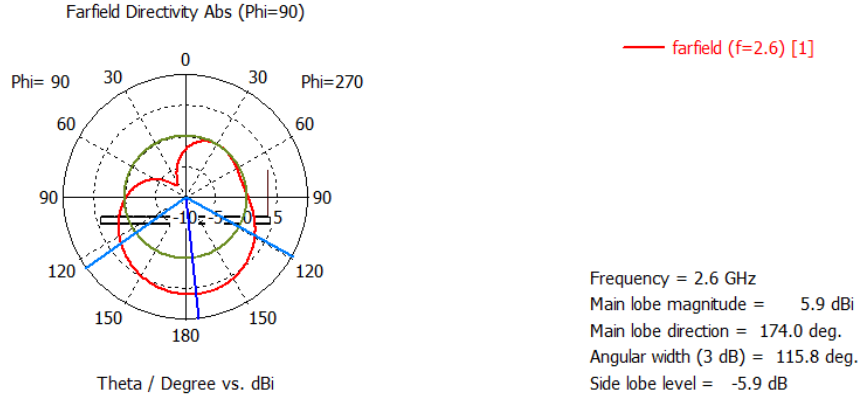


Şekil 4.13 2.6 GHz'de uzak alan yayılım karakteristiği

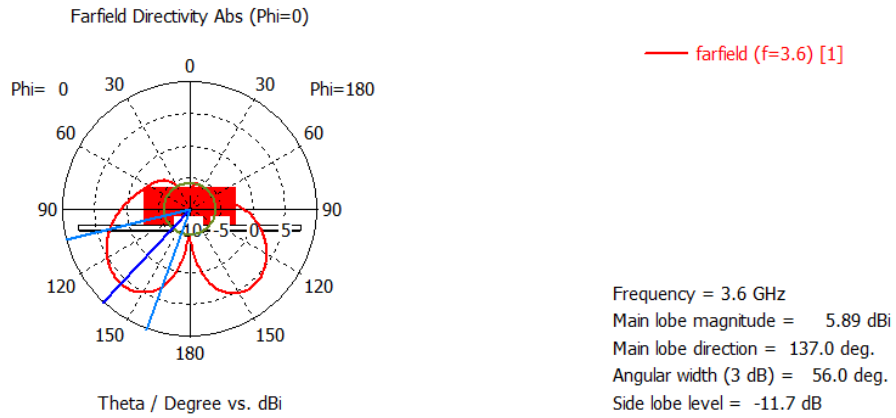


Şekil 4.14 3.6 GHz'de uzak alan yayılım karakteristiği

Aşağıdaki görsellerde theta açısı sabitken phi açısı 90 derece iken polar koordinatta uzak alan yayılımının modellenmiş hali yer almaktadır. Bu değerler ışığında 2.6 GHz'de kazanç 5.670 dBi, 3.6 GHz'de kazancımız ise 5.491 dBi'dır. Bu kazanç değerlerinin 3 dB azaldığı yani yarıya düştüğü noktadaki yayılımın açısı 2.6 GHz'de 115.8 derecede, 3.6 GHz'de 56 derecede sağlanmaktadır.

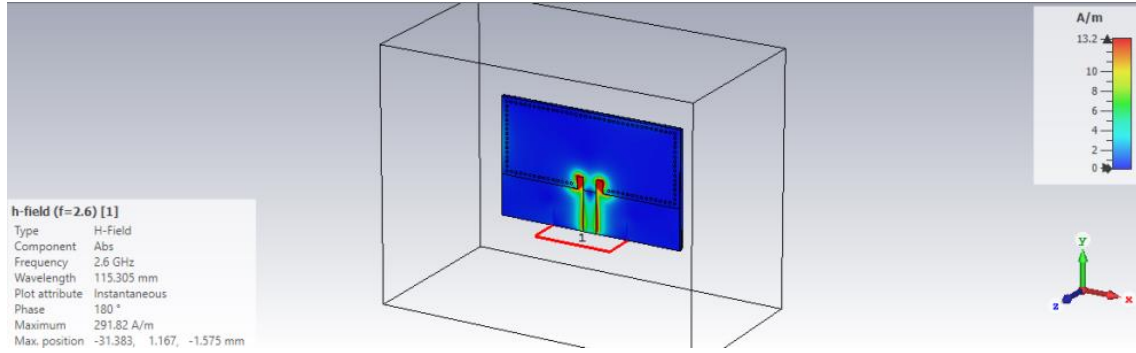


Şekil 4.15 Phi açısı 90 derece iken uzak alan yayılım modeli

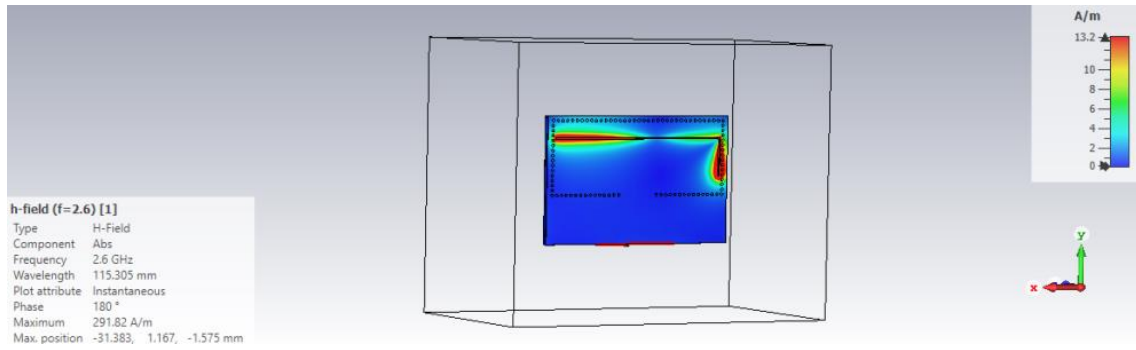


Şekil 4.16 Theta açısı 90 derece iken uzak alan yayılım modeli

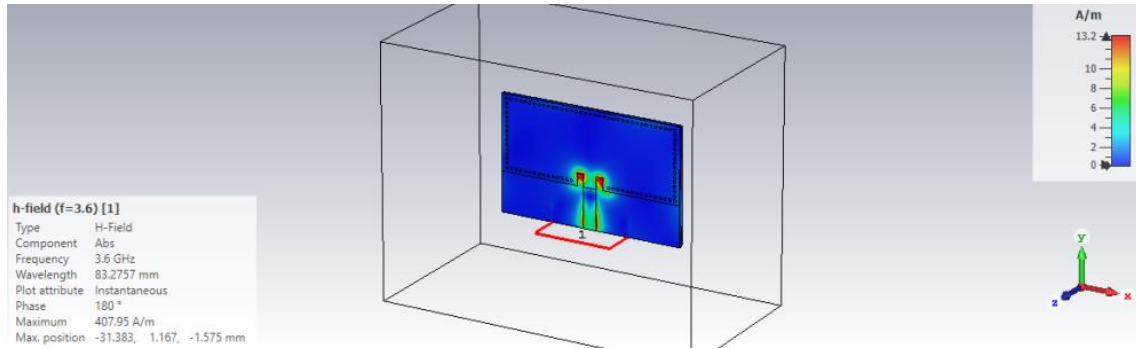
Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de istenilen çalışma frekanslarında manyetik alan yayılımı gösterilmektedir. Bu yayılım hem ön hem arka yüzeyler için modellenmiştir. 2.6 GHz'de maximum manyetik alan değeri 291.82 A/m iken 3.6 GHz'de 407.95 A/m dir. Ön yüzeyde manyetik yayılımı besleme hattı bitiminde yer alan boşluklarda gerçekleşmektedir. Arka yüzeyde ise bu yayılım slot yapılarında gözlemlenmiştir.



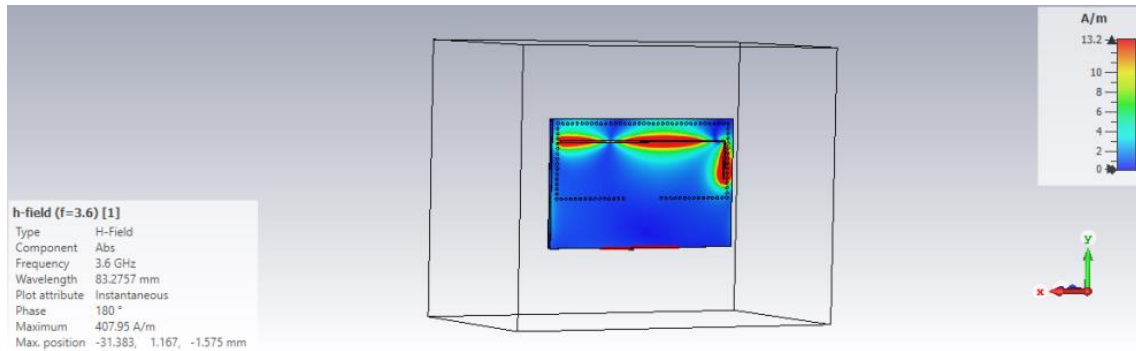
Şekil 4.17 2.6 GHz'de ön yüzeydeki manyetik alan yayılımı



Şekil 4.18 2.6 GHz'de arka yüzeydeki manyetik alan yayılımı

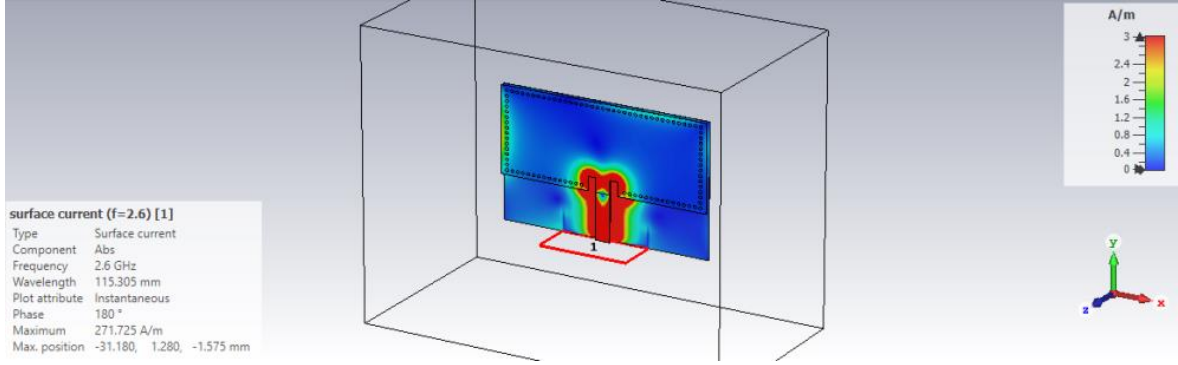


Şekil 4.19 3.6 GHz'de ön yüzeydeki manyetik alan yayılımı

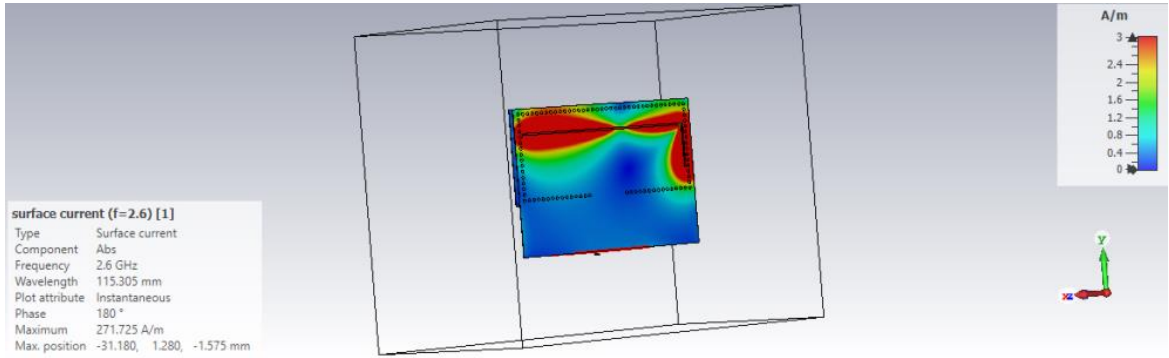


Şekil 4.20 3.6 GHz'de arka yüzeydeki manyetik alan yayılımı

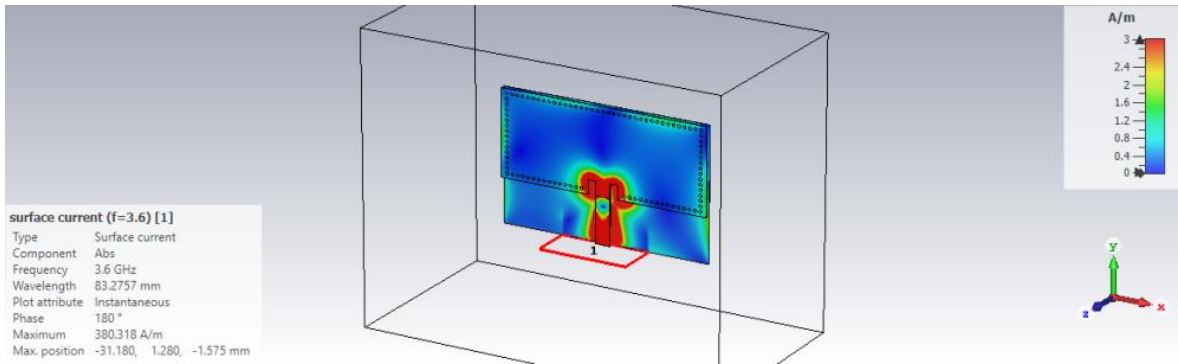
Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de istenilen çalışma frekanslarında yüzey akımı gösterilmektedir. Bu akım hem ön hem arka yüzeyler için modellenmiştir. 2.6 GHz’de maximum yüzey akımı değeri 271.25 A/m iken 3.6 GHz’de 380.318 A/m dir. Ön yüzeyde akım besleme hattı bitiminde yer alan boşluklarda gerçekleşmektedir. Arka yüzeyde ise bu yayılım slot yapılarında gözlemlenmiştir.



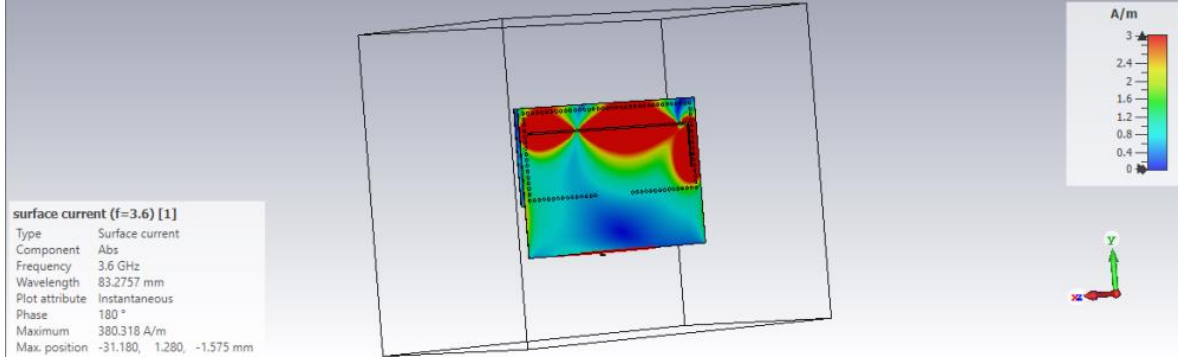
Şekil 4.21 2.6 GHz’de ön yüzey akımı



Şekil 4.22 2.6 GHz’de arka yüzey akımı

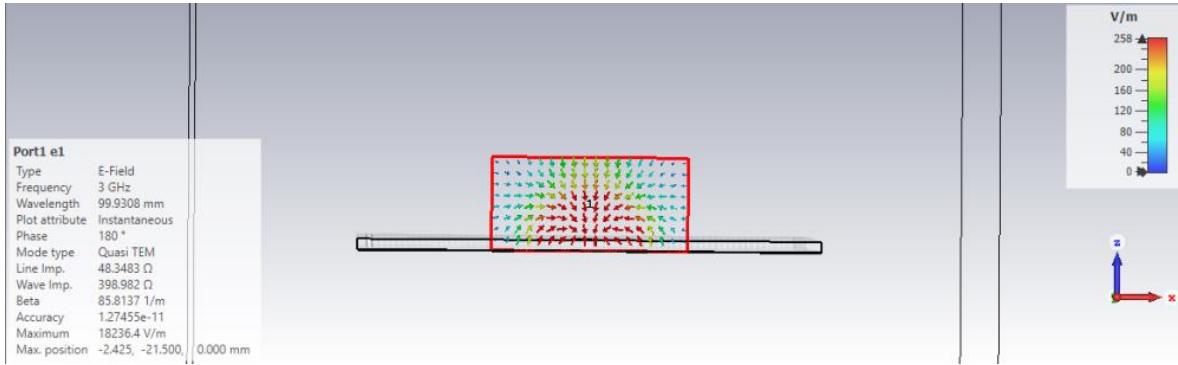


Şekil 4.23 3.6 GHz’de ön yüzey akımı



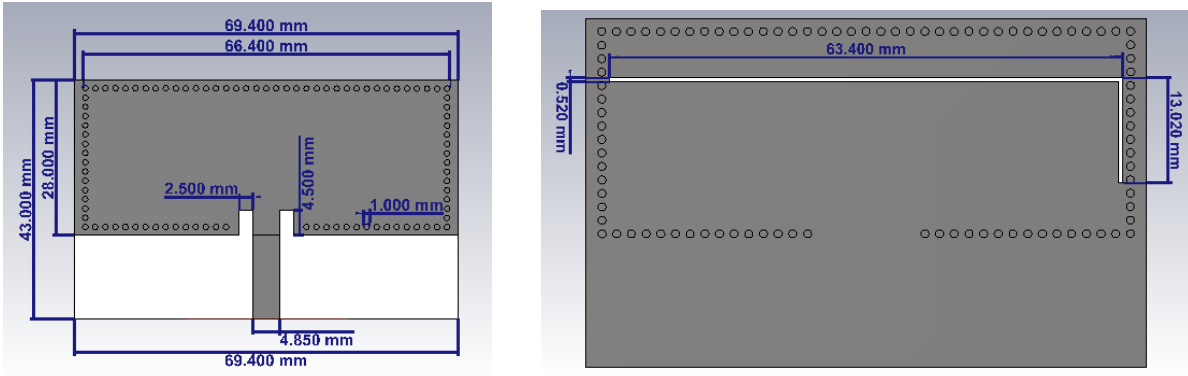
Şekil 4.24 3.6 GHz'de arka yüzey akımı

Şekil 4.25'de portta yer alan elektrik alanın modellesi yer almaktadır. Mikro şerit yapılar Quasi TEM dalga modunu desteklemektedir ve tüm simülasyonlar ve analizler Quasi TEM dalga modunda gerçekleştirilmiştir. Tasarımda yayılan Quasi TEM dalgalarının maksimum elektrik alan değeri 18236,4 V/m'dir. Mikro şerit hatlarda istenilen hat empedansı 50 ohm'dur. Bu 50 ohm değeri besleme hattının genişliği, dielektrik malzemenin kalınlığı ve ϵ_r değeri ile bağlantılıdır. Tasarımda 50 ohm'a ulaşabilmek için dielektrik malzemenin değerleri değiştirilmeden, besleme hattının genişliği ile optimizasyonu sağlanmıştır. Bu optimizasyon sonucunda 48.3483 ohm değerinde hat empedansı elde edilmiştir.



Şekil 4.25 Portta yer alan elektrik alan modeli

Şekil 4.26'de tasarımın son haline ait görseller yer almaktadır.



Şekil 4.26 Tasarımın son hali

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 4G ve 5G haberleşme sistemleri çalışma frekansında aynı anda çalışabilecek SIW tabanlı çift bantlı anten tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım sayesinde 4G ve 5G haberleşme sistemlerini aynı anda kullanabilen hibrit sistemlerde kullanılabilir. Tasarımda şerit üzerine SIW ve slot yapıları eklenerek boyut olarak daha küçük, daha iyi performansa sahip ve verimli bir çift bantlı anten tasarımı sağlanmaktadır. Ayrıca tasarımda besleme hattının iki yanına eklenen boşluklar ile de antenin geri yansıma kaybı daha da azaltılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ancak empedans uyumlama çalışması farklı metotlar ile yapılarak geri yansıma kaybı en aza indirilebilmektedir. Ayrıca bu anten tasarımı ile sadece 4G ve 5G haberleşme sistemlerini hibrit bir şekilde kullanan yapılar için değil diğer çift bantlı tüm uygulamalara kolaylıkla entegre edilebilecektir.

Çalışmada 4G haberleşme için çalışma frekansı 2,6 GHz ve 5G haberleşme için 3,6 GHz seçilmiştir. Bu frekans değerleri ayrı ayrı ilgili haberleşme sisteminin içerisinde var olan bantlar arasındadır. 2,6 GHz çalışma frekansında S_{11} değeri -13,55 dB ve 3,6 GHz çalışma frekansında ise -13,08 dB'dir. Bu sonuçlar yapılan optimizasyon çalışmaları ile elde edilmiştir. Ayrıca S_{11} değerinin -10 dB ve aşağısında literatüre göre antenin çalışacağı varsayıldığında tasarlanan anten 2,57-2,61 GHz ve 3,59-3,61 GHz frekans bantlarında çalışma göstermektedir. Bu çalışma frekans bantları hariç tasarlanan antenin diğer frekanslarda geri yansıma kaybının çok büyük olduğu görülmektedir. Böylece istenen frekanslarda slot teknolojisi kullanılarak SIW tabanlı çift bantlı anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akhavan, H. G., & Mirshekar, S. D. (1997). Study of coupled slot antennas fed by microstrip lines. *In Tenth International Conference on Antennas and Propagation*.
- Antenna Theory*. (2011). Waveguide Tutorial: <https://www.antenna-theory.com/tutorial/waveguides/waveguide.php> adresinden alındı
- Aparna, E., Ram , G., & Kumar, G. A. (2022). Review on Substrate Integrated Waveguide Cavity Backed Slot Antennas. *IEEE Access*.
- Astuti, D. W., & Rahardjo, E. T. (2018). Size reduction of substrate integrated waveguide cavity backed u-slot antenna. *In 2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)* .
- Awida, M. H., & Fathy, A. E. (2009). Substrate-Integrated Waveguide Ku-Band Cavity-Backed . *EEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons.
- Bohórquez, J. C., Pedraza, H. F., Pinzon, I. C., Castiblanco, J. A., Pena, N., & Guarnizo, H. F. (2009). Planar substrate integrated waveguide cavity-backed antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.
- Bozzi, M., Georgiadis, A., & Wu , K. (2011). Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 5(8), 909-920.
- Carlson, A. B., & Crilly, P. B. (2010). *Communications Systems, An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communications*. Higher Education.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Chen, J. X., Hong, W., Hao, Z., Li, H., & Wu, K. (2006). Development of a low cost microwave mixer using a broad-band substrate integrated waveguide (SIW) coupler. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*.
- Chen, P., Hong, W., Kuai, Z., & Xu, J. (2009). A double layer substrate integrated waveguide Blass matrix for beamforming applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*.
- Cheng, D. K. (1989). *Field and wave electromagnetics*. Pearson Education India.
- Cheng, Y. J., Hong, W., & Wu, K. (2008). Design of a monopulse antenna using a dual V-type linearly tapered slot antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- Cheng, Y. J., Hong, W., Wu, K., Kuai, Z. Q., Yu, C., Chen, J. X., & Tang, H. J. (2008). Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman lens and its Ka-band multibeam array antenna applications. *IEEE Transactions on antennas and propagation*.
- Chinchole, A., & Khade, S. (2020). A Wideband Slot Antenna with Simple Structure. *In 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering*.
- Choi, S. T., Yang, K. S., Tokuda, K., & Kim, Y. H. (2004). A V-band planar narrow bandpass filter using a new type integrated waveguide transition. *IEEE microwave and wireless components letters*.
- Deslandes, D. (2005). Substrate integrated waveguide leaky-wave antenna: Concept and design considerations. *In Asia Pacific Microwave Conference Proc.*

KAYNAKLAR DİZİNİ

Djerafi, T., Fonseca, N. J., & Wu, K. (2010). Planar Ku Band Nolen Matrix in SIW Technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.

Ezhilarasan, E., & Dinakaran, M. (2017). A review on mobile technologies: 3G, 4G and 5G. In 2017 second international conference on recent trends and challenges in computational models. *ICRTCCM*, 369-373.

Gatti, R. V., Marcaccioli, L., Sbarra, E., & Sorrentino, R. (2011). Flat array antenna for Ku-band mobile satellite terminals. In *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation*.

Georgiadis, A., Via, S., Collado, A., & Mira, F. (2009). Push-push oscillator design based on a substrate integrated waveguide (SIW) resonator. In *2009 European Microwave Conference (EuMC)*.

Giuppi, F., Georgiadis, A., Bozzi, M., Via, S., Collado, A., & Perregrini, L. (2010). Hybrid nonlinear and electromagnetic design of an active oscillator SIW cavity backed slot antenna. In *Applied Computations Electromagnetics Society Symp.(ACES)*.

Giuppi, F., Georgiadis, A., Collado, A., Bozzi, M., Via, S., & Perregrini, L. (2010). An X band, compact active cavity backed patch oscillator antenna using a substrate integrated waveguide (SIW) resonator. In *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*.

Gobjuka, H. (2009). 4G wireless networks: opportunities and challenges. *arXiv preprint arXiv:0907.2929*.

Hihonor. (2018). *Hihonor. 5G Nedir Ve Nasıl Çalışır?:*
 hihonor.com/tr/club/topicdetail/topicid-4680/ adresinden alındı

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Hirokawa, J., & Ando, M. (1998). Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane TEM wave excitation in parallel plates. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 625-630.
- Hirokawa, J., & Ando, M. (2000). Efficiency of 76 GHz post wall waveguide fed parallel plate slot arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- Lu, G. Q., Hu, Z. F., Liang, Y., Yu, L. Y., & Sun, L. L. (2009). Development of low profile cavity backed crossed slot antennas for planar integration. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*.
- Luo, G. Q., & Sun, L. L. (2009). A reconfigurable cavity backed antenna for circular polarization diversity. *Microwave and Optical Technology Letters*.
- Luo, G. Q., Hu, Z. F., Dong, L. X., & Sun, L. L. (2008). Planar slot antenna backed by substrate integrated waveguide cavity. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.
- Meadows, B. K., Heath, T. H., Neff, J. D., Brown, E. A., Fogliatti, D. W., Gabbay, M., & Ditto, W. L. (2002). Nonlinear antenna technology. *Proceedings of the IEEE*.
- Moldovan, E., Bosisio, R. G., & Wu, K. (2006). W-band multiport substrate-integrated waveguide circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.
- Nwajana, A. O., & Obi, E. R. (2022). A review on SIW and its applications to microwave components. *Electronics*, 11(7), 1160.
- Pozar , D. M. (2011). *Microwave engineering*. John wiley & sons.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ren, W., Shi, Z. G., & Chen, K. S. (2006). Compact dual-band slot antenna for WLAN applications. *In 2006 IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks.*
- Samanta, K. K., Stephens, D., & Robertson, I. D. (2007). Design and performance of a 60-GHz multi-chip module receiver employing substrate integrated waveguides. *IET Microwaves, Antennas & Propagation.*
- Shen, W., Yin, W. Y., & Sun, X. W. (2011). Miniaturized dual-band substrate integrated waveguide filter with controllable bandwidths. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters,*.
- Srivastava, A., Chaudhary, R. K., Biswas, A., & Akhtar, M. J. (2013). Dual-band L-shaped SIW slot antenna. *In 2013 International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP).*
- Srivastava, A., Chaudhary, R. K., Biswas, A., & Akhtar, M. J. (2017). Dual-band C-shaped circular slot SIW antenna. *IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM).*
- Stephens, D., Young, P. R., & Robertson, I. D. (2005). Millimeter-wave substrate integrated waveguides and filters in photoimageable thick-film technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.*
- Uchimura, H., Takenoshita, T., & Fujii, M. (1998). Development of a " laminated waveguide". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.*

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Wang, H., Fang, D. G., Zhang, B., & Che, W. Q. (2009). Dielectric loaded substrate integrated waveguide (SIW) H-plane horn antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- Wu, K. (2006). Towards system-on-substrate approach for future millimeter-wave and photonic wireless applications. *In 2006 Asia-Pacific Microwave Conference* , 1895-1900.
- Yan, L., Hong, W., Hua, G., Chen, J., Wu, K., & Cui, T. J. (2004). Simulation and experiment on SIW slot array antennas. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*.