



**5G MOBİL HABERLEŞME İÇİN
ÇİFT BANTLI VE DÜŞÜK MALİYETLİ
MİKROŞERİT YAMA ANTEN
TASARIMI VE ÜRETİMİ**

Gürkan KALINAY

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği
Danışman: Doç. Dr. Fatih KABURCUK**

**2021
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**5G MOBİL HABERLEŞME İÇİN ÇİFT BANTLI VE DÜŞÜK MALİYETLİ
MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI VE ÜRETİMİ**

Gürkan KALINAY

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih KABURCUK

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

30 / 06 / 2021

İmzası

Gürkan KALINAY

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

5G MOBİL HABERLEŞME İÇİN ÇİFT BANTLI VE DÜŞÜK MALİYETLİ MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Gürkan KALINAY

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih KABURCUK

Bu tezde, beşinci nesil (5G) mobil haberleşme için düşük maliyetli ve çift bantlı bir mikroşerit yama anteninin sayısal ve deneysel analizini sunulmaktadır. Önerilen anten, düşük maliyetli bir FR-4 dielektrik alttaşı üzerine tasarlanmış ve üretimi yapılmıştır. Antenin sayısal analizi, sonlu farklar zaman alanı (FDTD) tabanlı hesaplamalı elektromanyetik simülör (CEMS) yazılımı ve sonlu entegrasyon tekniği (FIT) tabanlı Computer Simulation Technology (CST) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Antenin performansı, simulasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Önerilen anten, Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından belirlenen 5G frekans bantlarını içeren 24 ve 28 GHz çift frekans bantlarında çalışmaktadır. Anten maksimum kazanç değerleri, xy düzleminde sırasıyla 24 ve 28 GHz'de 3.20 dBi ve 3.99 dBi'dir. Önerilen anten, 5G mobil haberleşme cihazları için uygun olmakla birlikte çok yönlü ışıma deseni sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen anten performansını değerlendirmek için iki farklı parametrik çalışma yapılmıştır. Antenin üst yüzünde bulunan yamaların, topraklama düzleminin boyutlarının ve farklı kalınlıklardaki FR-4 alttaşların, antenin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. 5G frekans bantlarında çalışan antenlerin boyutlarının çok küçük olması anten üretimini zorlaştırmaktadır. Önerilen antenin prototipini üretebilmek için, PCB baskı cihazı yerine CNC cihazı kullanılmıştır. FR-4 alttaşı üzerinde yüksek hassasiyetli kazıma yapabilmek ve oluşabilecek üretim hatalarını minimize edebilmek için, CNC üzerinde özel bir sistem tasarlanmıştır.

2021, 53 sayfa

Anahtar Kelimeler: 5G anten, Çift-bantlı anten, Düşük maliyetli anten, Mikroşerit yama anten, CST, CEMS, FDTD.

ABSTRACT

MS. Thesis

DESIGN AND FABRICATION OF A DUAL-BAND AND LOW-COST MICROSTRIP PATCH ANTENNA FOR 5G MOBILE COMMUNICATIONS

Gürkan KALINAY

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih KABURCUK

This thesis presents the numerical and experimental analysis of a low-cost and dual-band microstrip patch antenna for the fifth generation (5G) mobile communications. The antenna is designed and printed on a low-cost FR-4 dielectric substrate. The numerical analysis of the antenna is performed using the computational electromagnetic simulator (CEMS) software which is based on the finite-difference time-domain (FDTD) and Computer Simulation Technology (CST) software which is based on the finite integration technique (FIT). The performance of the proposed antenna is verified with the simulated and measured results. The proposed antenna operates in the 24 and 28 GHz dual frequency bands, which includes the 5G frequency bands determined by the Federal Communications Commission (FCC). The maximum gain values of the antenna are 3.20 dBi and 3.99 dBi in the x - y plane at 24 and 28 GHz, respectively. The proposed antenna provides almost omni-directional patterns suitable for 5G mobile communication devices. In addition, two different parametric studies were conducted to evaluate the proposed antenna performance. The effects of patches on the upper face of the antenna, the dimensions of the ground plane and different FR-4 substrate thicknesses on the performance of the antenna were investigated. In order to fabricate the proposed antenna prototype, CNC device was used instead of traditional PCB printing device because it makes difficult to fabricate the antenna operating at 5G frequency bands due to its very small dimensions. For this reason, a special system has been designed on the CNC to engrave with high precision on the FR-4 substrate and to minimize the production errors that may occur.

2021, 53 pages

Keywords: 5G antenna, Dual-band antenna, Low-cost antenna, Microstrip patch antenna, CST, CEMS, FDTD.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans hayatım boyunca yapmış olduğum çalışmalarda bilgi birikimini bana aktaran, yol gösteren, her türlü problemimde yanımda olan kıymetli ve değerli danışman hocam Doç. Dr. Fatih KABURCUK'a göstermiş olduğu sabır ve anlayışından dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatıma başladığımdan bu yana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Sebahattin KALINAY'a, annem Zemzeme KALINAY'a, ağabeylerim Serkan KALINAY'a ve Erkan KALINAY'a, kardeşlerim Volkan KALINAY'a, Damla YİĞİT'e, Sadık YİĞİT'e ve Çağla KALINAY'a teşekkür ederim.

Yaptığım çalışmalarda ekipman desteği sunan İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümü öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Selçuk PAKER'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

CEMS yazılımının kullanımı sağladıkları için Colarado School of Mines Üniversitesi'nden Sayın Prof. Dr. Atef Z. Elsherbeni'ye ve Northern Illinois Üniversitesi'nden Sayın Prof. Dr. Veysel Demir'e teşekkür ederim.

Uzun ve yorucu bu süreçte bir an olsun yanımdan ayrılmayan bana güç veren eşim Yeşim Nur KALINAY'a teşekkür ederim.

Gürkan KALINAY
Haziran 2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	9
3.1. Anten ve Özellikleri	9
3.1.1 Anten tanımı	9
3.1.2. Anten çeşitleri	11
3.1.3. Anten parametreleri	15
3.2. Mikroşerit Yama Antenler Hakkında Genel Bilgiler	23
3.2.1. Mikroşerit anten türleri	25
3.2.2. Mikroşerit anten besleme türleri	29
3.3. Mikroşerit Anten Tasarımı	33
3.3.1. Mikroşerit anten tasarımı için gerekli formüller	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	37
4.1. Anten Tasarım Parametreleri	37
4.1.1. CEMS simulasyon parametreleri	38
4.1.2. CST simulasyon parametreleri	38
4.2. Anten Üretimi	38
4.3. Sayısal ve Deneysel Sonuçlar	42
4.3.1. Giriş yansıma katsayısı (S_{11}) ve ışıma deseni	42
4.3.2. P_1 ve P_2 yamaların ve topraklama düzleminin antenin performansı üzerindeki etkileri	45
4.3.3. FR-4 alttaş kalınlığının antenin performansı üzerindeki etkileri	47
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
AWR	Advancing the Wireless Revolution
CEMS	Computational Electromagnetic Simulator
CST	Computer Simulation Technology
dB	Desibel
FCC	Federal Communications Commission
FEM	Finite Element Method
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
FIT	Finite Integral Technique
GHz	Gigahertz
HFSS	High Frequency Structure Simulator
GPU	Graphics Processing Unit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
RF	Radio Frequency
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WIMAX	Worldwide Interoperability for Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Anten sistemi	9
Şekil 3.2. Anten sisteminin thevenin eşdeğer devresi.....	10
Şekil 3.3. Açıklık anten çeşitleri	12
Şekil 3.4. Tel anten çeşitleri.....	13
Şekil 3.5. Dizi anten çeşitleri	14
Şekil 3.6. Mikroşerit anten.....	15
Şekil 3.7. Bant genişliği	16
Şekil 3.8. Üç boyutlu ve iki boyutlu hüzmeye genişliği.....	17
Şekil 3.9. Verici anten thevenin ve northon eşdeğer devreleri	18
Şekil 3.10. Polarizasyon çeşitleri	19
Şekil 3.11. Işıma örüntüsü	22
Şekil 3.12. Temel mikroşerit anten	24
Şekil 3.13. Mikroşerit dipol anten.....	26
Şekil 3.14. Monopol yama anten	27
Şekil 3.15. Yürüyen dalga anten çeşitleri	28
Şekil 3.16. Temel mikroşerit yarık anten.....	28
Şekil 3.17. Mikroşerit yama anten geometrileri.....	29
Şekil 3.18. Koaksiyel (eş eksenli) besleme.....	30
Şekil 3.19. Açıklık bağlaşımlı besleme tekniği	31
Şekil 3.20. Elektromanyetik bağlaşımlı besleme tekniği.....	32
Şekil 3.21. Mikroşerit hat besleme çeşitleri.....	33
Şekil 4.22. Önerilen antenin ön ve arka yüzleri.....	37
Şekil 4.23. CNC cihazı	39
Şekil 4.24. Vakum pompası motoru	39
Şekil 4.25. CNC metal tabaka.....	40
Şekil 4.26. CNC kazıma ucu.....	41
Şekil 4.27. Üretilen mikroşerit yama antenin ön (a) ve arka (b) görünüşü.....	41
Şekil 4.28. Önerilen antenin ölçümü.....	41
Şekil 4.29. Önerilen antenin simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen S_{11} grafiği	42

Şekil 4.30. Üç düzlem kesit (x-y, x-z ve y-z) üzerinde (a) 24 GHz ve (b) 28 GHz'de antenin kazanç desenleri.....	44
Şekil 4.31. Üç farklı senaryo için antenlerin geometrileri	46
Şekil 4.32. Üç farklı senaryo için antenlerin S_{11} simülasyon sonuçları.....	46
Şekil 4.33. 0.8, 1.6 ve 2.4 mm FR-4 alttaş kalınlıkları (h) için antenlerin S_{11} 'leri.....	47



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Literatürde incelenen bazı çalışmalar tablosu.....	8
Çizelge 3.1. Mikroşerit anten avantajları ve dezavantajları.....	25
Çizelge 4.1. Önerilen antenin boyutları	37
Çizelge 4.2. Önerilen antenin performans parametreleri	43
Çizelge 4.3. Üç farklı senaryo için önerilen antenlerin performans parametreleri.....	45
Çizelge 4.4. FR-4 alttaş kalınlığı 0.8 ve 1.6 mm için anten performans parametreleri	47



1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan haberleşme sistemleri incelendiği zaman bilgi akışını sağlayan elektromanyetik dalgaların aktarımı için antenlerin çok önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Güncel sistemlerde ihtiyaç duyulan yüksek veri hızı ve aynı anda gönderilen-alınan veri kapasite büyüklüğü gibi parametreleri destekleyecek, yüksek performanslı (Chung *et al.* 2011, Niknejad *et al.* 2015) antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Mobil haberleşme teknolojisi, kablosuz ve mobil cihazların kullanımının artması nedeniyle her geçen gün gelişmektedir. Bu nedenle birinci nesilden (1G) dördüncü nesile (4G) kadar geliştirilen mobil haberleşme teknolojisi (Gupta 2013) günümüzde kullanıcıların taleplerini karşılayamaz hale gelmiştir. Kullanıcı ihtiyaçlarına yanıt verebilmek adına beşinci nesil (5G) mobil haberleşme teknolojisi (Vora 2015, Andrews *et al.* 2014) ortaya atılmıştır. Bu teknolojiyle birlikte, 4G mobil haberleşme teknolojisinden daha yüksek veri hızı, daha geniş bant, daha büyük kapasite ve daha düşük gecikme süresi sağlayabilen 5G teknolojisi (Andrews *et al.* 2014) talepleri karşılamak için geliştirilmiştir. Bu nedenle, 5G mobil haberleşme için düşük maliyetli, hafif ve geniş bant aralığında yüksek performans gösteren ve lisanslı frekans bantlarında çalışan antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Federal İletişim Komisyonu (FCC) (Anonymous 2020) tarafından 6 GHz üzerindeki 5G frekans bantları (Anonymous 2019, Anonymous 2020) (24.25-24.45 GHz, 24.75-25.25 GHz, 27.5-28.35 GHz, 37-37.6 GHz ve 37-38.6 GHz) belirlenmiştir.

Günümüzde popüler olan ve kullanımları giderek artan otonom araç, artırılmış gerçeklik (VR) vb. teknolojiler için gerekli olan yüksek veri hızı ihtiyacı da 5G haberleşmesini (Moreno *et al.* 2018) kaçınılmaz kılmıştır. 5G teknolojisi, yüksek bir çoklu Gb/sn veri hızı sağlayabilmek için 24 ve 28 GHz'de daha yüksek bir frekans bandı kullanır ve 2020'ye kadar bugünün kapasitesinin 100 katına ve 2030'a kadar 1000 katına kadar (Rao and Sai 2013) destekleyebileceği ön görülmektedir. Bunların yanı sıra bugün haberleşme esas olarak insan odaklı olsa da gelecekte çok sayıda makine birbirleriyle ve insanlarla haberleşeceği (Wu *et al.* 2011, Li *et al.* 2011) düşünülmektedir. Hızlı bağlantı ve veri hızı ile 4G haberleşmesinin sunduğu orana göre, 5G haberleşmenin bu ihtiyaçlara yeterince cevap vereceği ön görülmektedir. Bu ihtiyaçlara paralel olarak günümüzde kullanılan mobil cihazların tasarımsal özelliklerine uyumlu olacak hafif, küçük ve

maliyeti az olan antenlere ihtiyaç vardır. Bu şartları sağlayan anten türü mikroşerit yama antenlerdir.

5G mobil haberleşme teknolojisi ile daha önce varolan haberleşme teknolojileri arasındaki en önemli fark, daha geniş bant genişliği elde etmenin daha kolay olduğu daha yüksek frekanslarda çalışabilecek antenlerin kullanılacak olmasıdır. Bu nedenle anten tasarımı, 5G mobil haberleşme teknolojisinin en önemli parçalarından biridir. 5G teknolojisinde anten tasarımında, düşük maliyeti, küçük boyutu ve hafifliği nedeniyle en yaygın anten türü olan mikroşerit yama anten kullanılmaktadır.

5G mobil haberleşme teknolojisi için anten tasarımı, araştırmacılara yeni zorluklar getirmektedir. Anten tasarımındaki zorluklardan biri, özellikle yüksek frekanslarda nispeten yüksek kayıplı ve düşük maliyetli olan FR-4 alttaşı üzerinde küçük boyutlu anten üretimidir. 5G antenlerinin milimetrik boyutlarda olması, konnektör modellemesindeki hatalar, konnektör pimi ile besleme hattı arasındaki lehimleme sorunları ve fabrikasyon yeteneklerindeki diğer hatalar nedeniyle anten üretiminde zorluklar oluşmaktadır. Bununla birlikte, FR-4 alttaşının kolay bulunabilir ve sağlam olması, iyi mekanik ve elektriksel özelliklere sahip ve yaygın olarak kullanılan PCB baskı devre malzemesi olması tercih sebepleridir. Bu nedenle, FR-4 alttaşının anten üretiminde kullanılması, üreticilere önemli maliyet tasarrufu ve bahsedilen avantajları sağlamaktadır.

Literatürde, 6 GHz (Haraz *et al.* 2015, Oraroudiparchin *et al.* 2015, Outerelo *et al.* 2015, Gampala and Reddy 2016, Jandy *et al.* 2017, Ta *et al.* 2017, Kaeib *et al.* 2019, Hicdurmaz and Gumus 2019, Teresa and Umamaheswari 2020, Przesmycki *et al.* 2021) üzerindeki 5G frekans bantlarında çalışan birçok mikroşerit anten önerilmiş ve küçük geometrik boyutları, anten bant genişliği ve kazançları ile karakterize edilmiştir. Bunların çoğu, düşük dielektrik sabiti, ultra düşük kayıp tanjantı ve yüksek maliyeti olan bir alttaşı üzerinde tasarlanmıştır.

Bu çalışmada önerilen anten, düşük maliyetli ve kayıplı bir FR-4 alttaşı üzerinde tasarlanmış ve üretilmiştir. Önerilen anten, düşük maliyetli ve kayıplı bir alttaşı üzerinde üretilmesine rağmen, antenin kazanç modelleri ve bunların maksimum değerleri, 5G mobil haberleşme için en az literatürdeki antenler kadar uygundur. Antenin sayısal

analizi, sonlu farklar zaman alanı (FDTD) tabanlı hesaplamalı elektromanyetik simülatör (CEMS) yazılımı ve sonlu integrasyon tekniği (FIT) tabanlı CST yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Önerilen anten, 24 ve 28 GHz olan çift frekans bantlarında çalışmaktadır. Önerilen antenin performansı, simüle edilmiş ve ölçülen sonuçlarla doğrulanmıştır. Anten maksimum kazanç değerleri 24 ve 28 GHz'de sırasıyla 3.20 dBi ve 3.99 dBi'dir. Önerilen anten, 5G mobil haberleşme cihazları için uygun olabilecek çok yönlü ışıma deseni sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen anten performansını değerlendirmek için iki farklı parametrik çalışma yapılmıştır. Antenin üst yüzünde bulunan yamaların, topraklama düzleminin boyutlarının ve farklı kalınlıklardaki FR-4 alttaşların, antenin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde, 6 GHz üzerindeki 5G frekanslarında çalışan birçok mikroşerit yama anten önerilmiş ve küçük geometrik boyutları, anten bant genişlikleri ve kazançları ile karakterize edilmiştir. Önerilen antenlerin birçoğu, düşük dielektrik sabiti, ultra düşük kayıp tanjantı ve yüksek maliyeti olan alttaşlar üzerine tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, 5G için özellikle geniş bant genişlikleri ve yüksek kazançlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu özellikleri elde edebilmek için çeşitli tasarımsal değişiklikler, besleme tekniklerinde değişiklikler, dizi anten denemeleri gibi yöntemlere başvurulmuştur. Literatürde varolan 5G antenler için yapılan çalışmalar bu bölümde ele alınmıştır.

Venkateshkumar et al., çalışmalarında 5G uygulamaları için 23 GHz ve 28 GHz frekanslarında çalışan ve yanısıra Wi-Fi, WiMax, Bluetooth ve WLAN uygulamaları için kullanılabilecek mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu tasarımda mikroşerit hat besleme yöntemi kullanılmıştır ve dielektrik malzeme olarak FR-4 alttaş kullanılmıştır. Bu çalışmada yamanın şekli dairesel yerine dikdörtgen seçilerek yüksek kazanç elde edilmesi amaçlanmıştır. Tasarımda yama üzerine besleme hattının birleşim noktasına eşit uzaklıkta iki yarık açılarak ve antenin ışıma yapan kısmına da yarıklar açılarak bant genişliği ve çalışma frekansı artırılmaya çalışılmıştır. Bu teknikler neticesinde elde edilen anten tasarımı HFSS kullanılarak simüle edilmiş olup çalışma frekansı, bant genişliği ve kazanç gibi değerler gösterilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılan anten 28.9 GHz’de rezonansa girmiş ve geri dönüş kaybı - 30.44 dB olarak elde edilmiştir. Elde edilen maksimum kazanç ise 5.44 dB olmuştur. Yapılan tasarım ile daha küçük ve verimli antenlerin üretilebileceği gösterilmiştir. (Venkateshkumar *et al.* 2020)

Kiran et al., yapmış oldukları çalışmada 28 GHz ve 50 GHz frekanslarda rezonansa giren, 5G uygulamaları için uygun, mikroşerit yama anten tasarlamışlardır. Mikroşerit yama anteni öncelikle geleneksel düzlemsel yama şekliyle tasarlanmış ve daha sonra bu tasarım üzerinde çeşitli yarıklar açılmıştır. Bu sayede tasarlanan antenin yer problemini çözerken verimliliğini de kabul edilebilir seviyeye getirmeye çalışmışlardır. Tasarımda mikroşerit hat besleme yöntemi kullanılmış ve dielektrik malzeme olarak Rogers RT/duroid 5880 kullanılmıştır. Tasarımlar HFSS benzetim programı yardımıyla

yapılmıştır. Çalışma neticesinde anten, 5G için aday frekanslardan olan 28.3 GHz ve 50.3 GHz frekanslarda rezonansa girmiş ve sırasıyla -21 dB ve -31 dB değerlerinde geri dönüş kaybı değerleri elde edilmiştir. Bu frekanslar için elde edilen maksimum kazanç ise 2.6 dB olmuştur. (Kiran *et al.* 2018)

Mungur ve Duraikannan yapmış oldukları çalışmada yerel çoklu dağıtım servisi (LMDS) bandında (26 GHz-29 GHz) rezonansa giren dikdörtgen yama geometrisine sahip bir mikroşerit yama anten tasarımı yapmışlardır. Yaptıkları tasarımda mikroşerit hat besleme tekniğini kullanmışlardır ve birbirine bağlı iki besleme hattı kullanarak 50 ohm giriş empedansına sahip bir besleme hattı oluşturmuşlardır. Dielektrik malzeme olarak Rogers RT Duroid 5880 kullanılmıştır. Tasarımlar HFSS benzetim programı yardımıyla yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde önerilen anten -12.59 dB geri dönüş kaybı ile 27.91 GHz frekansta rezonansa girmiştir. Bu rezonans frekansında maksimum kazanç 6.69 dB ve ışıma modeli çok yönlü olarak elde edilmiştir. (Mungur and Duraikannan 2018)

Mourad S. Ibrahim, yaptığı çalışmada, 28 GHz ve 60 GHz frekanslarında çalışan iç ve dış sistemlerde beşinci nesil (5G) uygulamalara uygun çok yönlü ışıma modeline sahip çift bantlı tek kutuplu bir anten tasarımı geliştirilmiştir. Önerilen tek kutuplu anten, iki dikdörtgen parçadan oluşan bir mikro şerit ve T şeklinde katlanmış bir yama kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada, analiz ve optimizasyon işlemleri, sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanan HFSS ve sonlu integral tekniğini (FIT) kullanan CST kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rezonans frekanslarında elde edilen bant genişliği sırasıyla yaklaşık 1.44 GHz ve 39.24 GHz'dir. Antenin yönlülüğü, 28 GHz'de yaklaşık 2.28 dBi ve 60 GHz'de yaklaşık 3.414 dBi'dir. Böylelikle iki yöntem arasında elde edilen sonuçlar bakımından iyi bir uyum sağlanmıştır. (Mourad 2018)

Haneef et al., 5G mobil uygulamalar için 28 GHz'de optimize edilmiş 2x2 dizi anten tasarımı yapmışlardır. Bu çalışmada mikroşerit hat beslemesi kullanılmış ve dielektrik malzeme olarak RT6010 kullanılmıştır. Yama üzerine yarıklar açarak kazancı artırmayı hedeflemiş ve kazancın yüksek olması için ihtiyaç duyulan anten boyutlarının altına inerek daha kompakt bir anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarımda U ve dairesel şekilli yarıklı yama anten kullanılmıştır. Böylece, istenilen kazancı ve bant

genişliğini kolaylıkla elde etmişlerdir. Anten simülasyonlarını HFSS benzetim programıyla yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucu %83,21 verimlilikle 18.3 dB'lik kazanç elde ettikleri görülmüştür. (Haneef *et al.* 2019)

Nho ve Hung, 5G haberleşme sistemleri için 28 GHz'de çalışan bir dizi anten tasarlamışlardır. Tasarımda, frekans bandı hem verici antenin kendisi hem de kullanılan çeyrek dalga dönüştürücüleri tarafından sınırlandırıldığından, pasif verici antenlerin frekansını 5 kat oranında artırmıştır. Bu tasarımda oluşturan devre için tasarımsal yaklaşımlar açıklanmıştır. Tasarım için dielektrik katman olarak Rogers RO4350 kullanılmıştır. Önerilen adımlar HFSS benzetim programında simüle edilmiş ve diyagram devreleri de NI AWR programında yapılmıştır. Anten beslemesi olarak mikroşerit hat beslemesi tercih edilmiştir. (Nho and Hung 2019)

Jandi et al., yaptıkları çalışmada 5G haberleşme sistemleri için kompakt boyutta ($19 \times 19 \times 0.787 \text{ mm}^3$) dual bant bir yama anten tasarımı yapmışlardır. Önerilen anten, 10.15 GHz ve 28 GHz'de rezonansa girmektedir. Bu çalışmada, dielektrik alttaş olarak Rogers 5880 kullanılmıştır. Belirtilen frekanslarda sırasıyla 5.51 dB ve 8.03 dB'lik kazançlar elde edilmiştir. Ayrıca anten tasarım süreçleri HFSS ve CST ile ortak zamanlı yapıp simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve uyumun çok iyi olduğu görülmüştür. (Jandi *et al.* 2017)

Imran et al., yaptıkları çalışmada 38 GHz ve 54 GHz merkez frekanslarında rezonansa giren sırasıyla 1.94 GHz ve 2 GHz bant genişliklerine sahip olan düşük maliyetli ve kompakt bir mikroşerit yama anten tasarımı önermişlerdir. Önerilen antende, mikroşerit hat besleme tekniği kullanılmış ve kazancı artırmak için dizi anten tekniği kullanılmıştır. Dielektrik katman olarak Rogers RT 5880 kullanılmıştır. 4 mm aralıklı 4 elemanlı dizi antenden 12 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir. Önerilen anten 5G haberleşme sistemleri için uygundur. Anten tasarımı ve analizi CST programı ile yapılmıştır. (Imran *et al.* 2018)

Rahman et al., yaptıkları çalışmada 5G uygulamaları için çok bantlı bir dizi yama anten önermişlerdir. Tasarlanan anten, Wi-Fi için 2.4 GHz, WiMAX için 7.8 GHz ve 5G uygulamaları için 33.5 GHz frekanslarında rezonansa girmektedir. Önerilen antenin

tasarım ve simülasyonu CST benzetim programı ile yapılmıştır. Analizler sonucunda 2.4 GHz’de verimlilik yaklaşık olarak %24.6, 7.8 GHz için % 35,8 ve 33.5 GHz için %41,67 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bant genişlikleri sırasıyla 2.4 GHz için 150 MHz, 7.8 GHz için 235 MHz ve 33.5 GHz için yaklaşık olarak 4.5 GHz olarak gözlemlenmiştir. 5G frekansı için elde edilen toplam kazanç ise 5.06 dB olmuştur. (Rahman *et al.* 2018)

Rahayu ve Hidayat, 5G mobil haberleşme için tekli, ikili, dört ve altı elemanlı çift bantlı (28/38 GHz) mikroşerit yama anten tasarımları yapılarak çeşitli parametreler üzerinde incelemeler yapmışlardır. Önerilen anten, 2.2 dielektrik sabiti, 0.0009 kayıp tanjanı ve 1.575 mm kalınlığa olan Rogers Duroid 5880 alttaş üzerine tasarlanmıştır. Tasarlanan anten 50 ohm giriş empedansına sahip mikroşerit hat besleme ile besleme hattı oluşturulmuş üçgen şekilli bir yamadan oluşmaktadır. Elde edilen veriler ışığında en yüksek kazançlar her iki frekans bandı için de altı elemanlı diziler ile sağlandığı görülmüştür. 28 GHz’de, -30.70 dB geri dönüş kaybı elde edilmiş ve maksimum kazanç 7.47 dBi olarak elde edilmiştir. 38 GHz’de, -34.5 dB’lik bir geri dönüş kaybı görülmekte ve maksimum kazanç ise 12.1 dBi olarak elde edilmiştir. Antenin tasarımı ve analizleri CST benzetim programı ile yapılmıştır. (Rahayu and Hidayat 2018)

Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen antenlerin performansları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Literatürde incelenen bazı çalışmalar tablosu

Referans	Rezonans Frekansı (GHz)	S ₁₁ (dB)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dBi)	Anten Boyutları (mm)
U. Venkateshkumar et al.	23.3	-15.58	600	5.44	50×45×1.6
	28.9	-30.44	690		
T. Kiran et al.	28.3	-20.84	1900	2.6	11×8×0.5
	50.3	-30.78	7900		
D. Mungur et al.	27.91	-12.59	582	6.69	14.7×7.9×0.254
M. S. Ibrahim et al.	28.24	-16.2	1440	-	-
	60.76	-32.3	39240	-	
S. R. Haneef et al.	28.1	-22.95	1390	18.3	12×12×1.6
L. C. Nho et al.	28	-20.0	1600	-	-
Y. Jandi et al.	10.15	-27.5	278	5.51	19×19×0.787
	28.1	-24.5	1000	8.03	
D. Imran et al.	38.6	-13.6	3500	12.2	6×6.25×0.578
	54.3	-18.0	1300	12.1	
A. Mahabub et al.	33.5	-29.01	4503	5.06	62×50×0.8
Y. Rahayu	28	-30.7	4427	7.47	35×25×1.575
	38	-34.75	3537	12.1	
O. M. Haraz et al.	28	-	-	4.2	0.8 λ_0 × 0.75 λ_0
	38	-		6.9	
N. Ojaroudiparchin et al.	28	-18	-	13	-
D. A. Outerelo et al.	28	-34	1100	-	-
	60	-35	4000		
S. X. Ta et al.	26	-34	3200	4.5	-
	38	-25	1600	5.8	
A. F. Kaeib et al.	28	-26.05	2386	5.7	8.06×6.96×0.8
P. M. Teresa and G. Umamaheswari	28	-27.79	2620	6.59	7 × 7 × 0.8
R. Przesmycki	28	-22.51	5570	3.6	6.2 × 8.4 × 1.57

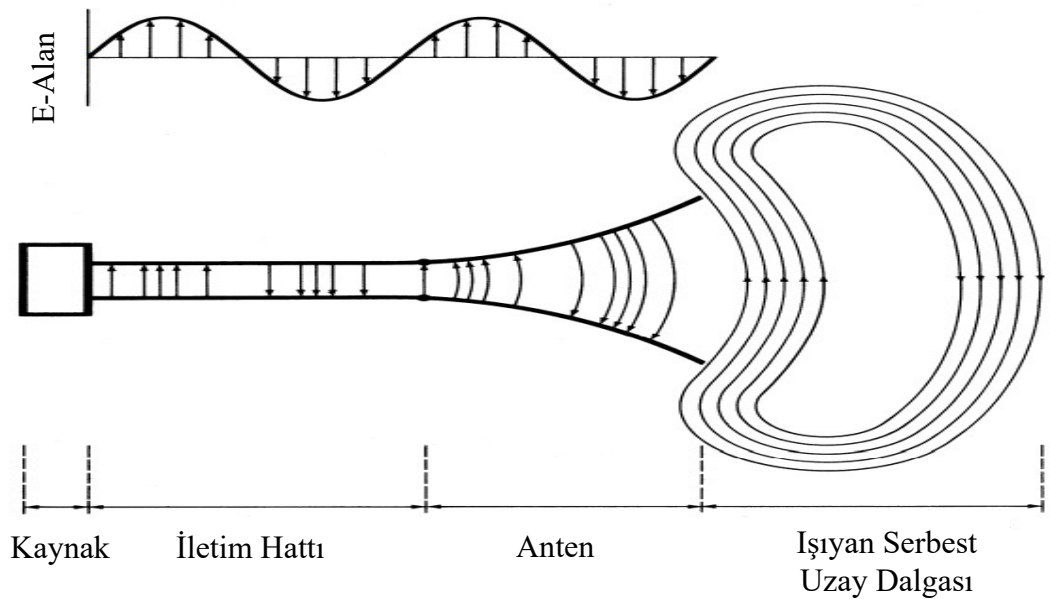
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Anten ve Özellikleri

3.1.1 Anten tanımı

Maxwell, 1864 yılında geliştirmiş olduğu denklemlerle zamana göre değişen elektrik ve manyetik alanların birlikte bir dalga oluşturduğunu ispatlamıştır. Bu ispattan önce bu iki alanın birbirinden bağımsız olduğu düşünülmekteydi. Devrim niteliğinde olan bu ispat ile kablosuz haberleşmenin temelini oluşturan elektromanyetik dalga 1868 yılında Heinrich Rudolf Hertz tarafından deneysel verilerle kanıtlanmıştır. Bu deneyde ise anten kavramı ilk defa ortaya çıkmıştır. Çünkü, Hertz çalışmalarında voltaj değişimlerinden yararlanarak oluşturduğu sinyalleri dipol antenle iletmiştir. 1897 yılında ise radyonun mucidi olan Marconi yaptığı çalışmalarda anten ile alakalı gelişime hız vermiştir.

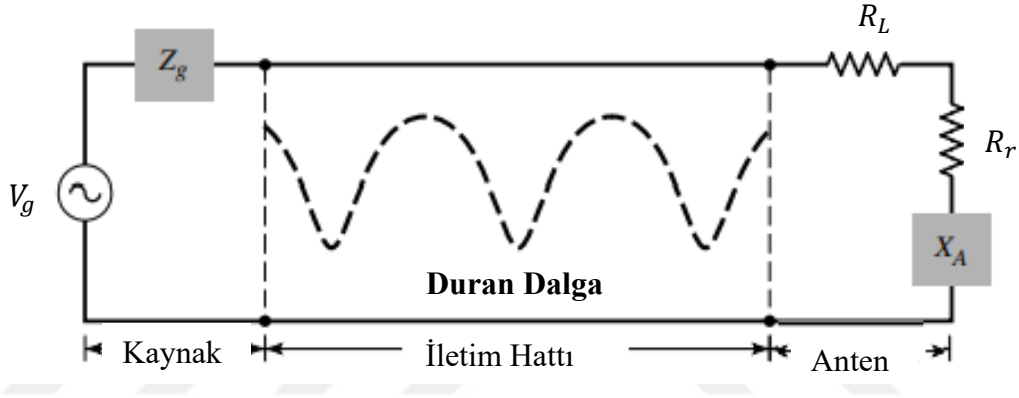
Kısa tanımıyla anten; sistemden aldığı güç ile çevresine elektromanyetik dalga yayan veya yayılan elektromanyetik dalgayı toplayan, genelde metal olan bir cihazdır. Aslında antenler kaynak ve iletim hattı ile elektromanyetik dalganın yayıldığı boşluk arasında bir ara elemandır. Şekil 3.1’de bir anten sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Anten sistemi (Balanis 2005)

Antenler alıcı anten ve verici anten olmak üzere iki temel yapıda kullanılırlar. Alıcı antenler çevrede yayılan elektromanyetik dalgaları toplayıp sisteme aktarımını yaparken, verici antenler ise sistemden aldıkları veriyi kaynak yardımıyla elektromanyetik dalgaya çevirir ve çevreye yayma işlemini gerçekleştirir. Günümüzde hem alıcı hem de verici anten (Akkaya 1997) olarak kullanılan yapılar da mevcuttur.

Anten kavramını daha iyi anlayabilmek için anten sisteminin matematik modelini çıkarmak önemlidir. Bir anten sisteminin Thevenin eşdeğeri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Anten sisteminin thevenin eşdeğer devresi (Balanis 2005)

Z_A ile belirtilen antenin empedans değeridir. Z_A 'nın değeri aşağıdaki denklem yardımıyla bulunabilir.

$$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A \quad (3.1)$$

Bu denklem aslından antenin sisteme bağlanmasını ifade etmektedir. R_L antenin kayıp rezistansı, R_r ışıma direnci, X_A reaktans olarak adlandırılmaktadır. Antenin çalışması için gereken ideal koşullarda kaynağın ürettiği enerjinin tamamı ışıma direncine (R_r) aktarıldığı düşünülebilir. Ancak günümüzdeki anten sistemlerinde iletim hattı kaybı, dielektrik kayıplar ve iletim hattı ile anten arasındaki uyumsuzluklardan dolayı yansıma kayıpları da mevcuttur. Eğer sistem uygun tasarlanmamış ve empedans uyumuna dikkat edilmemişse iletim hattı beklenenin aksine enerji depolama işlemi yapacaktır ve verimli çalışması mümkün olmayacaktır.

Antenler sadece elektromanyetik dalga yayma veya toplama işlemi yapmazlar. Mobil haberleşme sistemlerinde kaynaktan aldıkları enerjiyi istenen yönde göndermek gibi işlemleri yapması da beklenmektedir. İdeal olarak üretilen ve çalışan bir anten kaynaktan almış olduğu tüm gücü istenilen yönde istenilen şekilde iletmesi gerekmektedir. Fakat, kayıpsız anten üretmek imkânsızdır. Çeşitli sistemler için farklı antenler geliştirilmiş ve üretilmiştir.

3.1.2. Anten çeşitleri

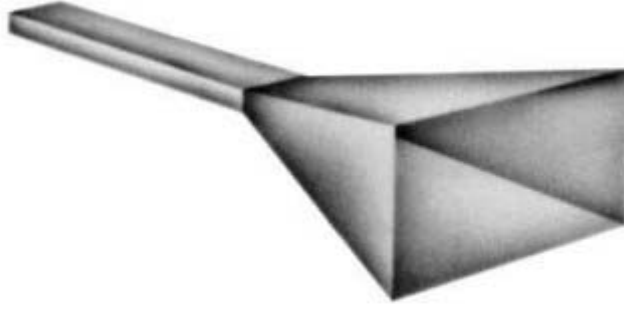
Günümüzde kullanılan haberleşme sistemlerinde ortaya çıkan gereksinimlere karşılık verebilmek için çeşitli özelliklere sahip antenler ortaya çıkmıştır. Bu çeşitlilikte ihtiyaca uygun anten seçimi yaparken;

- Çalışma Frekansı
- Bant Genişliği
- Boyut
- Polarizasyon
- Kazanç
- Verimlilik

v.b. parametrelere dikkat edilerek, seçim yapılması uygun olacaktır. Sıradaki bölümde temel anten yapılarından olan açıklık antenler, tel antenler, dizi antenler ve mikroşerit antenler hakkında bilgiler verilecektir.

3.1.2.1. Açıklık antenler

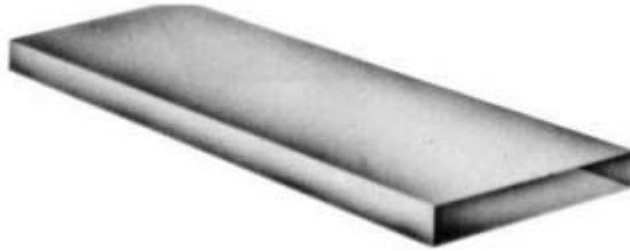
Bu anten türü, yüksek frekansta çalışma ihtiyacı duyan sistemler için idealdir. Açıklık antenler yönlülük gereken sistemlerde sıkça kullanılır. Genellikle uçaklar ve uzay araçları için yapılan uygulamalarda tercih edilir. Bu antenler eliptik, dikdörtgen, doğrusal veya ihtiyaç duyulan herhangi bir şekilde üretilebilirler. Şekil 3.3'te en sık kullanılan geometrik yapılarıyla gösterilmiştir.



(a) Piramidal



(b) Konik

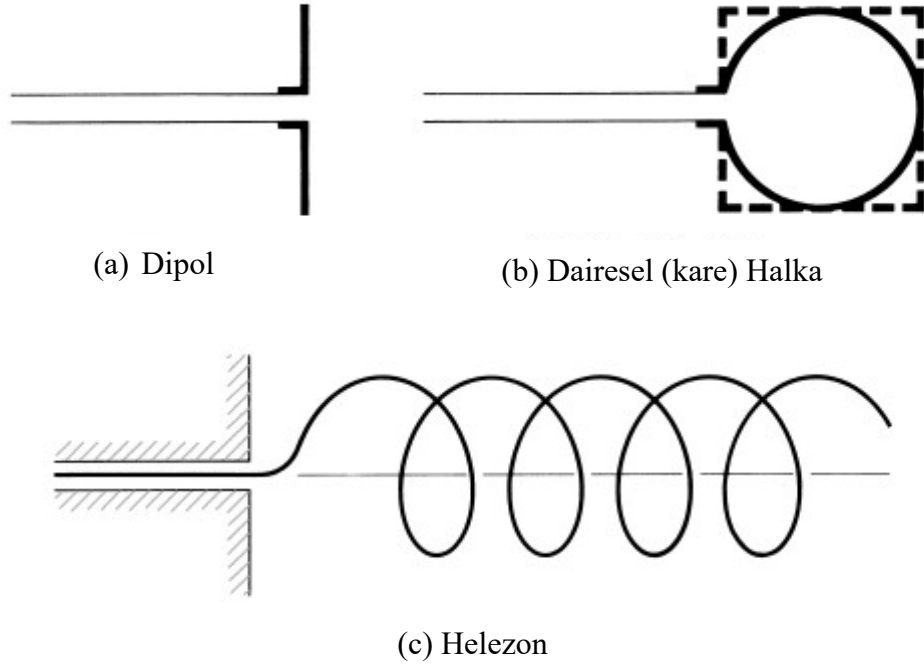


(c) Dikdörtgen Dalga Kılavuzu

Şekil 3.3. Açıklık anten çeşitleri (Balanis 2005)

3.1.2.2. Tel antenler

Günlük hayatta karşımıza en sık çıkan anten türüdür. Üretim maliyetlerinin düşük olması ve üretimlerindeki kolaylık nedeniyle evlerde, arabalarda, gemilerde ve uzay araçlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu antenler yönlülük ihtiyacı olan uygulamalar için uygun değildir. Çünkü her yöne eşit ışıma yaparlar. Genellikle dikdörtgen, kare ve elips şeklinde tasarlanırlar da ihtiyaç duyulan herhangi bir şekilde de tasarlanıp üretilebilirler. Yüksek frekans bantlarından düşük frekans bantlarına kadar ihtiyaç duyulan uygulamalar için kullanabilecek geniş frekans yelpazesine sahiptir. Şekil 3.4’te farklı geometrilerdeki tel anten çeşitleri gösterilmiştir.



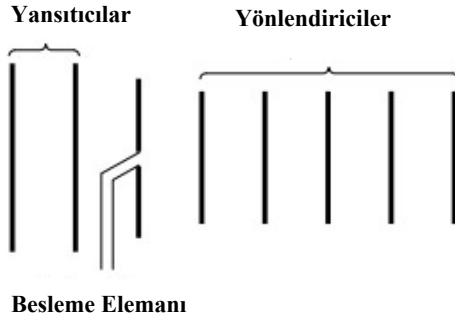
Şekil 3.4. Tel anten çeşitleri (Balanis 2005)

3.1.2.3. Dizi antenler

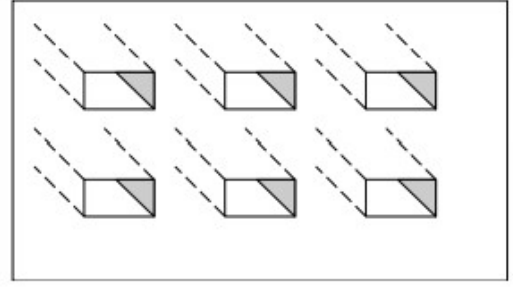
Bu anten türü, ihtiyaç duyulan özellikleri sağlayabilmek için benzer özellikteki yapıların art arda dizilmesiyle oluşturulan bir yapıdır. Buradaki amaç;

- Yönlendiricilik
- Kazanç
- Işıma özelliği
- Bant genişliği

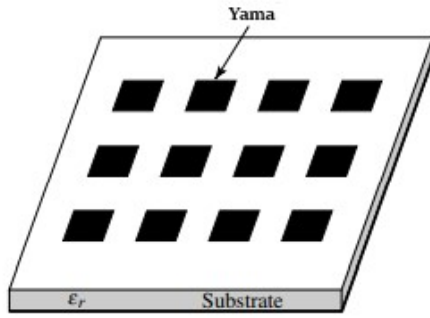
gibi özellikleri artırmak ve anteni daha verimli hale getirmektir. Şekil 3.5'te dizi anten çeşitleri gösterilmiştir.



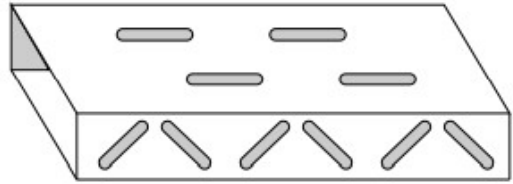
(a) Yagi Uda Dizisi



(b) Açıklık Dizisi



(c) Mikroşerit Yama Dizisi

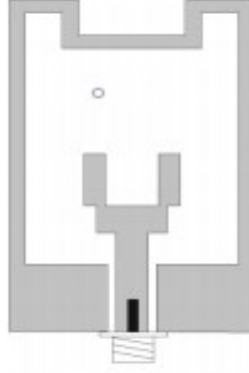


(d) Yarıklı Dalga Kılavuzu Dizisi

Şekil 3.5. Dizi anten çeşitleri (Balanis 2005)

3.1.2.4. Mikroşerit antenler

1970’li yıllarda gelişen uzay, uydu, uçak, radar sistemleri gibi sektörler için ihtiyaç duyulan bu anten türü; üretim maliyetlerinin az olması, verimli olması, yüksek kazançlı olması, küçük boyutları ve hızlı veri aktarımına uygun yapısı nedeniyle popüler olmuştur. Şekil 3.6’da geleneksel bir mikroşerit anten gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Mikroşerit anten (*Liu et al. 2012*)

Mikroşerit antenler dielektrik katman üzerine bina edilen çeşitli geometrik yapılara sahip olan, yama ve dielektrik katman alt yüzeyinde yama ile aynı metal kaplanan topraklama düzleminden oluşur. Yama olarak adlandırılan kısım ısımayı sağlayan parçadır. Yama ve topraklama yüzeyleri, genellikle iletkenliği yüksek olan altın, gümüş, bakır vb. metaller kullanılmaktadır. Yama ve topraklama kısımları genellikle düzlemseldir. Fakat özel uygulamalar için düzlemsel olmayan yapılar da kullanılmaktadır.

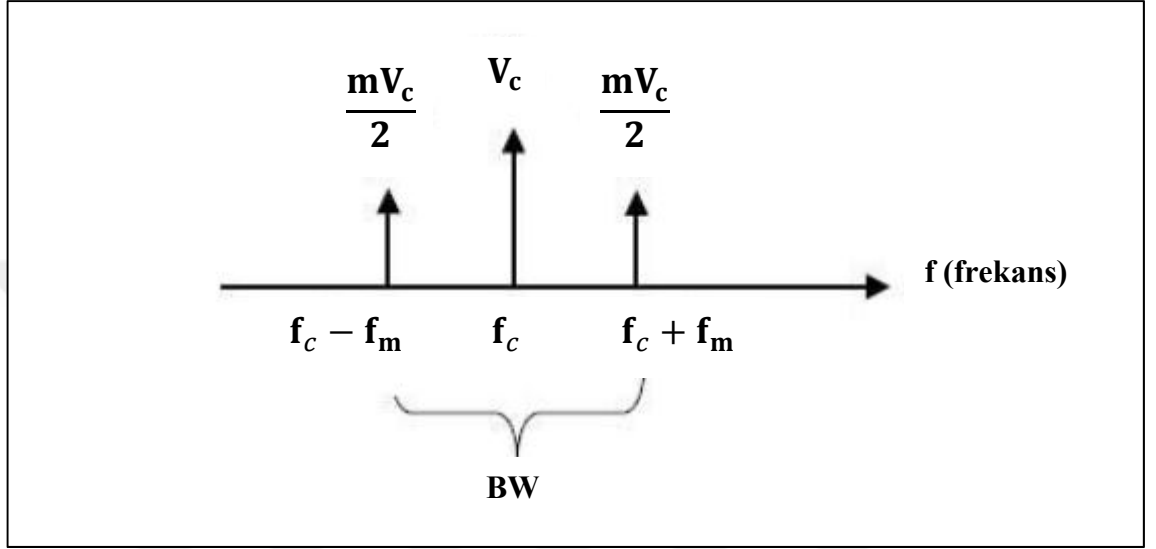
Bu çalışmada mikroşerit yama anten kullanıldığı için ilerleyen bölümlerde daha detaylı anlatılacaktır.

3.1.3. Anten parametreleri

Bu bölümde anten çalışmasına etki edecek ve tasarımsal hesaplamalar ve analizler için gerekli olan temel anten parametrelerinden bahsedilecektir. Bu parametreler tasarımsal işlemleri kolaylaştırdığı gibi aynı zamanda analizler sonucunda ihtiyaç duyulan özelliklerin elde edilip edilmediğinin kontrolünü sağlamayı da kolaylaştırmaktadır.

3.1.3.1. Bant genişliği

Antenin merkez frekansı olarak adlandırılan çalışma frekansının sağındaki ve solundaki frekansların arası, antenin çalıştığı bant genişliğini ifade etmektedir. Şekil 3.7’de bant genişliği gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Bant genişliği

Bant genişliği belirlenirken antenin yansımaya katsayısının -10 dB altına bakılır. Bant genişliği formülü aşağıda verilmiştir.

$$BW = f_{max} - f_{min} \quad (3.2)$$

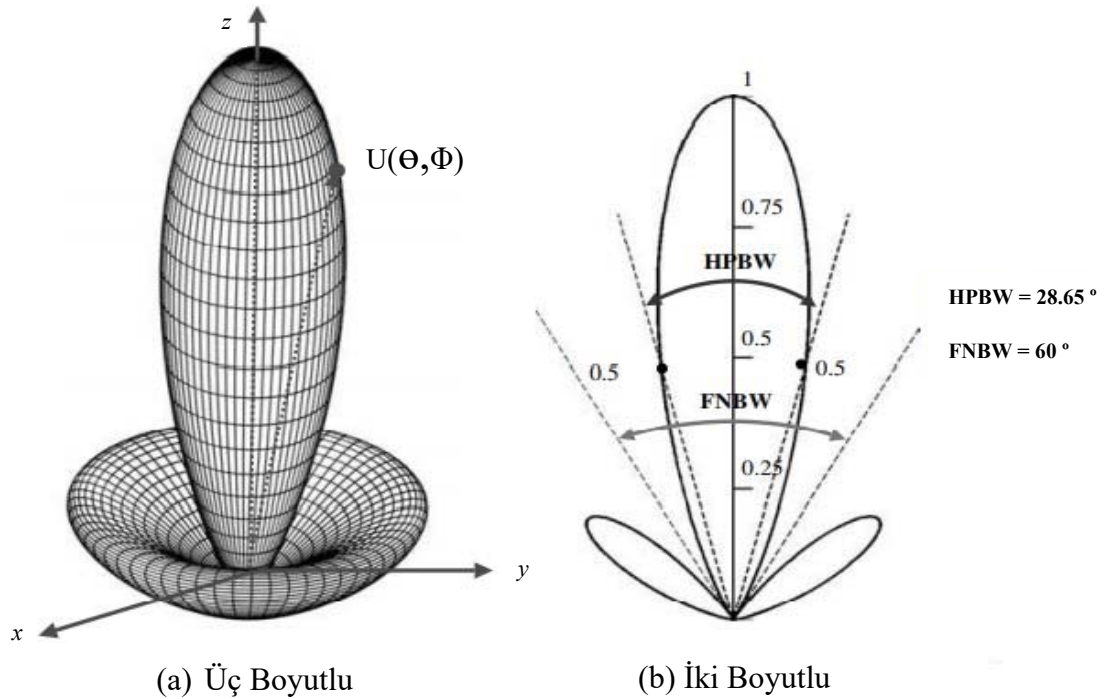
Burada f_{max} antenin çalışabileceği maksimum frekansı f_{min} ise minimum çalışabileceği frekansı ifade etmektedir. Bant genişliğinin oranına göre dar bant, geniş bant ve ultra geniş bant olarak antenleri sınıflandırmak mümkündür. Bant genişliği oranı formülü aşağıda verilmiştir.

$$BW(\%) = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \quad (3.3)$$

3.1.3.2. Hüzme genişliği

Bu parametre anten deseniyle alakalı bir değerdir. Birkaç hüzme çeşidi vardır. En önemlisi ise yarım güç hüzme genişliğidir (HPBW). IEEE bu parametreyi; maksimum yönlülüğün olduğu yönde, ışıma şiddetinin yarıya düştüğü iki yön arasındaki açı (Kraus 1966) olarak ifade etmiştir.

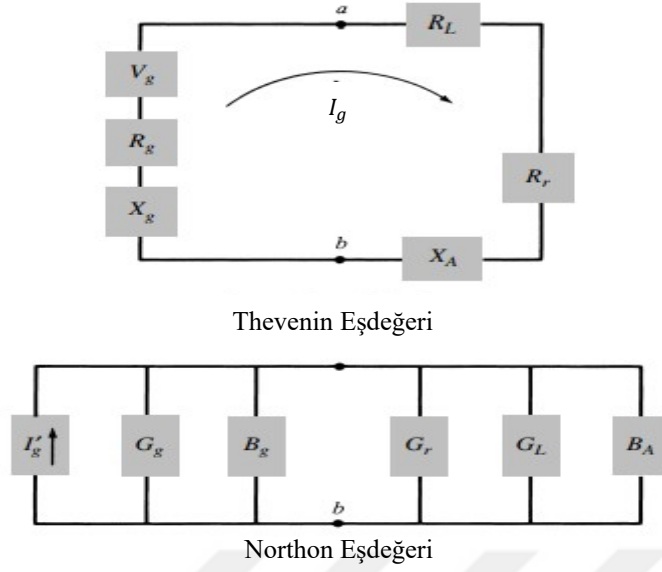
Bir diğer önemli hüzme genişliği ise ilk sıfır hüzme genişliğidir (FNBW). Bu hüzme genişliği ise ilk sıfır noktaları arasındaki açısal açıklığı ifade etmektedir. Belirtilen bu iki önemli hüzme genişlikleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Üç boyutlu ve iki boyutlu hüzme genişliği (Warren and Gary 1998)

3.1.3.3. Giriş empedansı

Bir anten sisteminde giriş empedansı bir çift terminalde voltaj akım oranı olarak tanımlanabilir. Verici görevi yapan anten giriş empedansının Thevenin ve Northon eşdeğer devresi Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Verici anten thevenin ve northon eşdeğer devreleri (Balanis 2005)

Anten giriş empedansını hesaplamak için gereken denklemler aşağıda verilmiştir.

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (3.4)$$

Burada X_A empedansın sanal kısmını R_A ise reel kısmını vermektedir. Reel kısmının hesaplaması ise aşağıdaki denklem aracılığıyla yapılmaktadır.

$$R_A = R_r + R_L \quad (3.5)$$

R_A , a-b uçları arasındaki direnci, R_r antenin ışıma direncini ve R_L ise a-b uçları arasındaki antenin kayıp direncini ifade eder.

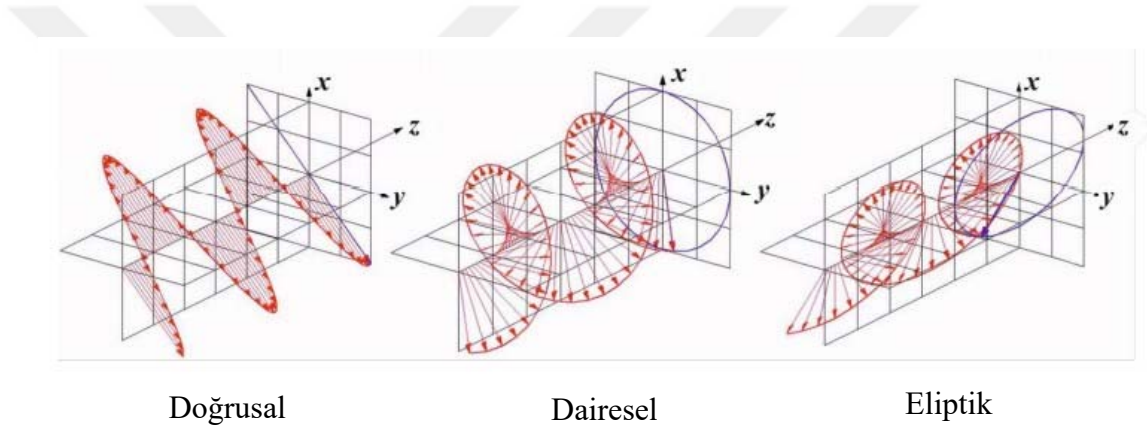
Anten tasarımlarında giriş empedansı çok önemlidir. Kaynak ile antenin empedans uyumlu olması anten sisteminin verimli ve kazançlı çalışabilmesi için çok önemlidir.

3.1.3.4. Polarizasyon

Elektrik alan vektörünün zamana göre değişimi polarizasyon olarak ifade edilmektedir. Üç tür polarizasyon vardır:

1. Doğrusal Polarizasyon
2. Dairesel Polarizasyon
3. Eliptik Polarizasyon (Ali *et al.* 2005)

olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.10’da bu polarizasyon çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Polarizasyon çeşitleri (Gürdal 2020)

Tasarlanan anten yönlüyse ışımanın olduğu yön polarizasyonu belirler. Anten yönsüz ise kazancın en yüksek olduğu yön antenin polarizasyonunu belirler.

3.1.3.5. Anten verimliliği

Anten ile alakalı birkaç farklı verimlilik türünden bahsedilebilir. Temel olarak anten verimliliği birçok verimlilik etkeninin birleşimidir. Toplam verimlilik aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$e_0 = e_r \times e_c \times e_d \quad (3.6)$$

Burada e_r yansıma verimliliği e_c iletim verimliliği e_d ise kullanılan dielektriğin verimliliğini ifade etmektedir. Görüldüğü üzere anten verimliliğini 3 temel verimlilik belirlemektedir. e_c ve e_d deneysel verilerle elde edilebilmektedir. e_r ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$e_r = (1 - |\Gamma|^2) \quad (3.7)$$

Burada, Γ ile anten yansıma katsayısı ifade edilmiştir.

3.1.3.6. Işıma şiddeti

Işıma şiddeti, verilen bir yöndeki açı başına düşen yayılan güçtür. Işıma şiddeti U ile ifade edilir ve ışıma yoğunluğu (W_{rad}) ile uzaklığının karesi (r^2) çarpımına eşittir. Aşağıda ışıma şiddetinin hesaplanabileceği formül verilmiştir.

$$U = r^2 \times W_{rad} \quad (3.8)$$

3.1.3.7. Kazanç

Antenin kaynaktan aldığı gücü belirli bir yönde ışımaya dönüştürme yeteneğinin ölçüsüdür ve ışıma gücünün tepe yaptığı (Bazan 2010) yerde ölçülür. Kazanç parametresi anten performansını gözlemlemek ve anlamak için önemli bir parametredir. Kazanç, ışıma şiddeti ve verimlilik ile doğrudan alakalıdır. Kazanç aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$G = \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \times 4\pi \quad (3.9)$$

Burada, $U(\theta, \phi)$ ifadesi belirtilen θ ve ϕ yönlerindeki ışıma şiddetini ve P_{in} ise kaynaktan gelen gücü ifade etmektedir.

3.1.3.8. Yönlülük

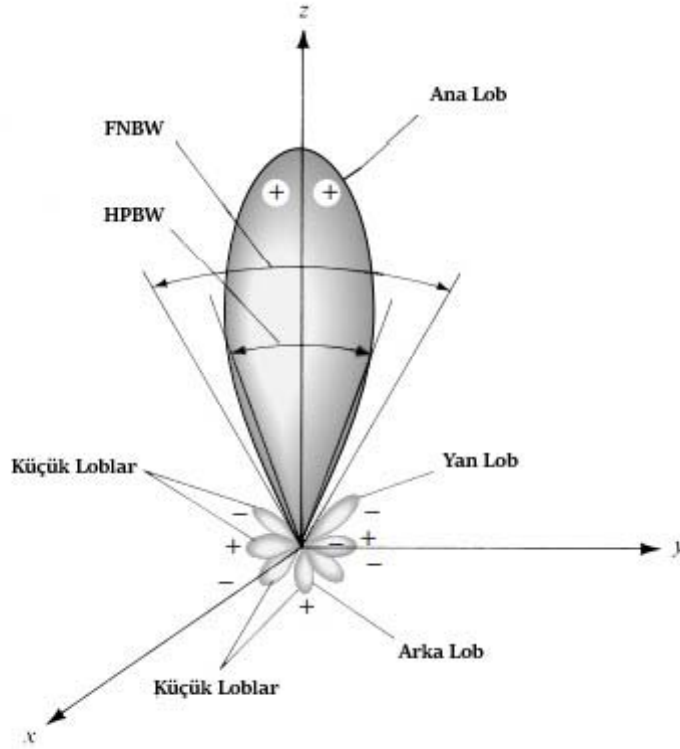
Yönlülük, kaynaktan anten terminallerine gelen enerjinin ne kadar yönlendirildiğini belirtir. Matematiksel olarak ifade edilirse; bir yöndeki ışıma şiddetinin tüm yönlerdekine oranı olarak söylenebilir. Aşağıda yönlendiricilik ile alakalı matematiksel ifade formülüne edilmiştir.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi \times U}{P_{rad}} \quad (3.10)$$

Burada, U : ışıma şiddetini, U_0 : yönbağımsız kaynağın ışıma şiddeti ve P_{rad} : toplam ışıyan güç olarak ifade edilmiştir.

3.1.3.9. Işıma örüntüsü

Işıma örüntüsü, anten ışımasının uzay koordinatlarının bir fonksiyonu (Iwasaki 1996) olarak matematiksel ya da grafiksel gösterimdir. Işıma örüntüsü 3 temel bölümden oluşur. Bunlar ana lob, arka lob ve yan lobdur. Antenin maksimum ışımasını gösteren kısım ana lobdur. Buradan da anlaşılacağı üzere arka ve yan lobların mümkün olan en az seviyede olması tasarlanan antenin performanslı çalışması için istenen ve beklenen bir durumdur. Küçük lobların düzeyi, ana lobun güç yoğunluğuna oranı ile belirlenir. Çoğu uygulamada bu oranın -20 dB veya daha küçük (Fang 2010) olması istenir. Şekil 3.11’de ışıma örüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Işıma örüntüsü (Worren and Gary 1998)

3.1.3.10. Saçılım (S) parametreleri

Saçılım parametreleri, portlar arasında aktarılan güç ilişkisinin ifadesi olarak tanımlanır. Anten analizleri yapılırken giriş yansıma katsayısı (S_{11}) en çok dikkat edilen parametredir. Çünkü bu değere bakılarak, antenden ne kadar gücün yansıdığının ve ne kadar gücün ise anten sayesinde ortamda yayıldığının hesabı yapılır. Bu nedenle yansıma katsayısı olarak da ifade edilebilir.

3.1.3.11. Voltaj duran dalga oranı (VSWR)

Anten çalışmasını önemli derecede etkileyen bu parametre empedans uyumu göz ardı edilerek tasarlanan bir antene gelen ve antenden yansıyan dalgaların girişiminden dolayı oluşur. Bu girişim olayının olması ile anten sistemi bir depolama cihazı gibi çalışır. Bu parametre kullanıcıya anten ile iletim hattı ve kaynağın ne kadar eşleştiğini göstermektedir. Aşağıda VSWR parametresinin matematiksel ifadesi verilmiştir.

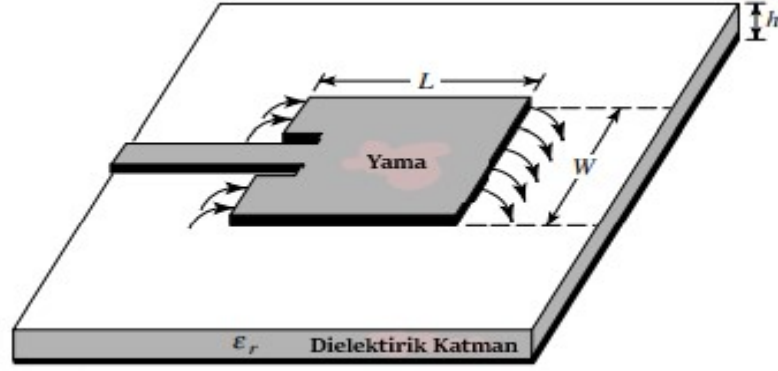
$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.11)$$

Burada, Γ yansıma katsayısı olarak ifade edilmektedir. Matematiksel ifadeye bakıldığında yansıma katsayısının 1 veya -1 değerleri için duran dalga oranının sonsuza gittiği görülmektedir. Bu anten tasarımlarında istenmeyen bir durumdur. Çünkü, bu durumda iletilmesi istenen dalga tümüyle geri yansıtılır. Tasarlanan anten VSWR değerinin 1 olması idealdir. Bunun için de yansıma katsayısının 0 olması istenir.

3.2. Mikroşerit Yama Antenler Hakkında Genel Bilgiler

Mikroşerit antenler ilk olarak 1953'te Deschamps tarafından gündeme getirilmiş olmasına rağmen 1955'te patenti alınmıştır. İlk mikroşerit anten ise uzay araçları ve füzelerde Howell ve Munson tarafından kullanılmıştır. Belirtilen yıllarda, bu anten türüne ihtiyacın olmaması ve kullanım alanları olan uzay, uydu, uçak ve radar sistemleri gibi alanların 1970'li yıllar itibari ile gelişimine başlamasından dolayı mikroşerit antenlere talep ve ilgi, bu tarihten itibaren artmaya başlamıştır. Bunun yanı sıra boyutlarının küçük olması, hafifliği, üretim maliyetlerinin düşük olmasının yanı sıra elektronik devre kartlarına entegresinin çok kolay olmasıyla da günümüzde çok popüler bir yere sahiptir.

Günümüzde birçok insanın kullanmakta olduğu kablosuz haberleşme cihazlarının yapısında da mikroşerit antenler kullanılmaktadır. Mikroşerit antenler dielektrik alttaş üzerine üretilen, çeşitli geometrik şekillerde olan yama ve yama ile aynı metalden oluşan bir topraklama düzleminde oluşmaktadır. Şekil 3.12'de temel bir mikroşerit anten gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Temel mikroşerit anten (Balanis 2005)

Mikroşerit antenler; yükselteçler, osilatörler, anahtarlama devreleri gibi pek çok devre yapısıyla aynı tabla üzerinde kullanılabilmekte ve bu sayede tasarımsal olarak büyük avantajlar sağlamaktadırlar. Ek olarak baskı devre teknolojisinin ilerlemesi ve mikroşerit hatlarda ihtiyaç duyulan devre elamanlarıyla birlikte kullanılabilmesiyle, bu iki parça birlikte üretilip entegre edilebilmektedir. (Cheng 2009) Bu yüzden mikroşerit antenlerin kullanım alanı çok geniştir.

Mikroşerit antenlerin birçok avantajı olduğu gibi dezavantajları da vardır. Mikroşerit antenlerin avantajlarının ve dezavantajlarının bir araya getirildiği Çizelge 3.1 aşağıda verilmiştir.

Mikroşerit antenlerde en büyük dezavantaj ise diğer mikrodalga antenlere oranla düşük bant genişliğine sahip olmasıdır. Bu pek istenmeyen bir durum gibi gözükse de günümüzde ihtiyaç duyulan çok bantlı anten profillerinde düşük bant genişliği filtre gibi çalıştığı için antene pozitif etki sağlamaktadır. Düşük bant genişliği yapılan tasarımsal değişikliklerle %60 oranında (Sainati 1996) iyileştirilebilmektedir. Bunun yanı sıra mikroşerit antenlerle oluşturulan dizi sayesinde de bant genişliği (Derneryd 1976) artırılabilir.

Çizelge 3.1. Mikroşerit anten avantajları ve dezavantajları

MIKROŞERİT ANTEN	AVANTAJ	DEZAVANTAJ
	Küçük Boyut	Düşük Verimlilik
	Hafiflik	Düşük Güç
	Üretim Kolaylığı	Fazla Kayıp
	Üretim Maliyeti Düşüklüğü	Dar bant Genişliği
	Besleyici Hat ve Uyumlandırma Devresi Kolaylığı	Yarı Düzlem İçinde Işıma
	Montaj Kolaylığı	Uç Noktalardaki Düşük Işıma
	Yüksek Kazanç	
	Düşük Saçılma Ara Kesiti	

Mikroşerit anten tasarımı yapılırken performanslı bir anten üretebilmek için dielektrik malzeme $2.2 \leq \epsilon_0 \leq 12$ aralığında seçilmelidir. Çünkü, dielektrik malzeme seçimi, geniş yüksek bant genişliği ve verimliliği daha büyük eleman boyutlarına karşı ışıyan alanları daha az sınırlayan (Pozar 1992) yapılar sağlamak için önemlidir. Dielektrik malzemenin kalınlığı avantajlar ve dezavantajlar oluşturabilir. Eğer yalıtkan malzeme kalın olursa ışıma gücü, bant genişliği gibi parametrelerde artış olacaktır. Fakat ağırlık artacak, dielektrik kayıplar fazlalaşacak ve yüzey dalga kayıpları da artacağı için tasarlanan anten pek kullanışlı olmayacaktır. Benzer etkiler düşük dielektrik geçirgenlikte de görülmektedir.

Mikroşerit antenlerin kullanıldıkları uygulamalar için çeşitli şekillerde üretilmektedirler. Sıradaki bölümde bunlar hakkında bilgilendirmeler yapılacaktır.

3.2.1. Mikroşerit anten türleri

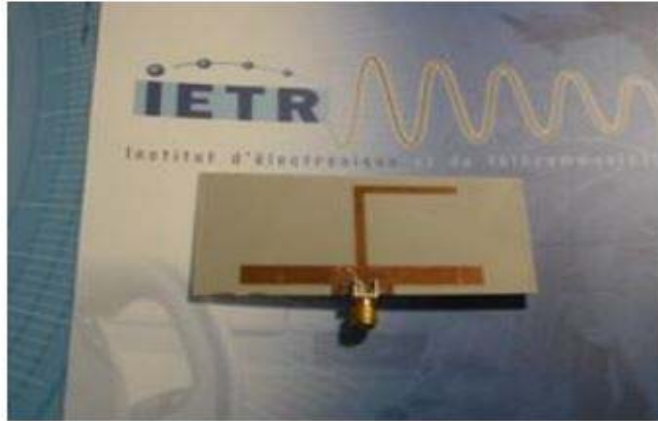
Mikroşerit antenler diğer mikrodalga antenlere göre fiziksel özelliklerini değiştirebilir olmasından dolayı çeşitleri fazladır. Çeşitli boyut ve geometrik şekillerde üretilen mikroşerit antenler temel olarak;

1. Mikroşerit Dipol Antenler
2. Mikroşerit Monopol Antenler
3. Mikroşerit Yürüyen Dalga Antenler
4. Mikroşerit Yarık Antenler
5. Mikroşerit Yama Antenler

şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

3.2.1.1. Mikroşerit dipol antenler

Geleneksel yama antenlerde yama kısmının dikdörtgen olması ve bu dikdörtgen yamanın dar olması ile dipol antenler oluşmaktadır. Mikroşerit yama antene benzer özelliklere sahip olsa da mikroşerit dipol antenler; ışıma dirençleri, çapraz polarizasyonları ve bant genişlikleri yönünden farklılık göstermektedir. Diğer mikroşerit yama antenlere oranla daha az yer kaplarlar. Bu yüzden dizi anten uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar. Şekil 3.13'te bir dipol anten gösterilmiştir. Mikroşerit dipol antenler merkezi besleme ile kullanılmaktadırlar.

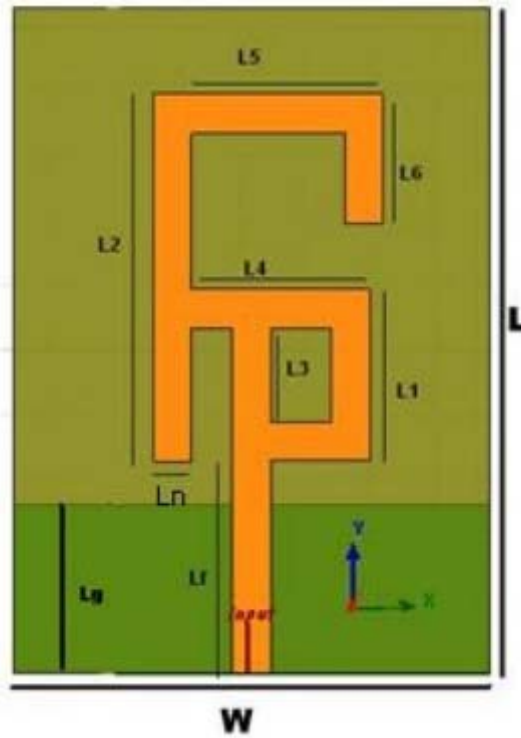


Şekil 3.13. Mikroşerit dipol anten (Floc and Sayed 2012)

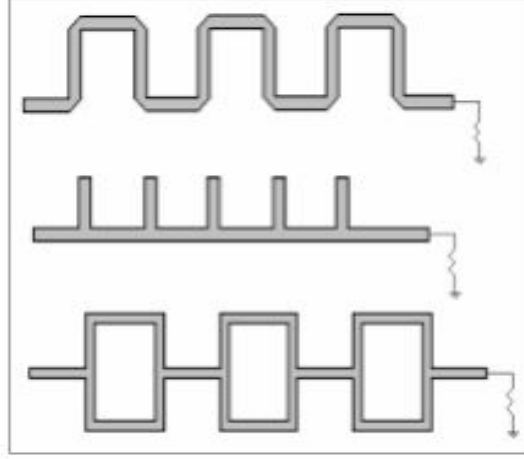
3.2.1.2. Mikroşerit monopol antenler

Bu anten türünde dielektrik yapının bir yüzeyinde yama vardır. Bu yamaya bağlı iletim hattı mevcuttur. Geleneksel yama antenlerden farklı olarak topraklama düzlemi besleme hattı boyunca oluşturulmaktadır. Yapısal özelliklerinden dolayı her iki düzlemde de ışıma oluşmaktadır. Ek olarak topraklama düzleminin büyük olması rezonans frekansını düşürüp, bant genişliğine de pozitif etki sağlamaktadır.

Monopol antenler geniş bant desteği ve istikrarlı ışıma örüntüsü ile kablosuz haberleşme uygulamalarında (Kuo and Wong 2003. Pan *et al.* 2005) sıklıkla tercih edilmektedirler. Şekil 3.14'te bir monopol yama anten gösterilmiştir.



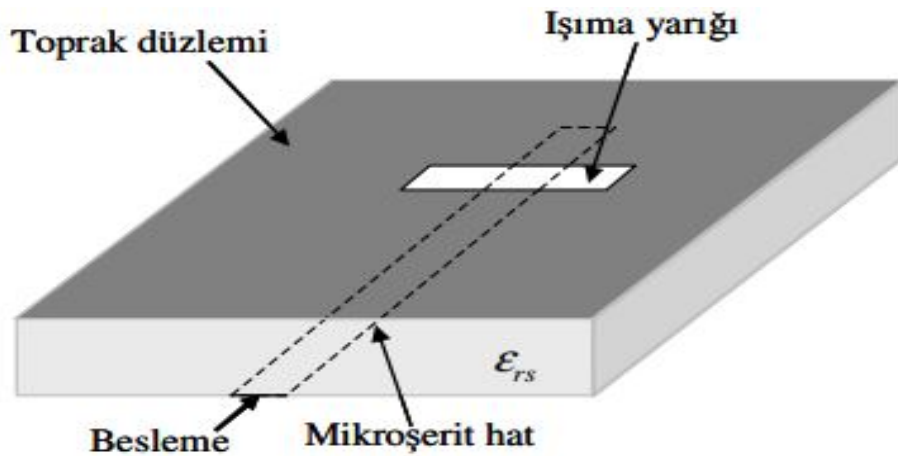
olarak antende yapılacak tasarımsal değişikliklerle ana hüzme yatay ve düşey konumdaki herhangi bir yöne döndürülebilir. Şekil 3.15'te bu anten çeşidi gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Yürüyen dalga anten çeşitleri (Amin 2011)

3.2.1.4. Mikroşerit yarık antenler

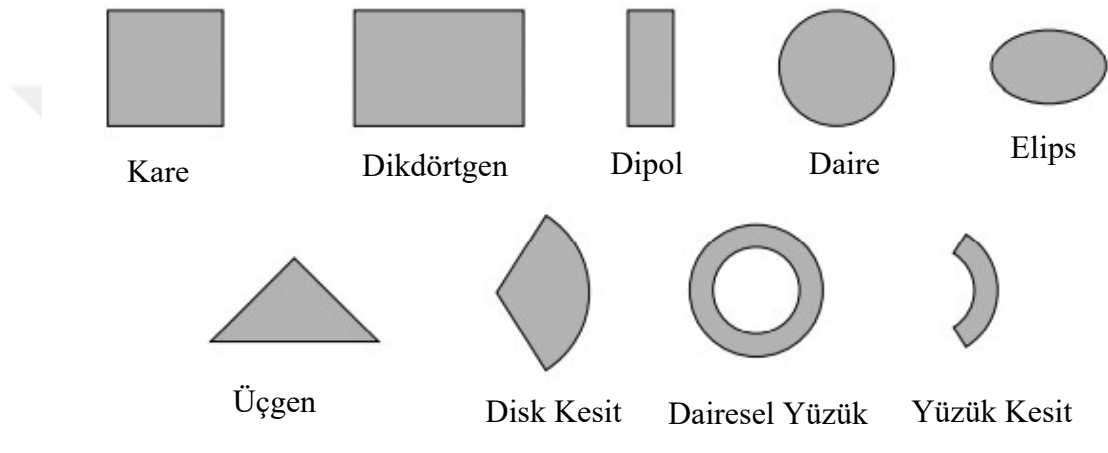
Yarık antenlerde taban malzemesinin üzerinde ışıma boşluğu olan topraklama düzlemi diğer tarafında ise besleme hattı bulunur. Bu ışıma boşluğu dairesel ya da düzlemsel bir şekilde olabilir. Fakat özel uygulamalar için çeşitli geometrik şekillerde de üretilebilir. Şekil 3.16'da mikroşerit yarık anten gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Temel mikroşerit yarık anten (Carr 2010)

3.2.1.5. Mikroşerit yama antenler

Mikroşerit yama antenler, dielektrik alttaş üzerine ışımayı sağlayan çeşitli geometrik şekillerde olabilen bir yama ve dielektrik katmanın alt tabanına da yama ile aynı metalden yapılmış bir topraklama düzleminden oluşan yapıdır. Işımayı sağlayan yama kısmını oluşturan geometrik şekil genellikle düzlemseldir. Bunun yanı sıra düzlemsel olmayan yamalar özel uygulamalar için de kullanılmaktadır. Şekil 3.17’de yama kısmını oluşturan düzlemsel örnekler verilmiştir.



Şekil 3.17. Mikroşerit yama anten geometrileri (Balanis 2005)

Mikroşerit yama antenlerde, yamanın geometrik yapısının farklı olması ışıma karakteristiğini değiştirmez. Burada temel amaç anten boyutları ile performans arasındaki maksimum noktayı (Nesem 2012) yakalamaktır. Genel olarak kazançları 5-6 dB bandındadır. 70° ile 90° aralığında hüzme genişliği 3 dB (Garg *et al.* 2001) olarak görülmektedir.

3.2.2. Mikroşerit anten besleme türleri

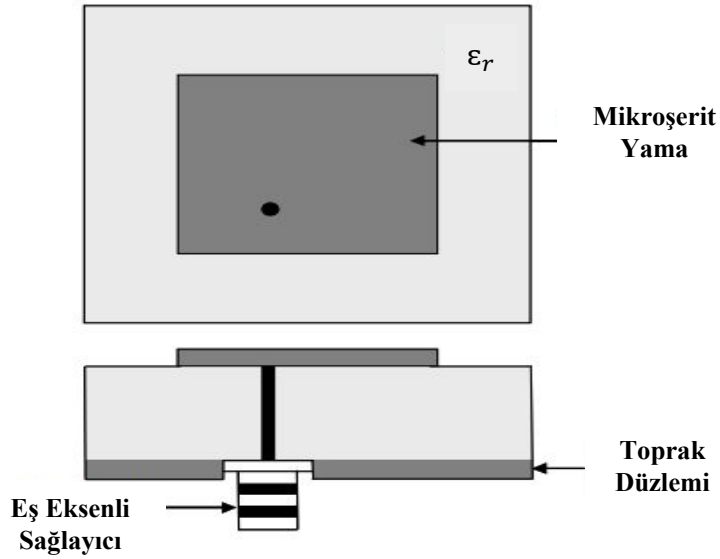
Mikroşerit antenlerde farklı besleme çeşitleri olmasına rağmen genel olarak 4 farklı besleme tekniğinin varlığından bahsedilebilir. Besleme tekniklerinin hangi mikroşerit antende kullanılabileceği tasarımı yapılan anten yapısıyla doğrudan ilgilidir. Besleme yapılırken empedans uyumunun sağlanması çok önemlidir. Genelde empedans uyumu 50 Ω ‘luk değer ile sağlanmaktadır. Eğer bu empedans uyumu sağlanmıyorsa

uyumlayıcı devre kullanılmalıdır. Mikroşerit antenlerde en çok kullanılan besleme teknikleri aşağıda sıralanmıştır;

- Koaksiyel Besleme
- Açıklık Bağlısımlı Besleme
- Elektromanyetik Bağlısımlı Besleme
- Mikroşerit Hat Besleme (Fank 2010)

3.2.2.1. Koaksiyel besleme

Bu besleme tekniğinde, topraklama düzlemi yönünden yama düzlemine kadar açılan delikten geçirilen koaksiyel kablonun merkez iletkeni yamaya lehimlenerek işlem gerçekleştirilir. Açılacak delik empedans uyumunun en iyi olduğu noktadan yapılır. Aslında bu besleme türünde empedans uyumlaması çok kolay yapılabilmektedir. Koaksiyel besleme tekniği Şekil 3.18 'de gösterilmiştir.

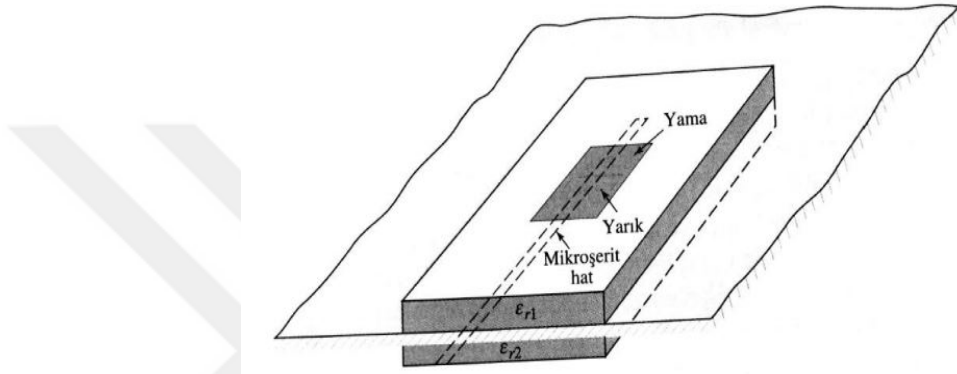


Şekil 3.18. Koaksiyel (eş eksenli) besleme (Balanis 2005)

Bu besleme tekniğinde kullanılan koaksiyel kablo kolay şekillendirilebildiği için birçok uygulamada kullanılır. Bu besleme türü antenin yüksek verimlilikle çalışmasını sağlamaktadır. Hat kaybı azdır ve yüksek frekanslarda uyumlu çalışır.

3.2.2.2. Açıklık bağlaşımlı besleme

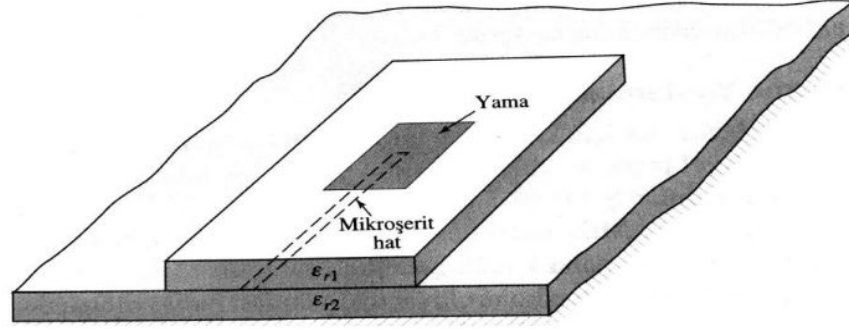
Bu teknikte, iki dielektrik katmana ihtiyaç duyulur. Bu iki katman toprak tabaka ile ikiye ayrılır. Besleme mikroşerit hattan toprak tabakaya aradaki yarı iletken ile aktarılır. Geniş bant gerektiren uygulamalar için kullanılması uygundur. Bu besleme tekniğini de tasarlamak kolay fakat üretilmesi zordur. Şekil 3.19’da açık bağlaşımlı besleme tekniği gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Açıklık bağlaşımlı besleme tekniği (Balanis 2005)

3.2.2.3. Elektromanyetik bağlaşımlı besleme

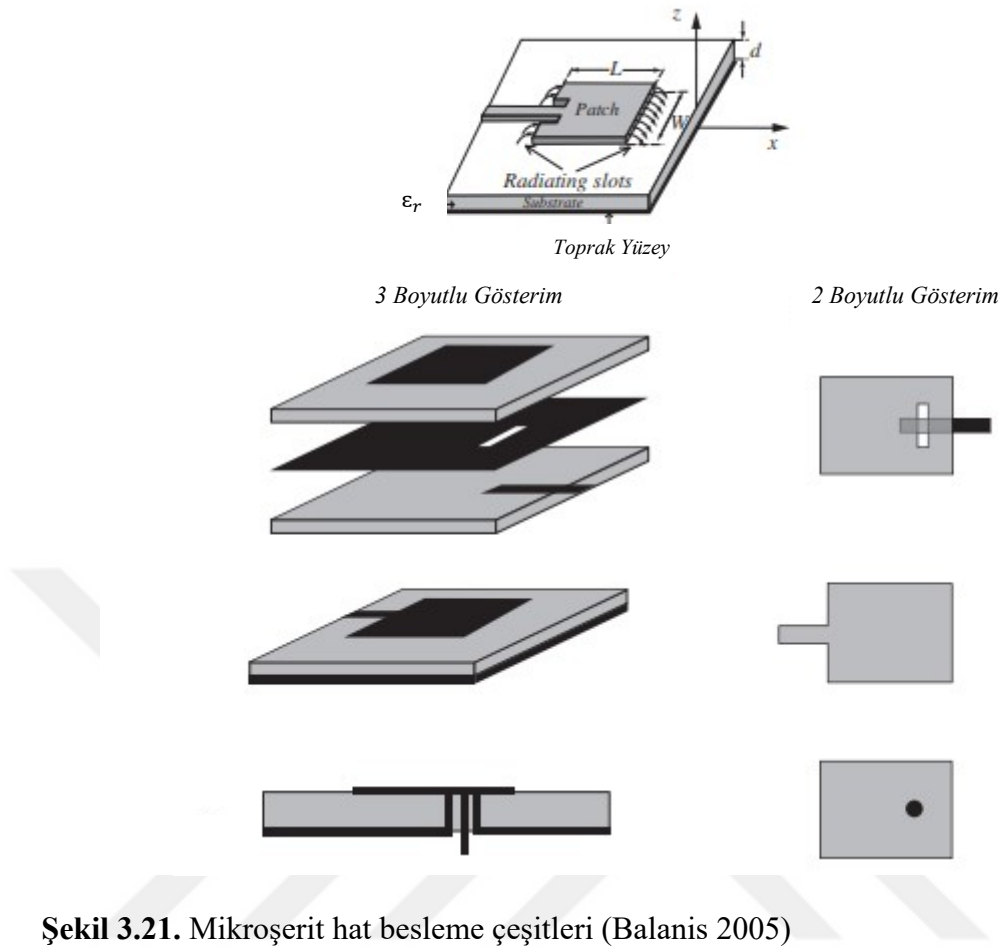
Bu besleme tekniği, temassız bir yöntemi içermektedir. İki adet yalıtkan tabaka ve bu iki yalıtkan tabaka arasında bir besleme hattı konumlandırılmıştır. Bu besleme tekniği açık devre yan hat ile sonlandırılır. Bu teknik ile en geniş bant genişliği elde edilebilir. Parazitlik ışımaları çok düşük fakat üretimi çok zordur. Besleme saplamasının uzunluğu ve yamanın genişlik-hat oranı uyumlamayı kontrol etmek (Balanis 2005) için kullanılabilir. Şekil 3.20’de elektromanyetik besleme tekniği gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Elektromanyetik bağlaşımlı besleme tekniği (Balanis 2005)

3.2.2.4. Mikroşerit hat besleme

Mikroşerit yama antenlerde en temel besleme şeklidir. Bu teknikte besleme hattı yama ile aynı yüzeyde ama yamadan daha az genişliktedir. Yama ile aynı kalınlığa sahip bir hattır. Mikroşerit hat besleme tekniği yama antenin boyutlarında büyümeye neden olduğu için dezavantajlar oluşturmaktadır. Ayrıca istenmeyen ışımalara neden olması ve dar bant genişliğine neden olmasından ötürü dezavantajlar oluşturmaktadır. Mikroşerit hat tasarlanırken genellikle yamanın ortasına yerleştirilir. Fakat yamanın sağında solunda konumlandırıldığı uygulamalar da vardır. Bu durum rezonans frekansında da kaymalara sebebiyet vermektedir. Bu kaymayı önleyebilmek için antende ya da iletim yama boyutlarında yapılacak hafif değişikliklerle (Bahl and Bhartia 1980) düzeltilebilir. Mikroşerit hat beslemeli bazı yama antenler Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21. Mikroşerit hat besleme çeşitleri (Balanis 2005)

3.3. Mikroşerit Anten Tasarımı

Anten tasarımı, anten performansını belirleyen temel etkenlerden biridir. Önerilen tasarımda yapılacak olan antenin, kolay besleme yöntemleri ve düşük profilli olması, kullanıcıya kolaylıklar sağlamaktadır. Bu çalışmada, zemin için bakır alttaş kullanılmış ve dielektrik alttaş olarak FR-4 kullanılmıştır. Bu çalışmada, tasarım için CEMS ve CST benzetim programları kullanılmıştır. 1990'lı yıllarda geliştirilmeye başlanan ve kullanıma sunulan bu tip benzetim programları sayesinde tasarım süreçleri daha kısa sürede yapılabilmekte ve üretim maliyetleri de minimize edilebilmektedir.

3.3.1. Mikroşerit anten tasarımı için gerekli formüller

Tasarıma başlamadan önce antenin istenilen frekans ya da frekanslarda rezonansa girebilmesi ve yüksek bant genişliği ile yüksek verimlilikle çalışabilmesi için antenin boyutlarının denklemler kullanılarak belirlenmesi gerekmektedir. Denklemler kullanılarak belirlenen fiziki boyutlarla oluşturulan anten simüle edildiğinde istenilen sonuçların elde edilemediği durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu yüzden hesaplamalar sonucunda, her zaman kesin boyutları elde edemeyebiliriz. Bunun için, benzetim programlarında tasarlanan anten boyutları üzerinde değişiklikler yapılarak tasarım tamamlanır. Anten tasarımı için gerekli hesaplamaları yapabilmek için gerekli formüller sırasıyla aşağıdaki gibidir.

Adım-1 Anten Yama Genişliği (W) aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada c ışık hızını, ϵ_0 serbest uzay geçirgenliğini, ϵ_r taban malzemenin dielektrik sabitini, f_r rezonans frekansını, μ_0 ise boşluğun manyetik sabitini temsil eder.

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2\epsilon_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.12)$$

Adım-2 Dielektrik Katsayısının Etkin Değeri (ϵ_{reff}), aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada h , dielektrik malzemenin kalınlığını ifade etmektedir.

ϵ_{reff} değerinin hesabı için iki durum vardır.

Eğer $\frac{w}{h} \geq 1$ ise;

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times [1 + 12 \times \frac{h}{w}]^{-1/2} \quad (3.13)$$

olur. Eğer $\frac{w}{h} \leq 1$ ise;

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left[\left(1 + 12 \times \left(\frac{h}{w} \right) \right)^{-1/2} + 0.04 \times \left(1 - \left(\frac{w}{h} \right) \right)^2 \right] \quad (3.14)$$

formülleri kullanılır.

Adım-3 Etkin Anten Uzunluğunun Hesabı (L_{eff}) aşağıdaki gibi yapılır. Burada f_0 çalışma frekansını ifade etmektedir.

$$L_{eff} = \frac{c}{2 \times f_0 \times \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3.15)$$

Adım-4 Anten Uzunluğu Uzantısının Hesabı (ΔL)

$$\Delta L = 0.412 \times h \times \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \times (\frac{W}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \times (\frac{W}{h} + 0.8)} \quad (3.16)$$

Adım-5 Mikroşerit Anten Yama Uzunluğu (L)

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (3.17)$$

Adım-6 Mikroşerit Besleme Genişliği (W_f)

$$Z_c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \times \frac{120 \times \pi}{[\frac{W_f}{h} + 1.393 + 0.667 \ln(\frac{W_f}{h} + 1.444)]} \quad (3.18)$$

Adım-7 Mikroşerit Besleme Uzunluğu (L_f)

Mikroşerit besleme hattının uzunluğu $\frac{\lambda}{4}$ oranında olduğu Munson tarafından belirtilmiştir.

$$\lambda = \frac{c}{f} \rightarrow L_f = \frac{\lambda}{4} \quad (3.19)$$

Adım-8 Dielektrik Katman Uzunluğu (L_d)

$$L_d = 2.5 \times L \quad (3.20)$$

Adım-8 Dielektrik Katman Genişliği (W_d)

$$W_d = 2 \times W \quad (3.21)$$

Mikroşerit yama anteni için hedeflenen rezonans frekansını elde edebilmek için gerekli olan yama boyu ve genişliği, verilen denklemlerle hesaplanmıştır. Tasarlanan antenin yama kısmının beslemesi için mikroşerit besleme tekniği kullanılmıştır. Çünkü mikroşerit hat besleme yöntemiyle iletim kaybı daha düşük, besleme sırasında daha yüksek yalıtım sağlanıp ve bant genişliğinin daha iyi olması sağlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Anten Tasarım Parametreleri

Bu çalışmada, önerilen antenin geometrisi Şekil 4.22’de gösterilmiştir ve antenin boyutları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Anten, göreceli dielektrik geçirgenliği 4.4, kalınlığı 1.6 mm ve kayıp tanjantı 0.025 olan düşük maliyetli bir FR-4 dielektrik alttaşı her iki tarafına tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarlanan antenin toplam boyutu 25 mm × 20 mm × 1.6 mm’dir. FR-4 alttaşı ön tarafında ışıma yapan iki yama bulunmakta ve alttaşı arka tarafında kısmi bir topraklama düzlemi bulunmaktadır. Üretim ve test ölçümlerinden önce simülasyon tutarlılıklarını doğrulamak için antenin tasarımında ve simülasyonunda, sonlu farklar zaman alanı (FDTD) yöntemine dayanan hesaplamalı elektromanyetik simülatör (CEMS) yazılımı (Demir and Elsherbeni 2011) ve CST yazılımı (Anonymous 2008) kullanılmıştır. Simülasyonun yapıldığı bilgisayarın özellikleri, Windows 10 sisteminde çalışan Intel® Core™ i7-4790 CPU, 32 GB Random-Access Memory (RAM) ve NVIDIA RTX 2070 Super grafik işlemci ünitesidir (GPU).

Çizelge 4.1. Önerilen antenin boyutları

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	P ₁	P ₂	G
Boy (mm)	5	2	1	1.2	4.7	2.3	13.2
En (mm)	2	0.8	0.4	0.4	7.4	3	25



Şekil 4.22. Önerilen antenin ön ve arka yüzleri

4.1.1. CEMS simulasyon parametreleri

FDTD yöntemine dayanan CEMS simülasyonunda, problem uzayı kübik hücrelerden oluşmaktadır ve hücre boyutunun seçimi çözümlerin kararlılığını ve doğruluğunu belirlemektedir. FDTD yönteminde, sayısal kararlılığı sağlamak için (Elsherbeni and Demir 2016) hücre boyutu $\lambda_{\min}/20$ 'den küçük olmalıdır, burada $\lambda_{\min}$ problem alanındaki en yüksek frekansın dalga boyudur. Bu nedenle, bu çalışmada, problemin tüm yönlerdeki hücre boyutu $\lambda_{\min}/20$ 'den küçük olan 0.1 mm'ye ayarlanmıştır. Problem uzayı, 15 hücre katmanı hava tamponu ile 10 kat evrimsel mükemmel uyumlu katman (CPML) (Kuzuoglu and Mittra 1996) ile sonlandırılmıştır. Problem alanındaki toplam hücre sayısı 4.950.000'dir. Simülasyon, saniyede yaklaşık 2 milyar hücre (MCPS) yürütme GPU hesaplama kapasitesiyle 8000 zaman adımından sonra makul bir yakınsama göstermektedir. Önerilen antenin CEMS simülasyon süresi, NVIDIA RTX 2070 Super GPU kullanılarak 19.8 saniyedir.

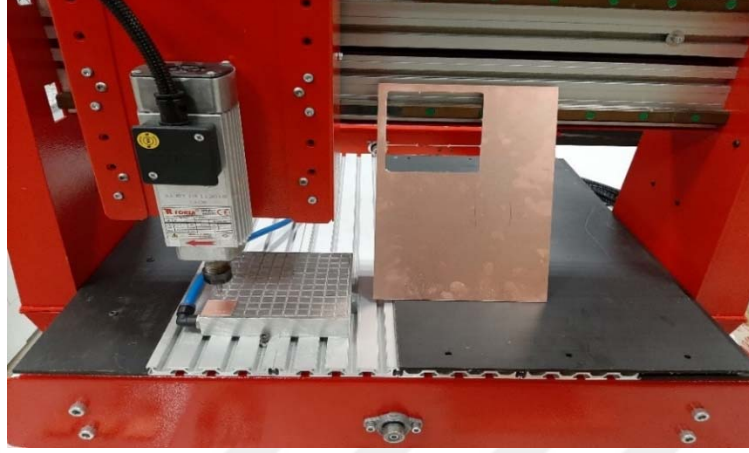
4.1.2. CST simulasyon parametreleri

Ticari elektromanyetik yazılım olan CST, CEMS paketine dayalı simülasyon sonuçlarını doğrulamak için kullanıldı. Tutarlılığı mümkün olduğunca korumak için CEMS tarafından uygulanan FDTD yönteminden farklı olarak, sonlu integrasyon tekniğine (FIT) dayanan CST'de zaman tanımlı çözücü seçildi. Problem uzayında, hücre boyutları maksimum için $\lambda_{\min}/15$ ve minimum için $\lambda_{\min}/20$ olduğu toplam 365.040 uyarlanabilir hücre vardır. CST eğitim lisansındaki GPU sınırlaması nedeniyle bu antenin CST simülasyonu CPU üzerinde yapılmıştır. Diğer tüm ayarlar ve boyutlar CEMS'dekilerle aynı tutulmuştur ve toplam simülasyon süresi 163 saniyedir. CST ve CEMS'ye dayalı bu tasarımın performansı aşağıdaki bölümde gösterilecektir.

4.2. Anten Üretimi

5G mobil haberleşme için kullanılabilecek olan mikroşerit yama antenin tasarımı ve sayısal analizleri yapıldıktan sonra, antenin üretimi gerçekleştirilmiştir. 6 GHz'in üzerindeki 5G frekanslarında çalışan antenlerin boyutlarının çok küçük olması nedeniyle

üretim aşamasında hata oranını azaltmak için klasik PCB baskı cihazlarının yerine Şekil 4.23'te gösterilen CNC cihazı kullanılmıştır.



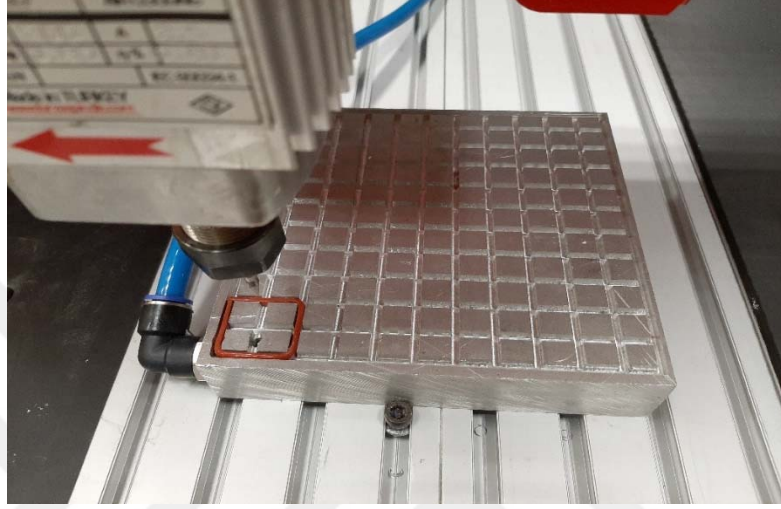
Şekil 4.23. CNC cihazı

CNC cihazı, özellikle milimetrik ölçüleri olan antenler için yüksek hassasiyete sahip bir cihaz değildir. Üretilen anten yüksek frekansta çalıştığı ve milimetrik ölçüleri olduğu için en küçük üretimsel hatadan etkilenecektir. Bu nedenle, bu cihazdan hassas bir baskı alabilmek için bir takım önemli eklemeler yapılmıştır. İlk olarak antenin tasarlandığı 1.6 mm taban kalınlığına sahip FR-4 alttaşın altına, kazıma sırasında herhangi bir kayma olmasını önlemek için bir vakum tablası yerleştirilmiştir. Çelik bir blok üzerine açılan eşit uzaklıklı ve eşit genişliğe sahip bir metal tabaka üretilmiştir. Daha sonra üretilen bu metal tabaka üzerine bir delik açılmış ve açılan deliğe ise vakum pompası bağlanmıştır. Bağlanan vakum pompası Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Vakum pompası motoru

Şekil 4.25'te gösterilen metal tabaka üzerine anten konulmadan önce alt kısmına silikondan yapılan bir conta yerleştirildi. Bu conta, vakum pompası ile birlikte kazım yapılacak olan FR-4'ü sıkıca sabitler ve önerilen antenin desenini üretirken hareket etmesini engeller. Bu sayede hedeflenen anten deseni hassas bir şekilde elde edilir.



Şekil 4.25. CNC metal tabaka

Hassas bir anten üretimi yapılırken, dielektrik malzeme üzerindeki bakırı kazımak ve kazıma işlemi yapılırken dielektrik malzemeye zarar vermemek çok önemli bir husustur. Kullanılan FR-4 malzemesinin bakır kalınlığı 0.035 mm'dir. Bu yüzden hassas bir kazıma için malzemenin sabit durması kadar, kazıma yapan ucun kalınlığı da önemlidir. Bu nedenle, CNC ile kazıma yaparken 3 mm'lik bir uç kullanılmıştır. Şekil 4.26'da gösterilen kazıma ucu istenilen hassasiyette kazıma yapabilmektedir. Böylelikle mikroşerit yama anten üretimi için CNC cihazı spesifik hale getirilmiş ve anten üretimi için hazır hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra analiz sonucunda odaklanılan şartlara uygun olan anten için üretim gerçekleştirilmiştir.

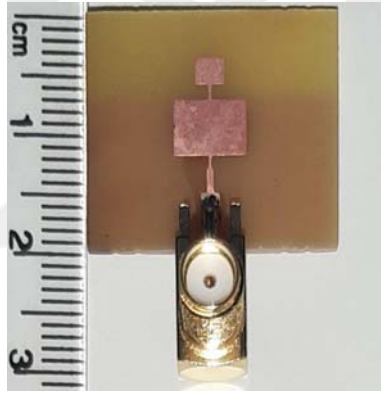
Üretim gerçekleştirildikten sonra, SMA dişi PCB dayanağı olan konnektör (50R) kullanılmıştır. SMA konnektörün mikroşerit yama antenin besleme hattına sabitlenmesi için lehimleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Lehimleme yapılırken sıvı lehim kullanılarak lehimleme hatalarını en aza indirmek hedeflenmiştir. Lehimleme işlemi yapılırken sıcak hava tabancası kullanılmıştır. Şekil 4.27'de üretilen mikroşerit yama antenin prototipi gösterilmiştir. Üretimi tamamlanan antenin ölçümlerini yapmak için İTÜ Elektronik ve

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Haberleşme Mühendisliği bölümü bünyesinde bulunan Şekil 4.28’de gösterilen Rohde & Schwarz-FSH8 Network Analizör kullanılmıştır.



Şekil 4.26. CNC kazıma ucu

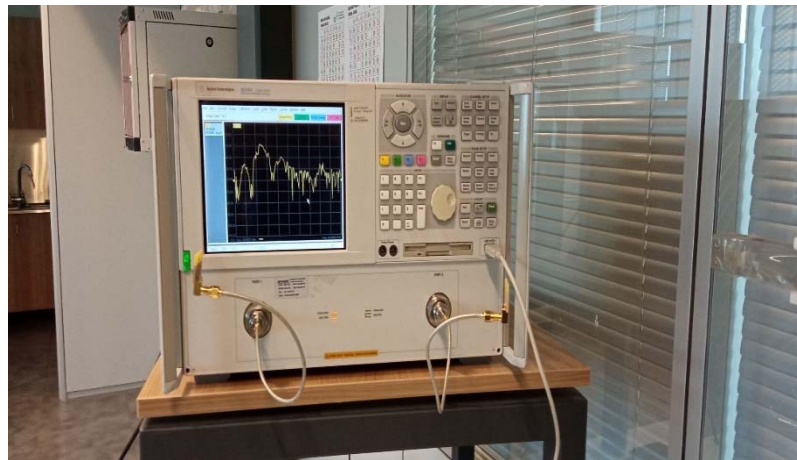


(a)



(b)

Şekil 4.27. Üretilen mikroşerit yama antenin ön (a) ve arka (b) görünüşü

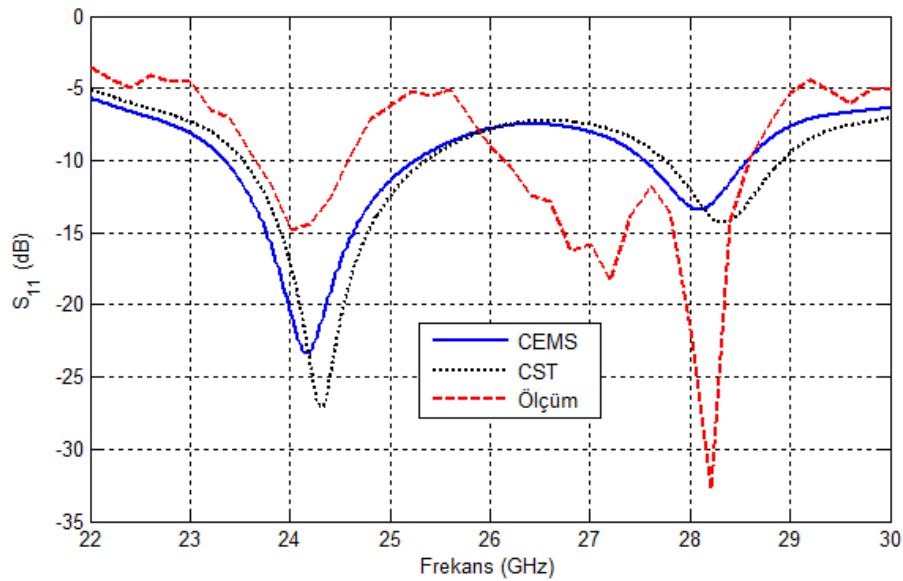


Şekil 4.28. Önerilen antenin ölçümü

4.3. Sayısal ve Deneysel Sonuçlar

4.3.1. Giriş yansıma katsayısı (S_{11}) ve ışıma deseni

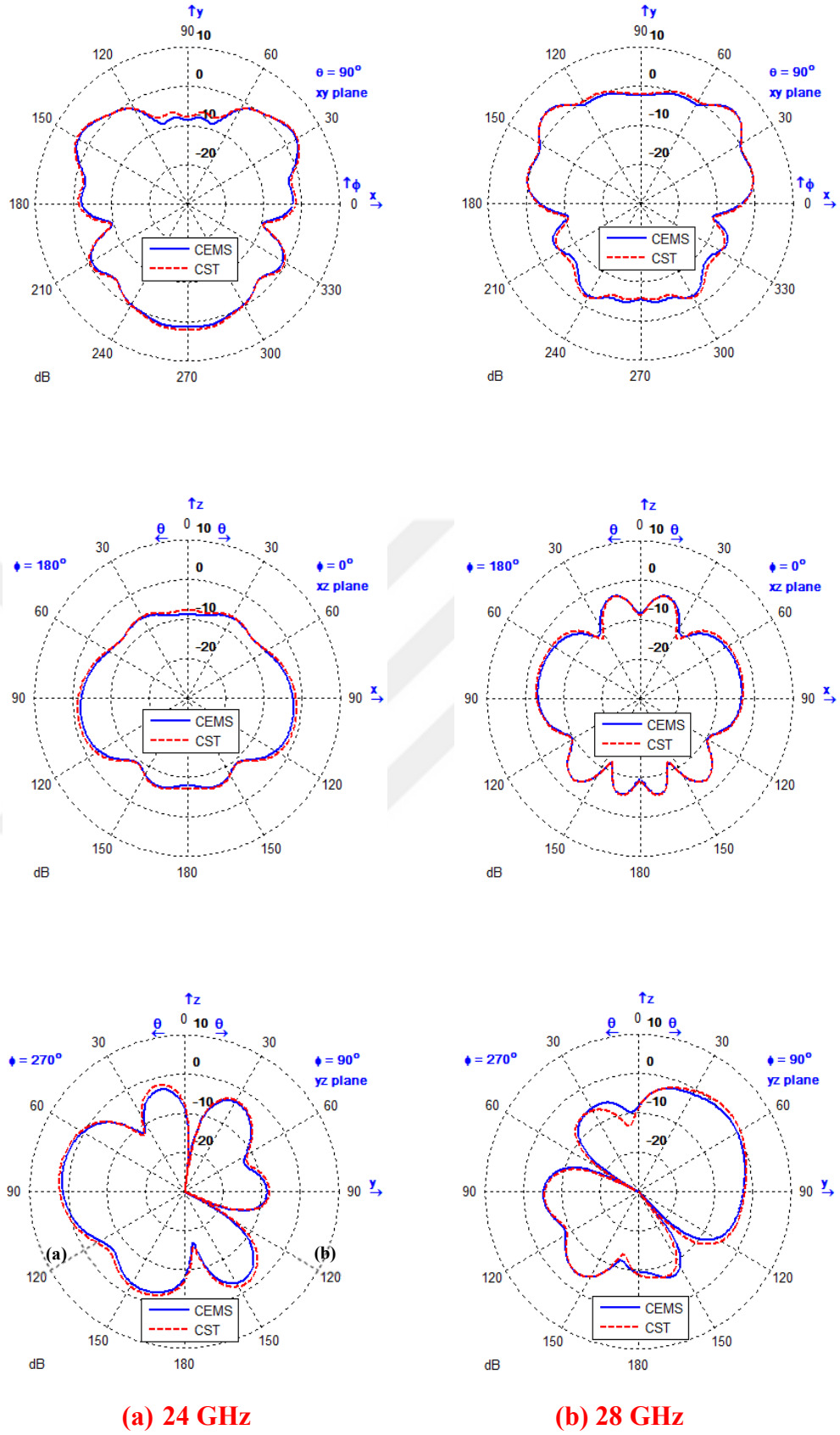
Önerilen çift bantlı antenin simüle edilen ve ölçülen giriş yansıma katsayıları (S_{11}) Şekil 4.29’da gösterilmiştir. Önerilen antenin simulasyon ve ölçüm sonuçları, özellikle 24 ve 28 GHz çalışma frekanslarında iyi bir uyum içindedir. Antenin 24 ve 28 GHz olan rezonans frekansları için, üç düzlemsel kesit üzerinde (x-y, x-z ve y-z) CEMS ve CST kullanılarak simüle edilmiş kazanç desenleri Şekil 4.30’da gösterilmektedir. Antenin x-y ve x-z düzlemlerindeki kazancının çok yönlülüğe yakın ışıma desenleri vardır. Antenin 24 ve 28 GHz’de x-y düzlemindeki çok yönlülüğü, 6 dBi’lik bir kazanç farkı için sırasıyla %68.6 ve %45’tir. Antenin 24 ve 28 GHz’de x-z düzlemindeki çok yönlülüğü sırasıyla %81.9 ve %85.8’dir. Simüle edilen ve ölçülen antenin performans parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’de, antenin maksimum kazanç değerleri için ölçüm sonuçları verilememiştir. Çünkü, antenin belirtilen çalışma frekanslarında kazanç deseni ölçümü yapabilecek bir test sistemimiz ve yankısız odamız bulunmamaktadır. Ayrıca, Çizelge 4.2’ye bakıldığında, CEMS ve CST kullanılarak elde edilen performans parametreleri (rezonans frekansları, S_{11} , bant genişliği ve maximum kazanç) birbirlerine çok yakındır ve ölçüm sonuçları ise, CEMS ve CST sonuçları ile iyi bir uyum içindedir.



Şekil 4.29. Önerilen antenin simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen S_{11} grafiği

Çizelge 4.2. Önerilen antenin performans parametreleri

	Rezonans Frekansı (GHz)	S₁₁ (dB)	Frekans Aralığı (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dBi)
CEMS	24.16	-23.4	23.36-25.26	1900	3.20
	28.1	-13.4	27.56-28.57	1010	3.99
CST	24.31	-27.12	23.54-25.36	1820	3.53
	28.34	-14.33	27.75-28.91	1160	3.86
Ölçülen	24	-14.86	23.7-24.6	900	-
	28.2	-32.72	26.2-28.5	2300	-



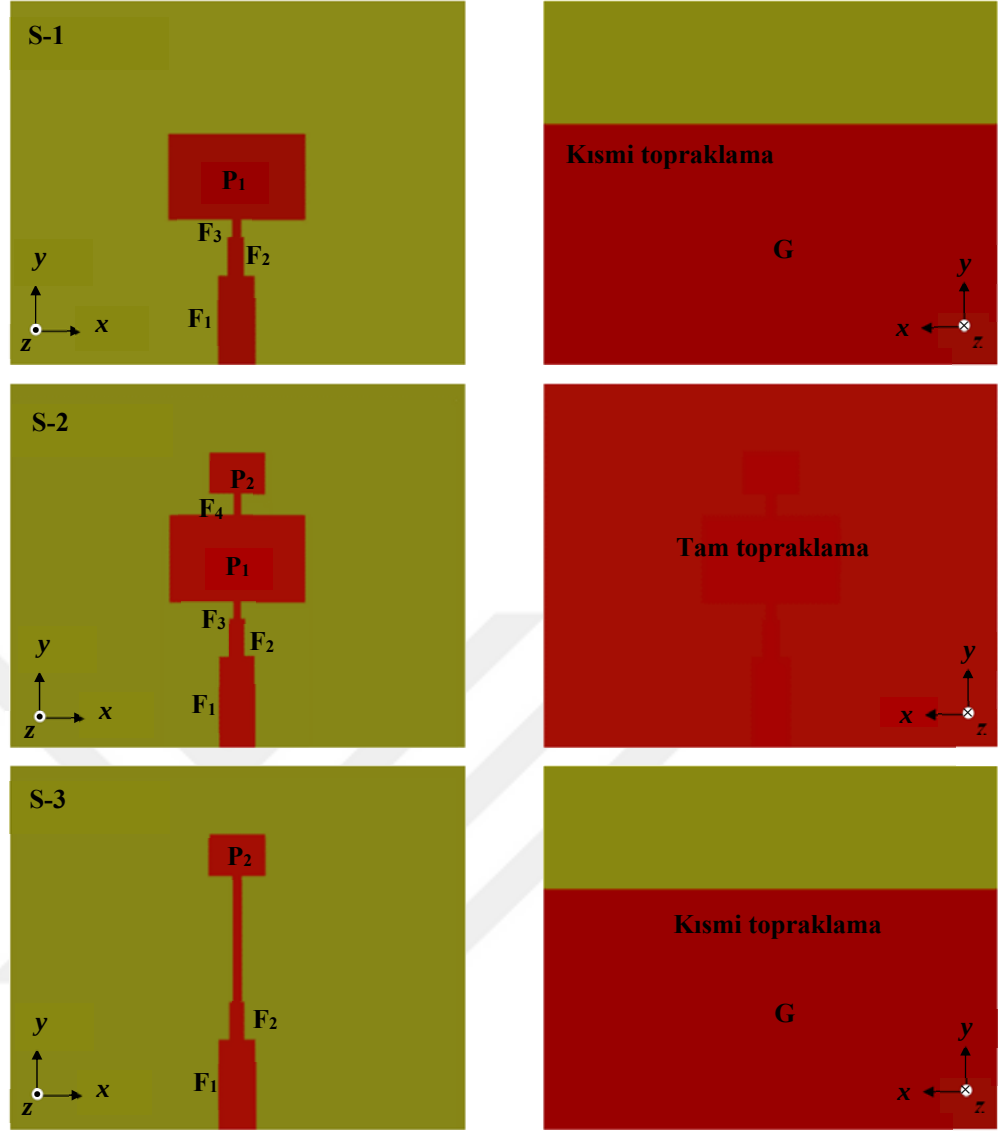
Şekil 4.30. Üç düzlem kesit (x-y, x-z ve y-z) üzerinde (a) 24 GHz ve (b) 28 GHz’de antenin kazanç desenleri

4.3.2. P₁ ve P₂ yamaların ve topraklama düzleminin antenin performansı üzerindeki etkileri

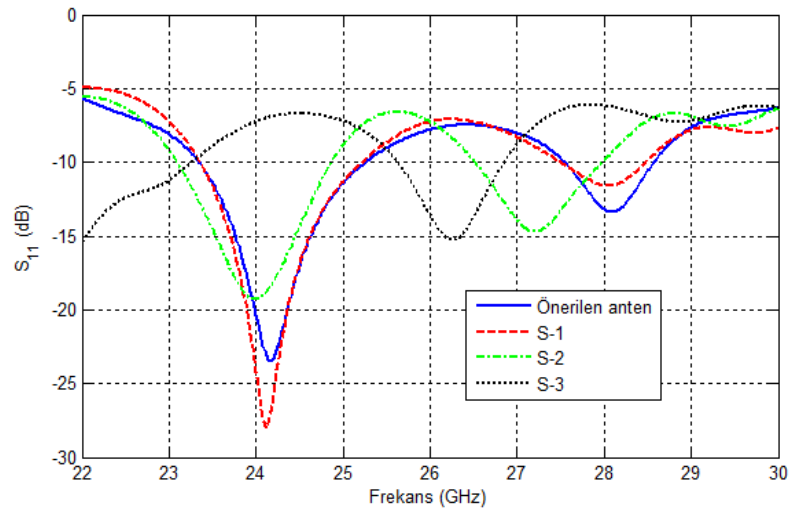
Önerilen antende iki adet yama bulunmaktadır: büyük yama (P₁) ve küçük yama (P₂). Bu iki yamanın ve topraklama düzleminin boyutlarının, önerilen anten performansı üzerindeki etkilerini göstermek için, üç farklı senaryo ele alınmıştır. İlk olarak, antende sadece P₁ yaması bulunmaktadır (S-1), daha sonra P₁ ve P₂ yamaları varken, kısmi topraklama düzlemi yerine tam topraklama düzlemi bulunmaktadır (S-2), ve son olarak antende sadece P₂ yaması bulunmaktadır (S-3). Bahsedilen üç farklı senaryo için antenlerin geometrileri Şekil 4.31’de sunulmuştur. Şekil 4.32’de, bu senaryolar için CEMS yazılımı kullanılarak elde edilen antenlerin S₁₁’lerini gösterilmektedir. Bu senaryolar için antenlerin performans parametreleri Çizelge 4.3’te verilmiştir. Çizelge 4.3’e göre, önerilen antenin performansına en yakın sonuç veren S-1 durumudur. Fakat, S-1 durumu için maksimum kazanç değeri 24 GHz’de önerilen anteninkinden daha düşüktür. S-2 ve S-3 durumlarında, antenlerin rezonans frekanslarında önemli ölçüde kayma olmasıyla birlikte maksimum kazanç değerleri de önerilen anteninkinden çok düşük çıkmıştır. Çizelge 4.3’te elde edilen sonuçlara göre, önerilen antenin diğer senaryonlara kıyasla daha iyi bir performans sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.3. Üç farklı senaryo için önerilen antenlerin performans parametreleri

	Rezonans Frekansı (GHz)	S₁₁ (dB)	Frekans Aralığı (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dBi)
S-1	24.12	-27.97	23.36-25.20	1840	2.11
	28.06	-11.61	27.50-28.46	960	4.02
S-2	23.98	-19.27	23.10-24.86	1760	2.49
	27.20	-14.71	26.52-27.96	1440	2.85
S-3	21.36	-20.72	20.22-23.24	3020	0.66
	26.26	-15.24	25.64-26.84	1200	0.74
Önerilen Anten	24.16	23.4	23.36-25.26	1900	3.20
	28.1	-13.4	27.56-28.57	1010	3.99



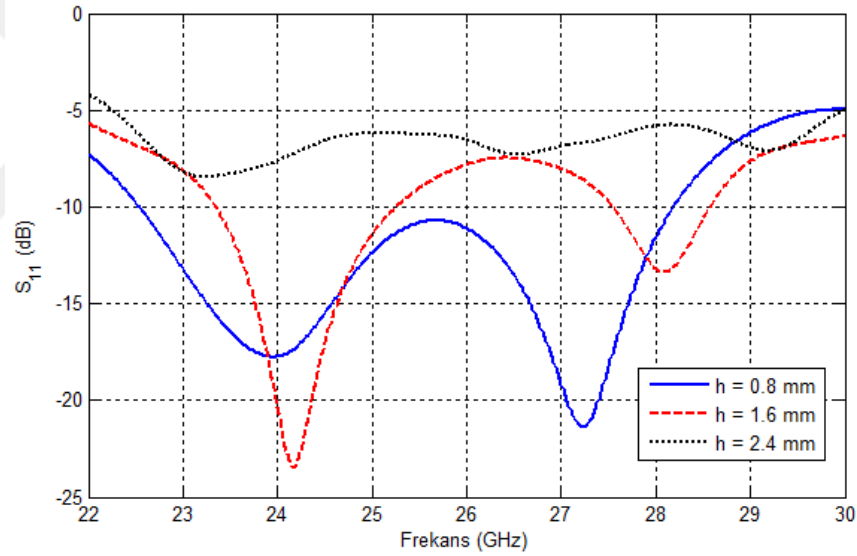
Şekil 4.31. Üç farklı senaryo için antenlerin geometrileri



Şekil 4.32. Üç farklı senaryo için antenlerin S_{11} simülasyon sonuçları

4.3.3. FR-4 alttaş kalınlığının antenin performansı üzerindeki etkileri

FR-4 alttaşın varolan farklı kalınlıkları (h) için, önerilen antenin performansı incelendi. FR-4 alttaşın farklı kalınlıkları (0.8, 1.6 ve 2.4 mm) için, antenlerin hesaplanan S_{11} 'leri Şekil 4.33'te gösterilmektedir. CEMS yazılımı kullanılarak elde edilen farklı kalınlıktaki antenlerin performans parametreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelgedeki sonuçlar, alttaş kalınlığının rezonans frekansları, bant genişliği ve kazanç üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.4'e göre, 0.8 mm alttaş üzerindeki antenin önerilen antene göre daha geniş bant genişliğine sahip olmasına rağmen, maksimum kazanç değerleri önerilen antene göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, 2.4 mm alttaş üzerindeki antenin belirtilen frekans bantlarında -10 dB altında S_{11} değerine sahip olduğu görülmekte ve bu kalınlık için antenin performansının iyi olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.33. 0.8, 1.6 ve 2.4 mm FR-4 alttaş kalınlıkları (h) için antenlerin S_{11} 'leri

Çizelge 4.4. FR-4 alttaş kalınlığı 0.8 ve 1.6 mm için anten performans parametreleri

Alttaş Kalınlığı (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	S_{11} (dB)	Frekans Aralığı (GHz)	Bant Genişliği (MHz)	Kazanç (dBi)
0.8	23.94	-17.76	22.54-25.74	3200	2.48
	27.22	-21.37	25.74-28.18	2440	0.55
1.6	24.16	-23.4	23.36-25.26	1900	3.20
	28.1	-13.4	27.56-28.57	1010	3.99

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, 5G mobil haberleşme sistemleri için düşük maliyetli FR-4 alttaşı üzerine çift bantlı mikroşerit yama anteninin sayısal ve deneysel analizi sunulmaktadır. Önerilen antenin tasarımı ve sayısal analizi, FDTD yöntemine dayalı CEMS yazılımı ve CST yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Önerilen antenin rezonans frekansları FCC tarafında belirlenen 5G frekans bantlarını içeren 24 ve 28 GHz'dir. Antenin performansı elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları ile doğrulanmıştır. Antenin maksimum kazanç değerleri, 24 ve 28 GHz'de sırasıyla 3.20 dBi ve 3.99 dBi'dir. Önerilen anten, gelişmekte olan 5G mobil haberleşme cihazları için uygun olmakla birlikte çok yönlü ışıma deseni sağlamaktadır.

Önerilen antenin performansını değerlendirmek için iki farklı parametrik çalışma yapılmıştır. İlk çalışmada, antenin üst yüzünde bulunan yamaların ve topraklama düzleminin boyutlarının anten performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci çalışmada ise, önerilen antenin farklı kalınlıklardaki FR-4 alttaşı üzerinde olmasının antenlerin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, antenlerin giriş yansıma katsayıları, rezonans frekansları, bant genişlikleri ve kazançları ciddi şekilde etkilenmiştir ve önerilen antenin performansının diğerlerinden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

5G frekansları için üretilen anten boyutlarının çok küçük olması anten üretimini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, tasarlanan antenin prototip üretiminde hassas kazıma yapabilmek için, PCB baskı cihazı yerine CNC cihazı kullanılmıştır. CNC üzerinde özel bir sistem tasarlanarak anten üretimi gerçekleştirilmiştir. Böylece, anten üretiminde hassasiyeti yüksek kazıma yaparak ve oluşabilecek üretim hatalarını minimize ederek, anten üretimi gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akkaya, İ. 1997. Antenler ve Propagasyon, Sistem Yayıncılık Mat. San.,Yayın No. 112, ISBN: 975-7397- 82-2,.
- Ali, M., Dougal, R., Yang, G. and Hwang, H.S. 2005. A Wideband Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna for 5-6 GHz Wireless LAN Applications, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 45, Cilt 4, s. 279-285.
- Amin, Sunbel S. 2011. Çeşitli Frekanslarda Geniş Bant Dairesel Mikroşerit Yama Anten Analizi ve Tasarımı. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A. E., Soong, A. C. K. and Zhang J. C. 2014. What Will 5G Be? in, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082.
- Bahl, I. J. and Bhartia, P. 1980. Microstrip Antennas. Artech House.
- Balanis, A. C. 2005. Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons Ltd, Hoboken, New Jersey, No. 3, Canada.
- Bazan, G. A. S. 2010. Design of a Circularly Polarized Patch Antenna for Satellite Mobile Communication lBand, Polytechnic University of Cataluña.
- Carr, J.J. and Hippisley G. 2012. Practical Antenna Handbook. Fifth edition. ed., McGraw-Hill/TAB Electronics, New York, NY. xvi, 767 p, 149-175 pages.
- Cheng, D. K. 2009. Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri. Palme Yayıncılık, İkinci Baskı.
- Chung, K. L. and Chaimool, S. 2011. Triple-band CPW-fed L-shaped monopole antenna with small ground plane. Microwave and Optical Technology Letters, vol. 53, no. 10, pp. 2274-2277.
- CST Microwave Studio, ver. 2008, Computer Simulation Technology, Framingham, MA,
- Demir, V. and Elsherbeni A. Z. 2021. Computational electromagnetic simulator software package version 4, veysdemir@gmail.com.
- Derneryd, G. 1976. Linearly polarized microstrip antennas. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-24, no. 6, pp. 846-850.
- Dheeraj, M. And Shankar. D. 2018. Microstrip Patch Antenna at 28 GHz for 5G Applications, Journal of Science Technology Engineering and Management-Advanced Research & Innovation vol. 1, no. 1.
- Elsherbeni, Z. and Demir V. 2016. The FiniteDifference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB Simulations, second edition, ACES Series on

Computational Electromagnetics and Engineering, SciTech Publishing, an Imprint of IET, Edison, NJ.

Fang, D. G. 2010. Antenna Theory and Microstrip Antennas, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida.

Floc, H. J. M. and Sayed, E. A. 2012. Dual-Band Printed Dipole Antenna with Parasitic Element for Compensation of Frequency Space Attenuation. International Journal of Electromagnetics and Applications, P-ISSN: 2168-5037.

Gampala G. and Reddy C. J. 2016. Design of Millimeter Wave Antenna Arrays for 5G Cellular Applications Using FEKO. In 2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES), pp. 1-2.

Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. and Ittipiboon, A. 2001. Microstrip antenna design handbook. Artech House Antennas and Propagation Library, 1-2.

Gupta P. 2013. Evolvment of Mobile Generations: 1G to 5G. International Journal for Technological Research in Engineering, vol. 1, pp. 152-157.

Gürdal, O. 2020. Elektromanyetik Dalga Teorisi, Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları, 3. Baskı, Bursa.

Haneef, S.R., Selvaperumal, S.K. and Jayapal, V. 2019. High Gain 2x2 Slotted Array Antenna for 5G Mobile Applications. Intl Journal Of Electronics And Telecommunications, 2019, vol. 65, no. 4, pp. 557-563 Manuscript received December 3, 2018; revised September.

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

Hicdurmaz, B. and Gumus Ö. F. 2019. Design and Analysis of 28 GHz Microstrip Patch Antenna for Different Type FR-4 Claddings. Uludag University Journal of the Faculty of Engineering, vol. 24, No:2.

https://www.5gamericas.org/wp_content/uploads/2019/07/5G_Americas_Spectrum_Recommendations_for_the_U.S_Final.pdf, Erişim Tarihi: 11/06/2021

<https://www.fcc.gov/5G>, Erişim Tarihi: 11/06/2021

<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/spectrum-for-4g-and-5g.pdf>, Erişim Tarihi: 11/06/2021

Imran, D., Farooqi, M. M., Khattak, M. I., Ullah, Z., M. Khan, I., Khattak, M. A. and Dar H. 2018. Millimeter Wave Microstrip Patch Antenna for 5G Mobile Communication, International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEET1.2018.8338623.

- Iwasaki, H. 1996. A Circularly Polarized Small-size Microstrip Antenna with A Cross Slot, In IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, no. 10, pp. 1399-1401, doi: 10.1109/8.537335.
- Jandi, Y., Gharnati, F. and Oulad, S.A. 2017. Design of A Compact Dual Bands Patch Antenna for 5G Applications. International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), pp. 1-4.
- Kaeib, A. F., Shebani, N. M. and Zarek, A. R. 2019. Design and Analysis of a Slotted Microstrip Antenna for 5G Communication Networks at 28 GHz. 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pp. 648-653.
- Kiran, T., Mounisha, N., Mythily, C.H., Akhil, D. and Phani Kumar T.V.B. 2018. Design of Micro Strip Patch Antenna for 5g Applications. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE) 13.1: 14-17.
- Kraus, J. D. 1966. Electrical and Electronic Engineering Series: Antennas, McGrawHill Inc., New York.
- Kraus, J. D. 1988. Antennas, McGraw-Hill Book Co., New York.
- Kuo, Y.-L., Wong, K.-L. 2003. Printed Double-T Monopole Antenna for 2.4/5.2 GHz Dual-band WLAN Operations. IEEE Trans. Antennas Propagat., 51(9).
- Kuzuoglu, M. and Mittra R. 1996. Frequency Dependence of The Constitutive Parameters of Causal Perfectly Matched Anisotropic Absorbers. IEEE Microwave Guided Wave Letters, vol. 6, no. 12, pp. 447-449.
- Li, Xu., Rongxing, Lu., Xiaohui, L. and Xuemin, S.J.C. and Xiaodong. Lin. 2011. Smart Community: An Internet of Things Application. IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 11, pp. 68-75.
- Liu, P. Y., Zou, B. X., Liu, X. and Sun, B. 2012. Compact CPW-fed Tri-band Printed Antenna with Meandering Splitring Slot for WLAN/WiMAX Spplications, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 11, pp. 1242–1244.
- Mahabub, A., Rahman, Md.M., Al-Amin, Md., Rahman, Md.S. and Rana, Md.M. 2018. Design of a Multiband Patch Antenna for 5G Communication Systems. Open Journal of Antennas and Propagation, 6, 1-14.
- Moreno, R.M., Ala-Laurinaho, J. and Viikari, V. 2018. Rod Waveguides as Future 5G Antennas for Mobile Devices, In 2018 48th European Microwave Conference (EuMC), pp. 1081-1084.
- Mourad, S. I. 2018. Dual-Band Microstrip Antenna for the Fifth Generation Indoor / Outdoor Wireless Applications. Applied Computational Electromagnetics (ACES) vol.25, no. 1.

- Nesem, K. 2012. UHF RFID Pasif Etiket İçin Dipol Anten Tasarımları. Yüksek Lisans Tezi. Haliç Üniversitesi, İstanbul.
- Nho, L. C. and Hung, L. Q. 2019. Microstrip Antenna Topologies for 5G Communication Systems. *Journal of Physics: Conference Series* 1353 (2019) 012014 doi:10.1088/1742-6596/1353/1/012014.
- Niknejad, A. M., Thyagarajan, S., Alon, E., Wang, Y. and Hull, C. 2015. A Circuit Designer's Guide to 5G mm-wave. In 2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), 2015, pp. 1-8.
- Ojaroudiparchin, N., Shen, M. and Pedersen, G. F. 2015. A 28 GHz FR-4 Compatible Phased Array Antenna for 5G Mobile Phone Applications. F3 P1 F1 F2 G port y x z y x z $\times$ Partial Ground Case 1 Substrate P2 F1 F2 G port y x z y x z $\times$ Partial Ground Case 3 Substrate F3 P1 F1 F2 port y x z y x z $\times$ Full Ground Case 2 Substrate P2 F4 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-4.
- Outerelo, D., Alvarez, A.A.V., Sanchez, M., Garcia, and Isasa, M.V. 2015. Microstrip Antenna for 5G Broadband Communications: Overview of Design Issues. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 2443-2444.
- Ozden, O., Karaaslan, M., Unal, E. and Kapusuz, D. 2012. Ultra Geniş Bant Uygulamaları İçin Mikroşerit Monopol Anten Multistrip Monopole Antenna For Uwb Applications.
- Pan, C.Y., Huang, C.-H. and Homg, T.-S. 2005. A New Printed G-shaped Monopole Antenna for Dual-band WLAN Application. *Microwave Opt. Techno. Lett.*, 45(4), 295-297.
- Pozar, D. M. 1992. Microstrip Antennas. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 79-91.
- Przesmycki, R., Bugaj, M. and Nowosielski, L. 2021. Broadband Microstrip Antenna for 5G Wireless Systems Operating at 28 GHz. *Electronics*, vol. 10, no. 1.
- Rahayu, Y. and Hidayat, M.I. 2018. Design of 28/38 GHz Dual-band Triangular-shaped Slot Microstrip Antenna Array for 5G Applications. In: 2018 2nd International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN), pp. 93–97. IEEE.
- Rao, R. G. S. and Sai, R. 2013. 5G – Introduction & Future of Mobile Broadband Communication Redefined, *Int. J. Electron. Commun. Instrum. Eng. Res. Dev.*, vol. 3, no. 4, pp. 119–124.
- Sainati, R. A. 1996. CAD of Microstrip Antenna for Wireless Application, Attech House, London.

- Ta, S. X., Choo, H. and Park, I. 2017. Broadband Printed Dipole Antenna and Its Arrays for 5G Applications. In IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2183-2186.
- Teresa, P. M. and Umamaheswari, G. 2020. Compact Slotted Microstrip Antenna for 5G Applications Operating at 28 GHz, IETE Journal of Research, pp. 1–8.
- Venkateshkumar, U., Kiruthiga, S., Mihitha, H., Maheswari, K. and Nithiyasri, M. 2020. Multiband Patch Antenna Design for 5G Applications. Proceedings of the Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC 2020) IEEE Xplore Part Number:CFP20K25-ART; ISBN:978-1- 7281-4889-2.
- Vora, L.J. 2015. Evolution Of Mobile Generation Technology: 1g To 5g And Review Of Upcoming Wireless Technology 5G, International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER) vol. 02, no. 10.
- Warren, L. S. and Gary, A. T. 1998. Antenna Theory and Design, John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Wu, G., Talwar, S., Johnsson, K., Himayat, N. and Johnson, K. 2011. M2M: From Mobile to Embedded Internet, IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 4, pp. 36