T.C. ERCİYES ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KABLOSUZ HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MİKROŞERİT BESLEMELİ YARIK ANTEN TASARIMI

Hazırlayan Gökhan Murat ERYILMAZ

Danışman Yrd. Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2013 KAYSERİ

T.C. ERCİYES ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KABLOSUZ HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MİKROŞERİT BESLEMELİ YARIK ANTEN TASARIMI (Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan Gökhan Murat ERYILMAZ

Danışman Yrd. Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu tarafından 112E006 nolu proje ile desteklenmiştir.

> Temmuz 2013 KAYSERİ

BILIMSEL ETIĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı : Gökhan Murat ERYILMAZ

İmza

nue

YÖNERGEYE UYGUNLUK

Kablosuz Haberleşme Uygulamaları İçin Mikroşerit Beslemeli Yarık Anten Tasarımı adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

nun

Gökhan Murat ERYILMAZ Tezi Hazırlayan

Walun

Yrd. Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN Danışman

Neer Cy Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Prof. Dr. Necmi'TAŞPINAR Elektrik – Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı Yrd. Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında Gökhan Murat ERYILMAZ tarafından hazırlanan "Kablosuz Haberleşme Uygulamaları İçin Mikroşerit Beslemeli Yarık Anten Tasarımı" adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

08/07/2013

JÜRİ:

- Başkan : Doç. Dr. İbrahim DEVELİ
- Üye : Doç. Dr. Ö. Galip SARAÇOĞLU
- Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 16/0.7/2013 tarih ve 2013/31-0.4. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

16 107 12013



ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Başta tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi, tecrübe ve mesaisini benim için cömertçe harcayan, dünyaya daha geniş bir pencereden bakma becerisi kazandıran ve isabetli öngörüleri ile her zaman yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa Türkmen'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 112E006) teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince baskı devre yapımında yardımcı olan Hüseyin Topçuoğlu ve Bekir Türkmen'e, ölçümlerin yapılmasında yardımcı olan TÜBİTAK UME personeli Elektronik Mühendisi Osman Şen'e değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Özellikle de, aralıksız devam eden yoğun araştırma süreçlerinde beni destekleyen, benden güler yüzünü hiçbir zaman eksik etmeyen, beni birçok konuda yüreklendirip hedeflerimi büyüten ve her zaman yanımda olan, can yoldaşım, sevgili eşime çok teşekkür ederim.

Gökhan Murat ERYILMAZ Kayseri, Temmuz 2013

KABLOSUZ HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MİKROŞERİT BESLEMELİ YARIK ANTEN TASARIMI

Gökhan Murat ERYILMAZ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2013 Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

KISA ÖZET

Kablosuz iletişim teknolojisi hızla gelişmektedir ve hayatımızda büyük bir etkiye sahiptir. Antenler, kablosuz haberleşme sistemlerinin önemli bir unsurudur ve iletişim araçlarının optimal tasarımında çok önemli bir rol oynamaktadır. Günümüzde mikroşerit antenler; çift ya da çoklu bantta çalışma özelliğine, düşük maliyete, basit yapıya ve minyatür boyuta sahip olmasından dolayı, kablosuz yerel alan ağı (WLAN) ve kablosuz geniş bandın hızlı ve kullanışlı örneği olan mikrodalga erişim ile dünya çapında birlikte çalışabilirlik (WiMAX) uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yeni nesil haberleşme sistemleri ve bu sistemlerde kullanılabilen anten yapılarının belirlenmesi amacıyla yapılan literatür çalışmasına yer verilmiştir. İkinci bölümde, kablosuz haberleşme uygulamalarında kullanılan anten yapılarından biri olan mikroşerit anten yapılarının özelliklerinden ve besleme tekniklerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, sayısal analiz yöntemlerinden olan Zaman Domeninde Sonlu Farklar Metodu (FDTD) ve bu metodu kullanan simülasyon programlardan birinin özelliklerine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ilk olarak, literatürdeki üç farklı anten yapısı için gerçekleştirilen çalışmalara ait bulgular incelenmiştir. Daha sonra teze özgü olarak tasarlanan beş adet anten yapısına ait detaylı incelemeler sunulmuş ve bu yapılara ait teorik ve deneysel çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir. Bu anten yapılarının üçü çift bant, ikisi ise üçlü bant frekans cevabına sahiptir. Beşinci bölümde ise tartışma, sonuç ve öneriler yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikroşerit beslemeli yarık antenler, Kablosuz haberleşme, WLAN, WiMAX, Çift-bant, Çoklu-bant.

MICROSTRIP FED SLOT ANTENNA DESIGN FOR WIRELESS COMMUNICATION APPLICATIONS

Gökhan Murat ERYILMAZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences M. Sc. Thesis, July 2013 Thesis Supervisor: Assist. Prof. Mustafa TÜRKMEN

ABSTRACT

Wireless communications technology has developed rapidly and has a major impact in our lives. Antennas are an essential element of wireless communications system and they play a paramount role in an optimal design of the wearable or hand-held units used in personal communications. Nowadays antennas' design for wireless communication systems there are at least three key requirements in addition to the promise of low cost: dual or multi-band operation, simple structure and miniaturized size the microstrip antennas have been widely implemented in many applications such as wireless local area networks (WLAN), worldwide interoperability for microwave access (WiMAX) and the other miniaturized systems that demand small sized antennas.

Thesis consists of five chapters. In the first chapter, the modern wireless communication systems have been presented and the antenna structures used for wireless communication systems have been given. In the second chapter, the microstrip antenna structures, specifications and feeding techniques of the antennas are presented. In the third chapter, Finite Difference Time Domain (FDTD) method and the specifications of an FDTD based electromagnetic simulation software program are given. In the fourth chapter, obtained results for three different antenna structures from the literature are given. Then the detailed investigations of designed and fabricated five different novel microstrip fed slot antennas are presented and the results of the theoretical and experimental studies are presented. Three of them have dual-band and the others have three-band frequency response. In the fifth chapter, conclusions and recommendations are presented.

Keywords: Microstrip fed slot antennas, Wireless communication, WLAN, WiMAX, Dual-band, Multi-band.

İÇİNDEKİLER

KABLOSUZ HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MİKROŞERİT BESLEMELİ YARIK ANTEN TASARIMI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	V
KISA ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER	X
TABLOLAR LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii

GİRİŞ

KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

G.1. Yeni Nesil Kablosuz Haberleşme Sistemleri	.1
G.2 Literatür Taraması	.3
G.3. Tezin Amacı	.7

1. BÖLÜM

MİKROŞERİT ANTENLER

1.1. Giriş	9
1.2. Mikroşerit Anten Çeşitleri	11
1.2.1. Mikroşerit yama antenler	11
1.2.2. Mikroşerit dipol antenler	12
1.2.3. Mikroşerit yarık antenler	
1.2.4. Mikroşerit yürüyen dalga antenler	
1.2.5. Monopol antenler	13
1.3. Besleme Teknikleri	14

1.3.1. Mikroşerit besleme	15
1.3.2. Eş eksenli kablo ile besleme	
1.3.3. Yakınlık kuplajlı besleme	
1.3.4. Boşluk kuplajlı besleme	

2. BÖLÜM

SAYISAL ANALİZ YÖNTEMİ

2.1.	Giriş19)
2.2.	Zaman Domeninde Sonlu Farklar Metodu (FDTD)19)
2.3.	CST Microwave Studio Programın Özellikleri23	3

3. BÖLÜM

MİKROŞERİT YARIK ANTEN TASARIMLARI

3.1. Giris	24
3.2. Literatürde Yapılmış Çalışmalar	24
3.2.1. L#1	24
3.2.2. L#2	26
3.2.3. L#3	28
3.3. Teze Özgü Olarak Tasarlanan Anten Yapıları	29
3.3.1. Teze Özgü Olarak Tasarlanan Anten Yapılarına ait Sonuçlar	30
3.3.1.1. T#1'e ait sonuçlar	30
3.3.1.2. T#2'ye ait sonuçlar	42

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1.	Tartışma-Sonuç ve	Öneriler	52
------	-------------------	----------	----

KAYNAKÇA	
ÖZGEÇMİŞ	

KISALTMALAR VE SİMGELER

WLAN	Wireless Local Area Network; Kablosuz Yerel Alan Ağı	
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access; Mikrodalga Erişim ile	
	Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik	
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network; Kablosuz Metropol Alan Ağları	
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers; Elektrik Elektronik	
	Mühendisleri Enstitüsü	
δ	Kayıp tanjantı	
MIC	Microwave Integrated Circuit; Mikrodalga Entegre Devre	
MMIC	Monolithic MIC; Monolitik Mikrodalga Entegre Devre	
SL	Slot Line; Yarık Hat	
CPW	Coplanar Waveguide, Eş düzlemli dalga kılavuzu	
CPS	Coplanar Striplines; Eş düzlemli şerit hatlar	
Q	Kalite faktörü	
ve ark.	ve arkadaşları	
ϵ_{eff}	Efektif dielektrik sabiti	
Z_0	Karakteristik empedans	
ε ₀	Boş uzayın dielektrik katsayısı	
ε _r	Bağıl dielektrik sabiti	
λ_0	Boş uzayda dalga boyu	
MoM	Method of Moment; Moment Metodu	
FDTD	Finite Difference Time Domain Method; Zaman Domeninde Sonlu	
	Farklar Yöntemi	
SMA	SubMiniature version A	
GSM	Global System for Mobile Communications; Mobil İletişim için Küresel	
	Sistem	
PCS	Personal Comminications Systems; Kişisel İletişim Sistemleri	
S ₁₁	Return Loss; Geriye Dönüş Kaybı	

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo G.1. Hız, mesafe ve frekansa göre kablosuz teknolojiler [3]	3
Tablo G.2. WiMAX için tahsis edilen frekans bantları [3]	3
Tablo 1.1. Mikroşerit antenlerde değişik tiplerdeki besleme tekniklerinin	
karşılaştırılması.	18
Tablo 3.1. T#1a yapısına ait boyutlar (mm)	34
Tablo 3.2. T#1b1 yapısına ait boyutlar (mm)	37
Tablo 3.3. T#1b2 yapısına ait boyutlar (mm).	39
Tablo 3.4. T#2a yapısına ait boyutlar (mm)	46
Tablo 3.5. T#2b yapısına ait boyutlar (mm)	49

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1. Basit bir mikroşerit anten geometrisi
Şekil 1.1. Mikroşerit yama anten tipleri11
Şekil 1.2. Merkez beslemeli tipik bir mikroşerit dipol anten12
Şekil 1.3. Mikroşerit beslemeli yarık anten tipleri
Şekil 1.4. Mikroşerit yürüyen dalga anten tipleri
Şekil 1.5. Mikroşerit beslemeli monopol anten
Şekil 1.6. Mikroşerit hatlı besleme
Şekil 1.7. Empedans uygunlaştırma yöntemleri; (a) girintili besleme, (b) kuplaj besleme.
Şekil 1.8. Eş eksenli kablo ile beslenmiş mikroşerit anten
Şekil 1.9. Yakınlık kuplaj beslemeli mikroşerit anten [59]17
Şekil 1.10. Boşluk kuplajlı beslemeli mikroşerit anten [59]18
Şekil 2.1. Yee hücresi [57]20
Şekil 2.2. Birim yee hücresi
Şekil 3.1. Seo ve ark. tarafından önerilen yapı [50]25
Şekil 3.2. Seo ve ark. tarafından önerilen yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları [50].
Şekil 3.3. Seo ve ark. tarafından önerilen yapının CST programında elde edilen $S_{11}, \dots 26$
Şekil 3.4. Bian ve ark. tarafından önerilen yapı [54]
Şekil 3.5. Bian ve ark. tarafından önerilen yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları [54].
Şekil 3.6. Bian ve ark. tarafından önerilen yapının CST programında elde edilen S $_{11} \ldots 27$
Şekil 3.7. Dang ve ark. tarafından önerilen yapı [47]
Şekil 3.8. Dang ve ark. tarafından önerilen yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları [47].
Şekil 3.9. Dang ve ark. tarafından önerilen yapının CST programında elde edilen S $_{11}$ 29
Şekil 3.10. TÜBİTAK UME yansımasız oda
Şekil 3.11. Agilent firmasına ait E8362B network analizör
Şekil 3.12. T#1'in geometrisi ve boyutları

Şekil 3.13. lf uzunluğunun değişimi	32
Şekil 3.14. a uzunluğunun değişimi	32
Şekil 3.15. c uzunluğunun değişimi.	33
Şekil 3.16. e uzunluğunun değişimi	33
Şekil 3.17 T#1a yapısının baskı devresi	34
Şekil 3.18. T#1a'nın S ₁₁ karakteristiği	34
Şekil 3.19. T#1a'nın voltaj duran dalga oranı	35
Şekil 3.20. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 3.36 GHz (b) 5.75 GHz	35
Şekil 3.21.	36
Şekil 3.22. θ=90° için ışıma diagramı (a) 3.36 GHz (b) 5.75 GHz	36
Şekil 3.23. T#1b1 yapısının baskı devresi	37
Şekil 3.24. T#1b1'in S ₁₁ karakteristiği	37
Şekil 3.25. T#1b1 yapısının voltaj duran dalga oranı	38
Şekil 3.26. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 3.47 GHz (b) 5.2 GHz	38
Şekil 3.27.	39
Şekil 3.28. θ=90° için ışıma diagramı (a) 3.47 GHz (b) 5.2 GHz	39
Şekil 3.29. T#1b2 yapısının baskı devresi.	40
Şekil 3.30. T#1b2'nin S ₁₁ karakteristiği	40
Şekil 3.31. T#1b2 yapısının voltaj duran dalga oranı	41
Şekil 3.32. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 2.41 GHz (b) 5.66 GHz	41
Şekil 3.33.	42
Şekil 3.34. θ=90° için ışıma diagramı (a) 2.41 GHz (b) 5.66 GHz	42
Şekil 3.35. T#2'nin geometrisi ve boyutları	43
Şekil 3.36. lf uzunluğunun değişimi	44
Şekil 3.37. a uzunluğunun değişimi	44
Şekil 3.38. c uzunluğunun değişimi.	45
Şekil 3.39. e uzunluğunun değişimi.	45
Şekil 3.40. f uzunluğunun değişimi	46
Şekil 3.41 T#2a yapısının baskı devresi	47
Şekil 3.42 T#2a'nın S ₁₁ karakteristiği	47
Şekil 3.43 T#2a'nın voltaj duran dalga oranı	47
Şekil 3.44. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.46 GHz ve (c) 5.54 GHz	48
Şekil 3.45. ϕ =90° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.46 GHz ve (c) 5.54 GHz	48

Şekil 3	3.46.	θ=90° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.46 GHz ve (c) 5.54 GHz	49
Şekil 3	3.47.	T#2b yapısının baskı devresi	49
Şekil 3	3.48.	T#2b'nin S ₁₁ karakteristiği	50
Şekil 3	3.49.	T#2b yapısının voltaj duran dalga oranı	50
Şekil 3	3.50.	φ=0° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.37 GHz ve (c) 5.34 GHz	51
Şekil 3	3.51.	φ=90° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.37 GHz ve (c) 5.34 GHz	51
Şekil 3	3.52.	θ=90° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.37 GHz ve (c) 5.34 GHz	51

GİRİŞ

KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

G.1. Yeni Nesil Kablosuz Haberleşme Sistemleri

Kablosuz yerel alan ağı (Wireless local area network; WLAN), standartları Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Enstitude of Electrical and Electronics Engineers; IEEE) 802.11 ile belirlenmiş olan ve 30-300 metre aralığındaki mesafelerde verel alan ağı kurarak, iki yönlü kablosuz haberleşme sağlayan bir teknolojidir [1]. Yüksek veri aktarım hızı, dünya çapında yaygın olma ve ağ yapılarına kolayca uygulanabilme ve kablosuz iletişim kurma gibi avantajlara sahiptir. Kablosuz olmasının getirdiği avantaj, günümüzde WLAN teknolojisini kullanan cihazların hayatın her alanında yer almasını sağlamıştır. WLAN teknolojisinin standardı, 1990'lı yılların başında IEEE tarafından çalışmalarına başlanan ve ilk sürümü 1997 yılında yayınlanan uluslararası bir standarttır. 2.4 GHz frekans bandını kullanan standart, yaklaşık 75 metre mesafede en fazla 2 Mbps hızında haberleşmeyi desteklemektedir. 1999 yılında 3.7 GHz ve 5 GHz frekans bantlarında daha geniş bir alanda haberleşmeyi sağlayabilen IEEE 802.11a geliştirilmiştir. Aynı yıl 2.4 GHz frekans bandında daha yüksek hızlarda ve IEEE 802.11'e göre biraz daha geniş bir alanda haberleşmeyi sağlayan IEEE 802.11b sürümü de yayınlanmıştır. 2003 yılında, IEEE 802.11b sürümünde geliştirmeler yapılarak standardın 54 Mbps'e kadar olan hızları desteklemesi sağlanmıştır. Bu sürüm daha sonra IEEE 802.11g olarak adlandırılmıştır. 2009 yılında yapılan düzenleme ile standartın, çok daha geniş alanlarda, 150 Mbps'e kadar olan hızlarda kullanabilmesi imkânı ortaya çıkmıştır. Bu sürüm şuan kullanılan en son sürümdür ve IEEE 802.11n olarak adlandırılmıştır.

WLAN'a göre daha geniş bir kapsama alanında kullanılmak üzere tasarlanan mikrodalga erişim ile dünya çapında birlikte çalışabilirlik (Worldwide Interoperability

for Microwave Access; WiMAX) teknolojisi, sabit ve mobil kullanıcılar için geniş bantlı haberleşmeleri destekleyerek son yıllarda kullanılan diğer haberleşme sistemlerine alternatif olması beklenen bir teknolojidir [2]. WiMAX teknolojisinin standartları, IEEE 802.16 ile belirlenmiştir. Pratikte 10-50 km çapında geniş bir alanda, 40-75 Mbps gibi yüksek hız ve geniş bant haberleşme olanağı sağlamaktadır. WİMAX standardını belirleme konusundaki çalışmalar, 1999 yılında IEEE tarafından yapılmaya başlanılmıştır. 2001 yılında, ticari olmayan bir organizasyon olan WiMAX forum kurulmuştur. WiMAX forum tarafından oluşturulan çözümler ve cihaz üreticilerinin birlikte çalışmaları sayesinde 2.5 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekans bantları, farklı devletler tarafından lisanslanarak kullanılmaktadır [2].

WiMAX ile WLAN sistemler arasındaki en temel fark, WiMAX'in, WLAN'a göre çok daha geniş alanlarda, daha verimli haberleşmeye imkân vermesidir. WiMAX, günümüz kablosuz geniş bant teknolojilerine göre daha yüksek bit hızlarıyla internet bağlantısı yapılmasını sağlayacaktır. WiMAX teknolojisi, kablo altyapısı gerektiren geniş bant teknolojilerine tamamlayıcı nitelikte olacak ve maliyet avantajı getirecektir. WiMAX, günümüzde bilgiye erişmeye olan ihtiyacı her yerden ve kesintisiz olarak sağlayabilecektir. Son yıllarda tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de internet hızla hayatımızın her aşamasında önemli bir rol oynamaktadır. Ticari uygulamaların dışında e-devlet, e-eğitim, e-sağlık ve e-ticaret gibi servislerin WLAN ve WiMAX uygulamaları sayesinde her an her yerde kablosuz bağlantılar aracılığı ile kullanılabilecek ve bu da ilgili servislerin daha yaygın kullanımına yol açacaktır. WLAN ve WiMAX uygulamalarında kullanılan ürünler ülkelere göre değişen frekanslarda çalışmaktadırlar. Kablosuz teknolojilere tahsis edilen frekanslar Tablo G.1'de ve ülkelere göre kullanılan frekans bantları ise Tablo G.2'de gösterilmektedir [3].

Teknoloji	Standart	Kullanımı	En Yüksek Hız	Mesafe	Frekans	
Wi-Fi	802.11a	WLAN	54 Mbps	100 m	5 GHz	
Wi-Fi	802.11b	WLAN	11 Mbps	100 m	2.4 GHz	
Wi-Fi	802.11g	WLAN	54 Mbps	100 m	2.4 GHz	
Wİ-Fİ	802.11n	WLAN	74 Mbps	250 m	2.4 GHz/ 5 GHz	
WiMAX	802 164	W/M A NI	75 Mbps (20 MHz	6.5-10	<11 CH ₇	
(sabit)	802.10u	WWAN	bant genişliğinde)	km		
WiMAX	802 160	W/M A NI	30 Mbps (10 MHz	1.5-5	2 6 CHz	
(mobil)	ou2.10e	WIVIAIN	bant genişliğinde)	km	2-0 UHZ	

Tablo G.1. Hız, mesafe ve frekansa göre kablosuz teknolojiler [3].

Tablo G.2. WiMAX için tahsis edilen frekans bantları [3].

Ülke/Coğrafik Bölge	Kullanılan Frekans Bandı
Kuzey Amerika, Meksika	2.5 GHz ve 5.8 GHz
Orta ve Güney Amerika	2.5 GHz, 3.5GHz ve 5.8 GHz
Doğu ve Batı Avrupa	3.5 GHz ve 5.8 GHz
Ortadoğu ve Afrika	3.5 GHz ve 5.8 GHz
Asya Pasifik	3.5 GHz ve 5.8 GHz

G.2 Literatür Taraması

İlk yama anten 1953'de Deschamps [4] tarafından sunulan mikroşerit anten yapısıdır. 1955 yılında Gutton [5] tarafından ilk patent alınmıştır. Ancak, ilk pratik mikroşerit anten, 1974 yılında Munson [6] ve 1975 Howell [7] tarafından sunulmuştur. Basit bir mikroşerit anten geometrisi aşağıdaki Şekil G.1'de görülmektedir.



Şekil G.1. Basit bir mikroşerit anten geometrisi.

Bu tip yama antenlerin tasarımında kullanılan tabanların bağıl dielektrik sabitleri (ε_r) genellikle 2.2 $\leq \varepsilon_r \leq 12$ aralığındadır. Ancak performanslarının yüksek olabilmesi için taban malzemesinin bağıl dielektrik sabitinin mümkün olduğu kadar küçük olması istenir. Yüksek dielektrik sabitli taban kullanmak, düşük verime ve dar bant genişliğine sebep olmaktadır. Yama iletkeni çok iyi iletken olması gerektiğinden dolayı bakır veya altından yapılır ve herhangi bir şekilde olabilmekle beraber, genellikle analizi kolaylaştıracak ve performans beklentilerine cevap verebilecek geometriler seçilir. 1970'li yıllarda düşük kayıp tanjantlı (δ) ve cazip termal ve mekanik özelliklere sahip dielektrik tabanların piyasaya çıkması, baskı devre tekniklerinin gelişmesi ve daha iyi teorik modellerin literatürde sunulması mikroşerit antenler konusunda yapılan teorik ve pratik çalışmaları hızlandırmıştır [4-18]. 1970'li yıllardan bu yana yama antenler ve bu yamalarda açılan yarıklar nedeniyle yarık antenler olarak isimlendirilen antenlerle ilgili teorik ve pratik çalışmaları içeren çok sayıda kitap, makale ve bildiri yayınlanmıştır[4-56].

İlk yıllarda, teknolojik sınırlamalardan kaynaklanan yüksek oranda kayıp ve yansımalar gibi bazı problemlere sahip olan mikroşerit yapıların, geliştirilen imalat teknolojileriyle optimize edilmesi pratik uygulamalarda kullanılmasıyla mikrodalga entegre devre teknolojisi (Microwave Integrated Circuit; MIC) geliştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda, MIC'lerde kullanılmak üzere, alternatif transmisyon yapıları olarak önerilen yarık hatlar (Slot Line; SL) ve koplanar hatlar (Coplanar Waveguide; CPW, Coplanar Strip Line; CPS) tasarlanmıştır. Geçmişte mikroşerit hatlarla gerçekleştirilen monolitik mikrodalga entegre devre (monolotic MIC; MMIC)'lerde devre elemanlarının toprak iletkenlerle bağlantısını sağlamak için geçiş deliklerinin açılması ve aynı zamanda ince tabanlara ihtiyaç duyulması gibi nedenlerle üretimi zorlaştıran ilave işlemler gerektirmekteydi. MMIC'lerin minyatürizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda önerilen tek yüzlü MMIC konfigürasyonları bu problemleri ortadan kaldırmıştır [4-18]. Mikroşerit hatların yerine temel iletim ortamı olarak CPS ve CPW'lerden oluşan tek yüzlü MMIC'lerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte kablosuz haberlesme sistemlerinde ilk yılların en çok kullanılan mikroserit hat beslemeli yarık antenler yerini CPW beslemeli yarık antenlere bırakmıştır.

Mikroşerit antenler son yıllarda, uzay araçlarında, uçaklarda, doppler ve navigasyon radarlarında, uydu haberleşmesinde, güdümlü mermi gibi birçok askeri alanda, adaptif anten dizilerinde, mobil radyo ve telsiz haberleşmesinde, radyo altimetrelerinde ve biyomedikal uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [4-18]. Yama antenler bilinen mikrodalga antenleri ile karşılaştırıldığında çok sayıda üstünlüğe ve genis bir frekans aralığında çok sayıda uygulamaya sahiptir. 100 MHz'den 100 GHz'e kadar genis bir frekans aralığında kullanılan ancak gelisen teknoloji ile birlikte her yıl calışma frekans aralığı daha da artan yama antenlerin bilinen mikrodalga antenlerine göre bazı üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir. Hafifliği, küçük hacimli olması, baskı devre teknolojisi ile üretiminin basit ve ucuz olması, seri üretiminin kolay olması, düzlemsel biçimliliği nedeniyle kullanışlı olması, çok ince yapılabilmelerinden dolayı uzay araçlarının aerodinamik yapısını bozmamaları, güdümlü mermiler, roketler ve uydular üzerinde önemli değişikliklere sebep olmaksızın yerleştirilebilmeleri, düşük saçılma ara kesitine sahip olmaları, basit bir besleme ile veya besleme konumundaki ufak değişikliklerle doğrusal ve dairesel kutuplanmış ışıma yapabilmeleri, çift frekans ve çift kutuplama antenlerin kolaylıkla üretilebilmesi, rezonatör taban desteklemeye gerek duymaması, çok farklı çeşitlerinin olması sebebiyle farklı anten karakteristiklerinin elde edilebilmesi, osilatörler, yükselteçler, anahtarlar, modülatörler, karıştırıcılar v.s. gibi katı hal araçlarının yama antenlerin tabanına ilave edilerek bileşik sistemlerin geliştirilebilmesi, besleyici hatları ve uyumlandırma devrelerinin antenle birlikte aynı zamanda üretilebilir biçimde olmasıdır. Bu avantajların yanında yama antenlerin bilinen mikrodalga antenlerine göre bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajları ise elektriksel olarak ince antenler için bant genişliklerinin düşük olması, çeşitli kayıplar sonucu düşük kazançlı olmaları, düşük güç kapasitesi (< 100 W), beslemelerden ve bağlantılardan istenmeyen ışıma, çoğunun yarı düzlem içinde ışıması, 20 dB olan maksimum kazancın elde edilmesinde pratik bazı güçlüklerin olması, besleme ve ışıma elemanı arasında yalıtımlarının zayıf olması, yüzey dalga uyarımının mümkün olması, dizilerin besleme yapısında büyük omik kayıplar olması, yüksek performanslı diziler için karmaşık besleme yapılarına gerek duyması, genelde boyuna ışımanın zayıf olması, yüksek frekanslarda dizi çevresinde ortak kuplaj ve çapraz-kutuplamanın kabul edilemez yüksek seviyeleri ile birlikte düşük verimli olmalarıdır. Yüksek dielektrik sabitli tabana sahip yama anten, MMIC RF devre uygulamaları için özellikle tercih

edilmektedir. Ancak, yüksek dielektrik sabitli taban kullanmak, düşük verime ve dar bant genişliğine sebep olmaktadır [4-18].

Modern kablosuz haberleşme sistemlerindeki hızlı gelişmelerle birlikte, tasarımcılar çok bantlı ve üretimi kolay, yapı olarak da basit tasarımlara yönelmişlerdir. Günümüzde literatüre sunulmuş WLAN ve WiMAX uygulamalarına adapte edilebilecek çeşitli çiftbantlı ve çok-bantlı anten tasarımları mevcuttur. Bu anten yapılarındaki yarıklar ve çeşitli farklı geometrideki çıkıntılar antenlerin birden çok bantta çalışmasını sağlamaktadır.

Geçmişte literatüre sunulmuş olan tek kutuplu (monopole) anten yapıları hem WLAN hem de WiMAX uygulamaları için uygun karakteristik özellikler taşımakta fakat boyut olarak oldukça büyük ve karmaşık tasarımlara sahiplerdi [40]. Yarık [34-39] ve tek kutuplu [40] antenlerin yanı sıra, çok bantlı uygulamalar için yama antenler [43], dipol antenler ve kompozit metamalzeme tabanlı rezonatörlerden oluşan antenler gibi başka birçok farklı uygulama söz konusudur. Diğer antenlerle karşılaştırıldığında, mikroşerit anten beslemeli yarık antenler daha fazla bant genişliği, daha az iletken kaybı ve ışıma elemanıyla besleme kaynağı arasında daha iyi yalıtım sağlama gibi daha iyi karakteristik özelliklere sahiptir. Önceki yıllarda mikroşerit hatlarla beslendiği için mikroşerit antenler [20-33] olarak isimlendirilen anten yapıları yerini WLAN uygulamalarında da kullanılabilecek anten yapıları olan yarık antenlere [34-39] ve koplanar iletim hatları ile beslenmiş mikroşerit antenlere [44, 46, 48] bırakmıştır. 2000'li yıllardan sonra ise geniş bant kablosuz haberleşme uygulamalarına ihtiyaç duyulmasıyla birlikte geniş bant ve çok geniş bant anten yapıları kullanılmaya başlamıştır [35, 37, 40, 42, 53]. Bu çalışmalardan bazılarında hem WLAN hem de WiMAX uygulamalarında kullanılabilecek özellikte anten yapıları tasarlanmıştır [40, 43, 47, 48, 51]. Yapılan inceleme sonucunda ayrıca bu anten yapılarının minyatürize edilebileceği ve farklı geometrik boyutlarda tasarlanarak daha üstün fiziksel özellikler gösteren yapılar sunulabileceği tespit edilmiştir.

WLAN/WiMAX uygulamalarda kullanılan en önemli donanımsal aygıt hiç şüphesiz veri aktarımını sağlayan anten yapılarıdır [4-18]. Bu uygulamalarda ilk olarak kullanılan anten yapıları MIC teknolojisiyle üretilmekte olan yama ve yarık antenlerdir [17, 18]. Başlangıçta bu antenler mikroşerit hatlarla beslendiği için mikroşerit antenler olarak

isimlendirilirken daha sonraki yıllarda yarık hatlar ve koplanar iletim hatları ile beslenmiş mikroşerit anten yapıları yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Sonraki yıllarda ise geniş bant kablosuz haberleşme uygulamalarına ihtiyaç duyulmasıyla birlikte geniş bant ve çok geniş bant anten yapıları literatüre sunulmuştur. Yapılan literatür taramasında farklı geometrik boyutlarda tasarlanarak farklı fiziksel özellikler gösteren yapılar sunulduğu ve bu yapıların minyatürize edilerek daha kompakt yapılar sunulmaya çalışıldığı görülmüştür [34-56]. Bu nedenle bazı anten yapılarının birden çok WLAN/WiMAX uygulaması için uygun karakteristik özelliklere sahip olabilecek şekilde çift-bant ve çok-bant karakteristiği sergileyecek biçimde tasarlandığı görülmüştür [40, 43, 47, 48, 51]. IEEE 802.11 WLAN standartları 2.4 GHz (2.4–2.484 GHz), 5.2 GHz (5.15–5.35 GHz), ve 5.8 GHz (5.725–5.875 GHz) frekans bantlarından oluşmaktadır. WiMAX standartları ise 3.5 GHz (3.3–3.6 GHz) ve 5.5 GHz (5.25–5.85 GHz) frekans bantlarından oluşmaktadır [51].

Ülkelere göre değişse de WLAN uygulamalarında kullanılan ürünler 2.4 GHz, 5.2 GHz ve 5.8 GHz'de, WiMAX ürünleri ise 3,5 GHz ve 5,5 GHz gibi değişen frekanslarda çalışmaktadırlar. Hem WLAN hem de WiMAX uygulamalarında yüksek frekanslarda veri iletimi gerektiği için bu antenlerin MIC teknolojisiyle üretilen antenler olması gerekmektedir.

G.3. Tezin Amacı

Tezin amacı, mikrodalga mühendisliğinin temel çalışma alanlarından birisi olan minyatürizasyon işleminin kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan anten yapılarına uygulanması ve yeni nesil kablosuz ağ uygulamalarında kullanılabilecek kompakt anten yapılarının sunulmasıdır. Bu amaçla ilk olarak WLAN ve kablosuz geniş bandın hızlı ve kullanışlı örneği WiMAX uygulamaları için literatürde yer alan standartlara uygun frekanslarda çalışan antenler incelenerek, bu uygulamalarda kullanılabilecek literatürdekilerden tamamen farklı geometrik ve fiziksel özelliklere sahip anten yapıları sunulacaktır. İlk olarak ilgili anten yapılarının, simülasyon programları ile analizi gerçekleştirilecek ve böylece kullanılacak anten yapılarına ait geometriler belirlenecektir. Daha sonra bu geometrilerde yer alan her bir boyutun antenin frekans cevabı üzerindeki etkisi incelenecek böylelikle sunulacak olan anten

anten yapılarının, geriye dönüş kaybı, kazancı, duran dalga oranları ve yayınım diyagramı gibi yayınım karakteristikleri incelenecektir. Literatürdekilere göre daha üstün özelliklere ve arzu edilen yayınım karakteristiklerine sahip olduğu tespit edilen anten yapıları, baskı devre kazıma yöntemi ile deneysel olarak gerçekleştirilecektir. Üretilen anten yapılarına ait yayınım karakteristikleri, yansımasız odalarda vektör network analizör kullanılarak ölçülecektir. Sonuç olarak bu tez çalışmasında, kablosuz haberleşme uygulamalarından olan WLAN ve WiMAX sistemlerde kullanılabilecek uygun frekanslarda çalışan çift ve üçlü bant frekans cevabına sahip mikroşerit beslemeli yarık antenlerin sunulması amaçlanmaktadır.

1. BÖLÜM MİKROŞERİT ANTENLER

1.1. Giriş

Mikroşerit antenler Şekil G.1'de gösterildiği gibi dielektrik taban malzemesinden, bu taban malzemenin üst yüzeyine yerleştirilen iletken ışıma elemanlarından (yama/boşluk), besleme hattından ve taban malzemenin alt yüzeyine yerleştirilen aynı zamanda antenin toprak tabakasını oluşturan iletken katmandan meydana gelmektedir. Bu tip yapıların baskı devre üretim tekniği ile kolaylıkla üretilebileceği görülmektedir. Işıma elemanının farklı geometrilerde yama ve/veya boşluk olacak şekilde seçilmesiyle, toprak düzleminde boşluk oluşturmak maksadıyla tasarlanmış literatürde önerilen birçok mikroşerit anten yapısı yer almaktadır. Dielektrik taban malzemenin alt ve üst yüzeyinde yer alan iletken kısımlar düşük kayıplı metalik malzemelerden seçilmektedirler. Işıma elemanının boyutları ve biçimi, taban malzemesinin kalınlığı, kayıp tanjantı ve dielektrik sabiti antenin performansını doğrudan etkileyen başlıca parametrelerdir.

Mikroşerit antenlerde iletken elemanların kalınlığı 17.5-75 µm aralığında değerler alırken, kullanılan taban malzemesinin dielektrik sabiti $2.2 \le \varepsilon_r \le 12$ ve kalınlığı (h) tipik olarak $0.003\lambda_0 \le \varepsilon_r \le 0.05\lambda_0'$ da arasında değerler almaktadır [16]. Taban malzemesinin dielektrik sabitinin düşük olması, kenar alanlar etkisini artırarak antenin ışıma performansında iyileşme sağlamaktadır. Ancak dielektrik sabitinin küçük olması, aynı frekans cevabının elde edilmesi için daha büyük ışıma elemanının kullanılması gerekeceğinden, ilgili antenin fiziki boyutları da büyümektedir. Bu da istenilmeyen bir durumdur. Taban malzemesinin dielektrik değerinin küçük kalınlığının büyük olması, antende ideal ışımayı sağlamasının yanı sıra frekans bant genişliğini de artırmaktadır. Fakat taban malzemesinin kalınlığının artırılması, yüzey dalgalarının oluşumunu tetikleyerek antenin veriminin azalmasına ve anten ışıma örüntüsünün bozulmasına neden olabilmektedir.

Yukarıda fiziksel yapısından ve teknik özelliklerinden genel olarak bahsedilen mikroşerit antenler, küçük hacim (kompakt boyut), düşük maliyet, hafiflik, düzlemsel olan ve düzlemsel olmayan yüzeylere uygulama kolaylığı, baskı devre teknolojisi ile kolay üretim ve mikrodalga entegre devrelere kolaylıkla entegre edilebilme gibi avantajlara sahiptir. Uygulandığı yüzeylerde oldukça küçük hacim kaplamaktadırlar. Bu özellikleri sayesinde küçük boyutlarındaki cihazların içerisine ve dışarısına kolaylıkla yerleştirilebilmektedirler. Böylelikle düzlemsel olmayan yüzeylere de uyumlu olmalarından dolayı radar, uçak, füze ve uydu gibi özel tasarım gerektiren araçların aerodinamik yapısını bozmadan bu araçlara kolayca monte edilebilmektedirler. Ayrıca bu antenlerden tek bant, çift-bant ve çoklu-bant karakteristiği elde edilebilmek mümkündür.

Bu avantajlarının yanında düşük verim, düşük kazanç, besleme ve birleşim yerlerinden ekstra ışıma yapma, yüzey dalgası ile uyartım oluşması, dar bant genişliği gibi dezavantajlara da sahiptir. Mikroşerit antenler çok yüksek anten kalite faktörüne (Q) sahiplerdir. Q, anten ile ilgili kayıpları temsil eder ve yüksek *Q* değeri, dar bant genişliği ve düşük verim anlamına gelmektedir. Q, taban malzemesi kalınlığının artırılması ile azaltılabilir. Bu kalınlık arttırıldığı zaman ise, oluşacak yüzey dalgaları nedeniyle antenin diğer elektriksel performansları olumsuz etkilenmektedir. Bu yüzey dalgaları, istenmeyen güç kayıplarına ve bazı anten karakteristiklerinde bozulmalara sebep olmaktadır.

Tasarlandığı ilk yıllarda ağırlıklı olarak güdümlü füzeler, roketler, radarlar ve uydular gibi askeri uygulamalarda kullanılan mikroşerit antenler, günümüzde WiMAX, WLAN, GSM, PCS sistemleri ve biyomedikal uygulamaları gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Mikroşerit antenler kullanıldığı alana göre farklı fiziksel yapılarda olabilirken, besleme teknikleri de tasarımlara bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Aşağıda mikroşerit anten çeşitleri ve besleme teknikleri hakkında bilgi verilmektedir.

1.2. Mikroşerit Anten Çeşitleri

Fiziksel parametrelerinin çeşitliliği sayesinde mikroşerit antenler diğer mikrodalga antenlere oranla daha geniş bir yelpazede sınıflandırılmaktadırlar. Pek çok farklı boyut ve geometrik yapıda tasarlanabilen mikroşerit antenler, mikroşerit dipoller, mikroşerit boşluk antenler, mikroşerit yama antenler ve mikroşerit yürüyen dalga antenler olmak üzere sınıflandırılabilir [8-18]. Bu sınıflama dışında kalan özel mikroşerit anten tasarımları da mevcuttur.

1.2.1. Mikroşerit yama antenler

Bu tip antenlerde dielektrik taban malzemesinin bir yüzeyi toprak düzlemi ile kaplanmış olup diğer yüzeyi ise herhangi bir geometriye sahip düzlemsel iletken bir yama bulunmaktadır.

Mikroşerit yama antenlerde iletken yamanın geometrik şekli farklı olsa da ışıma karakteristikleri benzerdir. Tipik olarak kazançları 5-6 dB seviyesinde olan mikroşerit yama antenler, 70°-90° arasında 3 dB hüzme genişliğine sahiptirler. Şekil 1.1'de literatürde sıklıkla rastlanılan ve yaygın olarak gerçekleştirilen mikroşerit yama anten tipleri görülmektedir [8-18]. Bunların dışında farklı şekillerde yama tipleri de bulunmaktadır.



Şekil 1.1. Mikroşerit yama anten tipleri.

1.2.2. Mikroşerit dipol antenler

Dikdörtgen yama antenler uzunluk-genişlik oranına bağlı olarak iki ana kategoride sınıflandırılırlar. İletken yamanın dar olduğu antenler mikroşerit ya da baskılı dipol anten olarak isimlendirilmektedir. Akım dağılımlarının benzerliklerinden dolayı dipol ve dikdörtgen yama antenlerin ışıma örüntüleri ile de benzerlik göstermektedir. Yine de ışıma dirençleri, bant genişlikleri ve çapraz polarizasyon ışıması büyük oranda farklılık göstermektedir. Diğer mikroşerit antenlere oranla daha az yer kapladıklarından dolayı özellikle dizi anten uygulamalarında kullanılan mikroşerit dipoller, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi genellikle merkez beslemeli olarak tasarlanmaktadırlar [8-18].



Şekil 1.2. Merkez beslemeli tipik bir mikroşerit dipol anten.

1.2.3. Mikroşerit yarık antenler

Bu tip mikroşerit antenlerde, dielektrik taban malzemesinin bir yüzeyinde ışıma boşluğu bulunan toprak düzlemi, diğer tarafında ise mikroşerit besleme hattı bulunmaktadır. Işıma boşluğu farklı şekillerde tasarlanabilmektedir. Boşluk antenlerde besleme çoğunlukla mikroşerit hat ya da eş düzlemli dalga kılavuzu ile yapılmaktadır. Diğer mikroşerit yama antenlerle karşılaştırıldığında çapraz-polarizasyon seviyeleri (~ -35 dB) oldukça düşüktür. Bu tür antenlerde ışıma yarığın her iki tarafından çift yönlü şekilde gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra, yarığın bir tarafında kullanılacak iletken yansıtıcı ile tek yönlü ışıma da elde edilebilir. Mikroşerit beslemeli yarık anten tipleri Şekil 1.3' te gösterilmektedir [8-18].



Şekil 1.3. Mikroşerit beslemeli yarık anten tipleri.

1.2.4. Mikroşerit yürüyen dalga antenler

Şekil 1.4'te değişik tipteki yürüyen dalga mikroşerit antenler gösterilmektedir. Bu tip antenler, zincir biçimli tekrarlanan iletkenlerden ve hattın açık uç uyumlu bir dirençle sonlandırılmasından meydana gelir [8-18]. Anten yapısındaki değişikliklerle ana hüzme yatay veya düşey konum arasında herhangi bir açıya yönlendirilebilir.



Şekil 1.4. Mikroşerit yürüyen dalga anten tipleri.

1.2.5. Monopol antenler

Günümüzde monopol antenler geniş bant performansı ve uygun ışıma örüntüsü sağlamaları nedeniyle, kablosuz haberleşme uygulamalarında özellikle tercih edilmektedirler. IEEE standartlarına göre çeşitli frekans bantlarında gerçekleşen kablosuz haberleşme uygulamalarının tek bir anten elemanıyla sağlanabilmesi ancak

ilgili antenin çoklu-bant veya geniş-bant performans göstermesi ile mümkün olabilmektedir. Literatürde yer alan mikroşerit beslemeli monopol anten Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Mikroşerit beslemeli monopol anten.

Bu anten yapılarında taban malzemesinin bir yüzeyinde iletken yama ve yamaya doğrudan bağlı olan mikroşerit besleme hattı bulunmaktadır. Bu antenleri tipik yama antenlerden ayıran başlıca özellik, toprak düzleminin sadece mikroşerit besleme hattı boyunca oluşturuluyor olmasıdır. Bu yapısından dolayı monopol antenlerde her iki düzlemde de ışıma gerçekleşmektedir. Ayrıca toprak düzleminin büyük olması rezonans frekansını düşürürken, empedans bant genişliğini de bir miktar etkilemektedir.

1.3. Besleme Teknikleri

Mikroşerit antenlerde besleme farklı yöntemlerle yapılabilmektedir [8-18]. Besleme teknikleri en genel halde temaslı ve temassız olmak üzere iki ayrı sınıfta incelenebilir. Temaslı beslemede, elektriksel enerjinin taşındığı hat doğrudan ışıma elemanına bağlıyken, temassız beslemede enerji hattı ile ışıma elemanı arasında elektromanyetik kuplaj ile enerji aktarımı yapılmaktadır. Hangi besleme tekniğinin tercih edileceği büyük oranda tasarlanan anten yapısına bağlıdır. Mikroşerit antenlerde besleme teknikleri dört ayrı grupta incelenebilir. Aşağıda ilgili teknikler genel özellikleri bakımından ele alınmaktadır.

1.3.1. Mikroşerit besleme

Mikroşerit besleme yama ve yarık antenlerde en basit besleme tekniğidir. Bu tip beslemede, Şekil 1.6'da gösterildiği gibi besleme hattı eğer varsa mikroşerit yama ile aynı taban malzemesi üzerinde ve doğrudan mikroşerit yamanın bir kenarına bağlıdır. Basit yapısından dolayı tasarım ve üretiminin kolay olması en önemli avantajı olmasına rağmen, bu besleme tekniği dar-bant performans sağlamaktadır. Antenin bant genişliğini artırmak için taban malzeme kalın seçildiğinde ise, yüzey dalgaları ve besleme merkezli parazitik ışımalar artmaktadır. Ayrıca mikroşerit besleme hattının genişliği yamaya oranla daha düşük olduğundan empedans uygunluğu oldukça zordur. Mikroşerit hat ile yama arasındaki empedans uygunluğu herhangi bir empedans uygunlaştırıcı ara devreye ihtiyaç duyulmaksızın iki farklı şekilde sağlanabilmektedir [8-18].



Şekil 1.6. Mikroşerit hatlı besleme.

Şekil 1.7 (a)'da gösterilen yöntemde, mikroşerit yama üzerinde bir girinti oluşturularak empedans uygunluğu sağlanabilmektedir. Girintinin konumu ve uzunluğu, kullanılan mikroşerit hattın empedansına uyumlu olacak şekilde seçilmektedir. Diğer yöntemde ise, empedans uygunluğu Şekil 1.7 (b)'de gösterildiği gibi mikroşerit besleme hattı ile yama arasında bir boşluk bırakılarak yapılmaktadır. Daha etkin bir empedans uygunluğu sağlayan bu yöntemde, sinyal elektromanyetik kuplaj yoluyla mikroşerit yamaya aktarılmaktadır. Fakat boşluk mesafesi genişledikçe güç kaybı artmaktadır [8-18].



Şekil 1.7. Empedans uygunlaştırma yöntemleri; (a) girintili besleme, (b) kuplaj besleme.

1.3.2. Eş eksenli kablo ile besleme

Bu tip beslemede, eş eksenli kablo (coaxial cable) Şekil 1.8'de gösterildiği gibi antenin toprak düzleminin altında bulunur ve iç iletken, taban malzemesi içerisinden mikroşerit yamaya bağlanırken, dış iletken toprak düzlemine bağlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemde empedans uygunluğu beslemenin konumu değiştirilerek kolayca sağlanabilmektedir. Fakat anten taban malzemesinin delinmesi ve bu delikten geçirilen iç iletkenin metalik yama ile lehimlenerek birleştirilecek olması, bu tür beslemenin deneysel olarak gerçekleştirilmesini hayli zorlaştırmaktadır. Ayrıca bu besleme tekniği kullanılan antenler mikroşerit besleme tekniğinde olduğu gibi dar bantlıdır. Bant genişliğinin artırılması için taban malzemesi kalın seçildiğinde, eş eksenli hattın uzunluğunun artmasına bağlı olarak, besleme merkezli istenmeyen ışımalar ve yüzey dalgaları artmaktadır [8-18].



Şekil 1.8. Eş eksenli kablo ile beslenmiş mikroşerit anten.

1.3.3. Yakınlık kuplajlı besleme

Şekil 1.9'da gösterilen bu tarz beslemede, iki farklı taban malzemesi kullanılmaktadır. Besleme hattı bu iki malzemenin arasında kalırken, ışıma elemanı en üst yüzeyde bulunmaktadır. En alt yüzey ise toprak düzlemidir. Mikroşerit besleme ve eş eksenli beslemelerin asimetrik yapılarından dolayı oluşan çapraz polarizasyon ve besleme merkezli parazitik ışımalar bu besleme tekniği ile giderilmiştir. Ayrıca mikroşerit yamanın üzerinde bulunduğu taban malzemesi kalın seçilerek oldukça yüksek bir bant genişliği sağlanabilmektedir. Besleme hattının uzunluğu ve mikroşerit yamanın genişlik-uzunluk oranlarının ayarlanmasıyla empedans uygunlaştırma yapılabilmektedir. Bu besleme tekniğinin en önemli dezavantajı iki dielektrik katmanın aynı hizada olacak şekilde üretilebilme zorluğudur [8-18].



Şekil 1.9. Yakınlık kuplaj beslemeli mikroşerit anten [59].

1.3.4. Boşluk kuplajlı besleme

Bu besleme tipinde, Şekil 1.10'da gösterildiği gibi ışıma elemanı ile besleme hattı arasında toprak düzlemi bulunmaktadır ve aralarındaki etkileşim toprak düzlemindeki boşluktan sağlanmaktadır. Kuplaj boşluğu genellikle mikroşerit yamanın merkezine denk gelecek şekilde oluşturularak antende simetri sağlanmakta, böylece çapraz-polarizasyon çok düşük seviyelere çekilebilmektedir. Bunun yanında besleme hattı ile mikroşerit yama arasında toprak düzleminin olması besleme merkezli parazitik ışımaları engellemektedir. Kuplaj yoluyla aktarılacak elektromanyetik enerjinin miktarı, büyük oranda boşluğun boyutları, şekli ve konumuna bağlıdır. Ayrıca boşluğun uzunluğu ve mikroşerit besleme hattının genişliği ayarlanarak empedans uygunluğu sağlanmaktadır. En önemli dezavantajı ise, yakınlık kuplajlı beslemede olduğu gibi çok katmanlı yapısından dolayı üretiminin oldukça zor olmasıdır [8-18].



Şekil 1.10. Boşluk kuplajlı beslemeli mikroşerit anten [59].

Tablo 1.1'de mikroşerit antenlerde kullanılan farklı besleme tekniklerinin karakteristik özellikleri karşılaştırılmıştır.

	Mikroşerit Hatlı Besleme	Eş Eksenli Hat ile Besleme	Yakınlık Kuplajlı Besleme	Boşluk Kuplajlı Besleme
Tasarım	Eş düzlemsel	Düzlemsel olmayan	Düzlemsel	Düzlemsel
İstenmeyen Besleme Işıması	Az	Fazla	Fazla	Fazla
Üretim Kolaylığı	Kolay	Delme ve lehimleme gerekli	Hizalama gerekli	Hizalama gerekli
Empedans Uygunlaştırma	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Bant Genişliği	% 2-5	% 2-5	% 13	% 21

Tablo 1.1. Mikroşerit antenlerde	değişik tiplerdeki besleme tekniklerinin
karşılaştırılması.	

2. BÖLÜM SAYISAL ANALİZ YÖNTEMİ

2.1. Giriş

Elektromanyetik problemlerin çözülmesinde analitik yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık yapılarda, yüksek işlem yeteneğine sahip bilgisayarların hızla gelişmesiyle sayısal yöntemleri kullanan simülasyon programları kullanılmaya başlanmıştır. Tez çalışmasında zaman domeninde sonlu farklar yöntemi (Finite Difference Time Domain; FDTD) yöntemini kullanan CST Studio Suit simülasyon programının, yüksek frekanslı problemlerin üç boyutlu elektromanyetik simülasyonlarını hızlı ve doğru olarak yapması için tasarlanan CST Microwave Studio aracı kullanılmıştır.

2.2. Zaman Domeninde Sonlu Farklar Metodu (FDTD)

FDTD yöntemi, elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan en popüler sayısal yöntemlerden biridir. FDTD metodu 30 yılı aşkın bir süredir var olmasına rağmen, bilgisayarların hız ve kapasiteleri arttığı sürece metodun popülaritesi artmaya devam edecektir. Ayrıca metodun geliştirilmesine yönelik yayınların artması da metodun çekiciliğini artırmaktadır.

FDTD yöntemi, diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin doğrudan zaman domeninde ayrıklaştırılıp çözülmesi esasına dayanır. İlk defa 1966 yılında Yee [57] tarafından ortaya atılan bu yöntem, uzayın seçilen ayrık noktalarında üç elektrik alan ve üç manyetik alan bileşeninin hesaplanabilmesini sağlar.

Karmaşık olmasına rağmen, Maxwell denklemlerinin anlaşılmasını sağlamak ve bilgisayarda işlemleri yürütmek için denklemlerin uygun bir forma dönüştürülmesi gerekir. İzole edilmiş yüklerin ve akımların olmadığı bir uzay bölgesi ele alınırsa Maxwell denklemleri şöyle yazılabilir [58].

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{E}$$
(2.1)

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{H}$$
(2.2)

Bu işlemlerin anlaşılması için, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi alanları uzayda sürekli olarak ele almaktansa ayrık olarak ele almak daha yararlıdır.



Şekil 2.1. Yee hücresi [57].

Gerçek bir problemde malzeme, her biri bir μ ve ε değerine sahip olan ve uygun bir şekilde boyutlandırılmış Yee hücrelerine bölünerek kolayca analiz edilebilir. Burada μ , birim hücredeki malzemenin manyetik geçirgenliğini, ε ise malzemenin dielektrik sabitini gösterir.

Alan elemanlarının hepsi için başlangıç değeri verilir. Daha sonra uygun bir cevap elde edilene kadar, alan denklemleri iteratif olarak hesaplanır. E değerleri $t = n \cdot \Delta t$ 'de ve H değerleri $t = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta t$ 'de güncelleştirilir. Ana döngü zaman döngüsüdür ve seçilen maksimum zaman adımı tamamlanıncaya kadar ana zaman döngüsü çalıştırılır. Eğer zaman Δt uzunluğunda ayrık adımlara ayrılırsa, şimdiki zamanda hesaplanan alan değerleri, önceki değerlere göre artar veya azalır.
21

Eşitlik 2.1 ve 2.2'de verilen Maxwell denklemlerindeki E ve H alanlarına ait kısmi diferansiyel denklemlerdeki gerekli vektörel çarpımlar yapılırsa, manyetik alan;

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \begin{vmatrix} \vec{l} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \\ \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \end{pmatrix}$$
(2.3)

olur. Burada manyetik alanın 3 bileşeni vardır. Bunlar;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right)$$
(2.4a)

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right)$$
(2.4b)

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right)$$
(2.4c)

Elektrik alan;

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \begin{vmatrix} \vec{l} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_{\chi} & H_{y} & H_{z} \end{vmatrix} = \frac{1}{\varepsilon} \begin{pmatrix} \frac{\partial H_{z}}{\partial y} - \frac{\partial H_{y}}{\partial z} \\ \frac{\partial H_{x}}{\partial z} - \frac{\partial H_{z}}{\partial x} \\ \frac{\partial H_{y}}{\partial x} - \frac{\partial H_{x}}{\partial y} \end{pmatrix}$$
(2.5)

olur. Burada elektrik alanın 3 bileşeni vardır. Bunlar;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right)$$
(2.6a)

$$\frac{\partial E_{y}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_{x}}{\partial z} - \frac{\partial H_{z}}{\partial x} \right)$$
(2.6b)

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right)$$
(2.6c)

şeklinde yazılabilir.

Böylece elektrik ve manyetik alana ait üçer bileşen elde edilmiş olur. Uzayın herhangi bir noktasındaki elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirlerine tamamen bağlıdır ve bu bağlılık ortamın manyetik geçirgenliği ve dielektrik sabitiyle de ilgilidir.

Elde edilen bu 6 adet eşitlik zamana bağlıdır. Bu eşitliklerin bilgisayar ortamında çözülebilmesi için ayrıklaştırılması gerekir. FDTD yönteminde üç boyutlu problemlerde uzaydaki ayrıklaştırma, Yee tarafından önerilen Şekil 2.2'deki birim hücre kullanılarak gerçekleştirilir [57].



Şekil 2.2. Birim yee hücresi.

Bu amaçla Taylor serisinden faydalanılarak merkezi sonlu farklar açılımı yapılır. Burada $u(i.\Delta x, j.\Delta y, k.\Delta z) = u_{i,j,k}^n$ anlamına gelir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) - u^n \left(i - \frac{1}{2}, j, k \right)}{\Delta x} \tag{2.7}$$

konumda ayrıklaştırmayı sağlar.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u^{n+1/2}(i,j,k) - u^{n-1/2}(i,j,k)}{\Delta t}$$
(2.8)

ise zamanda ayrıklaştırmayı sağlar.

Üç adet manyetik alan ve üç adet elektrik alan denklemi üzerinde konum ve zamanda ayrıklaştırma yapıldıktan sonra düzenleme yapılırsa manyetik alan ve elektrik alan denklemleri elde edilmiş olur.

FDTD yönteminde analiz edilecek olan yapı x, y ve z eksenleri boyunca binlerce küçük hücreye bölünür. Gerekli işlemlerden sonra, yapı içerisindeki elektromanyetik dalgaların ilerleyişi hakkında bilgiler elde edilir. Ancak elektrik ve manyetik alan değerlerinin fazla değişmediği yerlerde, yapının çok fazla hücreye bölünmesi işlem yükünü artırdığından dolayı gereksizdir. Bunun yerine alan değerlerinin hızlı değişim gösterdiği bölgelerde, köşelerde ve uç bölgelerde yapının daha fazla hücreye bölünmesiyle daha doğru ve verimli sonuçlar elde edilmektedir.

2.3. CST Microwave Studio Programın Özellikleri

Literatürde sunulan çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılan simülasyon programlardan biri CST (Computer Simulation Technology) firması tarafından üretilen CST Microwave Suit'tir. Anten yapılarının analizlerinde CST programının Microwave Studio aracını kullanacağız. CST programı, 3 boyutlu çizim yapmaya olanak tanıyan bir arabirime sahiptir. CST'de, S-parametrelerini, elektromanyetik alan dağılımlarını, anten ışıma diyagramlarını ve buna bağlı diğer antenin karakteristiğini belirleyen parametreleri, antenin, gerilim duran dalga oranı, Smith grafiğini, port giriş empedansı, akım yoğunluğu gibi birçok hesaplamayı hızlı bir şekilde yapabilmektedir [61].

3. BÖLÜM MİKROŞERİT YARIK ANTEN TASARIMLARI

3.1. Giriş

Bu tez çalışmasında kablosuz haberleşme uygulamalarında kullanılan anten yapıları incelenerek, WLAN/WİMAX frekans bantlarında çalışacak şekilde çok bantlı, mikroşerit beslemeli, kompakt yarık antenler tasarlanmıştır. İlk olarak CST MS programında yapılan tanımlamaları (port tanımlamaları, sınır şartları, mesh tanımları, transient solver ayarları vb.) doğrulamak için, farklı simülasyon programları ile tasarlanmış ve literatüre sunulmuş, CPW veya mikroşerit beslemeli, mikroşerit yama veya boşluk geometrilerine sahip olan anten yapılarını CST simülasyon programı ile gerçekleştireceğiz. Daha sonra tez kapsamında önereceğimiz anten yapılarının tasarım ve analizleri gerçekleştirilmiştir. İstenilen karakteristik özelliklere sahip olduğu tespit edilen anten yapıları laboratuvarımızda mevcut olan Quick Circuit 7000 baskı devre kazıma cihazı ile deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Anten yapılarının ölçümleri ise TÜBİTAK UME merkezinde yansımasız odalarda network analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2. Literatürde Yapılmış Çalışmalar

3.2.1. L#1

Literatürdeki yapılan çalışmaları incelemeye WLAN çalışmaları için sunulmuş olan CPW beslemeli çift bantlı monopol anten yapısı ile başlayacağız. Seo ve ark. [50] tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada, dielektrik sabiti 3.5 yüksekliği 1.52 mm olan teflon dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.1'de önerilen yapı ve Şekil 3.2'de elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Seo ve ark. tarafından önerilen yapı [50].



Şekil 3.2. Seo ve ark. tarafından önerilen yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları [50].

Bu yapı verilen boyutlara göre CST programında tasarlanmış ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3'te elde edilen simülasyon sonucundan görüleceği üzerine makalede verilen sonuçlar doğrulanmıştır.



Şekil 3.3. Seo ve ark. tarafından önerilen yapının CST programında elde edilen S₁₁.

3.2.2. L#2

Literatürde yapılmış olan çalışmalardan ikinci olarak inceleyeceğimiz yapı Bian ve ark. tarafından 2010 yılında önerilmiştir [54]. Bu yapı mikroşerit beslemeli, WLAN uygulamaları için önerilmiş çift bantlı bir yapıdır. Bu çalışmada dielektrik sabiti 4.4 yüksekliği 1 mm olan FR4 dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.4'te önerilen yapı ve Şekil 3.5'de elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Bian ve ark. tarafından önerilen yapı [54].



Şekil 3.5. Bian ve ark. tarafından önerilen yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları [54].

Bu yapı verilen boyutlara göre CST programında tasarlanmış ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da elde edilen simülasyon sonucu ile makalede verilen sonuçlar uyum sağlamaktadır.



Şekil 3.6. Bian ve ark. tarafından önerilen yapının CST programında elde edilen S_{11} .

3.2.3. L#3

Literatürde yapılmış olan çalışmalardan son olarak inceleyeceğimiz yapı Dang ve ark. tarafından 2010 yılında önerilmiştir [47]. Bu yapı mikroşerit beslemeli, WLAN/WiMAX uygulamaları için önerilmiş üç bantlı yarık anten yapısıdır. Bu çalışmada dielektrik sabiti 4.4, yüksekliği 1.6. mm ve kayıp tanjantı 0.02 olan FR4 dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.7'de önerilen yapı ve Şekil 3.8'de elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Dang ve ark. tarafından önerilen yapı [47].



Şekil 3.8. Dang ve ark. tarafından önerilen yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları [47].

Bu yapı verilen boyutlara göre CST programında tasarlanmış ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da elde edilen simülasyon sonucu ile makalede verilen sonuçlar uyum sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Dang ve ark. tarafından önerilen yapının CST programında elde edilen S₁₁.

3.3. Teze Özgü Olarak Tasarlanan Anten Yapıları

Literatürdeki son yıllarda yapılan çalışmaları incelendiğimiz zaman, bu çalışmamızda WLAN/WiMAX frekans spektrumunda çalışacak şekilde çok bantlı anten yapılarını tasarlamaya karar verilmiştir. Tasarladığımız yapılar literatürde mikroşerit beslemeli yarık anten yapıları olarak yer almaktadır. Bu yapıların analizleri TÜBİTAK projesi kapsamında alınan birkaç farklı dielektrik taban malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında çift bant ve üçlü bantta çalışan iki farklı yapı sunulmaktadır. Bu yapılara ait anten karakteristikleri aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

Teze özgü olarak tasarlanan anten yapıları T#1 ve T#2 olarak adlandırılmıştır. Farklı taban malzemelerinde tasarlanan versiyonları ise T#1a ve T#1b gibi isimlerle belirtilmiştir.

Tasarlanan anten yapıları Quick Circuit 7000 baskı devre kazıma cihazı ile deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Anten yapılarının ölçümleri ise TÜBİTAK UME merkezinde yansımasız odalarda Agilent firmasına ait E8362B network analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yansımasız odaya ve ölçüm düzeneğine ait fotoğraflar Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.10. TÜBİTAK UME yansımasız oda.



Şekil 3.11. Agilent firmasına ait E8362B network analizör.

3.3.1. Teze Özgü Olarak Tasarlanan Anten Yapılarına ait Sonuçlar

3.3.1.1. T#1'e ait sonuçlar

Bu bölümde çift bant çalışma özelliği gösteren yapılar tasarlanmaktadır. Bu yapılardan tezimizde T#1 olarak isimlendirerek devam edilmektedir. T#1'in geometrisi ve

boyutlandırma tanımlamaları Şekil 3.12'de verilmektedir. T#1 yapısı literatürde mikroşerit beslemeli yarık anten olarak adlandırılmaktadır. Tasarımlarımızda TÜBİTAK projesi kapsamında alınan, dielektrik sabiti (ε_r) 4.3, yüksekliği (h) 1.3 mm, kayıp tanjantı (δ) 0.02 olan FR-4 dielektrik taban malzemesi ve ε_r =6.15, h=1.27 mm ve δ = 0.0027 olan Rogers firmasının üretmiş olduğu RT/duroid 6006 dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. FR-4 dielektrik taban malzemesi kullanarak tasarlanan yapı tez T#1a olarak, RT/duroid 6006 dielektrik taban malzemesi kullanarak tasarlanan yapı tez T#1b1 ve tez T#1b2 olarak isimlendirilmiştir. Yapılan tasarımlarda, anten yapılarını deneysel olarak gerçekleştirirken 50 Q'luk SMA (SubMiniature version A) konnektör kullanıldığı için, empedans uyumsuzluğunu ortadan kaldırmak için hattın giriş empedansı 50 Q olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.12. T#1'in geometrisi ve boyutları.

Şekil 3.12'de tanımlanan boyutlardaki değişimlerin S_{11} cevabına etkisi incelendiği zaman, antenin kolaylıkla istenilen frekanslarda çalıştırılabileceği görülmektedir.

Besleme hattının uzunluğundaki (l_f) değişimin frekans cevabındaki etkisi Şekil 3.13'te verilmektedir. l_f uzunluğu arttırıldığı zaman 1. bandın frekansı sabit kalırken, 2. bandın frekansı azalmaktadır.



Şekil 3.13. lf uzunluğunun değişimi.

a, c ve e boyutlarındaki değişimler sırası ile Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi a, c ve e boyutlarındaki değişimler 1. bandın frekansını değiştirirken, 2. bandın frekansı üzerinde fazla bir etkiye sahip değildir.



Şekil 3.14. a uzunluğunun değişimi.



Şekil 3.15. c uzunluğunun değişimi.



Şekil 3.16. e uzunluğunun değişimi.

Tanımlanan boyutların etkileri belirlendiği için kolaylıkla antenin çalışacağı bantlar ayarlanabilmektedir.

T#1a'ya ait boyutlar Tablo 3.1'de verilmektedir.

W _f	$l_{\rm f}$	h	а	b	с	d	e	W
2.5	29	1.3	4	1	13	4	17	3.5

Tablo 3.1. T#1a yapısına ait boyutlar (mm).

T#1a yapısı için yapılan deneysel çalışmanın resimleri Şekil 3.17'de görülmektedir. Bu yapıya ait yansıma katsayısı sonuçları ise Şekil 3.18'de verilmektedir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere tasarlanan anten çift bant olacak şekilde, 3.3 GHz (3300-3400 MHz) ve üst 5 GHz (5725-5850 MHz) [60] bantlarında çalışmaktadır.



Şekil 3.17 T#1a yapısının baskı devresi.



Şekil 3.18. T#1a'nın S_{11} karakteristiği.

Bu yapıya ait voltaj duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 3.19'da verilmektedir. Kablosuz haberleşme uygulamalarında kullanılan antenlerin VSWR değerlerinin rezonans frekanslarında 2'nin altında olması arzu edilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi bu anten yapısının VSWR değeri rezonans noktalarında 2'den daha küçüktür. Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve 3.22'de ise P#1'e ait ışıma diyagramları verilmektedir.



Şekil 3.19. T#1a'nın voltaj duran dalga oranı.



Şekil 3.20. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 3.36 GHz (b) 5.75 GHz.



Şekil 3.21. $\phi=90^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 3.36 GHz (b) 5.75 GHz.



Şekil 3.22. θ =90° için ışıma diagramı (a) 3.36 GHz (b) 5.75 GHz.

Dielektrik sabiti 6.15 olan dielektrik taban malzemesini kullandığımız zaman yapımızı T#1b olarak isimlendireceğimizi söylemiştik. Bu yapıda çift bant çalışacak şekilde 2 farklı yapı tasarlanmıştır. Bunların ilki olan T#1b1'e ait boyutlar Tablo 3.2'de verilmektedir.

W _f	$l_{\rm f}$	h	а	b	с	d	e	W
1.9	29	1.27	4	2	13	4	14.4	4

Tablo 3.2. T#1b1 yapısına ait boyutlar (mm).

T#1b1 yapısı için tarafımızca yapılan deneysel çalışmanın resimleri Şekil 3.23'te görülmektedir. Bu yapının yansıma katsayısına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.24'te verilmektedir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere tasarlanan anten çift bant olacak şekilde, 3.5 GHz (3400-3600 MHz) ve alt 5 GHz (5150-5350 MHz) [60] bantlarında çalışmaktadır.



Şekil 3.23. T#1b1 yapısının baskı devresi.



Şekil 3.24. T#1b1'in S₁₁ karakteristiği.

Bu yapıya ait voltaj duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 3.25'te verilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi bu anten yapısının VSWR değeri rezonans noktalarında 2'den daha küçüktür.



Şekil 3.25. T#1b1 yapısının voltaj duran dalga oranı.

Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de ise T#1b1'e ait ışıma diyagramları verilmektedir.



Şekil 3.26. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 3.47 GHz (b) 5.2 GHz.



Şekil 3.27. $\phi=90^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 3.47 GHz (b) 5.2 GHz.



Şekil 3.28. θ =90° için ışıma diagramı (a) 3.47 GHz (b) 5.2 GHz.

T#1b2'ye ait boyutlar Tablo 3.3'te verilmektedir.

Tuelo elet In 102 jupiend dit elegididi (initi).	Tablo 3.3.	T#1b2	yapısına	ait boyutlar	(mm).
--	------------	-------	----------	--------------	-------

Wf	lf	h	а	b	с	d	e	W
1.86	28.08	1.27	4	4	5	5	14.6	1.2

T#1b2 yapısı için tarafımızca yapılan deneysel çalışmanın resimleri Şekil 3.29'da verilmektedir. Bu yapının yansıma katsayısına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.30'da verilmektedir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere tasarlanan anten çift bant olacak şekilde, 2.3 GHz (2300-2500 MHz) ve alt 5 GHz (5470-5725 MHz) [60] bantlarında çalışmaktadır.



Şekil 3.29. T#1b2 yapısının baskı devresi.



Şekil 3.30. T#1b2'nin S₁₁ karakteristiği.

Bu yapıya ait voltaj duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 3.31'de verilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi bu anten yapısının VSWR değeri rezonans noktalarında 2'den daha küçüktür.



Şekil 3.31. T#1b2 yapısının voltaj duran dalga oranı.

Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te ise T#1b2'ye ait ışıma diyagramları verilmektedir.



Şekil 3.32. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 2.41 GHz (b) 5.66 GHz.



Şekil 3.33. $\phi=90^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 2.41 GHz (b) 5.66 GHz.



Şekil 3.34. θ =90° için ışıma diagramı (a) 2.41 GHz (b) 5.66 GHz.

3.3.1.2. T#2'ye ait sonuçlar

Bu bölümde çoklu bant çalışma özelliği gösteren yapılar tasarlanmaktadır. Bu yapılardan tezimizde T#2 olarak isimlendirerek devam edilmektedir. T#2'in geometrisi ve boyutlandırma tanımlamaları Şekil 3.35'te verilmektedir. T#2 yukarıda bahsettiğimiz

gibi literatürde mikroşerit beslemeli yarık anten olarak adlandırılmaktadır. Tasarımlarımızda TÜBİTAK projesi kapsamında alınan, dielektrik sabiti (ε_r) 4.3, yüksekliği (h) 1.3 mm, kayıp tanjantı (δ) 0.02 olan FR-4 dielektrik taban malzemesi ve $\varepsilon_r = 6.15$, h=1.27 mm, δ = 0.0027 olan Rogers firmasının üretmiş olduğu RT/duroid 6006 dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. FR-4 dielektrik taban malzemesi kullanarak tasarlanan yapı tez T#2a olarak, RT duroid 6006 dielektrik taban malzemesi kullanarak tasarlanan yapı tez T#2b olarak isimlendirilmiştir. Yapılan tasarımlarda, anten yapılarını deneysel olarak gerçekleştirirken 50 Ω 'luk SMA (SubMiniature version A) konnektör kullanıldığı için, empedans uyumsuzluğunu ortadan kaldırmak için hattın giriş empedansı 50 Ω olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.35. T#2'nin geometrisi ve boyutları.

Şekil 3.35'te tanımlanan boyutlardaki değişimlerin frekans cevabına etkisi incelendiği zaman, antenin kolaylıkla istenilen frekanslarda çalıştırılabileceği görülmektedir.

Besleme hattının uzunluğundaki (l_f) değişimin frekans cevabındaki etkisi Şekil 3.36'da verilmektedir. l_f uzunluğu arttırıldığı zaman 1. ve 2. bandın frekansı hemen hemen sabit kalırken, 3. bandın frekansı azalmaktadır.



Şekil 3.36. lf uzunluğunun değişimi.

a, c, e ve f boyutlarındaki değişimler sırası ile Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'ta verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi 1. bandın çalışma frekansını ayarlamak için f, 2. bandın çalışma frekansını ayarlamak için a ve 3.bantın frekansını ayarlamak için ise c diye isimlendirdiğimiz boyutları değiştirmek gerekmektedir. Ayrıca bandın frekansını boyutu 1. ve 2. değiştirirken 3. bandın frekansını e değiştirmemektedir. Bu boyutları değiştirerek geriye dönüş kaybının seviyesini de ayarlamak mümkündür.



Şekil 3.37. a uzunluğunun değişimi.



Şekil 3.38. c uzunluğunun değişimi.



Şekil 3.39. e uzunluğunun değişimi.



Şekil 3.40. f uzunluğunun değişimi.

Bu yapıda da tanımlanan boyutların etkileri belirlendiği için kolaylıkla antenin çalışacağı bantlar ayarlanabilmektedir.

Dielektrik sabiti 4.3 olan dielektrik taban malzemesini kullandığımız zaman yapımızı T#2a olarak isimlendireceğimizi söylemiştik. T#2a'ya ait boyutlar Tablo 3.4'te verilmektedir.

W _f	$l_{\rm f}$	h	а	b	с	d	e	f	g	W ₁	W ₂
2.5	20	1.3	2	4	11.2	2	36	5	1	8	8

Tablo 3.4. T#2a yapısına ait boyutlar (mm).

T#2a yapısı için tarafımızca yapılan deneysel çalışmanın resimleri Şekil 3.41'de görülmektedir. Bu yapının yansıma katsayısına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.42'de verilmektedir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere tasarlanan anten üçlü bant olacak şekilde, 2.3 GHz (2300-2500 MHz), 3.5 GHz (3400-3600 MHz) ve alt 5 GHz (5470-5725 MHz) [60] bantlarında çalışmaktadır.



Şekil 3.41 T#2a yapısının baskı devresi.







Şekil 3.43 T#2a'nın voltaj duran dalga oranı

Bu yapıya ait voltaj duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 3.43'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi bu anten yapısının VSWR değeri rezonans noktalarında 2'den daha küçüktür.

Şekil 3.44, Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da ise T#2a'ya ait ışıma diyagramları verilmektedir.



Şekil 3.44. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.46 GHz ve (c) 5.54 GHz.



Şekil 3.45. ϕ =90° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.46 GHz ve (c) 5.54 GHz.



Şekil 3.46. θ=90° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.46 GHz ve (c) 5.54 GHz.

Dielektrik sabiti 6.15 olan dielektrik taban malzemesini kullandığımız zaman yapımızı T#2b olarak isimlendireceğimizi söylemiştik. T#2b'e ait boyutlar Tablo 3.5'te verilmektedir.

Tablo 3.5.	T#2b	yapısına	ait bo	yutlar	(mm).
------------	------	----------	--------	--------	-------

Wf	$l_{\rm f}$	h	a	b	с	d	e	f	g	W ₁	W ₂
1.86	18.2	1.27	2	4	9	2	34	5	1	8	8

T#2b yapısı için tarafımızca yapılan deneysel çalışmanın resimleri Şekil 3.47'de görülmektedir. Bu yapının yansıma katsayısına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.48'de verilmektedir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere tasarlanan anten üçlü bant olacak şekilde, 2.3 GHz (2300-2500 MHz), 3.3 GHz (3300-3400 MHz) ve alt 5 GHz (5150-5350 MHz) [60] bantlarında çalışmaktadır.



Şekil 3.47. T#2b yapısının baskı devresi.



Şekil 3.48. T#2b'nin S₁₁ karakteristiği.



Şekil 3.49. T#2b yapısının voltaj duran dalga oranı.

Bu yapıya ait voltaj duran dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 3.49'da verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi bu anten yapısının VSWR değeri rezonans noktalarında 2'den daha küçüktür.

Şekil 3.50, Şekil 3.51 ve Şekil 3.52'de ise T#2b'ye ait ışıma diyagramları verilmektedir.



Şekil 3.50. $\phi=0^{\circ}$ için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.37 GHz ve (c) 5.34 GHz.



Şekil 3.51. ϕ =90° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.37 GHz ve (c) 5.34 GHz.



Şekil 3.52. θ=90° için ışıma diagramı (a) 2.45 GHz (b) 3.37 GHz ve (c) 5.34 GHz.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, WLAN ve WiMAX uygulamaları için çoklu bant frekans cevabına sahip mikroşerit beslemeli kompakt yarık antenler sunulmuştur. Bu antenler dielektrik bir taban malzemesi ve bu taban malzemesi üzerine farklı geometrik şekillerde yarıklar kazınmış olan bir toprak düzleminden oluşmaktadır. Antenlerin beslemesi mikroşerit hat ile sağlanmaktadır. Toprak düzleminde yer alan yarıklar çift bantta işlem yapmaya imkan sağlayan ve ayrıca yüksek frekanslarda geniş bantta işlem yapabilme özelliği kazandıran ana elemanlardır. Bunun yanı sıra besleme hattının genişliği antenin karakteristik empedansının ayarlanmasında, uzunluğu ise antenlerin rezonans frekanslarının ayarlanmasında kullanılabilecek iki önemli parametre olduğu görülmüştür.

Tez kapsamında sunulan anten yapıları çift veya üç bantta aynı anda çalışma özelliğine sahip olan aynı zamanda üretimi kolay ve kompakt bir geometriye sahip anten yapılardır. Sunulan 2.4/5.2/5.8-GHz bantlarında WLAN'ın anten yapıları, gereksinimlerini ve 3.5/5.5-GHz bantlarında ise WiMAX'in gereksinimlerini sağlayabilecek çift- veya üçlü-bant operasyon karakteristiğine sahiptirler. Literatürde kablosuz haberleşme uygulamalarında kullanılacak olan antenlerin çalışma bantlarındaki frekans noktalarında geriye dönüş kayıplarının -10 dB'den daha küçük olması ve VSWR'lerinin de 2'den küçük olması gerekmektedir. Tez kapsamında sunulan tüm antenler literatürde kabul edilen değerlerin altında geriye dönüş kayıplarına ve VSWR'lere sahiptir.

Bu tez calışmasında iki veya daha fazla bantta calışabilen yarık antenlerle ilgili teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla ilk olarak literatürde WLAN ve WiMAX uygulamalarında kullanılmakta olan anten yapılarından bazıları için teorik ve deneysel çalışmalar yapılmış bu yapıların sonuçları test edildikten sonra teze özgü anten yapılarının belirlenmesine ilişkin çalışmalara başlanmıştır. Arzu edilen karakteristik özellikleri verebilecek olan anten geometrileri belirlenmesi sırasında ise ilk olarak teorik çalışmalarda ilgili yapıların, geri dönüş kaybı (return loss), kazancı (gain) ve yayınım diyagramı (radiation pattern) gibi yayınım karakteristikleri incelenmiştir. Bu calısmalarda ilgili anten yapıları zaman domeninde sonlu farklar metodu (FDTD: Finite Difference Time Domain Method) ile analiz edilmiş ve böylece kompakt anten geometrileri belirlenmiştir. Geometrilerde hangi parçacık ya da açıklığın antenin hangi rezonansına etki ettiği tespit edilmeye çalışılmış ve böylece ilgili rezonans frekansları istenilen frekans değerlerine kaydırılmıştır. Ardından arzu edilen yayınım karakteristiklerine sahip anten geometrileri, baskı devre kazıma yöntemi ile farklı dielektrik katsayılara sahip taban malzemeleri üzerine aktarılmıştır. Böylece bu tez ile mikrodalga mühendisliğinin temel çalışma alanlarından birisi olan minyatürizasyon işlemi, günümüz haberleşme teknolojisinde önemli bir yeri bulunan ve sürekli gelişmekte olan kablosuz haberleşme sistemlerine uygulanmıştır.

Tez sonunda elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer anten yapılarının sonuçlarıyla karşılaştırılarak ulusal ve uluslararası literatüre sunulmuştur. Yapılardan bazıları için makalelerin hazırlanmasına tez yazım döneminde de devam edilmektedir. Bu çalışmalarda her bir geometrik parametredeki değişimin rezonans frekansları üzerinde etkisinin nasıl olduğu ve değişik dielektrik katsayısına sahip taban malzemeleri üzerinde bu geometrilerden nasıl bir frekans cevabı elde edilebileceğine dair sonuçlar incelenmiştir. Teze özgü olarak tasarlanan antenlerden biri uluslararası 35. The Antenna Measurement Techniques Association (AMTA) konferansında sunulmak üzere kabul edilmiştir. Üçlü bant rezonans karakteristiğine sahip olan yapı ise Science Citation Index (SCI)'çe taranan Microwave Optical Technology Letters (MOPTL) dergisine sunulmak üzere hazırlanmaktadır.

Sonuç olarak, tez kapsamında literatürdeki üç farklı yapı için, teze özgü olarak ta beş yeni yarık anten geometrisi için teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, RT/Duroid taban malzemeleri ve piyasada anten ve devre tasarımında

yaygın olarak kullanılmakta olan FR4 kullanılmıştır. Bu taban malzemelerinin yüzeyi 17 µm veya 35 µm kalınlığında bakır tabaka ile kaplıdır. Deneysel çalışmalarda baskı devre kazıma tekniği, benzetim çalışmalarında FDTD tekniğine dayalı simülasyonlar yapan bir paket program kullanılmıştır.

KAYNAKÇA

- Wikipedia, 2013. IEEE 802.11. (Web page: <u>http://en.wikipedia.org</u>), (Date accessed: January 2013).
- 2. Andrews, J.G., Ghosh, A. and Muhamed, R., 2007. Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking. Prentice Hall, America, 449 pp.
- Güngör M., Tekin M. A., Yılmaz R., 2009. WiMAX: Diğer Genişbant Telsiz Erişim (GTE) Teknolojileri ile Karşılaştırılması Raporu. BTK, Ankara, 23s.
- 4. Deschamps, G. A., 1953. Microstrip microwave antennas, 3rd. USAF Symposium on Antennas, October 18-22 1953.
- Gutton, H. and Baissinnot, G., 1955. Flat aerial for ultra high frequencies. French Patent, 70313.
- Munson, R. E., 1974. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 22 (1): 74-78.
- Howell, J. Q., 1975. Microstrip antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 23 (1): 90-93.
- Bahl, I. J., Bhartia, P.,1980. Microstrip Antennas. Artech House, Dedham, MA, 348 pp.
- 9. Gupta, K. C., Benalla, A. (Editors),1988. Microstrip Antenna Design. Artech House, Canton, MA, 397 pp.
- James, J. R., Hall, P. S.,1989. Handbook of Microstrip Antennas. IEE Electromagnetic Wave Series, Publication No 28, 1-2, Peter Peregrinus Ltd., London, 1312 pp.
- Bhartia, P., et al., 1991. Millimeter-Wave Microstrip and Printed Circuit Antennas. Artech House, Canton, MA, 322 pp.
- 12. Pozar, D. M., Schaubert, D. H. (Editors), 1995. Microstrip Antennas-The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays. IEEE Press, New York, 433 pp.
- Zurcher, J. F., Gardiol, F. E., 1995. Broadband Patch Antennas. Artech House, Norwood, MA, 209 pp.
- Lee, K. F., Chen, W., 1997. Advances in Microstrip and Printed Antennas. John Wiley and Sons, 599 pp.
- Garg, R., et al., 2001. Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House, Canton, MA, 875pp.

- Balanis C. A., 2005. Antenna Theory Analysis and Design. Wiley Interscience, New Jersey, 1117 pp.
- Kin-Lu Wong, 2002. Compact and Broadband Microstrip Antennas. John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, 329 pp.
- Sainati, R. A., 1996. CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications. Artech House, Norwood, MA, 255 pp.
- Agrawal, P. K., Bailey, M. C., 1977. An analysis technique for microstrip antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 25 (6): 756-759.
- Uzunoglu, N. K., et al.,1979. Radiation properties of microstrip dipoles. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 27 (6): 853-858.
- Richards, W. F., et al., 1981. An improved theory for microstrip antennas and applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 29 (1): 38-46.
- 22. Carver, K. R., Mink, J. W., 1981. Microstrip antenna technology. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 29** (1): 2-24.
- Sullivan, P. L., Schaubert D. H., 1986. Analysis of an aperture coupled microstrip antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34 (8): 977-984.
- Bhattacharyya, A. K., Garg, R., 1986. Effect of substrate on the efficiency of an arbitrarily shaped microstrip patch antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34 (10): 1181-1188.
- Jackson, D. R., Alexopoulos, N. G., 1986. Analysis of planar strip geometries in a substrate-superstrate configuration. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34 (12): 1430-1438.
- Pozar, D. M., 1986. A reciprocity method of analysis for printed slot and slot coupled microstrip antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34 (12): 1439-1446.
- 27. Dahele, J.S., Lee, K.F., 1987. On the resonant frequencies of the triangular patch antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 35** (1): 100-101.
- Pozar, D. M., Voda, S. M., 1987. A rigorous analysis of a microstrip line fed patch antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 35 (12): 1343-1350.
- Chew, W. C., Liu, Q., 1988. Resonant frequency of a rectangular microstrip patch.
 IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 36 (8): 1045-1056.
- Abboud, F., et al., 1988. New determination of resonant frequency of circular disc microstrip antenna application to thick substrate. Electronics Letters, 24 (17): 1104-1106.
- Menzel, W., and Grabherr, W. 1991. A microstrip patch antenna with coplanar feed line. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1 (11): 340-342.
- Giauffret, L., Laheurte, L.M., 1996. Theoretical and experimental characterisation of CPW-fed microstrip antennas. IEE Proceedings Microwaves, Antennas and Propagation, 143 (1): 13-17.
- Kara, M., 1994. Novel broad-band rectangular microstrip antenna element. Microwave and Optical Technology Letters, 7 (15): 685-687.
- Shams, K. M. Z., M. Ali, and H. S. Hwang, 2006. A planar inductively coupled bow-tie slot antenna for WLAN application. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 20 (7): 861-871.
- Eldek, A. A., A. Z. Elsherbeni, C. E. Smith, 2005. Square slot antenna for dual wideband wireless communication systems. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 19 (12): 1571-1581.
- Wu, J.-W., 2005. 2.4/5 GHz dual band triangular slot antenna with compact operation. Microwave and Optical Technology Letters, 45 (1): 81-84.
- 37. Su, S. W., Wong, K. L., Cheng, Y. T., Chen, W. S., 2004. High gain broadband patch antenna with a cavity ground for 5 GHz WLAN operation. Microwave and Optical Technology Letters, 41 (5): 397-399.
- Sze, J.-Y., Chang, W.-S., 2009. Dual-band square slot antenna with embedded crossed strips for wireless local area network applications. Microwave and Optical Technology Letters, 51 (2): 435-439.
- Bae, H. R., So, S. O., Cho, C. S., 2009. A crooked U-slot dual-band antenna with radial stub feding. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 8: 1345-1348.
- Chien, Y. P., Horng, T. S., Chen, W. S., Chien, H. H., 2007. Dual wideband printed monopole antenna for WLAN/WiMAX applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 6: 149-151.
- Wu, Y. J., Sun, B.-H., Li, J.-F., Liu, Q.-Z., 2007. Triple-band omni-directional antenna for WLAN application. Progress in Electromagnetics Research, 76: 477-484.

- Wang, F. J., Zhang, J. S., 2007. Wide band cavity-backed patch antenna for PCS/IMI2000/2.4GHZ WLAN. Progress in Electromagnetics Research, 74: 39-46.
- Mahatthanajatuphat, C., Saleekaw, C., Akkaraekthalin, P., 2009. A rhombic patch monopole antenna with modified minkowski fractal geometry for UMTS, WLAN, and mobile WiMAX application. Progress in Electromagnetics Research, 89: 57-74.
- Chaimool, S., Chung, K. L., 2009. CPW-fed mirrored-L monopole antenna with distinct triple bands for Wi-Fi and WiMAX applications. Electronics Letters, 45 (18): 928-929.
- Zhang, J., Zhang, X.-M., Liu, J.-S., Wu, Q.-F., Ying, T., Jin, H., 2009. Dualband bidirectional high gain antenna for WLAN 2.4/5.8 GHz applications. Electronics Letters, 45 (1): 6-7.
- Liu, W.-C., Wu, C.-M., Chu, N.-C., 2010. A compact CPW-fed slotted patch antenna for dual-band operation. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 9: 110-113.
- Dang, L., Lei, Z. Y., Xie, Y. J., Ning, G. L., Fan, J., 2010. A compact microstrip slot triple-band antenna for WLAN/WiMAX applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 9: 1178-1181.
- Lin, D.-B., Tang, I.-T. and Wei, Y.-J., 2011. Compact dual-band-notched CPW-fed wide-slot antenna for WLAN and WiMAX applications. Microwave and Optical Technology Letters, 53 (7): 1496-1501.
- Sim, C.-Y.-D., Ho, C.-H. and Chien, Y.-L., 2011. Compact coplanar waveguide-fed monopole antenna with a folded ground strip for 5-GHz wireless applications. Microwave and Optical Technology Letters, 53 (11): 2464-2466.
- Seo, Y., Jung, J., Lee, H. and Lim, Y., 2011. Modified dual monopole antenna for WLAN operation. Microwave and Optical Technology Letters, 53 (12): 2768-2770.
- Zhai H., Ma Z., Han Y., and Liang C., 2013. A compact printed antenna for tripleband WLAN/WiMAX applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 12: 65-68.
- 52. Huang C.-Y. and Yu E.-Z., 2011. A slot-monopole antenna for dual-band WLAN applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 10**: 500-502.

- Wu J.-W., Hsiao H.-M., Lu J.-H. and Chang S.-H., 2004. Dual broadband design of rectangular slot antenna for 2.4 and 5 GHz wireless communication. Electronics Letters, 40 (23): 1461-1463.
- 54. Bian F.-G., Zhang F.-S., Yang Y.-B., Zhang Q., Huang J.-X., 2010 A compact dual band printed monopole antenna for WLAN applications. *Proceedings of International Symposium on Signals, Systems and Electronics (ISSSE2010), September 17-22, 2010, Nanjing, China.*
- Pan C.-Y., Huang C.-H. and Horng T.-S., 2005, A new printed G-shaped monopole antenna for dual-band WLAN applications. Microwave and Optical Technology Letters, 45 (4): 295-297.
- Basaran S. C., 2010. Dual wideband CPW-fed split-ring monopole antenna for WLAN applications, pp. 174-177. 2010 Mediterranean Microwave Symposium, August 25-27, 2010, Mersin, Turkey.
- Yee, K.S., 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 14 (3): 302-307.
- 58. Sevgi, L., 1999. Elektromanyetik Problemler ve Sayısal Yöntemler, Birsen Yayınevi, İstanbul, 222 s.
- Basaran S. C., 2008. Kablosuz Haberleşme Uygulamaları için Yarık Halka Mikroşerit Anten Tasarımı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 79 s.
- 60. Womersley R., 2006. Spectrum for WiMAX in Europe. (Web page: <u>http://www.icc-uk.com</u>), (Date accessed: January 2013).
- 61. CST Microwave Studio in CST Studio Suite 2011 User's Manual, (Web page: <u>www.cst.com</u>), (Date accessed: November 2012).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı	: Gökhan Murat ERYILMAZ
Uyruğu	: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri	: 04 Kasım 1981, Boğazlıyan
Medeni Durumu	: Evli
Tel	: +90 542 346 92 66
Email	: <u>gmeryilmaz@yahoo.com</u>
Yazışma Adres	: Mimarsinan Mah. Fuzuli Cad. Fevzi Çakmak Türk Telekom
-	Binası Kat:2, 38020, Kocasinan/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	ERÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği ABD	2013
Lisans	ERÜ, Mühendislik Fak., Elektronik Müh. Böl.	2004
Yabancı Dil	ERÜ, Yabancı Diller Y.O.	2000
Lise	Kocasinan Lisesi	1999

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2010- Halen	Türk Telekom A.Ş, Anadolu Merkez-2 Bölge Müdürlüğü (Kayseri) İletim Sistemleri	Mühendis
2005–2009	Niğde Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fak. Elektrik Elektronik Müh. Bölümü	Arş. Gör.

YABANCI DİL

İngilizce (ÜDS:75)