

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞ UYGULAMALARI İÇİN
METAMALZEME DESTEKLİ MİKROŞERİT
ANTENLERİN TASARIM VE ÜRETİMİ**

**Hazırlayan
Hüsnü YALDUZ**

**Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN**

Doktora Tezi

**Aralık 2020
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞ UYGULAMALARI İÇİN
METAMALZEME DESTEKLİ MİKROŞERİT
ANTENLERİN TASARIM VE ÜRETİMİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Hüsnü YALDUZ**

**Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN**

**Eylül 2018
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE 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.



Hüsnü YALDUZ

“Kablosuz Vücut Alan Ağ Uygulamaları için Metamalzeme Destekli Mikroşerit Antenlerin Tasarım ve Üretimi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Hazırlayan

Hüsnü YALDUZ



Danışman

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN



Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında **Hüsnü YALDUZ** tarafından hazırlanan “**Kablosuz Vücut Alan Ağ Uygulamaları için Metamalzeme Destekli Mikroserit Antenlerin Tasarım ve Üretimi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

15 / 12 / 2020

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Üye : Prof. Dr. İbrahim DEVELİ

Üye : Prof. Dr. Bahriye AKAY

Üye : Doç. Dr. Enes YİĞİT

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şekip Esat HAYBER

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / /

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince bana her türlü yardımı ve fedakârlığı esirgemeyen, çalışmalarımda bana bilgi ve tecrübeleriyle yön gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında birlikte yol aldığım Öğr. Gör. Dr. Timuçin Emre TABARU'ya ve deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmek için Abdullah Gül Üniversitesi bünyesinde bulunan RF- Mikrodalga Laboratuvarı'nın teknik altyapı imkânlarını sağlayıp her türlü desteğini esirgemeyen, sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi. Veli Tayfun KILIÇ'a ve Ankara Üniversitesi bünyesinde bulunan Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı'nda bana çalışma imkânı veren ve her türlü desteği sağlayan değerli meslektaşım Öğr. Gör. İ. Burak KOÇ'a değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Hüsnü YALDUZ

Aralık 2020, KAYSERİ

KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞ UYGULAMALARI İÇİN METAMALZEME DESTEKLİ MİKROŞERİT ANTENLERİN TASARIM VE ÜRETİMİ

Hüsnü YALDUZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Aralık 2020
Danışman: Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ÖZET

Özellikle düşük güçlü ve küçük boyutlu elektronik cihazlarındaki hızlı büyüme, gelişmiş mobil ve kişisel kablosuz iletişim sistemleri ile birlikte kablosuz vücut alanı ağı (WBAN) ve ilgili giyilebilir teknolojilerin oluşturulmasını sağlamıştır. WBAN'ların gelecekteki internetin kalbi olacağı ve sağlık, eğitim, askeri vb. uygulamalar için hayati bir rol oynayacağı öngörülmektedir. WBAN iletişiminin en önemli parçası kablosuz iletişimi sağlayan antendir. Bu tez çalışmasında, WBAN uygulamalarında kullanım için özgün tasarıma sahip dört adet giyilebilir anten tasarımı, üretimi ve analizleri yapılmıştır. Giyilebilir antenlerin tasarımında esnek tekstil malzemeleri tercih edilmiş ve anten ile vücut arası izolasyonu sağlamak için antenin kısmi toprak düzlemi arkasına metamalzeme (MM) yapı yerleştirilmiştir. Antenler ilk önce CST programında tasarlanıp analiz edilmiştir. Nümerik olarak tasarımları başarılı şekilde tamamlanan antenler üretilmiş ve deneysel ve nümerik sonuçlar analiz edilmiştir. MM'siz ve MM'li giyilebilir antenlerin yansıma katsayısı, ışıma örüntüleri, kazanç, yönlülük, SAR etkileri gibi performans parametreleri karşılaştırmalı olarak serbest uzayda ve vücut üzerinde başarılı şekilde ortaya konmuştur. Sonuçlardan antenlerin arkasına MM yapı ilave edilmesiyle antenlerin yönlülük, kazanç değerlerinin arttığı ve vücut etkileşimi, SAR değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Antenlerin esneklik ve düşük boyutlarının yanı sıra UWB çalışma frekansı bandı, kazanç ve düşük SAR değerleri avantajları ile WBAN uygulamalarında kullanım için uygundur.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Vücut Alan Ağları, Giyilebilir Anten, Düşük SAR Anten, Ultra Geniş Bant Anten, Metamalzeme Destekli Anten, Tekstil Anten.

**DESIGN AND MANUFACTURING OF METAMATERIAL SUPPORTED
MICROSTRIP ANTENNA FOR WIRELESS BODY AREA NETWORK
APPLICATIONS**

Hüsnü YALDUZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, December 2020

Supervisor: Assoc. Prof. Mustafa TÜRKMEN

ABSTRACT

Especially the rapid growth in low-power and small-sized electronic devices has led to the creation of wireless body area network (WBAN) and related wearable technologies, together with advanced mobile and personal wireless communication systems. WBANs will be the heart of the future Internet and health, education, military, etc. It is predicted to play a vital role for applications. The most important part of WBAN communication is the antenna that provides wireless communication. For this purpose, in this thesis, the design, production, and analysis of four original wearable antennas for use in WBAN applications were made. Flexible textile materials were preferred in the design of wearable antennas and a metamaterial (MM) structure was placed behind the partial ground plane of the antenna to provide insulation between the antenna and the body. Antennas were first designed and analyzed in the CST program. The antennas, whose designs were successfully completed numerically, were produced and the experimental and numerical results were analyzed. Performance parameters such as reflection coefficient, radiation patterns, gain, directionality, SAR effects of wearable antennas with and without MM have been successfully demonstrated in free space and on the body comparatively. From the results, it was observed that by adding MM structure behind the antennas, directionality, gain values of antennas increased and body interaction and SAR values decreased. In addition to the flexibility and low dimensions of the antennas, it is suitable for use in WBAN applications with the advantages of UWB operating frequency band, gain and low SAR values.

Keywords: Wireless Body Area Networks, Wearable Antenna, Low SAR Antenna, Ultra-wideband Antenna, Metamaterial Supported Antenna, Textile Antenna.

İÇİNDEKİLER

KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞ UYGULAMALARI İÇİN METAMALZEME DESTEKLİ MİKROŞERİT ANTENLERİN TASARIM VE ÜRETİMİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
GİRİŞ	1

1.BÖLÜM

KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞLARI

1.1. Kablosuz Vücut Alan Ağları Kavramı.....	5
1.2. WBAN Uygulamaları.....	6
1.2.1. Tıbbi Uygulamalar.....	6
1.2.2. Tıbbi Olmayan Uygulamalar	8
1.3. WBAN İletişim Standartları	8
1.3.1. IEEE 802.15.6 Standart.....	9
1.3.2. WBAN İletişim Frekans Bantları.....	9

2.BÖLÜM

WBAN ANTENLER

2.1. Antenler.....	12
2.2. Mikroşerit Antenler	13

2.2.1. Mikroşerit Dikdörtgen Yama Antenin Teorik Tasarımı	16
2.2.2. Ultra Geniş Bantlı Mikro Şerit Antenler	19
2.3. Giyilebilir Antenler	22
2.3.1. Sert Giyilebilir Antenler	23
2.3.2. Esnek Tekstil Giyilebilir Antenler	24
2.3.3. Bükülmenin Giyilebilir Antenler Üzerindeki Etkileri	27
2.3.3. Giyilebilir Anten ve İnsan Vücudu Arasındaki Etkileşim	28
2.4. SAR	29
2.4. Anten Tasarımında Metamalzemeler	31

3. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

3.1. Nümerik Analiz Teknikleri	37
3.1.1. Sonlu Entegrasyon Tekniği	38
3.1.2. CST Microwave Studio	39
3.2. Materyal	41
3.3. Üretim Yöntemi	43

4. BÖLÜM

BULGULAR

4.1. Literatürdeki Çalışmaların İncelemeleri	44
4.1.1. Literatür İncelemesi 1	44
4.1.2. Literatür İncelemesi 2	52
4.1.3. Literatür İncelemesi 3	62
4.2. Teze Özgü Anten Tasarımları	70
4.2.1. Tasarım 1	71
4.2.2. Tasarım 2	78
4.2.3. Tasarım 3	94
4.2.4. Tasarım 4	114

5. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKÇA	138
ÖZGEÇMİŞ.....	158



KISALTMALAR VE SİMGELER

AMC	Artificial magnetic conductor; Yapay Manyetik İletken
BG	Bant genişliği
CAD	Computer aided design; Bilgisayar destekli tasarım
CPW	Coplanar waveguide; Eş düzlemsel dalga kılavuzu
DARPA	The Defense Advanced Research Projects Agency; Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı
EBG	Electromagnetic band-gap; Elektromanyetik bant aralığı
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power; Etkili İzotropik Yayılan Güç
EM	Elektromanyetik
EMC	Electromagnetic Compatibility; Elektromanyetik uyumluluk
EMI	Electromagnetic Interference; Elektromanyetik girişim
ERC	European Radiocommunications Committee; Avrupa Radyo iletişim Komitesi
EVA	Etilen-vinil asetat (köpük)
FBR	Front-to-Back Ratio; Yönlü bir antenin önü ve arkası arasındaki güç kazancı oranı
FCC	Federal Communications Commission; Amerika Birleşik Devletleri; Federal Haberleşme Komisyonu
FDTD	Finite-difference time-domain; Sonlu fark zaman alanı (yöntemi)
FIT	Finite Integration Technique; Sonlu Entegrasyon Tekniği
HBC	Human Body Communications; İnsan Vücudu İletişimi
NB	Narrow band; Dar bant
WPAN	Wireless Personal Area Networks; Kablosuz Kişisel Alan Ağları
WBAN	Wireless Body Area Networks; Kablosuz Beden Alan Ağları
WBSN	Wireless Body Sensor Network; Kablosuz vücut sensörü ağı
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers; Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
ISM	Industrial Scientific Medical band; Endüstriyel, bilimsel ve tıbbi cihaz bantı

MAC	medium access control; Orta erişim kontrol (katmanı/protokolu)
MM	Metamalzeme
MICS	Medical Implant Communication System; Tıbbi İmplant İletişim Sistemi
MoM	Method of Moment; Moment Metodu
MŞA	Mikroşerit anten
NB	Narrow Band; Dar Bant
UWB	Ultra-wideband; Ultra geniş bant
WMTS	Wireless Medical Telemetry System; Kablosuz Tıbbi Telemetry Sistemi
Q	Kalite faktörü
PBA	Perfect Boundary Approximation; Mükemmel Sınır Yaklaşımı
PHY	Fiziksel katman
SAR	Specific Absorption Rate; Özgül soğurma oranı
TLM	Transmission Line Matrix; iletim hattı matrisi
VSWR	Voltage standing wave ratio; Gerilim duran dalga oranı
2B	2 Boyutlu
3B	3 Boyutlu
c	Serbest uzaydaki ışık hızı (3×10^8 m/s)
E	Elektriksel alan (V/m)
σ	Elektriksel iletkenlik (S/m)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
ε	Elektriksel geçirgenlik
ε_{eff}	Etkin dielektrik sabiti
$\tan\delta$	Kayıp tanjantı
ε_0	Boş uzayın dielektrik katsayısı
ε_r	Bağıl dielektrik sabiti
f	frekans
f_H	Üst çalışma frekansı
f_L	Alt çalışma frekansı
f_r	Rezonans frekansı
μ	Manyetik geçirgenlik
n	Kırılma indisi
λ_0	Boş uzayda dalga boyu

λ	Dalga boyu
S_{11}	Yansıma katsayısı
Z_0	Karakteristik empedans



TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Tekstil materyalleri için dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı.	25
Tablo 4.1. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 3 farklı rezonans frekansı için mm cinsinden boyutları.....	46
Tablo 4.2. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).	54
Tablo 4.3. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).	72
Tablo 4.4. Tasarım ızgara dizisi antenin karakteristik özelliklerinin özeti.	77
Tablo 4.5. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).	80
Tablo 4.6. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).	92
Tablo 4.6. Literatürde bildirilen arkasında MM yapısı olan giyilebilir antenler ile önerilen anten tasarımıımızın çalışma frekansı bandı, alt taban tipi, boyutları ve tepe kazancı.	93
Tablo 4.8. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).	95
Tablo 4.9. Önerilen antenin optimum geometrik parametreleri (mm).....	102
Tablo 4.10. Önerilen antenin optimum geometrik parametreleri (mm).....	111
Tablo 4.11. Literatürde bildirilen arkasında MM yapısı olan giyilebilir antenler ile önerilen antenin çalışma frekansı bandı, alt taban tipi, boyutları ve maksimum kazancı.	112
Tablo 4.12. Önerilen antenin optimize geometrik parametereleri (mm).	116
Tablo 4.13. Önerilen antenin optimize geometrik parametereleri (mm).	127
Tablo 4.14. Giyilebilir antenin SAR analiz özeti.	130
Tablo 4.15. Literatürde bildirilen arkasında MM yapısı olan giyilebilir antenler ile önerilen anten tasarımıımızın çalışma frekansı bandı, alt taban tipi, boyutları ve tepe kazancı.	131

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. WBAN temelli uzaktan sağlık izleme sistemi mimarisine genel bakış.	6
Şekil 1.2. WBAN iletişimi için bazı RF frekans bantları.....	10
Şekil 2.1. Mikroşerit dikdörtgen yama anten yapısı.	14
Şekil 2.2. Dikdörtgen MŞA'nın Fiziksel ve Etkin boyutları üstten ve yandan görünüşü.	18
Şekil 2.3. İç ve dış mekan uygulamaları için FCC emisyon sınırları.....	21
Şekil 2.4. UWB ve mevcut diğer bazı dar bant spektrumları.....	21
Şekil 2.5. Giyilebilir tekstil anten örnekleri: (a) kot dielektrik taban üzerine bakır bant kullanılarak tasarlanmış anten, (b) keçe dielektrik taban üzerine iletken tekstil bant kullanılarak tasarlanmış anten.	27
Şekil 2.6. Periyodik 5×5 diziye sahip MM yapısı.....	32
Şekil 2.7. Anten, $\lambda/4$ 'ten daha az bir mesafede metal bir iletken üzerinde.	34
Şekil 2.8. Anten, $\lambda/4$ mesafesinde metal bir iletken üzerinde.	35
Şekil 2.9. Anten, $\lambda/4$ 'ten çok küçük mesafedeki MM üzerinde.	35
Şekil 3.1. Giyilebilir antenlerin tasarımında kullanılan dielektrik ve iletken malzemeler: (a) kot kumaşı, (b) keçe, (c) EVA köpük, (d) iletken bakır bant, (e) iletken tekstil bant.	42
Şekil 4.1. Cárcamo vd. tarafından önerilen dikdörtgen mikroşerit yama anten geometrisi.....	45
Şekil 4.2. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin CST ortamında yeniden tasarımı ve analizi yapılan geometris.....	45
Şekil 4.3. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,36 GHz için Simülasyon S_{11} parametresinin frekansla değişimi.....	46
Şekil 4.4. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2.36 GHz için CST Simülasyonu S_{11} parametresinin frekansla değişimi doğrulaması.....	47
Şekil 4.5. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,36 GHz için simülasyon ışıma örüntüsü.....	47
Şekil 4.6. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,36 GHz için CST simülasyonu ışıma örüntüsü doğrulaması.	48
Şekil 4.7. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2.4 GHz için S_{11} parametresinin frekansla değişimi.	48

- Şekil 4.8. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin CST Simülasyonu 2,4 GHz için S_{11} parametresinin frekansla değişimi doğrulaması. 49
- Şekil 4.9. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,4 GHz için ışıma örüntüsü.... 49
- Şekil 4.10. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,4 GHz için CST simülasyonu ışıma örüntüsü doğrulaması. 50
- Şekil 4.11. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 5,7 GHz için S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 50
- Şekil 4.12. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 5,7 GHz için CST Simülasyonu S_{11} parametresinin frekansla değişimi doğrulaması. 51
- Şekil 4.13. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 5,7 GHz için ışıma örüntüsü... 51
- Şekil 4.14. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 5,7 GHz için CST simülasyonu ışıma örüntüsü doğrulaması. 52
- Şekil 4.15. Jiang vd. tarafından önerilen: (a) Entegre düzlemsel antenin konfigürasyonu, (b) Monopol anten katmanının üstten ve alttan görüşleri, (c) Metalik arkalıklı MM katmanının üst ve alt görünüşleri. 53
- Şekil 4.16. Jiang vd. tarafından önerilen yapının CST simülasyonu doğrulamasının geometrisi: (a) Düzlemsel antenin konfigürasyonu, (b) Entegre anten... 54
- Şekil 4.17. Jiang vd. tarafından önerilen: (a) I-şekilli MM birim hücrenin düzlem dalga uyarımı altındaki konfigürasyonu, (b) I-şekilli MM elemanın yansıma fazı, (c) I-şekilli MM elemanın yansıma fazı CST simülasyonu doğrulaması. 55
- Şekil 4.18. Jiang vd. tarafından önerilen (a) Monopol antenin serbest uzayda tek başına simülasyonda hesaplanmış ve deneylerde ölçülmüş S_{11} 'i ve bir PEC yer düzlemi üzerinde monopol antenin simüle edilmiş S_{11} 'i. (b) MM entegreli antenin ve referans yama antenin, boş alan için simülasyonlarda hesaplanmış ve deneylerde ölçülmüş S_{11} 'i. (Yama anteni, entegre antenle aynı form faktörüne sahiptir. Yamanın boyutları $P_x = 35$ mm, $P_y = 37$ mm, $D = 12$ mm'dir.). 56
- Şekil 4.19. (a) Tek başına monopol antenin serbest uzayda CST simülasyonunda hesaplanmış S_{11} – parametresinin frekansla değişimi doğrulaması, (b) MM entegreli antenin serbest uzayda CST simülasyonunda hesaplanmış S_{11} – parametresinin frekansla değişimi doğrulaması. 57
- Şekil 4.20. Jiang vd. tarafından önerilen antenin simüle edilmiş ve ölçülmüş: (a) E-düzlem ve (b) H-düzlem normalize edilmiş 2,38 GHz'de tek başına monopol

- anten ışıma örüntüsü. (c) E-düzlemi ve (d) H- düzlemi için 2,38 GHz'de MM entegreli antenin ve referans yama antenin normalize edilmiş ışıma örüntüleri. 58
- Şekil 4.21. Jiang vd. tarafından önerilen yapının simüle edilmiş CST doğrulaması: (a) E-düzlem ve (b) H-düzlem monopul antenin tek başına 2,38 GHz'de ışıma örüntüsü. (c) E-düzlemi ve (d) H-düzlemi için 2,38 GHz'de MM entegreli antenin ışıma örüntüsü. 59
- Şekil 4.22. Jiang vd. tarafından önerilen: (a) Tek başına monopul ve entegre antenin simülasyonda hesaplanmış ve deneylerse ölçülmüş tepe kazancı, (b) Monopul anten, metamalzeme entegreli anten ve referans yama antenin simülasyonlarda hesaplanmış ve deneylerde ölçülmüş FBR'si. 60
- Şekil 4.23. Jiang vd. tarafından önerilen yapının CST simülasyonlarda hesaplanmış doğrulaması: (a) Tek başına monopul ve entegre antenin tepe kazancı, (b) Monopul antenin ve metamalzeme entegreli antenin FBR'si. 61
- Şekil 4.24. Yan vd. tarafından önerilen anten yapısı: (a) yandan görüntü, (b) üst katman, (c) orta katman, (d) anten prototipi. 63
- Şekil 4.25. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST ortamında yeniden tasarımı ve analizi yapılan geometrisi..... 64
- Şekil 4.26. Yan vd. tarafından ölçülen ve simüle edilen anten S_{11} –parametresinin frekansla değişimi. 65
- Şekil 4.27. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonu S_{11} parametresinin frekansla değişimi doğrulaması..... 65
- Şekil 4.28. Yan vd. tarafından önerilen antenin uzak alan ışıma örüntüleri. 66
- Şekil 4.29. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonunda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri doğrulaması. 66
- Şekil 4.30. Yan vd. tarafından önerilen antenin x-ekseninde bükülme konfigürasyonu. 67
- Şekil 4.31. Yan vd. tarafından önerilen antenin x-ekseni boyunca bükülme durumunda S_{11} – parametresinin frekans ile değişimi..... 67
- Şekil 4.32. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonunda x-ekseni boyunca bükülme konfigürasyonu..... 68

- Şekil 4.33. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonunda x-eksende bükülme durumunda S_{11} parametresinin frekans ile değişimi doğrulaması 68
- Şekil 4.34. Yan vd. tarafından önerilen antenin vücut üzerinde S_{11} parametresinin frekans ile değişimi 69
- Şekil 4.35. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonunda vücut modeli üzerinde hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi doğrulaması 69
- Şekil 4.36. Önerilen antenin geometrisinin: (a) Ön yama düzlemi, (b) ilk aşama arka toprak düzlemi (yarıksız), (c) ikinci aşama arka toprak düzlemi (yarıklı), (d) yandan görünüm görüntüleri. 72
- Şekil 4.37. İlk tasarlanan yarıksız toprak düzlemlili antenin simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 73
- Şekil 4.38. Antenin toprak düzlemi yarık boyutlarının değişiminin simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekansla değişimi üzerindeki etkisi..... 74
- Şekil 4.39. Önerilen optimum antenin simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekansla değişimi ($L_{gs}=3,9$ mm, $W_{gs}=4,7$ mm). 74
- Şekil 4.40. Önerilen antenin simülasyonda hesaplanan VSWR parametresinin frekansla değişimi. 75
- Şekil 4.41. Önerilen antenin kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Φ : 0 ve Φ : 90) simülasyonlarda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri: (a) 2,45 GHz (b) 6,25 GHz (c) 8,25 GHz (d) 10,45 GHz. 77
- Şekil 4.42. Geometrik parametrelerle birlikte (a) ön, (b) arka ve (c) alt yandan görüntülerinden önerilen anten mimarisi. 79
- Şekil 4.43. Önerilen antenin optimize edilmiş geometrik parametrelere sahip olacak şekilde üretilmiş anten prototipi ön ve arka görüntüleri. 80
- Şekil 4.44. (a) MM entegreli anten yapısı katmanlarının yandan görünüşü, (b) ayrıntılı birim hücre geometrisi ile birlikte 7×7 kare kafes içinde hizalanan toplam 49 birim hücresinden oluşan önerilen meta yüzey yapısı, (c) tasarlanan MM yapısının üretilen prototipi, (d) Yansıma fazı açısının frekans ile değişimi. 82
- Şekil 4.45. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 83

- Şekil 4.46. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.84
- Şekil 4.47. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin farklı çaplarda köpük üzerinde boyuna bükümü için deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 84
- Şekil 4.48. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 85
- Şekil 4.49. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan maksimum gerçek kazancın frekans ile değişimi. 86
- Şekil 4.50. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan toplam verim değerinin frekans ile değişimi. 86
- Şekil 4.51. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan FBR değerinin frekans ile değişimi. 87
- Şekil 4.52. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Phi: 0 ve Phi: 90) simülasyonlarda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz, (c) 10 GHz. 88
- Şekil 4.53. Simülasyonlarda kullanılan kübik vücut dokusu modelinin perspektif görünümü. 89
- Şekil 4.54. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan anten için, serbest uzayda ve vücutta simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi. 90
- Şekil 4.55. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan anten için serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi. 90
- Şekil 4.56. Arkasında MM yapısı olmayan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz, (c) 10 GHz. 91
- Şekil 4.57. Arkasında MM yapısı olan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz, (c) 10 GHz. 91
- Şekil 4.58. Geometrik parametrelerle birlikte önerilen anten mimarisi: (a) ön, (b) arka, (c) alt yan görünümleri. 95
- Şekil 4.59. Düzlemsel antenin simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi. 96
- Şekil 4.60. Antenin (a) y-ekseninde ve (b) x-ekseninde bükülme konfigrasyonu. 97

- Şekil 4.61. Antenin y -ekseninde farklı yarıçaplarda bükülmeleri için simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi karşılaştırması. 97
- Şekil 4.62. Antenin x-ekseninde farklı yarıçaplarda bükülmeleri için simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi karşılaştırması. 98
- Şekil 4.63. Tekstil antenin farklı frekanslarda y-ekseninde farklı yarı çaplarda bükülme durumları için kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Phi: 0 ve Phi: 90) ışıma örüntüleri karşılaştırması: (a) 3,5 GHz, (b) 8 GHz, (c) 13GHZ.99
- Şekil 4.64. Tasarlanan tekstil antenin farklı frekanslarda x-ekseninde farklı yarı çaplarda bükülme durumları için kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Phi: 0 ve Phi: 90) ışıma örüntülerinin karşılaştırması: (a)3,5 GHz (b) 8 GHz (c) 13GHZ..... 100
- Şekil 4.65. Geometrik parametrelerle birlikte (a) ön, (b) arka, (c) alt yan görünümülerinden önerilen anten mimarisi. 101
- Şekil 4.66. Önerilen antenin optimize edilmiş geometrik parametrelere sahip olacak şekilde üretilmiş anten prototipi: (a) ön, (b) arka görünüm. 102
- Şekil 4.67. (a) Arkasına MM olan anten yapısı katmanlarının yandan görünüşü, (b) ayrıntılı birim hücre geometrisi ile I şeklinde birim hücrelerinden oluşan önerilen meta yüzey yapısı, (c) tasarlanan MM yapısının üretilen prototipi. (d) yansıma fazı açısının frekans ile değişimi. 104
- Şekil 4.68. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 105
- Şekil 4.69. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 105
- Şekil 4.70. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan maksimum gerçek kazancın frekans ile değişimi. 106
- Şekil 4.71. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan FBR değerinin frekans ile değişimi..... 107
- Şekil 4.72. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Phi: 0 ve Phi: 90) simülasyonlarda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 10 GHz frekansında 108

- Şekil 4.73. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan anten için, serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi. 109
- Şekil 4.74. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan anten için serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi. 110
- Şekil 4.75. Arkasında MM yapısı olmayan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7GHz, (c) 10 GHz..... 111
- Şekil 4.76. Arkasında MM yapısı olan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz, (c) 10 GHz..... 111
- Şekil 4.77. (a) Geometrik parametrelerle birlikte ön ve arka görünümünden önerilen anten mimarisi. (b) Optimize edilmiş geometrik parametrelere sahip olacak şekilde üretilmiş anten prototipi. 116
- Şekil 4.78. (a) MM entegreli anten yapısı katmanlarının yandan görünüşü. (b) ayrıntılı birim hücre geometrisi ile birlikte 7×7 kare kafes içinde hizalanan toplam 49 birim hücrelerinden oluşan önerilen meta yüzey yapısı, (c) tasarlanan MM yapısının üretilen prototipi. 118
- Şekil 4.79. (a) Yansıma fazı açısının frekans ile değişimi, (b) Birim hücrenin sınır koşullarını ifade eden simülasyon modeli. 118
- Şekil 4.80. Tasarlanan MM yapının simülasyonlarda bulunan S-parametreleri kullanılarak hesaplanan elektriksel geçirgenliğinin sanal ve gerçek kısımlarının frekansla değişimi. 119
- Şekil 4.81. Tasarlanan MM yapının simülasyonlarda bulunan S-parametreleri kullanılarak hesaplanan manyetik geçirgenliğinin sanal ve gerçek kısımlarının frekansla değişimi. 120
- Şekil 4.82. Tasarlanan MM yapının simülasyonlarda bulunan S-parametreleri kullanılarak hesaplanan kırılma indisinin sanal ve gerçek kısımlarının frekansla değişimi. 120
- Şekil 4.83. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 121
- Şekil 4.84. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 122

- Şekil 4.85. Toprak düzleminde dairesel parazittik yaması olan ve olmayan antenin arkasında MM yapısı ile simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekansla değişimi. 123
- Şekil 4.86. Arkasında MM yapısı olan (boşluk ve keçe ayırıcılar için) ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan maksimum gerçek kazancın frekans ile değişimi. 124
- Şekil 4.87. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan FBR değerinin frekans ile değişimi. 124
- Şekil 4.88. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Φ : 0 ve Φ : 90) simülasyonlarda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri: (a) 4 GHz, (b) 7,5 GHz ve (c) 10,5 GHz frekansında. 126
- Şekil 4.89. Simülasyonlarda kullanılan kübik vücut dokusu modelinin perspektif görünümü. 127
- Şekil 4.90. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan anten için, serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekans ile değişimi. 128
- Şekil 4.91. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan anten için serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekans ile değişimi. 128
- Şekil 4.92. Arkasında MM yapısı olmayan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7,5 GHz, (c) 10,5 GHz..... 129
- Şekil 4.93. Arkasında MM yapısı olan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7,5 GHz, (c) 10,5 GHz..... 130

GİRİŞ

Kablosuz iletişim, Hertz tarafından elektromanyetik dalgaların varlığının kanıtlanması ve Guglielmo Marconi tarafından yirminci yüzyılın başlarında kablosuz telgrafın gösterilmesinden bu yana önemli ölçüde gelişme göstermiştir. O zamandan beri, hayatımızda devrim yaratan yeni kablosuz iletişim yöntemleri sürekli olarak benimsenmiştir. Günümüz dünyasındaki modern kablosuz iletişim teknolojileri, modern elektronik cihaz teknolojisindeki son gelişmeler ve 1990'larda başlayan bilgi (ses, veri ve video) iletişim kapasitesi talebindeki patlama nedeniyle heyecan verici ve dinamik bir alan olarak ortaya çıkmıştır.

Kablosuz iletişim sistemleri, daha yüksek esneklik ve mobilite gibi bilinen avantajları yanında daha basit kurulum ve bakım gereksinimleri sonucu maliyet azalımı nedeniyle günümüzde birçok iletişim sistemlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Düşük güçlü tümleşik devrelerdeki hızlı büyüme, elektronik cihazların minyatürleştirilmesi ve gelişmiş mobil ve kişisel kablosuz iletişim sistemleri ile birlikte hesaplama yeteneğine sahip kablosuz vücut alanı ağı (Wireless body area network: WBAN) ve ilgili giyilebilir teknolojilerin oluşturulmasını sağlamıştır [1].

Modern teknolojiye kablosuz iletişim, bilgilerini her an ve her yerde birbiriyle paylaşabilmek için birçok olanak sağlar. Akıllı mobil iletişim ağı ve WLAN, WiFi, insanlarla birbirleriyle iletişim kurmaları için uygun bir yol sağlamak amacıyla eğitim, sağlık hizmetleri ve endüstri gibi çeşitli sektörlerde uygulanmaktadır. Her yerde ağ talebi arttıkça, ev, ofis ve diğer bilgi cihazları için olan kısa mesafelerde kablosuz iletişim kurabilen (düşük güçlü mobil) cihazlar daha fazla dikkat çekmektedir. Her yerde bulunan ağın standart ve teknik gelişimi hızla dünya pazarına girmiştir. WBAN, bu tür bir tekniğin özel bir uygulaması haline gelmiştir [2].

Bu teknoloji, özel bir Kablosuz Sensör Ağı (Wireless sensor network: WSN) tipi, yani Kablosuz Vücut Alan Ağı (Wireless body area network: WBAN) oluşturan düşük maliyetli, enerji kısıtlı, küçük, heterojen sensör düğümleri ile karakterize edilir [3, 4].

WBAN'lar her yerde iletişimin sağlanmasında ve potansiyel bir pazar yaratılmasında önemli bir rol oynamaktadır [5]. Örneğin; akıllı saatler, işitme cihazları, vücut sıcaklığı sensörleri ve daha yakın zamanda duyurulmuş olan Google gözlük, bu tür çok çok düşük güçlü giyilebilir cihazlardır. Kalp pili, retina protezi ve koklear implant (biyonik kulak)'lar implant edilebilir cihazlara örnektir. Bu örneklerin de belirttiği gibi, bu cihazların kullanıcıları hem hastalar hem de sağlıklı kişilerdir [6].

WSN teknolojileri, diğer birçok alana ek olarak, sağlık, eğlence, seyahat, perakende satış, endüstri, bağımlı bakım ve acil durum yönetimi gibi alanlarda farklı uygulamalarla yaşam biçimimizi değiştirme potansiyeline sahiptir [7]. Sağlık alanında, Dünya Sağlık Örgütü'nün istatistiklerine göre, hareketsiz yaşam tarzından dolayı her gün milyonlarca insan; obezite, hipertansiyon, kardiyovasküler hastalıklar veya kronik hastalıklardan muzdarip olurken, yaşlanan nüfus önemli bir sorun haline gelmektedir [5, 8]. Nüfus Referans Bürosu'na [9] göre, önümüzdeki 20 yıl içerisinde gelişmiş ülkelerdeki 65 yaş ve üstü nüfus toplam nüfusun yaklaşık %20'si olacaktır. Bu nedenle, hızla büyüyen yaşlı nüfus ve kronik hastalıklar, bu ülkelerde kaliteli bakım ve hizmet sağlama ihtiyacı varken, yeni sağlık hizmeti ihtiyaçlarını ortaya çıkarmaktadır. Bunun sonucunda da sağlık maliyetlerini artırmaktadır. Bu sağlık hizmeti ihtiyaçlarını karşılamak, sağlık hizmetlerinin maliyetlerini düşürmek, bu ülkelerdeki hükümetler ve sağlık hizmeti sağlayıcıları için önemli bir konudur. Giyilebilir ve implante edilebilir vücut sensörü ağ sistemleri, bu hedefe ulaşmak için önemli bir araçtır, çünkü bu alanlarda öne çıkan bir uygulama, insanların tüm günlük aktiviteleri sırasında izlenmelerini sağlayacak olan algılama ve tüketici elektroniği teknolojilerinin entegrasyonudur [5, 7].

Giyilebilir ve implant edilebilir vücut sensörü ağları ile sürekli izleme, risk altındaki hastalarda acil durumların ve hastalıkların erken tespitini artıracak, ayrıca çeşitli derecelerde bilişsel ve fiziksel engelli insanlar için çok çeşitli sağlık hizmetleri sunacaktır. Sadece yaşlılar ve kronik hastalar değil, aynı zamanda her iki ebeveynin de çalışması gereken aileler, bebekleri ve çocukları için kaliteli bakım hizmeti sunmak için bu sistemlerden faydalanacaktır [7].

Ek olarak, sporcular giyilebilir cihazlar kullanarak kan basıncı, sıcaklık gibi hayati sağlık parametrelerini izlemek için vücuda yakın olan veya implant edilebilen iki veya daha fazla cihaz, WBAN ile bir ağ oluşturarak birbirleriyle veya merkezi bir kontrol ünitesiyle iletişim sağlanabilmektedirler. WBAN için yaygın olarak kullanılan diğer bazı terimler kablosuz vücut sensörü ağı (Wireless Body Sensor Network: WBSN) veya vücut merkezli kablosuz iletişimdir [6].

WBAN'ların gelecekteki İnternet'in kalbi olacağı ve sağlık, eğitim ve yaşam tarzında daha iyi tesisler sağlamak için bilgi erişiminde ve bilgi alışverişinde hayati bir rol oynayacağı öngörülmektedir [10]. Bu kablosuz vücut algılayıcı ağlarında güvenli ve iyi bir iletişimin sağlanmasında en önemli parça, kablosuz iletişimi sağlayan ve BAN kullanan insanların bağımsız ve kaliteli bir yaşam sürmelerine yardımcı olan antendir.

WBAN uygulamalarında kullanılacak antenin tasarımı, kaliteli ve güvenli WBAN iletişimi için önemli bir konudur. Bu çalışmada, çeşitli WBAN uygulamaları için giyilebilir anten tasarımı ve üretimleri incelenmektedir. Tezde tartışılan araştırma alanının odak noktası, WBAN'ın çeşitli uygulamalarındaki cihazlar için antenler, dalga yayılımı performansı ve bu cihazlar tarafından yayılan elektromanyetik (EM) dalgaların gücünün insan sağlığı için güvenli bir seviyede olması gerekliliğidir. İnsan vücudunun kayıplı ve heterojen dokuları, giyilebilir bir radyo frekans (RF) kaynağının vücut üzerindeki performansını etkiler ve bu cihazlar tarafından yayılan EM dalgaların gücünün insan sağlığı için güvenli olması zorlu bir görev haline getirir. Bu nedenle antenler ve dalga yayılımı WBAN'lardaki cihazlar için kritik bir rol oynar.

Çünkü, WBAN uygulamaları için giyilebilir anten tasarımında, kompakt boyut, esneklik, biyo uyumluluk, insan vücuduna çok az duyarlılık ve düşük özgül soğurma oranı (Specific Absorption Rate: SAR) değerleri gibi bazı temel gereklilikleri yerine getirmeyi gerektirir. Ayrıca hızlı ve güvenli bir iletişim için çalışma bant genişliği önemlidir. Teknolojideki ilerlemeler tıbbi ekipman ve metamateryaller (MM)'ler gibi alanlarda tamamen yeni pazarlar açmaktadır. Literatürde, WBAN uygulamaları için araştırmacılar tarafından giyilebilir antenler boyut, esneklik, biyo uyumluluk, insan vücuduna duyarlılık ve SAR değeri gibi anten tasarımı performans parametrelerini yaygın olarak araştırmış olmakla birlikte WBAN uygulamaları için MM entegreli ultra geniş bant (Ultra-wideband: UWB) anten yaygın olarak çalışılmamıştır. Bu çalışmada, giyilebilir mikro

şerit anten çalışmalarına dayanarak daha fazla araştırma için üç alan önerilmektedir. Bu alanlar; UWB ve antene MM ilave ederek yüksek kazanç, düşük SAR değeri elde etmektir.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde WBAN ve uygulamaları, WBAN iletişim standardı IEEE 802.15.6 ve iletişim frekans bantları hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde öncelikle kablosuz haberleşmeyi sağlayan anten kavramına değinilmiş ve çeşitli avantajlarından dolayı WBAN uygulamalarında tercih edilen mikroşerit antenler (MŞA) ve UWB MŞA'lar hakkında bilgi verilmiştir. Devamında giyilebilir antenler, giyilebilir antenlerin tasarımında kullanılan malzemeler, bu antenlerin vücut üzeri performansları ve vücut üzerindeki elektromanyetik etkisi olan SAR etkisi ve bunu azaltma yöntemlerinden MM'ler açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, antenler vb. elektromanyetik problemlerin tasarım ve analizinde kullanılan teknikleri ve bu analiz tekniklerine dayanan ticari bir yazılım programı olan bilgisayar simülasyon teknolojisi (Computer Simulation Technology: CST) programı hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde ise literatüre sunulmuş mikroşerit anten yapıları CST programında yeniden doğrulanıp, analizi yapılmıştır. Böylece literatürdeki yapılar incelenip mikroşerit antenlerin tasarımında kullanılan farklı malzemelerin ve geometrilerin anten performans parametrelerine etkileri analiz yapılmış ve CST programının kullanımı öğrenilmiştir. Beşinci bölümde ise, çalışmaya özgü giyilebilir antenler nümerik olarak CST programında tasarlanmıştır. Nümerik olarak tasarımları başarılı şekilde tamamlanan antenler üretilmiş ve deneysel ve nümerik sonuçlar analiz edilmiştir. MM'li ve MM'siz giyilebilir antenlerin çalışma frekans bandını gösteren yansıma katsayısı, ışıma örüntüleri, kazanç gibi performans parametreleri ve vücuttaki SAR değerleri bu bölümde detaylı olarak ortaya konulmuştur. Altıncı bölümde, tasarımı yapılan ve üretilen antenlerin nümerik ve deneysel analiz sonuçlarının tartışması yapılarak, sonuç ve öneriler sunulmuştur.

1. BÖLÜM

KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞLARI

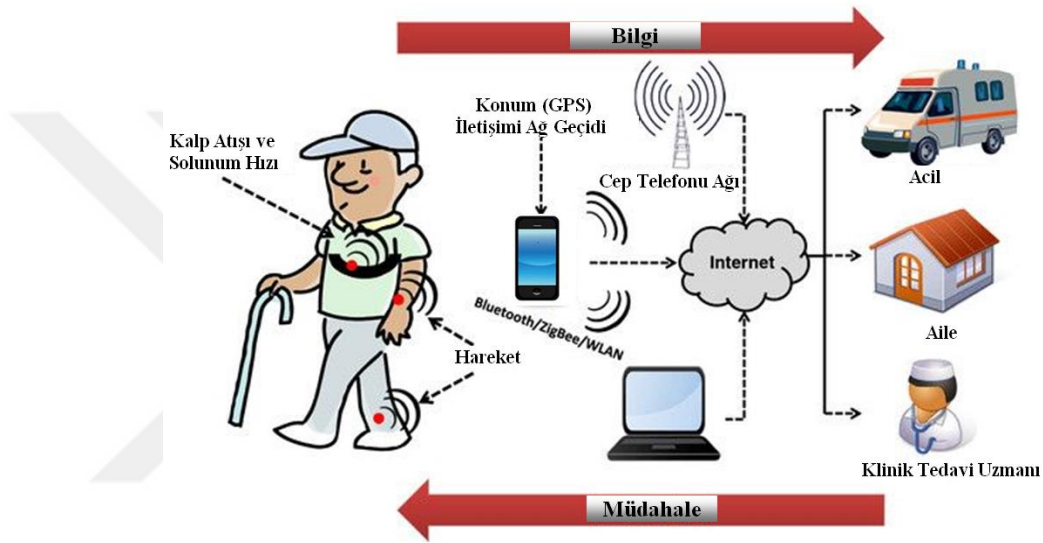
1.1. Kablosuz Vücut Alan Ağları Kavramı

Her yerde iletişimde artan ihtiyaçlar ve çok düşük güçlü kablosuz teknolojilerdeki son gelişmeler ile birlikte, insanlar etrafındaki kablosuz ağların geliştirilmesi ve uygulanmasına büyük ilgi gösterilmiştir. Kablosuz Vücut Alanı Ağları (WBANs), insan vücudunda veya vücut yakınında her biri en az bir sensör ile donatılmış birden fazla düğümü içeren radyo frekans (RF) tabanlı kablosuz ağ teknolojisi olarak tanımlanabilir [11]. Bu ağ, insan vücudunda hayati organların işlevlerini (kalp atım hızı, kan basıncı, oksijen doygunluğu, aktivite) veya vücut çevresindeki ortam parametrelerini (konum, sıcaklık, nem, ışık) uzun süre kesintisiz izleme sağlayan ve veri, ses, video gibi gerçek zamanlı trafiğin iletimini destekleyen bir ağıdır [2,12]. WBAN'daki, vücut üzerinde yer alan giyilebilen ve/veya vücut içerisinde implant edilen bu sensör düğümleri birbirleriyle ve/veya harici bir baz istasyonu ile kablosuz olarak iletişim kurabilirler [6]. Kısaca WBAN, vücudun farklı bölgelerine yerleştirilmiş sensörlerden bilgi toplayan ve işleyen düzensiz iletişimsel düğüm kümeleridir ve bu bilgilerin bir kısmını komşu veya çevre düğümlerle ve hatta yakındaki veri toplama istasyonlarıyla paylaşabilirler.

WBAN'lar için vücudun etrafındaki kablosuz özelliklere sahip bu sensör düğümleri, özel bir öneme sahiptir, çünkü hastanın sağlık durumunu uzun süre boyunca izlemenin kullanıcı dostu rahat bir yolunu sağlarlar ve hastanın etrafındaki rahatsız edici kabloların kullanılmasını engellerler [13].

WBAN terimi ilk olarak Van Dam vd. [14] tarafından kullanılmış daha sonra WBAN, birçok uygulama için hayati öneme sahip bir teknoloji olarak ortaya çıkmış ve bu alanda birçok akademik ve ticari araştırma yapılmaya başlanmıştır. Bu ağ sınıfı, yenilikçi sağlık izleme uygulamalarının önünü açmaktadır [15]. Bir kablosuz sağlık uygulaması, sağlık

uygulaması, sağlık sektörüne birçok avantajlar sunar. Bu avantajlar, hastaların günlük yaşamlarını, tıbbi durumlarını herhangi bir zamanda, herhangi bir yerde ve herhangi bir sınırlama olmaksızın sürekli izleme yapılabilmesi olarak belirtilebilir. Bu avantajları ile WBAN, sağlık sisteminde devrim yaratan zengin, disiplinler arası bir alandır [16–18]. Bu ağ, sağlık hizmetlerine ek olarak eğlence, etkileşimli oyun ve askeri uygulamalar gibi çeşitli yenilikçi ve ilginç uygulamaları da destekler [19]. Şekil 1.1, [20] WBAN tabanlı bir sağlık izleme sisteminin genel bir mimarisini göstermektedir.



Şekil 1.1. WBAN temelli uzaktan sağlık izleme sistemi mimarisine genel bakış.

1.2. WBAN Uygulamaları

WBAN, kullanıcılarının yaşam kalitesini artırmak için geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu uygulamalar literatürde yakın zamanda bildirilmiştir [7, 12, 21]. Askeri, her yerde bulunan sağlık hizmetleri, spor, eğlence ve diğerleri de dahil olmak üzere WBAN'ın geniş kapsamlı uygulamaları, IEEE 802.15.6 standardı ile iki ana alana ayrılmıştır. Bu iki alan tıbbi ve tıbbi olmayan uygulamalardır [22].

1.2.1. Tıbbi Uygulamalar

Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, yaşlanan nüfus aynı zamanda hareketsiz (durgun) yaşam tarzının her gün milyonlarca insanın kardiyovasküler, diyabet gibi kronik hastalıklardan muzdarip olmasına neden olduğu için önemli bir sorun haline geliyor. Bu nedenle, bu artan sağlık ihtiyaçları durumu, sağlık hizmeti dağıtım sistemi üzerinde büyük bir baskı

yaratmaktadır. Ayrıca nitelikli personel kıtlığı, hali hazırda aşırı yüklenme ve sağlık bütçelerinin kısılması, bir sağlık sistemi tarafından sağlanan hizmetlerin kalitesinde devam eden bir düşüşe neden olmaktadır. Bu sağlık sorunlarının üstesinden gelmek için teknolojik atılımlardan yararlanma ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. [8,23]. WBAN'nın sağlık izleme uygulamaları için kullanılmasını savunan ilk akademik araştırma makaleleri, 2000 yılında yayınlandı [24]. Ardından ortaya çıkan yeni kısa menzilli Kişisel Alan Ağları (PANs) ve sensörler, yarı iletkenler ve mobil iletişimdeki sürekli gelişmelerin yeni uygun fiyatlı ve giyilebilir sağlık izleme sistemleri oluşturmak için kullanılabileceği kabulü gördü [25].

Ayrıca, WBAN'ların tıbbi uygulamalarda kullanılması, sağlık kalitesinin iyileştirilmesinde büyük bir potansiyel olduğunu göstermiştir ve bu nedenle, her yerde bulunan sağlık izleme ve bilgisayar destekli rehabilitasyondan acil tıbbi müdahale sistemlerine kadar geniş bir uygulama alanı bulmuştur [26, 27]. WBAN'da doğrudan vücuda veya kişinin cildinin altına giysiler içine yerleştirilen sensörler ile vücut sıcaklığı, kalp atış hızı, kan basıncı, kan oksijen doygunluğu, solunum oranı, kan şekeri seviyesi, gibi fizyolojik özellikleri ölçülür ve kişinin normal faaliyetlerini kısıtlamadan uzun süreli sağlık izlemesi sağlanır [3, 28]. Anormal koşulların tespit edildiği durumlarda, sensörler tarafından toplanan veriler, cep telefonu gibi bir ağ geçidine gönderir. Ağ geçidi daha sonra verilerini hücreli bir ağ ya da İnternet üzerinden acil durum merkezi ya da harekete geçirilebilecek bir doktor odası gibi uzak bir yere iletir [29]. Ek olarak, WBAN'lar diyabet, hipertansiyon ve kardiyovasküler ilişkili hastalıklar gibi birçok türde muhtemel ölümcül hastalığı olan hastaların erken teşhisinde, hastalığın önlenmesinde, izlenmesinde ve tedavisinde anahtar bir çözüm olacaktır [3].

WBAN sağlık alanında bakıcı ihtiyacını en aza indirmek ve kronik hasta ve yaşlı insanların bağımsız bir yaşam sürmelerine yardımcı olmak ve insanlara kaliteli bir bakım sağlamak için önemli role sahiptir [7].

Mevcut izleme cihazlarının çoğunda kullanılan kablolar ve kablolarla olan bağlantılar, hastaların hareketliliğini sınırlandırmaları ve ayrıca cilt tahrişlerine veya enfeksiyonlarına neden olmaları ve dolayısıyla sağlık koşullarının bozulmasına neden olmaları bakımından

bariz dezavantajları vardır. Bu nedenle WBAN sensör ağları, geleneksel kablolu sensörlere göre önemli bir iyileşmeyi temsil eder [7].

1.2.2. Tıbbi Olmayan Uygulamalar

WBAN tıbbi olmayan uygulamalar da normal günlük kullanıcıları hedef almaktadır. Tıbbi olmayan uygulamalar, etkileşimli oyun ve sağlıklı yaşam izleme uygulamaları, hareket yardımı veya sosyal etkileşimler için bilişsel-duygusal tanıma ve terörist saldırılar, depremler, orman yangınları gibi afetlerde tıbbi yardım için hareketleri algılama özelliğini içerir [13].

Diğer bir uygulama alanı, WBAN'ın kamu güvenliği alanında itfaiyeciler, polisler veya askerler tarafından kullanılarak bu personellerin durumu ve yerleri izlenir [10,30]. WBAN örneğin havadaki toksinlerin seviyesini izler ve hayati tehlike seviyesi tespit edildiğinde itfaiyecileri veya askerleri uyarır [28]. Ayrıca WBAN, profesyonel sporcuların antrenman programlarının daha etkin bir şekilde ayarlanmasını sağlayan bir araç olarak da kullanılmaktadır.

WBAN, MP3 çalar, başa takılı (bilgisayar) ekranlar, mikrofon, kamera, sinirsel arayüz gibi gelişmiş insan-bilgisayar ara yüzleri, vb. gibi cihazları içerebilir. Bu nedenle, WBAN ayrıca oyun amaçları için ve sanal gerçeklikte de kullanılabilir [28].

1.3. WBAN İletişim Standartları

Kablosuz iletişim teknolojilerini standartlaştırmanın getirdiği birkaç faydalı neden vardır. İletişim teknolojilerinde standartlaştırma, üreticilerin ürünlerinin geliştirilmesinde ortak temel özelliklere bağlı olmalarından dolayı ürünlerin yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlayan birlikte çalışabilirliği sağlar. Müşterilerin belirli bir satıcıya bağlı kalmadıkları bu durum hem satıcı için hem de müşteriler için maliyet tasarrufu sağlar [4, 31]. WBAN'ın başarılı bir şekilde uygulanması için hem tıbbi hem de tüketici elektroniği uygulamalarını ele alabilecek standart bir model gerekliydi. Bu bağlamda, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)), özellikle WBAN'ın gereksinimlerinin standardizasyonu için IEEE 802.15.6 adlı bir görev grubunu kurmuştur [32].

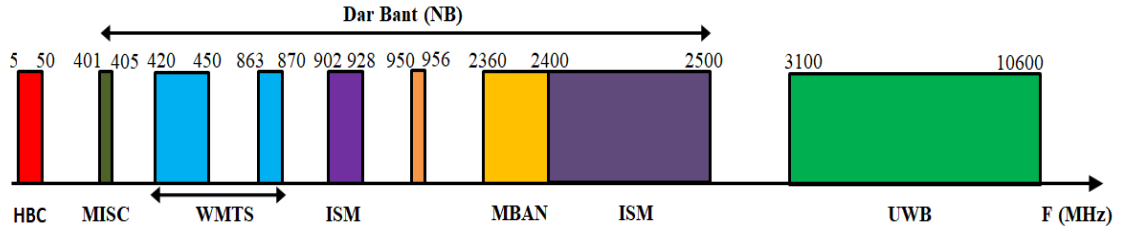
1.3.1. IEEE 802.15.6 Standart

IEEE, farklı erişim ağlarını desteklemek için çeşitli protokolleri standartlaştırmıştır. Sağlık gibi WBAN uygulama gereksinimlerini mevcut standartlar (örneğin, IEEE 802.15.4), güvenilirlik, düşük güç, trafik akışı çeşitliliği ve bir arada bulunma gibi temel konulardaki uygulamaların ihtiyaçlarını desteklemediği için ve tıbbi iletişim yönetmeliklerine uymadığı için IEEE, Kasım 2007’de IEEE 802.15.6 adlı bir görev grubu kurmuştur. Standartın ilk taslak sürümü 2010’da ve nihai ana sürümü 2012’de oluşturulmuştur. Bu, dünya çapında kabul edilen vücut alanı iletişimleri için yeni bir teknik standarttır. Kısaca söylemek gerekirse IEEE 802.15.6 standardı çeşitli tıbbi, tüketici elektroniği ve eğlence uygulamaları için insan vücudunda ve çevresindeki vücut alan ağları (BANs) için güvenilirlik, hizmet kalitesi, düşük güç, veri hızı ve parazitsiz olma ile ilgili gereklilikleri karşılamak için kısa menzilli, güvenilir bir kablosuz iletişim standardıdır. Bu standart ile WBAN düğümlerinin bölünmüş olduğu birkaç fiziksel (PHY) katmanları ve bu katmanları destekleyen bir orta erişim kontrol (MAC) katmanı özellikleri, güvenlik seviyeleri ile tarif ve analiz edilmiştir [3, 23, 33–35]. Bu standart aynı zamanda insan vücudundan ve doku hasarından kaçınmak için SAR düzenlemelerini de belirlemektedir [31].

1.3.2. WBAN İletişim Frekans Bantları

WBAN'ların kablosuz veri iletişimi için mevcut frekans bantları genellikle farklı ülkelerdeki iletişim otoriteleri tarafından düzenlendiği için farklı ülkelere ve bölgelere göre değişmektedir [31,32]. Amerika Birleşik Devletleri’nde Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission: FCC) ve Avrupada ise Avrupa Radyo İletişim Komitesi (European Radiocommunications Committee: ERC) bu frekans bantlarını düzenleyicilere iki önemli örnek olarak verilebilir [36, 37]. Frekans seçiminin, anten tasarımı, şebeke enerji tüketimi ve mevcut iletim mesafesi gibi bir dizi faktörden oldukça etkilendiği bilinmelidir [33]. Bir WBAN tasarımcısı için çok sayıda frekans bandından hedef uygulama için en uygun bandın seçilmesi çok da kolay değildir. Bu amaçla, IEEE 802.15.6 görev grubu, farklı ülkedeki ve bölgelerdeki tıbbi uygulamalar için mevcut frekans düzenlemelerine genel bir bakış sunan bir rapor sunmuştur. Mevcut IEEE 802.15.6 standardı, Dar Bant (Narrow Band: NB), Ultra geniş bant (UWB) ve İnsan Vücudu İletişimi (Human Body Communications: HBC) katmanları olmak üzere üç fiziksel katmanını tanımlar. Her fiziksel katmanın veya frekans bandının seçimi uygulama

gereksinimlerine bağlıdır [32]. WBAN için çeşitli frekans bantları, Şekil 1.2’de gösterilmektedir ve bunların ana özelliklerinin bir açıklaması aşağıda özetlenmiştir [31].



Şekil 1.2. WBAN iletişimi için bazı RF frekans bantları.

İnsan Vücudu İletişimi (HBC) PHY: IEEE 802.15.6, implante cihazlar için 5-50 MHz frekans aralığı ve koordinasyon cihazıyla etkileşimi için yeni bir iletişim ortamı (HBC) tanıttı. Standartta, 16 MHz ve 27 MHz’de iki çalışma bandı, 4 MHz bant genişliğinde önerilmiştir [38].

Dar Bant (NB) PHY: NB iletişiminde, vücutta birbirleriyle iletişim kurmak için çok sayıda düğüm vardır ve normalde nispeten yüksek güç tüketimi nedeniyle implant cihazlar için kullanılmaz. Uyumlu bir cihaz, aşağıdaki frekans bandından birinde iletim ve alımı destekleyebilmelidir [38]:

- 402–405 MHz: Tıbbi İmplant İletişim Sistemi (Medical Implant Communication System: MICS) bandı, olası bant genişliği sınırlı olmasına rağmen yaygın olarak kabul görmektedir;
- 420–450 MHz: Kablosuz Tıbbi Telemetry Sistemi (Wireless Medical Telemetry System: WMTS) bandı (Japonya’da mevcuttur);
- 863–870 MHz: WMTS bandı (Avrupa’da mevcut);
- 902–928 MHz: Endüstriyel, bilimsel ve tıbbi cihaz bandı (Industrial Scientific Medical band: ISM), Kuzey Amerika, Avustralya ve Yeni Zelanda’da lisanssız olarak kullanılabilir;
- 950–956 MHz: Japonya’da kullanılabilir;

- 2360–2400 MHz: Bu frekans bandı BAN uygulamalarında benimsenecek standardizasyon grubu tarafından önerilmiştir;
- 2400–2483,5 MHz: ISM bandı, dünya çapında mevcut ancak aynı bandı kullanan diğer IEEE standartlarıyla bir arada bulunma sorunları olabilir;

Ultra Geniş Bant (UWB) PHY: ABD’deki Federal Haberleşme Komisyonu’nun (FCC) 2002’de, lisanssız UWB frekans aralığını 3,1 ile 10,6 GHz arasında yetkilendirmiştir. Şimdi dünya çapında kabul gören bir bant olmuştur. Bu bant, WBAN’lar için yüksek performans, sağlamlık, düşük karmaşıklık ve ultra düşük güç avantajları sağlar [38].



2. BÖLÜM

WBAN ANTENLER

2.1. Antenler

Antenler, herhangi bir kablosuz sistemin önemli bir parçasıdır. Antenler elektriksel sinyalleri elektromanyetik dalgalar haline dönüştürerek uzağa gönderen ve bunun tersi olarak elektromanyetik dalgaya dönüştürülmüş sinyali alıp elektrik sinyaline dönüştüren elektromanyetik (EM) cihazlardır. Antenler verici ve alıcı arasında boşlukta elektromanyetik olarak kablosuz iletişim sağlayan karşılıklı cihazlardır, yani gönderme veya alma modunda aynı özelliklere sahiptirler. IEEE standardı tanımına göre ise, anten “Radyo dalgalarını yaymak veya almak için tasarlanmış bir verici veya alıcı sistemin parçası” olarak tanımlanmıştır. İyi bir anten tasarımı, sistem gereksinimlerini rahatlatılabilir ve genel sistem performansını iyileştirebilir. Bir antenin performansını tanımlamak için, empedans bant genişliği, radyasyon deseni, yönlülük, kazanç, verimlilik ve polarizasyon olmak üzere yaygın olarak kullanılan anten parametreleri incelenmektedir [39–41].

Ses, görüntü vb. bilgilerin kablolarla taşınması ve iletilmesi hem güç hem de masraflıdır. Ayrıca bu tür sistemler çeşitli teknik problemlerden dolayı sık sık bakım gerektirirler. Dolayısıyla, bunun yerine elektromanyetik dalgalar ile kablosuz bilgi taşınmasında antenler kullanılır. Farklı kullanım alanlarının yanında farklı yapısal ve karakteristik özellikleriyle birbirlerine üstünlük sağlayan tel, açıklık, yansıtıcı, lens ve mikroşerit gibi pek çok anten çeşidi bulunmaktadır. Bu çalışmada bu anten yapılarından biri olarak WBAN uygulamalarında pek çok avantaj sağlayan giyilebilir mikroşerit anten (MŞA) tasarımı çalışılmıştır. Kablosuz iletişimde, ISM ve UWB bantları, yüksek veri hızlı uygulamaları destekleyen ve dünya çapında kabul gören bantlardır [42]. WBAN uygulamalarında giyilebilir sistemlerin kablosuz haberleşmesinde 2,4 GHz ISM ve UWB

frekans bandı antenler, geniş empedans bant genişliği, küçük boyut ve düşük kalınlık, vücut yayılımı ve vücudun yakınında ışıma açısından mükemmellik özellikleri gibi çeşitli temel gereksinimleri taşır [43]. Ancak, IEEE 802.11 ve IEEE 802.15.4 standartlarını kullananlar da dahil olmak üzere birçok kablosuz aygıt 2,4 GHz bandında çalıştığı için yüksek bir girişim olasılığı vardır [42].

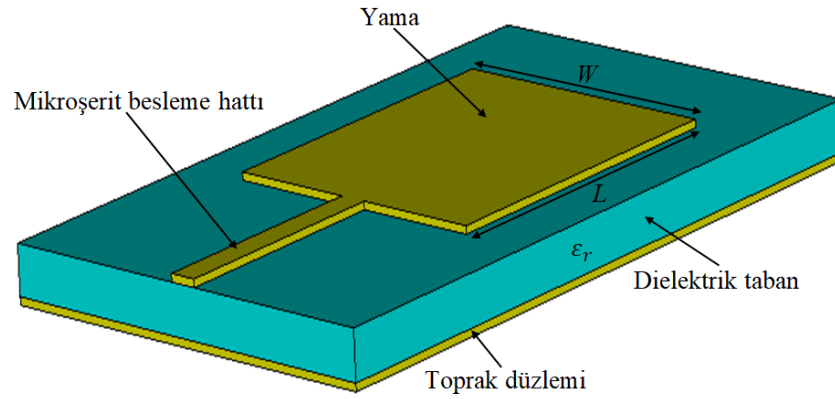
2.2. Mikroşerit Antenler

Kablosuz iletişim alanındaki teknolojik gelişmeler ve ortaya çıkan eğilimler, tek bir cihazda çok işlevli ve düşük fiziksel profilin sağlanmasını sağlayarak, anten tasarımlarına sistemle kolayca bütünleşmek için önemli bir ilgi uyandırmaktadır. Ayrıca, son gelişmeler ve kişisel iletişim ve taşınabilir cihazların çok yönlü kullanımı, düşük maliyetli, hafif, kompakt ve hatta bazı uygulamalar için çok frekanslı anteni zorunlu kılmaktadır. Özellikle kişisel ve mobil iletişim gereksinimlerinin artmasıyla birlikte, daha küçük boyut ve kalınlıkta antenlere olan talep MŞA'yı ön plana çıkarmıştır. MŞA'lar, düşük maliyet, düşük kalınlık, hafiflik, daha az sorunlu imalat ve sisteme entegrasyon kolaylığı gibi doğal avantajları ile rekabetçi çözümler sağlar [44,45].

Yama anten olarak da bilinen MŞA, antenler ve elektromanyetik uygulamalardaki en son teknolojilerden biridir. Kablosuz iletişim sisteminde basitliği ve baskı devre teknolojisi ile uyumluluğu nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

MŞA'lar son birkaç on yılda standart düzlemsel antenlerden biri olarak kapsamlı bir şekilde çalışılmış olmasına rağmen, daha ileri gelişmeler için hala büyük bir potansiyele sahiptir [46]. WBAN uygulamaları için giyilebilir antenlerde, baskın araştırmalardan biri, tasarımında kullanılan büyük toprak düzleminin bir sonucu olarak nispeten yüksek yönlendiriciliğe sahip yama antendir [47].

En basit haliyle bir MŞA, bir dielektrik (yalıtkan) taban malzemesi ve bunun bir tarafında ışıyan bir yama ve diğer tarafta bir toprak düzlemini oluşturan [48] iletken katmanlar olmak üzere üç farklı katmandan oluşur. Şekil 2.1'de dikdörtgen yamaya sahip bir MŞA'nın görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.1. Mikroşerit dikdörtgen yama anten yapısı.

MŞA tasarımında, ışımanın gerçekleştiği metalik yama için bakır, altın veya alüminyum gibi iyi iletken çok ince metalik malzemelerden seçilir. Işıyan veya diğer adıyla aktif yama geometrileri; kare, dikdörtgen, dairesel, eliptik veya üçgen gibi çeşitli şekiller alabilir. Farklı şekiller farklı avantajlara sahiptir, ancak çoğu zaman dairesel ve dikdörtgen aktif yamalar imalat ve analiz kolaylığı nedeniyle tercih edilir. Aktif yamanın boyutları anten performansı üzerinde hayati bir rol oynar [40, 48, 49]. Genel olarak, dikdörtgen şeklindeki MŞA'nın boyutu, yarı-yönlendirilmiş bir dalga boyunda olmalıdır. Bu sınırlama, matematiksel olarak Wheeler [50] ve Chu [51] tarafından çalışılmıştır [46].

Antenleri tasarlarken, dielektrik taban malzemesinin performansı için anahtar parametre, kayıp teğetinin yanı sıra göreceli geçirgenliktir [52]. Bir yama antenin bant genişliği ve verimliliği temel olarak taban malzemesinin dielektrik özellikleri ve kalınlığı ile belirlenir. Anten taban malzemesinin dielektrik özellikleri olarak, dielektrik sabiti ve kayıp teğeti, dielektrik ortamdaki elektromanyetik enerjinin yayılmasında önemli rol oynar [48].

Dielektriklerin kurucu parametresi (ϵ), karmaşık bir değer parametresi olan geçirgenliktir. Genellikle bu göreceli değer $\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ olarak ifade edilir. Burada $\epsilon_0 \cong 8854 \times 10^{-12}$ F/m olan vakumun geçirgenliğidir. Bağlı geçirgenlik, dielektrik sabiti olarak adlandırılır, ancak bunun farklı frekanslar için sabit olmadığını belirtmek gerekir. Sanal kısmın gerçek kısma oranı, tanjant kaybı olarak adlandırılır ve $\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$ olarak ifade edilir [53].

Dağılım faktörü olarak da bilinen kayıp tanjantı $\tan\delta$, malzemede ısıya dönüşen güç miktarını karakterize eder. Kayıp tanjant değerleri ne kadar yüksekse dielektrik taban malzemesi o kadar fazla kayıplı olur. Daha yüksek kayıplar daha az radyasyon verimi anlamına gelir [54].

Düşük dielektrik sabiti, alt taban malzemeleri içinde yönlendirilmiş dalga yayılımına bağlı olan yüzey dalgası kayıplarını azaltır. Bu nedenle, dielektrik sabitinin düşürülmesi uzaysal dalgaları arttırır ve bu da kabul edilebilir verimlilik, daha büyük veri aktarım kapasitesi ve yüksek kazançlı antenlerin geliştirilmesine izin verir [54, 55].

Sabit bir dielektrik değeri için bant genişliğini iyileştirmenin basit bir yöntemi, alt taban malzemesi kalınlığını arttırmaktır. Bununla birlikte, artan taban malzemesi kalınlığı ile yüzey dalga gücü artar ve ısıma gücü azalır. Bu da ısıma veriminin düşmesine neden olur [46] ve bu değer anten verimliliğini optimize etmeyebilir. Dolayısıyla, dielektrik malzemenin kalınlığının seçimi, antenin verimliliği ve bant genişliği arasında bir uzlaşmadır [54]. Bu nedenle, çalışmalar kablosuz iletişim endüstrisinden, maksimum radyasyon verimi elde etmek için mikroşerit yama anteninin tasarımını optimize etmeye yöneliktir [56].

Dielektrik alt taban kalınlığı h genellikle $0,003\lambda \leq h \leq 0,005\lambda$ aralığında bulunur, burada λ bir dalga boyudur. Kalınlığın, antenin bant genişliği (BG) üzerindeki etkisi eşitlik (2.1) ile açıklanabilir; burada Q_t , antenin kalite faktörünü ifade eder [54].

$$BG = \frac{1}{Q_t} \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.2)'de gösterildiği gibi Q faktörü; uzay dalgası (Q_{rad}) kayıpları, iletken omik (Q_c) kayıpları, yüzey dalgaları (Q_{sw}) ve dielektrik (Q_d) kayıplarından etkilenir:

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (2.2)$$

İnce dielektrik tabanlar ($h \ll \lambda_0$) için ışıyım ile ilişkili kalite faktörü (Q_{rad}) tabanın yüksekliği ile ters orantılıdır. Bu nedenle, tabanın yüksekliğinin arttırılması Q faktörünü (Q_t) düşürür. Antenin yama ve toprak düzlemleri arasında artan bir açıklık ile Q faktörü azaldığından, daha kalın bir alt taban daha geniş bir anten bant genişliği sağlar. Dahası, alt tabanın kalınlığı antenin geometrik boyutlandırılmasını da etkiler. Bu, düşük göreceli

geçirgenliğe (1 ve 2 arasında değer) sahip kalın bir tabanın büyük bir yama ve aynı dielektrik sabitli ince bir tabanın daha küçük yama ile sonuçlandığı anlamına gelir [54, 57].

Yukarıdaki tartışmalardan, MŞA'ların özelliklerini geliştirmek için birçok yöntem ve malzemenin kullanıldığını görülmektedir. Genel olarak, anten performansı ve boyutu esas olarak birbirine bağlanır; bir anten performansının, rezonans frekansı ve boyutu dalga boyu ile kıyaslanarak iyi olduğu söylenir [44]. Geleneksel MŞA'ların son sınırlaması, özellikle düşük mikrodalga frekanslarında göreceli olarak büyük boyutta olmalarıdır, çünkü çalışma frekansları antenin elektriksel büyüklüğü ile ilgilidir. Ancak, bant genişliği, kazanç ve mikroşerit antenlerin boyutu arasında bir ilişki olması gerekir. Anten mühendisleri, antenin bir özelliğindeki gelişmeye sıklıkla diğer performanslarındaki düşüşün eşlik ettiğini kabul etmişlerdir. Örneğin, anten boyutu genellikle bant genişliği ve kazanç pahasına azalır [46]. Bu nedenle, dielektrik taban malzemesi seçiminde makul bir kalınlık göz önünde bulundurulmalı ve bant genişliği ek teknikler kullanılarak artırılmalıdır [58].

MŞA'ların bant genişliği, yama geometrisini değiştirerek ve yamanın veya toprak düzleminin uygun yerlerinde bir veya daha fazla yarık açılarak (eksik toprak düzlem yapılarıyla) da artırılabilir [59, 60].

Genel olarak, MŞA boyutları matematiksel denklemler cinsinden ifade edilir. Aktif yamanın boyutları anten performansı üzerinde hayati bir rol oynar. En basit ve yaygın olarak kullanılan MŞA yapılandırmalarından biri dikdörtgen yama MŞA'dır [49]. Basitleştirilmiş formülasyona dayanarak, dikdörtgen MŞA'ların teorik olarak pratik tasarım prosedürü ana hatları kısaca aşağıda açıklanmıştır.

2.2.1. Mikroşerit Dikdörtgen Yama Anten Teorik Tasarımı

Şekil 2.1'de, mikroşerit hat beslemeli bir dikdörtgen yama MŞA verilmişti. Bu şekilden de görüldüğü gibi dikdörtgen bir yama L uzunluğu ve W genişliği ile tanımlanır.

Antenin istenen rezonans frekansı (f_r), taban malzemesi kalınlığı (h) ve dielektrik sabiti (ϵ_r), seçiminden sonra, dielektrik malzeme boyutu, yani uzunluk (L_s) ve genişlik (W_s) ve 50Ω empedans için mikroşerit besleme hattı genişliği (W_f), ayrıca ışıyan mikroşerit yama boyutlarının hesabı aşağıda özetlenmiştir.

Yama genişliğinin (W), rezonans frekansı (f_r) üzerinde küçük bir etkisi vardır ve aşağıdaki (2.3) eşitliği kullanılarak hesaplanır [40, 61].

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{(\epsilon_r + 1)}} \quad (2.3)$$

Burada;

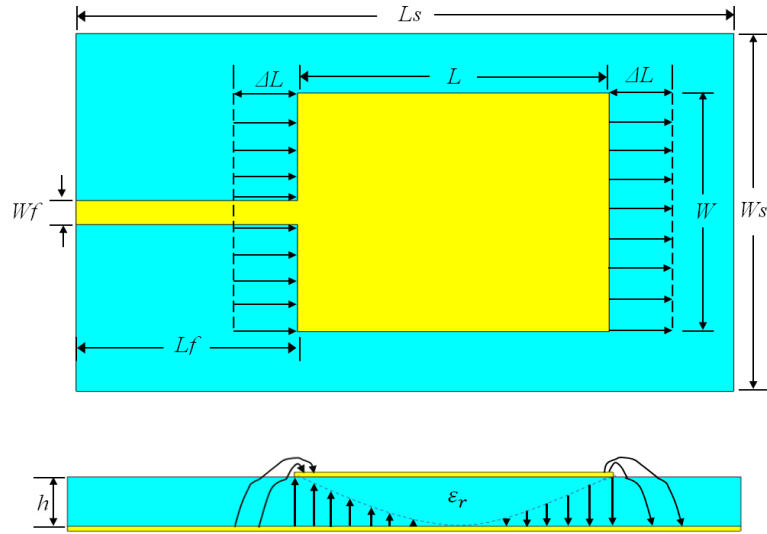
c : serbest uzaydaki ışık hızı (3×10^8 m/s)

ϵ_r : Taban malzemesi dielektrik sabiti

f_r : Anten rezonans frekansını göstermektedir.

MŞA'da ışıma, yamanın çevresi ile toprak düzlemi arasındaki saçak alanlarından kaynaklanmaktadır. Saçak alanlarının bir MŞA'nın performansı üzerinde büyük etkisi vardır. Şekil 2.2'de gösterilen dikdörtgen yama için, genişlik ve kalınlık boyunca alan değişimi yoktur. Saçak alanının miktarı, yamanın boyutlarının ve alt tabanın yüksekliğinin bir fonksiyonudur. Alt taban ne kadar yüksek olursa, saçak alanı o kadar büyük olur [62].

Saçaklanmanın etkisi nedeniyle, bir mikroşerit yama anteni fiziksel boyutlarına kıyasla elektriksel olarak daha geniş görünecektir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, dalgalar hem dielektrik tabanda hem de havada hareket eder. Böylece, etkin bir dielektrik sabiti cevabı eklenecektir. Etkin dielektrik sabiti, hattaki hem saçaklanmayı hem de dalga yayılımını dikkate alır [62].



Şekil 2.2. Dikdörtgen MŞA'nın Fiziksel ve Etkin boyutları üstten ve yandan görünüşü.

Etkin dielektrik sabiti için ifade, eşitlik (2.4)'te gösterildiği gibi A. Balanis [40] tarafından verilmektedir [62].

ϵ_{eff} 'nin değeri ϵ_r 'den biraz daha azdır, çünkü yamanın çevresi etrafındaki saçak alanları dielektrik tabanda sınırlı değildir, aynı zamanda Şekil 2.2 (a)'da gösterildiği gibi havada da yayılır [45].

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.4)$$

Burada;

h : Dielektrik tabanın yüksekliği

W : Metalik yamanın genişliği

Rezonans frekansındaki etkin uzunluk L_{eff} eşitlik (2.5) ile hesaplanır.

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.5)$$

Yamanın uzunluğu her iki uç tarafında ΔL kadar uzatılır. Bu ΔL değeri, etkin dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve genişlik/yükseklik oranının (W/h) bir fonksiyonudur [62]. Saçaklanma etkilerinden dolayı ΔL uzama faktörü eşitlik (2.6) ile hesaplanır.

$$\Delta L = h \times 0,412 \times \frac{(\varepsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (2.6)$$

Anten performansından daha fazla sorumlu olan aktif yamanın (L) uzunluğu genellikle $\lambda_0/3$ ve $\lambda_0/2$ arasındadır. Yama uzunluğu rezonans frekansını belirler ve yamanın doğal dar bant genişliği nedeniyle tasarımda kritik bir parametredir. Dikdörtgen yamanın L uzunluğu eşitlik (2.7) ile hesaplanır [40, 61].

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.7)$$

Dikdörtgen geometrideki bir yama antenin yama uzunluğu (L), normalde $0,33\lambda$ ile $0,5\lambda$ arasındadır. [63]

Dikdörtgen taban genişliği W_s ve uzunluğu L_s ise aşağıdaki (2.8) ve (2.9) eşitlikleri ile hesaplanır.

$$W_s = 6h + W \quad (2.8)$$

$$L_s = 6h + L \quad (2.9)$$

$Z_0=50 \Omega$ karakteristik empedansı için mikroşerit besleme genişliği W_f değeri eşitlik (2.10) ile hesaplanır.

$$W_f = \frac{2h}{\pi} \times \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 \times \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right\} \right] \quad (2.10)$$

Burada B ;

$$B = \frac{60\pi^2}{(Z_0\sqrt{\varepsilon_r})} \quad (2.11)$$

Olarak hesaplanır.

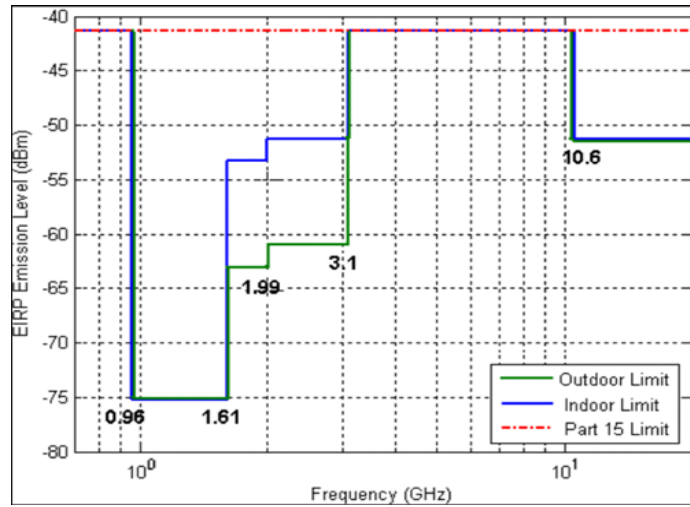
2.2.2. Ultra Geniş Bantlı Mikro Şerit Antenler

Bir antenin geniş bant anten olarak kabul edilmesi için özel bir bant genişliği sınır değerlerinin bulunmamasına rağmen, bir anteni ultra geniş bant olarak kabul edilebilebilmesi için iki ölçüt tanımlanmıştır. Birincisi Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (The Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA) raporuna göre, bir

UWB'nin kesirli (fraksiyonel) bant genişliği (aritmetik merkezi frekansı temel alınarak), %25'inden daha büyük bir iletim bant genişliğine sahip olmasını gerektirir. İkincisi FCC tarafından alternatif ve daha yeni bir tanıma göre, UWB, 500 MHz'den daha geniş mutlak bant genişliğine sahip veya kesirli bant genişliğinin %20'sini aşan bir iletim bant genişliğine sahip herhangi bir radyo teknolojisini ifade eder [58]. Mutlak bant genişliği, -10 dB emisyon seviyesinin altındaki üst frekans (f_H) noktası ve alt frekans (f_L) noktası arasındaki fark olarak hesaplanır. Öte yandan, kesirli bant genişliği matematiksel biçimde aşağıdaki (2.12) eşitliği ile ifade edilir [58]:

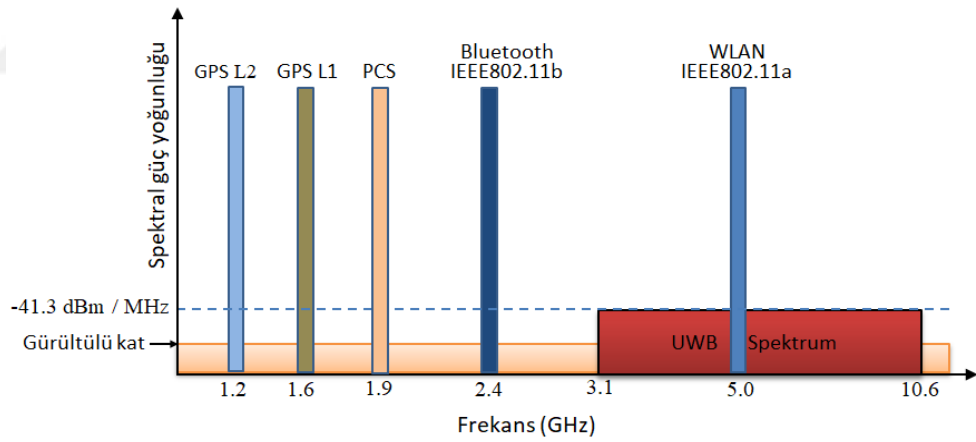
$$BG = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \begin{cases} 0,25 \text{ DARPA} \\ 0,20 \text{ FCC} \end{cases} \quad (2.12)$$

Ayrıca UWB iletişim sistemlerinin kullanımı için, 2002 yılında FCC, 3,1 GHz ile 10,6 GHz frekans aralığında, 7,5 GHz bant genişliğine sahip geniş bir frekans bandını lisanssız ticari kullanımı için belirli koşullar altında tahsis etmiştir. FCC tarafından tanımlanan bu spektrum lisanssız olsa da diğer sistemlerle zararlı parazitlenmeyi önlemek için bir dizi kural ortaya koymuştur. FCC düzenlemelerine göre, UWB bandındaki herhangi bir yöndeki maksimum yayılan güç, $-41,3$ dBm/MHz'dir. İç ve dış mekan uygulamaları için sınırlandırılmıştır. İç ve dış iletişim sistemleri için FCC sınırları, Şekil 2.3'te [64] gösterildiği gibi farklılık gösterir. Şekil 2.3'teki Part 15 sınırı, kasıtsız radyasyonlar için emisyon sınırlarına atıfta bulunur [64]. Emisyon sınırları etkili izotropik yayılan güç (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) cinsinden verilmiştir. Bu emisyon değeri, kabaca 0,5 mW maksimum toplam güce karşılık gelir [64–66]. Bu düşük güç sınırlaması, lisanssız bandın iletişimde kısa mesafeli uygulamalara yönlendirilmesini sağlar [65]. İstenilen sinyalin ultra geniş bir mutlak bant genişliği üzerine yayılması, UWB bant genişliği içindeki frekanslarda çalışan mevcut kablosuz sistemlere minimum düzeyde müdahale eden kablosuz sistemlerin oluşturulmasına izin verir. Bu nedenle, dünya çapında çok sayıda ulusal frekans düzenleyici UWB spektrumu mevcut (eski) spektrumlar ile çakışsa bile, lisanssız çalışmasına izin veren kararlar vermiştir [64]. FCC tarafından bu frekans spektrumunun tahsisi ve özellikle benzer UWB frekans bantlarının diğer ülkeler tarafından kabul görmesi, UWB araştırmalarında gerçek bir patlamaya neden olmuştur.



Şekil 2.3. İç ve dış mekan uygulamaları için FCC emisyon sınırları.

Şekil 2.4 de, UWB'nin mevcut diğer bazı geleneksel dar bant teknoloji standartlarıyla nasıl bir arada bulunduğunu gösterilmiştir.



Şekil 2.4. UWB ve mevcut diğer bazı dar bant spektrumları.

UWB teknolojisi çeşitli uygulamalara sahiptir; Bunlardan biri son yıllarda, tıbbi, sağlık izleme, eğlence ve uzaktan algılama sistemleri alanında geniş uygulamaları nedeniyle önemli bir araştırma alanı haline gelen WBAN sistemleridir. Özellikle, UWB teknolojisi, WBAN uygulamaları için çok uygun olan birtakım cazip özelliklere sahiptir. WBAN sistemleri, verimli çalışma için düşük güç kullanımıyla yüksek veri hızları gerektirir. UWB teknolojisi yüksek veri hızları, düşük güç spektral yoğunluğu, büyük bant genişliği sağlar [15,67]. Bir UWB sistemi, yüksek veri hızı iletimi elde etmek için çok kısa darbeler

kullanır [33] ve yüzlerce Mbps veya hatta 1 ila 10 metrelik mesafelerde birkaç Gbps gibi yüksek hız kapasitesine ulaşabilir [68]. UWB sistemleri potansiyel olarak basit yapı ve düşük maliyete sahiptir. Diğer sistemlere çok az parazit oluşturan gürültü benzeri sinyal özellikleri ile şiddetli çok yönlü yayılamaya ve sıkışmaya karşı dirençli yapısı, hassas konum ve izlemeye izin veren çok iyi zaman alanı çözünürlüğüne sahiptir [64]. Bu önemli özellikleri ile UWB sistem, WBAN sistemlerinin gereksinimlerini karşılamaya yardımcı olur [67]. UWB Gövde Alanı Ağlarında (BAN) insan dokuları, yakınına yerleştirilmiş WBAN cihazlarından etkilenmez. Düşük güç iletimi, görev döngüsü ayrıca ağ düğümlerinde daha düşük güç tüketimi ve bu tür sistemler için temel gereksinim olan uzun pil ömrünü sağlar. UWB teknolojisi ayrıca BAN cihazlarının boyut ve maliyet kısıtlamalarına da uygundur [10,23,31,69,70]. Kısa menzilli, düşük güçlü ve son derece güvenilir kablosuz iletişim için UWB teknolojisinin bir fiziksel (PHY) katman yaklaşımı olarak tanımlandığı uluslararası bir standart IEEE 802.15.6 [35], 2012'nin ilk çeyreğinde yayınlandı. IEEE 802.15.6 standardının insan vücudunun yakınında veya içinde kullanılması hedeflenmektedir [71]. UWB anteni, kablosuz iletişimi sağlayan UWB sistemlerinin önemli bir ögesidir [67]. WBAN uygulamalarında da tüm sistem performansında hayati bir rol oynamaktadır. Vücut dokularının anten çalışması üzerinde büyük bir etkisi vardır, anten performansını düşürmektedir. IEEE 802.15.6 insan varlığında anten özelliklerini göz önünde bulundurmayı ve bazı şartları önerir [71]. UWB antenlerinin tasarımı, UWB teknolojisinin ilerlemesini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. UWB antenleri elektriksel olarak performanstan ödün vermeden boyutu küçük ve maliyeti düşük olmalıdır [72]. WBAN'lar için UWB anten tasarım gereksinimlerini karşılamak için, tipik olarak MŞA tercih edilir [73]. Son yıllarda literatürde [74–79] WBAN uygulamaları için UWB anten tasarımı çok çalışılmaktadır.

2.3. Giyilebilir Antenler

WBAN antenler giyilebilir ve implant edilebilir antenler olarak sınıflandırılır. Giyilebilir bir anten, tanım gereği, kablosuz iletişim amaçları için insanlar veya hayvanlar tarafından giyilen giysilerin bir parçası anlamına gelir [80,81]. Giyilebilir antenler ince kalınlıkta, hafif, sağlam ve vücuda uyumlu olmalıdır. Bu antenlerin insan vücudu yakınında minimum bozulma olacak şekilde çalışma performansına sahip olmaları gerekir. Buna ilave olarak antenin, kanal kaybını, parazitlenmeyi en aza indirebilen ve ayrıca SAR gibi

insan vücudunun EM radyasyonuna maruz kalma sınırlaması gereksinimlerini karşılayan bir ışıma modeline sahip olmalıdır [1].

Daha önce açıklandığı gibi, giyilebilir uygulamalar için nispeten yüksek yönlendiriciliğinden dolayı mikro şerit yama tipi düzlemsel antenler önerilmiştir. MŞA'lar, ince düzlemsel yapıları nedeniyle giyilebilir sistemler için çok uygundur [82]. Mikroşerit yama antenleri, yapım kolaylığı, maliyet etkinlikleri ve yönlülüğün yanı sıra, vücutta giyilebilirler sistemler için ışıyan eleman ile gövde arasında toprak düzlemi ile elde edilen göreceli izolasyon nedeniyle vücut tarafından emilen enerjide önemli bir azalmaya yol açar [47]. İlk giyilebilir MŞA 1999 yılında Salonen vd. [82] tarafından GSM uygulaması için bir devre kartı üzerine basılmış, giysi entegrasyonu için uygun bir bakır yamalı düzlemsel ters F-antenidir. O zamandan beri, hafif, düşük maliyetli ve taşınabilir kablolu iletişim ve algılamayı mümkün kılma olasılıkları gibi çekici özellikleri nedeniyle giyilebilir antenler ile ilgili araştırmalar büyük bir ilgi gördü. Bu antenlerin tasarımı, üretimi ve uygulamaları hakkında birçok makale yayınlanmıştır [81,83,84]. Giyilebilir bir antenin tasarımı ve dahası, anten performansı ve üretim süresi açısından çok önemlidir. Giyilebilir antenler farklı türde iletken ve dielektrik malzemeler kullanılarak üretilirler. Bu malzemeler, farklı hava koşullarına (yağmur, kar, buz, vb.) Ve uygun EM radyasyon korumasına bağlı olarak minimum etki ile makul miktarda mekanik deformasyon (bükülme, büzülme ve sarma) sağlamak için dikkatle seçilir [85]. Bu nedenle bu antenler, insan vücudunun hareketlerini engellemeyecek şekilde giysilerin bir parçası olarak esnek veya minyatür olmalıdır. Anten tasarımı için alt taban malzemesi seçimi çok önemlidir. Taban malzemesi seçimi, vücuda yerleştirildiğinde anten verimliliğini artırmak için düşük kayıplı bir malzeme olmasını gerektirir. Bugüne kadar giyilebilir antenlerde kullanılan taban malzemesi yapısına göre tasarım ve üretim teknikleri için tanımlanmış iki kategori bulunmaktadır: (1) sert ve (2) esnek antenler [80].

2.3.1. Sert Giyilebilir Antenler

Sert giyilebilir antenlerin tasarım ve üretim işlemi, sert taban malzemeli pcb baskı devre kartları kullanılarak antenlerin basılması veya oluşturulması için kullanılan geleneksel teknikleri izler. Sert taban malzemeler üzerine giyilebilir anten tasarımlarında, bu antenlerin küçük boyutları ve karmaşık yapıları önemli bir zorluktur [86]. Çünkü vücuda giyilen sert, geleneksel antenler kullanıcı rahatlığı açısından pratik olmadığından

kullanıcı rahatsızlığını en aza indirecek şekilde minyatürleştirilmelidirler. Diğer bir zorluk ise, bu sert antenlerin bazen giyilebilir gereksinimi karşılayacak şekilde kavisli bir yapıda üretilmesini gerektirmesidir [80,87].

2.3.2. Esnek Tekstil Giyilebilir Antenler

Giyilebilir antenler rahat ve vücut şekline uygun olmalı, ancak son derece güvenilir ve verimli olmalıdırlar. Giyilebilir anten uygulamalarında birçok sorun vardır. En büyük problemler bir giysiye entegre edilmeleri ve giyilebilirlik rahatlığının artırılması, antenin minimum boyutta olması gerektiğidir [88]. Bu antenlerin insan vücudunun farklı bölümlerinde kullanıldığında uyumlu olması gerekir, bu nedenle esnek malzemeler kullanılarak uygulanması ve düşük profilli bir yapıda tasarlanması gerekir [85]. Giyilebilir antenlerin geliştirilmesiyle, yama antenleri üzerinde yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak esnek malzemeler üzerinde yoğunlaşmıştır [89,90]. Son zamanlarda, esnek giyilebilir antenler için tekstil / tekstil dışı Kapton, Polietilen tereftalat (PET) ve Polietilen naftolat (PEN) taban malzemeleri gibi kumaş dışı esnek polimer bazlı malzemeler kullanılmaktadır [85,91].

Tekstil antenleri, iletişim için giyim sistemlerine kolayca dahil edilebilirler ve çevreye bağlı olarak, bu antenler 10-100 m aralığında çalışabilirler [92]. Tekstil malzemelerinden üretilen ilk giyilebilir anten, Philips laboratuvarlarında Massey vd. [93] tarafından sunulmuştur. Bu ilk prototipten başlayarak, sonraki yıllar boyunca, birçok tekstil giyilebilir antenler insan vücuduna uyum sağlama esnekliği ve rahat kullanım için dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar tarafından kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır [94,95]. Giyilebilir uygulamalardaki tekstil antenlerinin en önemli özellikleri vücuda uyum sağlama esnekliği, dokunma rahatlığı ve yumuşaklığıdır [96].

Giyilebilir antenlerin tasarımında, antenin bir parçası olarak işlev görebilecek uygun bir tekstil alt taban malzemesi ve iletkenin seçimi kullanıcı konfor açısından olduğu gibi antenin performansı açısından da önemlidir. Çünkü anten tasarımında kullanılan bu malzemelerin çeşitli özellikleri, antenin davranışını etkileyebilir [89,90]. Tekstil antenleri, sert malzemelerden oluşan geleneksel antenlerin aksine, kısmen veya tamamen tekstil malzemelerden yapılmış özel bir anten sınıfıdır. Son araştırmalardan elde edilen bulgular, pamuk, keçe ve kot gibi düzenli giysi materyallerinin bir tekstil anteni oluşturan dielektrik tabanlar olarak kullanım için çok uygun olduğunu gösterirken, iletken

parçaların ince metalik folyolar, elektro-tekstiller olarak adlandırılan iletken tekstiller veya iletken gümüş mürekkepler ile yapılandırılabilceğini göstermiştir [94, 95].

Evrensel olarak kullanılan ve kolayca temin edilebilen pamuk, keçe ve kot kumaşı gibi sıradan tekstil malzemeleri, WBAN için giyilebilir antenler tasarlamak için taban malzemesi olarak kullanılmıştır [57]. Genel olarak, tekstiller, yüzey dalgası kayıplarını azaltan ve dolayısıyla antenin empedans bant genişliğini arttıran çok düşük bir dielektrik sabiti sunarlar. Yüksek dielektrik tabanlı antenler ile karşılaştırıldığında, tekstil antenleri fiziksel olarak daha büyüktür [62,97,98]. Tekstil malzemelerinin dielektrik davranışının frekansa, sıcaklığa ve neme bağlı olmasının yanı sıra, bileşen liflerinin özelliklerine ve ipliklerin ve / veya kumaşların yapısına ve lifli malzemedeki lif paketleme yoğunluğuna da bağlıdır [57].

Bazı araştırmacılar tekstillerin dielektrik özelliklerini incelemiş ve gözden geçirmiştir [57,99,100]. Tablo 1’de [101] bazı tekstil materyalleri için dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Tekstil materyalleri için dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı.

Dielektrik malzeme	Dielektrik sabiti (ϵ_r)	Kayıp tanjantı ($\tan\delta$)
Felt (Keçe)	1,22	0,016
Cotton (Pamuk)	1,60	0,040
Jeans (kot)	1,7	0,025
%100 polyester	1,90	0,0045
Panama	2,12	0,05
Cordura/Likra	1,50	0,0093
Cordura	1,90	0,0098
İpek	1,75	0,012
Moleskin	1,45	0,05
Tween	1,69	0,0084
Quartzel Kumaş	1,95	0,0004

Tablodan görülebileceği gibi, genel olarak, tekstiller çok gözenekli materyaller olduğu için çok düşük bir dielektrik sabiti sunarlar ve havanın dielektrik geçirgenliği değeri 1’e yakın değerlerdir [52]. Üreticiye bağlı olarak bu özelliklerin bir miktar değişebilir, bu nedenle literatürde belirtilen tekstillerin dielektrik özelliklerinde bazı farklılıklar gözlenebileceğini unutmamak gerekir. Ancak literatürdeki bu değerler anten tasarımı için

bir kılavuz olarak kullanılabilirler [66]. Öte yandan, Kapton, Polietilen tereftalat (PET) ve Polietilen naftolat (PEN) tabanlar gibi kumaş dışı esnek polimer bazlı malzemelerin kullanımı, önceden tanımlanmış kararlı dielektrik özelliklere sahiptir [85].

Genel olarak, esnek antenler için, ısıyan parçanın iletkenliği yüksek olmalıdır. Elektro-tekstil anteninin, nispeten daha düşük iletkenliği nedeniyle bakır bant veya folyo muadili ile karşılaştırıldığında daha az kazanç, verimlilik ve bant genişliğine sahip olduğu iyi bilinmektedir [85]. Farklı iletken malzemelerinin (yani, bakır bant, örgülü bakır, vb.) farklı anten performanslarına yol açabileceğini not etmek önemlidir. Farklı iletken malzemelerin giyilebilir anten performansı üzerindeki etkisi [102]'de sunulmuştur. Nikel kaplama (korozyona dayanıklı), gümüş kaplama (güçlü ve esnek), Flectron (Bakır kaplı naylon kumaş) ve Nora iletken kumaşlar, farklı tabaka dirençlerine sahip bu elektro-tekstillerin birkaç örneğidir [85].

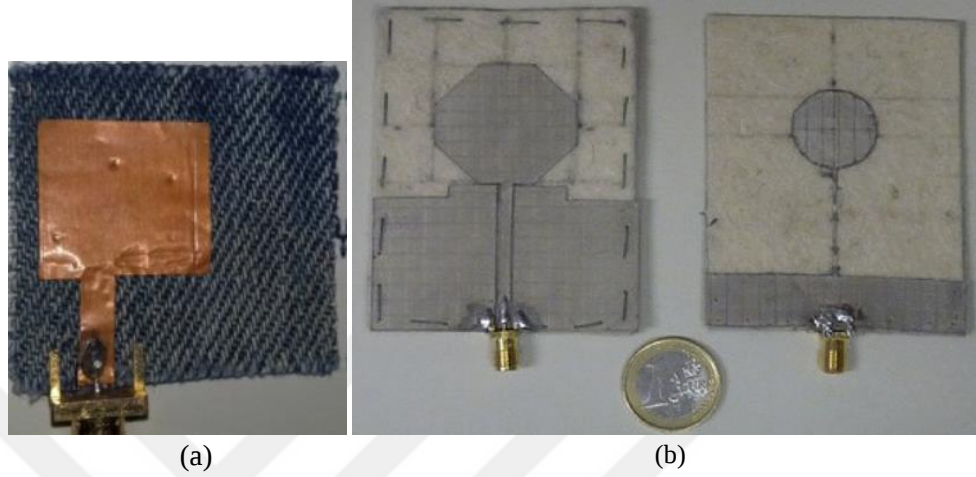
Diğer taraftan bir tekstil alt tabakaya bakır bant veya folyo yapıştırmak çok kolaydır, ancak bükülme sırasında veya çevresel koşullar (yani nem, sıcaklık) nedeniyle bakır bandın deformasyonu sonucu çıkarılması da mümkündür [80].

Son yıllarda, elektro-tekstiller (e-tekstiller), giyilebilir antenlerin tamamen esnek hale getirilmesi için akıllı malzemelerin kablosuz ağlar üzerinden serbestçe iletişim kurmasını sağlayan umut verici malzemeler olarak çok dikkat çekmiştir. Bu kumaşlar, dayanıklı, esnektir ve giyilebilirlik için uygundur [103].

Belirli elektriksel iletken e-tekstiller piyasada bulunmaktadır ve başarıyla kullanılmaktadır. Ticari olarak temin edilebilen elektro-tekstiller, kabul edilebilir anten performansı elde etmek için yeterince yüksek iletkenliğe sahiptir [104]. İletim için kullanılan e-tekstil, düşük ve sabit direnç ($\leq 1 \Omega / m^2$), anten alanı üzerinde homojen, esnek ve elastik olmayan gereksinimleri karşılamalıdır [105]. İletken tekstil ürünlerinin elektriksel özellikleri, yüzey dirençleri genellikle uzman üreticiler tarafından verilmektedir. Bu nedenle, ticari olarak temin edilebilen belirli iletken tekstiller, antenlerde başarıyla kullanılmıştır [57]. Bunlardan bazıları, Shieldit Super ve FlecTron ile üretilmiştir, her ikisi de $0,1 \Omega / m^2$ 'den az tabaka direncine sahiptir [104].

Bu antenler RF iletişimi için çeşitli WBAN uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmıştır [95]. Şekil 2.5 (a)'da [106] bir dielektrik kot kumaşı üzerine bakır bant

iletkeni kullanılarak, Şekil 2.5 (b)'de [107] ise keçe üzerine elektro tekstil bant iletkeni kullanılarak WBAN uygulamaları için tasarlanıp üretilmiş literatürdeki giyilebilir tekstil antenlerini göstermektedir.



Şekil 2.5. Giyilebilir tekstil anten örnekleri: (a) kot dielektrik taban üzerine bakır bant kullanılarak tasarlanmış anten, (b) keçe dielektrik taban üzerine iletken tekstil bant kullanılarak tasarlanmış anten.

2.3.3. Bükülmenin Giyilebilir Antenler Üzerindeki Etkileri

Giyilebilir antenlerin tasarımında tekstil ürünleri gibi esnek malzemeler kullanıldığında, antenin daima düz durması imkânsızdır. Esnek antenlerin çalışma sırasında belirli bir yüzeye eğilmeleri, hatta belirli bir yüzeye uymaları beklenir ve böylece tekstil anteninde bükülme ve buruşma meydana gelir ve sonuç olarak elektriksel uzunluğunu veya alanını değiştirir ve tasarlandığı temel işlemi kaybeder. Antenin belirli bir yönde bükülmesinin, amaçlanan uygulama için başta rezonans frekansında olmak üzere anten ışıma performansını düşürdüğü iyi bilinmektedir. Dahası, bu aynı zamanda kullanıcının vücudundaki SAR değerlerini de potansiyel olarak artırır. Bundan dolayı esnek antenlerin tasarımında, antenin belirli yüzeyler için, empedans eşleşmesi ve ışıma örüntüleri dahil olmak üzere performanslarını çeşitli bükülme koşullarında ele alınması gereklidir [85,105,108].

Giyilebilir esnek bir anten tasarımında, bu etkileri hafifletme ve eğilme veya buruşma sırasında anten performansını koruma tekniklerinden biri, geniş bant işleminin

sağlanmasıdır. Böylece rezonans frekansları büküldükten sonra bile gerekli çalışma bölgesi içerisinde tutulabilir. İkincisi, giyilebilir antenler mümkün olduğunca simetrik olacak şekilde tasarlanabilir, böylece farklı yönlerde bükülmelerine rağmen minimum düzeyde etkilenirler. Ek olarak, bir anteni, daha ciddi performans bozulmasına neden olacağı için y eksenine boyunca bükülmeyecek şekilde yerleştirmeye çalışılmalıdır. Ayrıca, bükülme sırasında antenin etkin uzunluğundaki önemli değişikliği önlemek için anten mümkün olduğunca küçük yapılabilir [85].

Giyilebilir esnek antenlerin, belirli yüzeyler için, çeşitli bükülme koşullarında empedans eşleşmesi [107, 109, 110] ve ısıma örüntüleri [111, 112] dahil olmak üzere performansları araştırılmıştır. [107]'de, bir keçe taban malzemesi üzerinde giyilebilir UWB tam tekstil esnek anten tasarlanıp üretilmiştir. Antenin x ve y eksenleri etrafındaki farklı bükülme koşullarındaki anten empedans performansı incelenmiş ve antenin empedans eşleşmesinin iyi olduğu gözlemlenmiştir.

2.3.3. Giyilebilir Anten ve İnsan Vücudu Arasındaki Etkileşim

Herhangi bir antenin tasarımı, çalışma ortamını dikkate almadan tamamlanmış değildir. Giyilebilir antenler insan vücuduna yakın çalıştığından, anten mühendisleri tasarımın ilk aşamalarında birçok potansiyel faktörü göz önünde bulundurmalıdır. Giyilebilir bir anten söz konusu olduğunda, anten performans özelliklerinin doğru değerlendirilmesi için insan vücudunun varlığını göz önünde bulundurmak zorunludur. Anten yansıması ve radyasyon özelliklerinin, kayıplı insan vücudu dokuları ile etkileşime bağlı olarak değişme eğilimi olduğu iyi bilinmektedir. İnsan vücudu cilt, yağ, kas vb. gibi düzensiz şekilli yüksek kayıplı ve çoklu dielektrik ara yüzeylerden oluşur ve dokuların geçirgenliği ve iletkenliği dokunun türüne (cilt, yağ, kas, vb.) ve çalışma frekansına göre değişir. Ayrıca, ortalama bir insan vücudu, anten üzerindeki dielektrik yükünü açıkça artıran %65 ile %80 arası su içeriğinden (25°C'de $\epsilon_r=75$) oluşur. Vücuda yakın olması nedeniyle giyilebilir antenin etkin geçirgenliğindeki bu artış, antenin Q faktörünü düşürür. Ek olarak, antenin insan dokularının etrafındaki akısı sıkışır ve anten elektriksel olarak daha büyük gibi görünür ve serbest alana kıyasla daha düşük frekanslarda ısıma yapar. Bu nedenle, anten üzerindeki dielektrik yükü, ısıma verimliliğini, kazancını, ısıma örüntüsünü ve E-alan dağılımını olumsuz etkileyebilir ve genel performansını önemli ölçüde azaltabilir. Böylece antenler, vücut üzerinde bulunduklarında ve vücuttan uzağa yerleştirildiklerinde

farklı performans gösterirler. Ayrıca, vücut tarafından emilen elektromanyetik güç, özellikle insan vücuduna uzun süreli bir ışınlama varsa, potansiyel sağlık riskleri oluşturabilir. Bu nedenle, giyilebilir antenlerin sağlık ve güvenlik gereksinimlerine uyması için, vücut dokusu tarafından emilen elektromanyetik gücün bir ölçüsünün ifadesi olan özgül soğurma oranı (SAR) değeri, uluslararası standartlar tarafından izin verilen maksimum değerinin altında bir güç sunması gerekir. Bu nedenlerden, giyilebilir bir esnek antenin tasarım süreci, normalde insan vücudunun yakınında çalışmayan geleneksel antenlerin tasarımına kıyasla oldukça farklıdır [85,89,113–115]. Çünkü kayıplı vücut dokularının yükleme etkisi, yüksek ışıma verimliliğine sahip bir antenin tasarımını, hafif ve düşük kalınlık özelliklere sahip olması arzu edildiğinde de zorlaştırır [116].

Literatürde [107, 117–120] araştırmacılar, farklı topolojilere sahip çeşitli tipte izolasyon tekniklerine sahip insan vücudu yakınında anten performansı üzerine tekstil / esnek giyilebilir antenler önermişlerdir. Ancak, izolasyon için çeşitli yapıların eklenmesi tipik olarak doğada hacimli ve kayıplı bir anten ile sonuçlanır. Bu nedenle, giyilebilir antenin gerekli operasyonel parametreleri korunurken, SAR standartlarına uygun olarak vücuttan yeterli izolasyonda, kompakt boyutlu anten tasarım tekniklerin kullanılması gerekmektedir [85]. Giyilebilir uygulamalarda anten ve insan vücudu arasındaki karşılıklı bağlantının üstesinden gelmenin etkili yöntemlerinden biri, düşük kalınlıkta anten tasarımı ile uyumluluğu nedeniyle daha düşük SAR değerleri ile sonuçlanan MM’li bir izolatör veya reflektör kullanmaktır [121–123].

2.4. SAR

Kablosuz iletişimi sağlayan antenlerin ışımasıyla yayılan radyo dalgaları ve mikrodalgalar elektromanyetik enerjinin bir şeklidir. Bir RF dalgası yoğunluğuna maruz kalmak biyolojik dokunun ısınmasına ve vücut sıcaklığının artmasına neden olabilir. Bu da canlı organizmaların genetik materyali olan DNA üzerindeki etkiler de dahil olmak üzere birçok uzun ve kısa vadeli çeşitli sağlık etkilerine sahip olabilir [124]. Bu etkiler, insan vücudunda biriken EM enerjisinin miktarıyla ilişkilidir ve Özgül Soğurma Oranı (SAR) ile tanımlanan bir parametredir. SAR, vücut kütle dokusu tarafından emilen güçü temsil eder. SAR birimi kilogram başına Watt (W/kg) cinsinden ifade edilir [125].

SAR için genellikle tüm vücutta veya küçük bir numune hacmi üzerinde (tipik olarak 1 g veya 10 g doku) ortalaması alınır. Belirtilen değer belirtilen hacim veya kütle üzerinde

çalışılan vücut kısmında ölçülen maksimum seviyedir [126]. WBAN'lar gibi düşük güçlü cihazlar, tüm vücut SAR'ının bir kaygı oluşturacağı kadar bir gücü yaymazken, bununla birlikte, RF alanlarına en fazla maruz kalan vücutun belirli bölgelerinde ölçülen SAR olan lokalize SAR'a dikkat edilmelidir. Bu nedenle, WBAN'lar için yerel SAR'ı en aza indirmeli ve uluslararası veya bölgesel SAR düzenlemelerine uymalıdır [31].

İnsan vücudunu zararlı radyasyonun etkilerinden korumak ve sağlık güvenliğini sağlamak için Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: ICNIRP) ve IEEE tarafından yerine getirilmesi gereken genel yasal kısıtlama ve sınırlamalar belirtilmektedir. SAR değerleri, IEEE ve ICNIRP standartlarına göre 1 g ve 10 g doku kütlesi üzerinden hesaplanır. IEEE C95.1: 2005'te belirtilen sınır, 1 g ortalama doku kütlesinde 1,6 W/kg'dır ve 10 g ortalama doku kütlesinde 2 W/kg'dır. Bu sınırlamalar ICNIRP rehberinde belirtilen sınır ile benzerdir. Öte yandan, SAR limiti, FCC tarafından 1 g insan dokularında 1,6 W/kg olarak belirlenmiştir [127,128]. SAR, belirli bir yoğunluğa sahip bir hacim kısmında bulunan kütledeki bir artışın, zamana göre emilen enerjideki artışa oranının zamana türevi olarak tanımlanır, yani SAR, elektromanyetik enerjisinin vücutun birim kütlesine uygulanma (nüfuz etme) hızıdır. Bu tanım, IEEE'e göre [127, 129], bu tanımın SAR matematiksel denklemi eşitlik (2.13) ile gösterilir [130–132].

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dv} \right) \quad (2.13)$$

Genel olarak SAR birimleri kilogram başına watt (W/kg) veya gram başına miliwatttır (mW/g). SAR, eşitlik (1.14)'de gösterildiği gibi indüklenen elektrik alanı cinsinden tanımlanabilir [130, 132].

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (2.14)$$

Burada E , (r.m.s) indüklenen elektrik alanın genliği (V/m), σ , dokunun elektriksel iletkenliği (S/m) ve ρ , doku yoğunluğu (kg/m^3) ifade eder [132].

SAR, anten radyasyonunun insan vücudu üzerindeki etkisini ifade eder. Pratik uygulamalar için, bu etkiyi değerlendirmek ve gerçekçi sonuçları yansıtmak için anten

insan vücudunda simüle edilmeli ve ölçülmelidir. Sayısal insan modelinin elektromanyetik simülasyon paketlerinde SAR değerlendirmesi için yaygın olarak kullanılan bir başka araç olduğunu belirtmek gerekir. Ayrıca, insan vücudu fantomu bu tür ölçümlerde yararlı bir araçtır [133].

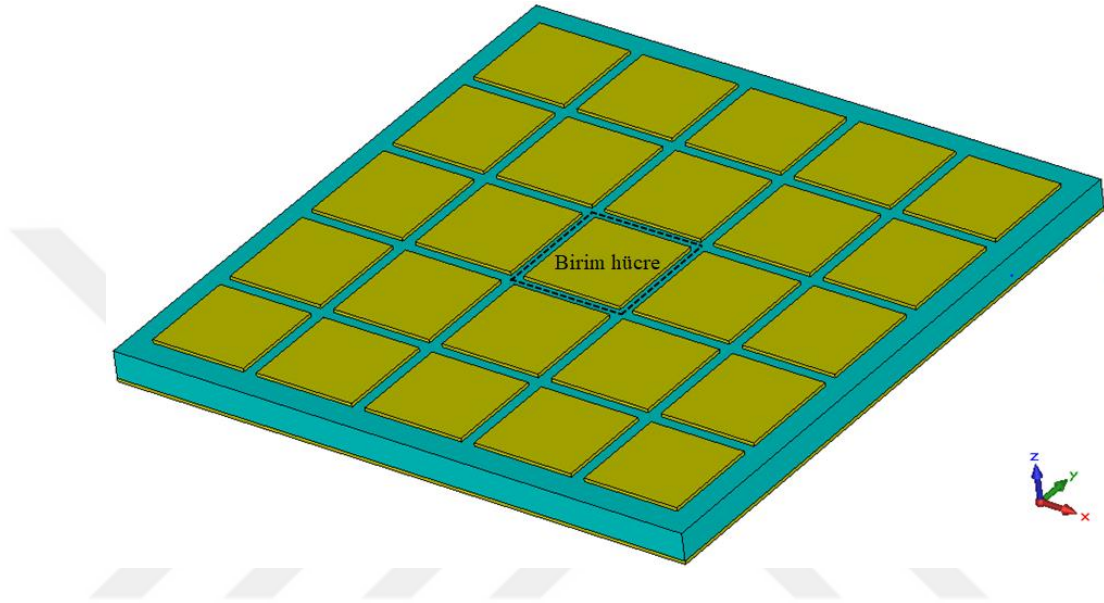
Çok yönlü anten genellikle insan vücudunda yüksek SAR gösterir. Bunun nedeni, kontrol edilmesi gereken insan vücuduna doğru yüksek arka lob radyasyonları olmasıdır. Bir zemin düzlemi olarak metamalzeme, vücutta taşınan antenler için bu radyasyonların seviyesini azaltmak ve dolayısıyla SAR'ı sınırlamak için önerilen bir çözümdür [105].

2.4. Anten Tasarımında Metamalzemeler

Metamalzeme (MM)'ler doğal olarak oluşan malzemelerden farklı özelliklere sahip yapay olarak tasarlanmış malzemelerdir. Elektrik geçirgenliği (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ), bir malzemenin veya ortamın elektromanyetik özelliğini tanımlayan iki temel parametredir. Elektrik geçirgenlik, bir malzemenin elektrik alanına yerleştirildiğinde nasıl etkilendiğini açıklar. Ve manyetik geçirgenlik, bir malzemenin manyetik alan varlığında nasıl etkilendiğini açıklar. MM'ler negatif elektrik geçirgenliğe veya manyetik geçirgenliğe sahip olabilir veya her ikisi de aynı anda negatif olabilir. Yapay olarak yapılandırılmış MM, negatif kırılma indeksinin doğal olmayan özelliklerini temel malzemeden değil, tasarlanan kompozit yapıdan türetmektedir. MM, bir birim hücrenin ortalama büyüklüğünün, ışığın itici dalga boyundan çok daha küçük olması gereken birim hücre yapılarının bir düzenlemesidir [134,135].

MM, bilim ve mühendislik alanındaki geniş bir uygulama alanını kapsar [136]. Yapay olarak doğada bulunmayan benzersiz özellikleri sergileyen bir yapı tipi tanımlayan geniş bir terimdir.[137] MM'ler tipik olarak yapay olarak dielektrik tabanlar üzerine basılmış periyodik metalik desenlerden oluşan kompozit yapılar olarak gerçekleştirilir [138]. Bu egzotik özellikleri kuvvetli bir şekilde bileşimlerinden ziyade MM birim hücrelerinin geometrisine bağlıdır [139]. Genel bir tanım olarak MM'ler, ilgilenilen frekanslarda doğal malzemelerde bulunamayan benzersiz veya sıradışı özellikler sergileyen malzemelerdir. Bu nedenle, mikrodalga ve optik bileşenlerde doğal malzemeler kullanılırken karşılaşılan bazı sınırların ötesine geçmeye izin veren yapay mühendislik malzemeleri olarak tanımlanabilir [140]. MM'ler, doğal olarak bulunmayan iki benzersiz faydalı özelliğe sahip yapay mühendislik yapılarıdır. MM'nin benzersiz özelliklerinden

ilki, yapay manyetik iletken (Artificial Magnetic Conductor: AMC) gibi elektromanyetik dalgaların yayılımını sıfır faz kayması ile kontrol etme yeteneğidir. İkincisi, yüzey dalgalarını her yöne bastırabilen elektromanyetik bant aralığı (Electromagnetic band-gap: EBG) özelliğine sahip olmasıdır [123, 141, 142]. Şekil 2.6’da Periyodik 5×5 diziye sahip MM yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Periyodik 5×5 diziye sahip MM yapısı.

Yapay malzeme ilk olarak 1898’de Jagadis Chunder Bose tarafından uygulandı; burada ilk mikrodalga deney çalışmasını bugünün terminolojisi ile yapay kiral elemanlar olarak bilinen bükülmüş yapılar üzerinde gerçekleştirdi. 1914’te Lindman yapay şıral medya üzerinde çalıştı. 1948’de Kock, yapay medyanın etkin kırılma indisini periyodik olarak ve etkili bir şekilde düzenleyen küreler, diskler ve şeritler düzenleyerek hafif mikrodalga lensler üzerinde çalıştı [143]. 1968’de, Veselago, ünlü makalesinde yapay malzemelerin aynı anda manyetik geçirgenlik (μ) ve elektrik geçirgenliği (ϵ) negatif değerlerine sahip malzemelerin özellikleriyle ilgili bazı yeni fenomenleri öngören ilk teorik çalışmayı yapmıştır [144]. Bu malzemeleri elektrik alanı, manyetik alan ve faz yayılımı olarak üçlü vektörlerin oluşturduğu sol el ortamı (LH) olarak adlandırmıştır [145]. Bunlar grup hızının ve faz hızının tersine çevrilmiş elektromanyetik dalgalar özelliğine sahiptir ve ters yönde ilerler [146]. Uzun bir zaman sonra 1990’larda Pendry vd. [147] tel yapıların bir elektrik plazma frekansına (negatif elektrik geçirgenlik) ve ardından halka yapıların [148] manyetik plazma frekansına (negatif manyetik geçirgenlik) sahip homojen bir malzeme

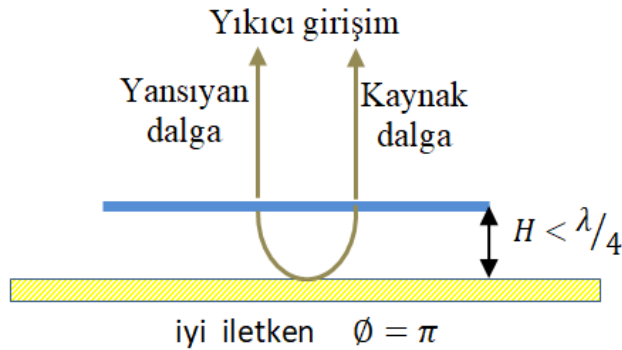
olarak davrandığını göstermiştir. 2000 yılında Schultz ve iş arkadaşları, periyodik olarak uygulanan metal çizgiler ve ayrık halka rezonatör (Split-ring resonator: SRR)’leri kullanarak malzemelerin özelliklerini deneysel olarak negatif bir kırılma indeksiyle gösterdiler [149, 150]. Bundan sonra, MM’lerin eşsiz elektromanyetik özellikleri araştırmacıların ve mühendislerin ilgi odağı olmuştur, çünkü kavram elektromanyetik dalga teorisi ve mühendisliğinde yeni gelecek vaat eden bir paradigma haline gelecektir [151]. MM’lerin en önemli uygulamalarından biri anten tasarımıdır. Olağandışı MM özellikleri nedeniyle, geleneksel malzemelerle gerçekleştirilemeyen yeni özelliklere sahip antenler elde edebiliriz [152].

Bu antenlerin WBAN uygulamaları için tasarımı durumunda gövde üzerine yerleştirilmesi gerektiğinden, tasarım stratejileri geleneksel antenlere göre oldukça farklı olabilir. Çünkü WBAN sistemi için giyilebilir anten tasarlarken anten ile insan vücudu arasındaki etkileşim önemli bir sorundur. Bu durum anten empedans bant genişliği, radyasyon kalıbı / polarizasyonu ve verimliliği gibi özellikleri önemli ölçüde değiştirebilir ve muhtemelen yüksek SAR değeriyle kullanıcının sağlığını etkileyebilir. Giyilebilir antenlerin sağlık ve güvenlik gereksinimlerine uyması için, antenlerden vücuda nüfuz eden radyasyonun, SAR ile ölçülen birim kütle başına emilen gücün en az gücü sunması gerekir [115, 153, 154]. Araştırmacılar bu zorlukları gidermek için farklı topolojilere sahip çeşitli tiplerde tekstil / esnek giyilebilir antenler önermişlerdir [115]. Ancak son zamanlarda araştırmacılar, MM’lerin eşsiz elektromanyetik özelliklerinden faydalanarak, anten tasarımlarındaki çeşitli problemleri gidermek için teknolojiler geliştirilmiştir [151, 155]. MM’lerin eşsiz özellikleri ile geleneksel malzemelerle gerçekleştirilemeyen yeni özelliklere sahip antenler elde edilmektedir. Bu yapılar, doğada bulunmayan ve yüksek elektromanyetik yüzey dalga empedansı özelliklerine sahip yapay olarak tasarlanmış yapılardır. Bu yapılar, belirli bir frekans bandı (bant aralığı) içindeki yüzey akımlarının/dalgaların yayılımını bastırabilmektedir ve antenlerin performansını arttırmak için bir toprak düzlemi olarak önerilmektedir [156]. Anten tasarımında MM’lerin kullanımı, antenin SAR değerini yalnızca önemli ölçüde düşürmekle kalmaz, aynı zamanda boyut küçültülebilir, bant genişliğini, kazancı arttırabilir veya çok bantlı anten oluşturma gibi antenin diğer parametrelerini de iyileştirebilir. Tasarlanan antenin teknik gereksinimlerine bağlı olarak, MM’ler antenin farklı işlevleri için kullanılabilir. İyileştirilmesi istenen antenin parametrelerine bağlı olarak, MM’ler farklı yöntemlerle

uygulanabilir. Meta malzemeler, antenin ortamı olarak veya antenin bir parçası olarak uygulanabilir [75, 123, 156, 157].

Genel olarak, antenin toplam kalınlığını en aza indirmek için düzlemsel yansıtıcı olarak bir elektromanyetik bant aralığı (EBG) veya yapay manyetik iletken (AMC) düzlem kullanılır [154].

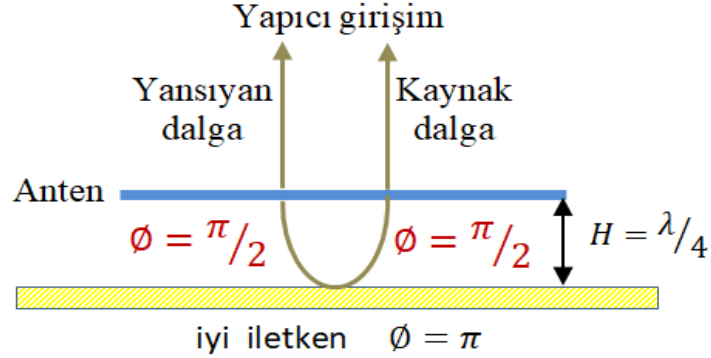
Anten ve insan vücudu arasındaki bağlantıyı azaltmak için normal olarak aralarına bir metalize tabaka parçası yerleştirilir [154]. Geleneksel antende, geleneksel bir arka plan düzlemi olarak iyi iletken (Perfect Electric Conductor: PEC) (veya bakır gibi pratik, iletken) katmanı antenin reflektörü olarak işlev görür. Bununla birlikte, PEC katmanının dezavantajı, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi anten düz, iletken bir levha PEC katmanına çok yakın ($\lambda/4$ ’ten çok düşük aralıkta) yerleştirildiğinde, başlangıçta antenin ışıyan kısmı boyunca akan kaynak dalgaya göre 180° faz dışı üretilen yansıyan dalgadır. Faz dışı yansıyan dalga kaynak dalga ile yıkıcı etkileşime neden olur. Bu girişim antendeki kaynak dalgayı yok eder veya büyük ölçüde zayıflatır, böylece anten radyasyon verimliliğini azaltır ve kazancı azalır. Bu durumda, güçlü alan iptali nedeniyle anten uygun şekilde eşleşmeyebilir [158, 159].



Şekil 2.7. Anten, $\lambda/4$ ’ten daha az bir mesafede metal bir iletken üzerinde.

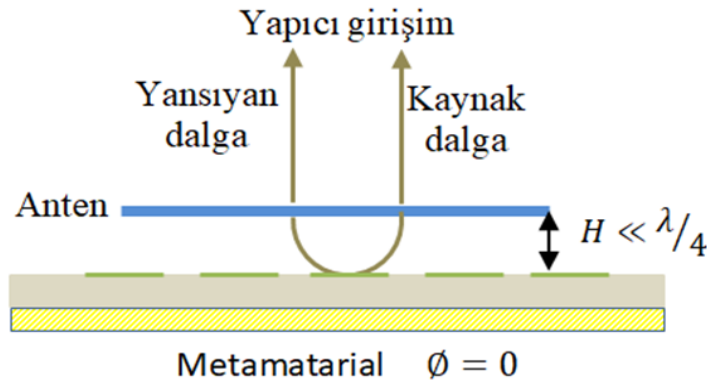
Bu sorun, Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, ışıyan anten ile PEC metal düzlemi arasına minimum çeyrek dalga boyu boşluğu eklenerek çözülmektedir. Antenden yüzeye ve tekrar antene olan toplam gidiş-dönüş faz kayması bir tam döngüye (π) eşittir ve (PEC’den) yansıyan dalga kaynak dalgasına yapıcı bir şekilde eklenir. Anten verimli bir şekilde yayılır. Anten verimli bir şekilde yayılır. Ayrıca anten rezonans frekansındaki empedans uyumu da iyileştirilir. Ne yazık ki, bu mesafenin dezavantajı, genel anten

boyutlarını artırmasıdır. Bu nedenle, anten yapısı artık düşük kalınlıkta değildir ve metallerin bir başka özelliği de yüzey dalgalarını desteklemesidir [158, 159].



Şekil 2.8. Anten, $\lambda/4$ mesafesinde metal bir iletken üzerinde.

Buna karşı, belirli bir frekans bandında aynı fazda yansıma özellikleri nedeniyle PEC yerine mükemmel manyetik iletken (Perfect Magnetic Conductor: PMC) veya pratikte AMC) kullanılır. Şekil 2.9’da gösterildiği gibi, AMC tarafından yansıtılan dalga kaynak dalga ile aynı faz halindedir. Bu nedenle PMC katmanını tüm gücü tıpkı bir metal levha gibi yansıtırken, faz dışı değil faz içi yansıtır, Faz içi yansıtılan ek dalgalar, kaynak dalgaya yapıcı bir şekilde etki eder. Hem yansıyan dalgadan hem de kaynak dalgadan gelen birleştirici etki, antenin radyasyon verimliliğini ve kazancını artırır. Böylece, AMC yer düzlemi ile anten arasında gereksiz bir mesafe $\lambda/4$ eklenmeden (PEC toprak katmanında olduğu gibi) düşük kalınlıklı bir anten gerçekleştirilebilir [158,159].



Şekil 2.9. Anten, $\lambda/4$ ’ten çok küçük mesafedeki MM üzerinde.

EBG ve AMC tasarımlarının anten tasarımlarının, geleneksel antenler ile karşılaştırıldığında insan vücuduna elektromanyetik bağlanmanın en aza indirilmesinde yardımcı olduğu bildirilmiştir [115, 160–162].

Literatürde çeşitli MM yapısına dayalı bir reflektör düzlemi olarak, anten vücut üzerinde çalışırken anten ile kullanıcı vücudu arasındaki etkileşimi ortadan kaldırmak, antenin performansını artırmak için ve vücut üzerinde kullanılabilir düşük SAR değerli antenler çalışılmıştır. Literatürde bu çalışmalar, tek bandlı [116, 163, 164], çift bandlı [122, 142, 162, 165–168] ve geniş bandlı [169–172], MM'ye dayalı yapılar giyilebilir uygulamalarda arka lob ışımasını ve SAR değerini azaltarak anten performansını iyileştirmek için kullanılmıştır [123]. MM eklenmesinin, geleneksel antenlerle elde edilebilecek olanlara kıyasla anten performansını önemli ölçüde arttırdığı gösterilmiştir [173]. [174]'te, yama anteninin kazancını artırmak için keçe ve denim alt tabaka üzerinde bakır bant kullanan altıgen çift bantlı bir AMC kullanılmıştır. [175]'te, Oluklu Kudüs Haçı toprak düzlemi gibi AMC de antenin geri radyasyonunun insan vücudu üzerindeki etkilerini azaltmak için önerilmiştir.

MM yapılarının giyilebilir uygulamalar için eğilme ve buruşma etkilerine karşı daha az duyarlı oldukları da kanıtlanmıştır. Bu, farklı bükülme koşulları altında araştırılan çeşitli MM destekli giyilebilir antenler literatürde başarılı şekilde sunulmuştur [165,168,172,176,177]. Literatürdeki bu çalışmalardan da anlaşılacağı gibi MM yapılar anten tasarımında antenin düşük kalınlık ve performans parametreleri açısından önemli bir araştırma konusudur.

3. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

3.1. Nümerik Analiz Teknikleri

Anten analizinin temel problemi, anten etrafındaki radyasyon alanının çözümü ve anten diyagramının yönü, ışın genişliği, kazanç ve giriş empedansı gibi parametrelerin çözülmesidir. MŞA'nın analizi için birçok yöntem vardır [178]. Mikroşerit yama antenlerini modellemek ve analiz etmek için kullanılabilecek en popüler yöntemler; yaklaşık yöntemler ve tam dalga yöntemleri olarak iki gruptan birine girer. Yaklaşık yöntemlerde iletim hattı modeli, boşluk modeli en yaygın kullanılan popüler yöntemlerdir. Analitik olarak analiz yapılan yaklaşık yöntemlerin tek elemanlı basit anten yapıları için, çok küçük çözüm süresi ile iyi bir fiziksel fikir verir, ancak daha az doğrulukları vardır. Daha karmaşık mikroşerit yama antenlerini modellemek için kullanılabilecek en popülerleri tam dalga yöntemleri olan moment yöntemi (MoM), sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method: FEM) ve sonlu fark zaman alanı (Finite-difference time-domain: FDTD) yöntemi, Sonlu Entegrasyon Tekniği (Finite Integration Method: FIT), Green Fonksiyon Yöntemleri, vb. gibi diğer yöntemler de analiz için kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin temelinde sayısal yöntemlerle analiz vardır. Bu grup daha titiz bir analiz gerektirir ve bu nedenle daha uzun simülasyon süresi alır, ancak daha doğru bir sonuç verir [48].

Ne iletim hattı modeli teorisi ne de rezonant boşluk modeli teorisi, dikey yönde alan değişikliğini dikkate almaz. MŞA'nın kalınlığı belirli bir değere ulaştığında, model doğru değildir. Ancak İletim hattı modeli ve kavite modellerine gibi klasik modellere göre, tam dalga teorisi yöntemi doğru, eksiksiz ve geneldir. Ancak tam dalga teorisi ile hesaplama çok karmaşıktır. Bilgisayar yazılımı ve donanım teknolojisinin yüksek hızlı gelişimi ile, tam dalga teorisi yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Piyasada ortaya çıkan birçok elektromanyetik simülasyon yazılımı tam dalga teorisine dayanmamaktadır [178].

EM bileşenler, sürekli artan ürün yelpazesinin başarısı için çok önemlidir. Teknolojideki ilerlemelere ayak uydurmak hem vizyoner tasarımlar hem de hızlı, esnek geliştirme döngüleri gerektirir. Simülasyon, mühendislerin tasarım sürecinin en erken aşamalarında bile sanal prototipleri denemelerine, farklı konfigürasyonların performansını karşılaştırmalarına ve ürünlerini optimize etmelerine olanak tanır. Simülasyon, gerekli fiziksel prototip sayısını azaltabilir ve geliştirme sürecini kısaltarak hem maliyetleri hem de pazara sunma süresini kısaltabilir. Ürünlerin performanslarını analiz etmek ve yasal elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic Compatibility; EMC) ve maruz kalma sınırlarını karşıladıklarını doğrulamak için gerçekçi bir sistemin parçası olarak simüle edilebilir ve potansiyel olarak zaman alıcı yeniden tasarımlardan veya maliyetli ve utanç verici geri çağırımlardan kaçınabilir [179].

Son birkaç on yıllık çaba ile tam dalga tekniğine dayalı yazılımlar geliştirildi. Popüler olarak kullanılan yazılımlar Ansoft HFSS, FEKO ve CST Microwave Studio'dur. Bunlar mikroşerit antenler üzerinde araştırmaların ilerlemesinde hayati bir rol oynamıştır ve anten tasarımcıları için gerekli araçlar olduğu ortaya çıkmıştır [63]. Bir yama anteninin mikroşerit yapılarını tasarlamak için (bu yazılım programlarında) çeşitli sayısal simülasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler FDTD, iletim hattı matrisi (Transmission Line Matrix: TLM), FEM, MoM ve FIT temelli yöntemlerdirler [180,181].

FEM, FDTD, FIT gibi sayısal analiz tekniklerine dayanarak, fiziksel sınır içindeki elektrik ve manyetik alanları modelleyen ve simüle eden elektromanyetik hesaplama yazılım araçları geliştirilmiştir. Bu yazılım araçları, elektromanyetik alanlar ve RF / mikrodalga yapıların modellenmesinde büyük kolaylıklar sunar. Bu araçların en sık kullanılan ve en iyi bilinenleri, FEM'e dayanan yüksek frekanslı yapı simülatörü (HFSS) ve FIT'e dayanan Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) yazılımıdır [182].

3.1.1. Sonlu Entegrasyon Tekniği

Sonlu integrasyon tekniği (Finite Integration Technique: FIT) ilk olarak 1977'de Weiland [183] tarafından tanıtıldı ve o zamandan beri farklı elektromanyetik dalga problemlerini çözmek için hesaplama tekniklerinden biridir. FIT, hem zaman alanında hem de frekans alanında Maxwell denklemlerini çözer. FIT, Kartezyen veya non- ortogonal gibi farklı ızgara türleri için formüle edilir ve Maxwell denklemlerinin içinde çözülebileceği sınırlı

sayıda ayrıık konumda bir hacmi tanımlar. FIT'in ayrıklaştırma yöntemi, homojen ortamlar için FDTD yöntemine benzer. Ayrıca bazı FDTD dezavantajlarını telafi eder. Bununla birlikte, FIT Maxwell denklemlerini integral formlarında doğrusal bir denklem sistemine dönüştürür. Bu teknik farklı ortamlar arasındaki ara yüzleri daha doğru bir şekilde ele alır. Geometrik modellemede esneklik ve kavisli sınırları ve karmaşık şekilleri daha doğru bir şekilde çözümler [182, 184].

3.1.2. CST Microwave Studio

Bu tez çalışmasında tercih edilen bilgisayar simülasyonu programı CST Microwave studio (CST MWS) yazılımı programıdır. CST MWS, EM bileşenleri ve sistemleri tasarlamak, analiz etmek ve optimize etmek için yüksek performanslı bir 3B EM analizi için hazırlanmış ticari bir yazılım paketidir [179].

EM analizinin ortak konuları arasında antenlerin ve filtrelerin performansı ve verimliliği, elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference: EMI), insan vücudunun EM alanlarına maruz kalma, motorlarda ve jeneratörlerde elektromekanik etkiler ve yüksek güçte cihazlarda termal etkiler yer alır [179].

EM spektrumundaki uygulamalar için elektromanyetik alan çözümler, CST Studio Suite'teki tek bir kullanıcı ara yüzünde bulunur. Çözümler, hibrit simülasyonları gerçekleştirmek için birleştirilerek mühendisler birden çok bileşenden oluşan tüm sistemleri verimli ve basit bir şekilde analiz etme esnekliği sağlar. Diğer SIMULIA ürünleriyle birlikte tasarım, EM simülasyonunun tasarım akışına entegre edilmesini sağlar ve geliştirme sürecini en erken aşamalardan itibaren yürütür [179].

CST Studio Suite, dünya çapında önde gelen teknoloji ve mühendislik şirketlerinde kullanılan EM ve çoklu fizik simülasyonu için kullanılan sınıfının en iyilerinden bir yazılım paketidir. Daha kısa geliştirme döngüleri ve daha düşük maliyetler sağlayarak pazara önemli ürün avantajları sunar. Simülasyon, sanal prototip oluşturma kullanılarak sağlanır. Cihaz performansı optimize edilebilir, potansiyel uyum sorunları tasarım sürecinin erken aşamalarında tespit edilebilir ve hafifletilebilir, gerekli fiziksel prototip sayısı azaltılabilir ve test başarısızlıkları ve geri çağırma riski en aza indirilebilir. [179].

CST Studio Suite, modelin kritik bölümlerinde ağ kalitesini artırmak için ağ iyileştirme ve otomatik uyarılama ile hızlı, otomatik ağ oluşturma sağlar. CST Studio Suite tarafından kullanılan tescilli Mükemmel Sınır Yaklaşımı (Perfect Boundary Approximation: PBA), milyarlarca örgü hücresi olan modeller için bile geleneksel bir merdiven ağıyla ilişkili hız avantajlarını korur, ancak eğimli yapıların ve karmaşık bilgisayar destekli tasarım (computer aided design: CAD) verilerinin doğru bir şekilde modellenmesine izin verir [179].

CST Studio Suite, simülasyon modellerini oluşturmak ve düzenlemek için güçlü ve tamamen parametrik bir CAD arayüzü sunar. İçe ve dışa aktarma araçları, modellerin çok çeşitli CAD ve elektronik tasarım otomasyonu (EDA) yazılımlarından içe aktarılabilmesi anlamına gelir. SOLIDWORKS'e tamamen parametrik iki yönlü bağlantı, CST Studio Suite'te yapılan tasarım değişikliklerinin doğrudan SOLIDWORKS projesine veya tam tersi şekilde geri alınabileceği anlamına gelir [179].

Bir cihazın EM alanının insan vücudu ile etkileşimi, cihaz tasarımı için önemli bir parametredir aynı zamanda hem ürün performansı hem de güvenliği hakkında bilgi verir. Özellikle sağlık ve yaşam bilimlerinde. CST Studio Suite, insan vücudunun dikkate alınmasını sağlayan detaylı iç yapıya ve gerçekçi EM ve termal özelliklere sahip hem voksel tabanlı hem de CAD tabanlı vücut modellerini sunar [179].

CST Mikrodalga stüdyosu, çalışması için "Sonlu entegrasyon tekniği" adlı sayısal bir yöntem kullanır. Statik alanın hem zaman hem de frekans alanında hesaplanması veya yüksek frekans uygulamaları gibi çeşitli elektromanyetik ile ilgili problemleri çözmek için uygun bir uzaysal ayrıklaştırma şemasıdır. CST MWS bunların dışında MoM, FEM, geçici çözücü, frekans etki alanı çözücü, eigen modu çözücü, asimptotik ve TLM çözücü gibi çeşitli çözücü mekanizmalarla donatılmıştır. Tüm bu çözücüler, belirli senaryolar için geçerli olan ilgili alanda benzersiz avantajlara sahiptir [179,185].

CSTS'nin geçici veya zaman etki alanı çözücüsü, yüksek frekanslı bir uygulama senaryosu için geniş bantın yanı sıra çok bantlı frekans özelliklerini simüle etme konusunda büyük bir avantaja sahiptir. Bu teknik, S parametrelerinin doğru modellenmesi için bir FIT yöntemini kullanır. Bu tür zaman alanı analizi oldukça kullanışlıdır, çünkü tüm sayısal yaklaşımlar Hızlı Fourier Dönüşümü aracılığıyla kolayca frekans alanına

dönüştürülür. CST Studio, S-parametrelerinin frekans etki alanı analizinden türetilen geçici etki alanı darbelerinin önceden hesaplanmasını mümkün kılmıştır [179, 185].

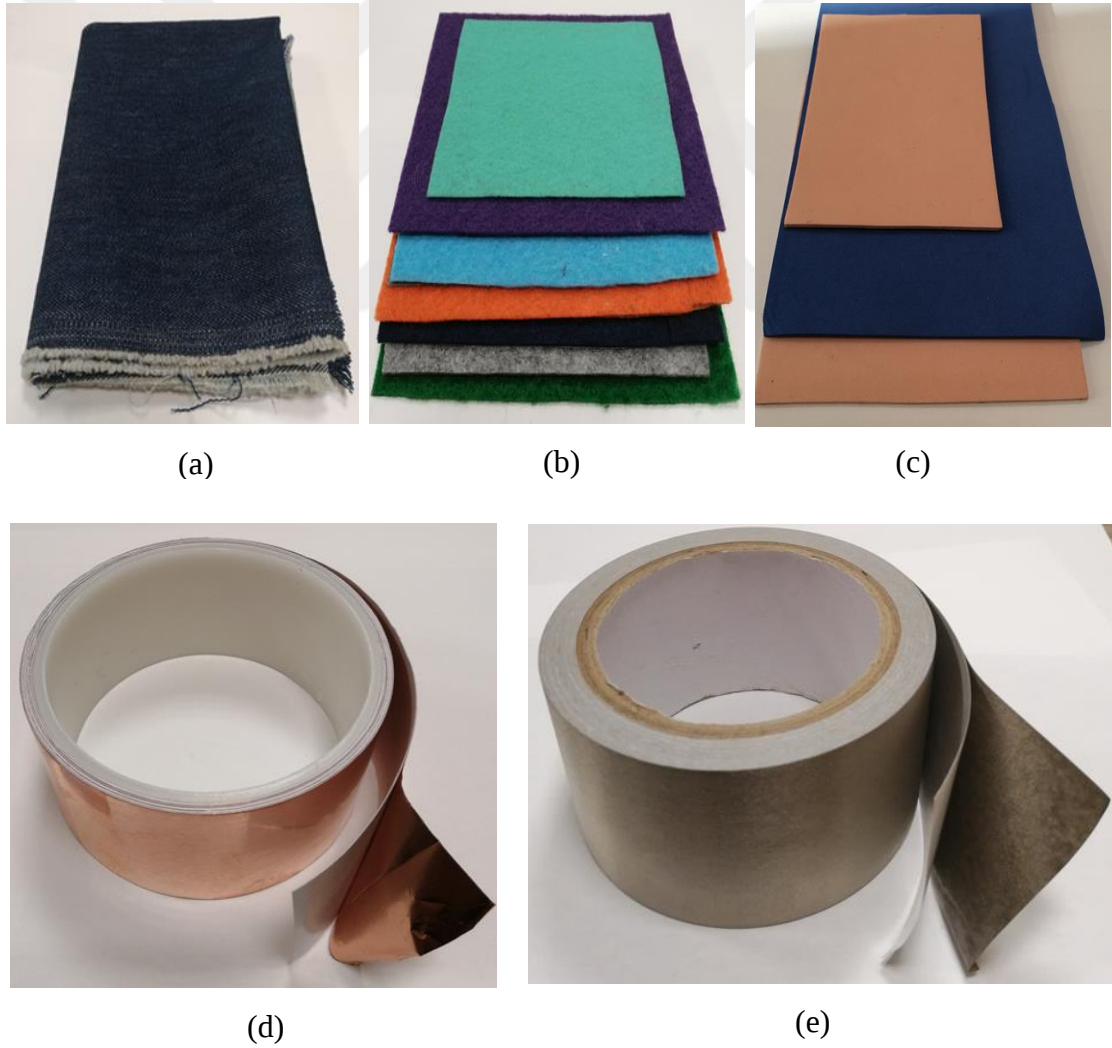
CST'nin frekans etki alanı çözücüsü, EM alanlarını daha iyi S-Parametreleri simülasyonu ile modellemede önemli bir öneme sahiptir. Bu çözücü, küçük yapıları simüle etmek için uygundur. Bu çözücüde sadece Kartezyen değil dörtyüzlü ağ oluşturma da kullanılabilir. İyi sonuçlar sağlamayan mevcut çeşitli frekans etki alanı çözücülerden farklı olarak bu çözücü, dört yüzlü ağ oluşturma şemaları kullanarak gerçek geometriyi benimser ve böylece frekans alanında doğru sonuçlar verebilir [179, 185]

Antenler, iletim hatları, bağlayıcılar, RF filtreleri ve konektörler gibi çeşitli RF ve Mikrodalga bileşenlerinin CST modellemesinde kolay ve hızlıdır [185]. CST simülasyon programı antenlerin simülasyonunda yaygın olarak kullanılan iyi bir çözücüdür ve oldukça gerçekçi bir yaklaşım sağlar. Ek olarak, bu ticari araç küçük boyutlu ve çok bantlı geniş bantlı antenlerde kullanılır [182]. CST de, antenin geri dönüş kaybı (S_{11} parametresi), gerilim duran dalga oranı, Smith abağı, ışıma örüntüsü, akım yoğunluğu gibi birçok hesaplamaları hızlı ve doğru bir şekilde yapılabilmektedir. Giyilebilir anten tasarımları, insan vücuduna monte edilecekleri dikkate alınarak yapılmalıdır. Bu insan vücudu etkileşimi, giyilebilir anten tasarımlarımız çok önemli bir rol oynar ve tasarımlarımızın sunulacağı sonraki bölümlere yansımaktadır. CST ile insan vücudunun bir iletişim sistemindeki etkisini ve herhangi bir iletişim sisteminin unsurlarının vücut üzerinde sağlık etkilerinin simülasyon ile analizi yapılabilir. Dolayısıyla tasarımları simüle ederken farklı yapıların, geometrilerin, tekniklerin bilgisi önemli hale gelir. CST yazılımı ile anten geometrisinin, antenin performansını ve vücut etkileşimi nasıl etkilediğini ve ayrıca hangi yöntemin belirli simülasyon için uygun olacağını anlamaya yardımcı olurlar. Simülasyon programı ile elde edilen anten özellikleri ve ışıma sonuçlarına göre gerekli görülen iyileştirmeler uygulama yapmadan simülasyonda tekrar ile kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

3.2. Materyal

Tez çalışmasında WBAN uygulamaları için MM'li giyilebilir anten tasarımında dielektrik taban malzemeleri olarak anten bant genişliği açısından önemli avantaj sağlayan düşük dielektrik sabiti değerine sahip taban malzemesi olan Rogers 5880 pcb,

kot ve keçe gibi tekstil dielektrik taban malzemeleri tercih edilmiştir. Tekstil dielektrik taban malzemeleri WBAN giyilebilir antenlerin tasarımında antenlerin giyilebilirliği için önemli bir gereksinim olan esneklik açısından önemli avantaj sağlar. Tasarlanan MM'li antenlerin iletken kısımları için bakır iletken bant ve tekstil iletken bantlar kullanılmıştır. Bakır iletken bant $5,88 \times 10^7$ S/m iletkenliğe ve 0,035 mm kalınlığa sahiptir. Tekstil iletken bant yaklaşık olarak yaklaşık olarak $1,18 \times 10^5$ S/m bir iletkenlikte 0,17 mm kalınlığında nikel-bakır-polyester bant kullanılmıştır. Ayrıca MM ve anten arasında ayırıcı parça olarak keçe veya düşük dielektrik özelliklere sahip olan EVA (etilen-vinil asetat) köpük malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.1'de giyilebilir antenlerin tasarımında kullanılan dielektrik taban malzemeleri ve iletkenler gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Giyilebilir antenlerin tasarımında kullanılan dielektrik ve iletken malzemeler: (a) kot kumaşı, (b) keçe, (c) EVA köpük, (d) iletken bakır bant, (e) iletken tekstil bant.

3.3. Üretim Yöntemi

Tez çalışmasında ilk önce CST programında tasarlanıp optimize edilen teze özgün WBAN antenleri, hassas bir şekilde üretmek için bakır, gümüş ve altın gibi parlak malzemelerin işlemeciliğinde kullanılan lazer kesim cihazı tercih edilmiştir. Tasarlanan antenlerin ve MM yapıların CST programı modelleri, bu programının sunduğu 2B ve 3B CAD dışa aktarım ara yüzü kullanılarak lazer kesim cihazı programına aktarılmış ve lazer kesim cihazıyla hassas bir şekilde kesim yapılarak üretilmiştir. Üretilen anten yapılarına SMA port lehimlenerek S_{11} yansıma katsayısı parametreleri ölçülmüş ve ölçüm sonuçları iyi çıkmayan anten yapıları simülasyon programında ölçüm sonuçları dikkate alınarak yeniden optimize edilip, yeniden üretilmiştir.

4. BÖLÜM

BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamındaki çalışmaların özgün değerini ortaya çıkarmak ve tasarımlarda kullanılacak CST yazılım programının port ve sınır koşulları vb. ayarlarını doğrulamak için yapılan literatür çalışmalarının incelemesi verilmiştir. Daha sonra tez çalışması kapsamında tasarlanan özgün anten yapılarının nümerik ve deneysel sonuçlarının analizi verilmiştir.

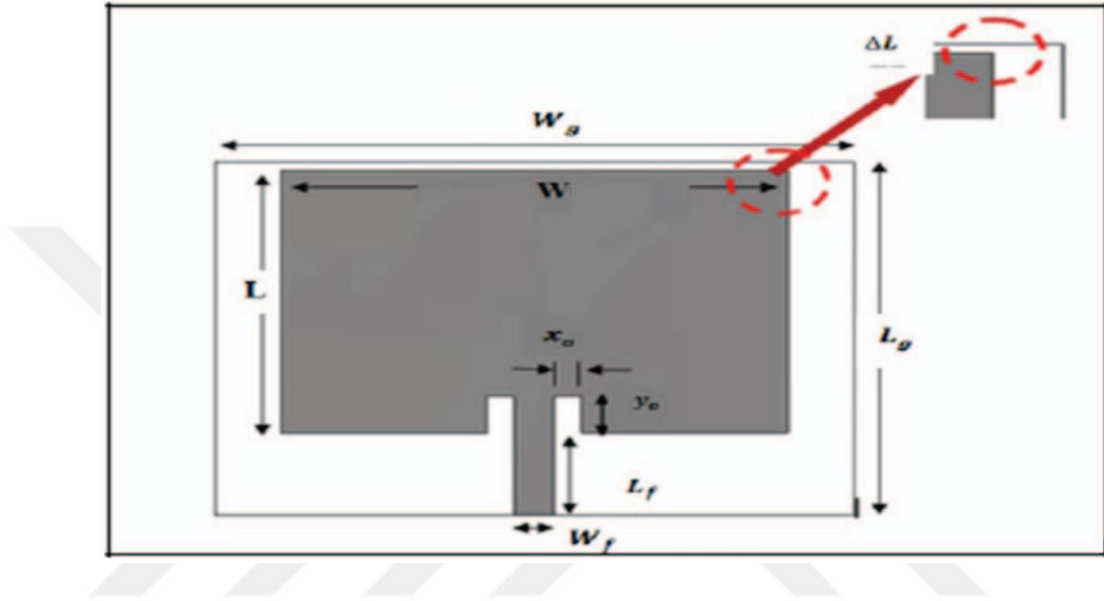
4.1. Literatürdeki Çalışmaların İncelemeleri

Tez özgün antenlerin tasarımı için CST simülasyon programı kullanılacağı için ilk önce literatürdeki çalışmalar yeniden CST simülasyon programında literatürdeki yapıya uygun olarak tasarlanıp, analizi yapılmıştır. Çünkü literatürdeki tasarımların yeniden simülasyonları ile CST simülasyon programının kullanımı ve literatürdeki farklı geometri ve bileşimlerdeki mikroşerit yama anten yapılarının tasarımı nasıl etkilediğini ve ayrıca hangi yöntemin belirli simülasyon için uygun olacağını anlamaya yardımcı olması amaçlanmıştır. Literatürdeki farklı geometri ve bileşimlerdeki mikroşerit yama anten yapılarının yansıma katsayısı, çalışma frekans bantları, ışıma örüntüleri, kazanç, antenin bükülme performansı gibi parametreleri yeniden analiz edilip literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

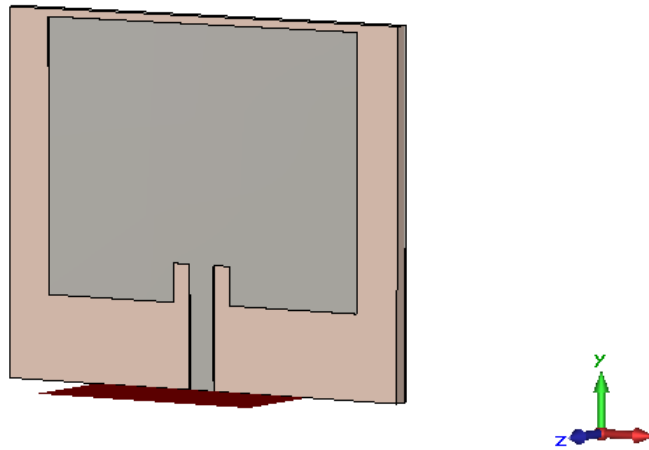
4.1.1. Literatür İncelemesi 1

İlk olarak incelenecek literatür çalışması, tasarımının basit olmasından dolayı Cárcamo vd. [186] tarafından 2015 yılında FR-4 ($\epsilon_r=4,7$, $\tan\delta=0,019$) taban malzemesi üzerine yapılmış tek dar bantlı dikdörtgen mikroşerit anten çalışması seçilmiştir. Çalışmada WBAN'a uygulanan MICS ve ISM frekans bantları için mikroşerit yama antenin karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Anten iletken kısımları için $t_{cu}=0,035$ mm bakır seçilmiştir. Literatürdeki çalışmanın 2,36 GHz MISC, 2,4 GHz ve 5,7 GHz ISM

bantları ele alınmıştır [186]. Literatürdeki anten 3 farklı frekans bölgesi için geometrik yapısı aynıdır ve önerilen antenin geometrisi Şekil 4.1’de [186] gösterilmiştir. Şekil 4.2’de CST yazılımında yeniden analiz için modellendiğindeki yapısı gösterilmiştir. Antenin 3 farklı çalışma frekans bölgesi için literatürdeki geometrik boyutları mm cinsinden Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Cárcamo vd. tarafından önerilen dikdörtgen mikroşerit yama anten geometrisi.

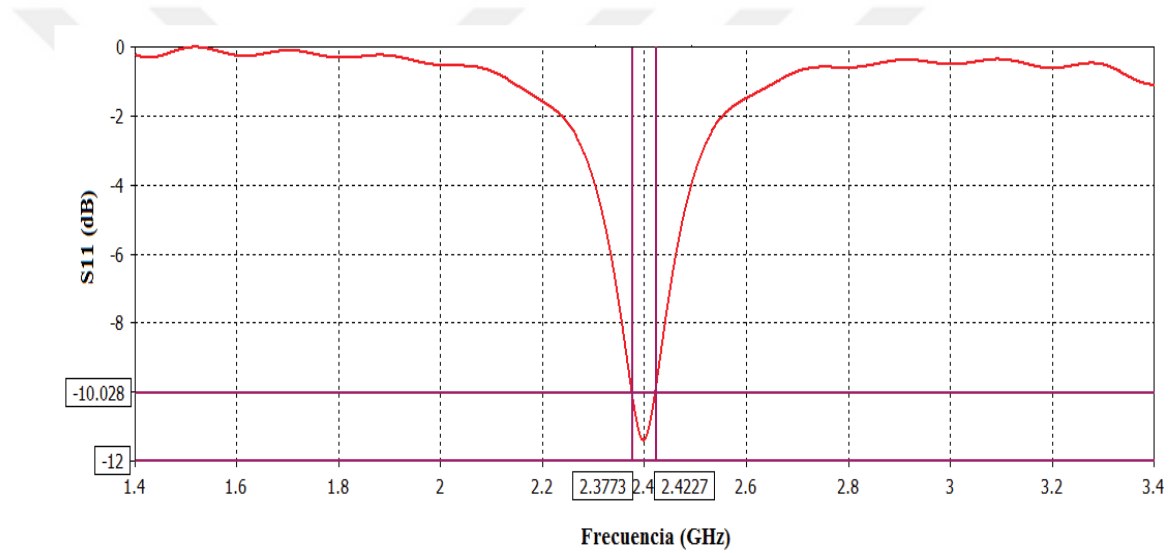


Şekil 4.2. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin CST ortamında yeniden tasarımı ve analizi yapılan geometrisi.

Tablo 4.1. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 3 farklı rezonans frekansı için mm cinsinden boyutları.

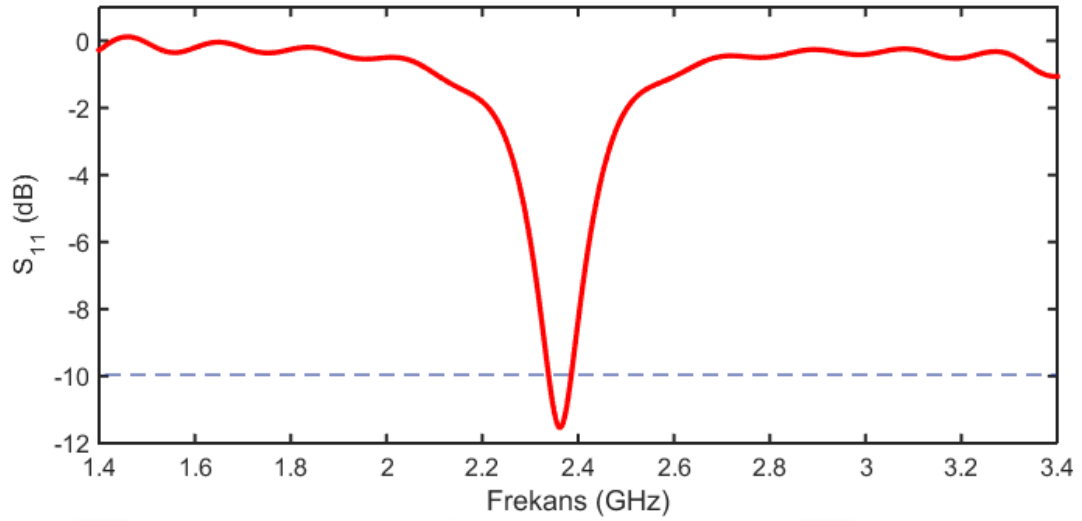
No	Frekans	h	L	W	L_g	W_g	L_f	x_o	y_o	W_f	t_{cu}
Anten 1	2,36 GHz	1,6	29	37,6	38,6	47,2	8,9	2	4	2,88	0,035
Anten 2	2,4 GHz	1,6	28,4	37,02	38	46,6	8,8	2	4	2,88	0,035
Anten 3	5,7 GHz	1,6	12	16	21,2	25,2	8,5	2	4	2,88	0,035

Anten 1 geometrisi için 2,36 GHz MISC frekans bandında literatür çalışmasının yansıma katsayısı (S_{11}) parametresinin frekansa bağlı değişimi grafiği Şekil 4.3'te [186] gösterilmiştir.



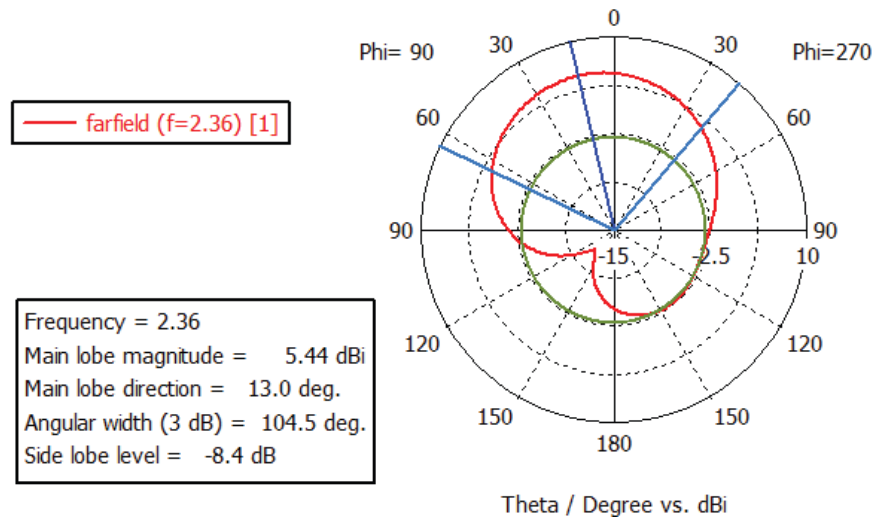
Şekil 4.3. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,36 GHz için Simülasyon S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

Burada incelemesi yapılan literatürdeki yapının boyutlarına uygun CST simülasyon çalışmasının yansıma katsayısı S_{11} sonucu ise Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Şekil 4.3, literatürdeki simülasyon sonucu ve Şekil 4.4, CST çalışmasındaki simülasyon sonucunun iyi bir uyum içerisinde olduğu ve her iki çalışmada da antenin rezonans frekansının 2,36 GHz olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca her sonuçta da antenin maksimum rezonansı -12 dB değerinin altındadır.

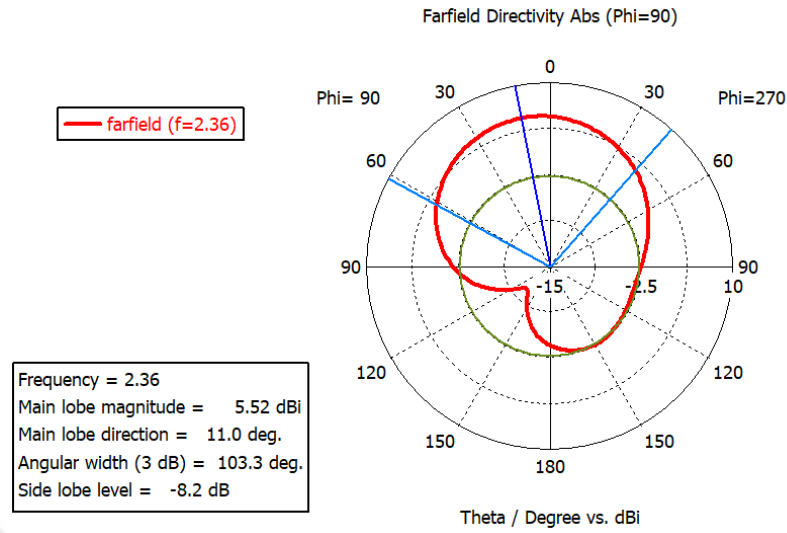


Şekil 4.4. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2.36 GHz için CST Simülasyonu S_{11} parametresinin frekansla değişimi doğrulaması.

Antenin 2,36 GHz MISC frekans bandında literatürdeki simülasyonu ışıma örüntüsü grafiği Şekil 4.5'te [186] ve CST simülasyon çalışmasındaki ışıma örüntüsü doğrulaması grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Sonuçlardan antenin 2,36 GHz için literatürdeki ve CST çalışmasındaki tasarımın ışıma yönlülüğünün iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Her iki simülasyonda da antenin yönlülüğü yaklaşık 5 dBi'dir.

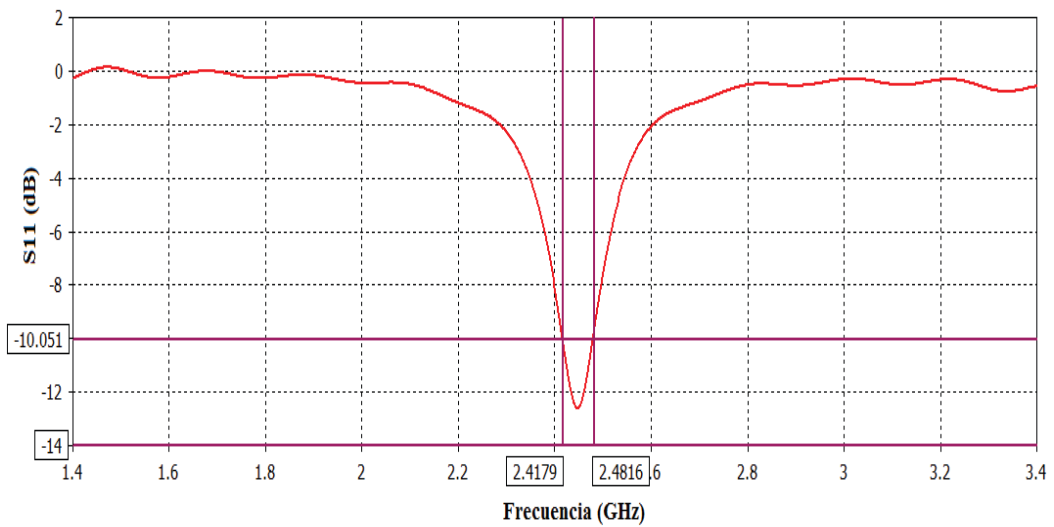


Şekil 4.5. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,36 GHz için simülasyon ışıma örüntüsü.

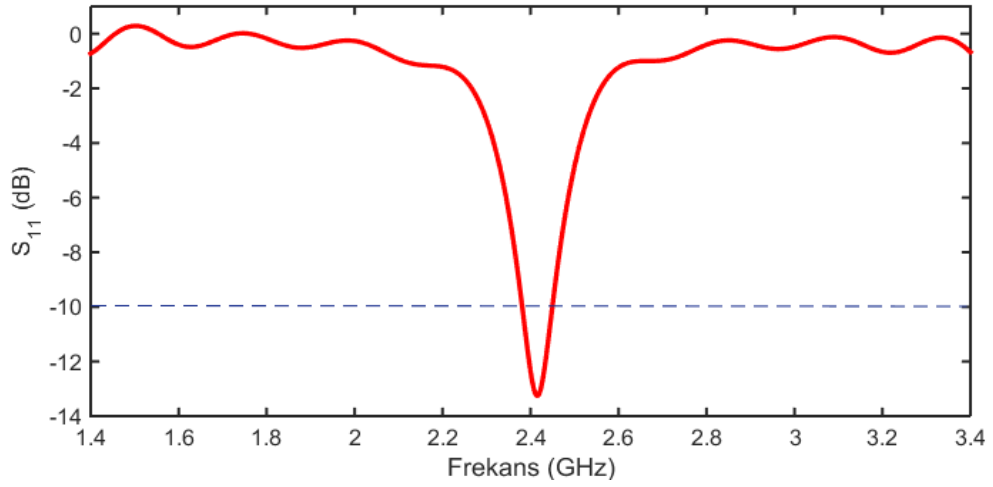


Şekil 4.6. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,36 GHz için CST simülasyonu ışıma örüntüsü doğrulaması.

Literatürde çalışılan geometrinin 2,4 GHz ISM frekans bandı boyutları (anten 2) için yansıma katsayısı S_{11} parametresinin frekansa bağlı değişim grafiği Şekil 4.7’de [186] gösterilmiştir. CST simülasyonu doğrulamasında bulunan S_{11} yansıma katsayısı sonuçları ise Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Literatürdeki simülasyon sonucunun ve CST çalışmasındaki simülasyon sonucunun iyi bir uyum içerisinde olduğu ve antenin rezonans frekansının 2,4 GHz ISM bandında olduğu gözlemlenmiştir

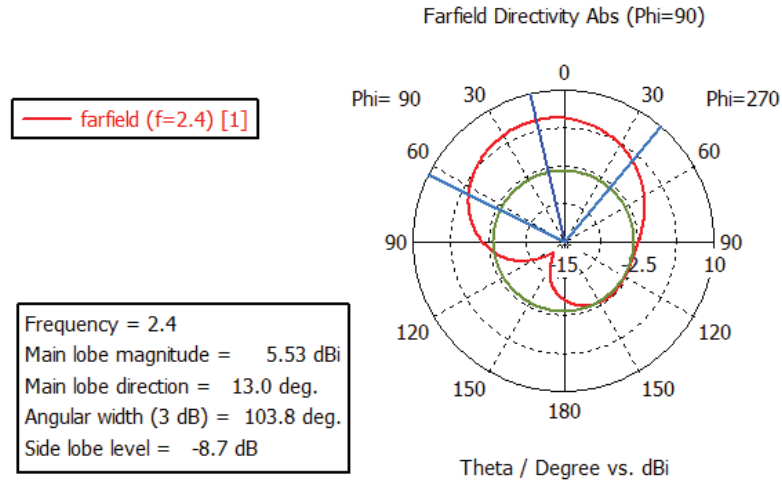


Şekil 4.7. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2.4 GHz için S_{11} parametresinin frekansla değişimi.



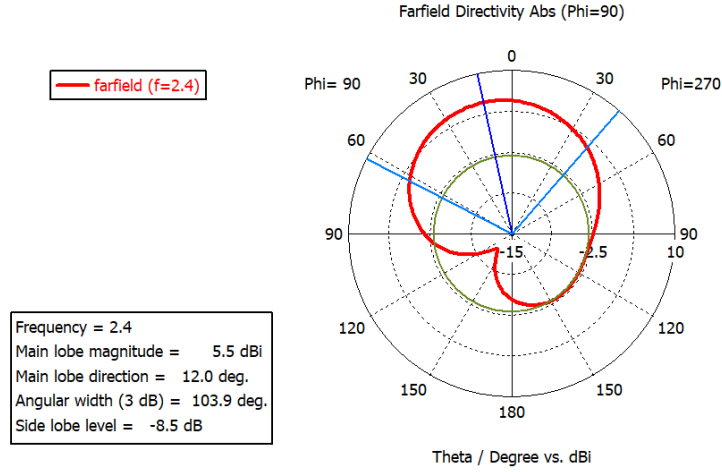
Şekil 4.8. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin CST Simülasyonu 2,4 GHz için S_{11} parametresinin frekansla değişimi doğrulaması.

Antenin 2,4 GHz ISM frekans bandında literatürdeki simülasyon ışıma örüntüsü grafiği Şekil 4.9’da [186] gösterilmiştir.



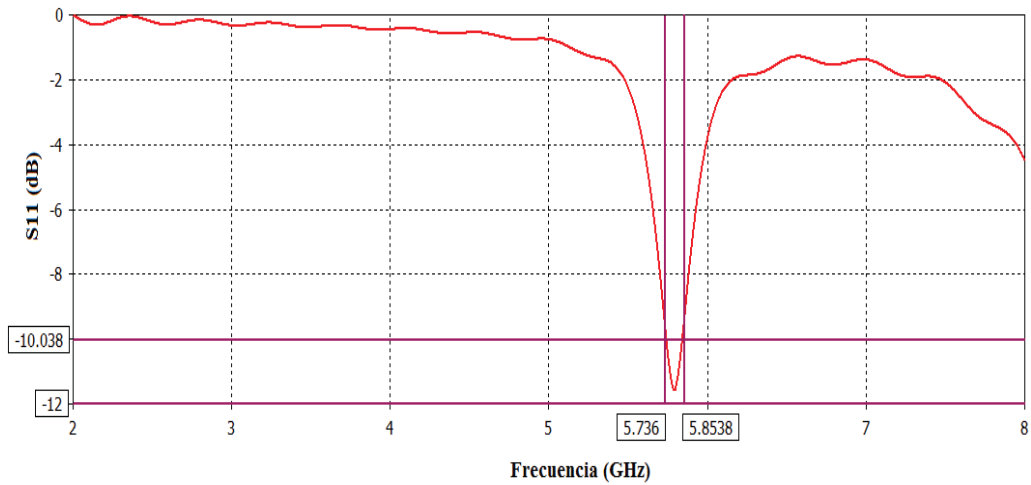
Şekil 4.9. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,4 GHz için ışıma örüntüsü.

Antenin 2,4 GHz ISM frekans bandı için CST simülasyon doğrulaması ışıma örüntüleri ise Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Bu sonuçlardan antenin 2,4 GHz için literatürdeki çalışmasındaki ve CST doğrulama çalışmasındaki ışıma örüntülerinin iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Her iki simülasyon sonucunda antenin yönlülüğünün yaklaşık 5,5 dBi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca her iki sonuçta da antenin maksimum rezonansı -13 dB değerine yakındır.

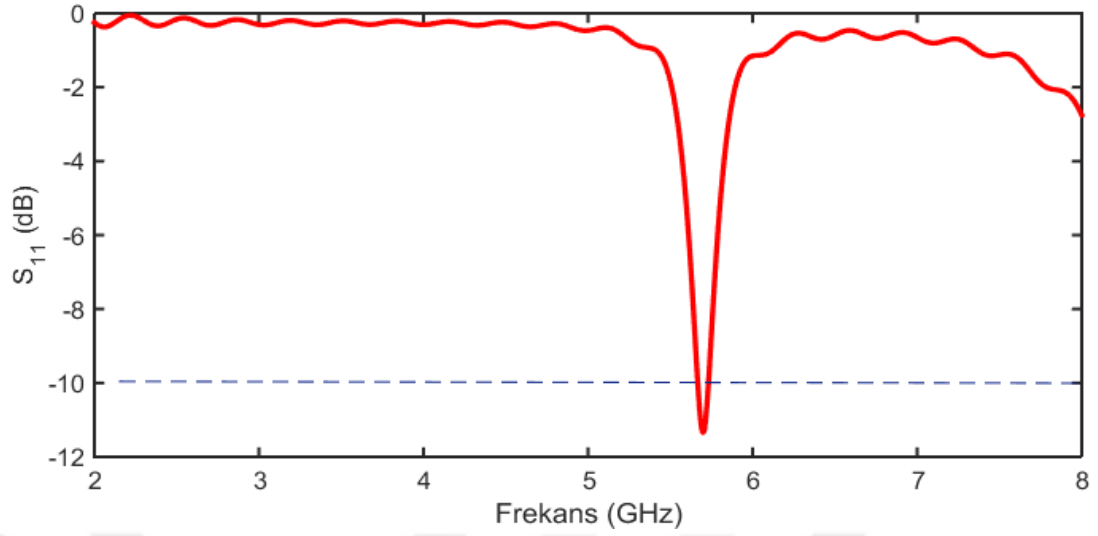


Şekil 4.10. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 2,4 GHz için CST simülasyonu ışıma örüntüsü doğrulaması.

Anten geometrisinin literatürde bir sonraki 5,7 GHz ISM frekans bandı boyutları (anten 3) için yansımaya katsayısı S_{11} parametresinin frekansa bağlı değişimi grafiği Şekil 4.11’de [186] gösterilmiştir. Literatürdeki yapının CST simülasyonu doğrulamasında bulunan yansımaya katsayısı S_{11} sonuçları ise Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Literatürdeki simülasyon sonucunun ve CST doğrulamasındaki simülasyon sonucunun iyi bir uyum içerisinde olduğu ve antenin rezonans frekansının 5,7 GHz bandında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca her sonuçta da antenin maksimum rezonansı -12 dB değerine yakındır.

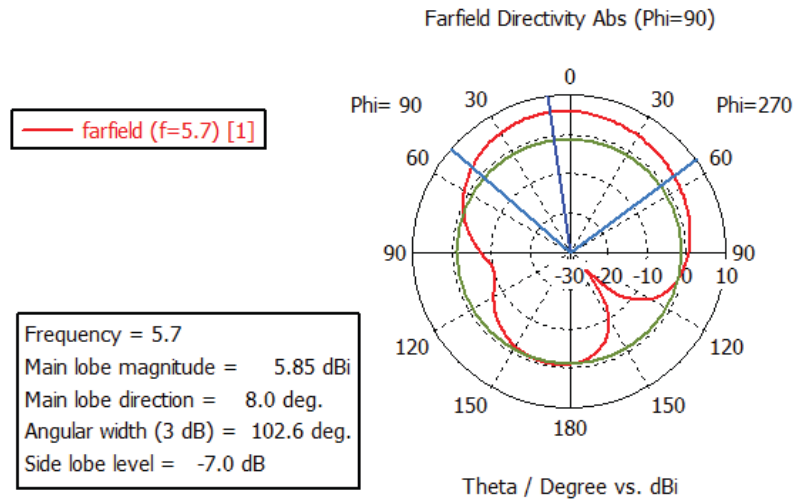


Şekil 4.11. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 5,7 GHz için S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

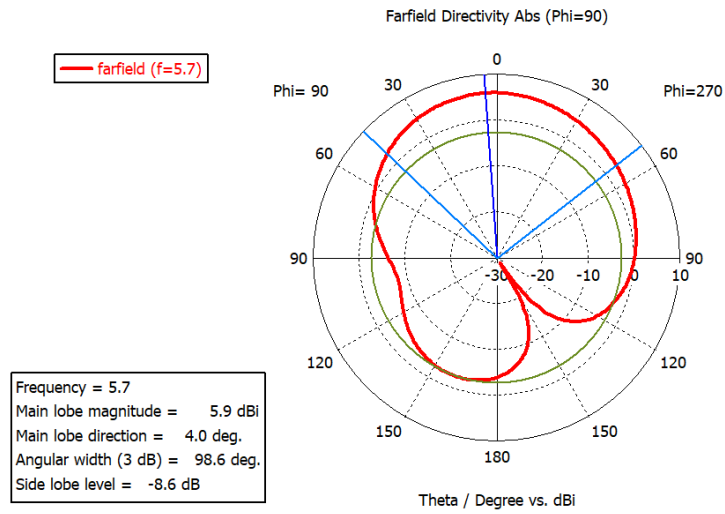


Şekil 4.12. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 5,7 GHz için CST Simülasyonu S_{11} parametresinin frekansla değişimi doğrulaması.

Antenin 5,7 GHz ISM frekans bandında literatürdeki simülasyon ışıma deseni grafiği Şekil 4.13'te [186] ve CST simülasyon çalışmasındaki doğrulaması Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Sonuçlardan antenin 5,7 GHz için literatürdeki ve CST çalışmasındaki tasarımın ışıma yönlülüğünün iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Her iki simülasyonda da antenin yönlülüğünün yaklaşık 5,9 dBi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 5,7 GHz için ışıma örüntüsü.



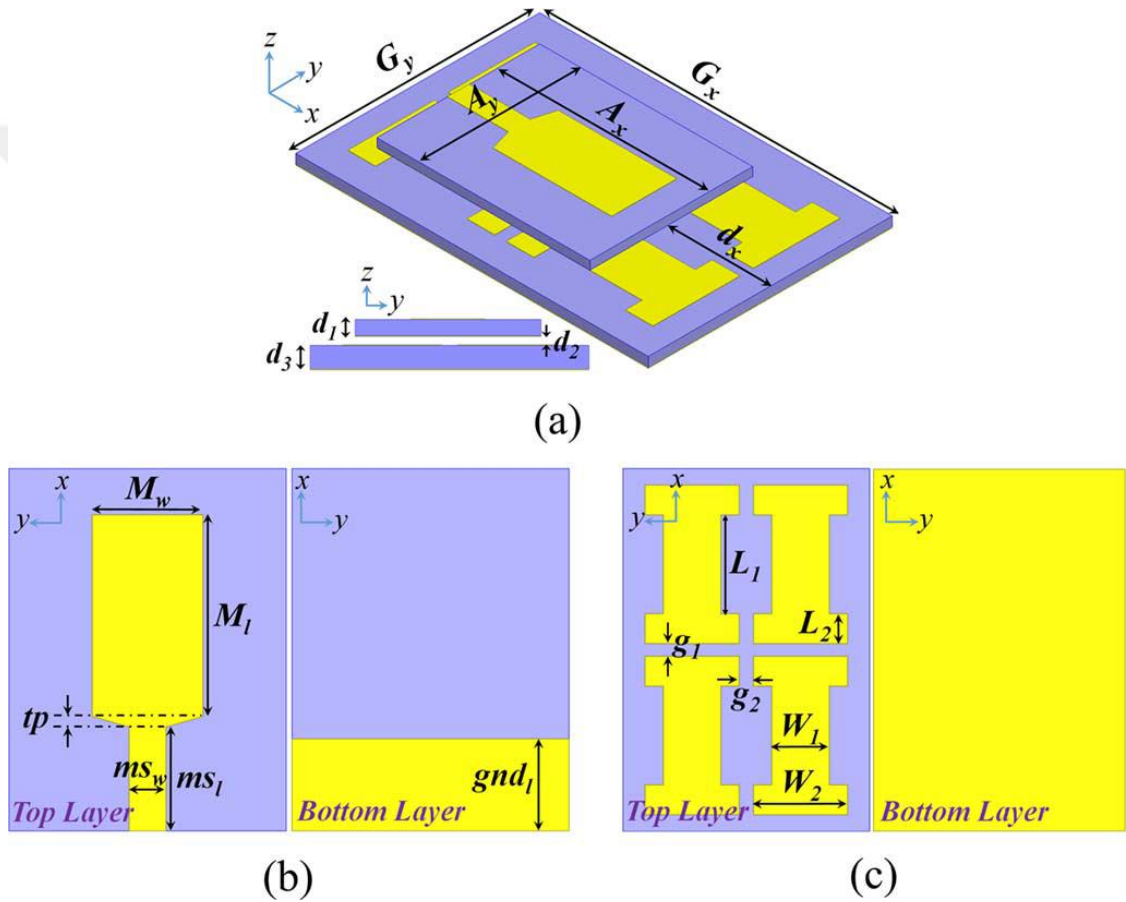
Şekil 4.14. Cárcamo vd. tarafından önerilen antenin 5,7 GHz için CST simülasyonu Işıma örüntüsü doğrulaması.

Bu sonuçlardan görüldüğü gibi literatürde 2,36 GHz, 2,4 GHz ve 5,7 GHz frekansı bantlarında çalışması için farklı boyutlarda FR-4 sert dielektrik tabanlı dikdörtgen bir mikroşerit yama WBAN anteni tasarım ve analizleri CST simülasyonu ortamında başarılı bir şekilde yapılmıştır. Antenin literatür çalışması ve CST doğrulaması yansıma katsayısı ve ışıma deseni sonuçlarının birbirleriyle iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu analiz sonucunda antenin boyutları küçüldükçe rezonans frekansının üst frekans bölgesine kaydığı görülmektedir. FR-4 gibi sert taban malzemeleri WBAN uygulamalarında ısı ve neme karşı avantaj sağlarken esnek olmayan yapısı nedeniyle giyilebilir uygulamalar için çok tercih edilmezler.

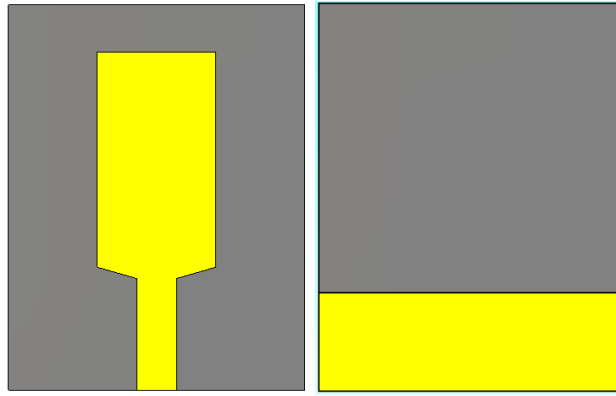
4.1.2. Literatür İncelemesi 2

Bu çalışmada, literatürdeki Jiang vd. [116] tarafından 2014 yılında önerilen giyilebilir tıbbi BAN cihazları için kompakt, düşük kalınlıkta metayüzeyli (metamalzemeli) anten ele alınıp CST simülasyon programında analiz edilmiş ve doğrulanmıştır. Çalışmada 2,36-2,4 GHz medikal BAN bandında çalışan kompakt ve uyumlu bir giyilebilir anten önerilmiştir. MM'li antenin HFSS programındaki optimize edilmiş düzlemsel konfigürasyonu Şekil 4.15'te [116] verilmiştir. CST doğrulaması Şekil 4.16'da gösterilmektedir. MM'li anten tasarımında esnek taban malzemesi olarak Rogers RO3003 ($\epsilon_r=3$, $\tan\delta=0,0013$) kullanılmıştır. Anten, düzlemsel bir monopolün altına yalnızca ikiye

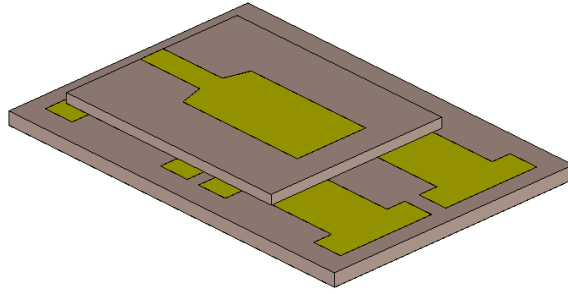
iki I-şekilli eleman dizisinden oluşan bir meta yüzey yerleştirilerek etkinleştirilmiştir. İnce bir köpük ayırıcı ile ayrılmış iki bileşenden oluşur. Üstte düzlemsel monopol anten ve altta özel olarak tasarlanmış izotropik olamayan bir metalik arkalıklı MM vardır. Monopol anten, verimli bir uyarma için I şeklindeki elemanların uzun eksenine paralel olarak yönlendirilmiştir. Burada MM yalnızca izolasyon için bir toprak düzlemi olarak değil, aynı zamanda ana ışıma oluşturmada da işlev görür. Önerilen antenin MM ile birlikte geometrik boyutları mm cinsinden Tablo 1’de verilmiştir [116].



Şekil 4.15. Jiang vd. tarafından önerilen: (a) Entegre düzlemsel antenin konfigürasyonu, (b) Monopol anten katmanının üstten ve alttan görünüşleri, (c) Metalik arkalıklı MM katmanının üst ve alt görünüşleri.



(a)



(b)

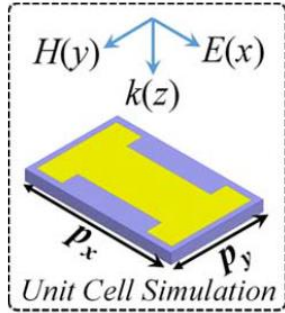
Şekil 4.16. Jiang vd. tarafından önerilen yapının CST simülasyonu doğrulamasının geometrisi: (a) Düzlemsel antenin konfigürasyonu, (b) Entegre anten.

Tablo 4.2. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).

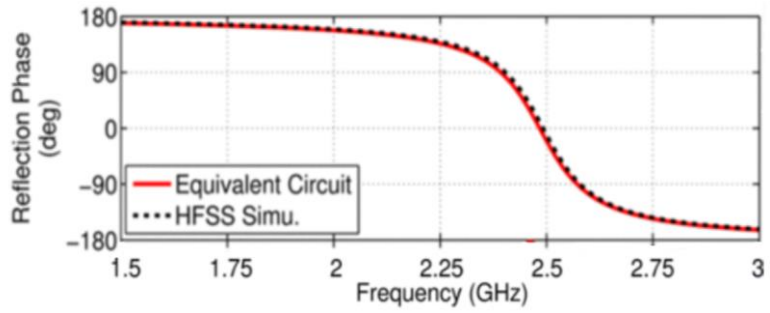
A_y	A_x	M_w	M_l	ms_l	ms_w	tp	gnd_l	d_1	d_x
30	39	12	21,8	11,3	4	1,15	10	1,5	18,2
G_y	G_x	W_1	W_2	L_1	L_2	g_1	g_2	d_2	d_3
62	42	9,75	16	16,86	5,1	2,15	2,49	0,5	2

Literatürde tasarım sürecinin ilk adımında, anizotropik MM'nin geometrik boyutları 2,5 GHz civarında sıfır yansıma fazı verecek şekilde tasarlanıp ayarlanmıştır. MM, normal gelişte bir düzlem dalgası ile aydınlatıldığında, x-yönünde elektrik alanı ile polarize edilmiş simülasyon modeli Şekil 4.17 (a)'da [116] verilmiştir. Şekil 4.17 (b)'de [116], literatürdeki yapının HFSS simülasyonunda, şekil 4.17 (c)'de CST similasyonu tasarımı için metal bir arka tabaka ile I-şekilli dizinin yansıtma fazını göstermektedir. Şekil 4.17 (b) ve şekil 4.17 (c)'deki her iki grafikten de görüldüğü gibi, AMC bandının 2,5 GHz

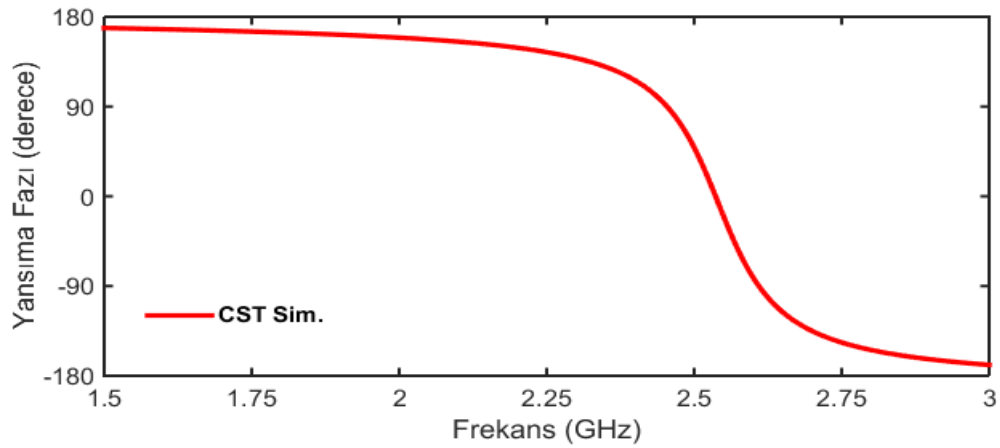
civarında sıfıra yakın bir yansıma fazı sergilemektedir. CST doğrulaması sonucu literatür çalışması ile benzeşmektedir.



(a)



(b)

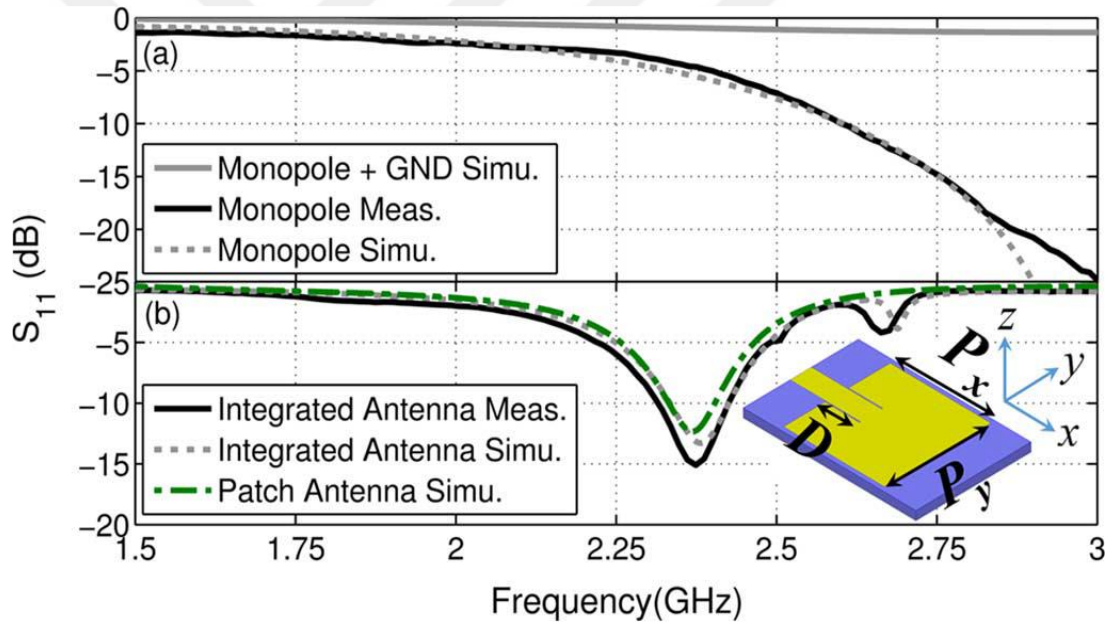


(a)

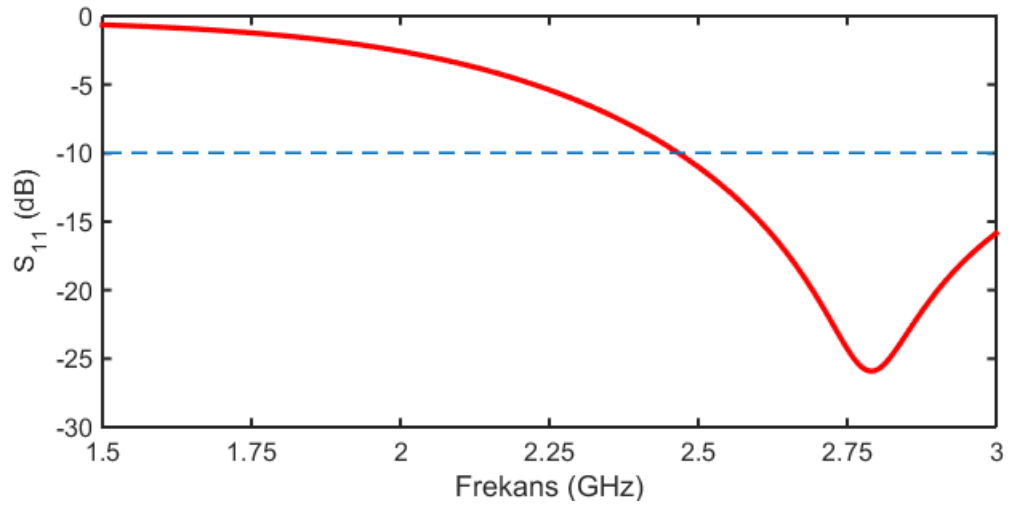
Şekil 4.17. Jiang vd. tarafından önerilen: (a) I-şekilli MM birim hücrenin düzlem dalga uyarımı altındaki konfigürasyonu, (b) I-şekilli MM elemanın yansıma fazı, (c) I-şekilli MM elemanın yansıma fazı CST simülasyonu doğrulaması.

Literatürdeki çalışmada MM tasarlandıktan sonra, geniş bantlı monopol anten eklenmiştir ve meta yüzeyin üstünde belirli bir d_2 mesafeye konumlandırılmıştır. Monopolun, anten ile MM arasındaki eşleşmeyi kontrol eden MM göre konumu ve monopolun geometrik boyutları, hedeflenen bantta optimum empedans eşleşmesi, yüksek kazanç ve yüksek FBR değeri elde etmek için ayarlanmıştır. Tek başına monopol antenin ve MM entegreli antenin serbest uzayda simüle edilmiş empedans performansları sırasıyla Şekil 4.18 (a) ve (b)'de [116] gösterilmektedir. Şekil 4.19 (a), tek başına monopol antenin ve Şekil 4.19 (b), MM entegre edilmiş antenin serbest uzayda CST de simüle edilmiş S_{11} doğrulama grafikleri verilmiştir. Literatürdeki ve CST doğrulaması similasyonları sonuçlarından

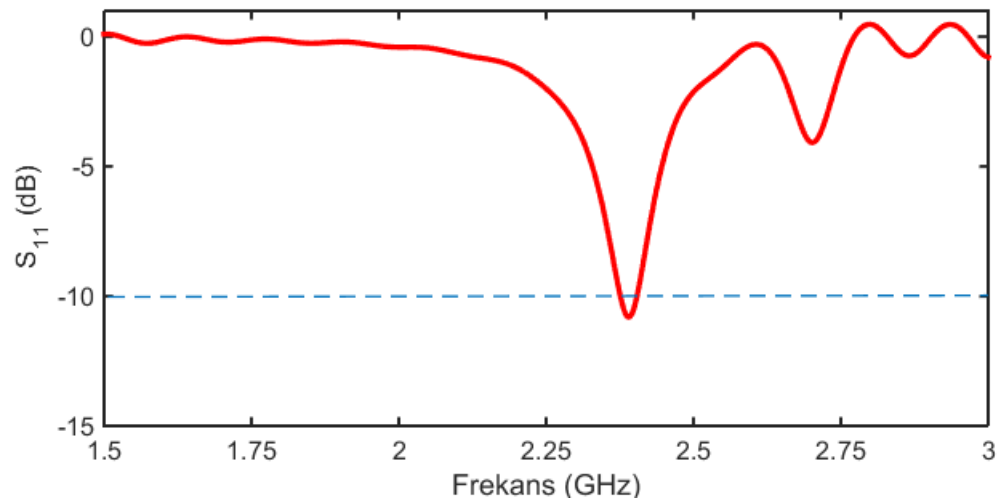
görüldüğü gibi da tek başına monopul anten, MBAN bandında zayıf bir empedans eşleşmesine sahiptir ve S_{11} parametresi değeri -6 dB'den daha yüksektir. Sadece bir metalik toprak düzleminin üzerinde 2.5 mm'lik bir mesafeye yerleştirilen tek kutup anten simüle edilmiş ve sonuç olarak tüm bant boyunca son derece zayıf bir empedans performansı göstermiştir. Buna karşılık, MM entegreli anten için, literatürdeki çalışmada da ve CST analizinde de iyi bir empedans uyumu elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmada S_{11} değeri 2.32 'den 2.43 GHz'e -10 dB'den daha düşük, yani yaklaşık %4,7 bant genişliğine sahiptir. MM entegre edilmiş antenin serbest uzayda CST de simüle edilmiş S_{11} grafiği literatür ile iyi bir benzeşim içinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, uygun şekilde tasarlanmış bir metalik levha destekli MM'nin minyatürleştirilmiş bir anten için empedans eşleşmesinde önemli bir iyileşmeye yol açabileceğini göstermiştir [116].



Şekil 4.18. Jiang vd. tarafından önerilen (a) Monopul antenin serbest uzayda tek başına simülasyonda hesaplanmış ve deneylerde ölçülmüş S_{11} 'i ve bir PEC yer düzlemi üzerinde monopul antenin simüle edilmiş S_{11} 'i. (b) MM entegreli antenin ve referans yama antenin, boş alan için simülasyonlarda hesaplanmış ve deneylerde ölçülmüş S_{11} 'i. (Yama anteni, entegre antenle aynı form faktörüne sahiptir. Yamanın boyutları $P_x = 35$ mm, $P_y = 37$ mm, $D = 12$ mm'dir.).



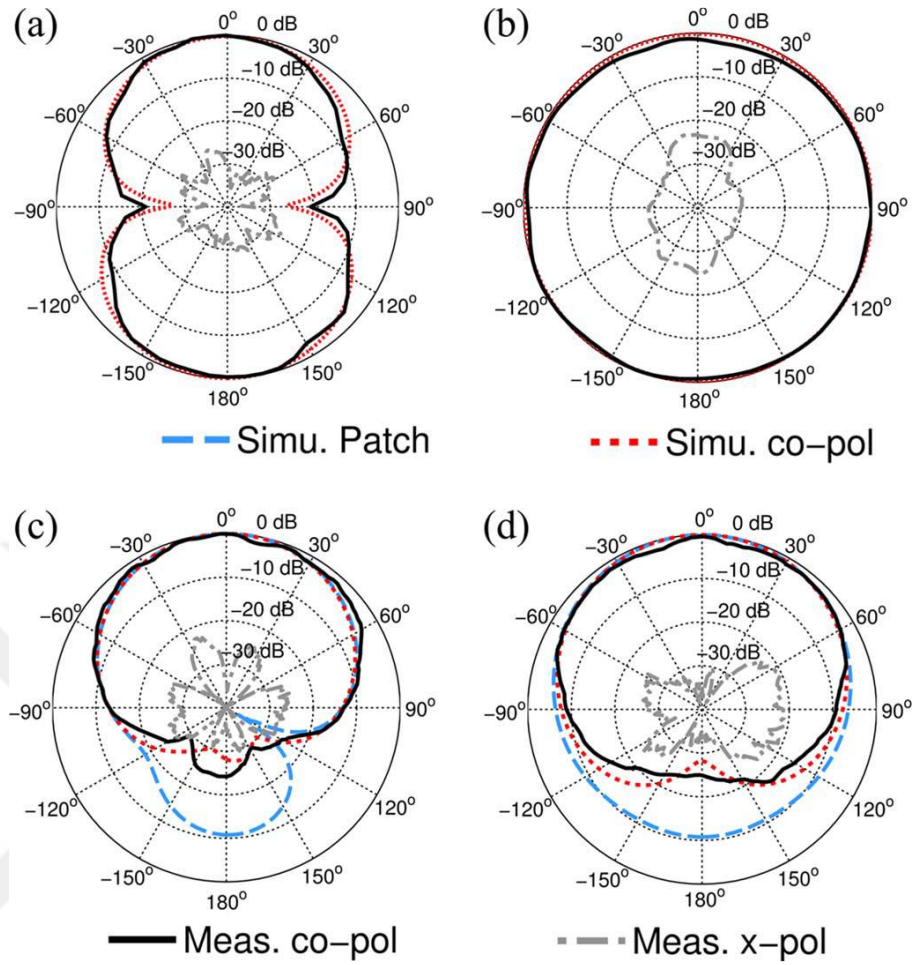
(a)



(b)

Şekil 4.19. (a) Tek başına monopol antenin serbest uzayda CST simülasyonunda hesaplanmış S_{11} – parametresinin frekansla değişimi doğrulaması, (b) MM entegreli antenin serbest uzayda CST simülasyonunda hesaplanmış S_{11} –parametresinin frekansla değişimi doğrulaması.

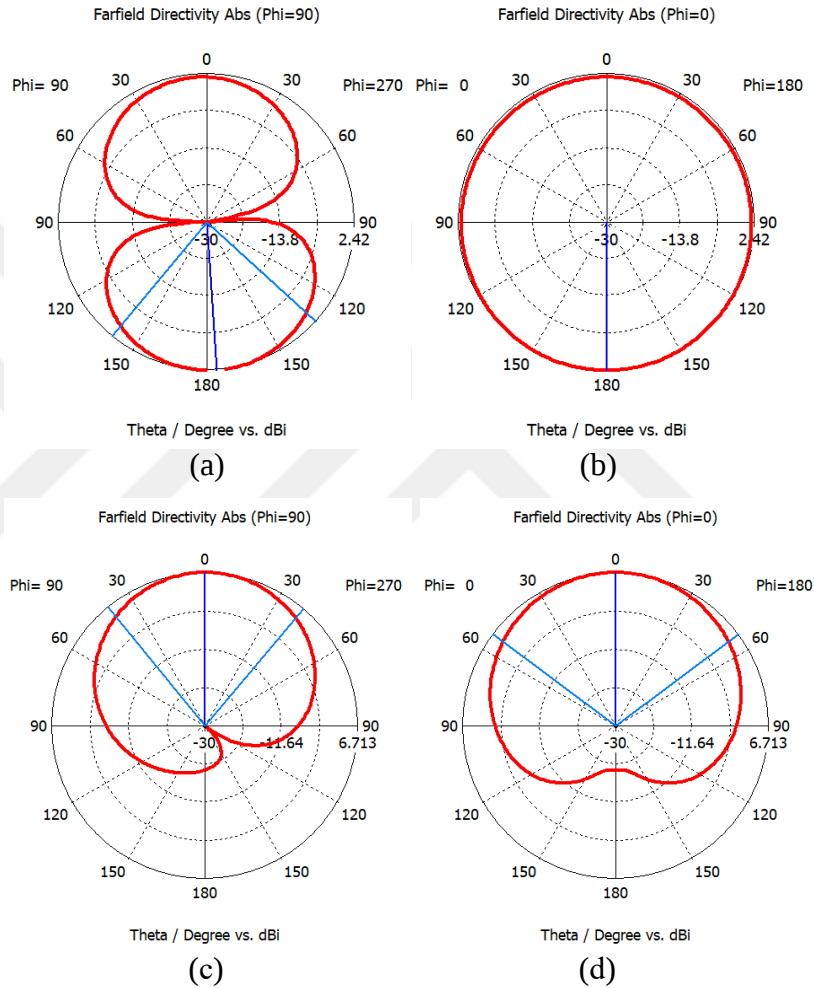
Şekil 4.20’de [116] literatürdeki monopol anten, MM entegreli anten ve referans antenlerinin, serbest uzay için 2,38 GHz’de simüle edilmiş ve ölçülmüş E- düzlemi ve H- düzlemi uzak alan ışıma örüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.20. Jiang vd. tarafından önerilen antenin simüle edilmiş ve ölçülmüş: (a) E-düzlem ve (b) H-düzlem normalize edilmiş 2,38 GHz'de tek başına monopol anten ışıma örüntüsü. (c) E-düzlemi ve (d) H- düzlemi için 2,38 GHz'de MM entegreli antenin ve referans yama antenin normalize edilmiş ışıma örüntüleri.

CST ile yeniden doğrulaması yapılan monopol antenin ve MM entegreli antenin serbest uzay için 2,38 GHz'de simüle edilmiş ve ölçülmüş E- düzlemi ve H-düzlemi uzak alan ışıma örüntüleri Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'deki sonuçlar iyi bir benzeşim içerisindedir. Şekil 4.20 (a) - (b) literatür ve Şekil 4.21 (a) - (b) CST sonuçlarından görüldüğü gibi serbest uzayda tek başına monopol, E-düzleminde dipol anten gibi bir ışıma örüntüsüne ve H-düzleminde çok yönlü bir ışıma örüntüsüne sahiptir. Buna karşılık, Şekil 4.20. (c) - (d) literatürdeki ve Şekil 4.21 (c) - (d)'de ki CST sonuçları, MM entegre antenin ışıma örüntülerini göstermektedir ve sonuçlardan MM entegre antenin ileri yönlülüğünün artmış olduğu görülmektedir. Yani MM entegre anten enerjisinin büyük bir kısmına + z yönünde sahiptir ve arka lob ışıması düşüktür. Ayrıca

Şekil 4.20 [116] literatürdeki ve Şekil 4.21 CST çalışmasındaki ışıma örüntüleri sonuçları iyi bir uyum içerisindedir. Önemsiz arka lob, insan vücuduna böyle bir anten yerleştirildiğinde dokuya çok az enerji yayılacağını gösterir. Bu özellik, SAR değerini en aza indirmeye yardımcı olur ve anteni, insan vücudunun etkilerine karşı daha sağlam hale getirir, her ikisi de giyilebilir uygulamalar için arzu edilen özelliklerdir.

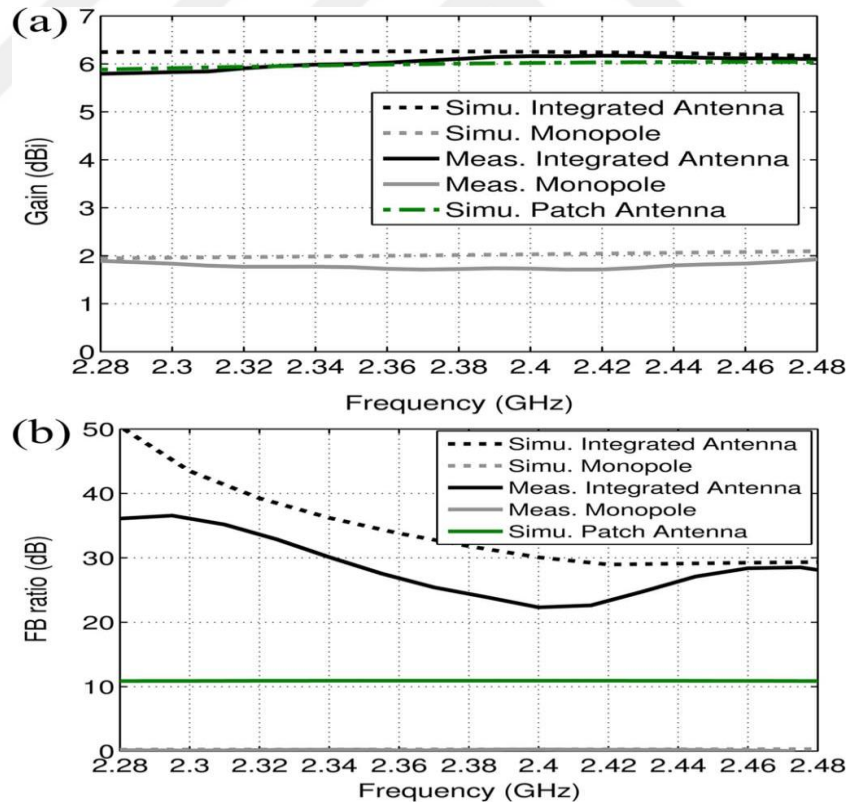


Şekil 4.21. Jiang vd. tarafından önerilen yapının simüle edilmiş CST doğrulaması: (a) E-düzlem ve (b) H-düzlem monopol antenin tek başına 2,38 GHz'de ışıma örüntüsü. (c) E-düzlemi ve (d) H-düzlemi için 2,38 GHz'de MM entegreli antenin ışıma örüntüsü.

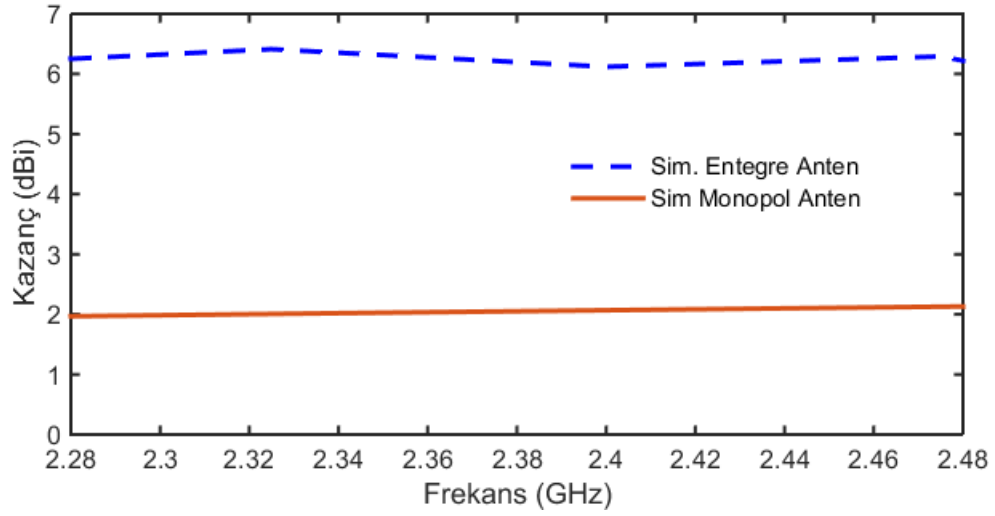
Tek başına monopol anten ve MM entegre anten için literatür ve CST çalışması kazanç ve FBR sonuçları sırasıyla Şekil 4.22 [116] ve Şekil 4.23'te sırayla gösterilmektedir. Şekil 4.22 (a)'da ki literatür ve Şekil 4.23 (a)'da ki CST sonuçlarında tek başına monopol anten yaklaşık 2 dBi'lik bir simülasyon kazancına sahipken, entegre anten, aşağıda gösterildiği gibi, çalışma frekans bandında yaklaşık 6,2 dBi'lik simüle edilmiş bir tepe kazancına

sahiptir. Tek başına anten kazancı ve entegre anten kazancı için literatür ve CST sonuçları iyi bir uyum içindedir ve anten kazancı MM yapı entegre edilmesiyle artış göstermiştir.

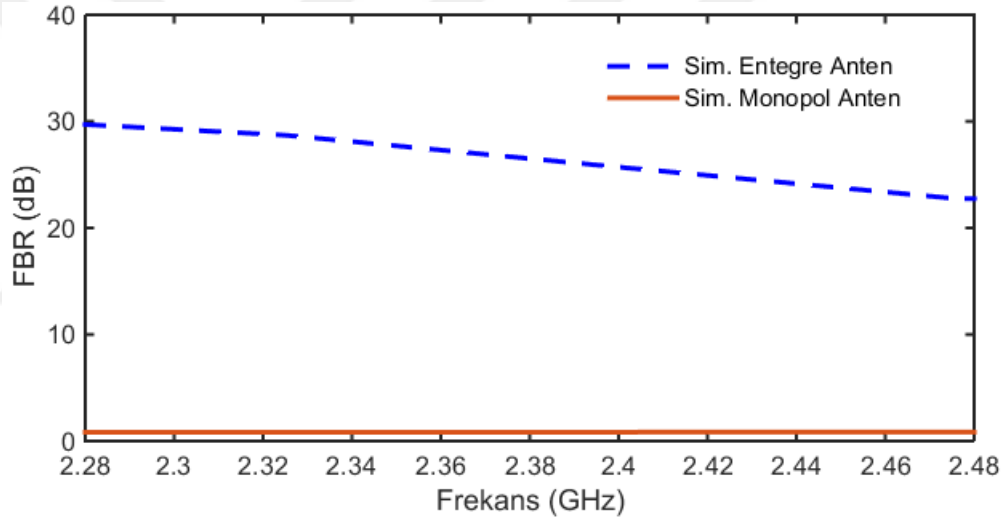
Tek başına monopol antenin ve MM entegreli antenin Şekil 4.22 (b)'de [116] literatür ve Şekil 4.23 (b)'de CST doğrulaması FBR sonuçları verilmiştir. Literatür ve CST doğrulaması simülasyon sonuçlarının her ikisinde de monopol antenin tek başına yaklaşık 1 dB'lik çok düşük bir FBR değerine sahiptir. MM entegre anten ise, ilgili frekans bandında, literatür için 29 dB'den daha büyük bir simülasyon, yaklaşık 23 dB'den daha büyük ölçüm sonucuna sahipken ve CST doğrulamasında da yaklaşık 23 dB'den daha büyük FBR değerine sahiptir. Monopol antene MM entegre edilmesiyle FBR'si literatürde ve yeniden CST simülasyonunda artmıştır. Literatür ve CST simülasyonlarının FBR sonuçları arasında kısmi farklılıklar olmasına rağmen, literatürdeki ölçüm sonuçları ile CST simülasyon sonuçları birbirine daha yakın değerlerdedir. Bu farklılıklar simülasyon programlarının farklılığından kaynaklandığı düşünülmüştür.



Şekil 4.22. Jiang vd. tarafından önerilen: (a) Tek başına monopol ve entegre antenin simülasyonda hesaplanmış ve deneylerse ölçülmüş tepe kazancı, (b) Monopol anten, metamalzeme entegreli anten ve referans yama antenin simülasyonlarda hesaplanmış ve deneylerde ölçülmüş FBR'si.



(a)



(b)

Şekil 4.23. Jiang vd. tarafından önerilen yapının CST simülasyonlarda hesaplanmış doğrulaması: (a) Tek başına monopul ve entegre antenin tepe kazancı, (b) Monopul antenin ve metamalzeme entegreli antenin FBR'si.

FBR ve SAR, antenin farklı parametreleri olsada, belirli bir dereceye kadar birbirleriyle ilişkili oldukları unutulmamalıdır, çünkü antenin SAR değeri ve geri radyasyonunun her ikisi de toprak düzleminin kenarlarındaki kırınım dalgalarının sonucu olduğundan, belirli bir dereceye kadar birbirleriyle ilişkilidirler [116]

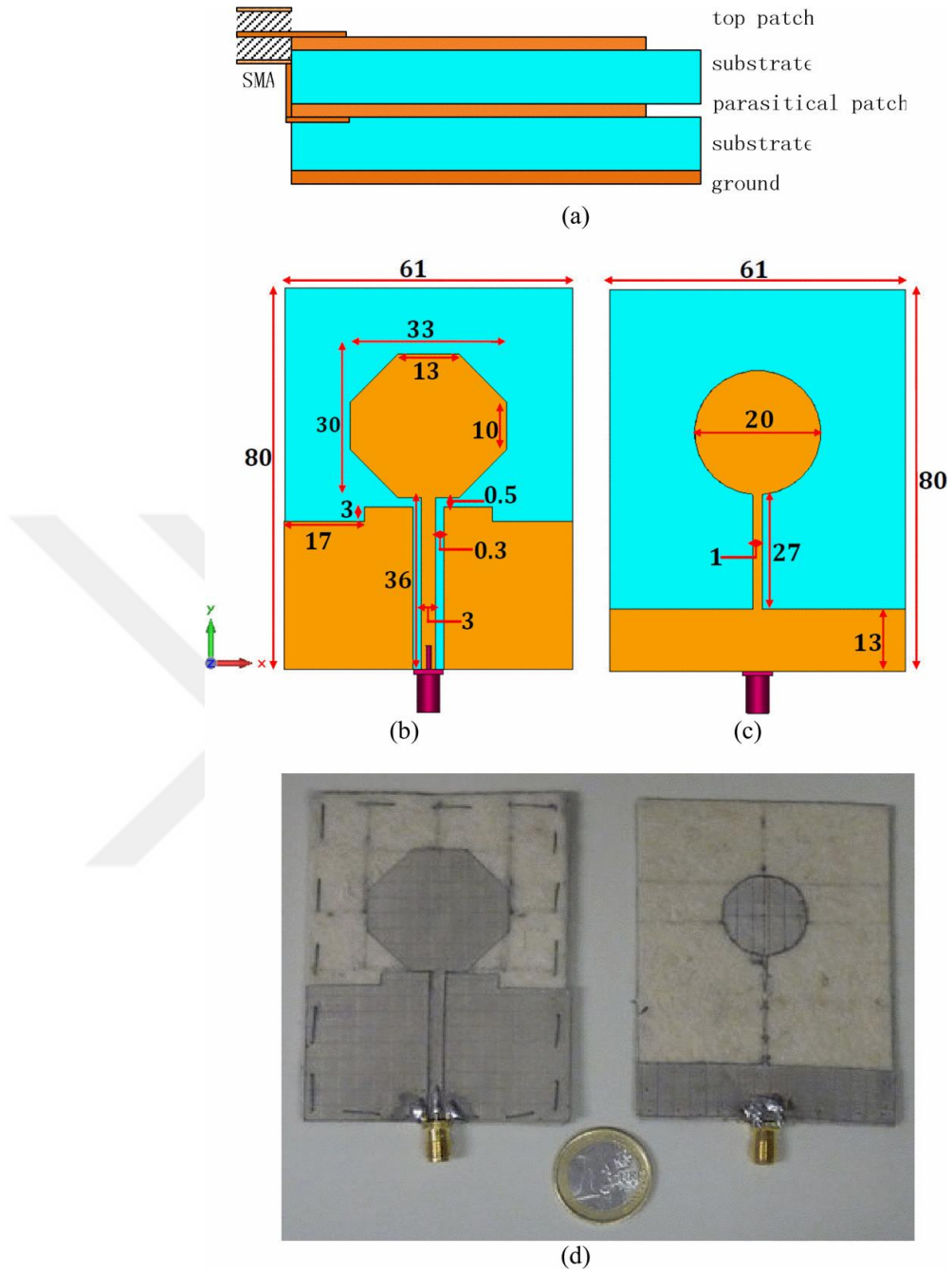
Bu çalışmada; literatürde giyilebilir uygulamalar için farklı konfigürasyonlar altında önerilmiş esnek MM entegreli kompakt anten, CST programında yeniden analiz

edilmiştir. Antenin literatür çalışmasındaki sonuçları, CST simülasyonları ile başarılı şekilde analiz edilip doğrulanmıştır. Literatürde olduğu gibi antene MM entegre edilmesiyle iyi bir empedans uyumu ve iyi bir ışıma karakteristiği elde edilmiş ve MM entegre antenin yönlülüğü, tepe kazancı ve FBR değeri artmıştır. AMC toprak düzlemleri ile entegre edilmiş daha önce gösterilen antenlerin aksine, önerilen antene entegre edilen MM, izolasyon sağlamanın yanı sıra antenin ışımasında asıl etkin işleve sahip olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen antenin bu kanıtlanmış özellikleri, onu tıbbi algılama ve izleme ve diğer uygulamalar için olası giyilebilir cihazlar için ideal bir aday haline getirmektedir [116].

4.1.3. Literatür İncelemesi 3

Bu çalışmada, literatürdeki Yan vd. [107] tarafından 2016 yılında önerilen tam toprak düzlemine sahip besleme konektörü haricinde tamamen tekstil malzemeleri ile imal edilen giyilebilir UWB tekstil antenin vücut üstü performansı CST programında yeniden doğrulanıp analiz edilmiştir. Çok katmanlı bir yapı uygulayarak, antenin düşük kalınlığı korunurken UWB bandının tamamında iyi bir empedans eşlemesi elde edilmiştir. Antenin performansı, yamanın altına yerleştirilen tam toprak düzleminin ekranlaması nedeniyle insan vücudu üzerine giyildiğinde etkilenmez. Bunun yanı sıra, anten birkaç deformasyon altında incelendiğinde, vücut üzeri bükülme şartlarında da yüksek kararlılık ve iyi bir performans gösterir [107].

Anten topolojisi Şekil 4.24'te [107] gösterilmiştir. İki alt katman ve sırasıyla üst yama, parazitik yama ve tam toprak düzlemi içeren üç metal katmandan oluşur. Antenin iletken bileşenleri (ışık yama, parazitik yama ve toprak düzlemleri) LessEMF Inc.'den ShieldIt iletken tekstil kullanılarak oluşturulmuştur. 0,17 mm kalınlığa ve $1,18 \times 10^5$ S/m'lik bir iletkenliğe sahiptir. Bu arada, dielektrik taban katmanları 2 mm kalınlığında keçe kullanılarak oluşturulmuştur. Keçe, yaklaşık dielektrik sabiti (ϵ_r) 1,45 ve kayıp tanjantı ($\tan\delta$) 0,044 olan termik yalıtım malzemesidir. Anteni bir eş düzlemsel dalga kılavuzu (coplanar waveguide: CPW) besleme hattı üzerinden beslemek için standart bir 50 Ω SMA konektör kullanılmıştır. Yapı, literatürde CST programında zaman alanı çözümü kullanılarak simüle edilmiştir [107].

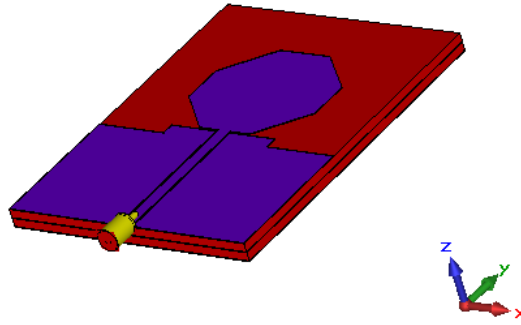


Şekil 4.24. Yan vd. tarafından önerilen anten yapısı: (a) yandan görüntü, (b) üst katman, (c) orta katman, (d) anten prototipi.

Şekil 4.24 (b) ve (c), üst ve alt yamaların optimize edilmiş boyutlarını göstermektedir. Üst metalik katman, $33 \times 30 \text{ mm}^2$ (genişlik ve uzunluk) toplam boyuta sahip sekizgen şeklinde bir yama içerir. Bu yama, (genişlik x uzunluk) $3 \times 36 \text{ mm}^2$ boyutunda bir CPW besleme hattı kullanılarak beslenmiştir. CPW besleme hattının her iki tarafına 28,7 mm genişlik ve 35,5 mm uzunlukta iki adet dikdörtgen CPW toprak düzlemi yerleştirilmiştir.

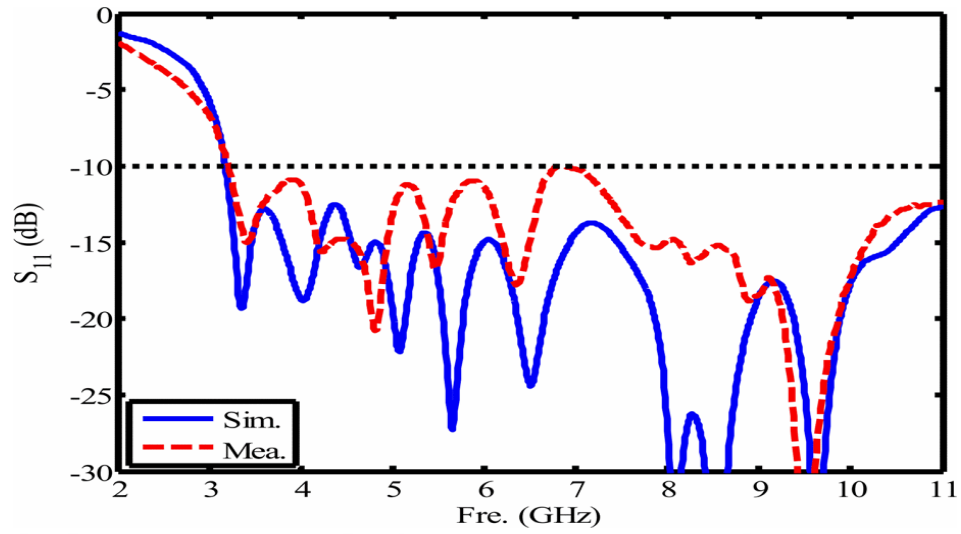
Besleme hattının yanındaki iki toprak düzlemine bir çift adım ilave edilmiştir ve bunlar (genişlik $\times$ uzunluk) $17 \times 3 \text{ mm}^2$ olacak şekilde boyutlandırılmıştır. İki toprak düzlemi ve CPW besleme hattı arasındaki boşluk 0,3 mm, CPW toprak düzlemi ve sekizgen yama arasındaki boşluk 0,5 mm'dir. İkinci metalik tabaka üzerinde bir parazitik dairesel monopole yer verilmiştir. Dairesel yama çapı 20 mm'dir. Bu yama ince bir şerit hattı ile $13 \times 61 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki dikdörtgen bir kesime bağlanmıştır. Şerit hattının genişliği ve uzunluğu sırasıyla 1 mm ve 27 mm'dir. Üçüncü metalik katman, anten ile insan vücudu arasındaki bağlantıyı önlemek için bir kalkan tabakası oluşturan iletken tekstil malzemesi ile tamamen kaplıdır. Antenin deneysel olarak ölçümlerini yapmak için SMA konnektör dahil edilmiştir. Antenin toplam boyutu $80 \times 61 \times 4,51 \text{ mm}^3$ 'tür [107].

Bu literatür [107] çalışmadaki anten parametreleri kullanılarak CST programında yeniden tasarlanıp analiz edilen anten yapısı Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



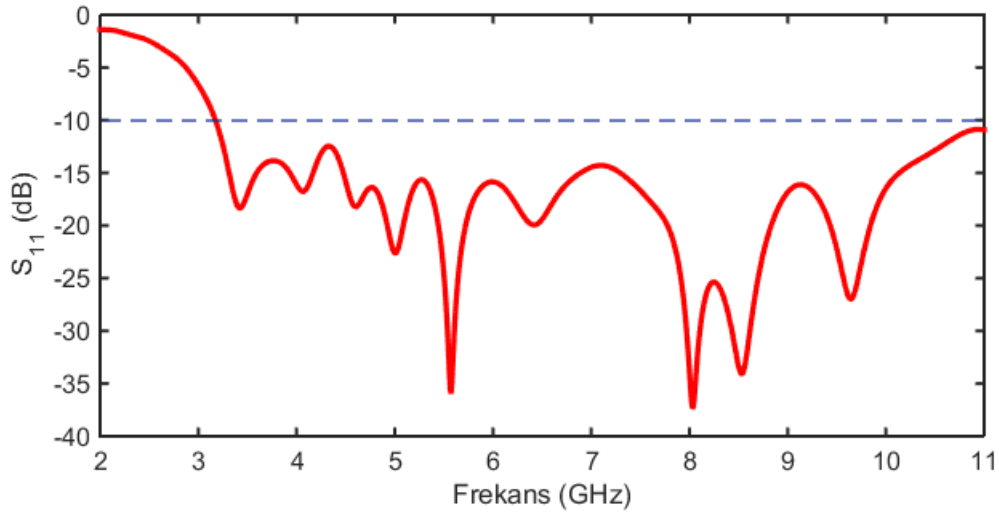
Şekil 4.25. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST ortamında yeniden tasarımı ve analizi yapılan geometrisi.

Anten öncelikle düzlemsel durumda incelenmiştir. Literatür çalışmasında serbest uzaydaki simülasyon ve ölçülen yansıma katsayısı S_{11} sonuçları Şekil 4.26'da [107] gösterilmektedir. Ölçülen sonucun simüle edilen sonuç ile iyi uyduğu görülebilir. Antenin empedans uyumu bant genişliği 3,1 GHz ila 11 GHz arasındaki UWB çalışma bant genişliğini kapsar.



Şekil 4.26. Yan vd. tarafından ölçülen ve simüle edilen anten S_{11} –parametresinin frekansla değişimi.

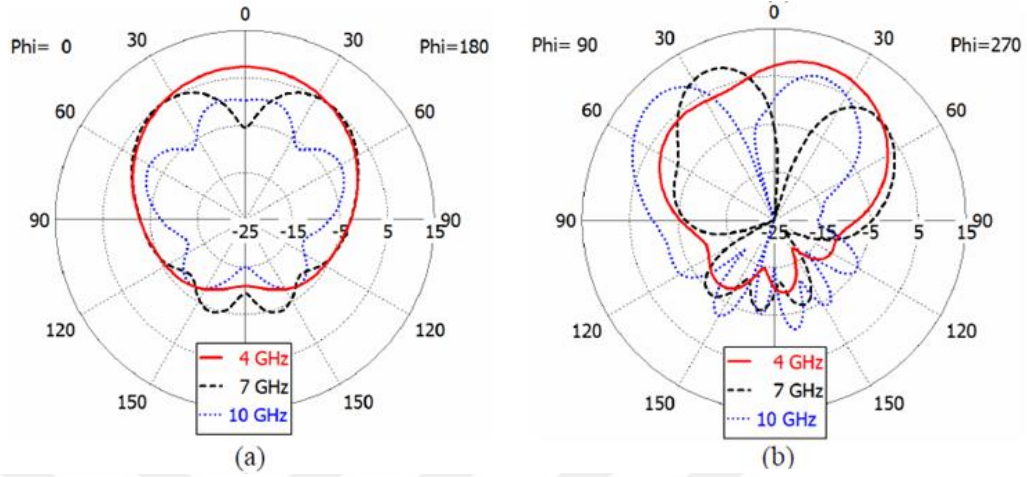
Şekil 4.27’de antenin düzlemsel durumda serbest uzaydaki CST simülasyonu S_{11} yansımaya katsayısı doğrulaması sonucunu gösterilmektedir. CST’de simüle edilen sonucun literatürde simüle edilens sonuç ile iyi uyduğu görülebilir.



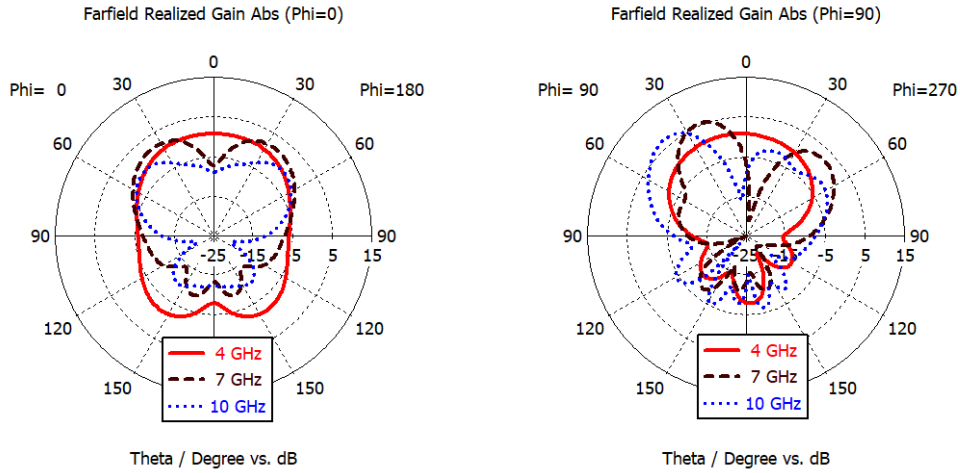
Şekil 4.27. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonu S_{11} parametresinin frekansla değişimi doğrulaması.

4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz’deki literatür ve CST doğrulaması ışıma örüntüleri sırasıyla Şekil 4.28 [107] ve şekil 4.29’da gösterilmektedir. Antene tam bir toprak düzlemi

uygulandığından antenin arka lob ışınımı, tüm çalışma frekansı bandında düşük bir seviyede tutulduğu literatür ve CST doğrulaması sonuçlarından görülmektedir.

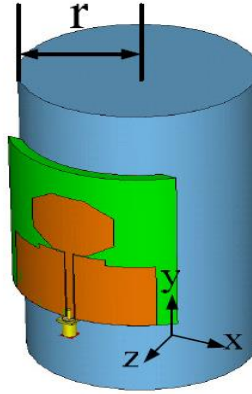


Şekil 4.28. Yan vd. tarafından önerilen antenin uzak alan ışıma örüntüleri.

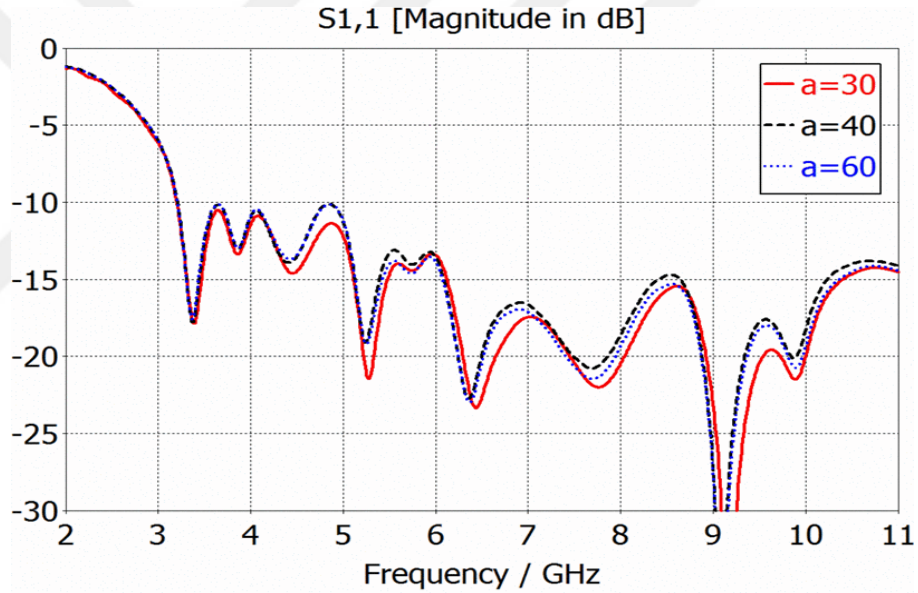


Şekil 4.29. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonunda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri doğrulaması.

Daha sonra, antenin farklı silindirlerin yüzeyinde farklı yarıçaplarla bükülme performansı analiz edilmiştir. Bu silindirlerin yarıçapları, üst kol, ön kol ve uyluk yarıçapları 30 mm, 40 mm ve 60 mm'dir. Şekil 4.30'da [107] literatürde, antenin x-ekseninde bükülme durumu gösterilmiştir ve Şekil 4.31'de [107] literatürde antenin x-eksenindeki farklı yarıçaplarda bükülme durumları için yansımaya katsayısı S_{11} performansı sonuçları verilmiştir.

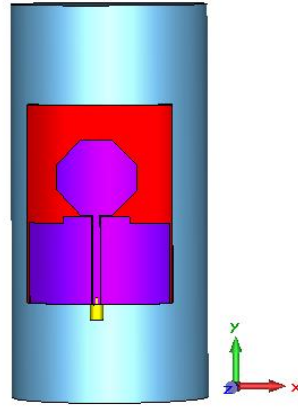


Şekil 4.30. Yan vd. tarafından önerilen antenin x-ekseninde bükülme konfigürasyonu.

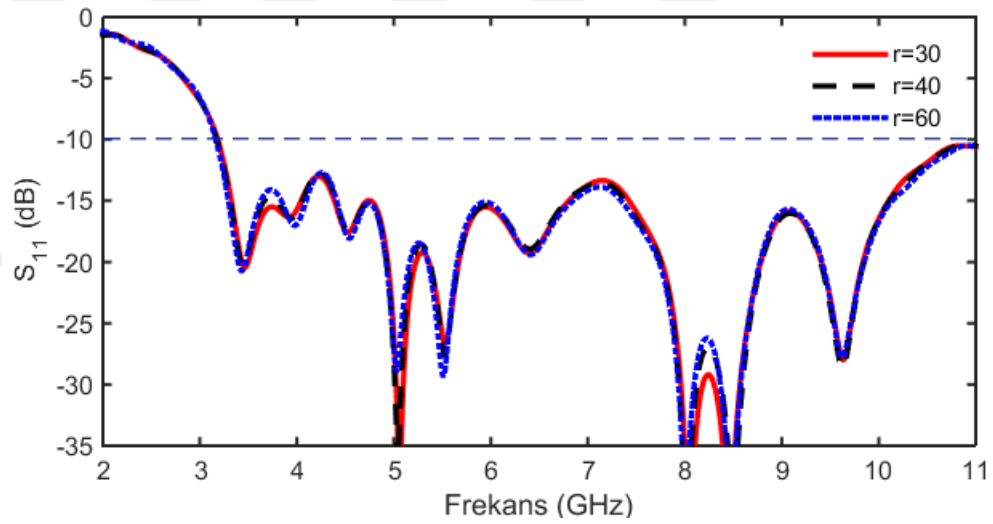


Şekil 4.31. Yan vd. tarafından önerilen antenin x-ekseni boyunca bükülme durumunda S_{11} – parametresinin frekans ile değişimi.

CST’de Şekil 4.32’de gösterildiği gibi x-eksenindeki bükülme yönü yeniden tasarlanmış ve Şekil 4.33’te farklı bükülme çapları için S_{11} performansı sonuçları yeniden elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatür sonuçlarıyla tutarlı olduğu ve antenin x-ekseni bükülmesi durumunda yansıma katsayısı performansının çok iyi olduğu gözlemlenmiştir. Antenin x-ekseni boyunca büküldüğünde, antenin yansıma katsayısı neredeyse aynı seviyede kalmıştır.

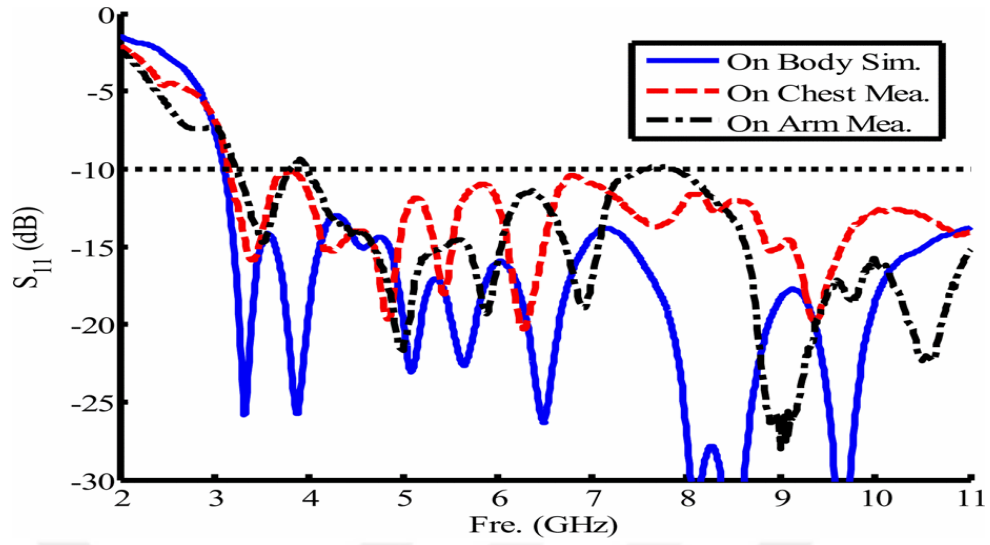


Şekil 4.32. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonunda x-ekseni boyunca bükülme konfigürasyonu



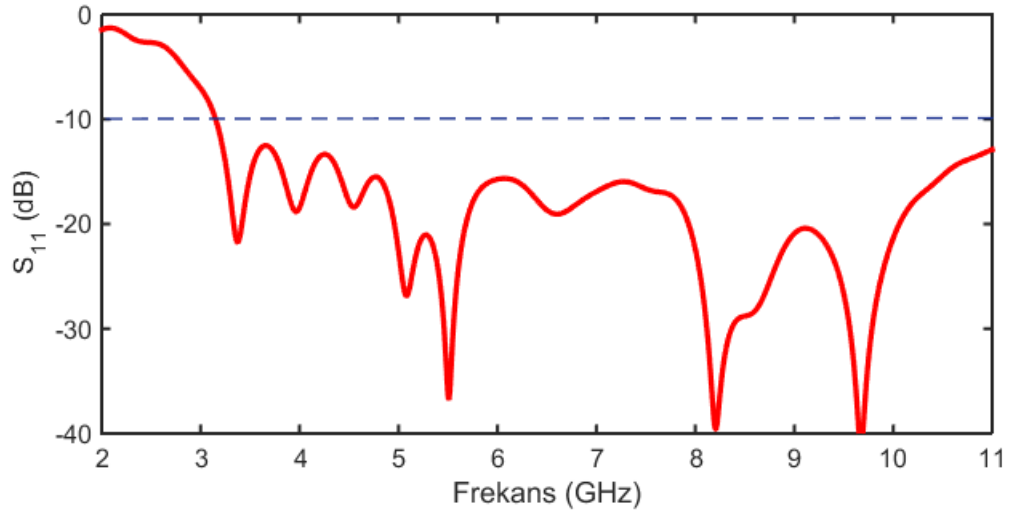
Şekil 4.33. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonunda x-eksende bükülme durumunda S_{11} parametresinin frekans ile değişimi doğrulaması

Literatürde önerilen antenin vücut üzerindeki performansını doğrulamak için, anten yansıma katsayısı performansı simülasyon ortamında üç katman içeren (deri-yağ-kas) bir kübik insan doku modeli üzerinde hesaplanmıştır. Literatürde antenin vücut modeli üzerinde elde edilen S_{11} analizi sonucu Şekil 4.34'te [107] gösterilmiştir. Tam toprak düzlemi anteni vücuttan izole ettiği için, S_{11} serbest uzaydaki ile neredeyse aynıdır.



Şekil 4.34. Yan vd. tarafından önerilen antenin vücut üzerinde S_{11} parametresinin frekans ile değişimi

CST’de yeniden simüle edilmiş vücut üzeri S_{11} -frekans eğrisi sonuçları Şekil 4.35’te gösterilmiştir. Literatürde gözlemlendiği gibi bu vücut üzeri sonuçların boş alan için elde edilen S_{11} doğrulama sonucu ile neredeyse aynı olduğu ve vücut üzeri literatür sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.35. Yan vd. tarafından önerilen antenin CST simülasyonunda vücut modeli üzerinde hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi doğrulaması

Bu çalışma sonucunda; literatürde farklı konfigürasyonlar altında analiz edilip önerilen bir tekstil giyilebilir UWB anteni, CST simülasyonu ortamında yeniden başarılı şekilde

analiz edilmiştir. Antenin boş alan, vücut modeli üzeri ve farklı bükülme şartları için empedans uyumu göstergesi olan yansıma katsayısı parametresi yeniden başarılı şekilde elde edilip, analiz edilmiştir. Antenin empedans uyumunun düzlemsel, bükülme ve vücut üzerindeki şartlarda iyi olduğu ve literatürdeki sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmüştür. Ayrıca boş alan için düzlemsel şartlardaki ışıma örüntüleri sonuçları yeniden elde edilmiştir ve literatürdeki sonuçlar ile uyum içindedir

4.2. Teze Özgü Anten Tasarımları

Teze özgün anten tasarımlarını ortaya çıkarmak için literatürdeki WBAN uygulamalarında kullanılan anten yapıları incelenerek, tek veya çok bantlı, UWB frekans bandında çalışacak şekilde mikroşerit beslemeli, kompakt antenler tasarlanmıştır. Tasarımlarda da literatürdeki anten tasarımlarında genel olarak ilk önce dikkate alınan S_{11} parametresi başarılı şekilde elde edildikten sonra ışıma örüntüleri, kazanç, verimlilik ve SAR gibi kritik parametreler anten üretilmeden simüle edilmiştir. CST programı tasarımlar için parametre süpürme ve optimizasyon için bir arayüz sağlar. Tasarımların geometrilerine sabit değerler koymak yerine bir tasarımın geometrik boyutlarının değerlerini parametrize etmek iyi bir uygulamadır. Bu parametreler daha sonra CST programındaki parametre süpürme seçeneği kullanılarak taranabilir veya optimize edicide optimize edilebilir. Bu işlem CST programındaki Simülasyon menüsü altındaki parametre süpürme (Par. Sweep) seçeneği seçilerek açılan pencerede bir sıralama oluşturmak için yeni sıralama (New Seq.) düğmesine basılıp daha sonra yeni parametre (New Par.) düğmesinden süpürme yapılacak parametreler ve bu parametrelerin süpürülmesinin hangi alt ve üst sınır aralığında, hangi adım değerlerinde (veya örneklem sayısında) olacağı girilebilmektedir. Ardından Result Template düğmesinden simülasyon ayarları yapılarak simülasyon yapılarak simülasyon sonuçlarından optimum geometrik parametre değerleri belirlenebilir. Tasarımlarda CST'nin bu özelliği kullanarak boyutlar simülasyon ile optimize edilmiştir. Simülasyon sonucunda başarılı şekilde elde edilen anten tasarımların CAD modeli CST programının dışa aktarma araçları kullanılarak lazer kesim cihazı ile başarılı şekilde üretilmiştir. Anten yapılarının yansıma parametreleri ölçümleri ise Anritsu MS4644B model ve Rohde Schwartz ZNB model ağ analizörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

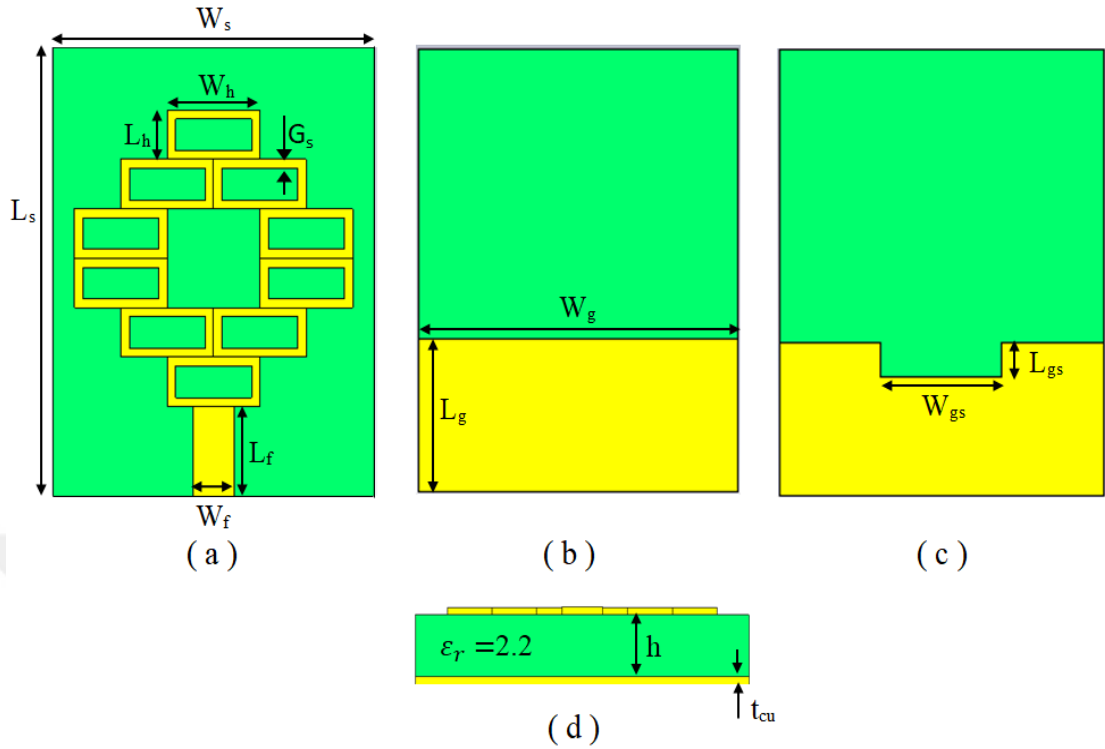
4.2.1. Tasarım 1

Kablosuz iletişim terminalleri için antenlerin, çoklu frekans bandı uygulamalarıyla uyumlu olması istenir. Ancak, frekans bantlarının sayısını arttıran bu durumun dezavantajı antenlerin tasarımında daha fazla karmaşıklığa neden olmasıdır [187, 189].

Bu çalışmada, RT/duroid 5880 dielektrik taban üzerinde WBAN uygulamaları için UWB ve ISM kanal frekanslarında çalışan dört bantlı ızgara dizisi mikroşerit anten tasarımı ve analizi sunulmuştur. Daha önce [188]'de milimetrik dalga boyu için benzer bir ızgara dizi yapısı incelenmiştir. Bu çalışmada, tasarım ve analiz için 3B nümerik simülasyon programı CST kullanılmıştır. Nümerik sonuçlar tasarlanan antenin çok bantlı olduğunu ve bu bantların ISM bandı ve UWB kanal frekanslarında çalıştığını göstermiştir [189].

Anten Tasarımı

Şekil 4.36, önerilen antenin ön, arka ve yandan tüm geometrik parametreleri ile birlikte yapısını göstermektedir. Antenin tasarımında, maliyet, piyasada bulunabilirlik ve düşük dielektrik toleransı, kaybı ve düşük nem emilimi gibi bazı avantajları nedeniyle RT / duroid 5880 dielektrik taban malzemesi seçilmiştir. RT/duroid 5880 tabanın boyutları $38 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 1,57 \text{ mm}$, dielektrik geçirgenlik $\epsilon_r=2,2$ ve tanjant kaybı $\tan\delta=0,0009$ 'dur. Anten yaması ve toprak düzlemi gibi iletken kısımları için yaklaşık olarak $0,02 \text{ mm}$ kalınlığında bakır iletken tercih edilmiştir. Antenin ön yüzeyindeki ışıyan yamanın geometrisi, Şekil 4.36 (a)'da gösterildiği gibi 10 adet ızgara dizisinden oluşturulmuştur. Anten besleme hattı için mikroşerit hat besleme tekniği kullanılmıştır. 50Ω hat empedansı için besleme hattı genişliği $W_f=4,85 \text{ mm}$ ve besleme hattı uzunluğu $L_f=10 \text{ mm}$ değerleri belirlenmiştir. Antenin toprak düzlemi iki adımda tasarlanmıştır. Şekil 4.37 (b)'de toprak düzleminin yarıksız olduğu ilk adımı ($W_g=38 \text{ mm}$, $L_g=17,2 \text{ mm}$) gösterilmiştir ve bu ilk adımın nümerik analizi sonucunda yalnızca bir rezonans frekans bandı oluşmuştur. Şekil 4.36 (c), modifiye edilmiş ikinci adımdaki yarıklı toprak düzlemini temsil etmektedir. Toprak düzleminde oluşturulan bu yarığın amacı, antenin rezonans frekans bantlarının sayısını artırmaktır ve yarık boyutları $3,9 \text{ mm} \times 4,7 \text{ mm}$ olarak simülasyon ortamında belirlenmiştir. Böylece, anten tasarımı tamamlanmıştır. Nümerik ortamda tasarlanan antenin optimize geometrik boyut parametreleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Bir sonraki adım olarak, antenin nümerik ortamdaki performans sonuçlarının analizi yapılmıştır.



Şekil 4.36. Önerilen antenin geometrisinin: (a) Ön yama düzlemi, (b) ilk aşama arka toprak düzlemi (yarıksız), (c) ikinci aşama arka toprak düzlemi (yarıklı), (d) yandan görünüm görüntüleri.

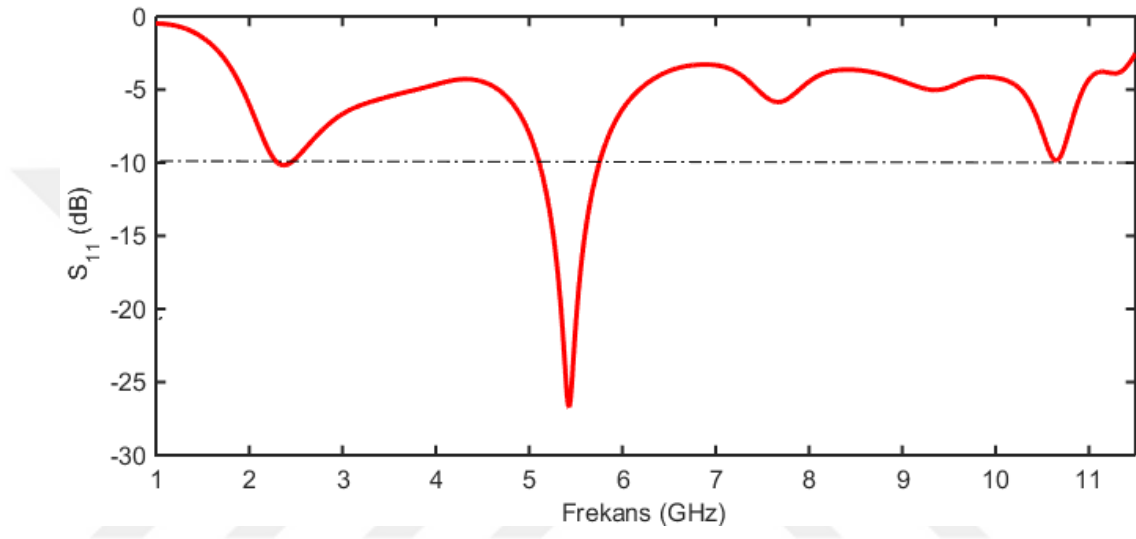
Tablo 4.3. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).

W_s	L_s	W_f	L_f	W_h	L_h	G_s	W_g	L_g	W_{gs}	L_{gs}	h	t_{cu}
38	50	4,85	10	11	5,5	1	50	17.2	4,7	3,9	1,57	0,5

Simülasyon Sonuçları

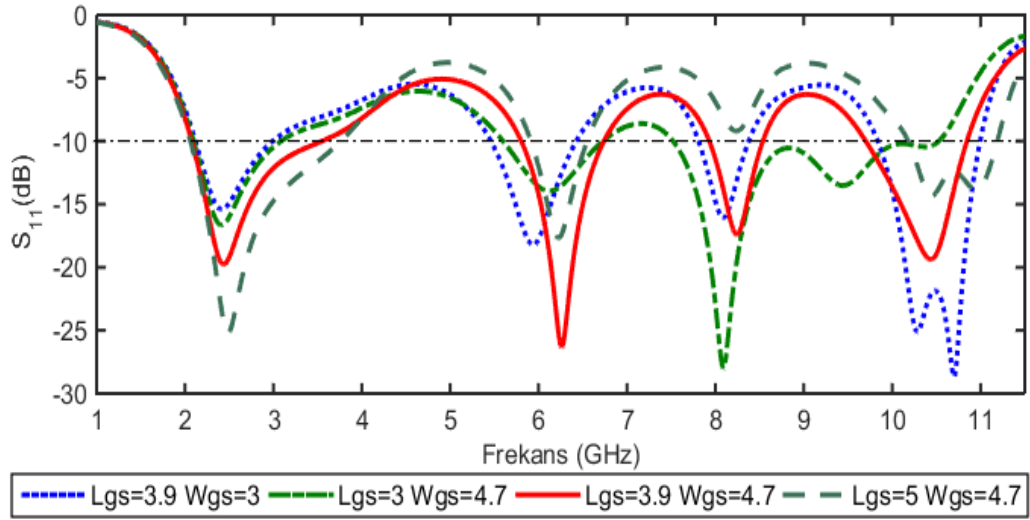
Yansıma katsayısı, ışıma deseni, gerilim duran dalga oranı (voltage standing wave ratio: VSWR) vb. anten performansını belirleyen parametreler vardır. Yansıma katsayısı parametresi tasarımda ilk önce dikkate alınmıştır. Diğer parametreler optimum yansıma katsayısı parametre grafiği elde edildikten sonra değerlendirilmiştir. Antenin yansıma katsayısı parametresi grafiği, antenin rezonans frekanslarını, bant sayısını, bant genişliklerini, ve rezonans frekansının maksimum yansıma katsayısı bilgilerini içerir. Tasarlanan antenin Şekil 4.36'da gösterilen ilk adım yapısı (a, b, d), CST yazılım programında simülasyonu sonucunda, Şekil 4.37'de gösterilen frekansa karşı yansıma katsayısı (S_{11} -parametresi) grafiği elde edilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, antenin bu

ilk tasarımı aşamasında sadece 5,43 GHz’de rezonans frekansı vardır. Bu rezonans frekansının yansıma katsayısı -26,727 dB ve rezonans frekans bandının 5,11 GHz - 5,75 GHz aralığında 640 MHz’lik bant genişliği vardır. Hedeflenen çok bantlı bir anten tasarlamaktır, ancak bu tasarım sonucu tek bantlı anten elde edilmiştir. Bu nedenle antenin toprak düzlemi değiştirilmiştir. Şekil 4.36 (c)’de gösterilen tasarımın ikinci aşaması olarak toprak düzleminde bir yarık oluşturulmuştur.



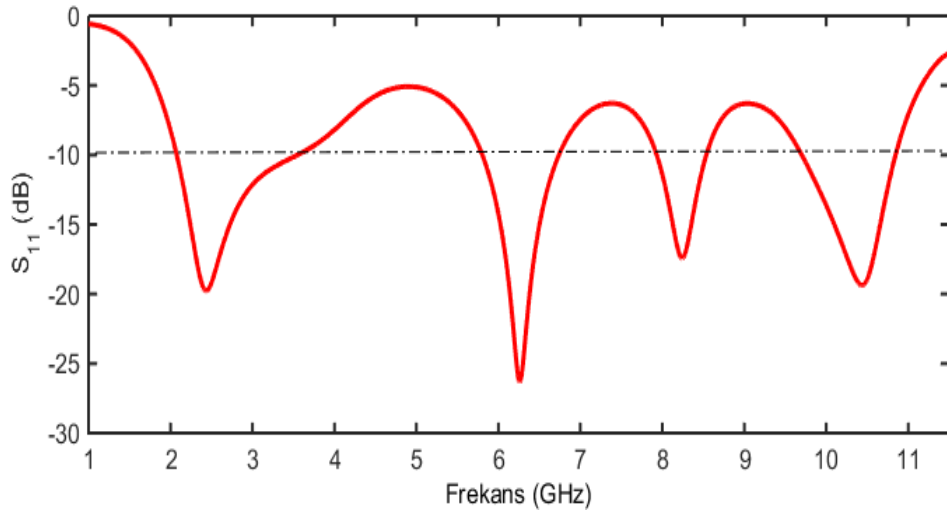
Şekil 4.37. İlk tasarlanan yarıksız toprak düzlemlili antenin simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

Optimum yansıma katsayısı parametre grafiğini elde etmek için yarık boyutları nümerik ortamda analiz edilip belirlenmiştir. Yansıma katsayısı parametre grafiği, Şekil 4.38’de çeşitli yarık boyutları için gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi toprak düzlemindeki yarık uzunluğu (L_{gs}) ve yarık genişlik (W_{gs}) değerlerini artırmak, sırasıyla yeni rezonans frekanslarına ve frekans bantlarının kaymasına neden olmuştur. $L_{gs}=3,9$ mm ve $W_{gs}=4,7$ mm optimum değer olarak belirlenip ve bu değerler için dört adet rezonans frekans bandı elde edilmiştir.



Şekil 4.38. Antenin toprak düzlemi yarık boyutlarının değişiminin simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekansla değişimi üzerindeki etkisi.

Şekil 4.39, elde edilen optimum anten geometrik değerleri için simüle edilen frekans karşılığı yansıma katsayısı grafiğini göstermektedir.

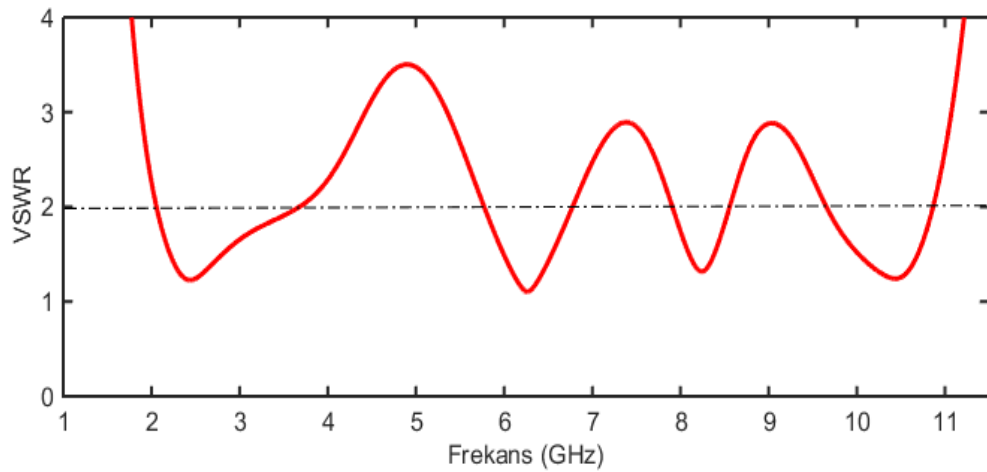


Şekil 4.39. Önerilen optimum antenin simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekansla değişimi ($L_{gs}=3,9$ mm, $W_{gs}=4,7$ mm).

Grafikten görüldüğü gibi antenin WBAN uygulamalarında kullanılabilecek rezonans frekansları 2,45 GHz ISM bandı ve UWB bandı bölgesinde 6,25 GHz; 8,25 GHz ve 10,45 GHz olmak üzere toplam dört adet frekans bandı bulunmaktadır. Grafikteki 2,45 GHz rezonans frekansı, 1470 MHz (2,075-3,545 GHz) bant genişliğiyle (≤ -10 dB) tüm ISM

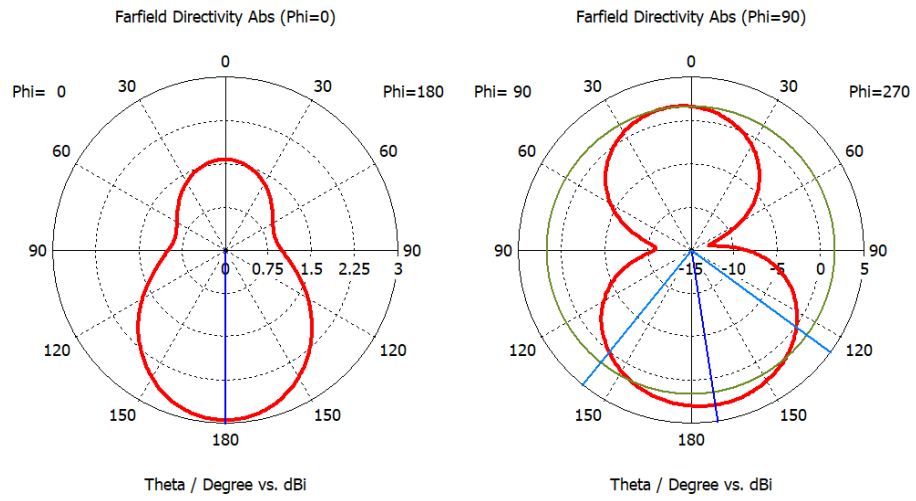
bandını kapsar ve yansıma katsayısı -19,759 dB'dir. Diğer rezonans frekans bantları genişlikleri 940 MHz (5,800-6,740 GHz), 620 MHz (7,915-8,535 GHz), 1145 MHz (9,700-10,845 GHz)'tir ve bu rezonans frekanslarına ait yansıma katsayıları sırasıyla, -26,334 dB;-17,417 dB; -19,377 dB'dir. Antenin UWB bölgesinde elde edilen rezonans frekans bant genişlikleri, FCC tarafından belirtilen, $UWB \geq 500$ MHz tanımlaması için uygundur.

Gerilim duran dalga oranı (VSWR), antenin empedans eşleşmesinin ne kadar iyi olduğunu gösterir. Şekil 4.40, antenin -10 dB altı rezonans frekans bantları için $VSWR \leq 2$ olduğunu göstermektedir. Yani, antenin empedans eşlenimi çalışma frekans bantlarına uymaktadır.

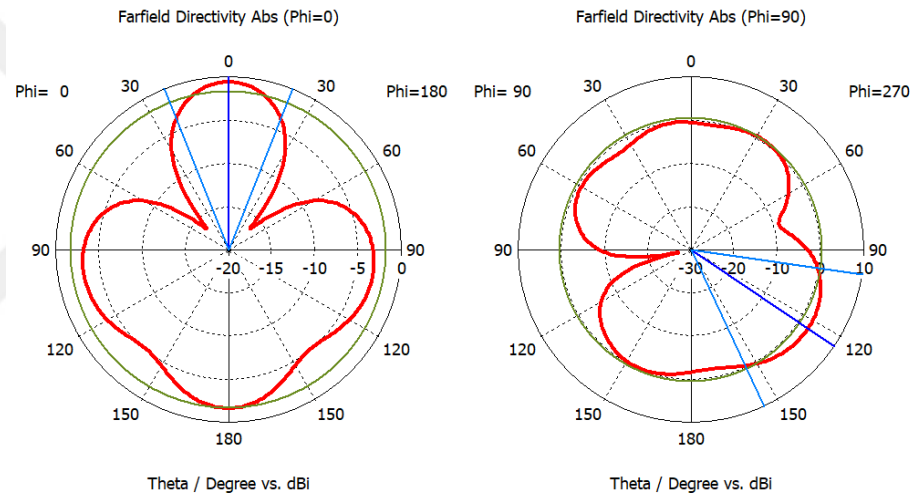


Şekil 4.40. Önerilen antenin simülasyonda hesaplanan VSWR parametresinin frekansla değişimi.

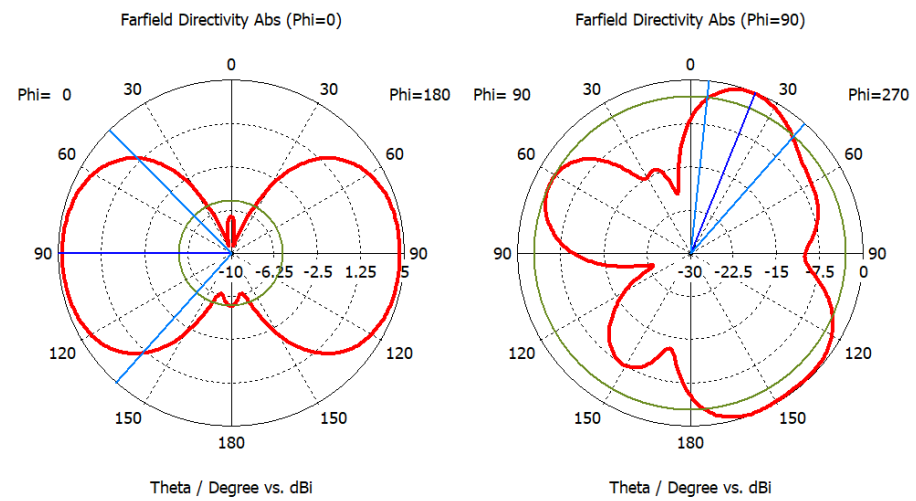
Şekil 4.41, simülasyon sonucu olarak antenin 2B ışıma örüntülerini göstermektedir. Işıma örüntüleri, antenin enerjiyi nasıl yönlendirdiğini gösterir. Antenin yönlendiriciliği 2,45 GHz; 6,25 GHz; 8,25 GHz ve 10,45 GHz maksimum yansıma katsayısı frekansları için sırasıyla 3,09 dBi; 4,38 dBi; 4,54 dBi ve 7,80 dBi'dir Bu sonuçlar anten yönlendiriciliğinin yüksek frekanslar için arttığını göstermektedir.



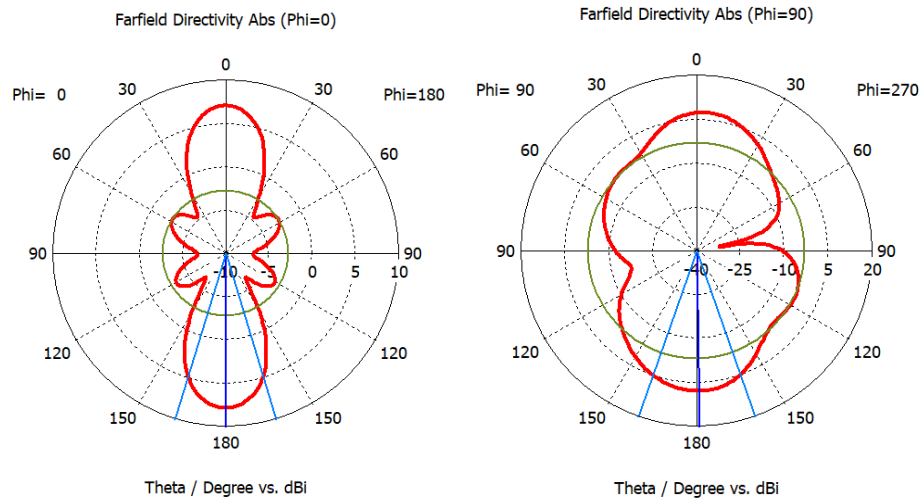
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.41. Önerilen antenin kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Phi: 0 ve Phi: 90) simülasyonlarda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri: (a) 2,45 GHz (b) 6,25 GHz (c) 8,25 GHz (d) 10,45 GHz.

Tablo 4.4'te tasarlanan antenin frekans bantlarına ait rezonans frekansı, maksimum yansıma katsayısı, çalışma frekans bandı aralığı, band genişliği ve yönlülük özellikleri özetlenmiştir. Tablodan antenin bir adet ISM bandına ve üç adet UWB bölgesinde $BG \geq 500$ MHz için UWB'da sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 4.4. Tasarım ızgara dizisi antenin karakteristik özelliklerinin özeti.

Band No	Rezonans Frekansı (GHz)	Maksimum Yansıma Kaybı (dB)	Frekans Aralığı (f_L - f_H) (GHz)	Band Genişliği (BG) (MHz)	Yönlülük (dBi)	Band
F1	2,45	19,76	2,075 - 3,540	1470	3,09	ISM Bandı kapsar
F2	6,25	26,33	5,800 - 6,740	940	4,38	UWB kanal $BG \geq 500$ MHZ
F3	8,25	17,42	7,915 - 8,535	620	4,54	
F4	10,45	19,38	9,700 - 10,845	1145	7,80	

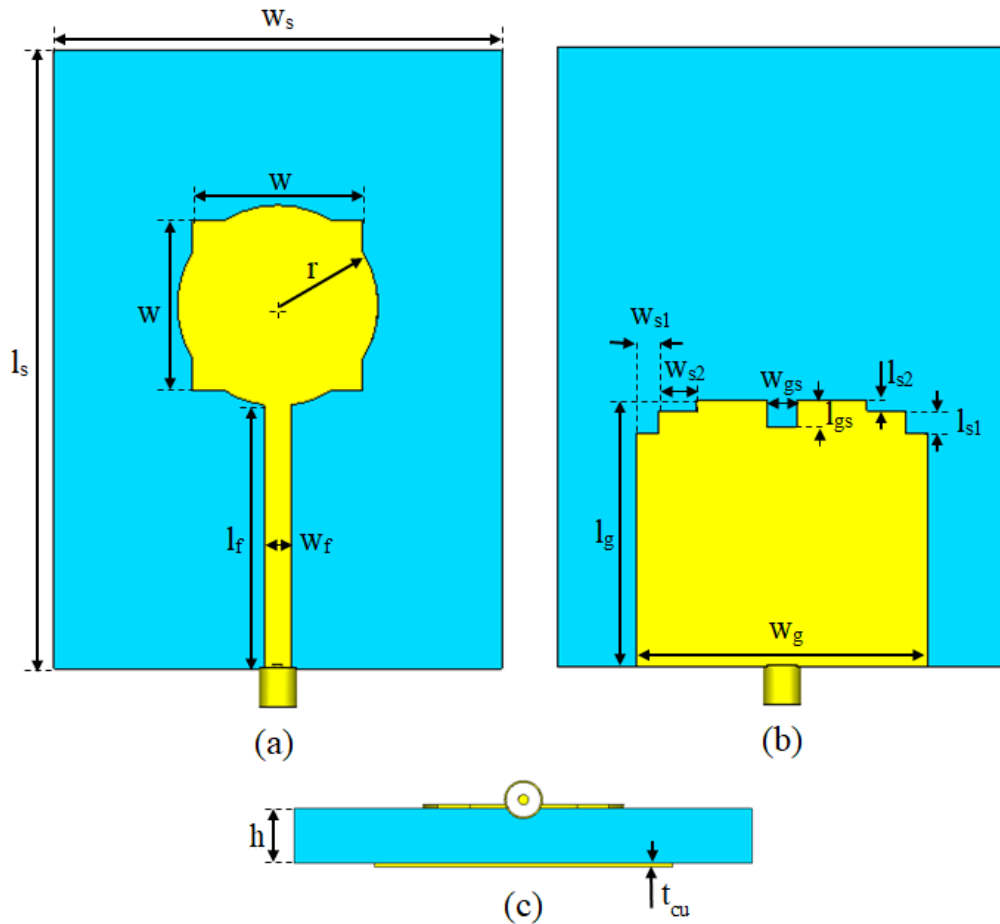
Bu çalışma sonucunda, çoklu çalışma frekans bandına sahip bir ızgara dizisi mikroşerit anten başarılı şekilde CST nümerik ortamında tasarlanıp analiz edilmiştir. Önerilen anten kompakt ve çok frekanslı ISM ve UWB bant genişliklerine sahiptir. UWB mikro şerit anteni WBAN uygulamalarında düşük güç tüketimi ve kompakt olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygun yansıma katsayısı ve bant genişlikleri ile WBAN uygulamaları için dört spektral frekans bandı elde edilmiştir (üç adet UWB bölgesinde ve bir adet ISM bandında). Bu frekans bantlarının her biri ile farklı cihazlarla iletişim kurabilir veya bant genişliğini artırmak için birlikte kullanılabilir. Gelecekteki çalışmalarda, nümerik ortamdaki bu değerleri WBAN anten üretiminde ve ölçümünde kullanılması planlanılmaktadır.

4.2.2. Tasarım 2

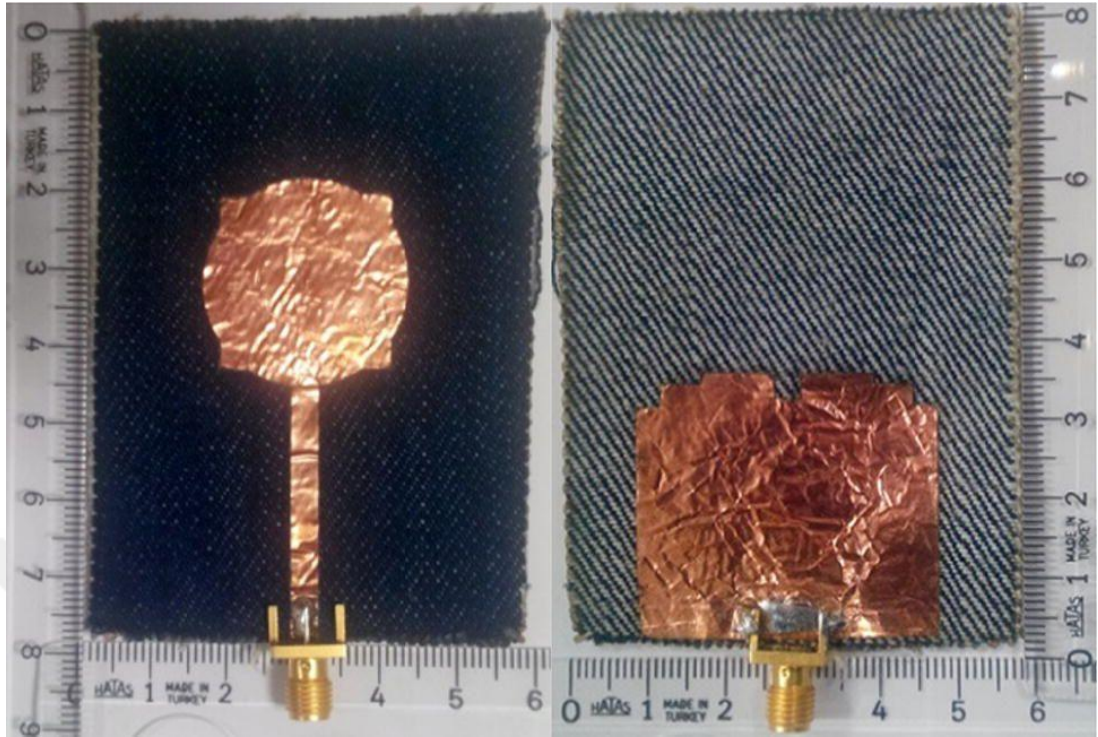
Bu çalışmada, WBAN uygulamaları için MM'li esnek bir giyilebilir tekstil UWB anteninin tasarımı ve deneysel doğrulaması sunulmuştur. Önerilen anten, $58 \times 80 \times 1$ mm³ boyutlarında kot dielektrik taban üzerine tasarlanmış kare ve dairesel yama birleşiminden oluşan bir mikroşerit hattı besleme antenidir. Benzer bir geometrik yapı daha önce [190]'te 2,4 GHz ISM bant için araştırılmıştır. Ayrıca giyilebilir antenlerin en önemli sorunlarından biri olan anten ile vücut arasında oluşan etkileşimi ortadan kaldırmak ve böylece tasarım anteninin SAR değerini düşürmek ve anten performans parametrelerini artırmak için keçe tekstil dielektrik alt taban üzerinde MM yapı tasarlanmış ve antenin kısmi toprak düzlemi arkasına entegre edilmiştir. Tasarlanan MM yapısı olan ve olmayan antenin, empedans uyumu, ışıma örüntüleri, kazanç ve SAR değeri gibi performans parametreleri simülasyon ortamında karşılaştırmalı bir şekilde başarılı şekilde analiz edilmiştir. Sonuçlar, tasarlanan MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle antenin kazanç, yönlülük ve önden arkaya oran (FBR) performans parametrelerinin önemli ölçüde artarken, antenden vücuda doğru yayılan elektromanyetik dalgalar ile insan vücudu arasındaki etkileşim önlenmiştir. Tasarlanan anten ve MM yapısı başarıyla üretilmiş ve ölçümler de alınmıştır. Ölçüm sonuçları simülasyonlarda bulunan sonuçlarla iyi bir uyum içindedir. Sonuç olarak elde edilen sonuçlar, önerilen antenin performans özelliklerinin ve tepe SAR değerlerinin giyilebilir uygulamalar için uygun ve güvenli olduğunu göstermiştir [123].

Anten ve Metamaterial Yapısı Tasarımları

Anten, 1 mm kalınlığında, $58 \times 80 \text{ mm}^2$ boyutlarında, 1,7 dielektrik geçirgenliğine ve 0,026 kayıp tanjantına sahip kot kumaşı taban malzemesi üzerine tasarlanıp üretilmiştir. Antenin iletken kısımları olan yama ve toprak düzlemi için $5,88 \times 10^7 \text{ S/m}$ iletkenliğe ve 0,035 mm kalınlığa sahip bakır bant tercih edilmiştir. Tasarımda bakır bant yapışkan yüzeyinin dielektrik geçirgenliği hesaba katılmamıştır. Anten yama geometrisi, dairesel ve kare şekillerin bir birleşimidir. Anten, 50Ω SMA konektörü için 3,5 mm genişliğinde bir mikroşerit hat kullanarak beslenmiştir. Şekil 4.42, önerilen anten konfigürasyon tasarımının CST'deki geometrisini göstermektedir. Şekil 4.43, WBAN uygulamaları için üretilen mikroşerit hat beslemeli prototip anteni göstermektedir. Önerilen antenin geometrik boyutları Tablo 4.5'te özet olarak verilmiştir.



Şekil 4.42. Geometrik parametrelerle birlikte (a) ön, (b) arka ve (c) alt yandan görünümüleriden önerilen anten mimarisi.



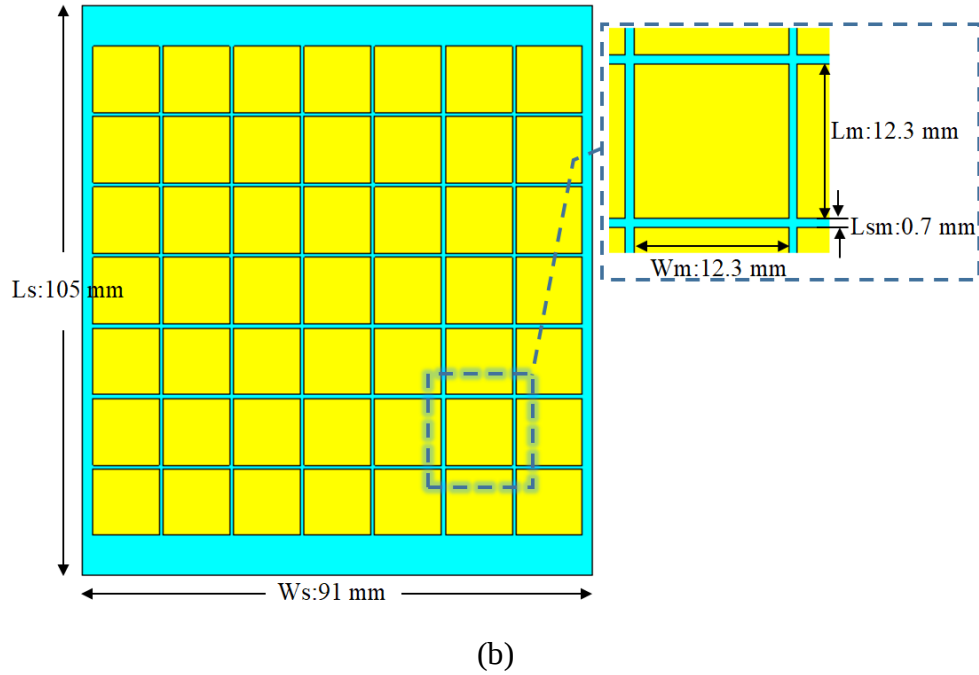
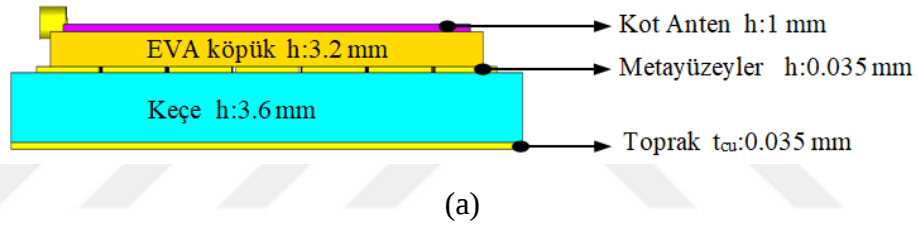
Şekil 4.43. Önerilen antenin optimize edilmiş geometrik parametrelere sahip olacak şekilde üretilmiş anten prototipi ön ve arka görünümleri.

Tablo 4.5. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).

W_s	L_s	W	r	w_f	l_f	W_g	l_g	w_{gs}	l_{gs}	w_{s1}	l_{s1}	w_{s2}	l_{s2}	h	t_{cu}
58	80	22	13	3,5	10	37,8	34,4	3,8	3,4	3	3	5	1,4	1	0,035

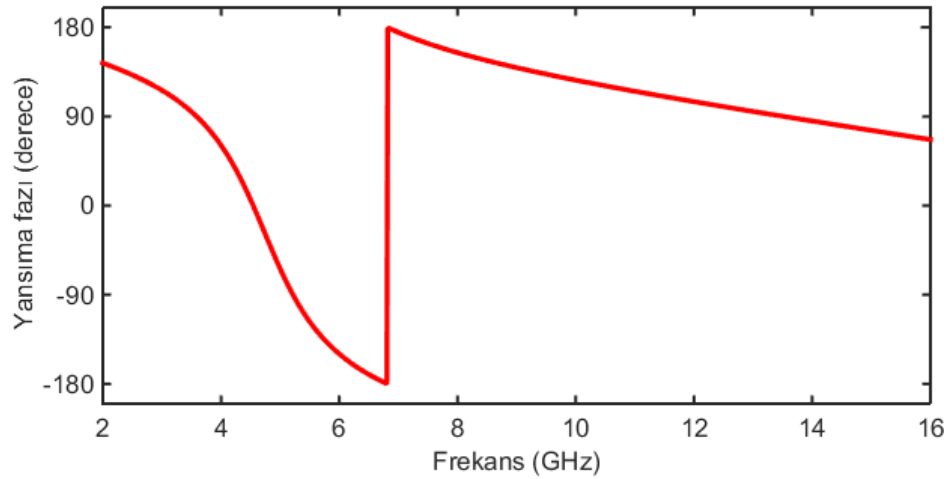
Antenin, arka lob ışımasını azaltmak, kazanç ve yönlendiriciliğini arttırmak için antenin kısmi toprak düzlemi arkasına yansıtıcısı olarak MM yapı tasarlanmıştır. Özellikle, antenden yayılan elektromanyetik dalgalar vücut dokularına zararlı olabilmektedirler. Tasarımda anten optimize edildikten sonra, vücuda zararlı olan elektromanyetik dalgaların SAR etkisini insan sağlığı güvenliği eşik sınırları altına düşürmek için, MM yapı tasarlanmıştır. MM yapısı optimizasyonunda, MM’li antenin yansıma katsayısı (S_{11}) parametresi göz önüne alınmıştır. Yansıma katsayısı, anten tasarımında anten girişindeki gücün ne kadarının empedans uyumsuzluğu nedeniyle yansıdığını ve anten empedans uyumunu belirten, çalışma frekansı bandını değerlendirmek için kullanılan bir parametredir. Şekil 4.44 (a), MM yapısı üzerine yerleştirilen antenin üç katmandan oluşan yandan görüntüsü verilmiştir: iki metalik (metayüzey ve toprak düzlemi) katman ve aralarındaki dielektrik keçe taban katmanı. Anten ile MM arasındaki mesafeyi korumak

ve elektriksel teması önlemek için bir ayırıcı olarak, 3,2 mm kalınlığındaki EVA dielektrik köpük ($\epsilon_r=1,2$, $\tan\delta=0,005$) malzemesi yerleştirilmiştir. Metalik katmanlar için antende olduğu gibi 0,035 mm kalınlığında bakır bant kullanılmıştır. MM yapısı, 3,6 mm kalınlığında, 1,43 dielektrik sabiti ve 0,044 tanjant kaybı olan keçe taban malzemesi üzerinde tasarlanmıştır. Şekil 4.44 (b)'de 7×7 kare kafes içinde toplamda 49 adet hizalanmış kare şekilli birim hücrelerden oluşan önerilen meta yüzey yapısının ayrıntılı geometrisini gösterir. Üretim kolaylığı nedeniyle, metayüzey birim hücresi kare biçiminde seçilmiştir. Üretilen MM yapının prototipi Şekil 4.44 (c)'de gösterilmektedir. Optimum MM yapısı için simüle edilmiş yansıma fazı grafiği, Şekil 4.44 (d)'de verilmiştir. CST'deki MM birim hücre simülasyon modeli, birim hücre periyodik sınır koşulları ve floquet portlu normal doğrultusunda gelen elektromanyetik dalga açısı olarak ayarlanmıştır.





(c)



(d)

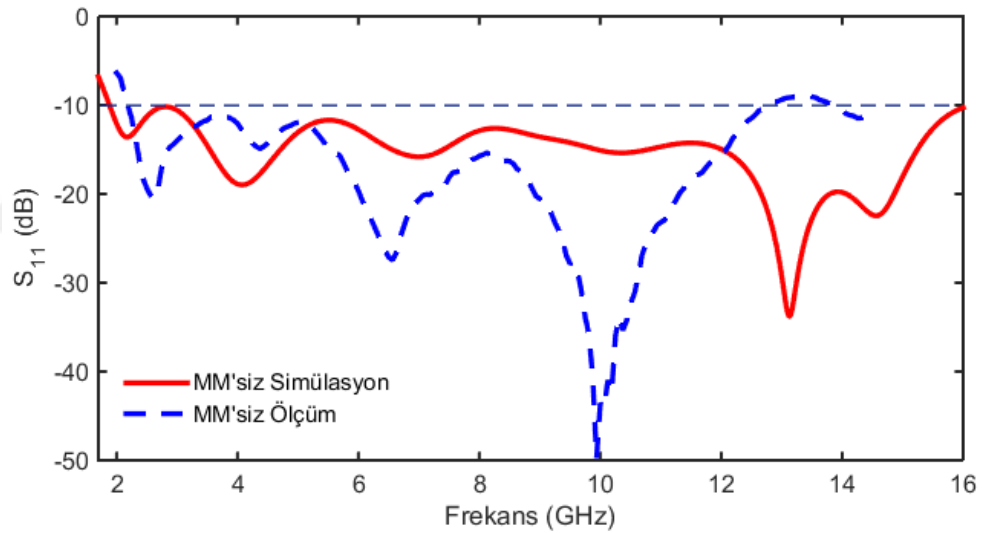
Şekil 4.44. (a) MM entegreli anten yapısı katmanlarının yandan görünüşü, (b) ayrıntılı birim hücre geometrisi ile birlikte 7×7 kare kafes içinde hizalanan toplam 49 birim hücresinden oluşan önerilen meta yüzey yapısı, (c) tasarlanan MM yapısının üretilen prototipi, (d) Yansımaya fazı açısının frekans ile değişimi.

Simülasyon ve Ölçüm Sonuçları

Anten performans parametrelerinin yansımaya katsayısı, düzlemsel koşullar için tasarımda öncelikli parametre olarak kabul edilir. Bu parametre başarıyla elde edildikten sonra diğer parametrelerin performansı değerlendirilmiştir. Optimum tasarım anten elde edildikten sonra, MM yapısı, antenin arkasında tasarlanmıştır ve tasarımda MM entegre edilmiş

antenin empedans eşleşmesi göz önünde bulundurulmuştur. Simülasyon programında UWB frekans bandı için optimum MM tasarımı da elde edildikten sonra, anten ve MM yapının prototipleri üretilmiştir. Daha sonra MM'li ve MM'siz anten prototipinin yansıma katsayısı Anritsu MS4644B model ağ analizörü ile ölçülmüştür. Tasarlanan ve üretilen MM'li ve MM'siz antenin performans (empedans uyumu, ışıma örüntüleri ve gerçekleşmiş kazanç) parametrelerinin simülasyon ve ölçüm sonuçları bu bölümde incelenip karşılaştırılmıştır.

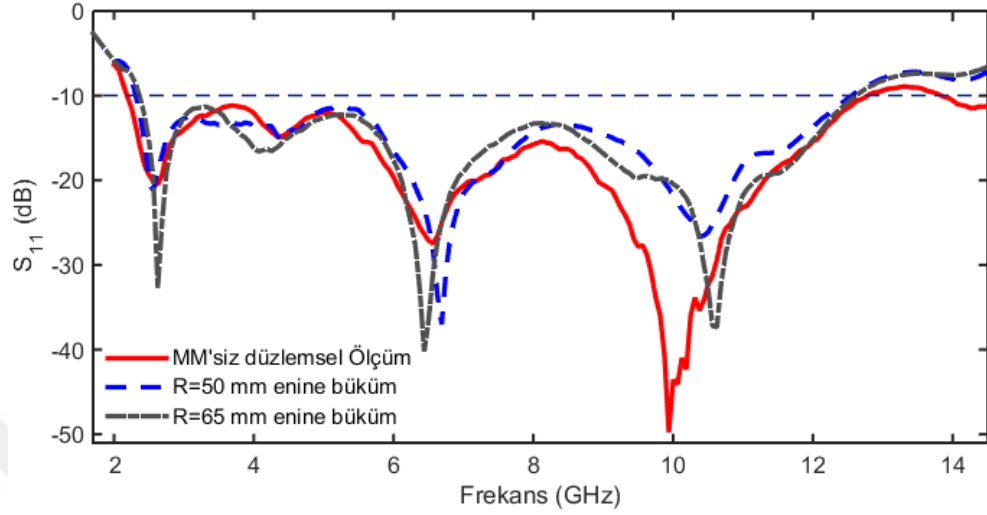
Düzlemsel MM'siz antenin yansıma katsayısı parametresinin serbest uzayda simülasyon ve ölçüm sonuçları, Şekil 4.45'te gösterilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarından, önerilen antenin serbest uzayda tüm UWB frekans bölgesini kapsayan geniş bir frekans bant genişliğine sahip olduğu tespit edilmiştir.



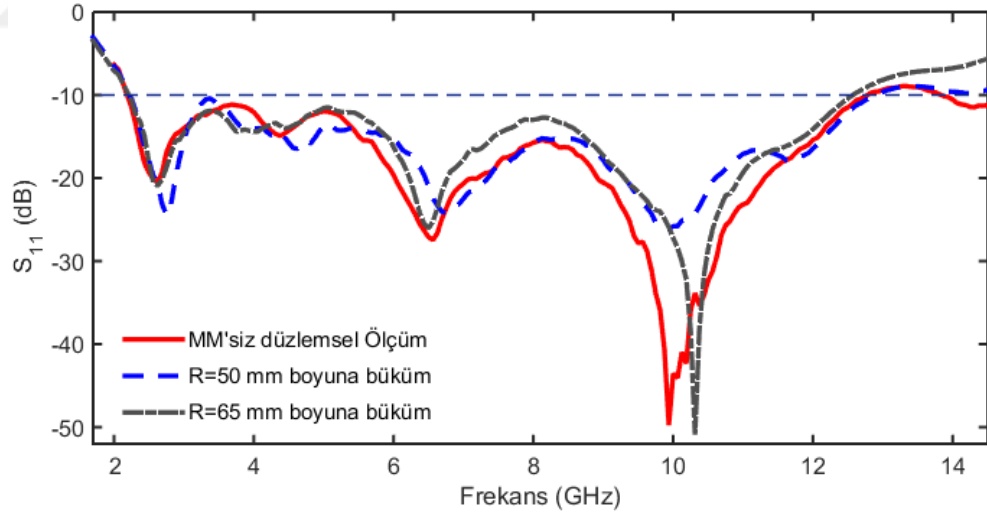
Şekil 4.45. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

Antenin bir diğer önemli performans göstergesi olan vücut üzerindeki bükülme şartlarındaki empedans band genişliği deneysel olarak incelenmiştir. Düzlemsel ve $R=50$ mm ve $R=65$ mm'lik farklı çaplarda köpük üzerinde MM'siz antenin enine ve boyuna büküm için ölçülen S_{11} yansıma katsayısı grafikleri sırasıyla, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de gösterilmektedir. Her iki ölçüm sonuç grafiklerinden de görüldüğü gibi, antenin $R=50$ mm ve $R=65$ mm'lik büküm şartlarında ölçülen yansıma katsayısı sonuçlarının, düzlemsel şartlardaki yansıma katsayısına göre çok az değişimler görülsede, çok ciddi bir

değişim yoktur. Özellikle büküm şartlarında da anten iyi bir empedans uyumu ($S_{11} \leq -10$ dB için) göstermektedir ve antenin düzlemsel şartlardaki bant genişliği korunmuştur.



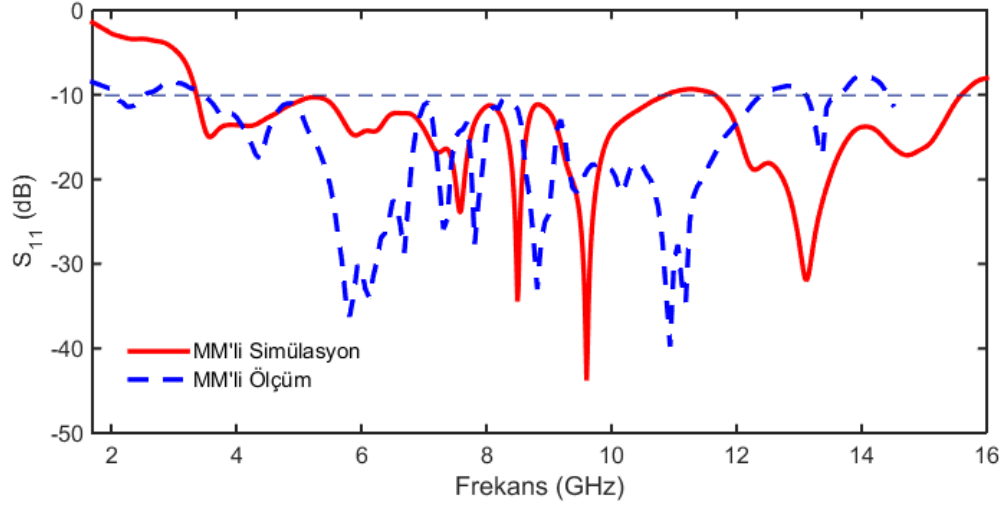
Şekil 4.46. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.



Şekil 4.47. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin farklı çaplarda köpük üzerinde boyuna bükümü için deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

MM'li antenin serbest uzay için simüle edilmiş ve ölçülmüş yansıma katsayısı sonuçları, Şekil 4.48'de gösterilmektedir. Şekil 4.48'den, simüle edilen sonucun bant genişliği 3,4 ila 15,8 GHz arasında ve antenin prototipinin ölçüm sonucu bant genişliği 3,5 ile 12,4 GHz arasında olduğu görülmektedir. Sonuçlara göre, MM'li anten iyi bir empedans

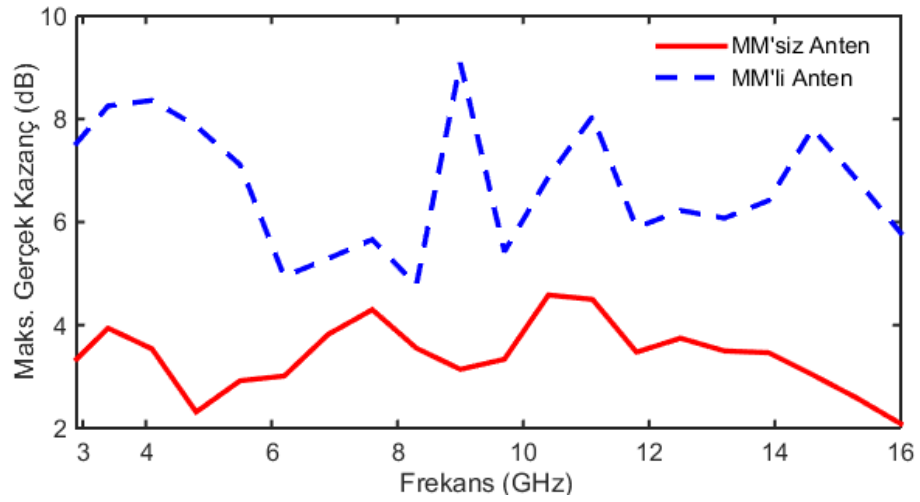
uyumu ($S_{11} \leq -10$ dB için) ve serbest uzayda UWB frekans bölgesini kaplayan geniş bir frekans bant genişliğine sahiptir.



Şekil 4.48. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

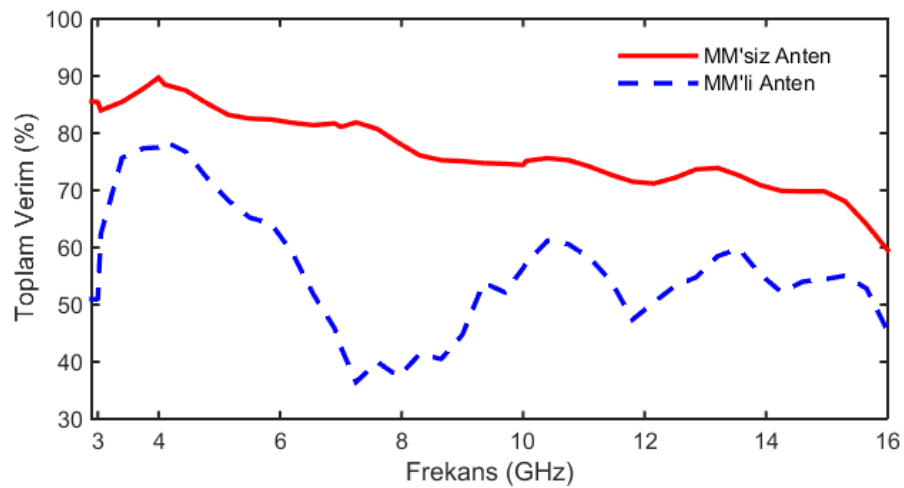
Simülasyon ve ölçüm sonuçları arasındaki farklar, imalat toleranslarına, sayısal hatalara, ölçüm ortamına, bakır bandın yapışkan yüzeyine ve SMA konnektör lehimleme etkilerine bağlanabilir

Şekil 4.49’da MM’li ve MM’siz antenin simüle edilmiş frekansa karşı maksimum gerçek kazanç grafiği, karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlardan MM’li antenin, tüm çalışma frekansı bandında MM’siz antenden daha fazla kazanca sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Antenin arkasında MM olmadan gerçek kazancı 2,1 ile 4,6 dB arasında değişmektedir. Antenin arka kısmına MM entegre edildiğinde, antenin kazancı tüm çalışma frekans bandı boyunca 4,7 dB’nin üzerindedir. Antenin maksimum gerçek kazancı 4,6 dB’den 9,1 dB’ye yükselmiştir. Böylece, antene MM entegre edilmesiyle antenin maksimum gerçek kazanç değerinde, MM’siz antenin maksimum gerçek kazanç değerine kıyasla %98 oranında önemli bir artış sağlamıştır.



Şekil 4.49. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan maksimum gerçek kazancın frekans ile değişimi.

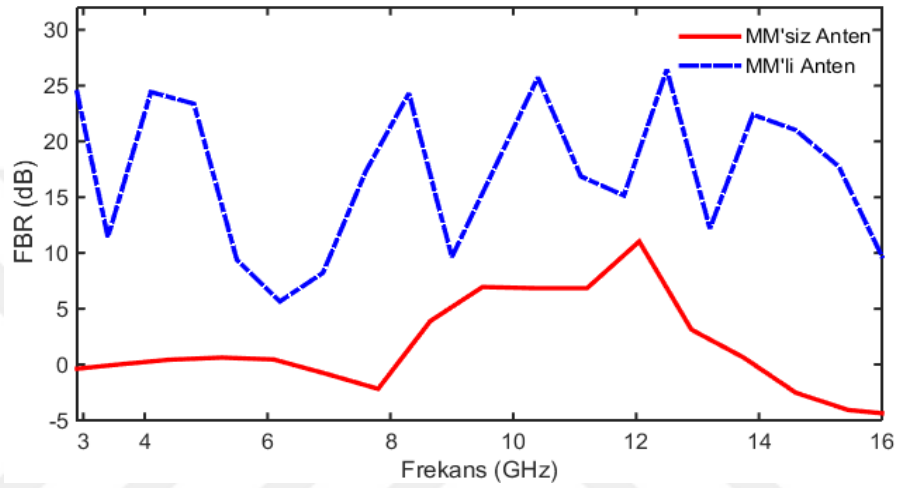
MM'li ve MM'siz antenin simüle edilmiş frekans karşılığı toplam verimlilik grafiği, Şekil 4.50'de gösterilmektedir. Sonuçlardan MM'li ve MM'siz antenin çalışma bant genişliği içinde toplam verimleri sırasıyla %60 ile %90 ve %37 ile %80 arasında değişmektedir. Antene MM entegre edildiğinde, antenin toplam verimi düşmüştür. Verimlilikteki bu azalma, empedans uyumu ve termal (dielektrik ve yüzey dalgası) kayıplarına bağlanabilir.



Şekil 4.50. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan toplam verim değerinin frekans ile değişimi.

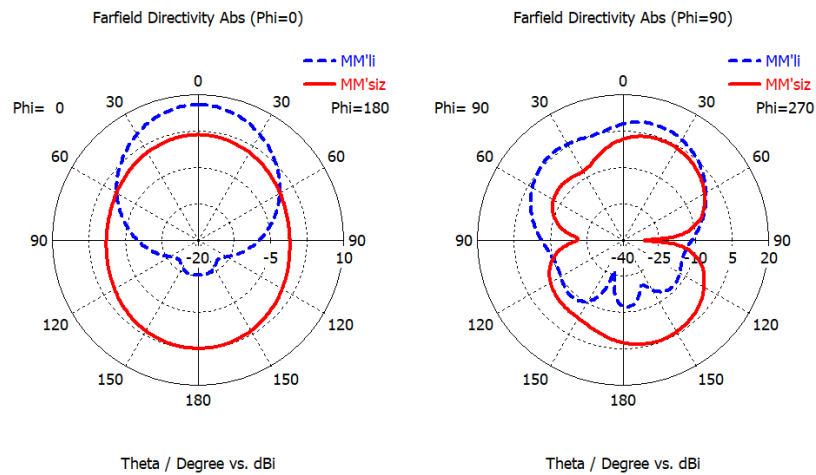
Şekil 4.51'de, MM'li ve MM'siz antenin simüle edilmiş frekans karşılığı ön-arka oranı (FBR) grafiği karşılaştırmalı olarak verilmiştir. MM'siz anten için simüle edilmiş FBR sonucu, 3-16 GHz arasındaki tüm çalışma frekansı bandında -4,4 ve 11 dB arasında

değişirken, MM'li anten için simüle edilmiş FBR sonucu, 5 ila 26,6 dB arasında değişmektedir. MM'li antenin FBR'si tüm çalışma frekansı bandında artmıştır. MM'nin antene entegrasyonu, antenin arka lob yayılımını azaltmış ve antenin ileri yayılımını arttırmıştır. Dolayısıyla, MM'nin antene arkasına eklenmesinden sonra, antenin FBR ve kazancının önemli ölçüde arttığı açıktır. Bu sonuçlar, MM ile önerilen antenin WBAN uygulamaları için avantajlar sağladığını göstermiştir

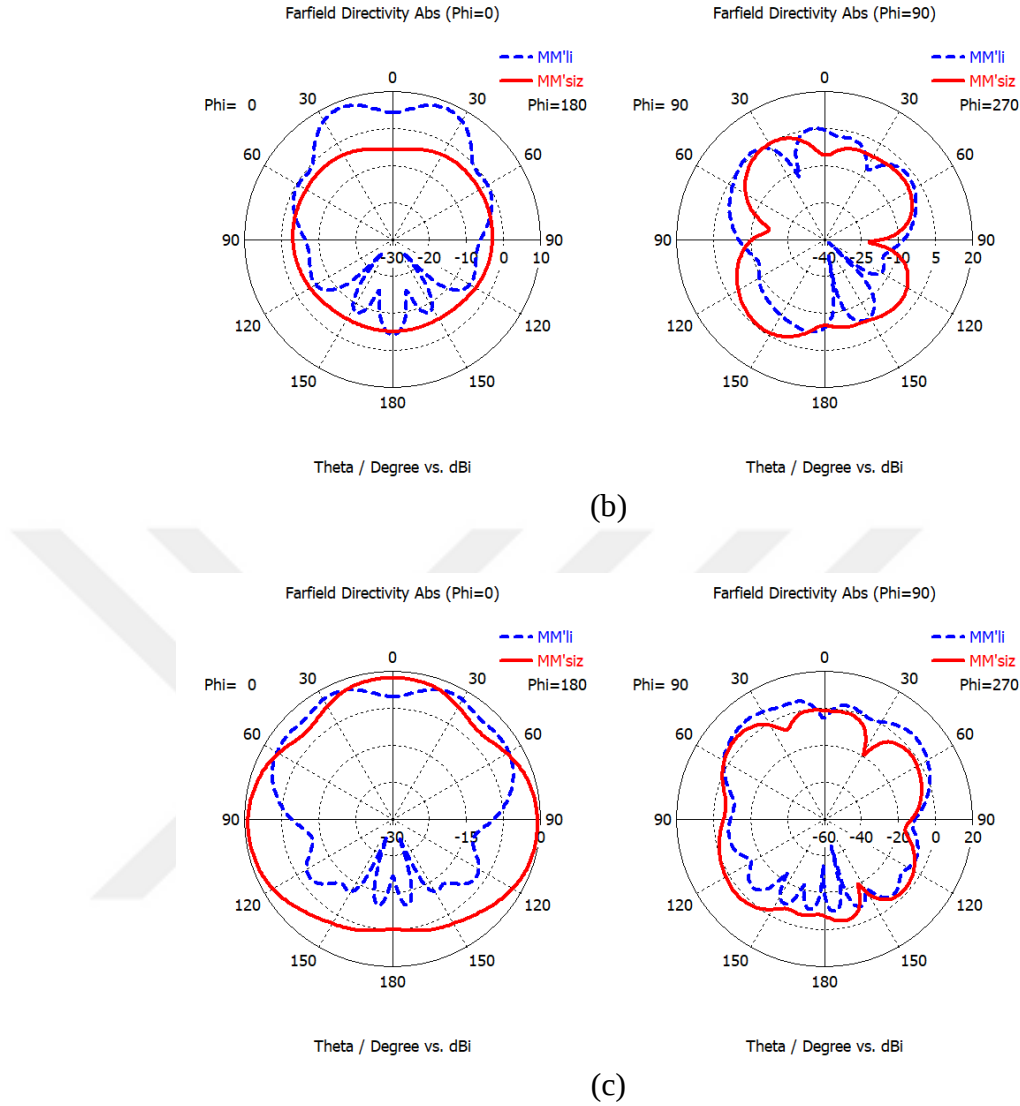


Şekil 4.51. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan FBR değerinin frekans ile değişimi.

MM'li ve MM'siz anten için simüle edilmiş ışıma örüntüleri Şekil 4.52'da karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Bu sonuçlar, MM entegre antenin ileri yönlülüğünün arttığını ve böylece antenin arka lob ışımasının azaldığını göstermiştir. Bu durum giyilebilir antenlerin düşük SAR değerli olması açısından önemlidir.



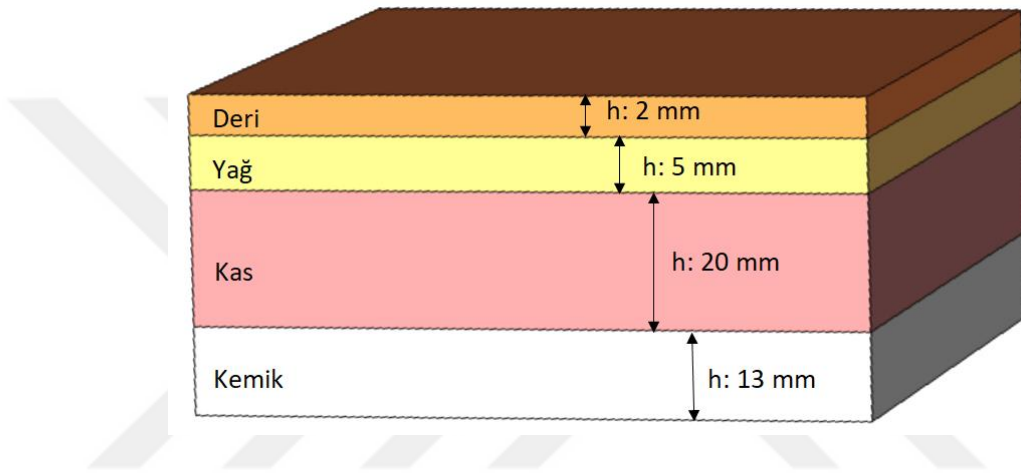
(a)



Şekil 4.52. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Φ : 0 ve Φ : 90) simülasyonlarda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz, (c) 10 GHz.

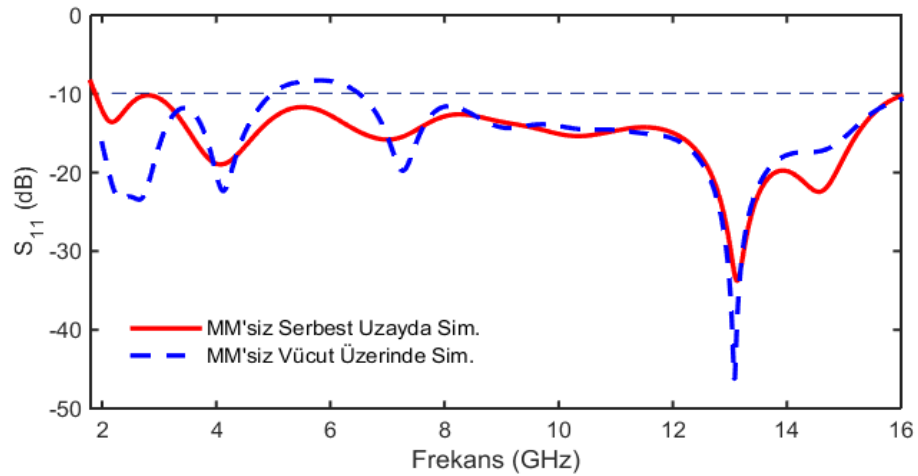
Giyilebilir antenler insan vücuduna yakın çalıştığından, anten ve vücut dokuları arasındaki etkileşimin dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Bu etkileşim, empedans uyumu, ışıma örüntüsü, kazanç ve yönlülük gibi anten performans parametrelerini etkiler. Antenden vücut doğrultusunda yayılan elektromanyetik dalgalar ise insan sağlığı üzerinde ciddi zararlar bırakabilir. Vücut üzerinde çalışan antenin yansıma katsayısı performans parametresini ve vücut üzerindeki SAR olarak isimlendirilen zararlı etkisini değerlendirmek için, CST simülasyon programında kübik bir vücut modeli oluşturulmuştur. Şekil 4.53'te gösterildiği gibi, vücut modeli, dıştan içe doğru sırasıyla 2,

5, 20 ve 13 mm kalınlığında cilt-yağ-kas-kemik dokuları içeren dört katmandan oluşmaktadır [164]. İnsan vücudu dokularının dielektrik özellikleri CST'deki malzeme kütüphanesinden seçilmiştir. Vücut modelinin toplam boyutları $100 \times 110 \times 40 \text{ mm}^3$ 'tür. Bu çalışmada, MM'li ve MM'siz antenin kübik vücut modeli üzerindeki yansıma katsayısı parametre performansı ve SAR etkisi CST ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Nesnel bir karşılaştırma olabilmesi için, anten ile vücut modeli arasındaki mesafe her iki durum için de 6,9 mm olarak sabit tutulmuştur.

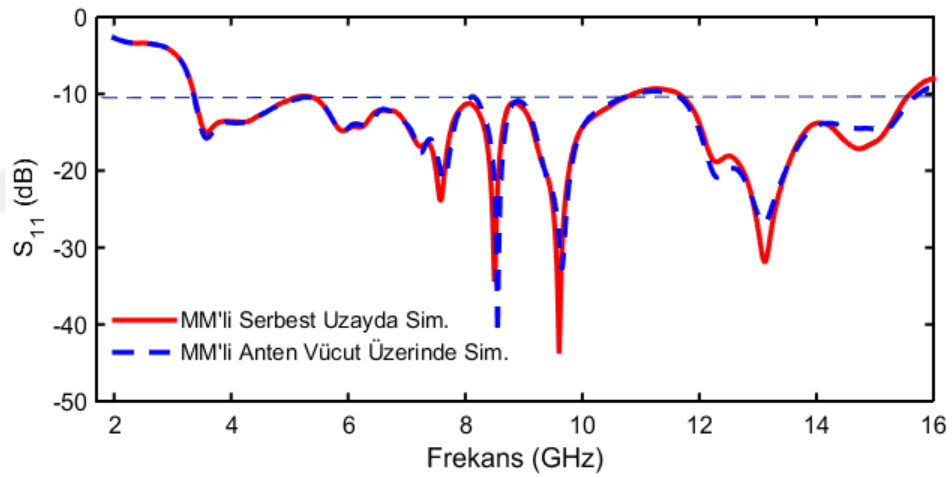


Şekil 4.53. Simülasyonlarda kullanılan kübik vücut dokusu modelinin perspektif görünümü.

Serbest uzayda ve kübik vücut modelinde MM'li ve MM'siz antenin simüle edilmiş yansıma katsayısı performans sonuçları, Şekil 4.54 ve 4.55'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Simülasyonun sonucu olarak, MM'siz antenin yansıma katsayısı, serbest alanda ve vücut üzerinde çok farklılık göstermiştir. MM'siz antenin yansıma katsayısı 5 - 6,5 GHz aralığında -10 dB üzerine aşmıştır. Sonuçta antenin çalışma frekans bandı değişmiş ve daralmıştır. Bunun nedeni antenin vücuttan etkilenmesidir. Buna karşın, MM'li antenin yansıma katsayısı, serbest uzayda ve vücut üstü modelde kararlıdır. Bunun nedeni, antenin MM tarafından vücuttan çok iyi izole edilmesidir.



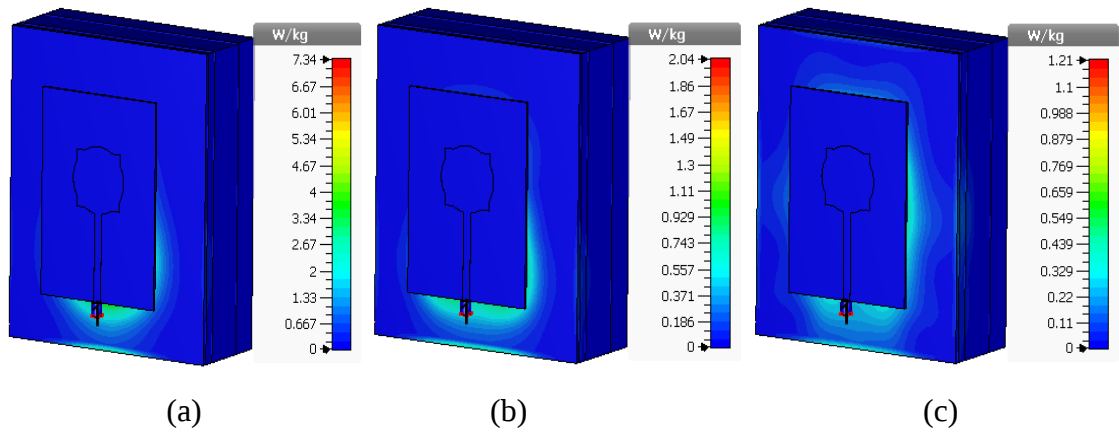
Şekil 4.54. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan anten için, serbest uzayda ve vücutta simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi.



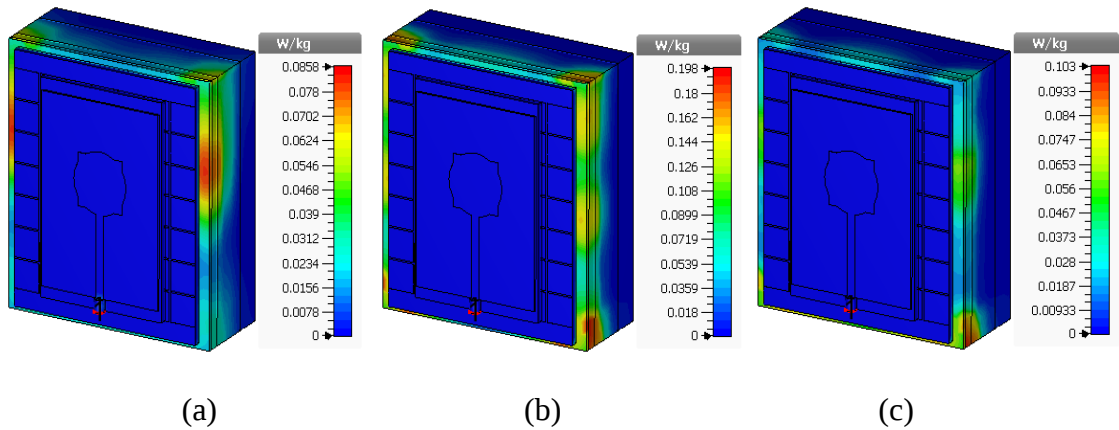
Şekil 4.55. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan anten için serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi.

MM'li ve MM'siz anten SAR değerleri, Avrupa standartları için Uluslararası İyonlaşma Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu'na (ICNIRP) göre vücut modeli üzerinde simülasyon programında hesaplanıp, sonuçlar analiz edilmiştir. Antenin giriş gücü 0,5 W'dir. Vücut üzerindeki SAR dağılımları 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için hesaplanmıştır. MM'li ve MM'siz antenin, yalnız vücut modeli üzerindeki SAR dağılımları, hesaplanan frekans için vücut üzerindeki maksimum SAR değerine göre renklendirme ölçeği kullanılarak gösterilmiştir (bkz. Şekil 4.56 ve Şekil 4.57). Şekil 4.56'da gösterildiği gibi, MM'siz anten vücut modeli üzerine yerleştirildiğinde 10 g doku

kütlesi için hesaplanan maksimum SAR değerleri 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için sırasıyla 7,34; 2,04 ve 1,21 W/kg'dır. Bu sonuçlardan 10 g doku için Avrupa standartları güvenlik sınırı 2 W/kg değerinin aşıldığı görülmüştür. Şekil 4.57'de gösterildiği gibi, MM'li anten vücut modeli üzerine yerleştirildiğinde 10 g doku için simülasyon programında hesaplanan maksimum SAR değerleri, 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekanslarında sırasıyla 0,086; 0,198 ve 0,103 W/kg'dır. Bu sonuçlardan MM'li antenin SAR değerlerinin oldukça düşük ve 10 g doku için Avrupa standartları güvenlik sınırı 2 W/kg değerine uygun olduğu görülmüştür. MM'li antenin simüle edilmiş tepe SAR değeri, MM olmayan antenin simüle edilmiş tepe SAR değerine kıyasla %97,4 oranında azalmıştır (Tablo 4.6). Antene MM entegre edilmesiyle anten vücuttan izole edilmiş ve SAR etkisi önemli bir ölçüde azaltılmıştır.



Şekil 4.56. Arkasında MM yapısı olmayan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz, (c) 10 GHz.



Şekil 4.57. Arkasında MM yapısı olan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz, (c) 10 GHz.

Tablo 4.6. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).

Antenin durumu	Frekanslar		
	4 GHz	7 GHz	10 GHz
MM'siz Anten	7,34 W/kg	2,04 W/kg	1,21 W/kg
MM'li Anten	0,086 W/kg	0,198 W/kg	0,103 W/kg

Önerilen MM'li anten ile literatürdeki MM'li referans antenlerin çalışma frekans bant genişliği, esneklik, ayak izi (iz düşümü), kalınlık (düşük profilli olma) ve kazanç özellikleri için bir karşılaştırma Tablo 4.7'de verilmiştir. Tablodan bu çalışmada önerilen antenin kazanç ve bant genişliği açısından çok avantajlı olduğu görünmektedir. Kazancı önerilen tasarımdan biraz daha yüksek olan ref. [169, 191, 192]'de yapılan çalışmalar, sert (ilave olarak [193]) ve yüksek profilli yapılar olduğu için giyilebilir antenler için uygun değildir. Ref. [170, 171, 174, 194–196]'deki diğer çalışmalar ise yazarlar tarafından giyilebilir uygulamalar için sunulmuştur. Ref. [171]'de yapılan çalışma, bu çalışmada önerilen tasarımdan daha geniş bir bant genişliğine sahip olmasına rağmen çok yüksek kalınlıktaki yapısından dolayı giyilebilir uygulamalar için en büyük dezavantajdır. Ref. [169,171,192]'den görülebileceği gibi, MM entegre edilmiş, düşük kalınlıkta, UWB anteni tasarlamak çok zordur. Önerilen anten bant genişliği açısından ref. [170, 174, 194–196], ayak izi açısından ref. [195], düşük profilli olma açısından ref. [171, 174, 194, 196] ve kazanç açısından ref. [170, 171, 174, 194–196] giyilebilir antenlerine göre daha fazla avantajlar sunar. Önerilen antenin boyutları, biraz büyük görünmesine rağmen, WBAN uygulamaları için literatürde sunulan antenlerin kalınlık ve ayak izi boyutlarının içerisinde olduğundan, antenin boyutları WBAN uygulamaları için çok büyük bir sorun olmayacağı düşünülmüştür. Tablo, özellikle bu özelliklerin tümü bir arada değerlendirildiğinde, önerilen antenin daha önce çalışılmış referans anten yapılarına göre daha iyi bir performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4.7. Literatürde bildirilen arkasında MM yapısı olan giyilebilir antenler ile önerilen anten tasarımıımızın çalışma frekansı bandı, alt taban tipi, boyutları ve tepe kazancı.

Ref. No	Çalışma Bandı (GHz)	Taban tipi	MM boyutları (mm)	MM'li Anten Kalınlığı (mm)	Tepe Kazancı (dB/dBi)
[194]	2,4 ISM	esnek	50 x 50 x 3	9,5	4,12 dBi
[174]	2,3-3/4-5,3	esnek	77 x 87 x 4	8	7,3 dB
[195]	2,45/ 5,5	esnek	102 x 102 x 3	7	5,2 dB
[191]	3,5-7	n/a	90 x 90 x 3	31,8	10,6 dB
[169]	5,75-14,51	sert	50 x80 x 2,4	4	10,65 dBi
[170]	5,7-11	esnek	46 x 46 x 3,5	5,8	8 dBi
[193]	4,2-8,1	sert	88 x 75 x 3,2	5,78	7,9 dB
[192]	2,6-12	sert	72 x 72 x 3,2	14,8	9,9 dBi
[196]	2,45 /5,8	esnek	42 x 63	8	7,8 dB
[171]	2,5-13,8	esnek	52,5 x 52,5 x 5	20	9 dB
Önerilen	3,5-12,4	esnek	91 x 105 x 3,6	7,9	9,1 dB

Bu çalışma sonucunda, UWB frekans bandında, düşük SAR değerli, esnek, MM entegreli, giyilebilir anten başarılı şekilde tasarlanıp üretilmiştir. Antenin ışıma performans parametrelerini artırmak ve insan vücudu ile anten arasındaki etkileşimi azaltmak için bir MM yapısı tasarlanmıştır. MM'li ve MM'siz antenin empedans uyumu karakteristikleri ve SAR değerleri, serbest alanda ve vücut üzerinde CST simülasyon programı ile başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Simüle edilen ve ölçülen yansıma katsayısı parametresi sonuçları, serbest alanda MM'li düzlemsel antenin UWB frekans bandını kapsayan geniş bir frekans bant genişliğine sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle MM ile antenin çalışma frekans bandının düşük frekansları tarafında, yönlendiriciliği artırılmış ve bunun sonucunda antenin arka lob yayılımı ve SAR değerleri azaltılmıştır. Ayrıca, anten MM üzerine yerleştirildiğinde, serbest alanda ve vücut üzerinde kararlı bir empedans uyumu sağlar. Maksimum SAR değerleri, 2 W/kg Avrupa güvenlik sınırlamalarının oldukça altındadır. MM'li antenin simüle edilmiş maksimum SAR değeri, MM olmayan antenin simüle edilmiş maksimum SAR değerine kıyasla %97,4 oranında azaltılmıştır. Antenin gerçekleşen maksimum kazancı MM yapı tarafından 4,6 dB'den 9,1 dB'ye yükselmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak, MM'li kompakt, UWB, düşük SAR ve yüksek yönlendiriciliğe sahip esnek giyilebilir anten WBAN uygulamaları için başarıyla tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu özellikler WBAN uygulamaları için önemli avantajlar

sağlar. Çalışmanın ve sonuçlarının UWB MM antenleri için literatüre önemli bir katkı sağlayacağı ve anten tasarımcılarına ışık tutacağı değerlendirilmektedir.

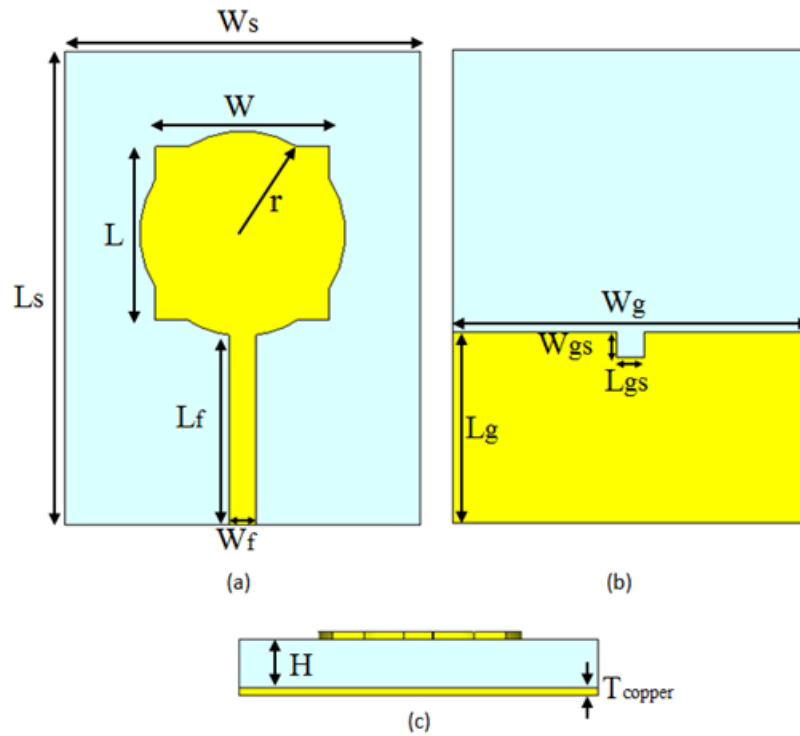
4.2.3. Tasarım 3

Bu çalışmada, WBAN uygulamaları için Tasarım 2'deki MM'li esnek bir giyilebilir tekstil UWB anteninin boyutları küçültülmüştür. Tasarımın ilk aşamasında simülasyon ortamında anten boyutları küçültülmüş ve arka kısmi zemin düzlemi daha basit hale getirilmiştir. Tasarlanan antenin yansıma katsayısı ve ışıma örüntüleri düzlemsel ve farklı yarıçaplardaki büküm koşullarında simülasyon ortamında analiz edilmiştir. Sonuçlardan antenin empedans uyumunun ve ışıma örüntülerinin düzlemsel ve büküm durumlarında iyi olduğu görülmüştür. Daha sonraki ikinci aşamada tasarlanan antene I şeklinde birim hücreli MM yapısı entegre edilmiş ve antenin simülasyon ortamındaki dielektrik özellikleri prototipinin üretiminde kullanılacak kot kumaşı için kısmi olarak değiştirilmiştir. Bu aşamada tasarlanan arkasına MM entegre edilmiş antenin toplam boyutları, tasarım 2'deki boyutlardan küçüktür. Tasarlanan antenin, MM'li ve MM'siz olarak serbest alanda ve insan vücut modeli üzerindeki performansı, ilk önce üç boyutlu (3B) elektromanyetik (EM) simülasyon ortamında karşılaştırmalı araştırılmıştır. Sonuçlar, tasarlanan MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle antenin kazanç, yönlülük ve önden arkaya oran (FBR) performans parametrelerinin önemli ölçüde artarken, antenden vücuda doğru yayılan elektromanyetik dalgalar ile insan vücudu arasındaki etkileşim önlenmiştir. Tasarlanan anten ve MM yapısı başarıyla üretilmiş ve ölçümler de alınmıştır. Ölçüm sonuçları simülasyonlarda hesaplanan sonuçlarla iyi bir uyum içindedir. Sonuç olarak elde edilen sonuçlar, önerilen antenin performans özelliklerinin ve tepe SAR değerlerinin giyilebilir uygulamalar için uygun ve güvenli olduğunu göstermiştir.

Anten Tasarımı

Bu çalışmada, WBAN uygulamaları için UWB tekstil anten tasarımı ve düzlemsel ve çeşitli bükülme koşulları için yansıma katsayısı ve ışıma deseni parametrelerinin simülasyon sonuçlarının performans analizi karşılaştırılması sunulmaktadır. Anten boyutları 45 mm × 60 mm × 1 mm'dir. Sunulan anten 2,2 GHz ila 17 GHz frekans aralığında çalışır ve UWB frekans bandını kapsar. Anten simülasyon sonuçları CST simülasyon yazılımı ile elde edilmiştir.

Tasarlanmış antenin ön, arka ve yan geometrik görünümünün ayrıntılı parametrik boyutları Şekil 4.58’de gösterilmiştir. Tasarımda, 1 mm kalınlıkta, esnek, düşük dielektrik sabitinde (ϵ_r) 1,68, kayıp tanjantı ($\tan\delta$) 0,01 olan kot tekstil malzemesi alt taban olarak seçilmiştir. Antenin ışıma yaması ve toprak düzlemi gibi iletken katmanları için, 0,02 mm kalınlığa sahip bakır bant seçilmiştir. Şekil 4.58 (a), antenin önden görünümünün ışıyan yamasını ve besleme hattı yapısını gösterir. Anten, 50 Ω SMA portu bağlantısı ile empedans uyumu için mikroşerit besleme hattı boyutları $W_f \times L_f$ (3,5 mm $\times$ 24,25 mm) olarak belirlenmiştir. Antenin ışıma yaması, kare ve dairesel geometrilerin birleşimi bir geometrik yapıya sahiptir. Şekil 4.58 (b), antenin arkasındaki $W_g \times L_g$ boyutlarında kısmi toprak düzlemini göstermektedir. Toprak düzleminde $W_{gs} \times L_{gs}$ boyutlarında bir yarık oluşturuldu. Nihai optimize edilmiş antenin ayrıntılı geometrik parametreleri Tablo 4.8’de verilmiştir.[197]



Şekil 4.58. Geometrik parametrelerle birlikte önerilen anten mimarisi: (a) ön, (b) arka, (c) alt yan görünümü.

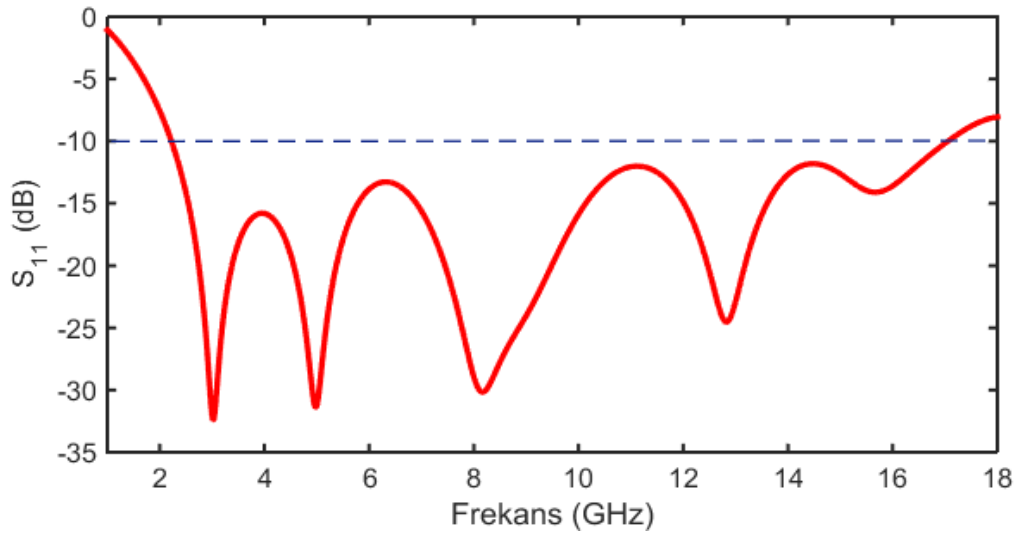
Tablo 4.8. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).

W_s	L_s	W	L	r	W_f	L_f	W_g	L_g	W_{gs}	L_{gs}	H	T_{copper}
45	60	22	22	13	3,5	24	45	24,25	3,6	3,25	1	0,02

Simülasyon Sonuçları

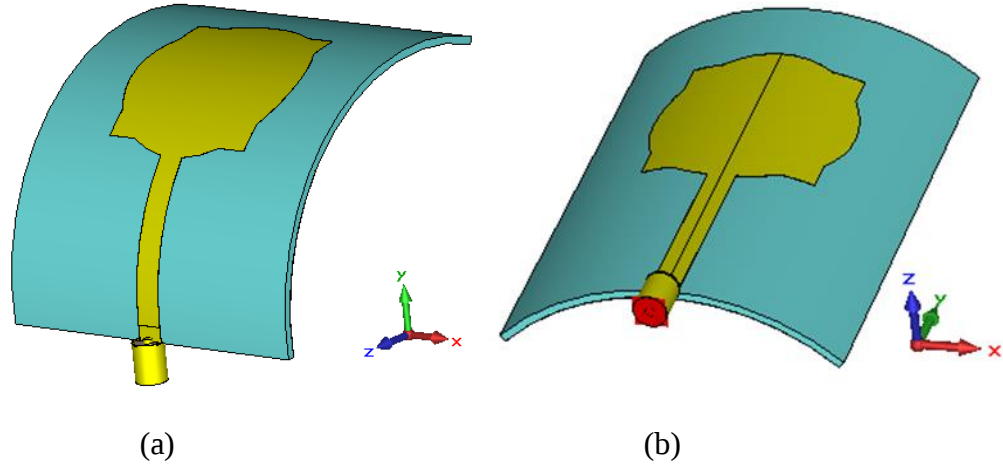
Anten performans parametrelerinin dönüş kaybı parametresi tasarım için öncelikli parametre olarak kabul edilmiştir ve anten, düzlemsel koşullar için tasarlanmıştır. Bu parametre başarıyla elde edildikten sonra diğer parametrelerin performansı değerlendirildi. Antenin esnekliğinden dolayı hem düzlemsel hem de bükülme koşulları için serbest alanda anten performans (yansıma katsayısı ve ışıma örüntüsü) parametreleri araştırılmıştır.

Şekil 4.59, antenin düzlemsel koşulları için simülasyonun sonucu olarak elde edilen frekans karşılığı yansıma katsayısı grafiğini göstermektedir. Bu sonuç, önerilen antenin 2,2 GHz ile 17 GHz frekansı arasında geniş bir bant üzerinden çalıştığını ve UWB (3,1-10,6 GHz) frekans aralığını kapsadığını göstermektedir.



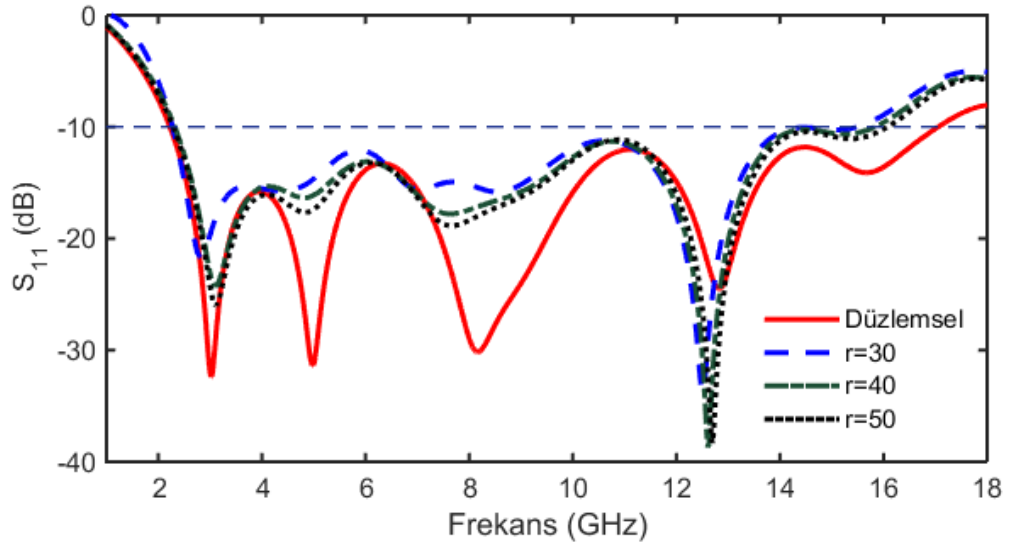
Şekil 4.59. Düzlemsel antenin simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi.

Giyilebilir tekstil antenler esnek olduğu için insan vücudu üzerinde farklı çaplarda farklı şekillerde bükülebilirler ancak bu bükülme koşullarında antenin maksimum performansını sürdürmesi önemlidir. Bu çalışmada antenin x-ekseni ve y-eksenindeki 30 mm, 40 mm ve 50 mm yarıçap değerleri için bükülme performansı simülasyon ile analiz edilmiştir. Şekil 4.60, sırasıyla y-ekseninde ve x-ekseninde bükülmüş esnek bir tekstil antenin konfigürasyonunu göstermektedir.



Şekil 4.60. Antenin (a) y-ekseninde ve (b) x-ekseninde bükülme konfigrasyonu.

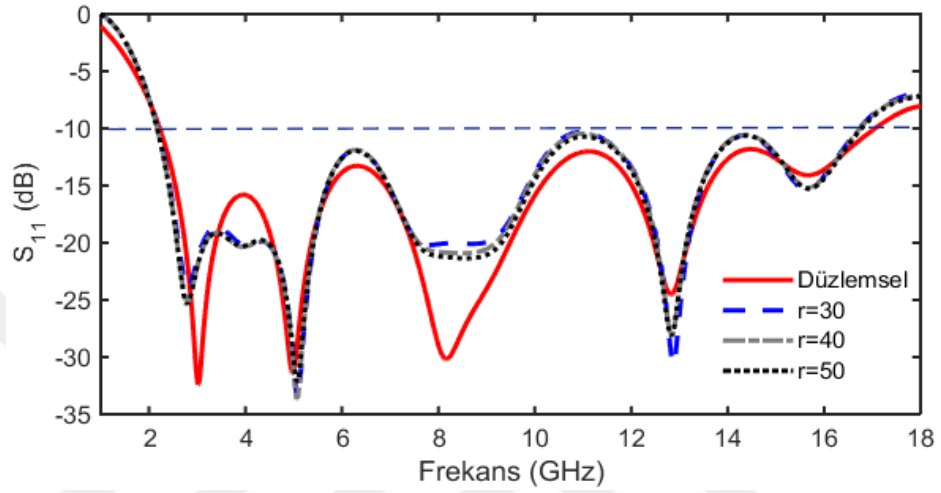
Şekil 4.61, düzlemsel (bükülme yok iken) ve antenin 30 mm, 40 mm, 50 mm yarıçap değerlerinde y-ekseninde bükülme durumları için simülasyonlarda hesaplanan frekansa karşılık yansıma katsayısı S_{11} parametresi değişimi karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Şekil 4.61'e göre anten bükülme seviyesindeki artışa karşılık anten çalışma frekans bant genişliği üst frekans bölgesinden 1-1,5 GHz civarında azalmıştır. Bununla birlikte, anten, UWB frekans bandını kapsayan çok geniş bir çalışma frekans bant genişliğine sahiptir.



Şekil 4.61. Antenin y -ekseninde farklı yarıçaplarda bükülmeleri için simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi karşılaştırması.

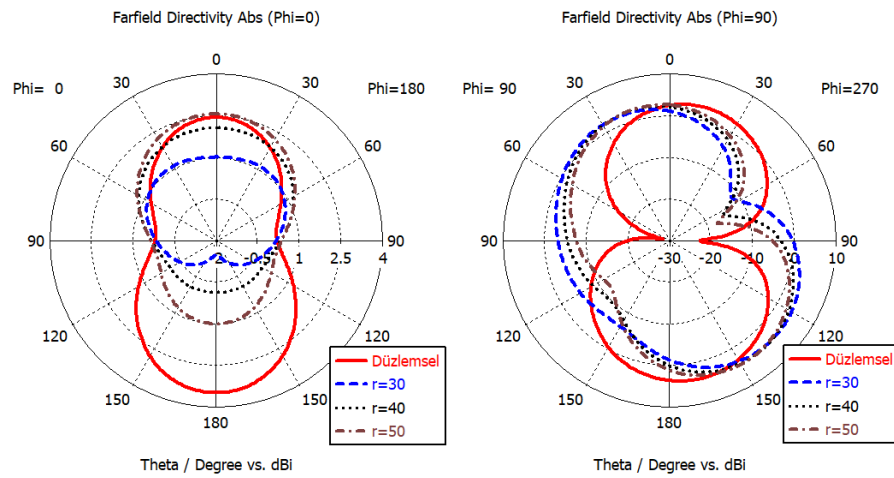
Şekil 4.62, düzlemsel (bükülme yok iken) ve antenin 30 mm, 40 mm, 50 mm yarıçap değerlerinde x-ekseninde bükülme durumları için simülasyonlarda hesaplanan frekansa

karşılık yansıma katsayısı S_{11} parametresi değişimi karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Şekil 4.62'den, antenin x-ekseninde bükülmeleri için, antenin çalışma frekansı bandını ve bant genişliğini büyük ölçüde koruduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre, antenin x-ekseni veya y-ekseni bükülme koşullarında bile çok geniş bir çalışma frekansı bant genişliğine sahiptir. Yani anten UWB frekans bandında çalışmaktadır.

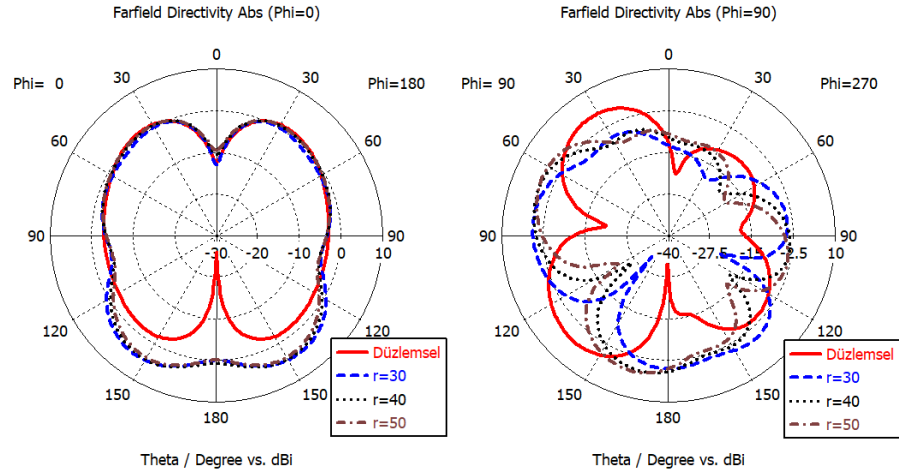


Şekil 4.62. Antenin x-ekseninde farklı yarıçaplarda bükülmeleri için simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi karşılaştırması.

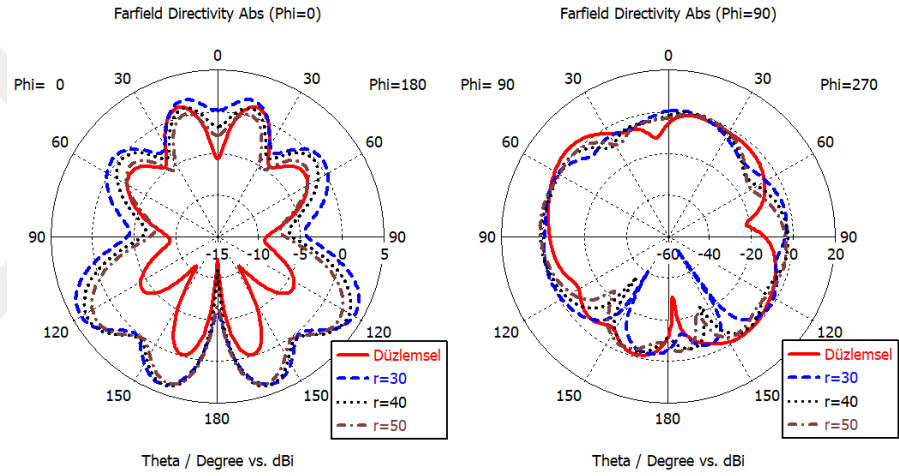
Şekil 4.63, antenin düzlemsel ve y-eksenindeki bükülme durumlarına göre farklı frekanslar için simülasyonlarda hesaplanan ışıma örüntülerini ($\phi=0$ ve $\phi=90$) karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



(a)



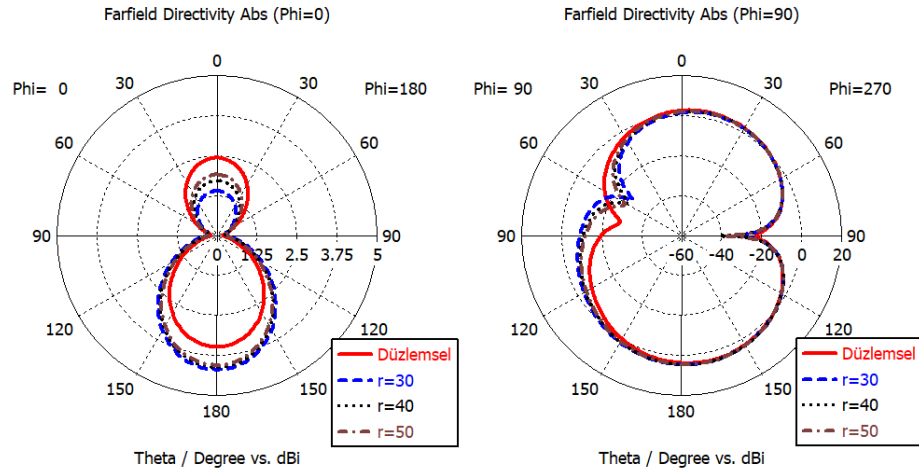
(b)



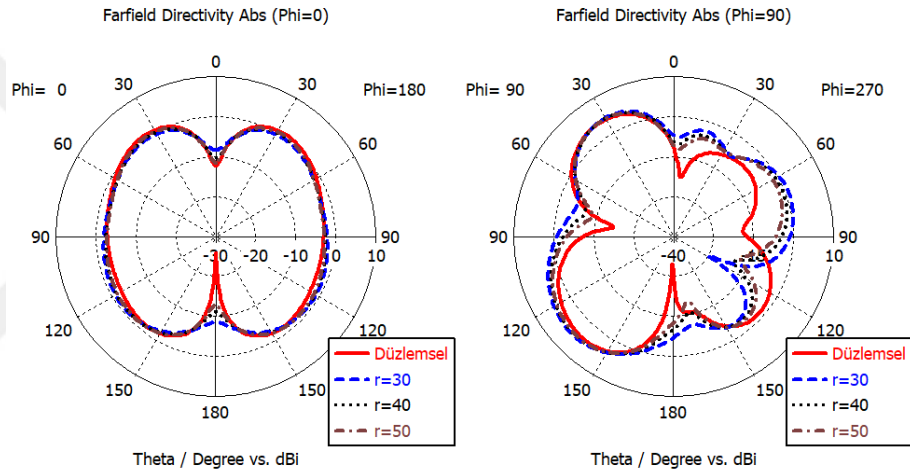
(c)

Şekil 4.63. Tekstil antenin farklı frekanslarda y-ekseninde farklı yarı çaplarda bükülme durumları için kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Phi: 0 ve Phi: 90) ışıma örüntüleri karşılaştırması: (a) 3,5 GHz, (b) 8 GHz, (c) 13GHz.

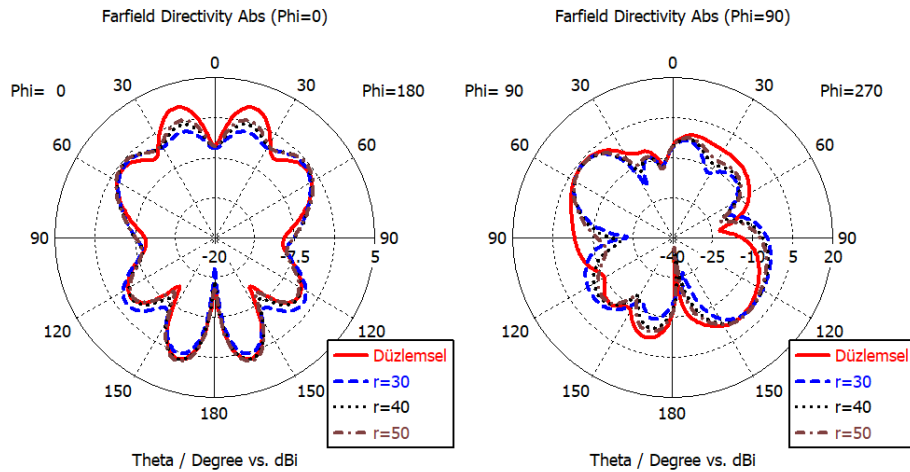
Şekil 4.64, antenin düzlemsel ve x-eksenindeki bükülme durumlarına göre farklı frekanslar için simülasyonlarda hesaplanan ışıma örüntülerini (phi:0 ve Phi:90) karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Şekil 4.63 ve Şekil 4.64, sonuçlarından antenin düzlemsel durumuna göre, antenin x veya y eksenindeki bükülme durumlarında ışıma örüntülerinde bir değişiklik olduğu görülmektedir. Ancak bu değişikliğin antenin ışıma performansı üzerinde büyük bir etkisi yoktur. Öte yandan, anten x-ekseninde büküldüğündeki, ışıma performansı kararlılığı y-ekseninde büküldüğündeki performansından daha iyidir.



(a)



(b)



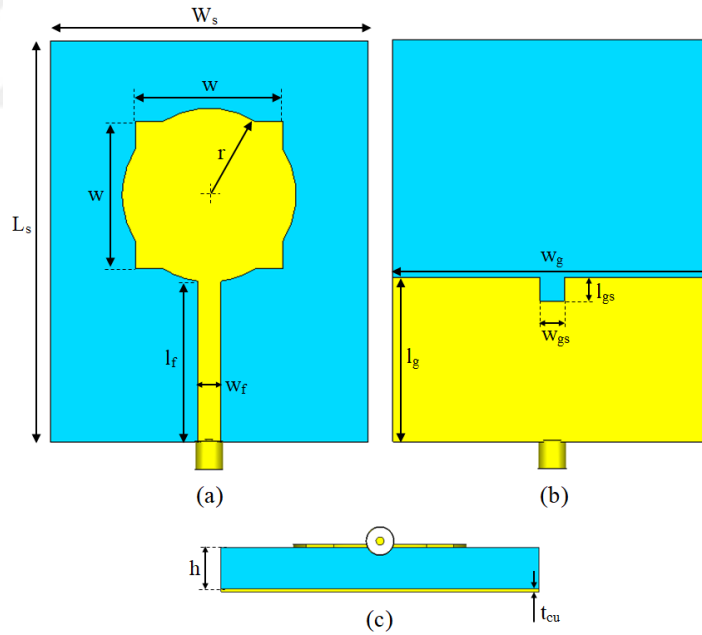
(c)

Şekil 4.64. Tasarlanan tekstil antenin farklı frekanslarda x-ekseninde farklı yarı çaplarda bükülme durumları için kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Phi: 0 ve Phi: 90) ışınma örüntülerinin karşılaştırması: (a)3,5 GHz (b) 8 GHz (c) 13GHz.

Bu çalışmada, WBAN uygulamalarında kullanılabilecek esnek, tekstil UWB mikroşerit anten tasarlanmış ve anten düzlemsel ve x ve y eksenlerindeki bükülme durumları için, CST MWS simülasyon yazılım programı ile performansı elde edilmiştir. Sonuçlar, antenin düzlemsel durumda UWB (3,1-10,6 GHz) frekans aralığını kapsayan 2,2 ve 17 GHz frekans aralığında geniş bir bantta çalıştığını göstermektedir. Antenin bükülme durumlarındaki, S_{11} ve ışıma örüntüsü parametrelerinin performansının iyi olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle anten x-ekseninde büküldüğündeki performansı, antenin y-eksenindeki bükülme performansından daha iyidir.

Anten ve Metamalzeme Yapı Tasarımları

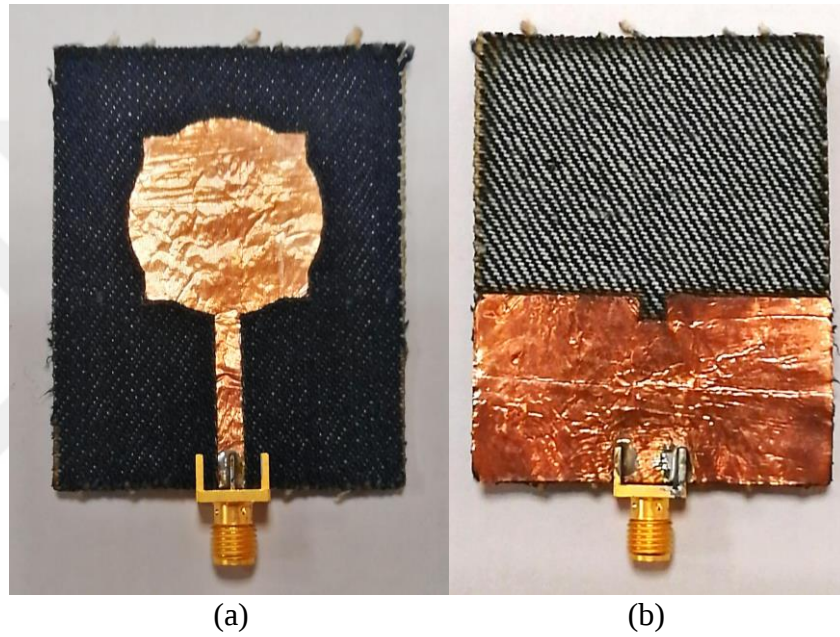
Bu çalışma Şekil 4.58’de simülasyon ortamında tasarlanan mikroşerit anten elimizdeki dielektrik kot kumaşına uygun olarak elektriksel özelliklerinde ve boyutlarında çok az bir değişiklikler yapılmıştır. Şekil 4.65, önerilen anten tasarımının CST’deki optimize edilen geometrisini göstermektedir.



Şekil 4.65. Geometrik parametrelerle birlikte (a) ön, (b) arka, (c) alt yan görünümünden önerilen anten mimarisi.

Anten, $47,5 \times 60 \times 1 \text{ mm}^3$ boyutlarında, 1,7 dielektrik sabitine ve 0,026 kayıp tanjantına sahip denim kot kumaşı üzerine tasarlanıp üretilmiştir. Antenin ışıma yapan yaması ve toprak düzlemi için $5,88 \times 10^7 \text{ S/m}$ iletkenliğe ve 0,035 mm kalınlığa sahip bakır bant

kullanılmıştır. Bakır bant yapışkan yüzeyinin dielektrik geçirgenliği hesaba katılmamıştır. Anten yama geometrisi, bir önceki yapıda olduğu gibi dairesel ve kare şekillerin bir birleşimidir. Anten ön yüzeyindeki mikroşerit besleme hattının (w_f) genişliği, hattın karakteristik empedansının 50Ω SMA konektörüne empedans uyumu için 3,5 mm genişliğinde belirlenmiştir. Şekil 4.66, WBAN uygulamaları için tasarlanan antenin prototip olarak üretilmişini göstermektedir. Önerilen antenin optimize edilmiş geometrik boyutları Tablo 4.9’da verilmiştir.



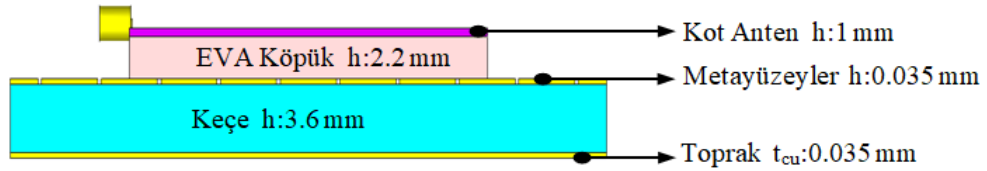
Şekil 4.66. Önerilen antenin optimize edilmiş geometrik parametrelere sahip olacak şekilde üretilmiş anten prototipi: (a) ön, (b) arka görünüm.

Tablo 4.9. Önerilen antenin optimum geometrik parametreleri (mm).

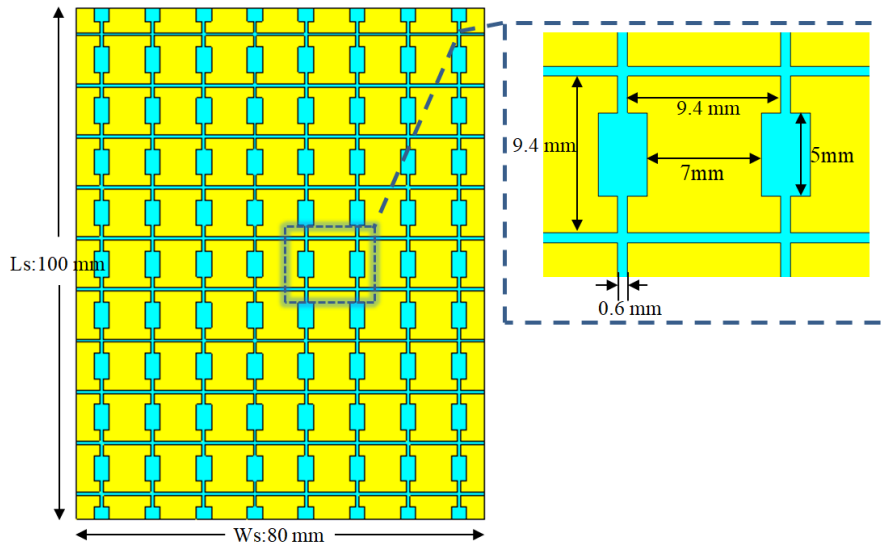
W_s	L_s	w	r	w_f	l_f	W_g	L_g	W_{gs}	L_{gs}	h	t_{cu}
47,5	60	22	13	3,5	24	47,5	24,5	3,6	3,25	1	0,035

Antenin, arka lob ışımasını azaltmak, kazancını ve yönlendiriciliğini arttırmak için için antenin arkasına yansıtıcısı olarak MM yapı tasarlanmıştır. Özellikle, antenden yayılan elektromanyetik dalgalar vücut dokularına zararlı olabilir. MM yapı, bu SAR etkisini standartların uygun gördüğü insan sağlığı güvenliği eşik değerlerinin altına düşürmek için tasarlanmıştır. MM yapının tasarımı, MM’li antenin yansıma katsayısı (S_{11}) parametresi göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Yansıma katsayısı, anten girişindeki gücün ne kadarının anten empedans uyumsuzluğu nedeniyle yansıdığını ve anten tasarımında anten

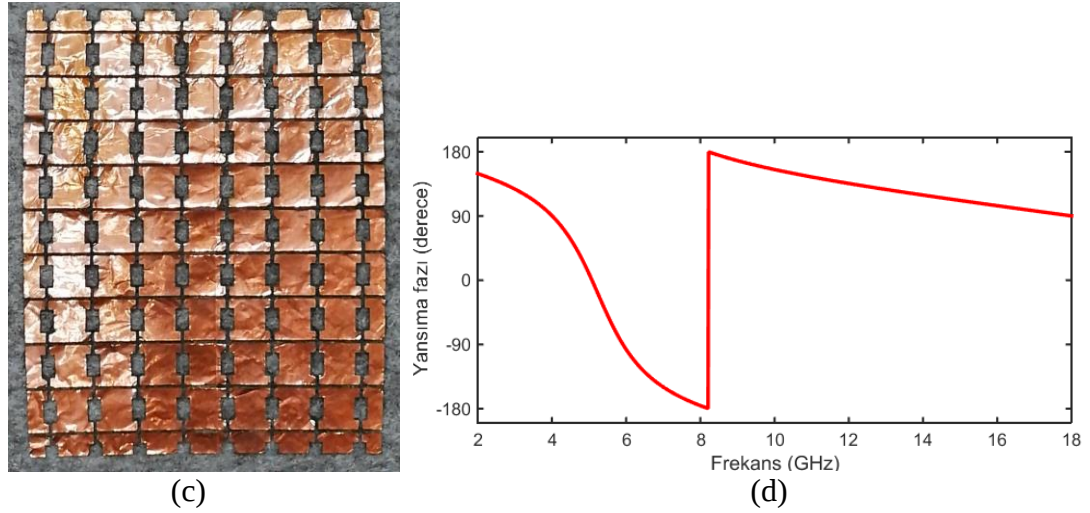
empedansını eşleştirme ve çalışma frekansı bandını değerlendirmek için kullanılan bir parametredir. Şekil 4.67 (a), MM üzerine yerleştirilen antenin yandan görünüşünü göstermektedir. Tasarımda anten ile MM arasındaki mesafeyi sabitlemek ve elektriksel teması önlemek için ayırıcı olarak 2,2 mm kalınlığında EVA köpük dielektrik ($\epsilon_r=1,2$; $\tan\delta=0,005$) malzeme yerleştirilmiştir. Şekil 4,67 (a), yandan kesit görünümünden görüldüğü gibi, MM yapısı iki metalik (metayüzey ve toprak düzlemi) katman ve aralarında bir dielektrik keçe taban olmak üzere üç katmandan oluşur. Metalik katmanlar için 0,035 mm kalınlığında bakır bant kullanılmıştır. MM yapısı $100 \times 90 \times 3,6 \text{ mm}^3$ boyutlarında, 1,45 dielektrik sabiti ve 0,044 teğet kaybı olan keçe taban malzemesi üzerinde tasarlanmıştır. Önerilen metayüzey yapısının geometrisi Şekil 4.67. (b)'de gösterilmektedir. Metayüzey birim hücresi I biçiminde bir geometri seçilmiştir. Üretilen MM'nin prototipi Şekil 4.67 (c)'de gösterilmektedir. Optimum MM için simüle yansıma faz açısı grafiği, Şekil 4.67 (d)'de verilmiştir. CST'deki MM birim hücre modeli, birim hücre periyodik sınır koşulları ve floquet portlu normalden gelen elektromanyetik dalgaya açısı olarak ayarlanmıştır.



(a)



(b)



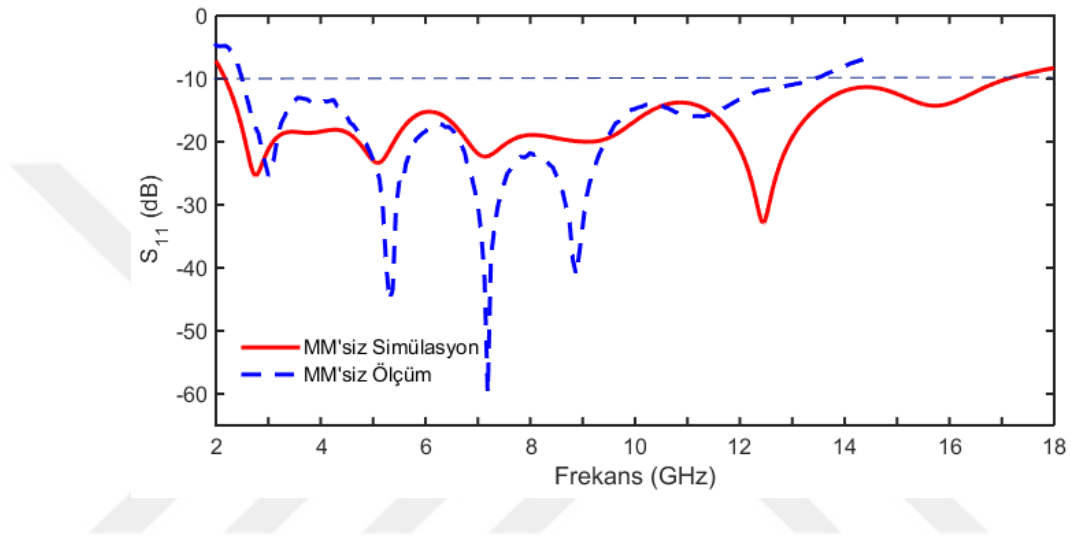
Şekil 4.67. (a) Arkasına MM olan anten yapısı katmanlarının yandan görünüşü, (b) ayrıntılı birim hücre geometrisi ile I şeklinde birim hücrelerinden oluşan önerilen meta yüzey yapısı, (c) tasarlanan MM yapısının üretilen prototipi. (d) yansıma fazı açısının frekans ile değişimi.

Simülasyon ve Ölçüm Sonuçları

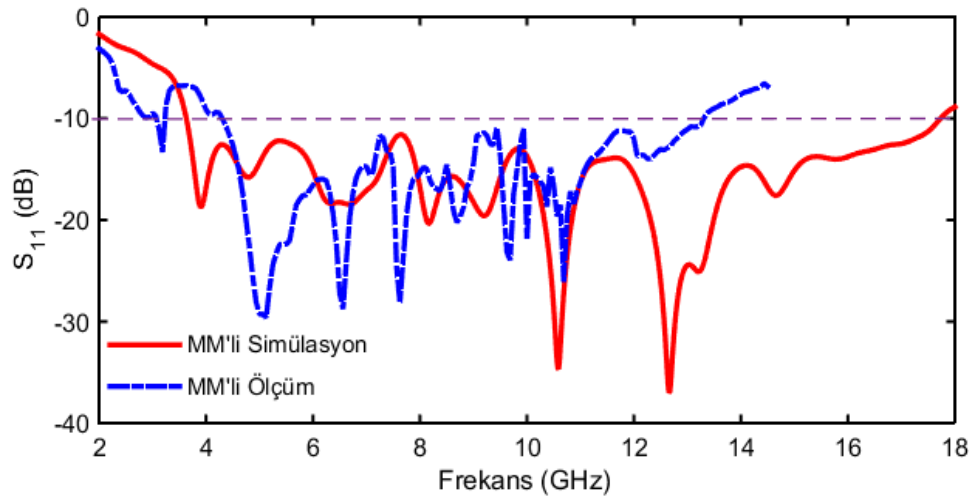
MM yapısı olmayan antenin analizleri, üç boyutlu (3B) EM analiz yazılımı ile yansıma katsayısı S_{11} simülasyonları ile başlatılmıştır. Simülasyonlardan sonra, MM yapısı olmayan antenin yansıma katsayısı S_{11} , vektör ağ analizörü (Anritsu MS4644B model) ile ölçüldü. Simülasyonlarda hesaplanan ve ölçülen antenin S_{11} değerlerinin frekansla değişimi Şekil 4.68’de gösterilmektedir. Bazı frekanslarda yansıma katsayısındaki küçük değişikliklere ve rezonans frekansındaki kaymaya rağmen, yine de hesaplanan ve ölçülen yansıma katsayısı değerleri iyi bir uyum içerisindedir. Buna ilave olarak, daha da önemlisi, UWB frekans bölgesini kapsayan empedans bant genişliği ($S_{11} \leq -10$ dB) hem simülasyon hem de ölçümde korunur. Şekil 4.68’de ki simülasyon sonuçlarından antenin 2,2 GHz ile 17 GHz’e kadar ve ölçüm sonuçlarından antenin 2,5 GHz’den 13,4 GHz’e kadar uzanan geniş bir frekans bandına sahip olduğu görülmektedir.

Bundan sonra, antenin simülasyonları ve ölçümleri Şekil 4.67 (a)’da gösterildiği gibi antenin arkasına yerleştirilen MM yapısı ile tekrarlandı. Şekil 4.69, MM ile önerilen antenin ölçülen ve simüle edilen S_{11} yansıma katsayısı parametresini göstermektedir. MM yapısına sahip antenin UWB frekans bölgesinde geniş bir çalışma bant genişliğine sahip olduğu S_{11} eğrilerinden anlaşılmaktadır. MM’li tasarlanmış antenin yansıma katsayısı

S_{11} 'in -10 dB'ye eşit veya daha düşük olduğu simüle edilmiş empedans bant genişliği 3,6 GHz'den 17,7 GHz frekansına uzanırken, ölçümlerde empedans bant genişliği 4,3 GHz'den 13,4 GHz'ye uzanır. Şekil 4.69, MM'li tasarlanmış antenin bant genişliğinin biraz daralmış olmasına rağmen, antenin UWB frekans bölgesinde 4,3 GHz'den 13,4 GHz'e kadar uzanan 9,1 GHz frekans bant genişliğine, yani antenin yine de çok geniş bir bant (UWB) genişliğine sahip olduğunu göstermektedir.

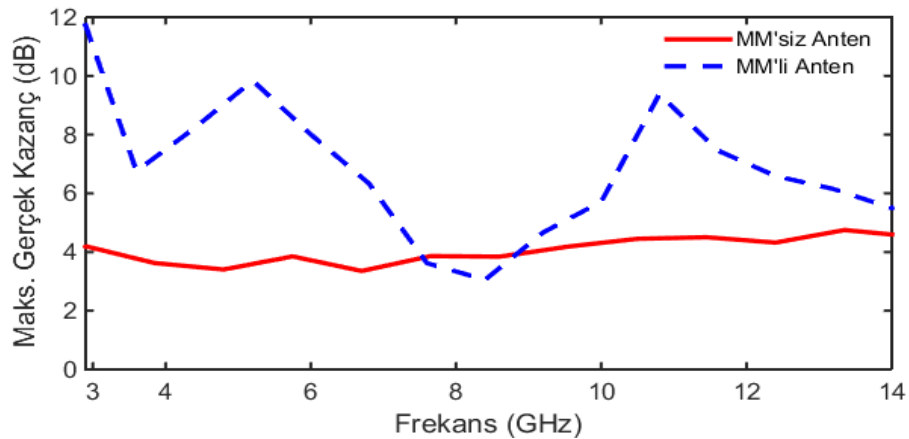


Şekil 4.68. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.



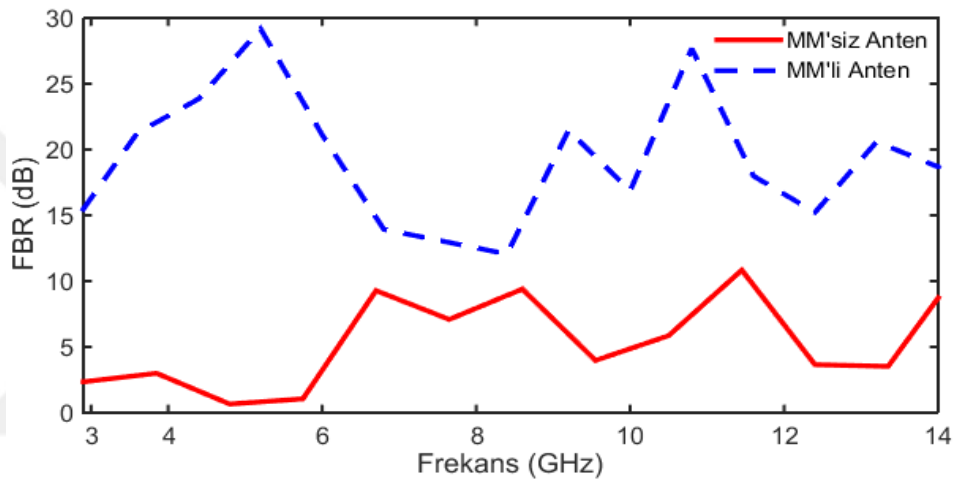
Şekil 4.69. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

Yansıma katsayısı simülasyonları ve ölçümleri elde edildikten sonra, anten arkasına yerleştirilmiş MM yapısı olan ve olmadan tasarlanan antenin maksimum gerçek kazancı, FBR ve ışınma örüntüleri için analizler yapılmıştır. Önerilen antenin arkasında MM yapısı ile ve MM yapısı olmadan çalışma frekans bandı için simülasyonlarda hesaplanan maksimum gerçek kazancı Şekil 4.70’te gösterilmiştir. Şekil 4.70’ten görüldüğü gibi, çalışma frekans bandında MM yapısı olmayan antenin maksimum gerçek kazancı değeri 3,35 ile 4,73 dB arasında değişirken, arkasında MM yapısı olan antenin maksimum gerçek kazancı değeri 3 dB ile 9,95 dB arasında değişmektedir. Antene MM entegre edilmesiyle antenin en yüksek maksimum gerçek kazancı değeri önemli ölçüde artmış ve anten kazancı 4,73 dB’den 9,95 dB’ye yükselmiştir. Şekil 4,70’ten, çalışma frekans bandındaki bazı frekanslar haricinde, tasarlanan MM yapının antenin arkasına yerleştirilmesiyle, antenin elde edilen maksimum kazancının genelde arttığı görülmektedir. Ancak MM yapı ile antenin kazancı çok az olsada 7,55 GHz ve 8,83 GHz aralığındaki frekanslarda, MM yapısı olmayan antenin kazancının altına düşmektedir. 7,55 GHz ve 8,83 GHz frekans aralığında antenin maksimum gerçek kazancındaki azalma, belirtilen frekans aralığının tasarlanan MM’nin etkin frekans aralığının dışında olması ve MM yapıda kullanılan keçe taban malzemesi, anten ile MM yapı arasına yerleştirilen EVA köpük dielektrik ayırıcı parçasının kayıplarından kaynaklandığı düşünülmektedir. MM’nin etkili frekans aralığı, yansıma fazı açısının -90° ile $+90^\circ$ arasında olduğu frekans aralığıdır (bkz. Şeki4.67 (d)). Bununla birlikte, arkasında MM yapısı bulunan tasarım antenin gerçek kazancı 8,4 GHz frekansında minimum 3 dB olarak hesaplanmıştır.



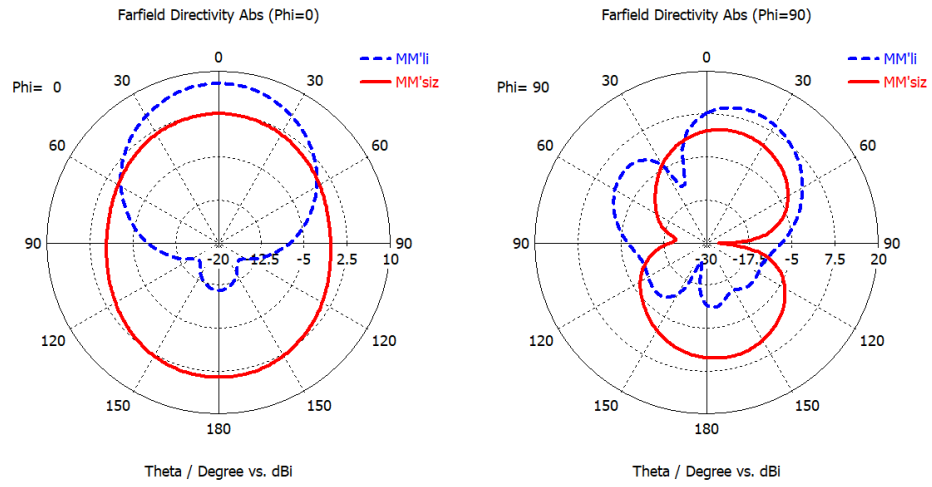
Şekil 4.70. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan maksimum gerçek kazancın frekans ile değişimi.

Şekil 4.71’de ise, serbest uzayda MM yapısı olan ve olmayan önerilen anten için simülasyonlarda hesaplanan çalışma frekansı bandı üzerinden FBR değerinin değişimleri sunulmaktadır. Eğrilerden, tasarlanan MM yapı, antenin arkasına entegre edildiğinde, artan anten ileri yönlülüğü ve azalan arka lob ışıması nedeniyle FBR değerinin tüm çalışma frekansı bandında önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, çalışma frekans bandında MM yapısı olmayan önerilen antenin FBR değeri 0,6 dB ile 10,8 dB arasında değişirken, arkasında MM yapısı olan antenin FBR değeri 12 dB ile 29,3 dB arasında değişmektedir.

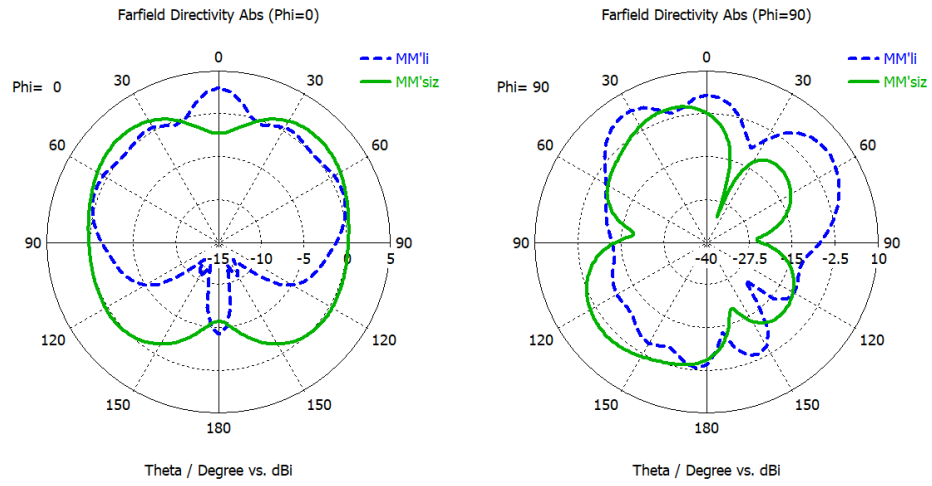


Şekil 4.71. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan FBR değerinin frekans ile değişimi

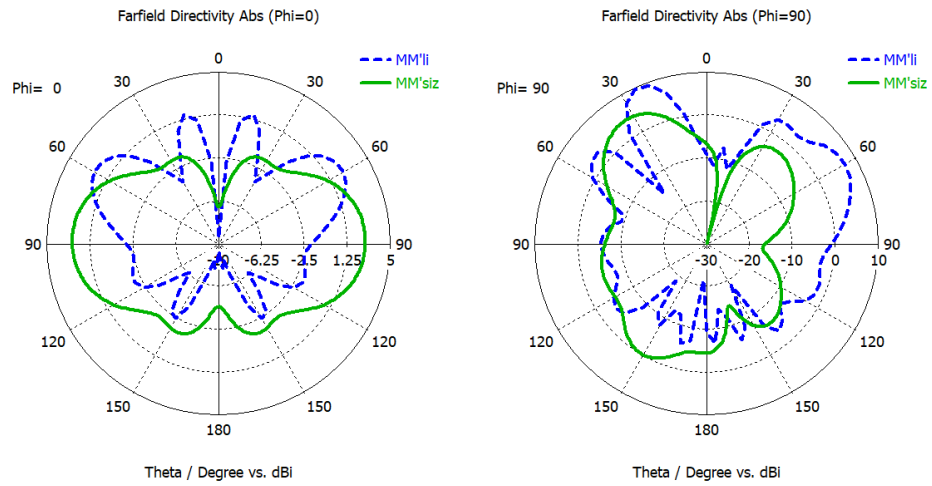
MM ile ve MM olmadan önerilen antenin simülasyon ışıma örüntü desenleri, Şekil 4.72’de 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için sunulmuştur. Işıma örüntüleri karşılaştırıldığında, antene MM entegre edilmesi, antenin yönlülüğünü arttırmıştır ve antenin arka lob yayılımı da yönlülük arttıkça azalmıştır. Bunun sonucu olarak EM dalgaların vücuda nüfuzu azalacaktır. Çünkü vücut tarafından emilen EM dalgaları geri yönde yayılım ile orantılıdır



(a)



(b)

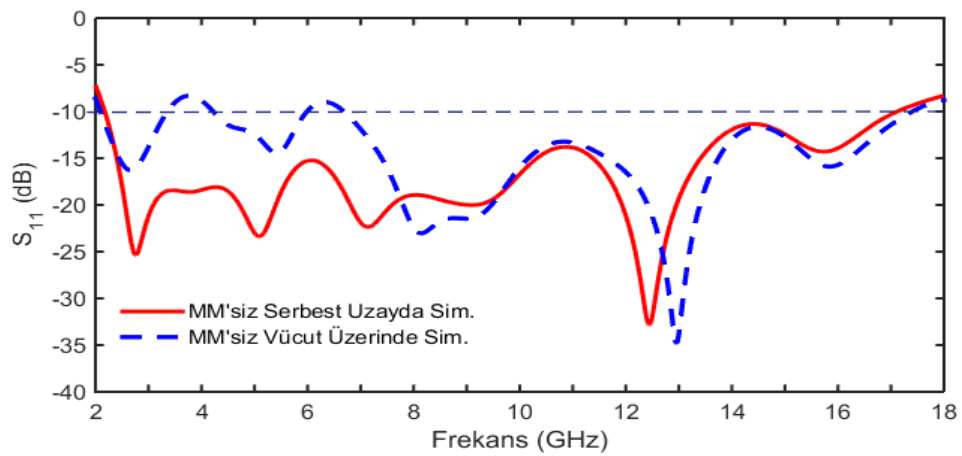


(c)

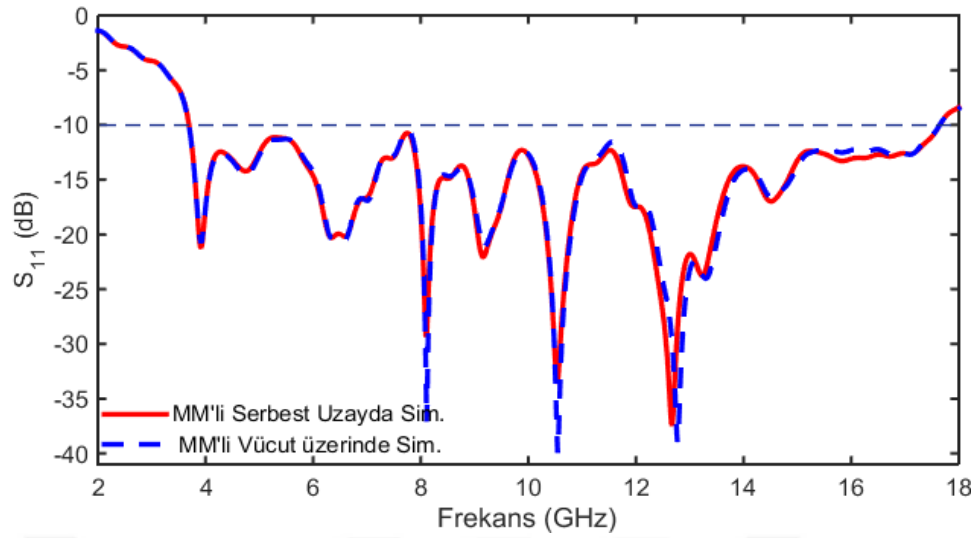
Şekil 4.72. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Phi: 0 ve Phi: 90) simülasyonlarda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 10 GHz frekansında

Vücut üzerinde çalışan antenin yansımaya katsayısı performans parametresini ve vücut üzerindeki SAR olarak isimlendirilen zararlı etkisini değerlendirmek için, CST simülasyon programında kübik bir vücut modeli (Şekil 4.53) daha önce oluşturulmuştu. Daha önce Şekil 4.53'te gösterildiği gibi, vücut modeli, dıştan içe doğru sırasıyla 2, 5, 20 ve 13 mm kalınlığında cilt-yağ-kas-kemik dokuları içeren dört katmandan oluşmaktadır. İnsan vücudu dokularının dielektrik özellikleri yine CST'deki malzeme kütüphanesinden seçilmiştir. Vücut modelinin toplam boyutları $100 \times 150 \times 40 \text{ mm}^3$ olarak değiştirilmiştir. Tasarlanan antenin vücut modeli üzerinde MM'li ve MM'siz yansımaya katsayısı parametre performansı ve SAR etkisi CST ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Nesnel bir karşılaştırma için, anten ile vücut modeli arasındaki mesafe her iki durumda da 6,9 mm'de sabit tutuldu.

Serbest uzayda ve kübik gövde modelinde MM'li ve MM'siz antenin simülasyon yansımaya katsayısı performans sonuçları sırasıyla, Şekil 4.73 ve 4.74'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Simülasyonun sonuçlarında, MM yapısı olmayan antenin yansımaya katsayısı, serbest alanda ve vücutta çok farklıdır. MM'siz antenin vücut üzerindeki yansımaya katsayısı performansı vücut üzerinde değişmiştir. Özellikle 3,3 GHz-4,2 GHz ve 5,95 GHz -6,7 GHz frekansları arasında anten yansımaya katsayısı -10 dB değerinin üzerine aşmış ve anten çalışma frekans bant genişliğini etkilemiştir. Bunun nedeni antenin vücuttan etkilenmesidir. Ek olarak, antenin MM ile yansımaya katsayısı, serbest uzayda ve vücut modeli üstünde kararlı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, antenin gövdeden MM tarafından izole edilmesidir.

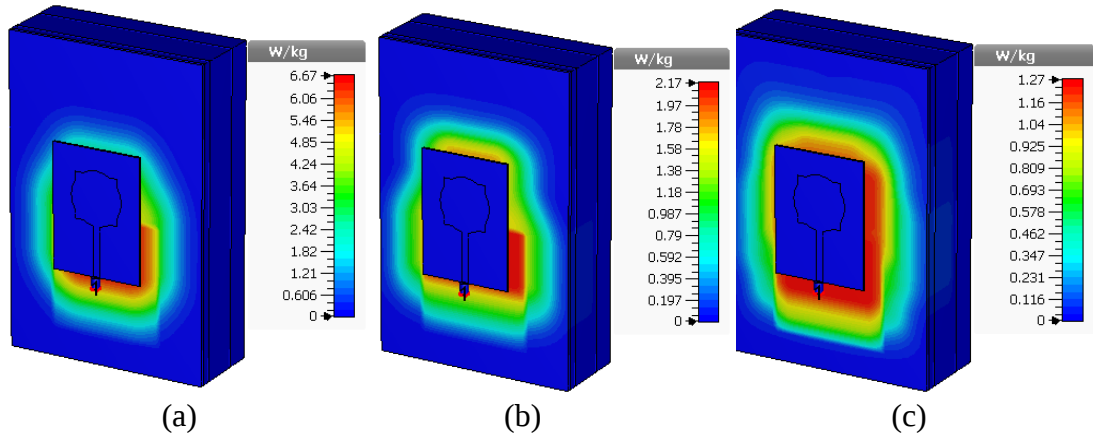


Şekil 4.73. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan anten için, serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi.

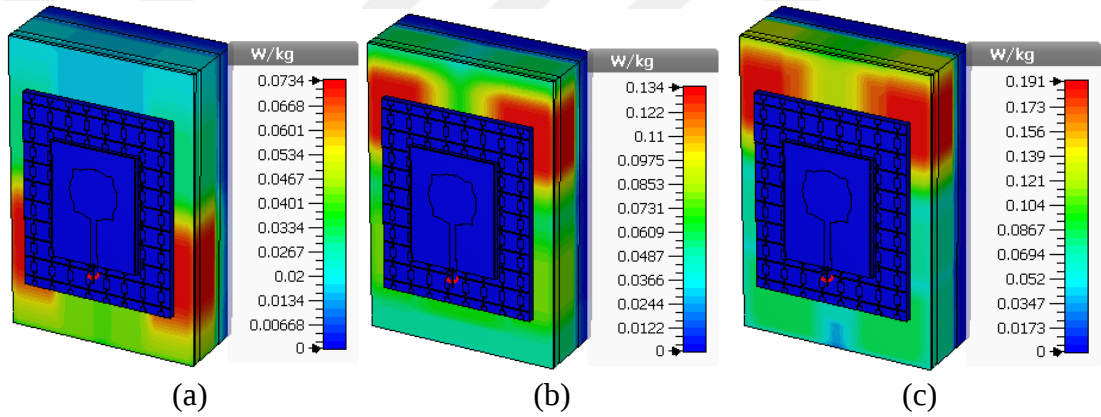


Şekil 4.74. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan anten için serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekans ile değişimi.

Antenden yayılan EM dalgaların insan vücudu üzerindeki zararlı etkisini araştırmak için; 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekanslarındaki SAR değerleri IEEE C95.3 standartlarına göre, 0,5 W anten giriş gücü için nümerik ortamda hesaplanmıştır. Önerilen antenin MM'li ve MM'siz kübik insan dokusu modeli üzerinde 10 g doku (güvenlik limiti 10 g doku için 2 W/kg'dır) standardına göre hesaplanan SAR değerleri Şekil 4.75 ve 4.76'da görülmektedir. Bu hesaplanan vücut modeli üzerindeki SAR değerlerinin dağılımları, hesaplanan frekans için vücut üzerindeki maksimum SAR değerine göre renklendirme ölçeği kullanılarak gösterilmiştir. Şekil 4.75'ten görüldüğü gibi, vücut modeli üzerinde MM'siz antenin 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için hesaplanan maksimum SAR değerleri sırasıyla, 6,67; 2,17 ve 1,27 W/kg'dır ve bu sonuçlardan 10 g doku için Avrupa güvenlik sınırı 2 W/kg değeri aşıldığı görülmektedir. Şekil 4.76'da görüldüğü gibi, vücut modeli üzerinde MM'li anten için hesaplanan maksimum SAR değerleri, 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için sırasıyla 0,0734; 0,134 ve 0,191 W/kg olarak elde edilmiştir. Bu SAR değerleri çok düşüktür ve Avrupa standardı sınırlamasına uygundur. Ayrıca MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle maksimum SAR değerini önemli ölçüde düşürdüğü ve bu düşüşün %97,1'e ulaşacağı görülmüştür (Tablo 4.10).



Şekil 4.75. Arkasında MM yapısı olmayan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7GHz, (c) 10 GHz.



Şekil 4.76. Arkasında MM yapısı olan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7 GHz, (c) 10 GHz.

Tablo 4.10. Önerilen antenin optimum geometrik parametreleri (mm).

Antenin durumu	Frekanslar		
	4 GHz	7 GHz	10 GHz
MM'siz Anten	6,67 W/kg	2,17 W/kg	1,27 W/kg
MM'li Anten	0,073 W/kg	0,134 W/kg	0,191 W/kg

MM yapısı ile önerilen anten tasarımı, çalışma frekansı bant genişliği, esneklik, boyutlar ve kazanç özellikleri açısından Tablo 4.10'da belirtilen referans antenlerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 4.11. Literatürde bildirilen arkasında MM yapısı olan giyilebilir antenler ile önerilen antenin çalışma frekansı bandı, alt taban tipi, boyutları ve maksimum kazancı.

Ref. No	Çalışma bandı (GHz)	Taban tipi	MM'li Anten Boyutları (mm)	Maksimum Kazanç (dB/dBi)
[194]	2,4 ISM	esnek	$50 \times 50 \times 9,5$	4,12 dBi
[174]	2,3-3/4-5,3	esnek	$77 \times 87 \times 8$	7,3 dB
[198]	2,4-2,5	esnek	$100 \times 100 \times 6,5$	2,42 dB
[195]	2,45/ 5,5	esnek	$102 \times 102 \times 7$	5,2 dB
[172]	1,85-3,15	esnek	$84 \times 162,25 \times 6,5$	3,38 dB
[170]	5,7-11	esnek	$46 \times 46 \times 5,8$	8 dBi
[192]	2,6-12	sert	$72 \times 72 \times 14,8$	9,9 dBi
[169]	5,75-14,51	sert	$50 \times 80 \times 4$	10,65 dBi
[196]	2,45 /5,8	esnek	$42 \times 63 \times 8$	7,8 dB
[171]	2,5-13,8	esnek	$52,5 \times 52,5 \times 20$	9 dB
Önerilen	4,3-13,4	esnek	$100 \times 80 \times 6,9$	9,95 dB

Giyilebilir bir antende tüm bu parametreler ve özellikler çok önemlidir. Önerilen tasarım anten ile karşılaştırılan tablodaki referans antenlerden, kazanç değeri açısından yalnızca [169]'de bildirilen anten, tasarlanan antenin kazanç değerinden biraz yüksektir ve [192]'de bildirilen anten ise, tasarlanan antenin kazanç değerine en yakın antendir. Ancak, bu antenler esnek yapıda değildirler ve bu antenler, giyilebilir antenler için önemli bir parametre olan esneklik açısından tasarlanan antene karşı en önemli dezavantajdır. Buna ilave olarak, [169]'de bildirilen antenin bant genişliği önerilen antenden biraz daha düşük ve [192]'de bildirilen anten ise 14,8 mm'lik kalınlık ile giyilebilir uygulamalar için uygun olmayan oldukça yüksek bir kalınlık değerine sahiptir. Giyilebilir bir antenin kapladığı alan önemli olsa da, anten kalınlığı, tasarım ve kullanımdaki ana endişelerden biridir. Tabloda karşılaştırılan antenlerden, [171,174,194–196]'de bildirilen antenlerin hepsi, önerilen antenden daha yüksek kalınlığa sahiptirler. Ayrıca, bu antenlerden [171]'de bildirilen anten, tasarlanan antenimizin çalışma frekans bandından biraz yüksek olsa da 20 mm kalınlığı ile giyilebilir uygulamalar için uygun olmayan yüksek kalınlıkta olma özelliğine sahiptir. Ayrıca tasarım antenden daha kalın olan [174, 194–196]'de bildirilen antenlerin çalışma frekans bandı, tasarladığımız antenimizin çalışma frekans bandından daha dardır. Diğer taraftan tablodaki tasarımıımızla karşılaştırılan antenler

arasında [170, 172, 198]'de bildirilen antenler, tasarlanan antenimizin kalınlığının atında kalınlığa sahip olmalarına rağmen bu antenler dar çalışma frekans bantlarına sahiptirler. Referans çalışmalarından da anlaşılacağı gibi, entegre bir MM yapısına sahip düşük kalınlıkta bir UWB anten tasarlamak kolay değildir. Bu MM yapılı tasarlanan anten, esneklik sağlayan tekstil dielektrik taban malzemelerden üretilmiş olması, düşük kalınlığı, UWB çalışma frekansı bandı ve en önemlisi tablodan da görüldüğü üzere antenin 9,9 dB yüksek kazancı nedeniyle, giyilebilir anten uygulamaları için önemli bir avantajlar sağlamaktadır.

Sonuç olarak bu çalışmada, WBAN uygulamaları için arkasına MM yapısı entegre edilmiş bir UWB düşük profilli giyilebilir anten başarılı şekilde tasarlanıp üretilmiştir. Tasarlanan antenin üst kısmında ışımadan sorumlu kare ve dairesel birleşiminden oluşan geometri bulunmaktadır. Öte yandan antenin arka tarafında, geniş bant genişliğini artıran dikdörtgen şekilli kısmi toprak düzlemi bulunmaktadır. Ek olarak, antenin arka lob ışımasını daha da azaltmak ve yönlülüğünü arttırmak için dikdörtgen bir kafes içinde periyodik olarak dizilmiş I şeklinde birim metayüzey hücrelerinden oluşan MM yapısı önerilmiş ve antenin arkasına uygulanmıştır. Tasarlanan antenin dielektrik taban malzemesi olarak kot kumaşı ve MM yapısı dielektrik taban malzemesi olarak keçe malzemeleri kullanılmıştır. Tasarımda iletken düzlemler için bakır bant tercih edilmiştir. Tasarlanan antenin MM'li ve MM'siz performansı, simülasyonlar ile ve ölçümler ile incelenmiştir. Sonuçlar, antene MM yapısı entegre edilmesiyle, tasarlanan antenin, UWB frekans bölgesinde 4,3 GHz'den 13,4 GHz'e uzanan 9,1 GHz'lik ultra geniş empedans bant genişliğine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca sonuçlardan tasarlanan MM yapısının antenin arkasına uygulanmasıyla antenin kazancı, yönlülüğü ve FBR'sinin arttığını göstermektedir. Antene MM entegre edilmesiyle antenin en yüksek maksimum gerçek kazancı değeri önemli ölçüde artırılmış 4,73 dB'den 9,95 dB'ye yükselmiştir. Simülasyonlarda antenin MM'li ve MM'siz olarak farklı frekanslardaki uzak alan ışıma örüntüleri de hesaplanmıştır. Işıma örüntülerinden, tasarlanan MM yapısının antenin arkasına yerleştirilmesi ile yönlülüğün arttığı ve arka lob ışımasının azaldığı, bunun sonucunda antenin vücut üzerinde kullanımları sırasında vücutta daha az EM dalgalarının çarpması ve daha az emilimi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca tasarlanan antenin insan vücudu üzerindeki yayılım etkisinin araştırılması için, antenin arkasında tasarlanan MM yapısı olan ve olmayan antenin serbest uzayda ve vücut

modeli üzerindeki SAR değerleri farklı frekanslarda hesaplanmıştır. MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle maksimum SAR değerlerinin önemli ölçüde azaldığı ve düşüşün %97,1'e ulaşacağı hesaplamada görülmüştür. Vücut modeli üzerinde MM yapısı ile tasarlanan antenin en yüksek SAR değerleri 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekanslarında sırasıyla 0,0734; 0,134 ve 0,191 W/kg olarak hesaplandı. Bu SAR değerleri, 10 g doku için Avrupa standartlarında belirlenen maksimum SAR sınırı olan 2 W/kg ile karşılaştırıldığında çok düşüktür. Ek olarak, vücut üzeri simülasyonları ve deneyleri, arkasında MM yapısı olan tasarım antenin UWB frekans bölgesinde ultra geniş çalışma empedans bant genişliğini koruduğunu göstermektedir.

Tasarlanan anten ve MM yapısından oluşan önerilen sistem yapısı düşük profile sahiptir. Tasarlanan MM'li antenin yaklaşık 6,9 mm kalınlığı, MM yapı UWB tekstil giyilebilir antenler için literatürde bildirilen düşük kalınlıkların içindedir. Ultra geniş frekans bandında çalışan MM yapısı ile tasarlanan antenin esnek dielektrik tekstil malzemelerinden üretilmiş olmasının yanında, yüksek kazanç, düşük kalınlık ve düşük SAR değerleri gibi avantajlı özellikleri nedeniyle WBAN uygulamalarında kullanım için uygundur.

4.2.4. Tasarım 4

Bu çalışmada, giyilebilir antenlerin bant genişliği, kompaktlık, vücut etkileşimi ve esneklik gibi sorunlarının üstesinden gelmek için, antenin kısmi toprak düzlemi arkasına MM yapı entegre edilmiş, keçe dielektrik taban ve nikel-bakır-polyester iletken kumaş bant malzemeleri kullanılarak tasarlanıp üretilmiş, WBAN uygulamaları için giyilebilir tam tekstil UWB anteni sunulmuştur. MM yapısı ile tasarlanan anten, şu ana kadar MM'li UWB antenler için literatürde bildirilen en düşük kalınlık olan 4,68 mm kalınlığa sahiptir. Tasarlanan düşük profilli antenin, MM'li ve MM'siz olarak serbest uzayda ve insan vücut modeli üzerindeki performansı, ilk önce üç boyutlu (3B) elektromanyetik (EM) simülasyon ortamında karşılaştırmalı araştırılmıştır. Sonuçlar, tasarlanan MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle kazanç, yönlülük ve önden arkaya oranı (FBR) performans parametreleri önemli ölçüde artarken, antenden vücuda doğru yayılan elektromanyetik dalgalar ile insan vücudu arasındaki etkileşim önlenmiştir. Tasarlanan anten ve MM yapısı başarıyla üretilmiş ve deneysel ölçümler de yapılmıştır. Ölçüm sonuçları, simülasyonlarda bulunan sonuçlarla iyi bir uyum içindedir. WBAN

uygulamalarında kullanılması için ümit verici MM yapıları önerilen antenin, tam esneklik ve çok düşük kalınlığa sahip olmasının yanında, çok düşük SAR değeri ile ultra geniş frekans bandında çalıştığı kanıtlanmıştır [199].

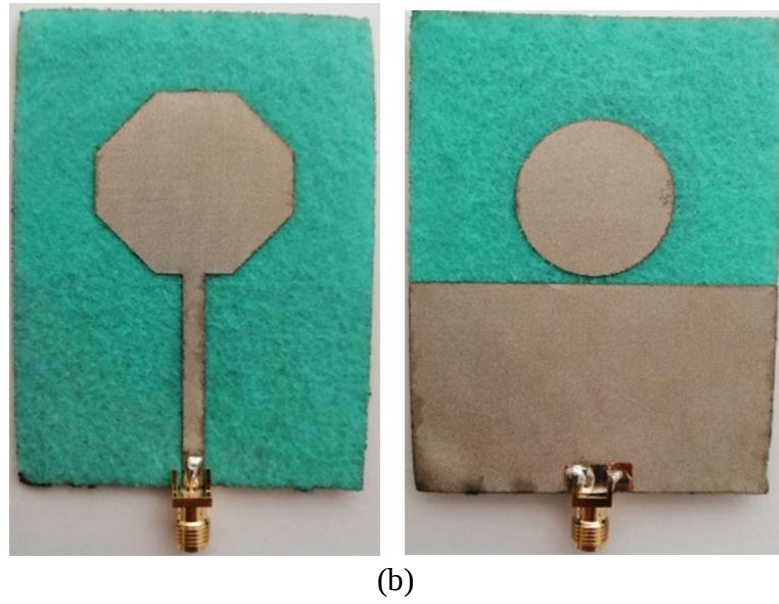
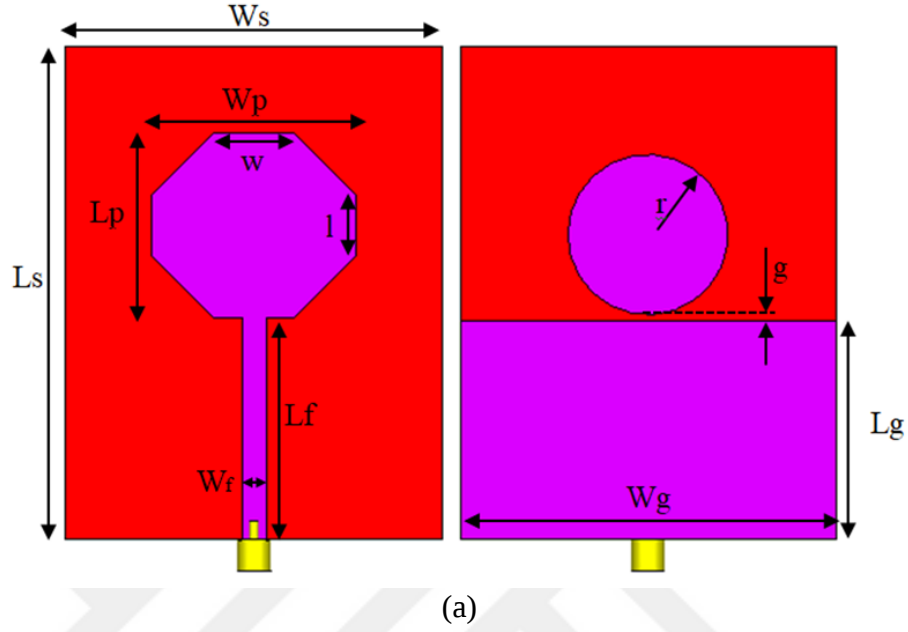
Anten ve Metamateryal Yapı Tasarımı

Tasarımlarımıza anten kısmı ile başladık. Anten, 1,4'lük bir dielektrik geçirgenlik ve 0,04'lük bir kayıp tanjantlı 80 mm uzunluk, 61 mm genişlik ve 1 mm kalınlık boyutlarındaki bir keçe alt tabaka üzerine yerleştirilmiştir. Işıyan yama ile toprak düzlemi iletken katmanları için yaklaşık olarak $1,18 \times 10^5$ S/m bir iletkenlikte, 0,17 mm kalınlığında nikel-bakır-polyester bant tercih edilmiştir. Tasarlanan giyilebilir mikroşerit antenin yapısı ve geometrik parametreleri Şekil 4.77 (a)'da ön yüzden ve arka yüzden görüntüleri verilmiştir. Şekilde, dielektrik taban ve metalik katmanlar sırasıyla kırmızı ve eflatun ile temsil edilmektedir. Ayrıca besleme hattına temas eden konektör sarı renkle gösterilmiştir. Görüldüğü gibi anten, keçe alt taban malzemesinin ön tarafında altıgen bir ışıyan yama ve bir mikro şerit beslemesinden oluşur. Önerilen antenin altıgen radyatör yama geometrisi daha önce literatür [107]'de sunulmuş ve incelenmiştir. Bununla birlikte, alt taban malzemesi arka tarafında, anten bant genişliğini artıran dikdörtgen bir eksik zemin düzlemi ve dairesel bir parazitik yama vardır.

Şekil 4.77 (a)'da dielektrik taban uzunluğu ve genişliği sırasıyla L_s ve W_s ile gösterilmiştir. Benzer şekilde, antenin ışıyan yama uzunluğu ve genişliği sırasıyla L_p ve W_p olarak etiketlenmiştir. Ayrıca, W_f ve L_f sırasıyla besleme hattının genişliğini ve uzunluğunu temsil eder. Altıgen anten geometrisinin üstte ve yanda düz kenarlarının uzunluklarını w ve l temsil eder. Öte yandan, antenin arka tarafında, dikdörtgen toprak düzleminin genişliği ve uzunluğu sırasıyla W_g ve L_g ile belirtilmiştir. Ayrıca, r ve g sırasıyla dairesel parazitik yama yarıçapı ve dikdörtgen toprak düzlemi ile dairesel parazitik yama arasındaki mesafe anlamına gelir.

Şekil 4.77 (a)'da gösterilen antenin tüm geometrik parametreleri, anten bant genişliği dikkate alınarak elektromanyetik simülasyon ile optimize edilmiştir. Daha sonra anten, optimum anten geometrilerine eşit boyutlarda üretildi. Optimize edilmiş anten parametreleri Tablo 4.11'de verilmiştir ve optimum boyutlara sahip üretilen antenin Şekil 4.77 (b)'de önden ve arkadan görüntüleri gösterilmektedir. Tabloda görüldüğü gibi,

besleme hattının (W_f) genişliği 3,85 mm'dir, bu da mikroşerit besleme hattının karakteristik empedansının çalışma frekansı bandında 50Ω 'ye eşit olmasını sağlar.

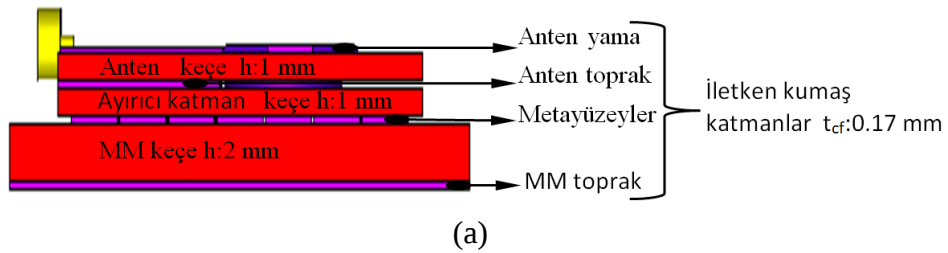


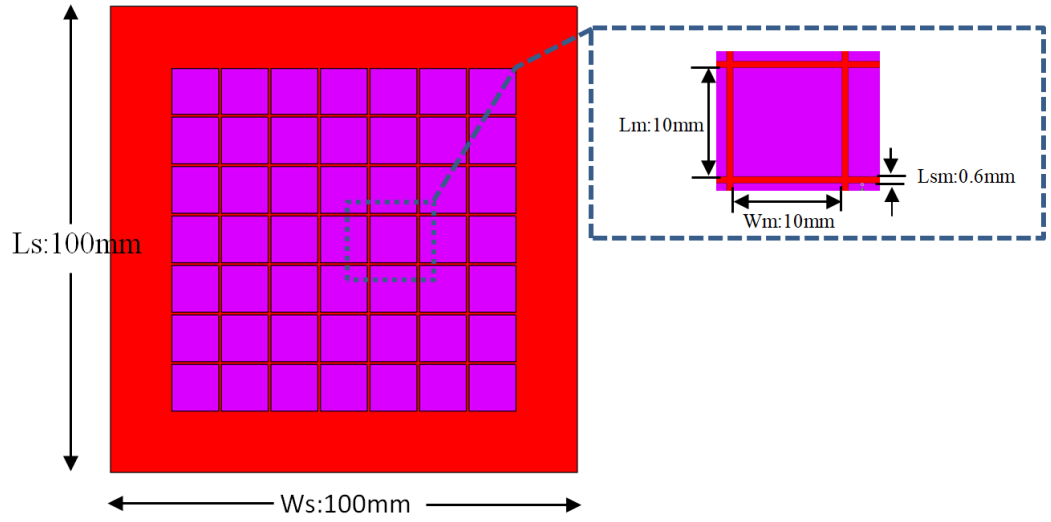
Şekil 4.77. (a) Geometrik parametrelerle birlikte ön ve arka görünümünden önerilen anten mimarisi. (b) Optimize edilmiş geometrik parametrelere sahip olacak şekilde üretilmiş anten prototipi.

Tablo 4.12. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).

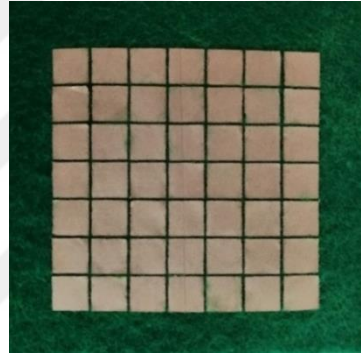
W_s	L_s	W_p	L_p	w	l	W_f	L_f	W_g	L_g	r	g	h_{sub}
61	80	33	30	13	10	3,85	33,5	61	33	13	0,5	1

Anteni optimize ettikten sonra, anten ile insan vücudu arasındaki etkileşimi azaltmak için MM yapısını tasarladık ve antenin arkasına entegre ettik. Tasarlanan sistemde MM'li antenin yansıma katsayısı, yani S_{11} parametresinin tüm UWB çalışma frekans bandı üzerinden yapılandırılması ana husustur. Tasarımda MM ile anten arasındaki mesafeyi sabitlemek ve MM ile anten arasındaki elektriksel teması önlemek için ara parça olarak 1 mm kalınlığında keçe malzeme yerleştirilmiştir. Şekil 4.78 (a), MM'li antenin enine kesit görünümünü gösterir. Enine kesit görünümünden görüldüğü gibi, MM yapısı iki metalik (metayüzey ve toprak düzlemi) katman ve aralarında bir dielektrik taban olan üç katmandan oluşur. Anten tasarımında olduğu gibi, MM yapısında da metalik katmanlar ve dielektrik taban için sırasıyla nikel-bakır-polyester kumaş ve keçe kumaş kullanılmıştır. Ancak anten keçesinden farklı olarak MM yapısında kullanılan keçe kumaş, 2 mm kalınlığa sahiptir. MM hücre boyutları simülasyonlarla optimize edilmiştir. Şekil 4.78 (b), 7×7 kare kafes içinde toplamda 49 adet hizalanmış kare şekilli birim hücrelerden oluşan önerilen meta yüzey yapısının ayrıntılı geometrisini gösterir. Meta yüzey için kare şeklinde bir kafes seçmenin nedeni, üretim kolaylığıdır. Şekilden görüldüğü gibi, MM yapısının genişliği (W_s) ve uzunluğu (L_s) her ikisi de 100 mm'ye eşit iken her bir meyüzey hücresi 10 mm yan uzunluklara sahiptir, yani hem W_m hem de L_m 10 mm'dir ve bu birim hücreler birbirinden 0,6 mm (L_{sm}) aralıklıdır. Şekil 4.78 (c), MM yapısının üretilmiş prototipini gösterir. Optimize edilmiş MM yapısı için simülasyonlarda hesaplanan 1 GHz ile 15 GHz arasındaki ultra geniş frekans bandında, yansıma fazının değişimi Şekil 4.79 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.79 (b)'de diğer yandan, birim hücrenin sınır koşullarını belirten simülasyon modeli gösterilmektedir. Metayüzey hücrelerinin periyodik olarak yerleştirilmesi nedeniyle simülasyonda birim hücre periyodik sınır koşulu kullanılmıştır. Simülasyonda elektromanyetik dalga geliş açısı normal doğrultusunda ayarlanmıştır.



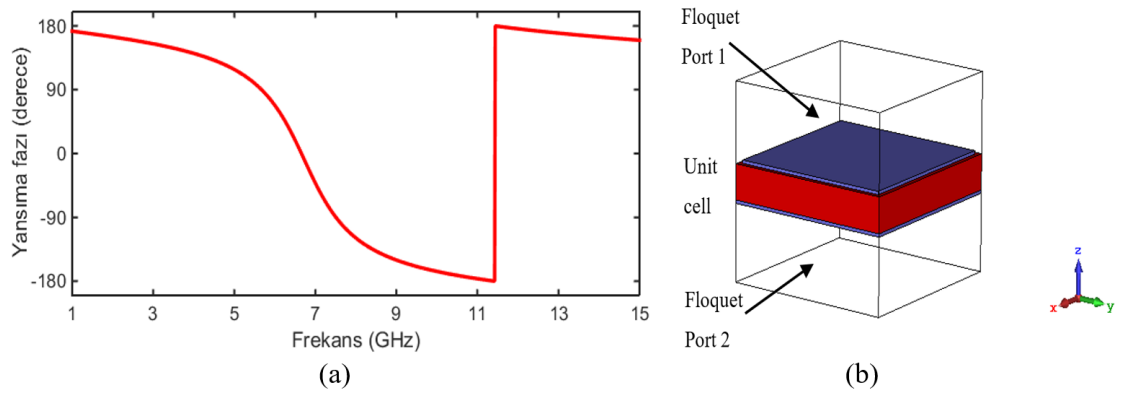


(b)



(c)

Şekil 4.78. (a) MM entegreli anten yapısı katmanlarının yandan görünüşü. (b) ayrıntılı birim hücre geometrisi ile birlikte 7×7 kare kafes içinde hizalanan toplam 49 birim hücresinden oluşan önerilen meta yüzey yapısı, (c) tasarlanan MM yapısının üretilen prototipi.

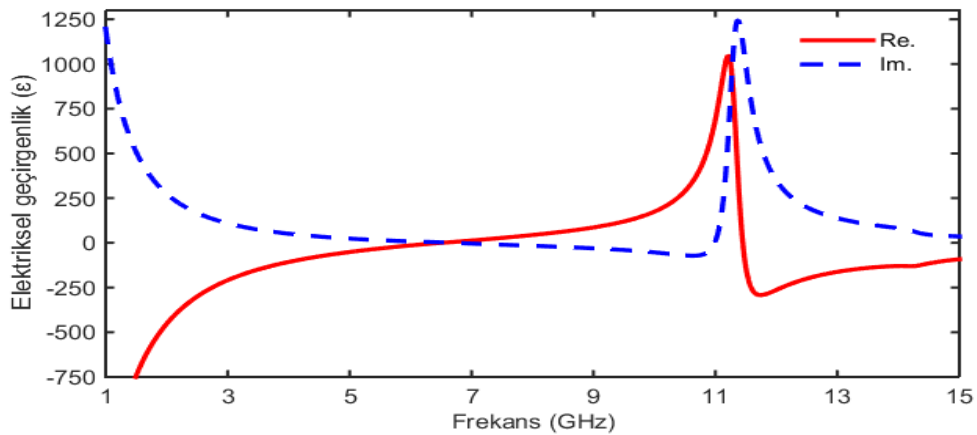


(a)

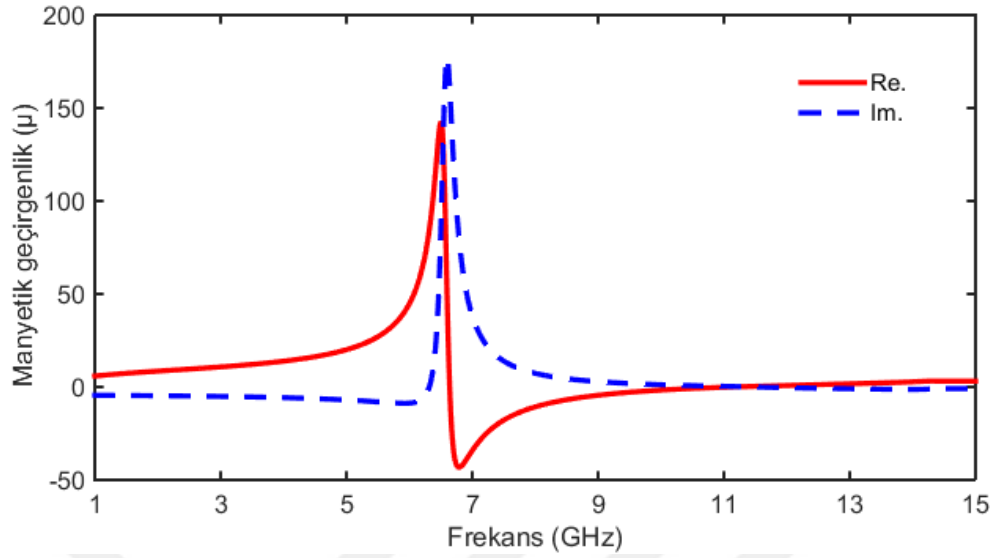
(b)

Şekil 4.79. (a) Yansıma fazı açısının frekans ile değişimi, (b) Birim hücrenin sınır koşullarını ifade eden simülasyon modeli.

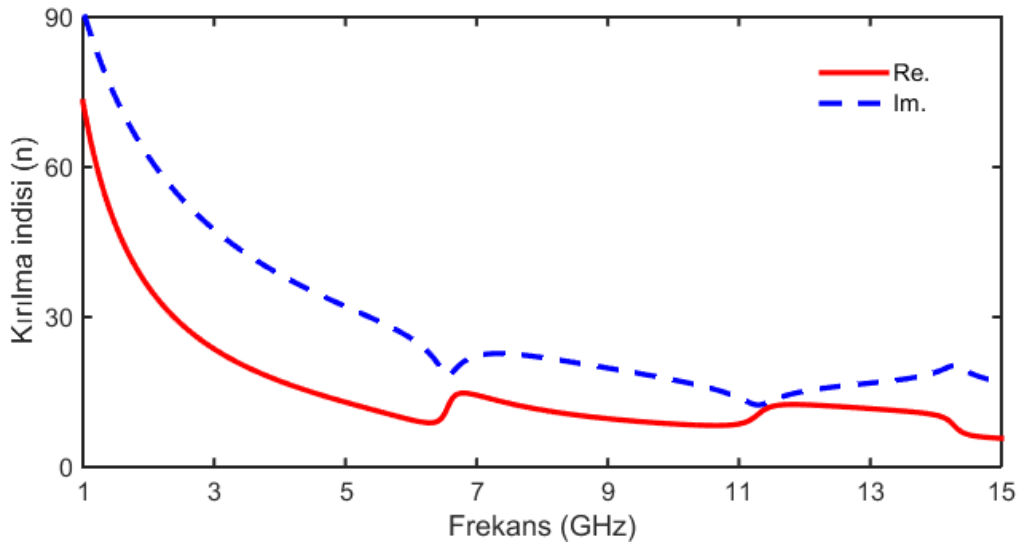
Ayrıca tasarlanan MM yapısı simüle edilmiş ve antenin çalışma frekansı bandı üzerinde hesaplanan S-parametrelerinden hesaplanan yapının elektriksel geçirgenlik (ϵ), manyetik geçirgenlik (μ) ve dolayısıyla kırılma indisi (n) değerleri hesaplanmıştır. Tasarlanan MM yapısı için hesaplanan elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisinin gerçek ve sanal kısımlarının varyasyonları sırasıyla Şekil 4.80, Şekil 4.81, Şekil 4.82’de gösterilmektedir. Şekil 4.80’de görüldüğü gibi 11,5 GHz civarında frekansta bir elektriksel geçirgenlik rezonansı vardır. Öte yandan, elektriksel geçirgenliğin gerçek kısmı yaklaşık olarak 6,8 GHz’den düşük frekanslarda negatiftir. 6,8 GHz ile 11,5 GHz arasındaki frekanslarda geçirgenliğin gerçek kısmı pozitifdir ve 11,5 GHz’den sonra tekrar 0’ın altına düşer. Kısaca tasarlanan MM yapısı, 6,8 GHz altı ve 11,5 GHz üstü frekanslarda elektriksel geçirgenliğin negatif gerçek kısmına sahiptir. Benzer şekilde Şekil 4.81’de, 6,8 GHz civarındaki çok dar frekans bandı haricinde tüm frekans bandında manyetik geçirgenliğin sanal kısmı 0’dır. Bu frekansta, manyetik geçirgenliğin rezonans davranışı vardır. Öte yandan, manyetik geçirgenliğin gerçek kısmı 6,8 GHz’den düşük frekanslarda pozitif, 6,8 GHz’den 11,5 GHz’e kadar olan frekanslarda negatiftir. Eğer Şekil 4.80, Şekil 4.81 karşılaştırılırken, tasarlanan MM elektriksel geçirgenliğinin 6,8 GHz’den düşük ve 11,5 GHz’den büyük frekanslarda olan gerçek kısmının negatif, 6,8 GHz ile 11,5 GHz arasındaki frekanslarda ise tasarlanan MM manyetik geçirgenliğinin gerçek kısmı negatiftir. Başka bir deyişle, tasarlanan MM elektriksel geçirgenliğinin gerçek kısmı veya tasarlanan MM manyetik geçirgenliğinin gerçek kısmı, 1 GHz’den 15 GHz’e kadar uzanan tüm frekans bölgesinde negatiftir. Bu beklenen bir sonuçtur ve meta malzeme olarak kullanılan yapıyı haklı çıkarır.



Şekil 4.80. Tasarlanan MM yapının simülasyonlarda bulunan S-parametreleri kullanılarak hesaplanan elektriksel geçirgenliğinin sanal ve gerçek kısımlarının frekansla değişimi.



Şekil 4.81. Tasarlanan MM yapının simülasyonlarda bulunan S-parametreleri kullanılarak hesaplanan manyetik geçirgenliğinin sanal ve gerçek kısımlarının frekansla değişimi.

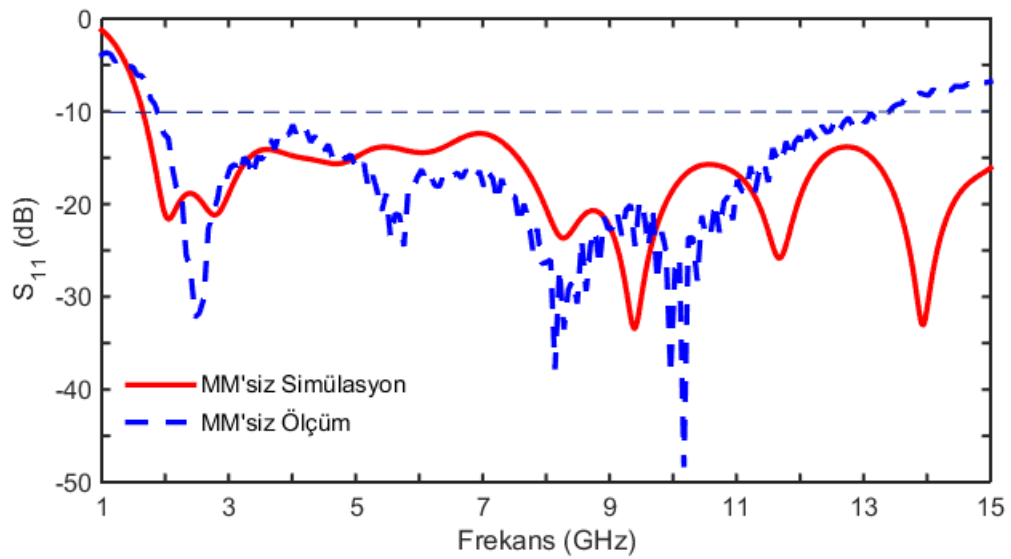


Şekil 4.82. Tasarlanan MM yapının simülasyonlarda bulunan S-parametreleri kullanılarak hesaplanan kırılma indisinin sanal ve gerçek kısımlarının frekansla değişimi.

Simülasyon ve ölçüm sonuçları

Analizler, üç boyutlu (3B) EM analiz yazılımı ile MM yapısı olmayan antenin yansımaya katsayısı S_{11} simülasyonları ile başlatılmıştır. Simülasyonlardan sonra, MM yapısı olmayan antenin yansımaya katsayısı S_{11} , vektör ağ analizörü (Rohde Schwartz ZNB) ile

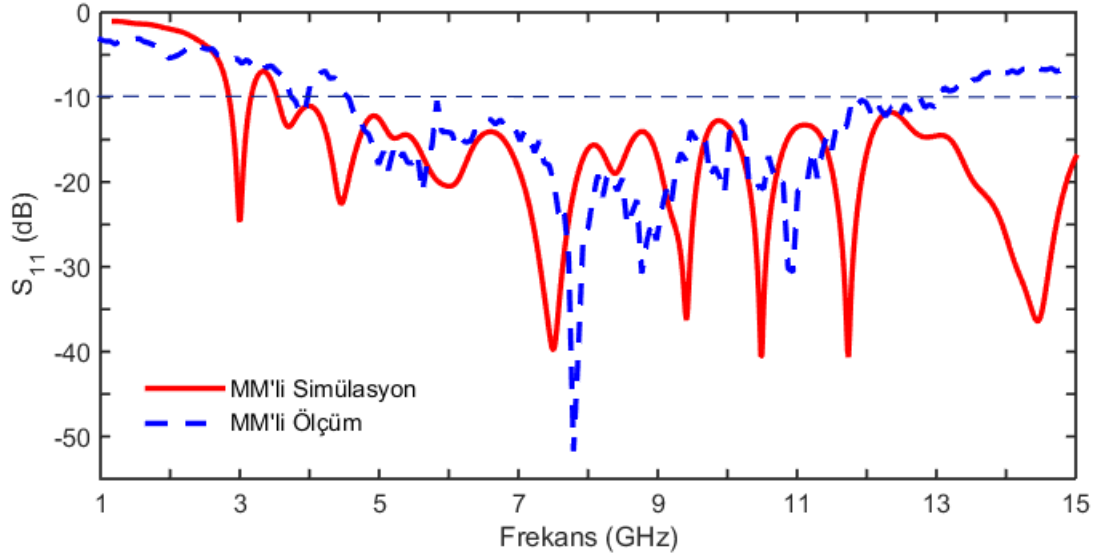
ölçüldü. UWB bölgesinde hesaplanan ve ölçülen S_{11} değerlerinin frekansla değişimi Şekil 4.83'te gösterilmektedir. Bazı frekanslarda yansımaya katsayısındaki küçük değişikliklere ve rezonans frekansındaki kaymaya rağmen, yine de hesaplanan ve ölçülen yansımaya katsayısı değerleri iyi bir uyum içerisindedir. Buna ilave olarak, daha da önemlisi, UWB frekans bölgesini kapsayan empedans bant genişliği ($S_{11} \leq -10$ dB) hem simülasyon hem de ölçümde korunur. Şekil 4.83'te ki ölçüm sonuçlarından antenin 1,9 GHz'den 13,4 GHz'e kadar uzanan geniş bir frekans bandına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.83. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

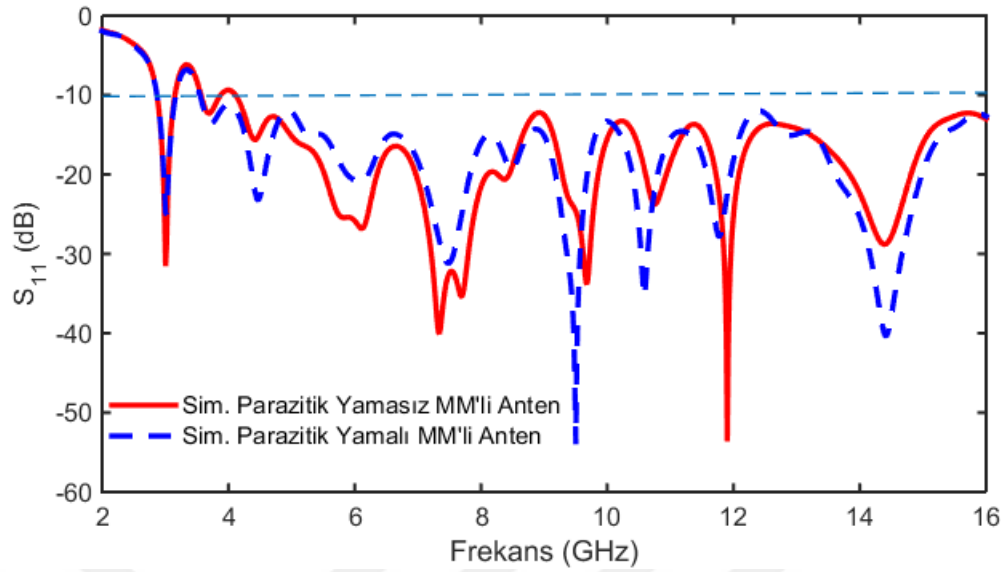
Bundan sonra, antenin simülasyonları ve ölçümleri Şekil 4.78 (a)'da gösterildiği gibi antenin arkasına yerleştirilen MM yapısı ile tekrarlandı. Şekil 4.84, MM ile önerilen antenin ölçülen ve simüle edilen S_{11} yansımaya katsayısı parametresini göstermektedir. MM yapısına sahip antenin UWB frekans bölgesinde geniş bir çalışma bant genişliğine sahip olduğu S_{11} eğrilerinden anlaşılmaktadır. Yansımaya katsayısı S_{11} 'in -10 dB'ye eşit veya daha düşük olduğu simüle edilmiş empedans bant genişliği 3,55 GHz'den 13 GHz üzeri frekanslara uzanırken, ölçümlerde empedans bant genişliği yaklaşık 3,7 GHz'den başlar ve 13 GHz'de biter. Ölçülen S_{11} parametresi, 3,95 ila 4,55 GHz frekans aralığında -10 dB'nin üzerinde kısmi aşımına sahiptir, ancak maksimum S_{11} değeri $-6,8$ dB'nin altındadır. Şekil 4.84, MM'li tasarlanmış antenin bant genişliğinin biraz daralmış olmasına rağmen, antenin UWB frekans bölgesinde 4,55 GHz'den 13 GHz'e kadar

uzanan 8,45 GHz frekans bant genişliğine, yani antenin yine de çok geniş bir bant (UWB) genişliğine sahip olduğunu göstermektedir.



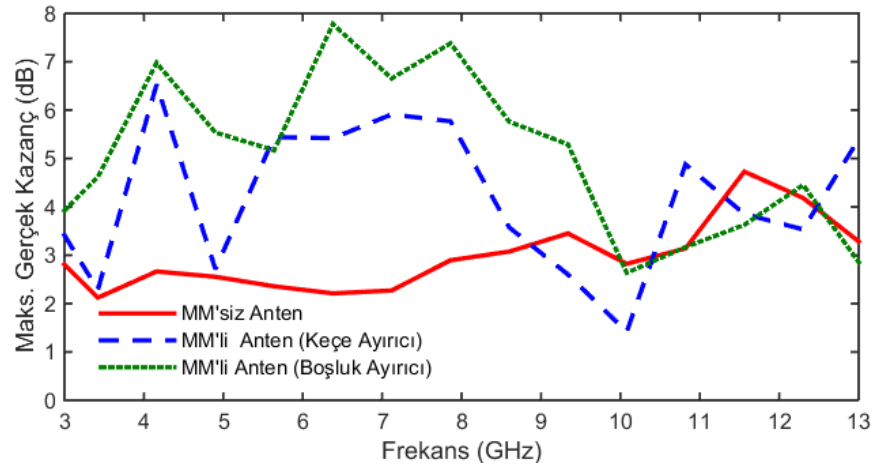
Şekil 4.84. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

Ayrıca arka tarafındaki anten toprak düzleminde dairesel parazittik yama kaldırılarak yansıma katsayısı hesaplamaları tekrarlandı. Bununla birlikte, MM yapısı da dahil olmak üzere tasarımın diğer kısımları hala herhangi bir değişiklik olmaksızın mevcuttur. Böylelikle anten performansı üzerindeki parazittik yama etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Kolay karşılaştırma için Şekil 4.85'te tasarlanan anten için S_{11} parametresinin antenin toprak düzleminde dairesel parazittik yama olmadan değişimi, toprak düzleminde dairesel parazittik yama bulunan anten için S_{11} parametresinin değişimi birlikte gösterilmiştir. Şekilde, MM'li anten toprak düzleminde dairesel bir parazit yaması olmadığındaki S_{11} 'in değeri 3,87 GHz ile 4,12 GHz frekans aralığında -10 dB'nin üzerindedir ve bu değer parazittik yamanın entegrasyonu ile -10 dB'nin altına düşmüştür. Böylece, parazittik yamanın kullanılması tasarlanan anten bant genişliğini artırmaktadır.



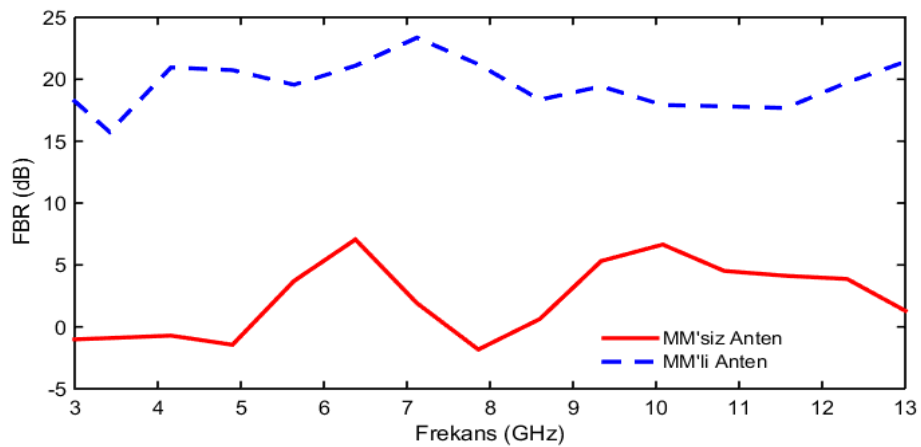
Şekil 4.85. Toprak düzleminde dairesel parazitlik yaması olan ve olmayan antenin arkasında MM yapısı ile simülasyonlarda hesaplanan S_{11} parametresinin frekansla değişimi.

Yansıma katsayısı simülasyonları ve ölçümleri elde edildikten sonra, anten arkasına yerleştirilmiş MM yapısı olan ve olmadan tasarlanan antenin maksimum gerçek kazancı, FBR ve ışıma örüntüleri için benzer analizler yapılmıştır. Önerilen antenin arkasında MM yapısı ile ve MM yapısı olmadan çalışma frekans bandı için simülasyonlarda hesaplanan maksimum gerçek kazancı Şekil 4.86'da gösterilmiştir. Şekilde, çalışma frekansı bandındaki bazı frekanslar haricinde, tasarlanan MM yapının antenin arkasına yerleştirilmesiyle, antenin elde edilen maksimum kazancının genelde arttığı görülmektedir. Ancak MM yapı ile antenin 8,9 GHz ve 10,4 GHz aralığındaki frekanslarda kazancı, MM yapısı olmayan antenin kazancının altına düşmektedir. 8,9 GHz ve 10,4 GHz frekans aralığında antenin maksimum gerçek kazancındaki azalma, belirtilen frekans aralığının tasarlanan MM'nin etkin frekans aralığının dışında olması ve anten ile MM yapı arasında keçe ayırıcı parçasının varlığından kaynaklanmaktadır. Bu durum şekil 4.86'da ki grafikten de görüldüğü gibi simülasyon ortamında keçe ayırıcı parçası yerine boşluk ayırıcının kullanılması ile büyük bir oranda azalmıştır. MM'nin etkin frekans aralığı, yansıma fazı açısının -90° ile $+90^\circ$ arasında olduğu frekans aralığıdır (bkz. Şekil 4.79 (a)). Bununla birlikte, arkasında MM yapısı bulunan tasarım antenin gerçek kazancı 10,1 GHz frekansında minimum 1,4 dB olarak hesaplanmıştır.



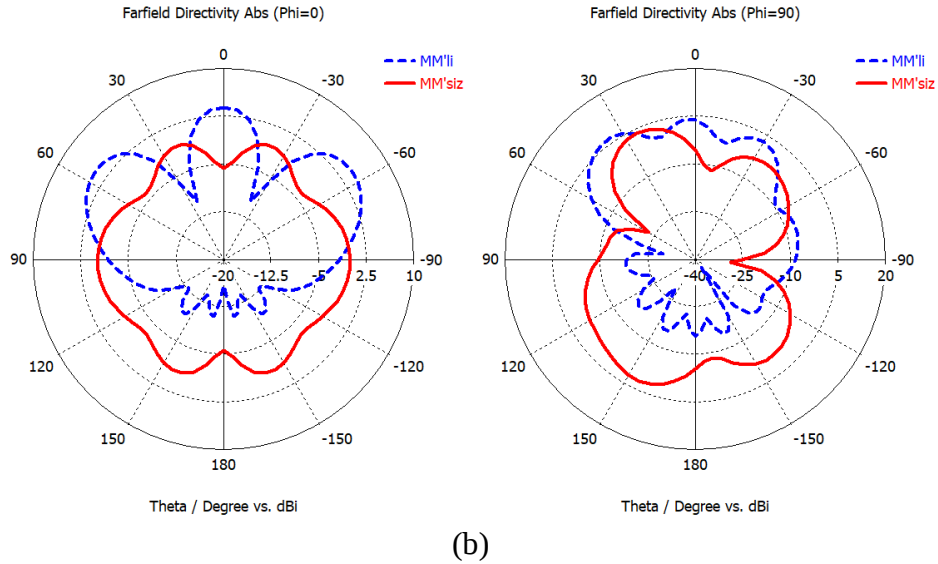
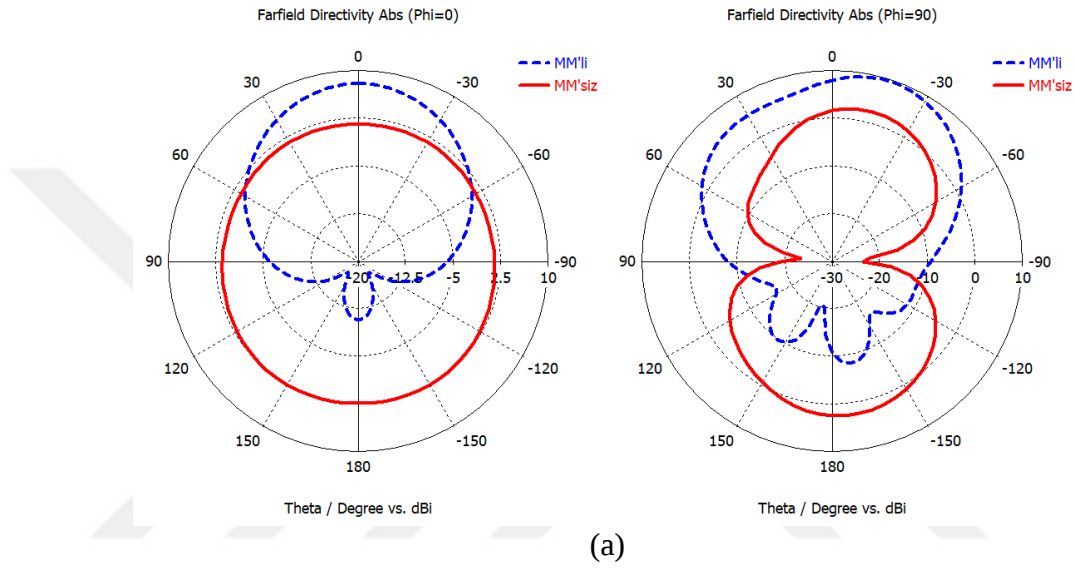
Şekil 4.86. Arkasında MM yapısı olan (boşluk ve keçe ayırıcılar için) ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan maksimum gerçek kazancın frekans ile değişimi.

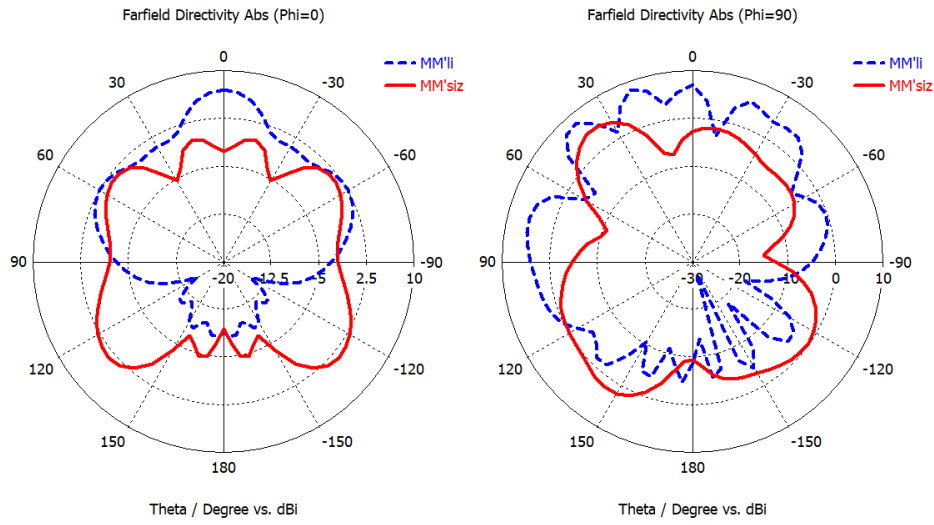
Şekil 4.87'de ise, MM yapısı olan ve olmayan önerilen anten için simülasyonlarda hesaplanan ultra geniş çalışma frekansı bandı üzerinden FBR değerinin değişimleri sunulmaktadır. Eğrilerden, tasarlanan MM yapısı antenin arkasına entegre edildiğinde, artan anten yönelimi ve azalan geri radyasyon nedeniyle FBR değerinin tüm çalışma frekansı bandında önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, çalışma frekans bandında MM yapısı olmayan önerilen antenin FBR değeri -1,85 dB ile 7 dB arasında değişirken, arkasında MM yapısı olan önerilen antenin FBR değeri 16 dB ile 23,5 dB arasında değişmektedir



Şekil 4.87. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin simülasyonlarda hesaplanan FBR değerinin frekans ile değişimi.

Ayrıca, 4; 7,5 ve 10,5 GHz frekanslarda simülasyonlarda hesaplanan, önerilen antenin MM yapısı olan ve olmayan uzak alan ışıma örüntüleri Şekil 4.88’de kutupsal koordinat sisteminde sunulmuştur. Her alt şekil içindeki ışıma örüntüleri karşılaştırılırsa, tasarlanan MM yapısının antenin arkasına yerleştirilmesiyle yönlülüğün arttığı ve arka ışımının azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, vücuda daha az EM dalgası etki eder ve daha az EM dalgası vücut tarafından emilir.

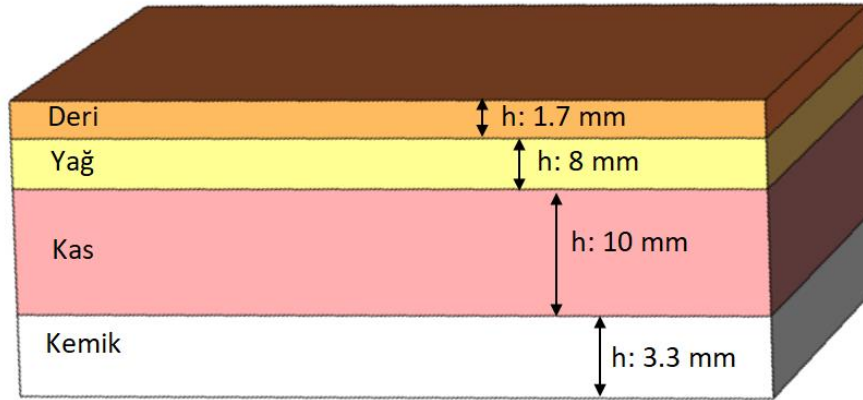




(c)

Şekil 4.88. Arkasında MM yapısı olan ve olmayan tasarlanan antenin kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda (Φ : 0 ve Φ : 90) simülasyonlarda hesaplanan uzak alan ışıma örüntüleri: (a) 4 GHz, (b) 7,5 GHz ve (c) 10,5 GHz frekansında.

İnsan vücudunda giyilebilir anten kullanıldığında, antenden yayılan elektromanyetik enerjinin bir kısmı emilir ve bir kısmı vücut tarafından yansıtılır. Bu nedenle, tasarlanan antenin performans değişimi ve vücut kullanımı durumunda insan vücuduna olan etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. İnsan vücudu simülasyon yazılımında kübik gövde modeli olarak modellenmiştir ve bu modeli simülasyonlarımızda kullandık. Vücut modeli Şekil 4.89’da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi vücut modeli dıştan içe doğru deri, yağ, kas ve kemik olmak üzere 4 katmanlı insan vücudu dokusundan oluşmaktadır. Deri, yağ, kas ve kemik katmanları sırasıyla 1,7 mm, 8 mm, 10 mm ve 3,3 mm kalınlığındadır ve modellenen geometri toplamda 120 mm, 130 mm ve 23 mm boyutlarına sahiptir. Modellenen gövdedeki dokuların katman kalınlıkları literatür [200]’de bildirilenlerle aynıdır. Ayrıca simülasyonlarda vücut dokularının malzeme yoğunluğu ve dielektrik sabiti değerleri CST (2014) yazılımının malzeme kütüphanesinde tanımlanan değerlerden alınır. Çeşitli frekanslardaki simülasyonlarda kullanılan malzeme yoğunluğu ve dielektrik sabiti değerleri Tablo 4.12’de verilmiştir. Görüldüğü gibi vücut dokularının dielektrik sabit değerlerinin hem gerçek hem de sanal kısımları frekansla değişmektedir.



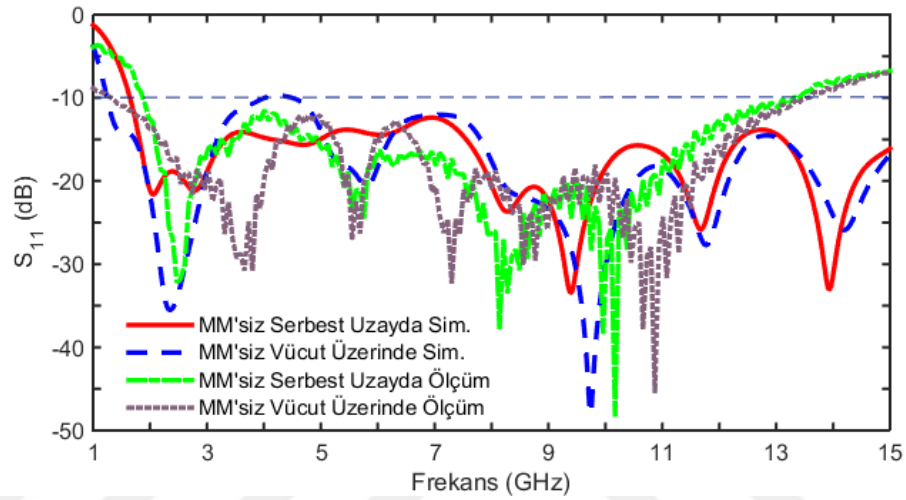
Şekil 4.89. Simülasyonlarda kullanılan kübik vücut dokusu modelinin perspektif görünümü.

Tablo 4.13. Önerilen antenin optimize geometrik parametreleri (mm).

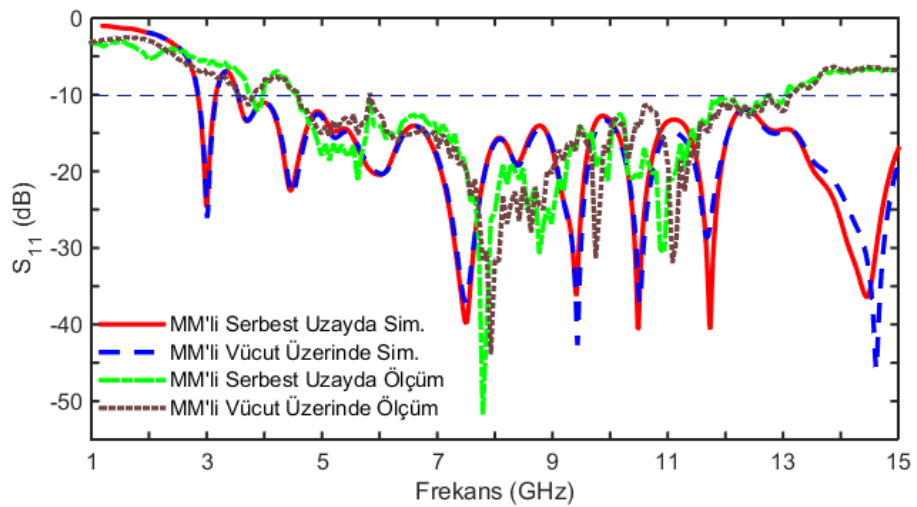
Dokular	Yoğunluk (kg/m ³)	Dielektrik Sabiti					
		4 GHz		7,5 GHz		10,5 GHz	
		Reel Kısım	Im. Kısım	Reel Kısım	Im. Kısım	Reel Kısım	Im. Kısım
Deri	1100	35,3	10,5	30,6	9,4	28,4	8
Yağ	910	5,1	0,83	4,6	0,8	4,4	0,8
Kas	1041	50	13,07	43,3	15,2	38,8	14,6
Kemik	1850	10,3	3,3	8,5	3,2	7,4	2,6

Tasarlanan anten ve MM'yi insan vücudu modeline yerleştirdik ve simülasyonlar elde ettik. Önerilen MM yapı simülasyonlarının etkisini incelemek için tasarlanan anten ile gövde modeli arasında MM yapısı olmadan tekrar edilmiştir. Adil karşılaştırma için, her iki durumda da yani MM yapısı olsun olmasın, anten ile gövde modeli arasındaki mesafe 3,34 mm'de sabit tutuldu. Ayrıca üretilen anten prototipi ve MM yapısının prototipi ile ölçümler elde ettik. Deneylerimizde tasarlanan anteni ve MM'yi vücudumuza yerleştirdik. Simülasyonlarda anten ile vücut modeli arasındaki mesafe 3.34 mm'dir (bkz. Şekil 4.78 (a), buradaki bu mesafe aralayıcı keçe, meta yüzeyler, MM taban keçesi ve MM toprak düzleminin toplam kalınlığı 3,34 mm'ye eşittir). Simülasyonlarda olduğu gibi, prototip antenin, MM yapısı ile ve MM yapısı olmadan ölçümleri de tekrarladık. Yine adil karşılaştırmalar için anten ile vücudumuz arasındaki MM yapısı olmayan deneylerde 3,34 mm'ye eşit olacak şekilde ayarlanmıştır. Simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametrelerinin MM yapısı olan ve olmayan gövde modeli ile serbest alanda ölçülen frekans ile değişimi sırasıyla Şekil 4.90, Şekil 4.91'de

gösterilmiştir. Şekil 4.90'da rezonans frekanslarındaki kaymalara ve S_{11} değerlerindeki değişikliklere rağmen, MM yapısı olmadan tasarlanan antenin ultra geniş çalışma frekans bandının vücut üzeri kullanım durumunda korunduğu görülmektedir. Şekil 4.91'de ise, serbest alan grafikleri ile vücut modeli arasındaki değişimler Şekil 4.90'dakinden daha düşüktür. Bunun nedeni, tasarlanan antenin arkasında MM yapısı ile kullanılması gerçeğidir. Anten, tasarlanan MM yapısı ile gövdeden izole edilmiştir.

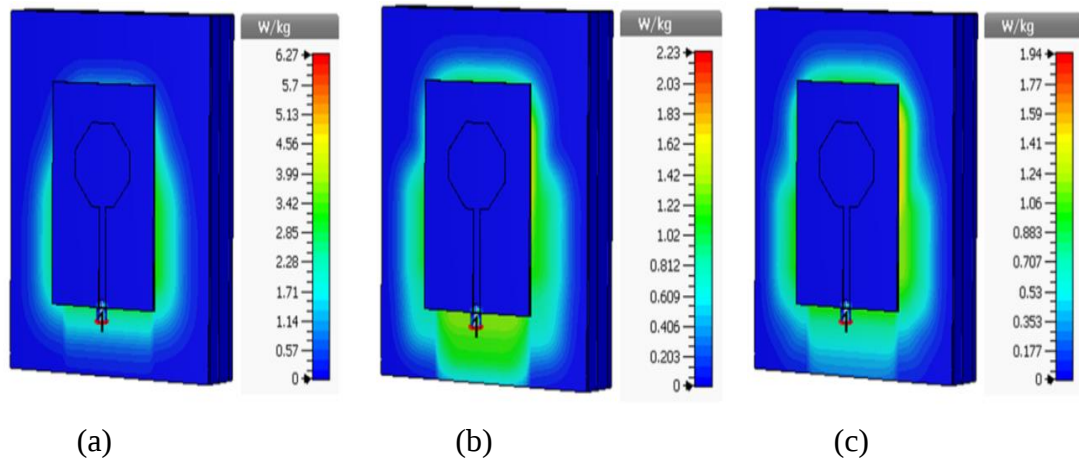


Şekil 4.90. Arkasında MM yapısı olmayan tasarlanan anten için, serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekans ile değişimi.

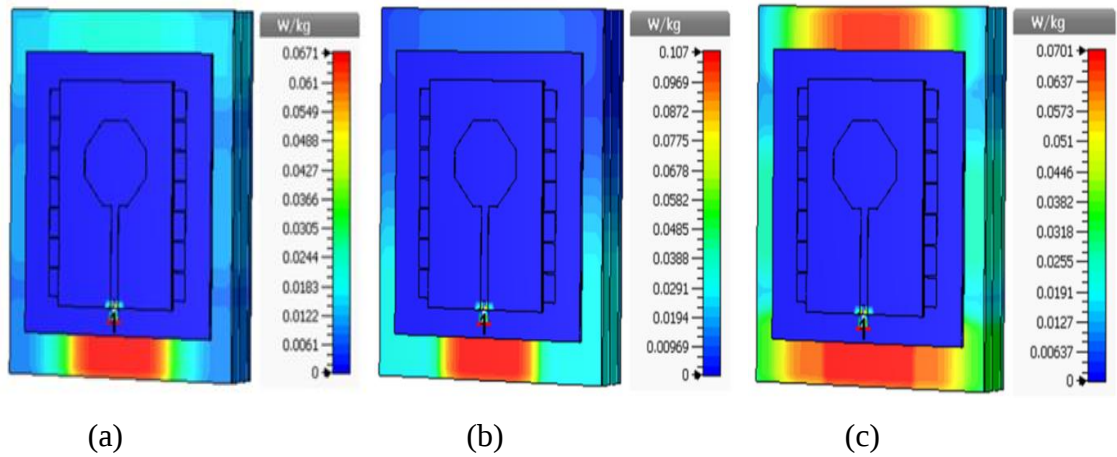


Şekil 4.91. Arkasında MM yapısı olan tasarlanan anten için serbest uzayda ve vücut üzerinde simülasyonlarda hesaplanan ve deneylerde ölçülen S_{11} parametresinin frekans ile değişimi.

Son olarak anten yayılımının insan vücudu üzerindeki etkisini araştırmak için tasarlanan MM yapısı olan ve olmayan antenin 4 GHz, 7,5 GHz ve 10,5 GHz frekanslarında SAR değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda anten giriş gücü IEEE C95.3 standartlarına göre 0,5 W olarak ayarlanmıştır. Ayrıca simülasyonlarda standart bir değer olan 10 g doku kütlesi için hesaplama seçilmiştir. Güvenlik sınırı, 10 g doku için 2 W/kg'dır. Antenin arkasında tasarlanmış MM yapısı olduğu ve olmadığı durumlar için, farklı frekanslarda 10 g vücut dokusu için önerilen antenin simülasyonlarda hesaplanan SAR değerleri ve dağılımları Şekil 4.92, Şekil 4.93'te gösterilmektedir. Bu hesaplanan vücut modeli üzerindeki SAR değerlerinin dağılımları, hesaplanan frekans için vücut üzerindeki maksimum SAR değerine göre renklendirme ölçeği kullanılarak gösterilmiştir. Şekil 4.92'de MM yapısı olmayan antenin maksimum SAR değerlerinin 4 GHz, 7,5 GHz ve 10,5 GHz frekanslarında sırasıyla 6,27; 2,23 ve 1,94 W/kg olduğu görülmektedir. Bu SAR değerleri, Avrupa standartlarında 10 g doku için belirlenen 2 W/kg sınırını aşmaktadır. Şekil 4.93'te ise tasarlanan MM yapısına sahip antenin maksimum SAR değerleri 4 GHz, 7,5 GHz ve 10,5 GHz frekanslarında sırasıyla 0,067; 0,107 ve 0,070 W/kg olarak hesaplanmıştır. Bu SAR değerleri, MM yapısı olmayan anten için bulunan değerlere göre oldukça düşüktür ve Avrupa standartlarına uygundur. Ayrıca MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle maksimum SAR değerini önemli ölçüde düşürdüğü ve bu düşüşün %98,3'e ulaşacağı görülmüştür (Tablo 4.14).



Şekil 4.92. Arkasında MM yapısı olmayan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7,5 GHz, (c) 10,5 GHz.



Şekil 4.93. Arkasında MM yapısı olan antenin 10 g doku için simülasyon ile hesaplanmış SAR değerleri: (a) 4 GHz, (b) 7,5 GHz, (c) 10,5 GHz.

Tablo 4.14. Giyilebilir antenin SAR analiz özeti.
(10 g doku standart SAR (W/kg)).

Antenin durumu	Frekanslar		
	4 GHz	7,5 GHz	10,5 GHz
MM'siz Anten	6,27 W/kg	2,23 W/kg	1,94 W/kg
MM'li Anten	0,067 W/kg	0,107 W/kg	0,070 W/kg

MM yapısı ile önerilen anten tasarımı, çalışma frekansı bant genişliği, esneklik, boyutlar ve kazanç özellikleri açısından Tablo 4.15'te literatürde belirtilen antenlerle karşılaştırılmıştır. Giyilebilir bir antende tüm bu parametreler ve özellikler çok önemlidir. Tabloda görüldüğü gibi tasarlanmış antenimiz en düşük kalınlığa sahiptir. Giyilebilir bir antenin kapladığı alan önemli olsa da kalınlığı, tasarım ve kullanımdaki ana endişelerden biridir. Tablodaki tasarımımla karşılaştırılan antenler arasında [170, 172, 198]'de bildirilen antenler, tasarlanan antenimizin kalınlığına en yakın kalınlığa sahiptir. Ancak bu antenlerin çalışma frekans bantları, tasarladığımız antenimizin frekans bandından çok daha dardır. Ref. [171, 192]'de bahsedilen antenler, bizim tasarladığımız antenimizin frekans bandı ile karşılaştırılabilir veya daha geniş olan çalışma frekans bantlarına sahiptir. Ancak bu antenler yüksek profilli, yani 14,8 mm ve 20 mm kalınlığında yapılara sahiptir ve giyilebilir anten olarak kullanılmaya uygun değildir. Bildiğimiz kadarıyla arkasında MM yapılı tasarlanan antenin 4,68 mm kalınlığı, MM yapılı UWB tam tekstil

giyilebilir antenler için literatürde bildirilen en düşük kalınlıktır. Referans çalışmalarından da anlaşılabacağı gibi, entegre bir MM yapısına sahip düşük profilli bir UWB anten tasarlamak kolay değildir. Bu nedenle, düşük profilli, tam esneklik sağlayan tamamen tekstil malzemelerden üretilmiş olması ve UWB çalışma frekansı rejimi nedeniyle MM yapıları tasarlanan anten, giyilebilir anten uygulamaları için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca tabloda görüldüğü üzere antenin 6 dB maksimum kazancı, literatürdeki çalışmalara göre giyilebilir anten uygulamaları için yeterince yüksektir.

Tablo 4.15. Literatürde bildirilen arkasında MM yapısı olan giyilebilir antenler ile önerilen anten tasarımımızın çalışma frekansı bandı, alt taban tipi, boyutları ve tepe kazancı.

Ref. No	Çalışma bandı (GHz)	Taban Tipi	MM'li Anten Boyutları (mm)	Maksimum Kazanç (dB/dBi)
[194]	2,4 ISM	esnek	50 × 50 × 9,5	4,12 dBi
[174]	2,3-3/4-5,3	esnek	77 × 87 × 8	7,3 dB
[198]	2,4-2,5	esnek	100 × 100 × 6,5	2,42 dB
[195]	2,45/ 5,5	esnek	102 × 102 × 7	5,2 dB
[172]	1,85-3,15	esnek	84 × 162,25 × 6,5	3,38 dB
[170]	5,7-11	esnek	46 × 46 × 5,8	8 dBi
[192]	2,6-12	sert	72 × 72 × 14,8	9,9 dBi
[196]	2,45 /5,8	esnek	42 × 63 × 8	7,8 dB
[171]	2,5-13,8	esnek	52,5 × 52,5 × 20	9 dB
Önerilen	4,55-13	esnek	100 × 100 × 4,68	6 dB

Bu çalışmada, WBAN uygulamaları için arkasında MM yapıları bir UWB düşük profilli giyilebilir anten önerilmiştir. Tasarlanan antenin üst kısmında ışımadan sorumlu altıgen geometri bulunmaktadır. Öte yandan antenin arka tarafında, geniş bant genişliğini artıran dikdörtgen şekilli toprak düzlemi ve dairesel parazitik yama bulunmaktadır. Ek olarak, antenin geri ışımasını daha da azaltmak ve yönlülüğünü arttırmak için kare bir kafes içinde hizalanmış metayüzey hücrelerinden oluşan MM yapısı önerilmiş ve antenin arkasına uygulanmıştır. Tasarlanan anten ve MM yapısı tamamen tekstil malzemelerden yapılmıştır. Tasarlanan antenin performansı MM'li ve MM'siz olarak simülasyonlar ve ölçümler ile incelenmiştir. Sonuçlar, arkasında MM yapısı bulunan tasarlanan antenin,

UWB frekans bölgesinde 4,55 GHz'den 13 GHz'e uzanan 8,45 GHz'lik ultra geniş empedans bant genişliğine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca sonuçlardan tasarlanan MM yapısının antenin arkasına uygulanmasıyla antenin kazancı, yönlülüğü ve FBR'sinin arttığı gözlemlenmiştir. Simülasyonlarda antenin arkasındaki MM yapısı olan ve olmayan farklı frekanslardaki uzak alan ışıma örüntüleri de hesaplanmıştır. Işıma örüntüsü grafiklerinden, tasarlanan MM yapısının antenin arkasına yerleştirilmesi ile yönlülüğün arttığı ve arka lob ışımasının azaldığı, bunun sonucunda antenin vücut üzerinde kullanımları sırasında vücuda daha az EM dalgalarının çarpması ve daha az emilimi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca tasarlanan antenin insan vücudu üzerindeki radyasyon etkisinin araştırılması için, antenin arkasında tasarlanan MM yapısı olan ve olmayan antenin boş uzayda ve vücut modeli üzerindeki SAR değerleri farklı frekanslarda hesaplanmıştır. MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle maksimum SAR değerlerinin önemli ölçüde azaldığı ve düşüşün %98,3'e ulaşacağı hesaplandığı görülmüştür. Vücut modeli üzerinde MM yapısı ile tasarlanan antenin en yüksek SAR değerleri 4 GHz, 7,5 GHz ve 10,5 GHz frekanslarında sırasıyla 0,067; 0,107 ve 0,070 W/kg olarak hesaplandı. Bu SAR değerleri, 10 g doku için Avrupa standartlarında belirlenen maksimum SAR sınırı olan 2 W/kg ile karşılaştırıldığında çok düşüktür. Ek olarak, vücut üzeri simülasyonları ve deneyleri, arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin UWB frekans bölgesinde ultra geniş çalışma empedans bant genişliğini koruduğunu göstermektedir.

Tasarlanan anten ve MM yapısından oluşan önerilen sistem yapısı oldukça düşük kalınlığa sahiptir. Bildiğimiz kadarıyla tasarlanan sistemin 4,68 mm kalınlığı, MM yapıları UWB tam tekstil giyilebilir antenler için literatürde bildirilen en düşük kalınlıktır. Çok düşük kalınlığa ve düşük SAR değerine sahip olmak, tam esneklik sağlayan tamamen tekstil malzemelerden üretilmiş ve ultra geniş frekans bandında çalışan, arkasındaki MM yapısı ile tasarlanan antenin tüm bu avantajlarla WBAN uygulamaları için kullanılacağına inanılmaktadır.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, WBAN uygulamalarında kullanılmak için bir adet çoklu frekans bandında, üç adet UWB frekans bandında özgün tasarıma sahip giyilebilir mikroşerit antenlerin tasarımı, nümerik analizi ve deneysel sonuçları sunulmuştur. Özgün giyilebilir antenler, ilk önce CST simülasyon programında tasarlanıp analiz edilmiştir. Tasarımlarda dielektrik taban malzemesi olarak, Rogers 5880 ve kot, keçe esnek tekstil malzemeleri tercih edilmiştir. Tasarlanan giyilebilir antenlerin vücut etkileşimini izole etmek ve yönlülüğünü artırmak için antenlerin arka kısımlarına MM yapılar tasarlanıp entegre edilmiştir. Nümerik ortamda boyutları belirlenen antenler ve MM yapılar başarılı şekilde üretilmiştir. CST yazılım ortamında öncelikle anten çalışma frekans bandını gösteren yansıma katsayısı parametresi olmak üzere, ışıma örüntüleri, yönlülük, kazanç gibi anten performans parametreleri serbest uzayda ve vücut üzerinde MM'li ve MM'siz olarak başarıyla analiz edilmiştir. Giyilebilir antenlerin sağlık güvenliği açısından önemli bir parametre olan SAR değerleri MM'li ve MM'siz olarak nümerik ortamda analiz edilmiştir. Nümerik sonuçların ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar önerilen antenlerin WBAN uygulamaları için kullanılabileceğini göstermiştir. Tez çalışmasında önerilen giyilebilir antenler için yapılan nümerik ve deneysel analizler aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tasarım 1 Anteni Rogers RT/duroid 5880 dielektrik taban malzemesi üzerine çoklu frekans bandı özelliğinde tasarlanmıştır. Giyilebilir antenin yansıma katsayısı, VSWR, ışıma örüntüleri, nümerik olarak incelenmesi yapılmıştır. Nümerik sonuçlardan antenin yansıma katsayısı, bant genişliği ve ışıma örüntüleri ile giyilebilir uygulamalar için kullanılabilir bir adet 2,4 GHz ISM bandı ve üç adet UWB bölgesinde UWB ($UWB \geq 500\text{MHz}$) olmak üzere toplam dört adet spektral frekans bantlı anten elde edilmiştir. Bu tasarım çoklu frekans bant uygulamaları için avantaj sağlar. Bu frekans

bantlarının her biri farklı cihazlarla iletişim kurabilir veya bant genişliğini artırmak için birlikte kullanılabilir. Anten sert dielektrik taban malzemesi Rogers RT/duroid 5880 üzerine tasarlanmış olması neme karşı avantaj sağlarken, giyilebilir tasarımlar için önemli olan esneklik açısından dezavantaja sahiptir. Ancak anten giyilebilirlik açısından yeterince küçük boyut ve düşük kalınlık özelliğine sahip olduğundan giyilebilirlik açısından uygundur. Gelecekteki çalışmalarda, bu değerleri WBAN anten üretiminde ve ölçümünde kullanılması planlanmaktadır.

Tasarım 2 çalışmasında, WBAN uygulamaları için UWB çalışma frekans bandına sahip MM'li ve MM'siz giyilebilir antenin nümerik ve deneysel sonuçları verilmiştir. Antenin radyasyon performans parametrelerini artırmak ve insan vücudu ile anten arasındaki etkileşimi azaltmak için bir MM yapısı tasarlanmıştır. Nümerik ve deneysel sonuçlardan MM'li ve MM'siz düzlemsel antenin empedans uyumu performansını gösteren yansıma katsayısı parametrelerinin, serbest uzayda UWB frekans bandını kapsayan geniş bir frekans bant genişliğine sahip olduğunu göstermiştir. MM'li ve MM'siz tasarlanmış antenin empedans uyumu karakteristikleri, kazanç, ışıma örüntüleri ve yönlülük parametreleri nümerik ortamda analiz edilmiştir. Ayrıca MM'li ve MM'siz antenin empedans uyum karakteristiği ve SAR değerleri, serbest uzayda ve vücut üzerinde nümerik ortamda başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Analiz sonuçlarından antene MM entegresi ile antenin ileri yönlendiriciliği arttırılmış ve bundan dolayı SAR değerleri düşmüştür. Üstelik, anten MM üzerine yerleştirildiğinde, serbest alanda ve vücutta kararlı bir empedans uyumu sağlarken maksimum SAR değerleri, 2 W / kg Avrupa güvenlik sınırlamalarının oldukça altındadır. MM'li antenin simüle edilmiş maksimum SAR değeri, MM olmayan antenin simüle edilmiş maksimum SAR değerine kıyasla % 97 oranında azaltılmıştır. Antenin gerçekleşen maksimum kazancı MM tarafından 4,6'dan 9,1 dB'ye yükselmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak, MM'li kompakt, UWB, düşük SAR ve yüksek yönlendirilebilirliğe sahip esnek giyilebilir anten WBAN uygulamaları için başarıyla tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu özellikler WBAN uygulamaları için önemli avantajlar sağlar. Çalışmanın ve sonuçlarının UWB MM antenleri için literatüre önemli bir katkı sağlayacağı ve anten tasarımcılarına ışık tutacağı değerlendirilmektedir.

Tasarım 3 çalışmasında, WBAN uygulamaları için arkasında MM yapısı entegre edilmiş bir UWB düşük profilli giyilebilir anten önerilmiştir. Tasarlanan antenin üst kısmında ışımadan sorumlu kare ve dairesel birleşiminden oluşan geometri bulunmaktadır. Öte

yandan antenin arka tarafında, geniş bant genişliğini artıran dikdörtgen şekilli eksik toprak düzlemi bulunmaktadır. Ek olarak, antenin geri ışınlamını daha da azaltmak ve yönlülüğünü arttırmak için dikdörtgen bir kafes içinde periyodik olarak dizilmiş I şeklinde birim metayüzey hücrelerinden oluşan MM yapısı önerilmiş ve antenin arkasına uygulanmıştır. Tasarlanan antenin dielektrik taban malzemesi olarak kot kumaşı ve MM yapısı dielektrik taban malzemesi olarak keçe malzemeleri kullanılmıştır. Tasarımda iletken düzlemler için bakır bant tercih edilmiştir. Tasarlanan antenin performansı MM yapısı olsun olmasın simülasyonlar ve ölçümler ile incelenmiştir. Sonuçlar, MM yapısı entegre edilmesiyle tasarlanan antenin, UWB frekans bölgesinde 4,3 GHz'den 13,4 GHz'e uzanan 9,1 GHz'lik ultra geniş empedans bant genişliğine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca sonuçlardan tasarlanan MM yapısının antenin arkasına uygulanmasıyla antenin kazancı, yönlülüğü ve FBR'sinin arttığı gözlemlenmiştir. Antene MM entegre edilmesiyle antenin en yüksek maksimum gerçek kazancı değeri önemli ölçüde artırılmış 4,73 dB'den 9,95 dB'ye yükselmiştir. Simülasyonlarda antenin arkasındaki MM yapısı olan ve olmayan farklı frekanslardaki uzak alan ışıma örüntüleri de hesaplanmıştır. Desen grafiklerinden, tasarlanan MM yapısının antenin arkasına yerleştirilmesi ile yönlülüğün arttığı ve arkadaki radyasyonun azaldığı, bunun sonucunda antenin vücut üzerinde kullanımları sırasında vücuda daha az EM dalgalarının çarpması ve daha az emilimi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca tasarlanan antenin insan vücudu üzerindeki radyasyon etkisinin araştırılması için, antenin arkasında tasarlanan MM yapısı olan ve olmayan antenin boş uzayda ve vücut modeli üzerindeki SAR değerleri farklı frekanslarda hesaplanmıştır. MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle maksimum SAR değerlerinin önemli ölçüde azaldığı ve düşüşün %97,1'e ulaşacağı hesaplandığı görülmüştür. Vücut modeli üzerinde MM yapısı ile tasarlanan antenin en yüksek SAR değerleri 4 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekanslarında sırasıyla 0,0734; 0,134 ve 0,191 W/kg olarak hesaplandı. Bu SAR değerleri, 10 g doku için Avrupa standartlarında belirlenen maksimum SAR sınırı olan 2 W/kg ile karşılaştırıldığında çok düşüktür. Ek olarak, vücut üzeri simülasyonları ve deneyleri, arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin UWB frekans bölgesinde ultra geniş çalışma empedans bant genişliğini koruduğunu göstermektedir.

Tasarlanan anten ve MM yapısından oluşan önerilen sistem yapısı oldukça düşük profile sahiptir. Tasarlanan MM'li antenin yaklaşık 6,9 mm kalınlığı, MM yapılı UWB tekstil

giyilebilir antenler için literatürde bildirilen düşük kalınlıkların içindedir. Ultra geniş frekans bandında çalışan MM yapısı ile tasarlanan antenin esnek dielektrik tekstil malzemelerinden üretilmiş olmasının yanında, yüksek kazanç, düşük kalınlık ve düşük SAR değerlerine sahip olması gibi avantajlı özellikleri nedeniyle WBAN uygulamaları için kullanılacağına inanılmaktadır.

Tasarım 4 çalışmasında, WBAN uygulamaları için arkasında MM yapıları bir UWB düşük kalınlıkta giyilebilir anten önerilmiştir. Tasarlanan antenin üst kısmında radyasyondan sorumlu altıgen geometri bulunmaktadır. Öte yandan antenin arka tarafında, geniş bant genişliğine izin veren dikdörtgen şekilli toprak düzlemi ve dairesel parazitik yama bulunmaktadır. Ek olarak, antenin geri ışınlamayı daha da azaltmak ve yönlülüğünü arttırmak için kare bir kafes içinde hizalanmış metayüzey hücrelerinden oluşan MM yapısı önerilmiş ve antenin arkasına uygulanmıştır. Tasarlanan anten ve MM yapısı tamamen tekstil malzemelerden yapılmıştır. Tasarlanan antenin performansı MM yapısı olsun olmasın simülasyonlar ve ölçümler ile incelenmiştir. Sonuçlar, arkasında MM yapısı bulunan tasarlanan antenin, UWB frekans bölgesinde 4,55 GHz'den 13 GHz'e uzanan 8,45 GHz'lik ultra geniş empedans bant genişliğine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca sonuçlardan tasarlanan MM yapısının antenin arkasına uygulanmasıyla antenin kazanımı, yönlendirmesi ve FBR'sinin arttığı gözlemlenmiştir. Simülasyonlarda antenin arkasındaki MM yapısı olan ve olmayan farklı frekanslardaki uzak alan ışınım örüntüleri de hesaplanmıştır. Desen grafiklerinden, tasarlanan MM yapısının antenin arkasına yerleştirilmesi ile yönlülüğün arttığı ve arkadaki radyasyonun azaldığı, bunun sonucunda antenin vücut üzerinde kullanımları sırasında vücutta daha az EM dalgalarının çarpması ve bunun sonucu olarak EM dalgalarının daha az emilmesi ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca tasarlanan antenin insan vücudu üzerindeki radyasyon etkisinin araştırılması için, antenin arkasında tasarlanan MM yapısı olan ve olmayan antenin boş uzayda ve vücut modeli üzerindeki SAR değerleri farklı frekanslarda hesaplanmıştır. Antene MM yapısı entegre edildikten sonra hesaplanan bu SAR değerleri, 10 g doku için Avrupa standartlarında belirlenen maksimum SAR sınırı olan 2 W/kg ile karşılaştırıldığında çok düşüktür. MM yapısının anten arkasına yerleştirilmesiyle zirve SAR değerlerinin önemli ölçüde azaldığı ve düşüşün %98,3'e ulaşacağı hesaplandığı görülmüştür. Ek olarak, vücut üzeri simülasyonları ve deneyleri, arkasında MM yapısı olan tasarlanan antenin UWB

frekans bölgesinde ultra geniş çalışma empedans bant genişliğini koruduğunu göstermektedir.

Tasarlanan anten ve MM yapısından oluşan önerilen sistem yapısı oldukça düşük profile sahiptir. Bildiğimiz kadarıyla tasarlanan sistemin 4,68 mm kalınlığı, MM yapılı UWB tam tekstil giyilebilir antenler için literatürde bildirilen en düşük kalınlıktır. Çok düşük profilli ve düşük SAR değerine sahip olmak, tam esneklik sağlayan tamamen tekstil malzemelerden üretilmiş ve ultra geniş frekans bandında çalışan, arkasındaki MM yapısı ile tasarlanan antenin tüm bu avantajlarla WBAN uygulamaları için kullanılacağına inanılmaktadır.



KAYNAKÇA

1. Wu, X., 2014. Antennas and Propagation for Body Area Networks at 60 GHz, University of Birmingham, Birmingham, PhD Thesis, 187 pp.
2. Arefin, M.T., Ali, M.H., Haque, A.K.M.F., 2017. Wireless body area network: an overview and various applications. **Journal of Computer and Communications**, 5 (7): 53–64.
3. Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., Jamalipour, A., 2014. Wireless body area networks: a survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 16 (3): 1658–1686.
4. Salayma, M., Al-Dubai, A., Romdhani, I., Nasser, Y., 2017. Wireless body area network (WBAN) a survey on reliability, fault tolerance, and technologies coexistence. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, 50 (1): 1–38.
5. Cao, H., Leung, V., Chow, C., Chan, H., 2009. Enabling technologies for wireless body area networks: a survey and outlook. **IEEE Communications Magazine**, 47 (12): 84–93.
6. Chandra, R., 2014. Antennas, wave propagation, and localization in wireless body area networks. Lund University, Lund, PhD Thesis, 194 pp.
7. Darwish, A., Hassanien, A.E., 2011. Wearable and implantable wireless sensor network solutions for healthcare monitoring. **Sensors**, 11 (6): 5561–5595.
8. Patel, M., Wang, J., 2010. Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies. **IEEE Wireless Communications**, 17 (1): 80–88.
9. Kinsella, K.G., Phillips, D.R., 2005. Global aging: The challenge of success **Population Reference Bureau** 60(1): 5-42.
10. Kołodziej, J., Grzonka, D., Widłak, A., Kisielewicz, P., 2019. Ultra Wide Band Body Area Networks: Design and Integration with Computational Clouds, 279–306. In: High-Performance Modelling and Simulation for Big Data Applications. (Eds: J. Kołodziej, H. González-Vélez) Springer, 2019.
11. Bradai, N., Fourati, L.C., Kamoun, L., 2015. WBAN data scheduling and aggregation under WBAN/WLAN healthcare network. **Ad Hoc Networks**, 25 (Part A): 251–262.

12. Otto, C., Milenkovic, A., Sanders, C., Jovanov, E., 2006. System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring. **Journal of Mobile Multimedia**, **1** (4): 307–326.
13. Filipe, L., Fdez-Riverola, F., Costa, N., Pereira, A., 2015. Wireless body area networks for healthcare applications: Protocol stack review. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, **11** (10): 213705.
14. Van Dam, K., Pitchers, S., Barnard, M., 2001. Body area networks: Towards a wearable future, In Proc. WWRF Kick off Meeting. Munich, Germany.
15. Chen, M., Gonzalez, S., Vasilakos, A., Cao, H., Leung, V.C.M., 2011. Body area networks: a survey. **Mobile Networks and Applications**, **16** (2): 171–193.
16. Siddiqui, M.A., Kama, M.B., Moinuddin, H., 2013. Towards the development of cross layer approach for energy efficiency and mobile wireless body area networks. **International Journal of Computer and Information Technology**, **2**(3) 542 – 548
17. Rocker, C., Ziefle, M., 2011. E-health, assistive technologies and applications for assisted living: challenges and solutions. Medical Information Science Reference. 392 pp
18. Al-Janabi, S., Al-Shourbaji, I., Shojafar, M., Shamshirband, S., 2017. Survey of main challenges (security and privacy) in wireless body area networks for healthcare applications. **Egyptian Informatics Journal**, **18** (2): 113–122.
19. Ullah, S., Higgins, H., Braem, B., Latre, B., Blondia, C., Moerman, I., Saleem, S., Rahman, Z., Kwak, K.S., 2012. A comprehensive survey of wireless body area networks. **Journal of Medical Systems**, **36** (3): 1065–1094.
20. Patel, S., Park, H., Bonato, P., Chan, L., Rodgers, M., 2012. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. **Journal of Neuroengineering and Rehabilitation**, **9** (1): 1–17.
21. Braem, B., Latre, B., Moerman, I., Blondia, C., Demeester, P., 2006. The wireless autonomous spanning tree protocol for multihop wireless body area networks, *2006 Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services*, 17-21 July 2006 San Jose, CA, US., IEEE, 1–8 pp
22. Lim, E.G., Wang, Z., Wang, J.C., Leach, M., Zhou, R., Lei, C.-U., Man, K.L., 2014. Wearable textile substrate patch antennas. **Engineering Letters**, **22** (2): 94–101.

23. Chen, M., Gonzalez, S., Vasilakos, A., Cao, H., & Leung, V. C., 2011. Body area networks: a survey. **Mobile networks and applications**, **16** (2), 171-193.
24. Jovanov, E., Price, J., Raskovic, D., Kavi, K., Martin, T., Adhami, R., 2000. Wireless personal area networks in telemedical environment. *Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine. ITAB-ITIS 2000. Joint Meeting Third IEEE EMBS International Conference on Information Technol*, 9-10 Nov. 2000, Arlington, VA, USA, 22-27 pp.
25. Jovanov, E., Milenkovic, A., 2011. Body area networks for ubiquitous healthcare applications: opportunities and challenges. **Journal of Medical Systems**, **35** (5): 1245–1254
26. Sindhu, S., Vashiath, S., Chakarvarti, S.K., 2016. A review on wireless body area network (WBAN) for health monitoring system, implementation Protocol. **Communication on Applied Electronics, Foundation of Computer Science**, **4** (7): 16-20.
27. Li, M., Lou, W., Ren, K., 2010. Data security and privacy in wireless body area networks. **IEEE Wireless Communications**, **17** (1): 51–58.
28. Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., Demeester, P., 2011. A survey on wireless body area networks. **Wireless Networks**, **17** (1): 1–18.
29. Xing, J., Zhu, Y., 2009. A survey on body area network, *2009 5th international conference on wireless communications, networking and mobile computing*, 24-26 Sept. Beijing, China IEEE, 1–4 pp.
30. Hoyt, R.W., Reifman, J., Coster, T.S., Buller, M.J., 2002. Combat medical informatics: present and future, *AMIA Symposium*. American Medical Informatics Association, 335-339 pp.
31. Cavallari, R., Martelli, F., Rosini, R., Buratti, C., Verdone, R., 2014. A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, **16** (3): 1635–1657.
32. Kwak, K.S., Ullah, S., Ullah, N., 2010. An overview of IEEE 802.15. 6 standard, *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)*, 7-10 Nov. 2010 Rome, Italy IEEE, 1–6 pp.

33. Liao, Y., 2017. System Design and Performance Analysis of Wireless Body Area Networks. University of Warwick PhD. Thesis, 161 pp.
34. Salehi, S.A., Razzaque, M.A., Tomeo-Reyes, I., Hussain, N., 2016. IEEE 802.15. 6 standard in wireless body area networks from a healthcare point of view, 2016 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), 25-27 Aug. 2016, Yogyakarta, Indonesia, IEEE, 523-528 pp.
35. Astrin, A., 2012. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks part 15.6: Wireless Body Area Networks. IEEE Std 802.15. 6.
36. Ibraheem, A.A.Y., 2014. Implanted antennas and intra-body propagation channel for wireless body area network. Virginia Polytechnic Institute and State University, PhD. Thesis, Virginia, 117 pp.
37. Islam, M.N., Yuce, M.R., 2016. Review of medical implant communication system (MICS) band and network. **Ict Express**, 2 (4): 188–194.
38. Alam, M.M., Hamida, E. Ben, 2014. Surveying wearable human assistive technology for life and safety critical applications: Standards, challenges and opportunities. **Sensors**, 14 (5): 9153–9209.
39. Rizwan, M., 2015. Performance evaluation of wearable antennas using flexible substrates. Tampere University of technology, Master's Thesis, 54 pp.
40. Balanis, C.A., 2016. Antenna theory: analysis and design. John wiley & sons
41. Najam, A.I., Duroc, Y., Tedjini, S., 2012. Multiple-input multiple-output antennas for ultra wideband communications, pp: 209–236, *In: Ultra Wideband: Current Status and Future Trends*, (Eds: M. A. Matin) IntechOpen.
42. Ullah, S., Mohaisen, M., Alnuem, M.A., 2013. A review of IEEE 802.15. 6 MAC, PHY, and security specifications. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 9 (4): 950704.
43. Hamza, A.R., Al-Hindawi, A., Azeez, H.I., 2016. Design and analysis of textile ISM/UWB antenna for on-body communications. **Journal of Modeling and Simulation of Antennas and Propagation**, 2 (1): 7–12.
44. Ahsan, M.R., Islam, M.T., Habib Ullah, M., Arshad, H., Mansor, M.F., 2014. Low-cost dielectric substrate for designing low profile multiband monopole microstrip antenna. **The Scientific World Journal**, 2014:.1-10.

45. Augustine, R. (2009). Electromagnetic modelling of human tissues and its application on the interaction between antenna and human body in the BAN context (Doctoral dissertation, University of Paris Est, PhD Thesis, Marne-la-Vallée, 186 pp
46. Liu, Y., Si, L.-M., Wei, M., Yan, P., Yang, P., Lu, H., Zheng, C., Yuan, Y., Mou, J., Lv, X., 2012. Some recent developments of microstrip antenna. **International Journal of Antennas and Propagation**, 2012:1-10pp.
47. Wang, J.C., Lim, E.G., Leach, M., Wang, Z., Man, K.L., Huang, Y., 2016. Review of wearable antennas for WBAN applications. **IAENG International Journal of Computer Science**, 43 (4): 16–19.
48. Mishra, R., 2016. Mishra, R. (2016). An overview of microstrip antenna. **HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR)**, 21 (2), 1-17.
49. Bankey, V., Nella, A., 2015. Design and performance issues of microstrip antennas. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, 6 (3): 1572–1580.
50. Wheeler, H.A., 1947. Fundamental limitations of small antennas. **Proceedings of the IRE**, 35 (12): 1479–1484.
51. Chu, L.J., 1948. Physical limitations of omni-directional antennas. **Journal of Applied Physics**, 19 (12): 1163–1175.
52. Loss, C. (2017). Study of the Electromagnetic Properties of Textiles: Development of Textile Antennas for Energy Harvesting Universidade da Beira Interior Doctoral Thesis, Covilhã Portugal, .145 pp
53. Baker-Jarvis, J., Janezic, M.D., DeGroot, D.C., 2010. High-frequency dielectric measurements. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, 13 (2): 24–31.
54. Purohit, S., Raval, F., 2013. A review on wearable–textile patch antenna. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 4 (12): 696–702.
55. Lee, K.-F., Tong, K.-F., 2012. Microstrip patch antennas—basic characteristics and some recent advances. **Proceedings of the IEEE**, 100 (7): 2169–2180.
56. Siddik, A., Hossain, M., Haque, D., & Faruque, O. (2019). Design and radiation characterization of rectangular microstrip patch antenna for millimeter-wave communication. **American Journal of Engineering Research**, 8 (1): 273-281.

57. Salgado, R., Loss, C., Gonçalves, R., Pinho, P., 2012. Textile materials for the design of wearable antennas: a survey. **Sensors**, **12** (11): 15841–15857.
58. Siakavara, K., 2011. Methods to design microstrip antennas for modern applications. 173-236. *In: Microstrip Antennas*, (Eds: N. Nasimuddin), In Tech.
59. Ather, S.N., Singhal, P.K., 2013. Truncated rectangular microstrip antenna with H and U slot for broadband. **International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)**, **5** (01): 114-118.
60. Latif, S.I., Shafai, L., Sharma, S.K., 2005. Bandwidth enhancement and size reduction of microstrip slot antennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **53** (3): 994–1003.
61. Sankaralingam, S., Gupta, B., 2010. Development of textile antennas for body wearable applications and investigations on their performance under bent conditions. **Progress In Electromagnetics Research**, **22**: 53–71.
62. Elrashidi, A., Elleithy, K., Bajwa, H., 2011. Resonance Frequency, Gain, Efficiency and Quality Factor of a Microstrip Printed Antenna as a Function of Curvature for TM₀₁ mode Using Different Substrates. **Journal of Wireless Networking and Communications**, **1**: 1–8.
63. Nawaz, M. I., Huiling, Z., Nawaz, M. S. S., Zakim, K., Zamin, S., Khan, A., 2013. A review on wideband microstrip patch antenna design techniques. *2013 International Conference on Aerospace Science & Engineering (ICASE)*, 21-23 Aug. 2013, Islamabad, Pakistan, IEEE. 1-8 pp.
64. Zhang, J., Orlik, P. V., Sahinoglu, Z., Molisch, A.F., Kinney, P., 2009. UWB systems for wireless sensor networks. **Proceedings of the IEEE**, **97** (2): 313–331
65. Adamiuk, G., Zwick, T., Wiesbeck, W., 2012. UWB antennas for communication systems. **Proceedings of the IEEE**, **100** (7): 2308–2321.
66. Ivšić, B., 2013. Textile Antennas for Body-Centric Communication Systems, University of Zagreb. Faculty of Electrical Engineering and Computing. Department of Wireless Communications, Doctoral Thesis, Zagreb, 241 pp.
67. Doddipalli, S., Kothari, A., 2018. Compact UWB antenna with integrated triple notch bands for WBAN applications. **IEEE Access**, **7**: 183–190.
68. Srifi, M.N., Essaaidi, M., 2011. Ultra-wideband printed antennas design. 195-214, *In: Ultra Wideband Communications: Novel Trends - Antennas and Propagation* (Eds: M. A. Matin) Intech Open.

69. De Santis, V., Feliziani, M., Maradei, F., 2010. Safety assessment of UWB radio systems for body area Network by the FD²TD Method. **IEEE Transactions on Magnetism**, **46** (8): 3245–3248.
70. Gerrits, J.F.M., Farserotu, J.R., Long, J.R., 2008. Low-complexity ultra-wide-band communications. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, **55** (4): 329–333.
71. Tuovinen, T., Kumpuniemi, T., Yazdandoost, K. Y., Hämäläinen, M., & Iinatti, J. (2013, March). Effect of the antenna-human body distance on the antenna matching in UWB WBAN applications. *7th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, 6-8 March 2013, Tokyo, Japan, IEEE, 193-197 pp.
72. Yildirim, B.S., Cetiner, B.A., Roqueta, G., Jofre, L., 2009. Integrated bluetooth and UWB antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **8**: 149–152.
73. Shafique, K., Khawaja, B.A., Tarar, M.A., Khan, B.M., Mustaqim, M., Raza, A., 2016. A wearable ultra-wideband antenna for wireless body area networks. **Microwave and Optical Technology Letters**, **58** (7): 1710–1715.
74. Poffelie, L.A.Y., Soh, P.J., Yan, S., Vandenbosch, G.A.E., 2015. A high-fidelity all-textile UWB antenna with low back radiation for off-body WBAN applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **64** (2): 757–760.
75. Koohestani, M., Zürcher, J.-F., Moreira, A.A., Skrivervik, A.K., 2014. A novel, low-profile, vertically-polarized UWB antenna for WBAN. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **62** (4): 1888–1894.
76. Jeong, W., Tak, J., Choi, J., 2015. A low-profile IR-UWB antenna with ring patch for WBAN applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **14**: 1447–1450.
77. Kumar, V., Gupta, B., 2016. On-body measurements of SS-UWB patch antenna for WBAN applications. **AEU-International Journal of Electronics and Communications**, **70** (5): 668–675.
78. Yang, D., Hu, J., Liu, S., 2018. A low profile UWB antenna for WBAN applications. **IEEE Access**, **6**: 25214–25219.
79. Simorangkir, R. B., Abbas, S. M., Esselle, K. P., 2016. A printed UWB antenna with full ground plane for WBAN applications. *International Workshop on Antenna*

- Technology (iWAT)*, 29 Feb.-2 March 2016, Cocoa Beach, FL, USA, IEEE, 127-130 pp.
80. Tsolis, A., Whittow, W.G., Alexandridis, A.A., Vardaxoglou, J.C., 2014. Embroidery and related manufacturing techniques for wearable antennas: challenges and opportunities. **Electronics**, **3** (2): 314–338.
 81. Hall, P.S., Hao, Y., 2006. Antennas and propagation for body centric communications, *2006 First European Conference on Antennas and Propagation*, 6-10 Nov. 2006, Nice, France, IEEE, 1–7 pp.
 82. Salonen, P., Sydanheimo, L., Keskilammi, M., Kivikoski, M., 1999. A small planar inverted-F antenna for wearable applications, *Digest of Papers. Third International Symposium on Wearable Computers*, 18-19 Oct. 1999, San Francisco, CA, USA, IEEE, 95–100 pp.
 83. Salonen, P., Hurme, L., 2003. A novel fabric WLAN antenna for wearable applications, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450)*, 22-27 June 2003, Columbus, OH, USA, IEEE, 700–703 pp.
 84. Tanaka, M., Jang, J.-H., 2003. Wearable microstrip antenna, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450)*, 22-27 June 2003, Columbus, OH, USA, IEEE, 704–707 pp.
 85. Paracha, K.N., Rahim, S.K.A., Soh, P.J., Khalily, M., 2019. Wearable Antennas: A Review of Materials, Structures, and Innovative Features for Autonomous Communication and Sensing. **IEEE Access**, **7**: 56694–56712.
 86. Waterhouse, R., Novak, D., 2006. Small uni-planar antenna suitable for body wearable applications, *MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference*, 23-25 Oct. 2006, Washington, DC, USA IEEE, 1–6 pp.
 87. Matthews, J.C.G., Pirollo, B.P., Tyler, A.J., Pettit, G., 2008. Wide-band body wearable antennas, *2008 Institution of Engineering and Technology Seminar on Wideband, Multiband Antennas and Arrays for Defence or Civil Applications*, 13 March 2008, London, UK, IET, 111-127
 88. Karthikeyan, S., Gopal, Y.V., Kumar, V.G.N., Ravi, T., 2019. Design and Analysis of Wearable Antenna for Wireless Body Area Network, *International Conference*

- on *Frontiers in Materials and Smart System Technologies*, 10 April 2019, Tamil Nadu, India, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 8 pp.
89. Gupta, B., Sankaralingam, S., Dhar, S., 2010. Development of wearable and implantable antennas in the last decade: A review, *10th Mediterranean Microwave Symposium*, 25-27 Aug. 2010, Guzelyurt, Cyprus, IEEE, 251–267 pp.
 90. Wang, J. C., Lim, E. G., Leach, M., Wang, Z., Man, K. L., Huang, Y. 2016. Conformal wearable antennas for WBAN applications, *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016*, 651-654 pp.
 91. Locher, I., Klemm, M., Kirstein, T., Trster, G., 2006. Design and characterization of purely textile patch antennas. **IEEE Transactions on Advanced Packaging**, 29 (4): 777–788.
 92. Nayak, R., Wang, L., Padhye, R., 2015. Electronic textiles for military personnel. **Electronic Textiles, Elsevier**, :239-256.
 93. Massey, P.J., 2001. Mobile phone fabric antennas integrated within clothing, *11th International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2001)*, 17-20 April 2001, Manchester, UK, 344 – 347 pp.
 94. Vallozzi, L., Hertleer, C., & Rogier, H. (2016). Latest developments in the field of textile antennas. 599–626, *Smart textiles and their applications*, (Eds:V. Koncar) Woodhead Publishing.
 95. Lin, X., Seet, B. C., & Joseph, F., 2018. Wearable humidity sensing antenna for BAN applications over 5G networks. *2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 9-10 April 2018, Sand Key, FL, USA, IEEE, 1–4 pp.
 96. Shikder, K., & Arifin, F., 2015. Design and evaluation of a UWB wearable textile antenna for body area network. *2015 2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT)*, 10-12 Dec. 2015, Khulna, Bangladesh, IEEE, pp: 326–330 pp.
 97. Singh, N., Singh, A.K., Singh, V.K., 2015. Design and performance of wearable ultrawide band textile antenna for medical applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, 57 (7): 1553–1557.
 98. George, G., Nagarjun, R., Thiripurasundari, D., Poonkuzhali, R., Alex, Z. C., 2013. Design of meander line wearable antenna, *2013 IEEE Conference on Information*

- & *Communication Technologies*, 11-12 April 2013, Thuckalay, Tamil Nadu, India, IEEE, 1190-1193 pp.
99. Sankaralingam, S., Gupta, B., 2010. Determination of dielectric constant of fabric materials and their use as substrates for design and development of antennas for wearable applications. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, **59** (12): 3122–3130.
 100. Hearle, J. W., & Morton, W. E. (2008). Physical properties of textile fibres. Woodhead Publishing Limited, 742.
 101. Dhupkariya, S., Singh, V.K., Shukla, A., 2015. A review of textile materials for wearable antenna, **Journal of Microwave Engineering & Technologies**, **1**(3): 7–14.
 102. Salonen, P., Rahmat-Samii, Y., Hurme, H., & Kivikoski, M., 2004. Effect of conductive material on wearable antenna performance: A case study of WLAN antennas. *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004*, 20-25 June 2004, Monterey, CA, USA, USA, IEEE, 455-458 pp.
 103. Ahmed, M.I., Ahmed, M.F., Shaalan, A.-E.H., 2018. Novel electro-textile patch antenna on jeans substrate for wearable applications. **Progress In Electromagnetics Research**, **83**: 255–265.
 104. Hertleer, C., Rogier, H., Vallozzi, L., Van Langenhove, L., 2009. A textile antenna for off-body communication integrated into protective clothing for firefighters. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **57** (4): 919–925.
 105. Afridi, A., Ullah, S., Khan, S., Ahmed, A., Khalil, A.H., Tarar, M.A., 2013. Design of dual band wearable antenna using metamaterials. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, **47** (2): 126–137.
 106. Ramli, K. N., 2014. Small planar monopole UWB wearable antenna with low SAR. *2014 IEEE Region 10 Symposium*, 14-16 April 2014, Kuala Lumpur, Malaysia, IEEE, 235-239 pp.
 107. Yan, S., Poffelie, L.A.Y., Soh, P.J., Zheng, X., Vandenbosch, G.A.E., 2016. On-body performance of wearable UWB textile antenna with full ground plane, *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 10-15 April 2016, Davos, Switzerland, IEEE, 1–4pp.

108. Chen, S.J., Chivers, B., Shepherd, R., Fumeaux, C., 2015. Bending impact on a flexible ultra-wideband conductive polymer antenna, *2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 7-11 Sept. 2015, Turin, Italy, IEEE, 422–425 pp.
109. Boeykens, F., Rogier, H., Vallozzi, L., 2013. An efficient technique based on polynomial chaos to model the uncertainty in the resonance frequency of textile antennas due to bending. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **62** (3): 1253–1260.
110. Salonen, P., Rahmat-Samii, Y., 2006. Textile antennas: Effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth, *2006 First European Conference on Antennas and Propagation*, 6-10 Nov. 2006, Nice, France, IEEE, 1–5 pp.
111. Sagor, M.H., Abbasi, Q.H., Alomainy, A., Hao, Y., 2011. Compact and conformal ultra wideband antenna for wearable applications, *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 11-15 April 2011, Rome, Italy, IEEE, 2095–2098 pp.
112. Khaleel, H.R., Al-Rizzo, H.M., Rucker, D.G., Mohan, S., 2012. A compact polyimide-based UWB antenna for flexible electronics. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **11**: 564–567.
113. Giddens, H., Paul, D.L., Hilton, G.S., McGeehan, J.P., 2012. Influence of body proximity on the efficiency of a wearable textile patch antenna, *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 26-30 March 2012, Prague, Czech Republic, IEEE, 1353–1357 pp.
114. Rahim, H.A., Abdulmalek, M., Soh, P.J., Vandenbosch, G.A.E., 2017. Evaluation of a broadband textile monopole antenna performance for subject-specific on-body applications. **Applied Physics A**, **123** (97): 1-6.
115. Alemaryeen, A., Noghanian, S., 2019. On-body low-profile textile antenna with artificial magnetic conductor. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **67** (6): 3649–3656.
116. Jiang, Z.H., Brocker, D.E., Sieber, P.E., Werner, D.H., 2014. A compact, low-profile metasurface-enabled antenna for wearable medical body-area network devices. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **62** (8): 4021–4030.

117. Chen, Z.N., Cai, A., See, T.S.P., Qing, X., Chia, M.Y.W., 2006. Small planar UWB antennas in proximity of the human head. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **54** (4): 1846–1857.
118. See, T.S.P., Chen, Z.N., 2009. Experimental characterization of UWB antennas for on-body communications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **57** (4): 866–874.
119. Chahat, N., Zhadobov, M., Sauleau, R., Ito, K., 2011. A compact UWB antenna for on-body applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **59** (4): 1123–1131.
120. Biswas, A., Islam, A.J., Al-Faruk, A., Alam, S.S., 2017. Design and performance analysis of a microstrip line-fed on-body matched flexible UWB antenna for biomedical applications, *2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, 16-18 Feb. 2017, Cox's Bazar, Bangladesh, IEEE, 181–185 pp.
121. Alemaryeen, A., Noghanian, S., 2017. Crumpling effects and specific absorption rates of flexible AMC integrated antennas. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, **12** (4): 627–635.
122. Gimán, F.N., Soh, P.J., Jamlos, M.F., Lago, H., Al-Hadi, A.A., Abdulmalek, M., Abdulaziz, N., 2017. Conformal dual-band textile antenna with metasurface for WBAN application. **Applied Physics A**, **123** (32): 1-7.
123. Yalduz, H., Koç, B., Kuzu, L., Turkmen, M., 2019. An ultra-wide band low-SAR flexible metasurface-enabled antenna for WBAN applications. **Applied Physics A**, **125** (9): 609.
124. Elsheakh, D., Abdallah, E.A., Elsadek, H.A., 2017. Non-Invasive Electromagnetic Biological Microwave Testing. 275-318, *Microwave Systems and Applications* (Eds: S. Goudos), Intech
125. Priyadarshini, S.J., Hemanth, D.J., 2018. Investigation and reduction methods of specific absorption rate for biomedical applications: A survey. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **28** (3): e21211
126. Priya, A., Kumar, A., Chauhan, B., 2015. A review of textile and cloth fabric wearable antennas. **International Journal of Computer Applications**, **116** (17):1-5.

127. Hossain, M.I., Faruque, M.R.I., Islam, M.T., 2015. Analysis on the effect of the distances and inclination angles between human head and mobile phone on SAR. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, **119** (2): 103–110.
128. Zhang, M., Alden, A., 2011. Calculation of whole-body SAR from a 100 MHz dipole antenna. **Progress In Electromagnetics Research**, **119**: 133–153.
129. Islam, M.T., Faruque, M.R.I., Misran, N., 2009. Reduction of specific absorption rate (SAR) in the human head with ferrite material and metamaterial. **Progress In Electromagnetics Research**, **9**: 47–58.
130. Ahmed, A.M., 2018. Specific Absorption Rate (SAR) Simulated for Square Patch Antenna of Head Tissues. **Engineering and Technology Journal**, **36** (5 Part (A) Engineering): 509–513.
131. Wang, M., Yang, Z., Wu, J., Bao, J., Liu, J., Cai, L., Dang, T., Zheng, H., Li, E., 2018. Investigation of SAR reduction using flexible antenna with metamaterial structure in wireless body area network. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **66** (6): 3076–3086.
132. Sánchez-Hernández, D.A., 2009. High frequency electromagnetic dosimetry. Artech House. 261pp.
133. Li, Y., Zhang, Z., Feng, Z., Khaleel, H.R., 2014. Fabrication and Measurement Techniques of Wearable and Flexible Antennas. **WIT Transactions on State-of-the-Art in Science and Engineering**, **82**: 7.
134. Rani, R., Kaur, P., Verma, N., 2015. Metamaterials and Their Applications in Patch Antenna: A. **International Journal of Hybrid Information Technology**, **8** (11): 199–212.
135. Chaturvedi, D., Raghavan, S., 2019. A Compact Metamaterial-Inspired Antenna for WBAN Application. **Wireless Personal Communications**, **105** (4): 1449–1460.
136. Fiddy, M.A., Tsu, R., 2010. Understanding metamaterials. **Waves in Random and Complex Media**, **20** (2): 202–222.
137. Zarifi, D., Oraizi, H., Soleimani, M., 2012. Improved performance of circularly polarized antenna using semi-planar chiral metamaterial covers. **Progress In Electromagnetics Research**, **123**: 337–354.

138. Wu, B.-I., Wang, W., Pacheco, J., Chen, X., Grzegorzczak, T.M., Kong, J.A., 2005. A study of using metamaterials as antenna substrate to enhance gain. **Progress In Electromagnetics Research**, **51**: 295–328.
139. Pendry, J., 2006. Metamaterials in the sunshine. *Nature Materials*, **5** (8): 599–600.
140. Bilotti, F., Sevgi, L., 2012. Metamaterials: Definitions, properties, applications, and FDTD-based modeling and simulation. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **22** (4): 422–438.
141. Grelier, M., Linot, F., Lepage, A.C., Begaud, X., LeMener, J.M., Soiron, M., 2011. Analytical methods for AMC and EBG characterizations. **Applied Physics A**, **103** (3): 805–808.
142. Yan, S., Soh, P.J., Vandenbosch, G.A.E., 2015. Wearable dual-band magneto-electric dipole antenna for WBAN/WLAN applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **63** (9): 4165–4169.
143. Engheta, N., Ziolkowski, R.W., 2006. Metamaterials: physics and engineering explorations. John Wiley & Sons.
144. Veselago, V.G., 1968. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of $\text{Im}g$ and $\text{Re}g$. **Physics-Uspekhi**, **10** (4): 509–514.
145. Grimberg, R., 2013. Electromagnetic metamaterials. **Materials Science and Engineering: B**, **178** (19): 1285–1295.
146. Park, I., 2018. Application of metasurfaces in the design of performance-enhanced low-profile antennas. **EPJ Applied Metamaterials**, **5**: 11.
147. Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J., Youngs, I., 1996. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. **Physical Review Letters**, **76** (25): 4773.
148. Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J., Stewart, W.J., 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **47** (11): 2075–2084.
149. Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C., Schultz, S., 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. **Physical Review Letters**, **84** (18): 4184.
150. Shelby, R.A., Smith, D.R., Schultz, S., 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. **Science**, **292** (5514): 77–79.

151. Zhi-ning, C., 2014. Metamaterials and metamaterial-based antenna technology. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 20 (5): 531–540.
152. Chen, Z.N., Qing, X., Shi, J., Khan, G.C., Sun, M., Lau, P.Y., Liu, W., 2014. Metamaterials-based Antennas: From Concepts To Technology, *5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'14)*, May 2014, 1-3pp.
153. Ashyap, A.Y.I., Zainal Abidin, Z., Dahlan, S.H., Majid, H.A., Saleh, G., 2019. Metamaterial inspired fabric antenna for wearable applications. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, 29 (3): e21640
154. Yan, S., Soh, P.J., Vandenbosch, G.A.E., 2015. Dual-band textile MIMO antenna based on substrate-integrated waveguide (SIW) technology. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 63 (11): 4640–4647.
155. Ziolkowski, R.W., 2006. Metamaterial-based antennas: Research and developments. **IEICE Transactions on Electronics**, 89 (9): 1267–1275.
156. Ali, U., Ullah, S., Shafi, M., Shah, S.A.A., Shah, I.A., Flint, J.A., 2019. Design and comparative analysis of conventional and metamaterial-based textile antennas for wearable applications. **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**, 32 (6): e2567
157. Krzysztofik, W.J., Cao, T.N., 2018. Metamaterials in application to improve antenna parameters. 63-85, *Metamaterials and Metasurfaces*, (Eds: J. Canet-Ferrer), Intech Open.
158. Dewan, R., Rahim, M.K.A., Hamid, M.R., Yusoff, M.F.M., Samsuri, N.A., Murad, N.A., Kamardin, K., 2017. Artificial magnetic conductor for various antenna applications: An overview. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, 27 (6): e21105.
159. Iyer, M., 2018. Compact Antenna with Artificial Magnetic Conductor for Noninvasive Continuous Blood Glucose Monitoring Rochester Institute of Technology, Master's Thesis, Rochester, New York, 102 pp.
160. Yan, S., Soh, P.J., Vandenbosch, G.A.E., 2014. Low-profile dual-band textile antenna with artificial magnetic conductor plane. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 62 (12): 6487–6490.

161. Mantash, M., Tarot, A.-C., Collardey, S., Mahdjoubi, K., 2015. Design methodology for wearable antenna on artificial magnetic conductor using stretch conductive fabric. **Electronics Letters**, **52** (2): 95–96.
162. Zhu, S., Langley, R., 2009. Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **57** (4): 926–935.
163. Ali, U., Ullah, S., Khan, J., Shafi, M., Kamal, B., Basir, A., Flint, J.A., Seager, R.D., 2017. Design and SAR analysis of wearable antenna on various parts of human body, using conventional and artificial ground planes. **Journal of Electrical Engineering and Technology**, **12** (1): 317–328.
164. Jiang, Z.H., Werner, D.H., 2014. Robust low-profile metasurface-enabled wearable antennas for off-body communications, *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, 6-11 April 2014, The Hague, Netherlands, IEEE, 21–24 pp.
165. Saeed, S.M., Balanis, C.A., Birtcher, C.R., Durgun, A.C., Shaman, H.N., 2017. Wearable flexible reconfigurable antenna integrated with artificial magnetic conductor. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **16**: 2396–2399.
166. Gao, G., Hu, B., Wang, S., Yang, C., 2018. Wearable planar inverted-F antenna with stable characteristic and low specific absorption rate. **Microwave and Optical Technology Letters**, **60** (4): 876–882.
167. Yang, H.-L., Yao, W., Yi, Y., Huang, X., Wu, S., Xiao, B., 2016. A dual-band low-profile metasurface-enabled wearable antenna for WLAN devices. **Progress In Electromagnetics Research**, **61**: 115–125.
168. Velan, S., Sundarsingh, E.F., Kanagasabai, M., Sarma, A.K., Raviteja, C., Sivasamy, R., Pakkathillam, J.K., 2014. Dual-band EBG integrated monopole antenna deploying fractal geometry for wearable applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **14**: 249–252.
169. Malekpoor, H., Jam, S., 2016. Improved radiation performance of low profile printed slot antenna using wideband planar AMC surface. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **64** (11): 4626–4638.
170. Liu, X., Di, Y., Liu, H., Wu, Z., Tentzeris, M.M., 2015. A planar windmill-like broadband antenna equipped with artificial magnetic conductor for off-body communications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **15**: 64–67.

171. Wang, F., Arslan, T., 2016. A wearable ultra-wideband monopole antenna with flexible artificial magnetic conductor, *2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, 14-15 Nov. 2016, Loughborough, UK IEEE, 1–5 pp.
172. Hussin, E.F.N.M., Soh, P.J., Jamlos, M.F., Lago, H., Al-Hadi, A.A., Rahiman, M.H.F., 2017. A wideband textile antenna with a ring-slotted AMC plane. **Applied Physics A**, **123** (1): 46.
173. Binion, D., Werner, P.L., Werner, D.H., Lier, E., Hand, T.H., 2018. Metamaterial enhanced antenna systems: A review, *2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, 25-29 March 2018, Denver, CO, USA, IEEE, 1–2 pp.
174. Mantash, M., Tarot, A.-C., Collardey, S., Mahdjoubi, K., 2012. Investigation of flexible textile antennas and AMC reflectors. **International Journal of Antennas and Propagation**, **2012**: 1-10.
175. Raad, H.R., Abbosh, A.I., Al-Rizzo, H.M., Rucker, D.G., 2012. Flexible and compact AMC based antenna for telemedicine applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **61** (2): 524–531.
176. Jiang, Z.H., Cui, Z., Yue, T., Zhu, Y., Werner, D.H., 2017. Compact, highly efficient, and fully flexible circularly polarized antenna enabled by silver nanowires for wireless body-area networks. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, **11** (4): 920–932.
177. Bai, Q., Langley, R., 2009. Wearable EBG antenna bending and crumpling, *2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 16-17 Nov. 2009, Loughborough, UK, IEEE, 201–204 pp.
178. Li, S., Zhou, X., Zhang, X., Wu, J., 2011. The study on microstrip antenna with miniaturization and broadband, *2011 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*, 15-17 Oct. 2011, Shanghai, China, IEEE, 2179–2182 pp.
179. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>, Erişim Tarihi Kasım 2020.
180. Monti, G., Catarinucci, L., Tarricone, L., 2009. Compact microstrip antenna for RFID applications. **Progress In Electromagnetics Research**, **8**: 191–199.

181. Rajat, A., Ajay, K., Saleem, K., Sandeep, A., 2013. Finite element modeling and design of rectangular patch antenna with different feeding techniques. **Open Journal of Antennas and Propagation**, 2013:.
182. Bilgin, G., Yilmaz, V.S., Kara, A., Aydin, E., 2019. Comparative assessment of electromagnetic simulation tools for use in microstrip antenna design: Experimental demonstrations. **Microwave and Optical Technology Letters**, 61 (2): 349–356
183. Weiland, T., 1977. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. **Archiv für Elektronik und Uebertragungstechnik**, 31: 116-120.
184. Rahimi, Z., 2011. The finite integration technique (FIT) and the application in lithography simulations. University of Erlangen, Doctoral Thesis, Nürnberg, 116 pp.
185. Kumar, V., Gupta, B., 2017. Design aspects of body-worn UWB antenna for body-centric communication: A review. **Wireless Personal Communications**, 97 (4): 5865–5895.
186. Cárcamo, H.K., Vera, C.A., Olivares, C.L., 2015. A comparative analysis of microstrip patch antenna for MICS and ISM frequency antennas applied to WBAN, *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 28-30 Oct. 2015, Santiago, Chile, IEEE, 281–287 pp.
187. Ullah, M.H., Islam, M.T., 2013. A compact square loop patch antenna on high dielectric ceramic–PTFE composite material. **Applied Physics A**, 113 (1): 185–193.
188. Muhamad, W.A.W., Ngah, R., Jamlos, M.F., Soh, P.J., Ali, M.T., 2016. Bandwidth enhancement using Polymeric Grid Array Antenna for millimeter-wave application. **Applied Physics A**, 123 (1): 69.
189. Türkmen, M., Yalduz, H., 2017. Design and analysis of quad-band grid array microstrip antenna at UWB and ISM channel frequencies for WBAN operations, *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*., 30 Nov.-2 Dec. 2017, Bursa, Turkey, IEEE, 991–994 pp.
190. Shahid, S., Rizwan, M., Abbasi, M.A.B., Tarar, M.A., Abbas, S.M., 2014. Bend profiling of textile antenna for body centric wireless communication, *the 8th*

European Conference on Antennas and Propagation, to be held at the World Forum in The Hague, The Netherlands, 1744-1748 pp.

191. Prakash, P., Abegaonkar, M.P., Basu, A., Koul, S.K., 2013. Gain enhancement of a CPW-fed monopole antenna using polarization-insensitive AMC structure. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **12**: 1315–1318.
192. Kumar Pandey, G., Shankar Singh, H., Kumar Meshram, M., 2016. Investigations of triple band artificial magnetic conductor back plane with UWB antenna. **Microwave and Optical Technology Letters**, **58** (8): 1900–1906.
193. Joshi, C., Lepage, A.C., Sarrazin, J., Begaud, X., 2016. Enhanced broadside gain of an ultrawideband diamond dipole antenna using a hybrid reflector. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **64** (7): 3269–3274.
194. Agarwal, K., Guo, Y.-X., Salam, B., 2016. Wearable AMC backed near-endfire antenna for on-body communications on latex substrate. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, **6** (3): 346–358.
195. Chahat, N., Zhadobov, M., Sauleau, R., Mahdjoubi, K., 2010. Improvement of the on-body performance of a dual-band textile antenna using an EBG structure, *2010 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 8-9 Nov. 2010, Loughborough, UK, IEEE, 465–468 pp.
196. Mersani, A., Lotfi, O., Ribero, J., 2018. Design of a textile antenna with artificial magnetic conductor for wearable applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, **60** (6): 1343–1349.
197. Turkmen, M., Yalduz, H., 2018. Design and performance analysis of a flexible UWB wearable textile antenna on jeans substrate. **International Journal of Information and Electronics Engineering**, **8** (2): 15–18.
198. Lago, H., Soh, P.J., Jamlos, M.F., Shohaimi, N., Yan, S., Vandenbosch, G.A.E., 2016. Textile antenna integrated with compact AMC and parasitic elements for WLAN/WBAN applications. **Applied Physics A**, **122** (12): 1059.
199. Yalduz, H., Tabaru, T.E., Kilic, V.T., Turkmen, M., 2020. Design and Analysis of Low Profile and Low SAR Full-Textile UWB Wearable Antenna with Metamaterial for WBAN Applications. **AEU-International Journal of Electronics and Communications**, **126** 153465.

200. Tripathi, S., Mohan, A., Yadav, S., 2017. A performance study of a fractal UWB antenna for on-body WBAN applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59 (9): 2201–2207.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Hüsnü YALDUZ
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri: 27.04.1977-Artvin
Medeni Durum: Bekar
E-mail: husnuyalduz@hitit.edu.tr
Yazışma Adresi: Hitit Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
 Merkez/Çorum

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü	2015
Lisans	Niğde Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2001
Lise	Şavşat Lisesi, Artvin	1994

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2013-Halen	Hitit Üniversitesi	Öğr. Gör.

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

3. Yalduz, H., Tabaru, T. E., Kilic, V. T., Turkmen, M., 2020. Design and analysis of low profile and low SAR full-textile UWB wearable antenna with metamaterial for WBAN

applications. **AEU-International Journal of Electronics and Communications**, 126 : 153465.

2. Yalduz, H., Koç, B., Kuzu, L., & Turkmen, M. (2019). An ultra-wide band low-SAR flexible metasurface-enabled antenna for WBAN applications. **Applied Physics A**, 125 (9), 609.

1. Turkmen, M., Yalduz, H., 2018. Design and performance analysis of a flexible UWB wearable textile antenna on jeans substrate. **International Journal of Information and Electronics Engineering**, 8 (2): 15-18.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında (Proceedings) Basılan Bildiriler:

1. Turkmen, M., Yalduz, H., 2018. Design and performance analysis of a flexible UWB wearable textile antenna on jeans substrate *ICEEE 2018 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 3-5 Mayıs 2018 İstanbul, Turkey

2. Türkmen, M., Yalduz, H., 2017. Design and analysis of quad-band grid array microstrip antenna at UWB and ISM channel frequencies for WBAN operations, *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*., 30 Nov.- 2 Dec. 2017, Bursa, Turkey, IEEE, 991–994 pp.