

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**GİYİLEBİLİR UYGULAMALAR İÇİN
ÇİFT BANT ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ
TEKSTİL ANTEN TASARIMI**

Safiye KARAGÖZ

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

OCAK 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİYİLEBİLİR UYGULAMALAR İÇİN
ÇİFT BANT ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ
TEKSTİL ANTEN TASARIMI

Safiye KARAGÖZ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 08/ 02 /2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. S. Cumhur BAŞARAN (Danışman)

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Doç. Dr. Mustafa İlker BEYAZ

ÖZET

GIYİLEBİLİR UYGULAMALAR İÇİN ÇİFT BANT ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ TEKSTİL ANTEN TASARIMI

Safiye KARAGÖZ

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. S. Cumhur BAŞARAN

Ocak 2023; 45 sayfa

Çoklu Giriş – Çoklu Çıkış (MIMO) anten teknolojisi bize hem alıcı hem de verici uçlarında birden fazla radyatörü bulunan bir anten yapısını ifade etmektedir. Söz konusu anten kablolu iletişim sistemlerinde veri hızını artırmak için, çok yönlü bir ortamda aynı bant genişliğini işgal eden birden fazla kanal elde edecek şekilde tasarlanmıştır. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten teknolojisiyle ilgili ana dezavantaj ışıma elemanları arasında meydana gelen kuplajdır. Işıma elemanları arasındaki kuplajın yüksek olması durumunda, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten sistemi yalnızca bir anten dizisi görevi görür. Bu nedenle, bu teknolojinin faydalarından yararlanmak için ışıma elemanları arasında güçlü bir dekoplaj sağlanmalıdır.

Bu tezin temel amacı, WLAN ve 5G uygulamaları için giyilebilir çift bantlı basılı Çoklu Giriş – Çoklu Çıkış tekstil anten geometrisini araştırmak ve uygulamaktır. Anten performans karakteristikleri; saçılma parametreleri, zarf korelasyon katsayısı (ECC), çeşitlilik kazancı (DG), anten verimliliği, anten tepe kazancı ve anten ışıma modelleri bakımından rapor edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, iç içe yerleştirilmiş spiral halka şeklindeki rezonatörün ayna görüntüsü alınarak oluşturulan iki anten elemanından, her iki antenin tam bir toprak yapısı üzerine yerleştirilmiş L-şekilli yarıktan ve anten ışıma elemanları arasında güçlü bir dekoplaj sağlamak için toprak yapısını tam ortasından ikiye kesen dikey bir yarıktan oluşan Çoklu Giriş Çoklu Çıkış tekstil anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen antenin performansını iyileştirmek adına sayısal analize dayalı parametrik bir araştırma yürütülmüştür. Antenin deneysel bulguları, HFSS (High Frequency Structure Simulator) ve CST (Computer Simulation Technology) simülasyon programlarından eş zamanlı olarak elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Söz konusu anten giyilebilir tekstil uygulamaları için 5G (4.80 – 5.00 GHz) ve WLAN (5.75 – 5.85 GHz) frekans bantlarında çift bant çalışan 2x2 Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten olarak tasarlanmıştır. Antenin elde edilmesi yönünde ilk olarak 5G (4.80 – 5.00 GHz) ve WLAN (5.75 – 5.85 GHz) frekans bantlarında çift bant çalışan tekli anten yapısının optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten rezonatörü ve toprak kısmının üretimi için bakır ve nikel kaplama naylondan yapılmış dokuma iletken kumaş kullanılması planlanmıştır. Anten üretilmiştir ancak, bilinen en hassas kesim tekniği olan zünd mekanik kesim yapılmasına rağmen radyatör kısmında kısa ve açık devreler oluşması nedeniyle elektromanyetik ölçümleri alınamamıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: 5inci Nesil Mobil Teknoloji (5G), Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) anten, Giyilebilir anten, Kablosuz yerel alan ağıları (WLAN), Tekstil anten.

JÜRİ: Doç.Dr. S. Cumhur BAŞARAN

Prof.Dr. Selçuk HELHEL

Doç. Dr. Mustafa İlker BEYAZ



ABSTRACT

**DUAL BAND MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT
TEXTILE ANTENNA DESIGN FOR WEARABLE APPLICATIONS**

Safiye KARAGÖZ

MSc Thesis in Electrical & Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof.Dr. S. Cumhur BAŞARAN

January 2023; 45 pages

Multiple Input - Multiple Output (MIMO) antenna technology refers to an antenna structure that has more than one radiator at both the receiving and transmitting ends. The antenna in question is designed to obtain multiple channels occupying the same bandwidth in a multipath environment, in order to increase the data rate in wireless communication systems. The main disadvantage with Multiple Input - Multiple Output antenna technology is the coupling that occurs between the radiating elements. If the coupling between the radiating elements is high, the Multiple Input - Multiple Output antenna system only acts as an antenna array. Therefore, a strong decoupling between the radiating elements must be provided to reap the benefits of this technology.

The main aim of this thesis is to investigate and apply wearable dual band printed Multiple Input - Multiple Output textile antenna geometry for WLAN and 5G applications. Antenna performance characteristics; scattering parameters are reported in terms of envelope correlation coefficient (ECC), diversity gain (DG), antenna efficiency, antenna peak gain and antenna radiation patterns.

In this thesis, two antenna elements formed by mirroring the nested spiral ring-shaped resonator, an L-shaped slit placed on a complete ground structure of both antennas, and a vertical beam that cuts the ground structure in half to provide strong decoupling between the antenna radiation elements are presented. Multiple Input - Multiple Output textile antenna design consisting of slits has been realized. In order to improve the performance of the proposed antenna, a parametric study based on numerical analysis was conducted. The experimental findings of the antenna were compared with the numerical results obtained simultaneously from HFSS (High Frequency Structure Simulator) and CST (Computer Simulation Technology) simulation programs. The antenna in question is designed as a dual-band 2×2 Multiple Input - Multiple Output antenna operating in the 5G (4.80–5.00 GHz) and WLAN (5.75–5.85 GHz) frequency bands for wearable textile applications. In order to obtain the Antenna, the optimum design of the dual-band single antenna structure was carried out first in the 5G (4.80–5.00 GHz) and WLAN (5.75–5.85 GHz) frequency bands. It is planned to use a woven conductive fabric made of copper and nickel-plated nylon for the manufacture of the antenna resonator and the ground part. The antenna was produced, but electromagnetic measurements could not be taken due to the formation of short and open circuits in the radiator part, despite the zünd mechanical cutting, which is the most precise cutting technique known.

KEYWORDS: 5th Generation Mobile Technology (5G), Multiple Input Multiple Output (MIMO) antenna, Wearable antenna, Textile antenna, Wireless local area network (WLAN)

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. S. Cumhuri BAŞARAN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Assoc. Prof. Dr. Mustafa İlker BEYAZ



ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans süresince bana danışmanlık yapan, her zaman ve her konuda desteğini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. S. Cumhur BAŞARAN hocama bu tez boyunca mükemmel rehberliği, sürekli destekleri ve sürekli teşvikleri için teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin desteği ve yardımları sayesinde bu çalışmayı tamamlayabildim.

Bu araştırma boyunca simülasyon ve ölçüm sürecini anlamada yardımları ve rehberlikleri için Öğr. Gör. Alparslan ÇINAR hocama özellikle teşekkür ve takdirlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca birlikte yaptığımız çalışmalarda bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Dr. Ahmet Rıfat GÖRGÜN hocama çok teşekkür ederim.

Son olarak; sürekli destekleri, cesaretlendirmeleri ve motivasyonları için aileme teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	5
3. MATERYAL VE METOD	8
3.1. Materyal	8
3.1.1. Giriş	8
3.1.2. Mikroşerit yama anten	9
3.1.3. Avantajları ve dezavantajları	10
3.2. Besleme Tekniği ve Bant Genişliği	11
3.2.1. Besleme teknikleri	11
3.2.1.1. Mikroşerit hat besleme	11
3.2.1.2. Koaksiyel besleme	12
3.2.1.3. Boşluk kuplajlı besleme	13
3.2.1.4. Yakınlık kuplajlı besleme	14
3.3. Tekstil Antenler.....	16
3.4. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Anten Sistemleri.....	18
3.4.1. Giriş	18
3.4.2. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistem yapısı	20
3.4.3. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sisteminin avantaj ve dezavantajları	21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	23

4.1. Tekli Anten Tasarımı	23
4.2. İki Anten Elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Anten Tasarımı	26
5. SONUÇLAR	33
6. KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**GIYİLEBİLİR UYGULAMALAR İÇİN ÇİFT BANT ÇOKLU GİRİŞ ÇOKLU ÇIKIŞ TEKSTİL ANTEN TASARIMI**” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../2023

Safiye KARAGÖZ

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	: Işık hızı
D	: Yönlülük
Q	: Antenin kalite faktörü
dB	: Desibel
ϵ_r	: Dielektrik geçirgenliği
ϵ_{rs}	: Anten taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti
ϵ_{ra}	: Yutucu bölge bağıl dielektrik sabiti
ϵ_{rs1}	: Birinci katmak taban malzemenin bağıl dielektrik sabiti
ϵ_{rs2}	: İkinci katmak taban malzemenin bağıl dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluktaki dalga boyu
f	: Çalışma frekansı
f_c	: Merkezi frekans
G	: Anten Kazancı
GHz	: Gigahertz Hz : Hertz
h	: Mikroşerit antenin kalınlığı
L	: Dikdörtgen mikroşerit anten eni
Ω	: Ohm
MHz	: Megahertz
mm	: Milimetre
mW	: Miliwatt
S_{11}	: Antenin yansıma katsayısı
S_{12}	: Antenin 2. Bağlantı Noktasından 1. Bağlantı Noktasına Aktarılan Güç
S_{21}	: Antenin 1. Bağlantı Noktasından 2. Bağlantı Noktasına Aktarılan Güç
X	: Antenden gönderilen işaretler

W	: Watt
W	: Dikdörtgen mikroşerit anten boyu
Y	: Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistem yoluyla antenlerden alınan işaret matrisi
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_e	: Etkin dielektrik sabiti
ϵ_r	: Dielektrik sabiti
λ_0	: Serbest uzay dalga boyu
λ	: Dalga boyu
ω	: Açısal frekansı
Γ	: Yansıma katsayısı

Kısaltmalar

5G	: 5. nesil mobil iletişim teknolojisi
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BWWD	: Vücuda giyilebilir kablosuz cihazlar
CST	: Computer-Simulation-Technology
DG	: Çeşitlilik kazancı
ECC	: Zarf korelasyon katsayısı
FCC	: Federal İletişim Kurulu
HFSS	: High Frequency Structure Simulator
LTE	: Long Term Evolution
MISO	: Çoklu Giriş Tek Çıkış
MŞA	: Mikroşerit antenler
PCB	: Esnek Baskılı Devre Kartı
PCS	: Personal Communication Systems
PIFA	: Düzlemsel ters F anteni

RF	: Radyo frekansı
RMS	: Karelerinin ortalamasının karekökü
S_{11}	: Geri dönüş kaybı
SAR	: Özgül soğurma oranı
SIMO	: Tek Giriş Çoklu Çıkış
SIW	: Taban malzemesine entegre edilmiş dalga kılavuzu
UWB	: Ultra Geniş Bant
VSWR	: Gerilim duran dalga oranı
WBAN	: Kablosuz vücut alanı ağı
Wi-Fi	: Wireless Fidelity
WIMAX	: Microwave Access (Mikrodalga erişimi için dünya çapında birlikte çalışabilirlik)
WLAN	: Wireless Local Area Network (Kablosuz lokal alan ağı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Mikroşerit yama antenin temel yapısı	9
Şekil 3.2. Mikroşerit yama elemanlarının yaygın şekilleri	10
Şekil 3.3. Mikroşerit hat besleme tekniği	12
Şekil 3.4. Prob beslemeli Dikdörtgen Mikroşerit Yama Anten	13
Şekil 3.5. Boşluk Kuplajlı besleme	14
Şekil 3.6. Yakınlık kuplajlı besleme	15
Şekil 3.7. Dokuma kumaş örnekleri	17
Şekil 3.8. SISO, SIMO, MISO ve MIMO sistem konfigürasyonu	19
Şekil 3.9. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sistemi blok diyagramı	20
Şekil 4.1. Tek elemanlı antenin (a) üstten görünümü; (b) alttan görünümü; (c) üç boyutlu görünümü	24
Şekil 4.2. Tek elemanlı antenin tasarım aşamaları	25
Şekil 4.3. Tekli anten konfigürasyonlarının (#1, #2, #3, #4, #5(Opt)) simüle edilmiş geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristiği	26
Şekil 4.4. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin (a) üstten görünümü; (b) alttan görünümü; (c) üç boyutlu görünümü.	27
Şekil 4.5. İki elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin tasarım aşamaları	29
Şekil 4.6. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten konfigürasyonlarının (#1, #2, #3, #4, #5(Opt)) simüle edilmiş geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristiği.	30
Şekil 4.7. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten ECC değeri.	31
Şekil 5.1. Tek yapıli anten HFSS ve CST simüle edilmiş geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristiği	34
Şekil 5.2. Tekli anten #5(Opt) için kazanç değeri.	34
Şekil 5.3. Tek anten #5(Opt) için VSWR değeri.	35
Şekil 5.6. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten HFSS ve CST simüle S_{11} ve S_{22} karakteristiği	37
Şekil 5.7. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten HFSS ve CST simüle S_{12} ve S_{21} karakteristiği	37
Şekil 5.8. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten #5(Opt) için kazanç değeri.	38
Şekil 5.9. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten #5(Opt) için VSWR değeri.	38
Şekil 5.10. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten farklı frekanslardaki kazanç örüntüleri	39
Şekil 5.11. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten üç boyutlu kazanç örüntüsü	40
Şekil 5.12. Üretimi gerçekleştirilmiş tek yapıli anten rezonatör ve toprak görünümü ...	40

Şekil 5.13. Üretimi gerçekleştirilmiş Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten rezonatör ve toprak görünümü	41
Şekil 5.14. Üretimi gerçekleştirilmiş tek ve Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten rezonatör ve toprak görünümü	41



ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 3.1. Mikroşerit yama antenlerde kullanılan farklı tiplerdeki besleme tekniklerinin karşılaştırılması (Garg Bhartia Bahl ve Ittipiboon 2001)	15
Tablo 3.2. Pamuk, keçe, kot ve kadife tabanlı antenlerin kalınlıkları ve dielektrik değerleri.....	18
Tablo 4.1. Önerilen tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteninin tasarım parametreleri ...	28
Tablo 5.1. Önerilen tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteninin literatürdeki antenlerle karşılaştırılması	42



1. GİRİŞ

Giyilebilir anten yapıları üzerine ilk bilimsel araştırmaların doksanlı yılların sonlarına dayandığı bilinmektedir (Salonen ve Hurme 2003). Daha sonra, giyilebilir anten üzerine akademik ve endüstriyel araştırmalarda büyüme meydana gelmiş ve tekstil taban malzemesi kullanılarak esnek bir taban malzemesi üzerine anten tasarımı yapılmıştır (Elsheakh ve diğerleri 2012). Tekstil antenleri, “akıllı giyim” olarak bilinen yeni bir konsept meydana getiren giysilerin bir parçası olmak amacıyla tasarlanmaktadır. Aynı zamanda giysilere kolaylıkla entegre edilebilmesi nedeniyle de son yıllarda oldukça ilgi görmektedir (Locher ve diğerleri 2006; Hertleer ve diğerleri 2007; Salonen ve diğerleri 2004; Langley ve Zhu 2008).

Vücuda giyilen sistemler aracılığıyla sürekli artan veri kullanımı, video ve ses hizmeti yetkinliklerin tamamının zahmetsizce durumsal bilince dahil edilmesi, özellikle askeri alanlar, yangınla mücadele, kişisel iletişim ve sağlık izleme gibi birçok uygulama için önemli bir alan haline gelmiştir (Osman ve diğerleri 2011). Ayrıca, en uzak yerlerde (yani astronotlarda) rutin olarak çalışan personel için de ciddi şekilde kayda değer ve önemli hale gelmiştir. Kullanıcının sağlığı ve çevresel durumları hakkında bilgi sağlayan bir sistemin parçası olduğundan, genellikle giyilebilir antenler, giysilere entegre edilebilen antenler olarak da tanımlanabilir. Ayrıca giysilerdeki tüm mevcut alan kablosuz iletişimde sinyal kalitesini iyileştirmek için giyilebilir antenlerde kullanılabilir.

Vücut merkezli iletişim uygulamaları için tekstil ve kumaş tabanlı antenler en çok üzerinde durulan konular arasındadır. Genel olarak, giyilebilir antenlerin düşük maliyetli, hafif ve neredeyse bakım gerektirmemesi; sağlık görevlileri, itfaiyeciler ve askeriyede görevli askerler gibi birçok meslek grubunda vücut merkezli haberleşme sistemlerinin kullanılmasını cazip hale getirmiştir. Bunun yanı sıra giyilebilir antenlerin izleme amacıyla gençler, yaşlılar ve sporcularla bağlantı kurma ihtiyacını da gidermeye katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

Giyilebilir antenin uygulama özelliklerine bağlı olarak anten gereksinimleri değişkenlik gösterebilmektedir. Ancak bazı ortak özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz (Josefsson ve Persson 2006; Bashir 2009):

- 1) Düşük profilli,
- 2) Esnek ve bükülme, engellerden kaynaklanan hasarlar ve germeye karşı dayanıklı,
- 3) Düşük imalat ve bakım maliyetli,
- 4) İnsan vücudu üzerindeki olumsuz etkilerden koruma sağlayabilme yeteneği,
- 5) Daha az rahatsız edici ve işletim sistemi için ekstra engele neden olmaz,
- 6) Islak hava koşullarından kaçınmak için gizlenmiş ve su geçirmez olma.

Sensör ve gerekli donanımlar eklenerek günlük hayatta kullanılan aksesuar ve kıyafetler akıllı cihaza dönüştürülebilmekte, bu sayede kendi aralarında haberleşebilmektedirler. Dolayısıyla, vücuda kolayca monte edilebilen elektronik devreler veya giyilen giysilerin haberleşme becerisi sayesinde veri alışverişi daha büyük bilgisayarlara ihtiyaç duymadan kolaylıkla sağlanabilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere kullanım yöntemlerine göre; eğitimden tutun da spor, eğlence, sağlık vb. aklımıza gelen daha birçok alanda karşımıza çıkan bu tür donanımlar, giyilebilir teknoloji sektörünü meydana getirmektedir. Söz konusu antenlerin yüksek kapasitede kablosuz iletişim kurabilme ve dahili ölçüm yapabilen sensörleri ihtiva etme gibi ortak özellikleri vardır (Sultan 2015; Teng ve diğerleri 2008). Ancak mobil terminal bir dalga boyu mesafesine kaydığında çok yollu sönümlenme nedeniyle sinyal gücü düşebilir. Anten çeşitliliği, çok yollu sönümlenme etkisine karşı koymanın çok etkili yollarından biridir. Çeşitlilik sisteminden yararlanmak için anten elemanlarının birbirinden ayrı yarım dalga boyunda olması gerekir. Alan yetersizliğinden dolayı bu, elde taşınan birimlerin küçük şekilli olması faktörü nedeniyle uygulanabilir değildir ki bu da anten çeşitliliğinin kullanımını sınırlar. Fakat, vücuda takılan kablosuz sistemde anten çeşitliliği büyük ölçekte kullanılabilir (Ouyang ve Chappell 2007).

İnsan vücudunun geometrisi, fizyolojik parametreleri, gelen alanın polarizasyonu ve frekansı, vücut içindeki saçılma alanını ve elektromanyetik alan dağılımını tanımlamaktadır. İnsan vücudu frekansa bağlı bir geçirgenliğe ve düzensiz şekilde iletkenliğe sahiptir. İnsan vücut dokuları yüksek geçirgenliğe sahip olduğundan dolayı (Anonymous 2022) antenin rezonans frekansı değişecektir ve daha düşük olanlara ayarlanacaktır. İnsan dokularının iletkenliğinden etkilenen bir diğer önemli parametre, anten kazancı veya maksimum ışıma yönünde iletilen güçtür.

Tekstil malzemeler kullanılarak üretilen kumaş antenler, ortamdaki suyu ve nemi kolayca emebilen ve bundan dolayı bir antenin rezonans frekansını ve empedans bant genişliğini değiştirebilen boşluklar içermektedir. Esneme ve sıkıştırma gibi hareketler kumaş için normal bir durum olsa da anten yapısı, esneme ve parçalanma nedeniyle kolaylıkla deforme olabilmektedir ve bu da antenin performans özelliklerini etkilemektedir. Buradan şu sonuca varılabilir ki, aynı malzemeleri kullanarak dahi aynı ışıma özelliklerine sahip bir antenin seri üretimini gerçekleştirmek zor olacaktır.

Kullanılan anten malzemesine bağlı olarak giyilebilir antenleri iki türe ayırabiliriz:

I. Esnek giyilebilir antenler: Esnek antenler; köpük, poliimidler, ticari kağıtlar ve esnek Baskılı Devre Kartı (PCB) gibi esnek malzemeler kullanılarak üretilen antenlere denilmektedir. Bu şekilde üretilen antenler, sert dielektrik alt tabakaya kıyasla fazladan esneklik göstermektedir. Bu tür antenin kullanımının hala sınırlı olmasının sebebi, antenin boyutu ve çok sayıda uygulamada giysilerle iyi bir şekilde bütünleşmenin karmaşıklığıdır. Başka bir esnek anten türü, iletken ve/veya iletken olmayan malzemelerin kumaşlara dayalı olduğu tekstil bazlı antendir. Bu yüzden, antenin giysi ile entegrasyonu kolayca yapılabilir ki bu da anten alanında herhangi bir kısıtlama olmaksızın bize daha fazla tasarım özgürlüğü yaratabilmektedir.

II. Esnek olmayan giyilebilir anten: Doğası gereği esnek olmayan alt tabakalardan yapılan antenlere esnek olmayan giyilebilir anten denir. Bu antenler insan

vücuduna monte edilmek üzere, kompakt boyutta tasarlanarak, kavisli bir çevrit şeklinde yapılmaktadır. Anten alanı ve şekli üzerindeki kısıtlamalara bakılmaksızın, bu tür antenlerin vücut üstü iletişim sistemi için kullanılması hem uygulanabilir hem de elverişli değildir (Tsolis ve diğerleri 2014).

Çalışılan frekanslar yüksek frekanslar olduğu için yaygın olarak giyilebilir antenlerin mikroşerit anten olması tesadüf değildir. Bilindiği üzere anten boyutları yüksek frekanslarda küçülebilmektedir. Bu yüzden giyilebilir antenler çoğunlukla mikroşerit yapıda tasarlanır. Mikroşerit antenler (MŞA) avantajlara sahip olduğu gibi dezavantajlara da sahiptir. En bilinenleri bant genişliği ve verimliliğidir. Giyilebilir uygulamalarda çoğunlukla tüm yönlerde ışıma yapılması hedeflenir. Tüm yönlerde ışıma yapabilen, yüksek verime sahip, iyi bant genişliği olan ve diğer elektriksel parametreleri de iyi performans gösteren antenleri tasarlayabilmek zordur. Bu zorluk doğru tekstil malzemesinin seçilmesiyle aşılabilmektedir. İnsan vücudu ile yakın mesafede olan giyilebilir antenler, yüksek dielektrik sabitine sahip insan vücudunun ve söz konusu yakınlık nedeniyle antenin giriş empedansı, verimliliği üzerinde negatif etkiye sahiptir. Ayrıca, insan bedeni iletim hatlarının karakteristik empedansını etkilediğinden uyumsuzluğa neden olmaktadır. Bu anten kayıplarını önemli ölçüde arttırmanın yanı sıra antenin elektriksel boyutlarında da değişikliklere sebebiyet verir. Bu şekilde potansiyel olarak antenin ışıması bozulur.

Antenlerin dielektrik değerlerinin önemi; boyut, rezonans frekansları ve yama şekilleri gibi parametrelerinki kadar yüksektir. Bilhassa mikroşerit antenlerin parametrelerini, yüksek frekanslarda kullanılan malzemelerin dielektrik özellikleri değiştirebilmektedir. Bu yüzden anten performansı etkilenebilmektedir. Tekstil malzemesinin geçirgenliği ve kayıp tanjantı gibi elektromanyetik özelliklerin anlaşılması, tekstil antenlerinin tasarımı için esastır. Pellon, ipek, keçe ve yapağı gibi iletken olmayan tekstil malzemeleri alt tabaka olarak kullanılabilirken, aksine saf bakır polyester tafta kumaşlar, Flectron ve Zelt gibi iletken tekstiller, ışıma elemanları için uygun bazı seçeneklerdir.

Antenlerin boyutu ve şekli ile antenlerin performansı arasında da güçlü bir bağlantı vardır. Doksanların sonlarında; anten boyutu, kazanç ve maksimum bant genişliği arasında bağlantının varlığını gösteren ilk önemli sonuçlar ortaya atılmıştır (Salonen ve diğerleri 1999). Anten boyutuna etki eden, üretimi için kullanılan teknoloji değil, aslında onun fizik yasalarıyla değerlendirilmektedir. İyi bir performans, anten rezonansa girdiğinde ve antenin boyutu dalga boyuna benzer olduğunda elde edilebilir. Ancak bu, kablosuz ağların olağan çalışma frekanslarında antenin oldukça büyük olması gerektiği anlamına gelmektedir. İyi ışıma özelliklerini korumaya ek olarak anten boyutlarını en aza indirmek için çok sayıda yöntem ve yaklaşım denenmiş, aynı zamanda uygulanmıştır.

Bunlara ek olarak kablosuz iletişim teknolojisinde yaşanan gelişmeler; Bluetooth, Long Term Evolution (LTE), Wireless Fidelity (Wi-Fi), Wireless Local Area Network (WLAN) ve Microwave Access (WiMAX) için Worldwide Interoperability gibi kablosuz uygulamalarda daha geniş kanal kapasitesi ve daha yüksek veri hızı taleplerini artırmıştır. Bundan dolayı, tek antenli sistemden çok antenli (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış) sistemlere hızla geçilerek kablosuz iletişim teknolojisinin daha yüksek veri hızı ve daha büyük

kapasite gereksinimleri karşılanmaktadır (Vaughan ve Andersen 1987; Foschini ve Gans 1998). Gönderici ve alıcı arasındaki iletişim kanallarının tamamen ilişkisiz olması gerekliliği, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten sistemlerinin maksimum kanal kapasitesine ulaşması için temel koşullardan biridir. Bu da verici ve alıcı uçlarındaki çoklu radyatörlerin bireysel olarak (ayrı ayrı) çalışması anlamına gelmektedir. Anten yapısı içindeki kuplaj, kanal korelasyonunu artıran iki ana nedenden birincisidir. Anten izolasyonu olarak adlandırılan bu parametre (aslında tersi) antenin S-parametreleri yoluyla ölçülebilmektedir. Ana nedenlerden ikincisi, ışıma elemanlarının oldukça iyi izole edilmiş olmasına rağmen kanal korelasyonunu artırabilen antenin ışıma modelinin özellikleridir. Bu faktörü, antenlerin korelasyon katsayıları yoluyla ölçebiliriz. Kanal kapasitesini maksimize etmek için Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten sistemlerinde yüksek izolasyon ve düşük korelasyon katsayısı değerleri elde etmek oldukça önem arz etmektedir. Işıma elemanları arasındaki fiziksel mesafeyi (en az $\lambda/2$) artırarak bir anten dizisi sisteminde bağlantı (kuplaj) geliştirilebilir. Ancak bu çözüm, kullanılabilir sınırlı alana sahip çağdaş el tipi kablosuz cihazlarda uygun değildir. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisi mobil iletişim sistemlerinde yaygınlaştırıldığından, baz istasyonunda ve mobil terminalde de çoklu ışıma antenlerinin uygulanmaya başlanmıştır. Genellikle, yüksek izolasyon elde etmek için ışıyan antenler arasındaki boşluk artırılabilirdiğinden, bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten sistemi tasarlamak için alan konusunda kesin bir sınırlama yoktur.

Bu tez çalışması geniş bir literatür taraması yapıldıktan sonra beş bölüm halinde hazırlanmıştır. Birinci bölümde; giyilebilir anten, tekstil anten ve Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenler ile ilgili bilgiler verilmiş ayrıca, anten üretiminde meta malzemeler ve önemi tartışılmış, ardından meta malzeme tasarımında en yaygın yapılar açıklığa kavuşturulmuştur. Son olarak, bu tasarımda ele alınacak en önemli problemlere açıklık getirilmiştir.

İkinci bölümde, mevcut bilimsel araştırmalarla ilgili daha önce yapılmış bazı çalışmalar, bunların nasıl tasarlandıkları ve mevcut bilimsel araştırmalarla arasındaki farklar gözden geçirilmiştir.

Üçüncü bölümde, anten tasarımında kullanılan materyallere ek olarak, anten tasarım metodu açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, HFSS ve CST simülasyon programları kullanılarak anten tasarlanmış ve hem tekli hem de Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenler için antenin tasarım aşamaları bunlarla ilgili sonuçlar ve sonuçların karşılaştırmasının kapsamını belirlemek için çıktılar gösterilmiştir. Bu bölümün son kısmında, mevcut bilimsel araştırmaların sonuçları ile ikinci bölümde tartışılan önceki bilimsel araştırmaların sonuçları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

Son olarak beşinci ve son bölüm ise anten performansına ilişkin verilerin yer aldığı kısım sonuçlanmaktadır. Elde edilen antenin performansına dair tüm veriler bu bölümde karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Modern uygulamalar tarafından maksimum kanal kapasitesi ile gittikçe daha yüksek veri hızlarına ulaşmak için son zamanlarda kablosuz iletişim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Daha yüksek dereceli modülasyon türlerini kullanmak için bazı sınırlamaların varlığı ve bant genişliğini artırmanın maliyetli olması, iletim kanalının avantajlarından faydalanan yeni bir yaklaşımın benimsenmesi gerektiğini göstermektedir.

Çoklu Giriş – Çoklu Çıkış (MIMO) teknolojisinin varlığı, kanal kapasitesi ve veri hızında önemli gelişmeler sağlamaktadır. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistemlerinin temel özelliği, kablosuz iletişim sistemlerinin bir dezavantajı olan çok yollu yayılmayı kullanması ve bunu kullanıcı için bir avantaj haline getirmesidir. Tüm bunların ötesinde Çoklu Giriş Çoklu Çıkış, mevcut bant genişliğinde herhangi bir artışa neden olmaksızın kablosuz iletişim sisteminin kapasitesini artırarak spektral verimliliği etkin bir şekilde gelişmesine katkı sağlamaktadır.

Literatür taraması yapılarak son zamanlarda giyilebilir uygulamalar için tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten tasarımına dair örneklerin varlığı görülmektedir. Söz konusu çalışmalarda çeşitli taban malzemesi kullanılmaktadır (kot, keçe, pamuk, kadife... gibi).

Bölümün bu kısmında, önceki araştırma çalışmalarından bazıları ile sonuçların ve tasarımın mevcut araştırmayla karşılaştırılması sunulacaktır. Karşılaştırma, sırasıyla tek bant tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten, çok bant tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten ve Ultra Geniş Bant (UWB) tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenlerle ilgili araştırmalar yoluyla yapılacaktır.

*Tek bant tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten tasarımları;

Tek bant çalışma frekansına sahip tekstil tabanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenlerle ilgili pek çok çalışma literatürde yerini almıştır. Yapılan literatür taramasında bu tip çalışmaların çoğunda tekstil taban malzemesi olarak keçenin kullanıldığı görülmektedir. Wagih ve diğerleri (2021) tarafından yürütülen çalışmada; 4 besleme portuna sahip, keçe taban malzemesi kullanılan $53 \times 53 \text{ mm}^2$ boyutundaki Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten, 2.4 GHz frekans bandında çalışmaktadır. Besleme yöntemi olarak SMA konnektör kullanılmıştır. Antenin alt kısmı tam toprak yapısına sahip olduğu için SAR değeri dört kat azalmış ve bu da vücutta daha iyi izolasyon sağlamıştır. Ayrıca anten ve rectenna bağlantı noktaları ortogonal polarizasyonlarla tasarlanarak port izolasyonu en üst düzeye çıkarılmıştır.

Li ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, kompakt bir dipol tabanlı tek katmanlı tekstil anten tasarlanmıştır. Yarı-ortogonal ışımlarla 2.45 GHz de çalışan, keçe alt yapı malzemeli $38.1 \times 38.1 \text{ mm}^2$ ebatlarında Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten iki ortogonal kenar boyunca iki şerit tarafından kapasitif olarak yüklenmiş, ana radyatör olarak küçük bir toprak düzlemi ve besleme yöntemi olarak SMA konnektör kullanılmıştır. Anten 2 portludur, 12 dB'nin üzerinde iyi bir izolasyon sağlar. İki dipol, toprak düzlemine ortogonal kenarlarda iki şerit eklenerek meydana getirilir ki bu da polarizasyon ve örüntü çeşitliliği sağlar. Çift kutuplu antenler, akımların daha düzgün

dağılması ve düşük SAR değerlerine yol açacak şekilde yaymak için toprak düzleminden yararlanır.

***Çoklu bant tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten tasarımları;**

Giyilebilir bir antenin hareketliliği ve öngörüleemeyen vücut merkezli iletişim ortamından dolayı, çift polarizasyonlu antenler hem iletişim hem de enerji almak için gereklidir. Yapılan literatür araştırmasında bu kategorideki tüm antenlerin dual bant şeklinde literatürde yerini aldığı görülmektedir. Biz de aynı şekilde dual bant kompakt tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten tasarımı yaptık.

Çoklu bant tekstil anten yapısı ile ilgili literatürde bir çok çalışma yerini almıştır. Yan, Soh ve Vandenbosch (2015) tarafından yürütülen çalışmada; keçe taban malzemesi üzerine yerleştirilen 2 ışıma elemanına sahip $32.3 \times 41.9 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki anten, taban malzemesine entegre edilmiş dalga kılavuzu (SIW) teknolojisine dayalı 2.4 GHz ve 5 GHz WLAN bantta çalışır; besleme yöntemi olarak SMA konnektör kullanılmıştır. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış uygulamalarında potansiyelini doğrulamak için önerilen SIW anteninin iki elemanı, performansı karşılıklı bağlantı ve zarf korelasyonu açısından incelemek üzere altı konfigürasyonda düzenlenmiş, aynı zamanda ikili Çoklu Giriş Çoklu Çıkış bağlantı noktaları arasında yüksek (20 dB) yalıtım sağlarken, iki anten elemanı arasında 0,08λ aralıklı yapı kullanılmıştır ki bu da uygulamanın boyutu ve karmaşıklığını artırmaktadır.

Mashagba ve diğerleri (2021) tarafından yürütülen çalışmada; alt tabanında keçe taban malzemesi kullanılan 2 ışıma elemanına sahip $47.2 \times 31 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki anten, 2.45 GHz ve 3.5 GHz’de çift bant çalışmaktadır. Alt tabanında tam toprak yapısı ve besleme yöntemi olarak SMA konnektör kullanılmıştır. Bu da SAR değerini oldukça düşürmektedir. Işıma yapan anten elemanlarının arasına sadece düz bir hat yamasının eklenmesi ve ortogonal yerleştirilmesi antenler arasındaki mevcut etkileşimi azaltarak izolasyonu artırmıştır.

***Ultra Geniş Bant (UWB) tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten tasarımları;**

Günümüzde, çok girişli çok çıkışlı (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış) sistemler, sistem kapasitesini artırmak ve çok yollu sönümlemenin ürettiği bozulmanın üstesinden gelmek için kablosuz iletişim alanında yaygın olarak yer almaktadır. Ultra geniş bant teknolojisi; çok düşük bir güç seviyesinde, geniş yayılmış frekans bandında yüksek veri iletimi sunması nedeniyle önemi giderek daha da artmaktadır. Bu sistemde, etkileşimli antenler arasındaki kırım ve yansımadan kaynaklanan çok yollu sönümleme sorunu vardır. Ancak, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisi uygulanarak bunun üstesinden gelinebilir (Vaughan ve Andersen 1987; Foschini ve Gans 1998). Giyilebilir bir cihazdaki yüksek performanslı kompakt anten, acil durum kurtarma, sağlık gözlemi, tıbbi bakım, teletıp, beden eğitimi ve uydu uygulamaları alanlarında muazzam bir talep görmektedir (Salonen ve Hurmer 2003; Elsheakh ve diğerleri 2012). Ortaya çıkan Ultra Geniş Bant teknolojisinin vaat ettiği şey; düşük maliyetli, kısa menzilli ve yüksek hızlı iletişim sistemleri yaratmaktır. Tüm bunlardan dolayı, Ultra Geniş Bant teknolojisi üzerine vücut üstü iletim kanallarında yapılan popüler araştırmalarla kablosuz vücut üstü ağlar için iyi bir aday olabileceği görülmektedir (Sultan 2015). Bu ilgi çekici ve şaşırtıcı özellikler, tasarımı boyut olarak daha kompakt hale getirmek için çeşitli frekans bantlarında çalışma yeteneği bulan daha fazla anten ögesinin eklenmesine olanak sağlamaktadır. Çok bantlı

ve küçük aygıtlar çoğunlukla kablosuz uygulamalarda talep edilir ve çok antenli sistemin minyatürleştirilmesi olarak adlandırılır (Teng ve diğerleri 2008). Çoklu Giriş Çoklu Çıkış mimarileri, etkili ve güvenilir iletişim sağlanmasına izin verebilir ve birkaç anten elemanı kullandıkları için diğer sistemlerin girişimlerini göz ardı edebilir (Osman ve diğerleri 2011; Josefsson ve Persson 2006).

Literatürde önerilen yapıların çoğunluğunda taban malzemesi olarak kot kullanıldığı görülmekle birlikte bazı çalışmalarda keçe alt tabanı da kullanıldığı (Singh ve diğerleri 2020), çoğu anten yapısının ısıma yapan kısmının 2 elemanlı olsa da 4 elemanlı yapıya sahip (Roy ve diğerleri 2020) Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenlerin de var olduğu, antenin bağlantı noktalarından anten bileşenlerinin uyarılması için 50Ω SMA konektörlerine bağlı olduğu; gerçekleştirilen antenlerde port izolasyon özelliklerini iyileştirmek için antenin toprak kısmının orta konumuna '8' şeklinde bir çentik (stub) yerleştirildiği (Biswas ve Chakraborty 2019), toprak yüzeyinde iki "I" şekilli çentiğin seri bağlanarak iki parça arasındaki toprak düzleminde 0.048λ kadar mesafe bırakıldığı (Biswas ve Chakraborty 2019), yarım toprak düzlemi kullanılarak tam orta kısmına zigzag hatlı yapı yerleştirildiği (Roy ve diğerleri 2020), kısmen baskılı toprak düzlemi üzerine T şekilli bir yapı ile dikdörtgen iki halka yapısı yerleştirildiği (Singh ve diğerleri 2020), kısmen basılı toprak yapısına iki ters U şekilli yapı eklendiği (Dey ve diğerleri 2020), diğerlerinden farklı olarak anten yüzeyinin ısıma yapan üst kısmında bir mikroşerit nötralizasyon hattı (NL) tasarlandığı (Biswas ve Chakraborty 2019) ve kısmen basılı toprak düzlemini ortalayacak şekilde ters L bir şerit baskı kullanıldığı görülmektedir (Sanjeev ve diğerleri 2021).

$55 \times 35 \text{ mm}^2$ boyutlarında ve 2.74 ila 12.33 GHz (yaklaşık %127,27) frekans aralığını kapsayan (Biswas ve Chakraborty 2019), $30 \times 50 \text{ mm}^2$ boyutlarında ve WLAN (2.4 – 2.484 GHz / 5.15 – 5.35 GHz / 5.72 – 5.825 GHz), WiMAX (3.2 – 3.85 GHz) ve C-bant uygulamaları indirme-yüklemede (3.7 – 4.2 GHz / 5.925 – 6.425 GHz) çalışan (Biswas ve Chakraborty 2019), $60 \times 97 \text{ mm}^2$ boyutlarında ve WLAN (IEEE 802.11a/b/g/c/n) ve WiMAX (IEEE 802.16d) uygulamaları için çift kutuplu çalışan (Roy ve diğerleri 2020), $76 \times 37 \text{ mm}^2$ boyutlarında 2.00 – 6.23 GHz'lik frekans aralığında çalışan (Singh ve diğerleri 2020), $50 \times 35 \text{ mm}^2$ boyutunda 1.83 ile 13.82 GHz arasında frekans aralığında çalışan (Dey ve diğerleri 2020), $30 \times 50 \text{ mm}^2$ boyutlarında 3.14 – 9.73 GHz frekans aralığını kapsayan (Biswas ve Chakraborty 2019) ve $32.5 \times 42 \text{ mm}^2$ boyutlarında 3.6 – 13 GHz frekans aralığını kapsayan antenler (Sanjeev ve diğerleri 2021) literatürde yerini almıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Giriş

İnsanlar arasındaki iletişim önce ses yoluyla oldu. İletişimin biraz daha mesafeli yapılabilmesi isteğinin doğmasıyla birlikte davul gibi aletler, ardından işaret bayrakları ve duman işaretleri gibi görsel yöntemler kullanılmaya başlandı. Elbette daha sonra kullanılmaya başlanan optik iletişim cihazları, elektromanyetik spektrumun ışık kısmını kullandı. Tüm insanlık tarihi boyunca düşünüldüğünde, görünür bölgenin dışındaki elektromanyetik spektrumun radyo aracılığıyla iletişim için kullanılması çok yakın tarihlere denk gelmektedir. Biraz düşününce insanoğlunun en büyük doğal kaynaklarından birinin elektromanyetik spektrum olduğu ve antenin bu büyük kaynağın kullanılmasında etkili olduğu görülmüştür.

Bir antenin, havadaki radyo sinyallerini elektriğe dönüştürdüğü veya bunun tam tersini yaptığı bilinmektedir. Düşünüldüğünde; antenler sinyal gönderir, sinyal alır veya bunların her ikisini birden yaparlar. Kablosuz cihazlarda, dışta görünen bir direkte veya tam tersi görmediğiniz bir yerde bir anten bulunmaktadır. Bir antenin iletim (gönderim) mesafesi, antenin türüne ve içinden geçen güç miktarına bağlı olarak değişkenlik gösterir ve kullanım alanına veya amacına bağlı olarak farklı tasarım özelliklerine sahip pek çok anten türü bulunmaktadır.

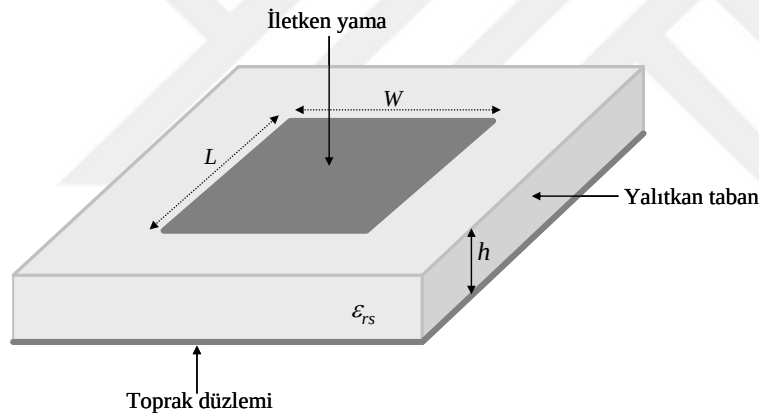
Bir mikroşerit anten, bir zemin düzlemi üzerinde dielektrik taban malzemesi (substrat) ile ayrılmış iletken yamadan meydana gelir. 1970 yılında elektronik devre minyatürleştirilmesindeki ve büyük ölçekli entegrasyondaki köklü değişime kadar bu kavram hiç gelişmemişti. Bu devrimden sonra birçok yazarın, farklı konfigürasyonlar için bir dielektrik substrat tarafından ayrılmış toprak düzleminden gelen ışımayı tanımladığı görülmüştür. Munson tarafından roketler ve füzeler üzerinde kullanmak için düşük profil özelliğine sahip gömme montajlı antenler üzerine yürüttüğü mikroşerit antenlerle ilgili ilk çalışmalar, bunun anten sistemindeki birçok problemde kullanmak için pratik bir fikir olduğunu gösterdi (Garg ve diğerleri 2000). Söz konusu anten için çok farklı matematiksel modeller geliştirilmiş ve bunların uygulamaları diğer alanlara da yayılmıştır. Bu antenler üzerine son yıllarda dergilerde yayınlanan makalelerin sayısı, onların ne kadar önem kazandıklarının bir diğer göstergesidir. Mikroşerit antenler günümüz anten tasarımcılarının tercihi durumundadır.

Mikroşerit antenlerde maksimum ışıma için genellikle düşük dielektrik sabitli taban malzemeleri tercih edilmektedir. Anten iletken yamasına herhangi bir şeklin verilebilmesiyle birlikte, dikdörtgen ve dairesel konfigürasyonlar en yaygın kullanılanlarıdır. Bununla birlikte anten performansının iyileştirilmesine olanak sağlayacak çok farklı şekillerdeki yama konfigürasyonları da kullanılmaktadır. Bir mikroşerit antenin karakterize edilen özellikleri; uzunluğu, genişliği, giriş empedansı, kazanç ve ışıma modelleridir. Antenin rezonans frekansını yöneten çok kritik bir parametre olan antenin uzunluğu, dielektrikte neredeyse yarı dalga boyundadır ve yamanın genişliğini bulmak için güç ve değişmeyen kuralların varlığından söz edilmez. Mikroşerit antenin diğer parametreleri ve tasarımıyla ilgili hususlar ilerleyen bölümlerde anlatılmaktadır.

3.1.2. Mikroşerit yama anten

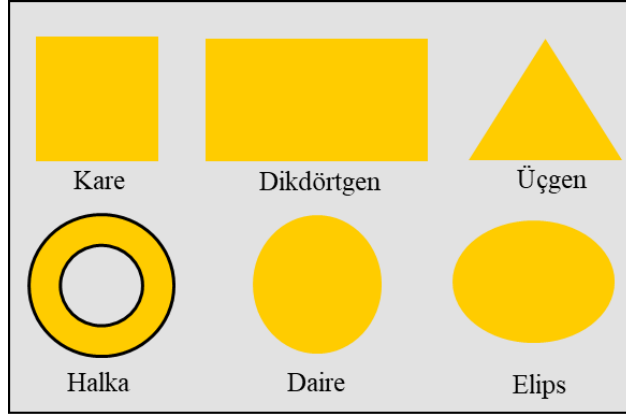
Diğer mikrodalga antenler ile karşılaştırıldığında, hafif ve kompakt yapıda olmaları, düşük maliyetleri ile kolay üretilebilir olmaları mikroşerit antenleri oldukça cazip hale getirmektedir. Bunun yanında bu tür antenler, basılı şerit besleme ağları ve aktif cihazlarla birlikte aynı devre kartı üzerinde entegre olabilme özelliklerine sahiptirler. Bu izafi olarak anten mühendisliğinin yeni bir alanı olmuştur. 1950'lerin ortalarından beri mikroşerit yapıların ışıma özellikleri bilinmektedir. Füzeler için konformal antenlerin gerekli olduğu 1970'lerin başında bu anten tiplerinin uygulanması başlamıştır. Çeşitli dizi konfigürasyonlarında, dikdörtgen ve dairesel mikroşerit rezonans yamalarının yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Büyük ölçekli entegrasyondaki gelişmelerin getirdiği elektronik devre minyatürleştirmesindeki mevcut devrim, mikroşerit antenlerin son gelişmelerine katkıda bulunan önemli bir faktördür. Geleneksel antenler genellikle bir elektronik sistemin hacimli ve maliyetli bir parçası olduğundan, fotolitografik teknolojiye dayalı mikroşerit antenler bir mühendislik atılımı olarak görülmektedir.

En temel yapı biçiminde, bir Mikroşerit yama anten Şekil 3.1'de gösterildiği gibi taban kısmında bir toprak düzlemi olan bir dielektrik alt tabakanın tek yüzünde yayılan bir yamadan oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Mikroşerit yama antenin temel yapısı

Bir mikroşerit yama antende, analiz ve performans çalışmalarını basitleştirmek adına yama kısmı genellikle kare, dikdörtgen, dairesel, üçgen ve elips veya Şekil 3.2'de gösterildiği gibi yaygın olan başka bir şekildedir. Dikdörtgen bir yama için, L ile gösterilen yama uzunluğu genellikle $0.3333\lambda_0 < L < 0.5\lambda_0$ olarak alınır. Burada λ_0 serbest uzay dalga boyunu göstermektedir. Antenin yama kısmı çok ince olacak şekilde seçilir, öyle ki $t \ll \lambda_0$ (burada t yama kalınlığıdır). Dielektrik substratın yüksekliğini gösteren h genellikle $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ olarak alınır. Substratın dielektrik sabit değeri (ϵ_r) doğal olarak $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığındadır.



Şekil 3.2. Mikroşerit yama elemanlarının yaygın şekilleri

Mikroşerit yama antenleri, ilk olarak yama kenarı ve toprak düzlemi arasındaki sınır alanlarından dolayı ışıma yapar. Bu tür anten yapılarında düşük bir dielektrik sabitine sahip kalın bir dielektrik alt tabaka tercih edilmesinin sebebi daha iyi anten performansı elde etmek için, daha iyi verim, daha geniş bant genişliği ve daha iyi ışıma sağlamasıdır. Öte yandan, bu tür konfigürasyonlar daha büyük anten boyutuna neden olmaktadır. Kompakt mikroşerit bir yama anteni tasarlanmak isteniyorsa, daha az verimli ve daha dar bant genişliğine sahip daha yüksek dielektrik sabitli alt tabakalar kullanılmalıdır. Sonuç olarak, antenin boyutları ve performansı arasında bir değiş tokuş yapmak gerekir.

3.1.3. Avantajları ve dezavantajları

Mikroşerit yama antenlerin düşük profilli yapılarından dolayı kablosuz uygulamalarda kullanım için popüleritesi artmaktadır. Ek olarak; cep telefonları, çağrı cihazları vb. gibi elde taşınabilir kablosuz cihazlarda gömülü anten kullanımına son derece uyumludurlar. Füzelerde kullanılan, telemetri ve iletişim antenlerinin ince ve uyumlu olması gerektiğinden sıklıkla buradaki antenlerde mikroşerit yama antenleri şeklindedir. Bu antenlerin başarıyla kullanıldıkları bir diğer alan da uydu haberleşmesidir. Kumar ve Ray tarafından tartışılan başlıca avantajlarından bazıları aşağıda verilmiştir (Garg ve diğerleri 2001):

- Hafiflik ve daha az hacim.
- Düşük üretim maliyetine sahip olduklarından büyük miktarlarda üretilebilirlik.
- Hem doğrusal polarizasyon hem de dairesel polarizasyonu destekleme.
- Düşük profilli düzlemsel konfigürasyon nedeniyle ana yüzeye kolayca uyumlu hale getirilebilme.
- Mikrodalga entegre devreleri (MIC'ler) ile kolayca entegre edilebilme.

- Hem ikili hem de üçlü frekans işlemleri yapabilme.
- Mekanik olarak sağlam olmaları nedeniyle pürüzlü yüzeylere monte edilebilme.

Mikroşerit yama antenleri, geleneksel antenlere kıyasla daha fazla dezavantaja sahiptir. Başlıca dezavantajlarından bazıları aşağıda verilmiştir:

- Dar bant genişliği
- Düşük verimlilik, düşük kazanç, düşük güç işleme kapasitesi
- Yüzey dalgası uyarımı
- Beslemelerden ve bağlantılardan gelen yabancı ışıma
- Konik yarık antenler dışında zayıf uç sıcak ışıma elemanı

Mikroşerit yama antenleri çok yüksek bir anten kalite faktörüne (Q) sahiptir. O büyük bir Q'nun dar bant genişliğine ve düşük verimliliğe yol açtığı antenle ilgili kayıpları temsil eder. Antenin kalite faktörünü (Q), dielektrik substratın kalınlığını artırarak azaltabiliriz. Bununla birlikte antenin kalınlığı arttıkça kaynak tarafından sağlanan toplam gücün artan kısmı bir yüzey dalgası göndermektedir.

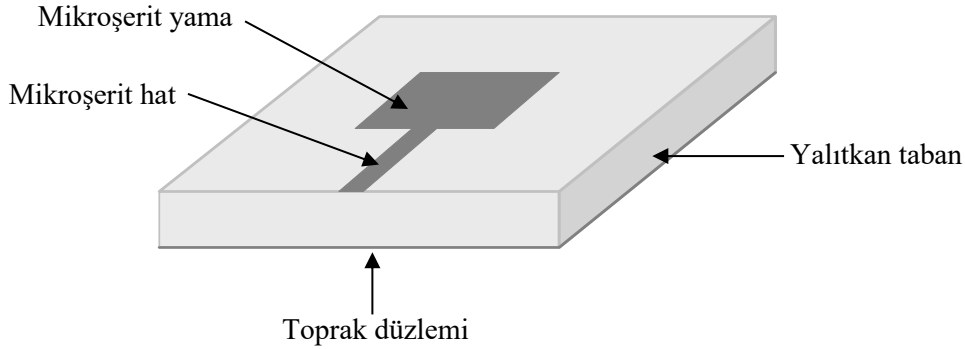
3.2. Besleme Tekniği ve Bant Genişliği

3.2.1. Besleme teknikleri

Mikroşerit yama antenleri çeşitli yöntemler kullanarak besleyebiliriz. Bir sınıflandırma yapılacak olursa, yöntemler temaslı ve temassız olmak üzere iki kategoride sınıflandırılabilir. Temaslı yöntemde, mikroşerit hat gibi bir bağlantı elemanı kullanılarak RF gücü ışıyan yamayla doğrudan beslenir. Temassız yöntemde bir elektromanyetik alan kuplajı, mikroşerit hat ile ışıyan yama arasındaki gücü aktarmak için yapılmaktadır. Mikroşerit hat, koaksiyel prob (her ikisi de temaslı şemalar), boşluk kuplajlı ve yakınlık kuplajlı (her ikisi de temassız şemalar) besleme teknikleri kullanılan en popüler dört besleme tekniğidir.

3.2.1.1. Mikroşerit hat besleme

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, bu tip besleme tekniğinde doğrudan mikroşerit yamanın kenarına iletken bir şerit bağlanmaktadır. İletken şeridin genişliği yamaya kıyasla daha küçüktür ve bu tür besleme türünün avantajı, düzlemsel bir yapı sağlamak için beslemenin aynı alt tabaka üzerine yerleştirilebilmesidir.



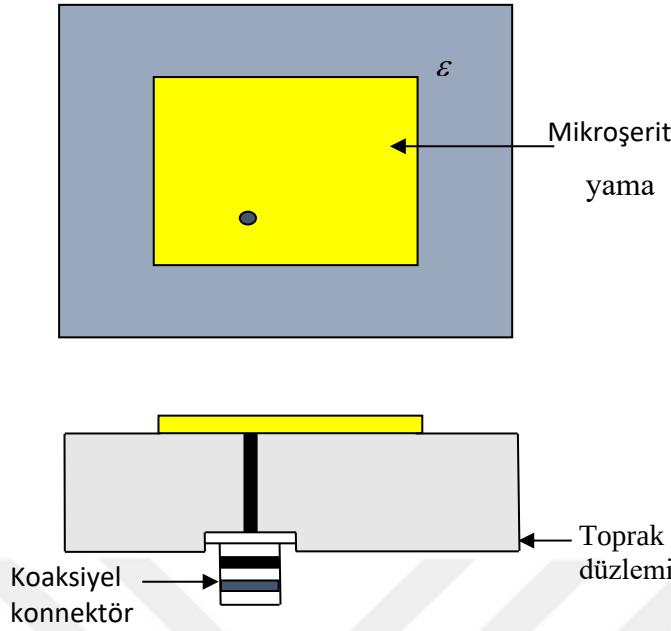
Şekil 3.3. Mikroşerit hat besleme tekniği

Mikroşerit hat beslemede yamadaki iç kesimin amacı, herhangi bir ek eşleştirme elemanına ihtiyaç duymadan besleme hattının empedansını yama ile eşleştirmektir. Bunu da iç kısım konumunun uygun şekilde kontrol edilmesiyle elde edebiliriz. İmalat kolaylığı ve modellemenin yanı sıra empedans eşleştirmede de basitlik sağladığından dolayı kolay bir besleme tekniğidir.

Tüm bunların yanı sıra kullanılan dielektrik alt tabakanın kalınlığı arttıkça, yüzey dalgaları ve sahte besleme ışıması da artar, ki bu da antenin bant genişliğine engel oluşturur. Aynı zamanda besleme ışıması istenmeyen çapraz polarize ışıma da yol açmaktadır.

3.2.1.2. Koaksiyel besleme

Koaksiyel besleme diğer adıyla prob besleme tekniği, mikroşerit yama antenlerini beslemek için en yaygın kullanılan besleme tekniğidir. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, koaksiyel konektörün iç iletkeni dielektrik boyunca uzatılarak ışıyan yamaya lehimlenir, ardından dış iletken ise toprak düzlemine bağlanır.

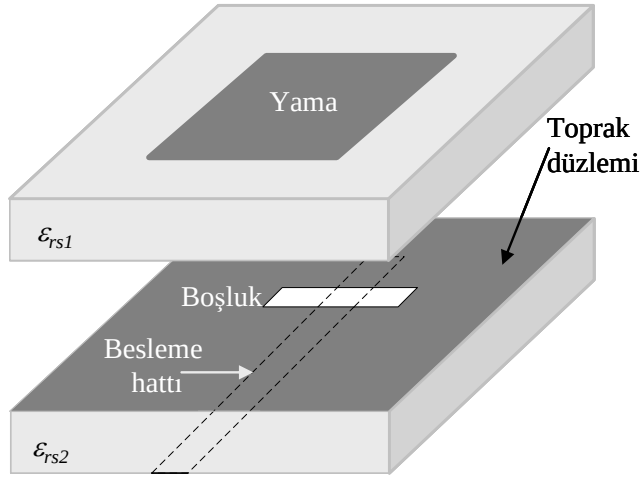


Şekil 3.4. Prob beslemeli Dikdörtgen Mikroşerit Yama Anten

Bu tip besleme tekniğinin en temel avantajı, beslemenin giriş empedansına uyması için yamanın içinde istenilen herhangi bir yere yerleştirilebilmesi kolaylığıdır. Bu besleme yönteminin üretiminin kolay olmasının yanı sıra düşük sahte ışıma sahiptir. Bununla birlikte, büyük bir dezavantajı dar bant genişliği sağlaması ve alt tabakada bir delik açılması gerektiğinden ve konektörün toprak düzleminin dışına çıkması nedeniyle modellenmenin zor olmasıdır. Bu sebeple kalın alt tabakalar için tamamen düzlemsel hale gelmemektedir ($h > 0.02\lambda_0$). Tüm bunlara ek olarak, daha kalın alt tabakalar için prob uzunluğu arttığından, giriş empedansı daha endüktif hale gelerek eşleştirme sorunlarına yol açmaktadır. Yukarıda, geniş bant genişliği sağlayan kalın bir dielektrik alt tabaka için mikroşerit hat beslemesinin ve eş eksenli beslemenin sayısız dezavantajdan muzdarip olduğu görülmektedir. İlerleyen kısımlarda tartışılan temassız besleme teknikleri bu sorunları çözmekte yardımcı olmaktadır.

3.2.1.3. Boşluk kuplajlı besleme

Boşluk kuplajlı besleme tekniğinde, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi ışıyan yama ve mikroşerit besleme hattı yer düzlemi ile ayrılarak, yama ve besleme hattı arasındaki bağlantı hattı yer düzlemindeki bir yarıklık veya bir açıklık vasıtasıyla yapılır.



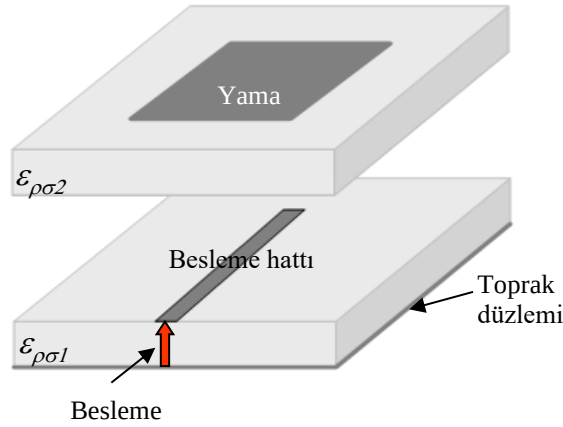
Şekil 3.5. Boşluk Kuplajlı besleme

Burada bağlantı açıklığı genellikle yamanın altında ortalandığından konfigürasyonun simetrisi nedeniyle daha düşük çapraz polarizasyona yol açmaktadır. Açıklığın şekli, boyutu ve konumu besleme hattından yamaya bağlanma miktarını belirler. Toprak düzlemi yamayı ve besleme hattını ayırdığından, bu sayede sahte ısıma en aza indirilmiş olur.

Genellikle, yamadan gelen ışımayı optimize etmek için üst tabaka için kalın düşük dielektrik sabitli bir malzeme kullanılırken, alt tabaka için yüksek dielektrik sabitli bir malzeme kullanılır. Bahsi geçen bu besleme tekniğinin en büyük dezavantajı, anten kalınlığını da artıran çoklu katmanlar nedeniyle üretilmesinin zor olmasıdır. Bu besleme şekli ayrıca dar bant genişliği de sağlamaktadır.

3.2.1.4. Yakınlık kuplajlı besleme

Aynı zamanda elektromanyetik bağlantı şeması olarak da adlandırılan bu tip besleme tekniği Şekil 3.6'da gösterildiği gibi, besleme hattı iki alt tabaka arasında olacak ve ışıyan yama üst tabakanın üstünde olacak şekilde iki dielektrik alt tabaka kullanılır. Bu besleme tekniğinin en temel avantajı, sahte besleme ışımasını ortadan kaldırması ve mikroşerit yama anteninin kalınlığındaki genel artış nedeniyle çok yüksek bant genişliği (%13'e kadar) sağlamasıdır. Bu besleme tekniği tüm bunlara ek olarak, bireysel performansları optimize etmek adına biri yama, diğeri besleme hattı için olmak üzere iki farklı dielektrik ortam arasında seçenekler de sunmaktadır.



Şekil 3.6. Yakınlık kuplajlı besleme

Bu tip beslemede eşleştirme, besleme hattının uzunluğunu ve yamanın genişlik/hat oranını kontrol ederek sağlanabilir. Bu besleme şeklinin en büyük dezavantajı, uygun hizalamaya ihtiyaç duyan iki dielektrik katman nedeniyle üretim zorluğudur.

Tablo 3.1. Mikroşerit yama antenlerde kullanılan farklı tiplerdeki besleme tekniklerinin karşılaştırılması (Garg Bhartia Bahl ve Ittipiboon 2001)

Anten Karakteristiği	Mikroşerit Hatlı Besleme	Koaksiyel Hat ile Besleme	Yakınlık Kuplajlı Besleme	Boşluk Kuplajlı Besleme
Antenin Tasarım	Eş düzlemsel	Düzlemsel olmayan	Düzlemsel	Düzlemsel
Antende İstenmeyen Besleme Işınması	Az	Fazla	Fazla	Fazla
Antenin Üretim Kolaylığı	Kolay	Delme ve lehimleme gerekli	Hizalama gerekli	Hizalama gerekli
Antende Empedans Uyumlaştırma	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Antenin Bant Genişliği	% 2-5	% 2-5	% 13	% 21

Mikroşerit yama antenlerinin analizinde tercih edilen modeller; iletim hattı modeli, boşluk modeli ve tam dalga modelidir (ki bu da öncelikle integral eşitlikleri/Moment Yöntemini içerir). Bunların arasında en basit olanı iletim hattı modelidir. İyi bir fiziksel kavrama sağlasa da, daha az doğruluk verir. Diğerine göre boşluk modeli daha doğrudur, aynı şekilde iyi bir fiziksel kavrama sağlar ancak doğası gereği karmaşıktır. Tam dalga modelleri son derece hassas ve çok yönlüdür. Tekli elemanlar, sonlu ve sonsuz diziler, yığılmış elemanlar, rastgele şekillendirilmiş elemanlar ve kuplaj gibi davranabilir. Yukarıda bahsedilen iki modele kıyasla bunlar daha az anlam verir ve doğal olarak çok daha karmaşıktır.

3.3. Tekstil Antenler

Mikroşerit antenler; istenilen geometrik şekillerde tasarlanabilen, küçük boyutlu, hafif yapılı ve istenilen ışıma desenini verebilme özelliklerinden dolayı günümüz kablosuz haberleşme cihazlarında sıklıkla tercih edilir. Giyilebilir antenler ve cihazların; estetik görünmesi, küçük ve kompakt yapıda olması, yerleştirildiği yapıya elektromanyetik olarak zarar vermemesi, maliyetinin görece düşük olması ve düşük güç tüketimi aranan temel özellikleridir. Bu yüzden anten tasarımları; giysilerin bir parçasıymış gibi kompakt olarak imalat aşamasında eklenebilen, esnek yapıda olan ve gizlenebilen tasarım olarak yine giyilebilir kumaş malzemesi üzerine üretilmesi tercih edilmektedir. Taban malzemesi olarak kullanılan kumaşların seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri kumaşın dielektrik sabiti değeri olmuştur.

Çok değişik özelliklere sahip ve çok çeşitli kullanım alanları bulan dokuma kumaşlar mevcuttur. Bu denli çeşitli karakteristiğe sahip ve kullanım alanı olan dokuma kumaşların yapıları da elbette birbirinden farklıdır. Kumaşın özelliklerini etkilediği ve kumaşın yüzey görünümünü belirlediği için kumaş yapısı son derece büyük bir öneme sahiptir (Özden, 1989). Bu nedenle kumaş tasarımı karmaşık bir sorun olarak karşımıza çıkar. Söz konusu sorunu çözebilmek için kumaşın yapısı ve yapıyı meydana getiren elemanlar arasındaki ilişkileri oldukça iyi bilmek gerekmektedir.



Şekil 3.7. Dokuma kumaş örnekleri

Bir dokuma kumaşta kullanılan hammadde cinsi, örgü, kalınlık, iplik özellikleri, sıklık, kumaş boyutları ve gramaj temel yapısal özelliklerdir. Bu temel yapısal özellikler kumaşın kullanım (performans) özelliklerini belirlemektedir. Kumaşın ısı geçirgenliği, nem tutması, sağlamlığı ve yumuşaklığı gibi performans özellikleri kullanılan hammadde türünden etkilenmektedir. Kumaşın fiziksel özellikleriyle performans özelliklerinden çoğunu ve bunların kullanım yerini ipliğin lif özelliklerinden etkilenen yapısal ve mekanik özellikleri belirlemektedir. Kullanılan kumaş örgüsü; dokunan kumaşın yüzey görünümünü, iç yapısını ve dokusunu başka bir deyişle mekanik özelliklerini belirlemektedir. Hammadde, sıklık, örgü, iplik, kumaş örtme faktörü arasındaki ilişkiler ve özellikler, dokuma kumaşların estetik tasarımı, kumaşın yüzey özelliği, uygunluk, tekrar, koram, zıtlık, denge, egemenlik, biçim, birlik, doku, yön ve renk kumaşın fiziksel tasarımında etkili olabilecek parametrelerdir (Meriç, 1988; Yakartepe & Yakartepe, 1995).

Giyilebilir mikroşerit antenlerde yalıtkan madde olarak kullanılan kot, kadife ve keçenin yapılan araştırmalarda dielektrik ve kalınlık değerlerinde çalışmadan çalışmaya farklılık görölse de genellikle aşağıdaki çizelgede belirtilen değerlerde olduğu görölmektedir.

Tablo 3.2. Pamuk, keçe, kot ve kadife tabanlı antenlerin kalınlıkları ve dielektrik değerleri

Kumaş Cinsi	ϵ_r	h (mm)
Pamuk	1.6	1.6
Keçe	1.45	3.30
Kadife	2	0.93
Kot	1.6	1.4

3.4. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Anten Sistemleri

3.4.1. Giriş

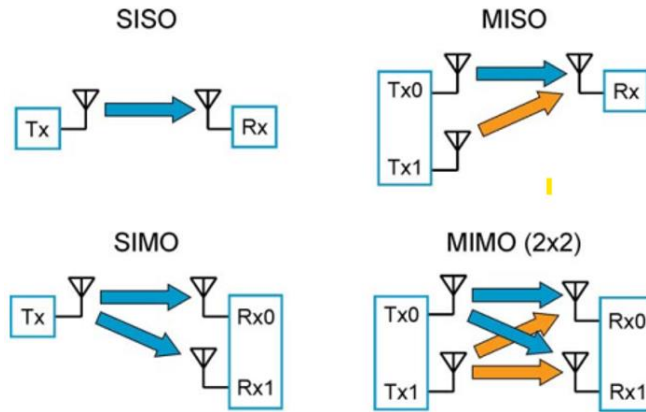
Modern uygulamalar tarafından maksimum kanal kapasitesi ile çok daha yüksek veri hızlarına ulaşmak için, son zamanlarda kablosuz iletişim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bant genişliğini artırmanın maliyeti ve daha yüksek dereceli modülasyon türlerini kullanmak için bazı sınırlamaların varlığı, iletim kanalının avantajlarını kapsayan yeni bir yaklaşımın benimsenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu konuda Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisi, veri hızı ve kanal kapasitesinde önemli gelişmeler sağlamıştır. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistemlerinin temel özelliği, kablosuz iletişim sistemlerinin bir dezavantajı olan çok yollu yayılımı kullanması ve bunu kullanıcı için bir avantaj haline getirmesidir. Tüm bunların ötesinde Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisi, mevcut bant genişliğinde herhangi bir artış olmaksızın kablosuz iletişim sisteminin kapasitesini artırarak spektral verimlilikte etkin bir gelişme sağlar.

Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisini bir kablosuz iletişim sisteminin kapasitesini sabit bir bant genişliği içinde çoğaltmak için çoklu verici ve alıcı antenleri kullanan gelişmiş bir teknik olarak tanımlayabiliriz. Başka bir deyişle, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisi, bir iletişim sisteminin aynı kablosuz bağlantı (ve aynı frekans bandı) üzerinden birden fazla anten topolojisi kullanarak herhangi bir ekstra ışıma gücü tüketimi olmadan aynı anda birden fazla bağımsız kanal gönderip alabildiği bir çözümden yararlanır. Zengin bir saçılma ortamında sağlanan ek yollardan yararlanır (Vaughan ve Andersen 1987; Foschini ve Gans 1998). Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisi sistem güvenilirliğini artırdığından ve birden fazla antene uygulanarak kanal kapasitesinde geliştirme sağladığından, yeni nesil kablosuz iletişim teknolojisinin omurgası olarak da öne çıkmaktadır. İlk çıkış noktasında, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisi tek girişli tek

çıkışlı (SISO) sistemlerin yaşadığı veri hızındaki sınırlamayı iyileştirebilecek pratik bir teknik olarak düşünüldü. Ayrıca, farklı ağlar, bir kablosuz iletişim sisteminin en yüksek kapasitesinden yararlanarak kanalın kapasitesini, sistemin güvenilirliğini ve veri iletim hızını (Salonen ve Hurme 2003) geliştirmek için Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisini uygulayabilir (Elsheakh Esmat ve Elsadek 2012).

Çoklu Giriş Tek Çıkış (MISO), Tek Giriş Çoklu Çıkış (SIMO) ve Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) gibi kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılabilecek ilgili teknolojiler vardır. Tek Giriş Çoklu Çıkış teknolojisinde bir verici anten ve birden fazla alıcı anten vardır. Bu şekildeki yapılandırma, alıcı çeşitliliği olarak bilinmektedir. Bu teknik sayesinde alıcı, aynı bilgiyi taşıyan farklı bağımsız kanallardan gelen çoklu sinyalleri alarak sönmüleme ile mücadele edebilir. Çoklu Giriş Tek Çıkış'da birden fazla verici anten ve bir alıcı anten vardır: fazlalık veriler birden fazla verici anten aracılığıyla iletilmektedir.

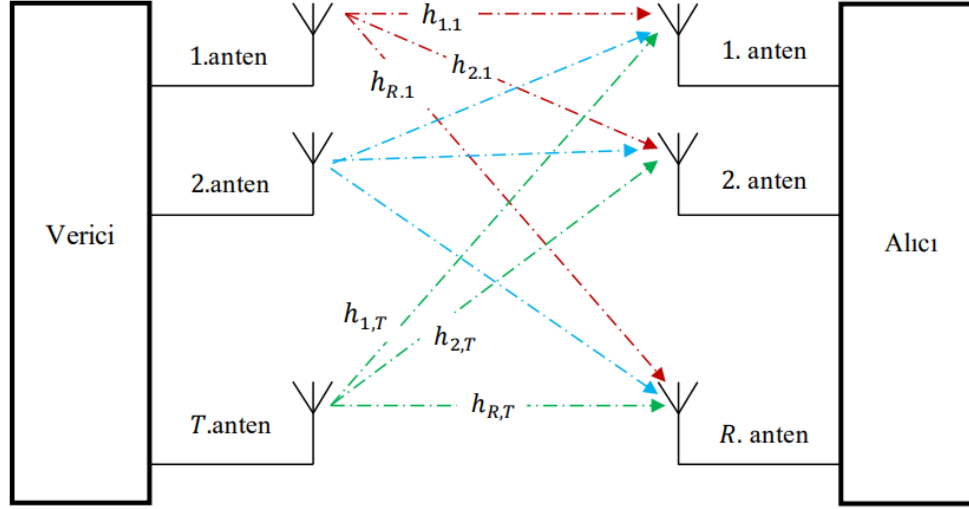
Bu yüzden, alıcının iletilen verileri doğru bir şekilde alma olasılığı daha yüksektir ve bundan dolayı çok yollu sinyal yayılımının etkilerini azaltır (Sultan 2015). Çoklu Giriş Çoklu Çıkış teknolojisi, vericide birden çok anten ve alıcıda birden çok anten kullanır. Bu nedenle, verici, çok yollu ortamda birden çok veri akışı gönderebilir. Ardından, alıcı uç, çok yollu ortam nedeniyle birden fazla veri kanalı alacaktır. Bundan sonra, iletilen çoklu veri akışlarını kurtarmak için alınan veriler özel bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış algoritması kullanılarak analiz edilmelidir (Sultan 2015). Şekil 3.8, farklı çoklu anten sistemlerinin konfigürasyonunu göstermektedir.



Şekil 3.8. SISO, SIMO, MISO ve MIMO sistem konfigürasyonu

3.4.2. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistem yapısı

Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sisteminin en temel yapısı Şekil 3.9’da görüldüğü üzere verici ve alıcıdaki çoklu anten bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.9. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sistemi blok diyagramı

(3.1) blok diyagramında gördüğümüz $h_{2,1}$ vericideki 1. antenden alıcıdaki 2. antene olan kanal katsayısını ifade etmektedir. Bu şekilde R adet alıcı anten ile T adet verici antene sahip bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sistemi için katsayılar aşağıdaki $R \times T$ boyutlu $\mathbf{H}$ matrisiyle ifade edilmektedir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{R,1} & h_{R,2} & \dots & h_{R,T} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Vektörel olarak Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sistemini aşağıdaki eşitlikte gösterildiği şekilde ifade edilebiliriz.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{G} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki denklemde Y Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistem yoluyla antenlerden alınan işaret matrisini, X antenden gönderilen işaretleri, G bağımsız sıfır ortalamalı sirküler simetrik Gauss gürültüsünü göstermektedir.

Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sistemlerinde birden fazla veri akışını aynı anda göndermek ve almak için Şekil 3.9'da gösterildiği gibi birden fazla anten kullanılır. Sistemde ihtiyaç duyulan anten sayısı, sistemin kendine ait özel donanım ve yazılımına bağlı olarak en uygun şekilde seçilmektedir. Anten konfigürasyonları 2×2 Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (İki verici ve iki alıcı anten), 3×3 Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Üç verici ve üç alıcı anten) vb. sistem yapısına göre değişebilmektedir. Burada anten yapılarında elde edilen bilgiye göre, bir sistemde ne kadar çok anten varsa o kadar çok eş zamanlı veri akışı sağlanabilmektedir. Fakat teknolojidaki ilerlemeler, radyo ortam koşullarının değişmesi vb. durumlarda anten sayısını artırmakla her zaman olumlu sonuçlar alınmayabilir.

3.4.3. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sisteminin avantaj ve dezavantajları

Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sistemlerinde aynı bilgi akışının iletilmesi veya alınması için çok sayıda alıcılı anten sistemi kullanılmaktadır. Bunun neticesinde çeşitlilik kazancı sağlanmaktadır. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistemlerde sağlanan çeşitlilik kazancı ile diğer haberleşme sistemlerine nazaran sönümlenme ve gürültü azaltılarak sinyalin güvenilirliği artmaktadır. Alıcı çeşitliliği durumunda, alıcıda bulunan antenlerin her birinde meydana gelen ve birbirine karışan gürültülü sinyallerden elde edilen gerçek sinyali ortaya çıkarabilmek için farklı teknikler kullanılır. İletim çeşitliliği durumunda, uzay zaman kodlama veya ön kodlama aynı bilginin birden fazla kanala en az bir kısmının verici ve alıcı arasında güvenilir bir iletişimin yapılabilmesi için gönderilmesini sağlar. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış, birden fazla alıcı ve verici anten ile farklı veri akışını sağladığı için kablosuz haberleşme kanalında bulunan yollar üzerinde çoğullanır (Roy, 2016).

Binaların yoğun olduğu alanlarda bulunan hücresel birimlerin bazılarında iletişimin sağlanabilmesi için gereken alıcı ile verici arasında doğrudan görüş hattı (Line of Sight, LoS) bulunmaz. Bunun sonucunda vericiden alıcıya doğru giden sinyaller bina yüzeylerine çarparak kırılmaya uğrarlar. Bu sinyaller uzunca bir yol aldıktan sonra hedefe ulaştıklarından dolayı Şekil 3.9'da gösterilen çoklu yol yayılımına sebep olurlar (Çakır, 2012). Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşme sistemlerinde çoklu yol yayılımının sebep olduğu olumsuzlukları önleyip bağlantı kalitesini ve kapasitesini arttırmak için alıcıda ve vericide birden çok anten dizileri kullanılmaktadır. Birden çok anten kullanımı ile farklı antenlerden farklı veri akışının iletilmesi sağlanmaktadır. Belirli bir frekans bant genişliğine ulaşmak için oluşan veri akışı yoğunluğu, spektrum verimliliğini büyük ölçüde iyileştirmek için bir haberleşme kanalı tarafından artırılabilir. Anten dizileri enerjiyi belirli yönlere kaydırmak ve sinyali bastırmak için kullanılabilir. Bu durum iletilen sinyal girişiminin azalmasını ve alınan sinyalin uzaysal filtrelenmesini sağlar. Çok bölmeli kablosuz ağlar veya klasik kablosuz sistem yapısına sahip ağlar, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten yapısından yararlanabilmektedir. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten yapısının kullanılması ile daha geniş bir ağ oluşturulmakta ve dolayısıyla kapsama aralığı artmaktadır. Kapsama aralığının artırılması ile de anten başına düşen güç ihtiyacı azalmaktadır. Bundan dolayı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistem yapısı kablosuz haberleşme sistemleri için yüksek performans ve düşük maliyet sağlamaktadır. (Comisso, 2008).

Çoklu Giriş Çoklu Çıkış haberleşmenin daha önceki bölümde bahsedildiği gibi birçok avantajının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar arasında en önemli dezavantajı, çoklu anten yapısının çok yüksek maliyetli olan Radyo Frekans (RF) modüllerine ihtiyaç duymasındır. Bu RF modülleri haberleşme sisteminin maliyetinin artmasına sebep olur (Kumar, 2019). Bunun yanı sıra donanım ve yazılım yapısının karmaşık olması da Çoklu Giriş Çoklu Çıkış sistemin dezavantajlarından biridir.

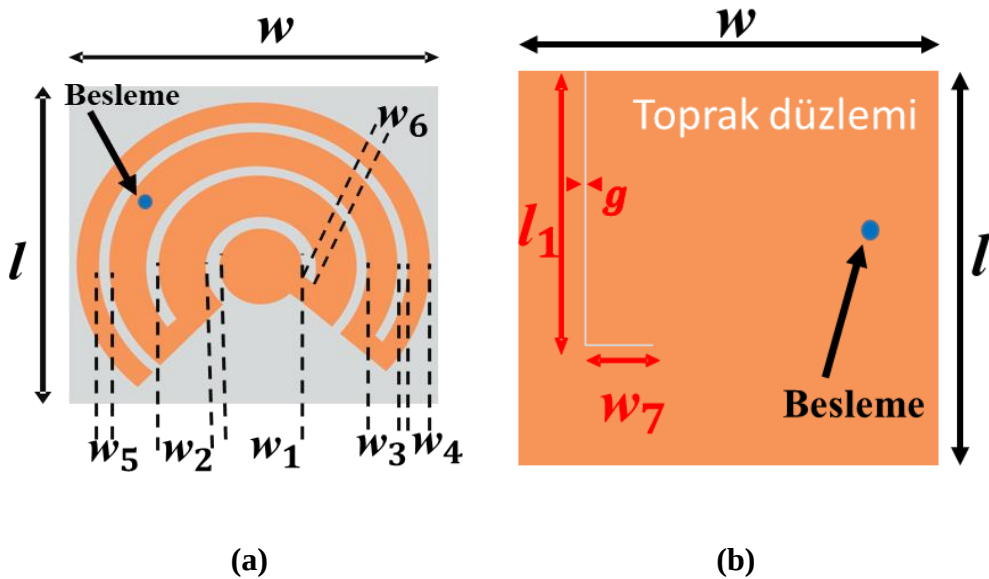


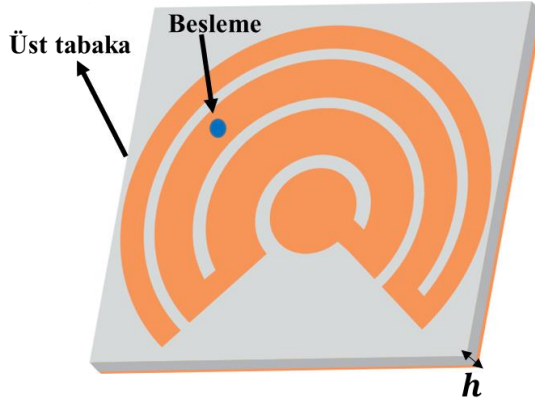
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Tekli Anten Tasarımı

Bu bölümde, nihai tasarıma ulaşmadan önce antenin tek elemanlı modeli sistematik bir şekilde adım adım değerlendirilmiş olup, bu tasarım bir dizi seri parametrik çalışmalar sonucunda elde edilebilmiştir. Optimize edilen kritik anten spiral yapısının her bir sarmalının boşluk kısmı sabit tutulurken, metalik kısımlarının kalınlığı, beslemenin konumu, toprak düzleminin yapısı, toprağa yerleştirilen L slot yapısının konumu ve kalınlığı optimize edilen başlıca anten parametreleridir. Anten bileşenlerinin uyarılması için 50Ω SMA konektör tekli antene düşey probe beslemeli bağlanmıştır. Bu besleme yöntemi, antenin fiziki olarak daha az alan kaplamasına yardımcı olur, ki bu da kapladığı hacim bakımından minyatürize etme ile ilgili sorunları ortadan kaldırabilir. Anten 4.80 – 5.00 (5G bandı) ve 5.75 – 5.85 GHz bantlarının (WLAN bandı) IEEE 802.11 frekans bandında çalışacak şekilde çift bantlı olarak tasarlanmıştır. Söz konusu frekans bantları; uzay biyomedikal uygulaması, mikrodalga bağlantılar, yer istasyonu ile radar ve amatör radyolarda kullanılmaktadır. Tek yapıli antenden elden edilen sonuçların doğruluğunun teyit edilmesi amacıyla Ansys HFSS ve ticari elektromanyetik simülasyon yazılımı olan CST Microwave Studio simülasyon programları eş zamanlı kullanılarak tasarlanıp, simüle ve optimize edilmiştir. Anten rezonatörü ve toprak kısmının üretimi için iletken tel veya iplik kullanılarak ya da kumaşa iletken malzemelerle işlem görmesi sonucu elde edilen bakır ve nikel kaplama naylondan yapılmış dokuma iletken kumaş kullanılmıştır. Anten için taban malzemesi olarak 1.4 mm kalınlığında, bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_r) 2 ve elektrik kayıp tanjantı 0.02 olan bir tekstil malzemesi olan kot kumaş kullanılmıştır.

Temel olarak, kot taban malzemenin üst kısmında tek elemanlı iç içe spiral halka şekilli ve toprak kısmı full ground L slotlu bir anten tasarlanmıştır. Antenin toprak düzleminde L slot açılmasının amacı ince frekans ayarı yapabilmektir. Empedans uyumunu sağlamak için en dış halka daha ince seçilmiştir. Ayrıca beslemenin konumu da buna göre ayarlanmıştır. Şekil 4.1 (a), (b), (c) tek yapıli antenin tasarımını ve Tablo 4.1 antenin tasarımını ve parametrelerini göstermektedir.





(c)

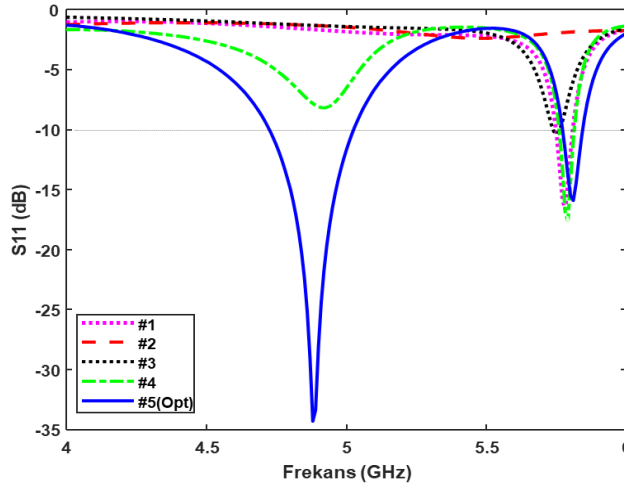
Şekil 4.1. Tek elemanlı antenin (a) üstten görünümü; (b) alttan görünümü; (c) üç boyutlu görünümü

Şekil 4.2'de tek elemanlı antenin tasarım aşamaları görülmektedir. Tasarımı yapılan tek elemanlı anten yapısının toplam hacmi $17 \times 15 \times 1.47 \text{ mm}^3$ 'tür. Birim eleman anten yapısı (#1), 1.4 mm kalınlığında bir kot alt tabaka üzerinde tasarlanmıştır. Şekil 4.2'de önerilen anten tasarım gelişmeleri adım adım gösterilmektedir. İlk tasarım, #1'de gösterilen tam bir zemin düzlemi tarafından desteklenen iç içe spiral halka şekilli en dış halkadan besleme uygulanarak oluşturulmuştur. #2'de, sadece beslemenin konumu değiştirilerek en içteki daireden verilmiştir. #3'te, şekilde görüleceği üzere beslemenin konumu değiştirilerek ikinci halkadan verilmiştir. Daha sonraki tasarımlarda (#4 ve #5(Opt)) tam bir toprak düzlemi üzerine L slot eklenmiştir ve beslemenin konumu değiştirildiğinde en iyi sonucu son tasarım #4 ve #5(Opt) vermektedir.



Şekil 4.2. Tek elemanlı antenin tasarım aşamaları

Tek elemanlı antenin S_{11} parametresinin simüle edilen ölçüm düzeni Şekil 4.3'te ele alınmaktadır. Anten konfigürasyon #1'de 5.5 – 6 GHz aralığında tek bant yaparak rezonansa geldiği, #2'de herhangi bir bant dahi yapmadığı ve rezonansa gelmediği, #3'te 5.5 – 6 GHz aralığında tek bant yaptığı ancak tam olarak rezonansa gelmediği, #4'te çift bant yaptığı ancak sadece 5.5 – 6 GHz aralığında rezonansa geldiği, #5(Opt)'ta 5G (4.80 – 5.00 GHz) ve WLAN (5.75 – 5.85 GHz) frekans bantlarında çift bant ($S_{11} < -10$ dB için) yaparak rezonansa geldiği ve en optimum sonucu verdiği görülmektedir.



Şekil 4.3. Tekli anten konfigürasyonlarının (#1, #2, #3, #4, #5(Opt)) simüle edilmiş geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristiği.

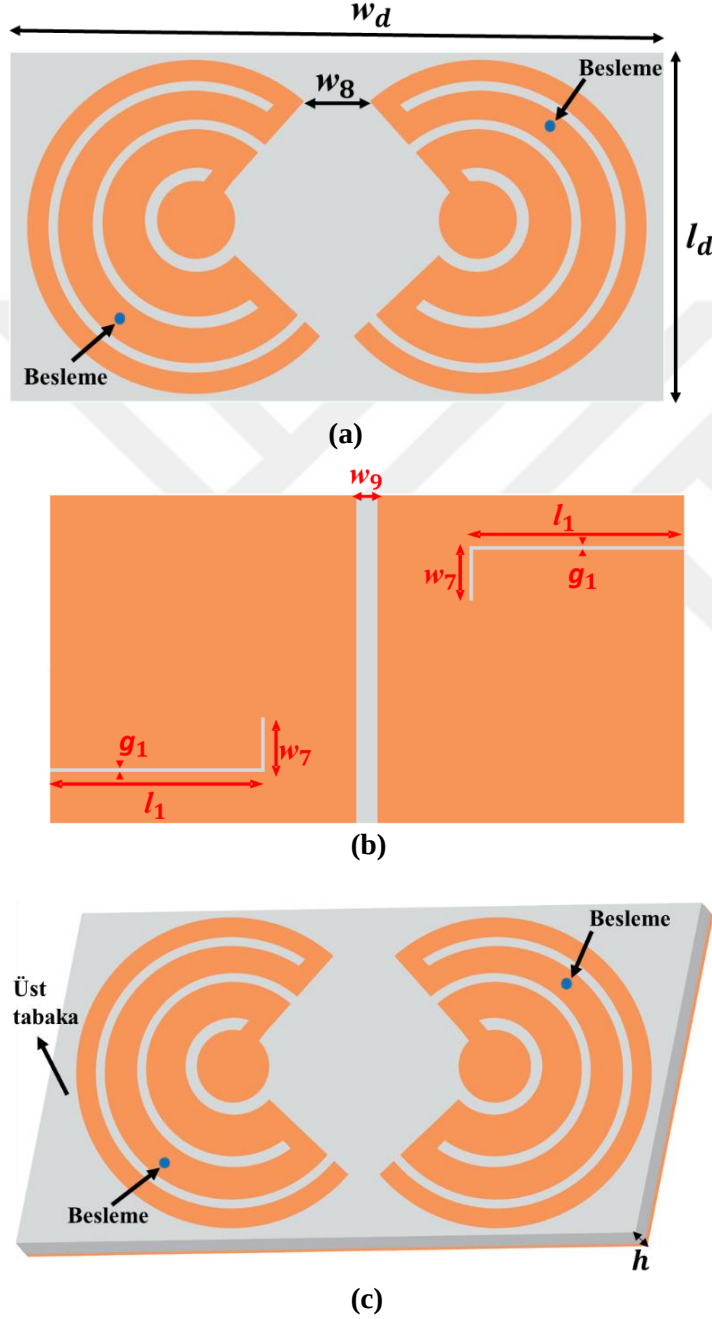
Aşağıdaki aşama, bir çift yama elemanından oluşan çift elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenini ele almaktadır, geliştirme prosedürü ilerleyen bölümlerde detaylandırılmıştır.

4.2. İki Anten Elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Anten Tasarımı

Daha önce açıklandığı gibi, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteni 2×2 dizi tekli antenden oluşur. Tasarım tamamlanmış ve daha iyi sonuçlar vermek için daha önce açıklandığı gibi modifikasyonda kullanılan algoritmaya göre anten boyutlarında ve meta malzeme boyutlarında iyileştirmeler yapılmıştır. Bundan sonraki aşamada amaç, tek elemanlı anten ile aynı frekans spektrumunu kapsayan ve daha iyi anten özelliklerine sahip bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten tasarımı gerçekleştirmektir. Ayrıca, toprak düzlemini (GP) iyileştirilerek aynı frekans aralıklarını gösterecek şekilde çift spiral halka şeklinde bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteni geliştirildi. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış yapısı birçok konfigürasyondan sonra en iyi sonucu veren ayna görüntüsü ile verilmiştir.

Anten bileşenlerinin uyarılması için tekli antende olduğu gibi 50Ω SMA konektörlerine düşey probe beslemeli bağlanan antenler, 4.80 – 5.00 (5G bandı) ve 5.75 – 5.85 GHz bantlarının (WLAN bandı) IEEE 802.11 frekans bandında çalışacak şekilde çift bantlı olarak tasarlanmıştır. Önerilen antenin port izolasyonunu sağlamak için iki patch anten toprak tabanının tam orta kısmına eklenen 1 mm kalınlığındaki bir yarıkla boydan boya ayrılmıştır. Ayrıca tekli antende de ince frekans ayarı yapmak için kullanılan L slotun kalınlığı 0.2 mm iken Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antende bu kalınlık iki kat artırılarak 0.4 mm alınmıştır. Tasarım yapılmış ve deneysel olarak test edilmiştir. Şekil 4.5 (a), Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin üst yapısını gösterirken, Şekil 4.5 (b) alt yüzeyi

yani toprak kısmını temsil etmektedir. Şekil 4.5 (a)'da gösterildiği gibi, iki elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin toplam hacmi $30 \times 17 \times 1.47 \text{ mm}^3$ 'tür. Giyilebilir uygulamalar için çift bantlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin geometrik konfigürasyonu Şekil 4.5 (a), (b) ve (c)'de gösterilmektedir. Tekli anten rezonatörüne ait parametreler ile Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antende tekli antenden farklı olarak kullanılan parametreler ve bu parametrelere ilişkin değerler Tablo 4.1 de sunulmuştur.

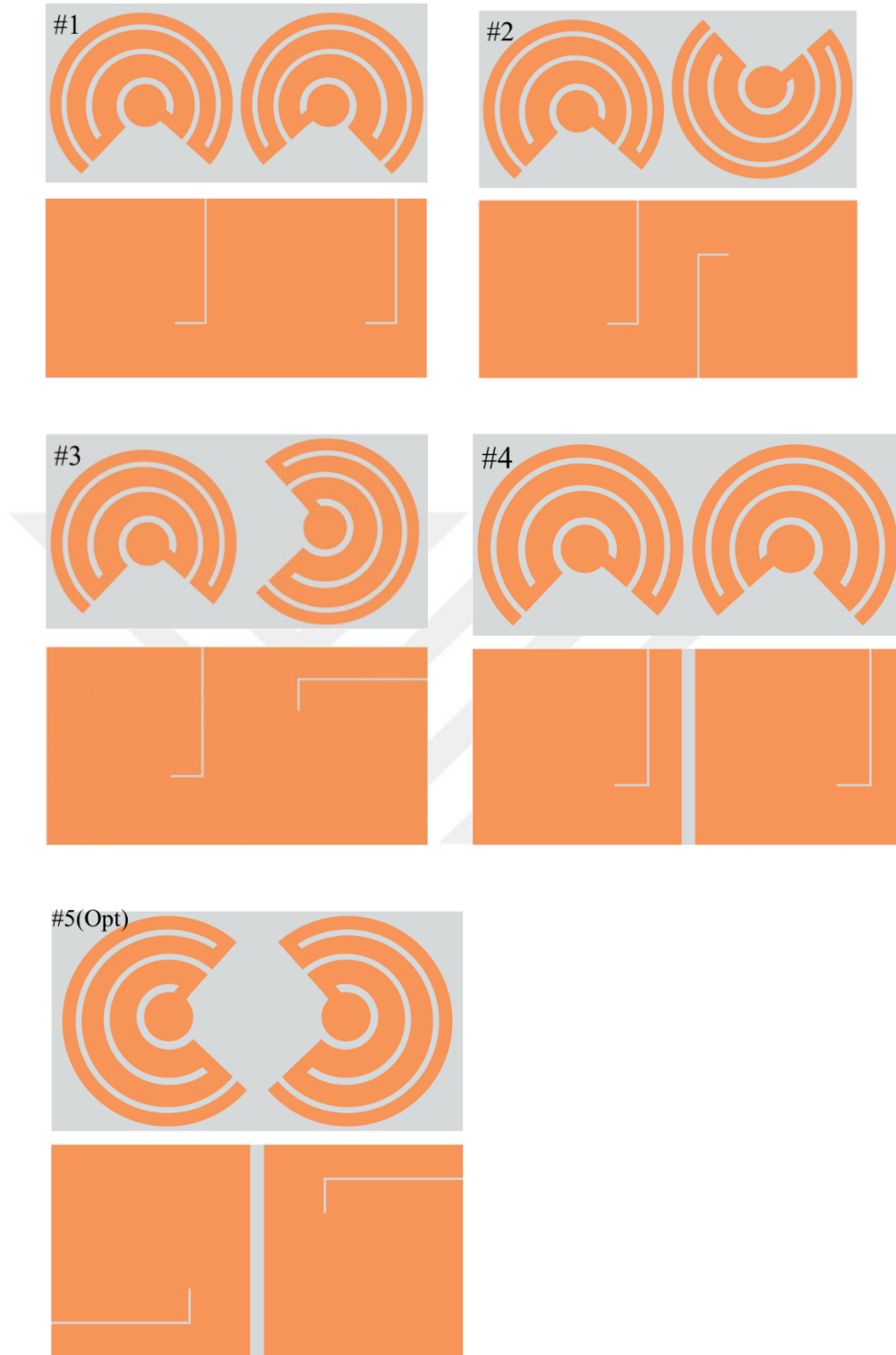


Şekil 4.4. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin **(a)** üstten görünümü; **(b)** alttan görünümü; **(c)** üç boyutlu görünümü.

Tablo 4.1. Önerilen tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteninin tasarım parametreleri

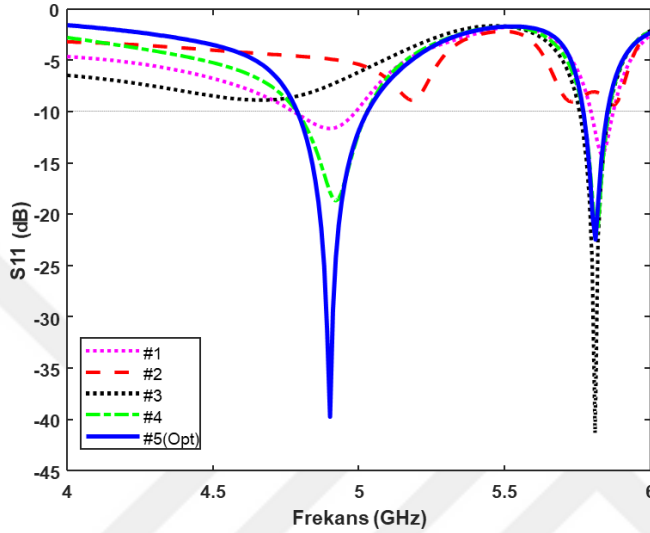
Parametreler	Değerler (mm)	Parametreler	Değerler (mm)
w_1	1.9	w	17
w_2	2	l	15
w_3	1.5	l_1	10.5
w_4	0.9	g	0.2
w_5	0.5	g_1	0.4
w_6	0.675	w_d	30
w_7	2.6	l_d	17
w_8	1.829	h	1.4
w_9	1		

Şekil 4.6'da iki elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteni için tasarım aşamaları görülmektedir. Tekli anten yapısında olduğu gibi anten rezonatörü ve toprak kısmının üretimi için iletken tel veya iplik kullanılarak ya da kumaşa iletken malzemelerle işlem görmesi sonucu elde edilen bakır ve nikel kaplama naylondan yapılmış dokuma iletken kumaş kullanılmıştır. Anten için taban malzemesi olarak 1.4 mm kalınlığında, bağlı dielektrik geçirgenliği (ϵ_r) 2 ve elektrik kayıp tanjantı 0.02 olan bir tekstil malzemesi olan kot kumaş kullanılmıştır. Tasarımı yapılan iki elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten yapısının toplam hacmi $17 \times 30 \times 1.47 \text{ mm}^3$ 'tür. Tasarımın ilk konfigürasyonunda (#1) tekli konfigürasyonda en iyi sonucu elde ettiğimiz antenin üst kısmında yer alan iç içe spiral halka şekilden iki tanesi paralel olarak L slotlu tam bir toprak yapısı üzerine yerleştirilmiştir. Bir sonraki konfigürasyonda (#2) spiral halka şeklindeki üst kısımlardan biri sabit tutularak diğer yapı toprakla 180 derece döndürülerek yerleştirilmiştir. Daha sonraki konfigürasyonda (#3) antenlerden biri sabit tutulup diğer anten toprakla birlikte ortogonal yerleştirilmiştir. Sonraki anten konfigürasyonunda (#4) #1'deki anten konfigürasyonundan farklı olarak toprak yapısında iki anteni ortalayacak şekilde 1 mm kalınlığında boydan boya slot yapısı uygulanmıştır. En nihayetindeki anten konfigürasyonunda (#5 (Opt)) antenin ayna görüntüsü alınarak toprak yapısında iki anteni ortalayacak şekilde 1 mm kalınlığında boydan boya slot yapısı uygulanmıştır. En optimum sonuç #5(Opt) nolu anten konfigürasyonundan elde edilmektedir.



şekil 4.5. İki elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin tasarım aşamaları

İki elemanlı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin S_{11} parametresinin simüle edilen ölçüm düzeni Şekil 4.7'de ele alınmaktadır. Anten konfigürasyon #1'de çift bant yaparak rezonansa geldiği, #2'de çift bant yaptığı ancak rezonansa gelmediği, #3'te 5.5 – 6 GHz aralığında tek bant yaparak rezonansa geldiği, #4'te çift bant yaparak rezonansa geldiği, #5(Opt)'ta 5G (4.80 – 5.00 GHz) ve WLAN (5.75 – 5.85 GHz) frekans bantlarında çift bant ($S_{11} < -10$ dB için) yaparak rezonansa geldiği ve en optimum sonucu verdiği görülmektedir.

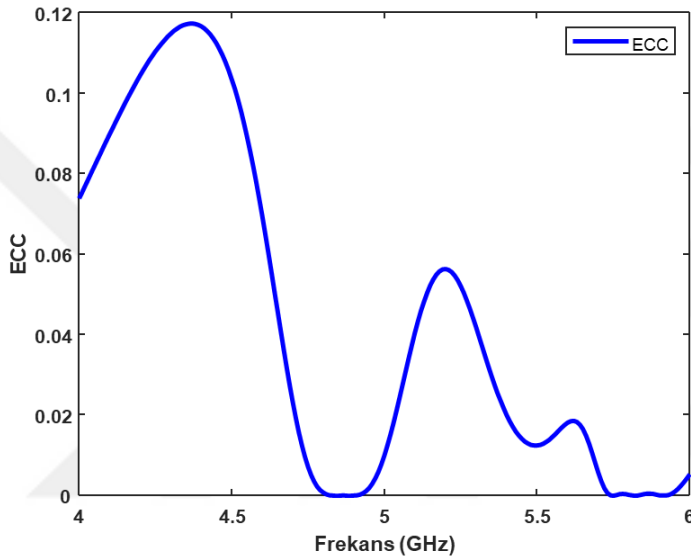


Şekil 4.6. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten konfigürasyonlarının (#1, #2, #3, #4, #5(Opt)) simüle edilmiş geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristiği.

Her antenin kazanç değeri konumuna göre değişir ve tüm antenler aynı boyutlara sahip olmasına rağmen yanındaki antenden etkilenir. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteninin temel işlevsel alanı, çeşitliliği ve çoğullamasıdır. Bundan dolayıdır ki, çeşitlilik ve çoğullama parametrelerinin performansının araştırılması; ısıma, yansıma ve izolasyon parametrelerinin performansının araştırılmasından daha önemlidir. Bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten sistemindeki çeşitliliğin performansını değerlendirmek için kilit unsur ECC değeridir. ECC'nin nispeten küçük olması, başka bir deyişle önerilen anten modelinin yeterliliğini değerlendirmek için ideal olarak 0.5'in altında olduğunu onaylaması gerekir ki bu da modelin güçlü bir çeşitlilik sağladığını düşündürür. ECC eğrisi, iletişim kanallarının ne ölçüde izole edildiğini veya ilişkilendirildiğini yansıtır. ECC aşağıdaki şekilde hesaplanır (Denklem (4.3)).

$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (4.3)$$

Önerilen Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteninin ECC eğrisinin değeri, antenin S parametreleri kullanılarak belirlenir. Görüldüğü üzere, Şekil 4.8 önerilen Çoklu Giriş Çoklu Çıkış modelinin ECC'sini doğrulamaktadır. Analizden, ECC aralığının 4.80–5.00 (5G bandı) ve 5.75–5.85 GHz bantlarının (WLAN bandı) frekans spektrumu üzerinde 0.01'den küçük olduğu sonucuna varılabilir. Bu şekilde tasarımın, modern iletişim ağları için çok gerekli olan artırılmış veri hızı aracılığıyla daha iyi çoğullama kalitesini desteklemiş olduğu görülür.



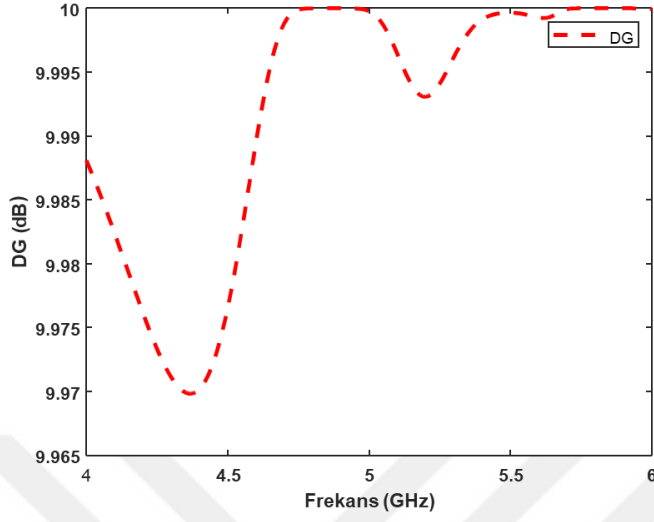
Şekil 4.7. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten ECC değeri.

Bir Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten tasarımında DG (çeşitlilik kazancı), göz ardı edilemeyecek diğer bir önemli parametredir. DG değeri 4.4'teki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$DG = 10\sqrt{1 - (ECC)^2} \quad (4.4)$$

ECC, önerilen Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteni için çeşitlilik başarısını ölçer. DG (Denklem (4.4)) yardımıyla çeşitlilik performansının verimliliği hesaplanabilmektedir. Sunulan tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteninin çeşitlilik kazancı Şekil 4.9'da

görülmektedir. Buradan planlanan Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anteninin ($DG > 9.9$) oldukça yüksek bir DG'e sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten DG değeri.

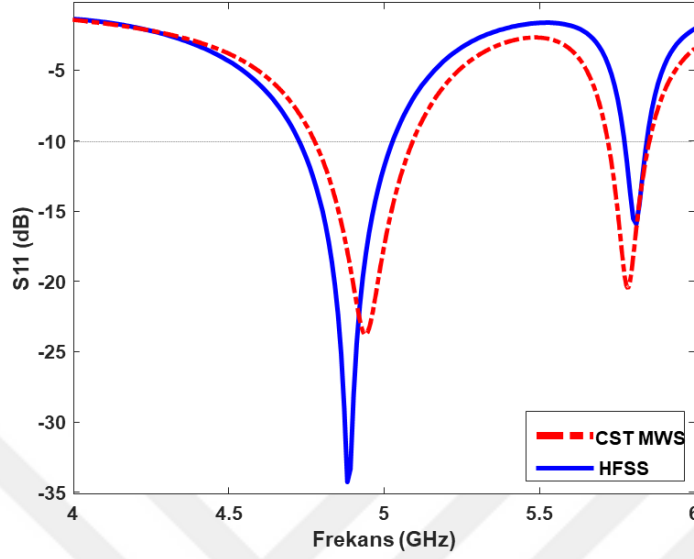
5. SONUÇLAR

Bölüm 4'te giyilebilir uygulamalar için Çoklu Giriş Çoklu Çıkış tekstil anten tasarımı detaylı bir şekilde anlatılmıştır. HFSS (High Frequency Structure Simulator) ve CST (Computer Simulation Technology) simülasyon programlarında istenilen değerler elde edildikten sonra antenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Hizmet alımı yöntemi ile yapılan üretimde bizim ulaştığımız imkanlarla hassas kesim yapabilen cihazlar aracılığıyla (mikro fabrikasyon) zünd mekanik kesim yöntemi ile üretim yapılmıştır. Antenin toprak kısmı muntazaman üretilmesine rağmen çok daha hassas olan rezonatör kısmında spiral halka sarımları arasındaki mesafe nedeniyle yeterli hassasiyette üretilmemiş ve kısa devreler oluşmuştur. Bu nedenle üretim ölçümü yapılamamıştır. Simülasyon programlarından elde edilen sonuçlar Matlab programı ile grafiksel olarak ayrı ayrı ve üst üste çizdirilmiştir. Bu şekilde HFSS ve CST simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması kolayca yapılmıştır.

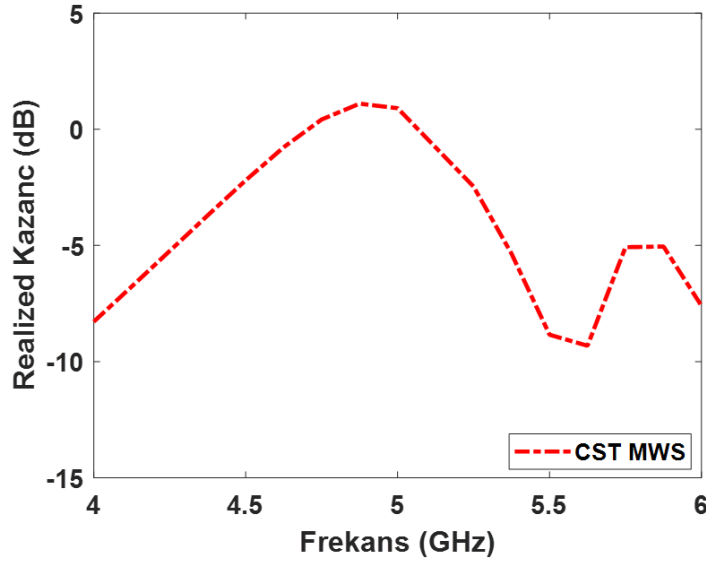
Bu tez çalışmasında önerilen tek yapılı antenin, Şekil 5.1'de HFSS ve CST simülasyon programlarında elde edilen yansıma katsayısı görülmektedir. Çift bantlı anten her iki bantta da oldukça düzgün bir ışıma karakteristiği göstermektedir. CST simülasyon programında elde edilen sonuçlar ile HFSS simülasyon programında elde edilen sonuçlar arasında grafikte az miktarda frekans kayması meydana gelmiştir. $S_{11} < -10$ dB için HFSS simülasyonu bize, 4.88 GHz'de -34.2641 dB yansıma katsayısı ile 4.7252 GHz'den 5.0261 GHz'e kadar 300.9 MHz'lik bir empedans bant genişliği ve 5.81 GHz'de -15.9081 dB yansıma katsayısı ile 5.7715 GHz'den 5.8437 GHz'e kadar 72.2 MHz'lik bir empedans bant genişliği veriyor. CST simülasyon programında empedans bant genişliği; 4.80 GHz'den başlayarak 5.00 GHz'e 200 MHz olarak, 5.75 GHz'den başlayarak 5.85 GHz 100 MHz olarak bulunmuştur. Birinci bant 4.88 GHz merkezli frekansta verimlilik %76.12 ve ikinci bant 5.81 GHz merkezli frekansta verimlilik %25.56 olarak bulunmuştur. Şekil 5.2, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 simülasyon sonuçlarına dayalı olarak monopoll antenin birinci banttaki kazanç değeri 1.57 dBi iken ikinci bantta -2.79 dBi seviyesindedir.

Bu çalışmada önerilen Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten giyilebilir tekstil uygulamaları için 5G (4.80 – 5.00 GHz) ve WLAN (5.75 – 5.85 GHz) frekans bantlarında çift bant tasarlanmış olup, söz konusu her iki bantta da oldukça düzgün bir ışıma karakteristiği göstermektedir. Literatür araştırmaları yapıldıktan sonra ilgili antenin oldukça küçük boyutlarda olduğu görülmektedir. Her iki bantta da oldukça düzgün ışıma karakteristiği gösteren antenin birinci banttaki kazanç değeri yaklaşık 2.24 dBi iken ikinci bantta -2.78 dBi seviyesindedir. Şekil 5.6'da HFSS ve CST simülasyon programlarında elde edilen S_{11} ve S_{22} karakteristiği yani birinci ve ikinci antenin yansıma katsayılarının mükemmel bir şekilde aynı karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Yalnızca HFSS ve CST simülasyon sonuçları arasında ikinci bantta az miktarda frekans kayması gözlenmiştir. $S_{11} < -10$ dB için HFSS simülasyonu bize, -39.6768 dB yansıma katsayısı ile 4.7892 GHz'den 5.0271 GHz'e kadar 237.9 MHz'lik bir empedans bant genişliği ve 5.81 GHz'de -22.3943 dB yansıma katsayısı ile 5.7687 GHz'den 5.8505 GHz'e kadar 81.8 MHz'lik bir empedans bant genişliği verirken CST simülasyonu bize 4.80 GHz'den 5.00 GHz'ye kadar 200 MHz'lik bir empedans bant genişliği, 5.75 GHz'den 5.85 GHz'ye 100 MHz bant genişliği vermektedir. Birinci bant 4.9175 GHz merkezli frekansta verimlilik %66.42 ve ikinci bant 5.7875 GHz merkezli frekansta verimlilik %21.81 olarak

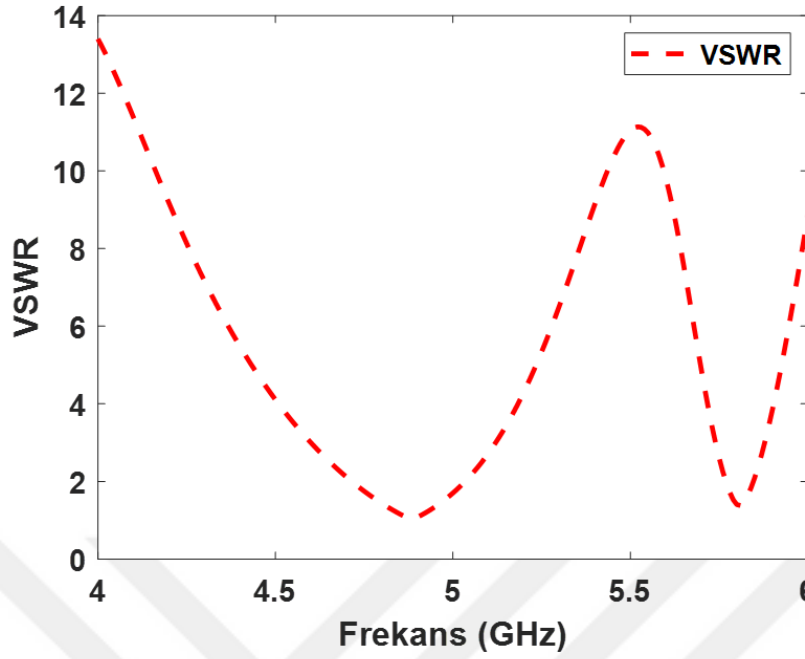
bulunmuştur. Şekil 5.8, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 antenin sonucunda Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin kazancını göstermektedir.



Şekil 5.1. Tek yapılı anten HFSS ve CST simüle edilmiş geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristiği.

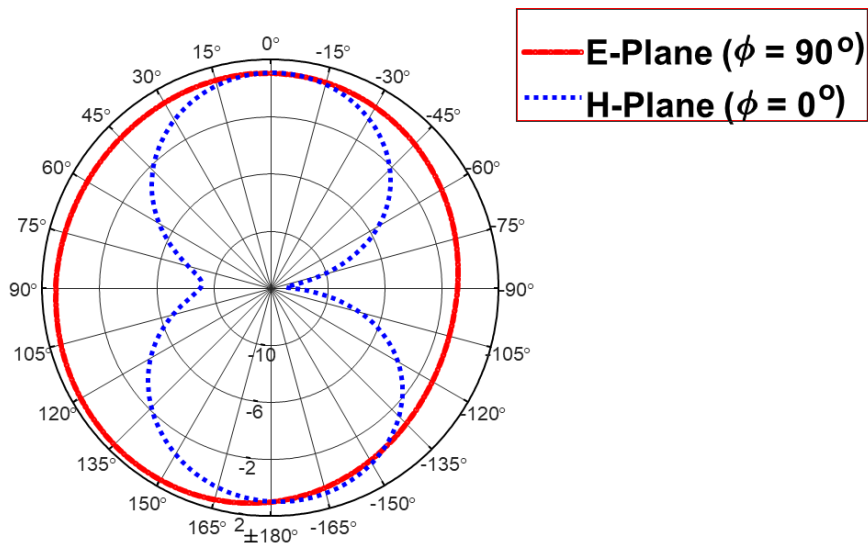


Şekil 5.2. Tekli anten #5(Opt) için kazanç değeri.

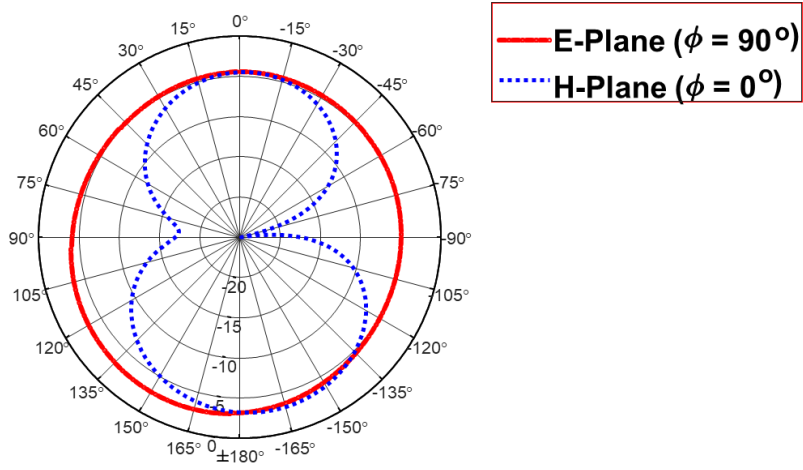


Şekil 5.3. Tek anten #5(Opt) için VSWR değeri.

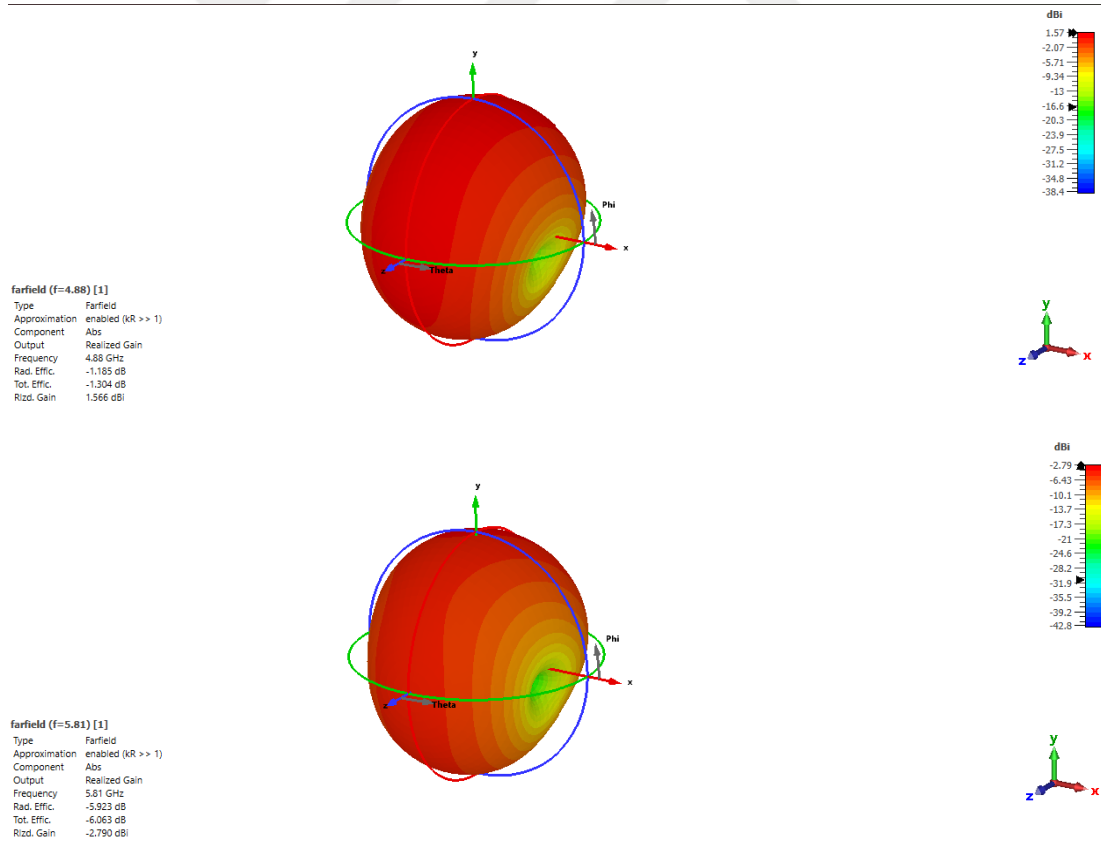
Şekil 5.3'te tekli antenin frekans–duran dalga oranı (VSWR) sonucu görülmektedir. Sonuca göre her iki çalışma bandının dışında 2'den biraz daha yüksek değerde olmasına rağmen, çalışma frekanslarında olması istenildiği gibi 2'nin altındadır.



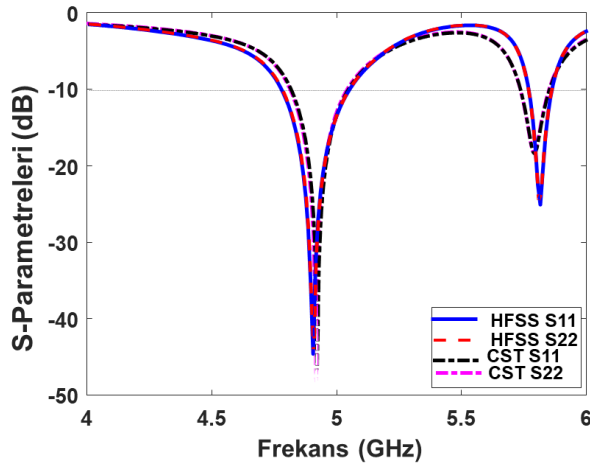
(a) $f=4.88$ GHz

(b) $f=5.81$ GHz

Şekil 5.4. Tek yapıli anten farklı frekanslardaki kazanç örüntüleri

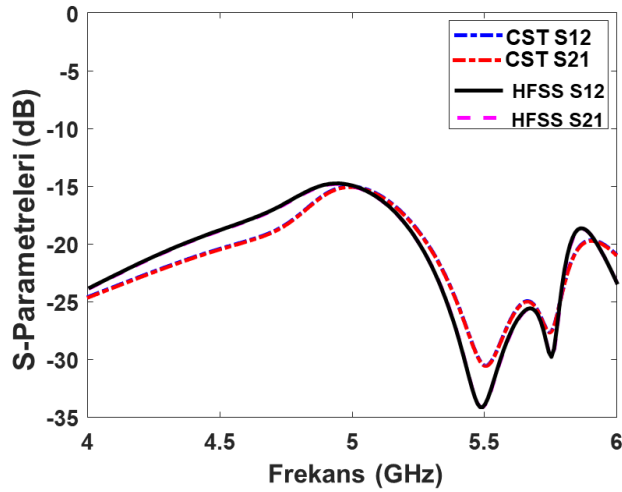


Şekil 5.5. Tek yapıli anten üç boyutlu kazanç örüntüsü

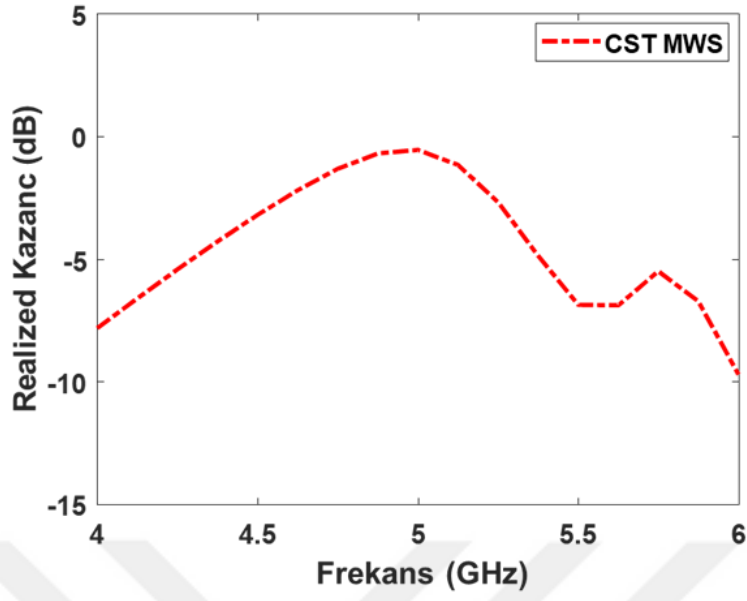


Şekil 5.6. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten HFSS ve CST simüle S_{11} ve S_{22} karakteristiği.

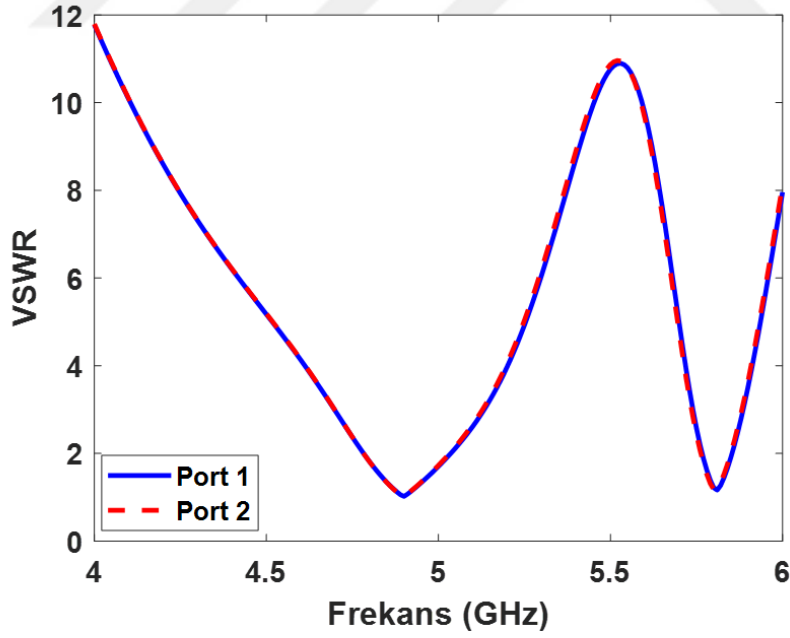
Şekil 5.7’de S_{12} ve S_{21} parametrelerinin HFSS ve CST simülasyon sonuçları grafiksel olarak gösterilmektedir. Tüm çalışma frekanslarında -15 dB’nin altında değerler elde edilmiştir. S_{12} ve S_{21} parametreleri ile Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin elemanları arasındaki izolasyon değeri gösterilir. İzolasyonun Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenlerde en önemli parametrelerden biri olduğu bilinmektedir. Şekil 4.6’dan da görüleceği üzere 15 dB’nin üstünde yüksek izolasyon performansı sağlanmaktadır.



Şekil 5.7. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten HFSS ve CST simüle S_{12} ve S_{21} karakteristiği.

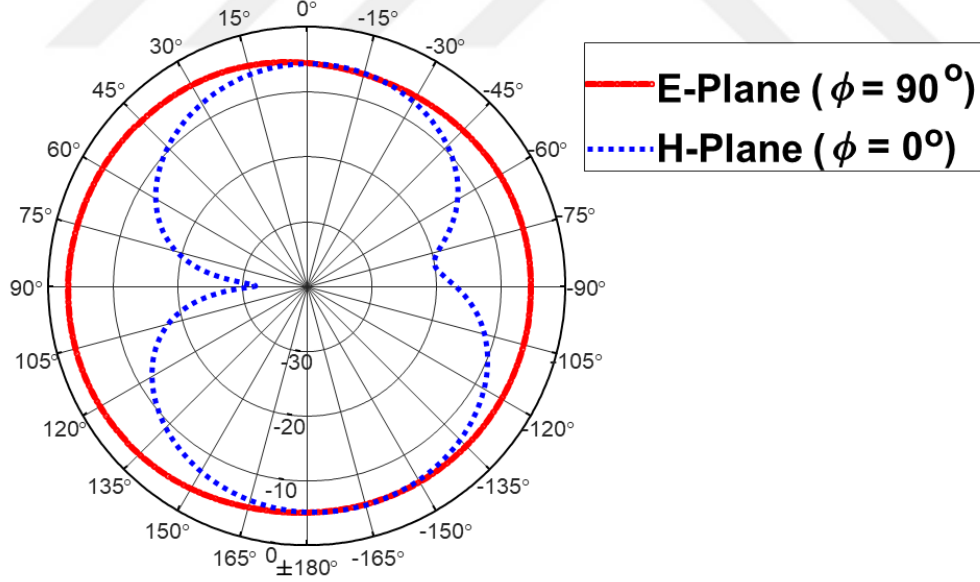
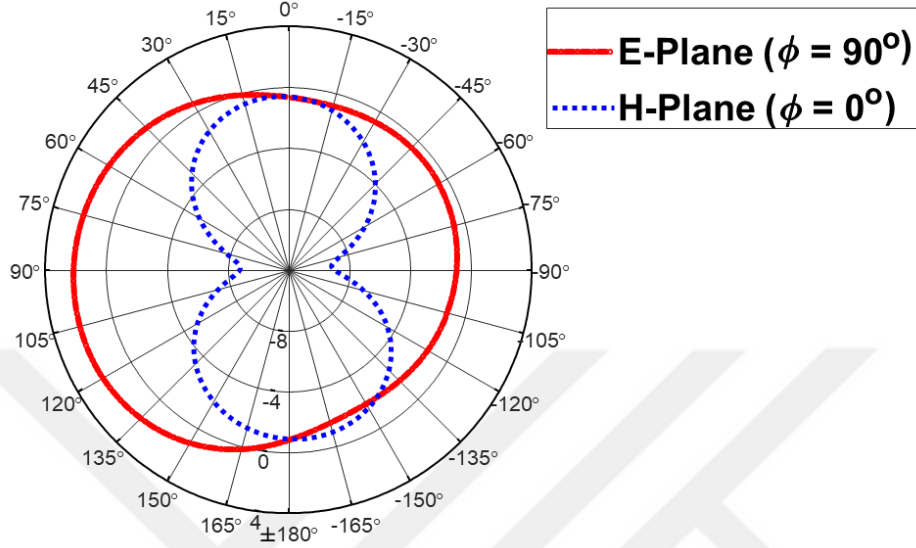


Şekil 5.8. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten #5(Opt) için kazanç değeri.



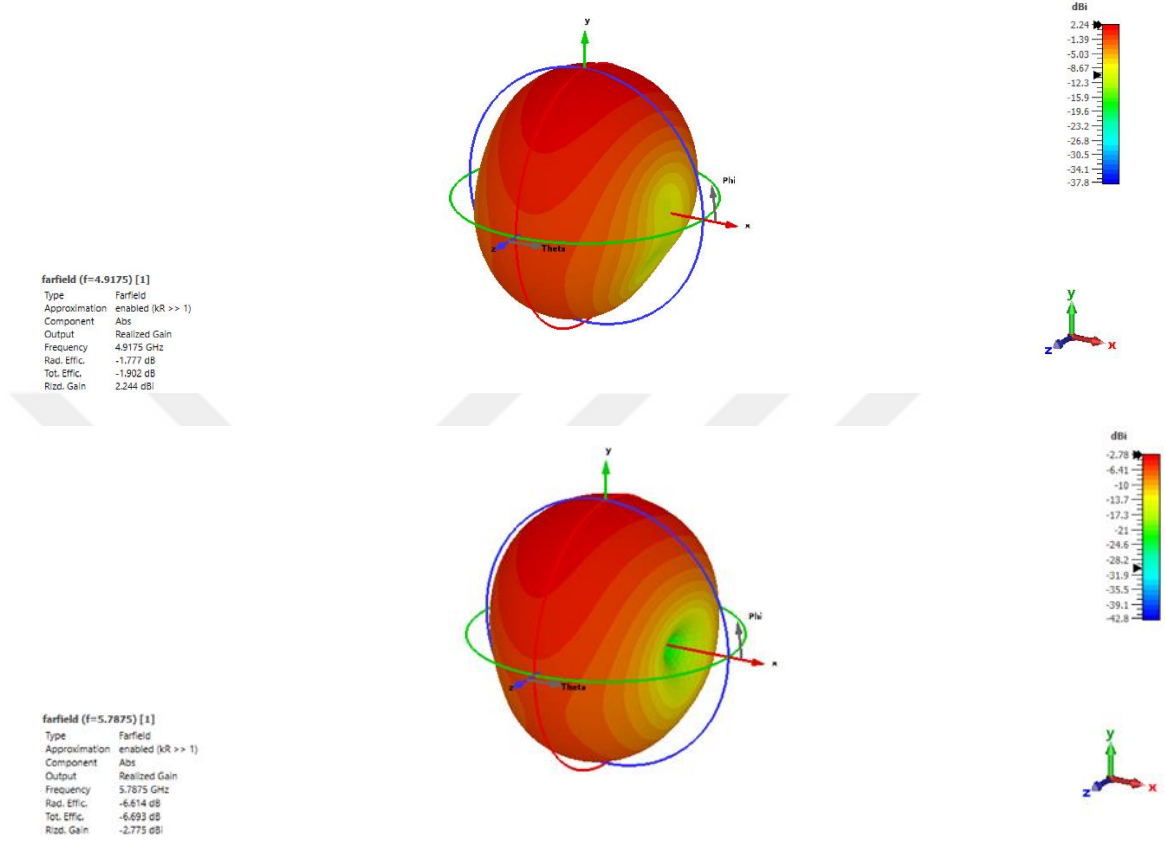
Şekil 5.9. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten #5(Opt) için VSWR değeri.

Şekil 5.9’da Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten frekans–duran dalga oranı (VSWR) grafiği gösterilmektedir. Duran dalga oranının 2’nin altında bir değere sahip olması istenmektedir. Antenin çalışma frekanslarında değeri 2’nin altındadır.

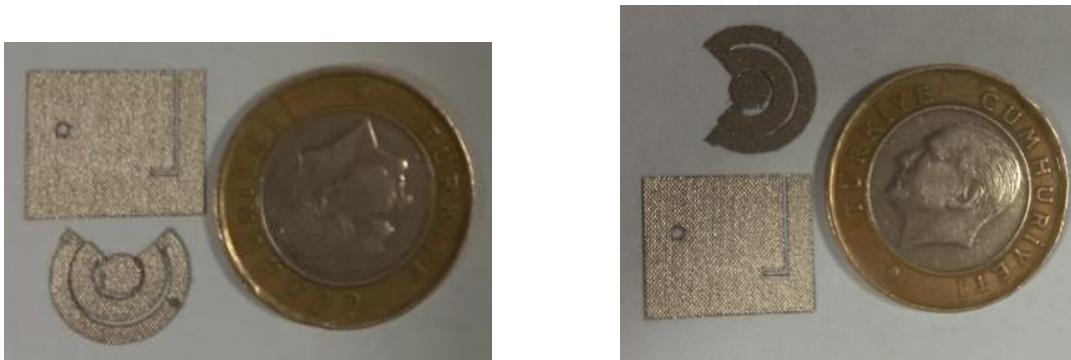


Şekil 5.10. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten farklı frekanslardaki kazanç örüntüleri

Şekil 5.10'da giyilebilir uygulamalar için çift bantlı tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin $f=4.9175$ ve $f=5.7875$ frekanslarında E-düzlemi ve H-düzlemindeki ışıma paternleri görülmektedir. Şekil 5.11'de söz konusu Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin CST simülasyon programından elde edilen üç boyutlu kazanç örüntüsü gösterilmektedir.



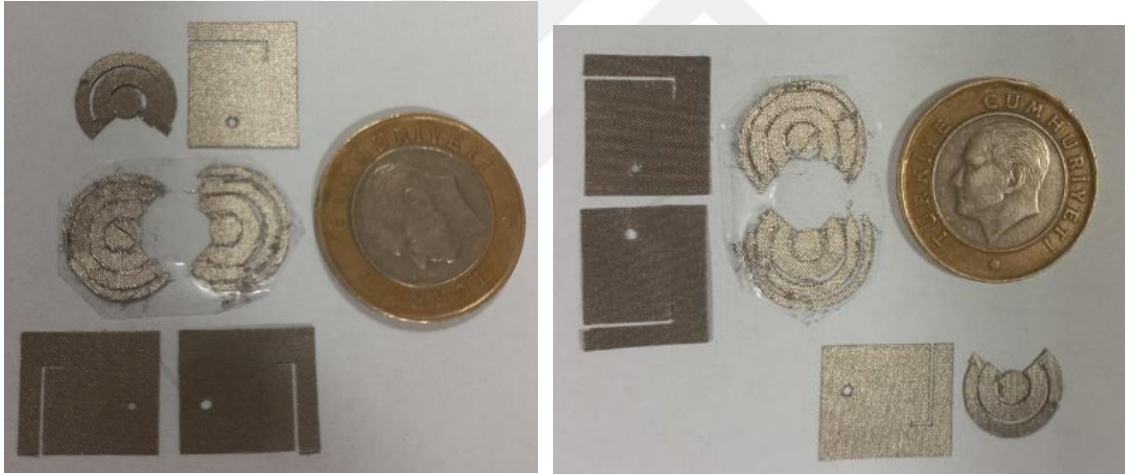
Şekil 5.11. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten üç boyutlu kazanç örüntüsü



Şekil 5.12. Üretimi gerçekleştirilmiş tek yapılı anten rezonatör ve toprak görünümü



Şekil 5.13. Üretimi gerçekleştirilmiş Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten rezonatör ve toprak görünümü



Şekil 5.14. Üretimi gerçekleştirilmiş tek ve Çoklu Giriş Çoklu Çıkış anten rezonatör ve toprak görünümü

Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te giyilebilir uygulamalar için çift bantlı tek yapılı ve Çoklu Giriş Çoklu Çıkış tekstil antenlerin üretilmiş hali görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere üretimi yapılan her iki anten için toprak kısmı istenildiği şekilde üretilebilmesine rağmen, rezonatör kısımları spiral halkalar arasındaki boşluğun hassasiyeti nedeniyle kısa ve açık devreler meydana gelmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, iyi ısıtma özelliklerine sahip giyilebilir tekstil uygulamaları için Çoklu Giriş Çoklu Çıkış dual band anten elde edilmiştir. Ayrıca

tasarlanan anten Çizelge 5.1'deki literatür değerleri ile karşılaştırıldığında oldukça iyi kazanç (2.24 dB) ve iyi izolasyona (-15 dB'nin üstünde değerler) sahiptir.

Tablo 5.1. Önerilen tekstil Çoklu Giriş Çoklu Çıkış antenin literatürdeki antenlerle karşılaştırılması

Ref.	Antenin elektriksel boyutu	Rezonatör Sayısı	Substrat (ϵ_r)	Maks. Kazanç (dB)	Frekans Bandı (GHz)	Maks. port izolasyon (dB)	ECC	DG
Roy ve diğerleri (2020)	$0.49\lambda_0 \times 0.79\lambda_0$	2	Kot (1.77)	4.00	1.5-3.8, 4.1-6.1	33.00	<0.1	>9.9
Yan ve diğerleri (2015)	$0.3352 \lambda_0 \times 0.2584 \lambda_0$	2	Tekstil (1.30)	3.2 5.8	2.4 5.15-5.85	20	<0.5	>9.9
Mashagba ve diğerleri (2021)	$1.301 \lambda_0 \times 0.686 \lambda_0$	2	Keçe (1.44)	1.878 4.027	2.45-3.5	30	<0.5	>9.9
Prop.	$0.272 \lambda_0 \times 0.48 \lambda_0$	2	Kot (2.00)	2.24 -2.78	4.80-5.00 5.75-5.85	15	<0.01	>9.99

6. KAYNAKLAR

- Salonen, P. and Hurme, H. 2003. A novel fabric WLAN antenna for wearable applications. *IEEE Trans Antennas Propagation (AP-S)*, vol. 2: 700–703.
- Elsheakh, D.M.N. Esmat, A. Elsadek, A. and H. A. 2012. *Antenna Designs with Electromagnetic Band Gap Structures*. INTECH Open Access Publisher.
- Locher, I. Klemm, M. Kirstein, T. and Troster G. 2006. Design and characterization of purely textile patch antennas. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 29: 777-788.
- Hertleer, C. Rogier, H. Vallozzi, L. and Declercq, F. 2007. A Textile Antenna based on High-Performance Fabrics. *Antennas and Propagation, EuCAP 2007. The Second European Conference on*: 1-5.
- Salonen, P. Rahmat-Samii, Y. Hurme, H. and Kivikoski, M. 2004. Dual-band wearable textile antenna. *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium 2004 Digest Held in Conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting*: 463-466 p.
- Langley, R. and Zhu, S. 2008. Dual band wearable antenna. *Antennas and Propagation Conference, LAPC 2008, Loughborough*: 14-17 p.
- Osman, M.A.R. Rahim, M.K.A. Abdullah, M.A. Samsuri, N.A. Zubir, F. and Kamardin, K. 2011. Design, implementation and performance of ultra-wideband textile antenna. *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 27: 307-325.
- Sultan, N. 2015. Reflective thoughts on the potential and challenges of wearable technology for healthcare provision and medical education. *International Journal of Information Management*, 35(5): 521-526.
- Teng, X.-F. Zhang, Y.-T. Poon, C. C. and Bonato, P. 2008. Wearable medical systems for p-health. *IEEE reviews in Biomedical engineering*, 1: 62-74.
- Ouyang, Y. and Chappell, W. 2007. Distributed Body-worn Transceiver System with the Use of Electro-textile Antennas. *Microwave Symposium. IEEE/MTT-S International*: 1229-1232 p.
- Anonymous: Federal Communication Commission. <http://www.fcc.gov/oet/rfsafety/dielectric.html> [Son erişim tarihi: 01.11.2022].
- Josefsson, L. and Persson, P. 2006. *Conformal array antenna theory and design*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press.
- Bashir, S. 2009. Design and synthesis of non-uniform high impedance surface based wearable antennas. Ph.D. thesis, Loughborough University, 68 p.
- Zhu, S.Z. and Langley, R. 2009. Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57 (4): 926-935 p.

- Tsolis, A. Whittow, W.G. Alexandridis, A.A. and Vardaxoglou, J.Y.C. 2014. Embroidery and Related Manufacturing Techniques for Wearable Antennas: Challenges and Opportunities. *Electronics*, vol. 3: 314-338 p.
- Salonen, P. Sydanheimo, L. Keskilammi, M. and Kivikoski, M. 1999. A small planar inverted-F antenna for wearable applications. *Wearable Computers*, 1999. Digest of Papers. The Third International Symposium. 95-100 p.
- Vaughan, R.G. and Andersen, J.B. 1987. Antenna diversity in mobile communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 36, no. 4: 149-172 p.
- Foschini, G.J. and Gans, M.J. 1998. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communication*, vol. 6, no. 3: 311–335 p.
- Wagih, M. Hilton, G. S. Weddell, A. S. and Beeby, S. 2021. Dual-Polarized Wearable Antenna/Rectenna for Full-Duplex and MIMO Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT). *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. Digital Object Identifier 10.1109/OJAP.2021.3098939.
- Li, H. Sun, S. Wang, B. and Wu, F. 2018. Design of Compact Single-Layer Textile MIMO Antenna for Wearable Applications. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, VOL. 66: 6 p.
- Yan, S. Soh, P.J. and Vandenbosch, G.A.E. 2015. Dual-band textile MIMO antenna based on substrate-integrated waveguide (SIW) technology. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 11: 4640–4647 p.
- Mashagba, H.A. Rahim, H.A. Adam, I. Jamaluddin, M.H. Yasin, M.N.M. Jusoh, M. Sabapathy, T. Abdulmalek, M. Al-Hadi, A.A. İsmail, A.M. and Soh, P.J. 2021. A Hybrid Mutual Coupling Reduction Technique in a Dual-Band MIMO Textile Antenna for WBAN and 5G Applications. *IEEE Open Access Journal*. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3125049.
- Singh, H. Kanaujia, B.K. Kumar, A. Srivastava, K. and Kumar, S. 2020. Wideband textile multiple-input-multiple-output antenna for industrial, scientific and medical (ISM)/wearable applications. *WILEY International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020;30:e22451.
- Roy, S. Ghosh, S. Pattanayak, S. S. and Chakarborty, U. 2020. Dual-polarized textile-based two/four element MIMO antenna with improved isolation for dual wideband application. *WILEY International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020;30:e22292.
- Biswas, A. K. and Chakraborty, U. 2019. Compact wearable MIMO antenna with improved port isolation for ultra-wideband applications. *WILEY IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, Vol. 13 Iss. 4:498-504 p.

- Biswas, A.K. and Chakraborty, U. 2019. A compact wide band textile MIMO antenna with very low mutual coupling for wearable applications. WILEY International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019;29:e21769.
- Dey, A. B. Pattanayak, S. S. Mitra, D. and Arif, W. 2020. Investigation and design of enhanced decoupled UWB MIMO antenna for wearable applications. WILEY Microw Opt Technol Lett. 2021;63:845–861 p.
- Biswas, A. K. and Chakraborty, U. 2019. Investigation on decoupling of wide band wearable multiple-input multiple-output antenna elements using microstrip neutralization line. WILEY International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019;29:e21723.
- Sanjeev, K. Durgesh, N. Kunal, S. Sachin, K. Hari, S. Mohamed, M. Hala, M. and Binod, K.K. 2021. Wideband Circularly Polarized Textile MIMO Antenna for Wearable Applications. IEEE OPEN ACCESS JOURNAL.2021.3101441.
- Garg, R. Bhartia, P. Bahl, I. and Ittipiboon, A. 2000. Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House, pp. 1-2.
- Roy, S. Ghosh, S. Pattanayak, S.S. Chakaraborty, U. 2020. Dual-polarized textile-based two/four element MIMO antenna with improved isolation for dual wideband application. Int J RF Microw Comput Aid Eng.
- Garg, R. Bhartia, P. Bahl, I. and Ittipiboon, A. 2001. Microstrip antenna design handbook. Artech House Antennas and Propagation Library, pp. 1-2.
- Özden, M. (1989). Dokuma Kumaşlarının Kullanım Amacına Uygun Tasarımında Kullanılacak Bir Bilgisayar Program Paketinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi (Development of a Computer Package Program for the Design of Woven Fabrics According to Purpose of use, M. Sc. Thesis), Ege Üniversitesi, İzmir 35 s.
- Meriç, B. (1988). Teknolojik Gelişme Sürecinde Fonksiyonel-Estetik İlişki Açısından Dokuma Kumaşların Tasarımı. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 27-75 s.
- Yakartepe, M., & Yakartepe, Z. (1995). Tekstil teknolojisi: elyaf'tan kumaş'a: TKAM.
- Fişekçi, D. (2011). Keçe. İstanbul: İnkılâp Yayınları.
- Seyirci, M. ve Topbaş, A. (1982). Keçecilik ve Batı Anadolu'daki Bazı Keçe Merkezleri. 2. Ulusal El Sanatları Sempozyumu Bildirileri - 18-20 Kasım 1982. İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Yayınları, İzmir.
- İmer, Z. (1989). Dokuma Tekniği II. Ankara: Sistem Ofset Ltd. Şti.
- Albairaqdar, O. H. M. 2018. Giyilebilir Uygulamalar İçin Eşit Yama Alanına (EYA) Sahip Tekstil Dielektrik Malzeme Tabanlı Mikroşerit Antenlerin 2.4, 3 ve 5.8 Ghz Frekanslarındaki Performansları. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 47 s.

ÖZGEÇMİŞ

SAFİYE KARAGÖZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2020-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2013-2017	Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi
2005-2009	Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Trabzon

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Şef	Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Md.
2021-Devam Ediyor	Kamu Özel Sektör İşbirliği Dairesi Bşk., Ankara
Memur	DHMI Antalya Havalimanı Başmüdürlüğü
2011-2021	İşletme Müdürlüğü, Antalya