



**5G ve IoT UYGULAMALARI İÇİN EŞDEĞER
DEVRE TABANLI BİR MODEL KULLANILARAK
YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN TASARIMI**

Hilal KOÇ POLAT

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU

Doktora Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2020

(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**5G ve IoT UYGULAMALARI İÇİN EŞDEĞER DEVRE TABANLI BİR
MODEL KULLANILARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN
TASARIMI**

(Design of Reconfigurable Antennas for 5G and IoT Applications by Using an Equivalent
Circuit Approach)

DOKTORA TEZİ

Hilal KOÇ POLAT

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU

Erzurum
Ağustos, 2020

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**5G ve IoT UYGULAMALARI İÇİN EŞDEĞER DEVRE TABANLI BİR MODEL
KULLANILARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN TASARIMI**

Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU danışmanlığında, Hilal KOÇ POLAT tarafından hazırlanan bu çalışma, 06/08/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği /oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK
Erzurum Teknik Üniversitesi

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Nur Hüseyin KAPLAN
Erzurum Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi: Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Tolga AYDIN
Atatürk Üniversitesi

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) kapsamında FHD-2019-7031 proje ile desteklenmiştir.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU danışmanlığında sunulan “5G ve IoT Uygulamaları için Eşdeğer Devre Tabanlı Bir Model Kullanılarak Yeniden Yapılandırılabilir Anten Tasarımı” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	4	30
Kuramsal Temeller	2	30
Materyal ve Yöntem	3	35
Bulgular	6	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	6	25

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hilal KOÇ POLAT	Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU
22.06.2020	22.06.2020
İmza:	İmza:

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezi (DAYTAM) ve Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır. Ayrıca bu tez, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) kapsamında FHD-2019-7031 proje ile desteklenmiştir.

Doktora öğrenimim boyunca engin bilimsel tecrübesini benimle paylaşan, tüm zorluklara karşı beni cesaretlendiren, kendisini akademik hayatım boyunca örnek olarak alacağım, sabrına, anlayışına ve çalışkanlığına hayran olduğum değerli hocam Sayın Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU'na sonsuz saygı ve teşekkürlerimi tüm içtenliğimle sunarım.

Tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen babam Secaattin KOÇ'a, annem Medine KOÇ'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez yazımı sürecini bitirdikten sonra dünyaya gelen kızım Selin'e, sevgili eşim Hafzullah POLAT'a, akademik çalışma becerisini bana kazandıran ablalarım Kübra KOÇ ve Fadime DAMGACI'ya, tez çalışma konusunu beraber belirlediğimiz, benden desteğini esirgemeyen yol arkadaşım Miraç Dilruba GEYİKOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışma süresince benden desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK, Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU, Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL'a ve Tez İzleme sürecinde beraber olduğumuz Doç. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK, Dr. Öğr. Üyesi Tolga AYDIN'a teşekkür ederim. Ayrıca Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN'a ve tez çalışmaları süresince bana destek olup anlayışlı davranan idari amirim Doç. Dr. Nur Hüseyin KAPLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hilal KOÇ POLAT

ÖZET

DOKTORA TEZİ

5G ve IoT UYGULAMALARI İÇİN EŞDEĞER DEVRE TABANLI BİR MODEL KULLANILARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN TASARIMI

Hilal KOÇ POLAT

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU

Amaç: Bu tez çalışmasında 5G ve IoT uygulamalarında önemli bir yere sahip olan yeniden yapılandırılabilir yama antenlerinin eşdeğer devre tabanlı tasarım yaklaşımı ile modellenmesi ve bu modelin esnek yeniden yapılandırılabilir antenlere uygulanabilirliğinin gösterilmesi amaçlanmaktadır.

Yöntem: Literatürde kullanılan ve sezgisel yaklaşımlar doğrultusunda gerçekleştirilen yapısal değişiklikler yerine, eşdeğer devre tabanlı bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı, sadece kapasitans ayarlamaları kullanarak rezonans frekansını uyumlama çabasına dayanmaktadır. Antenlerin eşdeğer devre modelleri AWR yazılımı ile yapılandırılmış ve doğrulanmıştır. Tam dalga analizleri, CST yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yeni tasarım stratejisi, iki farklı anten yapısı üzerinde uygulanmıştır. Bunlardan ilki, 2,45 GHz (Wi-Fi), 3,6 GHz (Wi-Max ve 5G), 5,4 GHz (WLAN ve 5G) frekansları için FR4 alttabaka kullanılarak üretilmiş, ikincisi ise 5G için öngörülen 6,5 GHz ve 25 GHz frekansları için esnek malzeme olan kapton alt tabaka kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca, kapton alt tabaka ile tasarlanan esnek yeniden yapılandırılabilir antenin, benzetim ortamında farklı açılardaki bükülmesinin etkisi incelenmiştir.

Bulgular: Önerilen tasarım, çeşitli frekansların kullanılmasının doğası nedeniyle oluşan empedans uyumsuzluğu sorununu çözmektedir. Sürdürülebilir bir tasarım stratejisi sağlamak için önemli ölçüde azaltılmış rezonans frekansı uyumlama çabasıyla, anten için tam bir eşdeğer devre modeli bildiğimiz kadarıyla literatürde ilk kez bu tez çalışması ile oluşturulmuş ve bu model hem esnek hem de esnek olmayan anten yapıları için şönt kapasitansları vasıtasıyla uyarlanabilmiştir.

Sonuç: Tasarımı yapılan frekansı yeniden yapılandırılabilir antenler için eşdeğer devre tabanlı yaklaşım metodolojisinin esnek ve esnek olmayan alt tabakalarda ve farklı frekanslarda uygulanabilir olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: AWR, CST, esnek anten, eşdeğer devre tabanlı model, IoT, yeniden yapılandırılabilir anten, 5G

Ağustos 2020, 77 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

DESIGN OF RECONFIGURABLE ANTENNAS FOR 5G AND IoT APPLICATIONS BY USING AN EQUIVALENT CIRCUIT APPROACH

Hilal KOÇ POLAT

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU

Purpose: In this thesis, it is aimed to model the frequency reconfigurable patch antennas which have an important place in 5G and IoT applications with an equivalent circuit-based design approach and to demonstrate the applicability of this model to flexible reconfigurable antennas.

Method: The proposed reconfigurable antenna design bases its tuning effort on using only capacitance adjustments instead of several structural changes which have been used by intuitive approaches in the literature. The new design strategy has been implemented on two different antenna structures. The first of these has been produced for 2.45 GHz (Wi-Fi), 3.6 GHz (Wi-Max and 5G), 5.4 GHz (WLAN and 5G) using FR4 substrate. The second one has been designed for 6.5 GHz and 25 GHz frequencies intended for 5G using Kapton substrate which is a flexible material. The complete equivalent circuit model of the proposed antennas are configured and validated through AWR software. Full wave analysis of the proposed antennas are performed using CST software. In addition, the effect of bending at different angles in the simulation environment has been investigated for the flexible reconfigurable antenna designed with the Kapton substrate.

Findings: The proposed design solves the problem of impedance mismatch caused due to integration of several frequencies into one single structure. As to our knowledge, the complete equivalent circuit model for reconfigurable antenna design with minimum tuning effort has been created by this thesis for the first time in the literature. This model can be adapted for both flexible and rigid antenna structures by means of shunt capacitances.

Results: It has been revealed that the equivalent circuit approach methodology is applicable for flexible and rigid substrates at different frequencies with the reconfigurable antennas designed.

Keywords: AWR, CST, equivalent circuit model, flexible antenna, IoT, reconfigurable antenna, 5G

August 2020, 77 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
Kablosuz Haberleşmenin Evrimi	1
Giyilebilir Anten Teknolojisi	4
Yeniden Yapılandırılabilir Antenler	6
Motivasyon.....	10
Çalışmanın Hedefleri ve Literatüre Katkısı	10
KURAMSAL TEMELLER.....	12
Anten Temelleri ve Elektromanyetik Işıma	12
Anten Çeşitleri	13
Mikroşerit yama anten.....	14
Anten Parametreleri	16
Anten empedansı.....	16
Geri dönüş kaybı	17
Bant genişliği	18
Yönelim, kazanç ve ışın genişliği	19
Verimlilik ve kalite faktörü.....	20
Işıma örüntüsü.....	21
Anten polarizasyonu.....	22
MATERYAL VE METOT	24
İletim Hattı Modeli.....	24
Çeyrek Dalga Dönüştürücü Tekniği ile Empedans Uyumlama	26
Mikroşerit Yama Antenin Eşdeğer Devresi	27
Mikroşerit Süreksizlikleri	28

Serigrafi Tekniği	34
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	36
Mikroşerit Anten Tasarımları ve Üretimi	36
Mikroşerit antenler için tam dalga modeli	36
Mikroşerit antenlerin benzetim sonuçlarının karşılaştırmalı incelenmesi	38
SEM analizi	41
Mikroşerit antenlerin ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı incelenmesi	43
Yeniden Yapılandırılabilir Mikroşerit Yama Anteni Tasarımı	44
Yeniden yapılandırılabilir mikroşerit yama anteni için tam dalga modeli	45
Yeniden yapılandırılabilir mikroşerit yama anteni için eşdeğer devre modeli	46
Yeniden yapılandırılabilir mikroşerit yama anten için elektromanyetik model, yaklaşık eşdeğer devre modeli çözümlü ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	51
Yeniden yapılandırılabilir mikroşerit yama antenine ait diğer anten parametrelerinin CST benzetim sonuçları	54
Yeniden Yapılandırılabilir Esnek Mikroşerit Yama Anteni	56
Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anten için tam dalga modeli	56
Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anteni için eşdeğer devre modeli	58
Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anteni için elektromanyetik model ve yaklaşık eşdeğer devre modeli çözümlü sonuçlarının karşılaştırılması	61
Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama antenine ait diğer anten parametrelerinin CST benzetim sonuçları	62
Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anteni için bükülmenin etkileri	63
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	72
ÖZ GEÇMİŞ	78

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Mikroşerit yama antenleri için yama boyutları	37
Tablo 2. Benzetimi ve üretimi yapılan antenlere ait sonuçlar	44
Tablo 3. Önerilen antenin boyutları	46
Tablo 4. Toplu elemanların detaylı değerleri.....	49
Tablo 5. Önerilen antenin çalışma modları.....	50
Tablo 6. Önerilen anten için CST benzetim sonuçları.....	56
Tablo 7. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin elektriksel boyutları.....	57
Tablo 8. Yeniden yapılandırılabilir esnek antende yer alan toplu elemanların detaylı değerleri	60
Tablo 9. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin çalışma modları	60
Tablo 10. Yeniden yapılandırılabilir esnek anten için benzetim sonuçları.....	62
Tablo 11. Farklı açılardaki bükülmeler için elde edilen benzetim sonuçları	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kablosuz haberleşme sistemleri için frekans tahsisi	2
Şekil 2. Bazı ülkelerin 5G haberleşme sistemleri için frekans tahsisi.....	3
Şekil 3. (a) Bir indüktör enerjii depolayan reaktif bir alan oluşturur, (b) ikinci bir indüktör eklenmesi, metalik temas olmayan bir yüke enerji aktarmak için reaktif alanı kullanır	12
Şekil 4. Yayılan elektromanyetik alanlar	13
Şekil 5. Mikroşerit yama antenin fiziksel yapısı.	14
Şekil 6. Sonunda Z_a yük bulunan karakteristik Z_0 empedansına sahip iletim hattı.....	17
Şekil 7. İki kapılı ağ S parametreleri	18
Şekil 8. Antene iletilen güç, yayılan güç	20
Şekil 9. Açığa karşı- Normalize kazancın kutupsal ve normal çizimleri.	20
Şekil 10. Mikroşerit yama antenin 3B ışımaya diyagramı.....	22
Şekil 11. Dikdörtgen mikroşerit yama antenin etkin uzunlukları: (a) üst görünüş, (b) yan görünüş.....	24
Şekil 12. Mikroşerit anten ve eşdeğer devresi; (a) Mikroşerit hat beslemeli mikroşerit yama anteni, (b) Mikroşerit yama eşdeğeri, (c) Mikroşerit hat besleme eşdeğeri.....	28
Şekil 13. Mikroşerit basamak süreksizliği ve eşdeğer devresi	28
Şekil 14. Mikroşerit dirsek süreksizliği ve eşdeğer devresi	30
Şekil 15. Mikroşerit boşluk geçiş süreksizliği ve eşdeğer devresi	31
Şekil 16. Mikroşerit iletim hattındaki boşluğun analitik konfigürasyonu.....	32
Şekil 17. Serigrafik tekniği ile desen aktarma.....	34
Şekil 18. 4,65 GHz’de tasarımı yapılan düzlemsel mikroşerit yama anteni geometrisi, (a) Kapton alt tabaka-gümüş yama, (b) FR4 alt tabaka-bakır tabaka	37
Şekil 19. Farklı malzemelere ait 4,65 GHz de üretilen düzlemsel antenlerin görselleri, (a) FR4 alt tabaka- bakır yama antenin üst ve alt görünüşleri, (b) Kapton alt tabaka- bakır yama antenin yan, üst ve alt görünüşleri, (c) Kapton alt tabaka-gümüş macun yama antenin üst ve alt görünüşleri	37
Şekil 20. Benzetim ortamında farklı malzemelere ait antenlerin yansıma katsayıları (S11) ...	38
Şekil 21. Benzetim ortamında farklı antenlere ait 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) FR4-bakır yama, (b) Kapton-gümüş yama, (c) Kapton-bakır yama	39
Şekil 22. Farklı kapton alt tabaka kalınlıkları (h) ile benzetimi yapılan antenlerin yansıma katsayıları	40

Şekil 23. Benzetim ortamında farklı h değerlerine sahip antenlerin 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) $h=0,125\text{mm}$, (b) $h=0,25\text{mm}$, (c) $h=0,5\text{mm}$, (d) $h=1,0\text{mm}$	40
Şekil 24. Farklı sinterleme sıcaklıkları ile üretilen antenlerin ölçülen yansımaya katsayıları (S11).....	41
Şekil 25. Farklı sinterleme sıcaklıklarında gümüş macununun FE-SEM görüntüleri; (a) 120°C , (b) 150°C , (c) 200°C ,.....	42
Şekil 26. Farklı malzemeler ile üretilen antenlerin ölçülen yansımaya katsayıları (S11).....	44
Şekil 27. Yeniden yapılandırılabilir antenin geometrisi.....	46
Şekil 28. Süreksizlikler ve empedans eşleştirme kapasitansları ile birlikte sunulan önerilen anten yapısı	47
Şekil 29. Önerilen anten için eşdeğer devre modeli	48
Şekil 30. Değişken C_{mnek} kapasitörlerine ait yansımaya katsayıları grafikleri; (a) Antenin Mode-2 durumu ($C_{12ek}=C_{13ek}=C_{14ek}=C1=1,25$), (b) Antenin Mode-3 durumu ($C_{12ek}=C_{13ek}=C_{14ek}=C2=6\text{pF}$ and $C_{45ek}=C_{36ek}=C_{27ek}=C1=3,4\text{pF}$).....	50
Şekil 31. Üretilen yeniden yapılandırılabilir antenin görüntüsü; (a) önden görünüm, (b) yandan görünüm, (c) arkadan görünüm	51
Şekil 32. Yansımaya katsayıları ölçüm sistemi.....	52
Şekil 33. Farklı çalışma bantları için AWR ve CST'de simüle edilmiş ve ölçülen yansımaya katsayıları; (a) Mod-1,.....	52
Şekil 34. Tasarımı yapılan yeniden yapılandırılabilir anten için VSWR	54
Şekil 35. Tasarımı yapılan antenin farklı çalışma bantları için elektrik alan dağılımı; (a) Mod-1, (b) Mod-2, (c) Mod-3	54
Şekil 36. Tasarımı yapılan antenin farklı çalışma 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) Mod-1 (b) Mod-2, (c) Mod-3	55
Şekil 37. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin geometrisi.....	57
Şekil 38. Süreksizlikler ve empedans eşleştirme kapasitansları ile birlikte sunulan yeniden yapılandırılabilir esnek anten yapısı	58
Şekil 39. Yeniden yapılandırılabilir esnek anten için eşdeğer devre modeli	59
Şekil 40. Değişken C_{mnek} kapasitörlerine ait yansımaya katsayıları grafikleri ($C_{12ek}=C_{13ek}=C_{14ek}=C1=1,6$ ve $C_{12b}=C_{13b}=C_{14b}=C2=1$).....	61
Şekil 41. Farklı çalışma bantları için AWR ve CST'de simüle edilmiş yansımaya katsayıları; (a) Mod-1, (b) Mod-2.....	61
Şekil 42. Yeniden yapılandırılabilir esnek anten için VSWR	63
Şekil 43. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı çalışma 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) Mod-1, (b) Mod-2	63

Şekil 44. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı derecelerdeki bükülmeleri için Mod-1 durumunda yansıma katsayıları; (a) yukarı yönlü bükülme (b) aşağı yönlü bükülme.....	64
Şekil 45. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı derecelerdeki bükülmeleri için Mod-2 durumunda yansıma katsayıları; (a) yukarı yönlü bükülme (b) aşağı yönlü bükülme.....	65
Şekil 46. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı derecelerdeki bükülmeleri için Mod-1 durumunda 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) yukarı yönlü bükülme (b) aşağı yönlü bükülme.....	66
Şekil 47. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı derecelerdeki bükülmeleri için Mod-2 durumunda 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) yukarı yönlü bükülme (b) aşağı yönlü bükülme.....	67

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

BW	: Bandwidth (Bant Genişliği)
CDMA	: Code Division Multiple Access (Kod Bölme Çoklu Erişim)
CDMA2000	: 3G mobil teknoloji standardı
CST	: Computer Science Technology (Anten Tasarım Programı)
dB	: Decibel (Desibel)
dBi	: İzotropik kaynağa göre desibel
EDGE	: Enhanced Data rates for GSM Evolution (GSM Evrimi için Geliştirilmiş Veri Hızı)
EDX	: Energy Dispersive X-Ray Analysis (Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi)
FDMA	: Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölme Çoklu Erişim)
FE-SEM	: Field Emission Scanning Electron Microscopy (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu)
FM	: Frequency Modulation (Frekans Modülasyonu)
Gbit	: Gigabit
GHz	: Gigahertz
GSM	: Global System for Mobile Communication (Mobil İletişim için Küresel Sistem)
GPRS	: General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Servisi)
IMT	: International Mobile Telecommunications (Uluslararası Mobil Telekomünikasyon)
IMT-2000	: International Mobile Telecommunication-2000
IoT	: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
ITU	: International Telecommunication Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)
Kbps	: Kilobit per second (Saniye Başına İndirilen Kilobit Oranı)
KHz	: Kilohertz
LTE	: Long Term Evolution (Uzun Vadeli Evrim)
LTE-A	: Long Term Evolution-Advanced (Gelişmiş Uzun Vadeli Evrim)
mm	: Milimeter (Milimetre)
Mbit	: Megabit
MHz	: Mega Hertz
MIMO	: Multiple Input Multiple Output (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış)
M2M	: Machine to Machine (Makineden Makineye İletişim)
nH	: Nanohenry
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Dik Frekans Bölme Çoklu Erişimi)
OSI	: Open System Interconnection (Açık Sistemler Arabağlaşımı)
QoS	: Quality of Service (Hizmet Kalitesi)
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying (Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
RL	: Return Loss (Geri Dönüş Kaybı)
TDMA	: Time Division Multiple Access (Zaman Bölme Çoklu Erişim)
PCB	: Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
pF	: Pikofarad
SC-FDMA	: Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (Tek Taşıyıcılı- Frekans Bölme Çoklu Erişim)
SDMA	: Spread Spectrum Multiple Access (Yayıllı Spektrumla Çoklu Erişim)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)
sn	: Saniye
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System (Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi)

VLAN	: Virtual Local Area Network (Sanal Yerel Alan Ağı)
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio (Duran Dalga Oranı)
W-CDMA	: Wideband Code Division Multiple Access (Genişband Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
WiFi	: Wireless Fidelity (Kablosuz Bağlantı Alanı)
WiMax	: Worldwide Interoperability for Microwave Access (Dünya Çapında Birlikte İşleyen Mikrodalga Erişimi)
1G	: First Generation (Birinci nesil)
16QAM	: 16 Quadrature Amplitude Modulation (Karesel Genlik Modülasyonu)
2G	: Second Generation (İkinci nesil)
2.5G	: İki buçuğuncu nesil
2.75G	: İki tam üç çeyreğici nesil
3B	: Üç boyutlu
3G	: Third Generation (Üçüncü Nesil)
4G	: Fourth Generation (Dördüncü Nesil)
5G	: Fifth Generation (Beşinci nesil)
64QAM	: 64 Quadrature Amplitude Modulation (Karesel Genlik Modülasyonu)
<i>B</i>	: Manyetik akı yoğunluğu
<i>C</i>	: Kondansatör
<i>C_{mnek}</i>	: Şönt boşluk kapasitesine paralel bağlanan kondansatör
<i>D</i>	: Elektrik akı yoğunluğu
<i>D_{max}</i>	:Yönlülük kazancının maksimum değeri
<i>D(θ, φ)</i>	: Yönlülük kazancı
<i>d</i>	: Mikroşerit yamanın boyu
<i>d_f</i>	: Mikroşerit besleme hattının boyu
<i>d_g</i>	: Mikroşerit yama antenine ait alt tabakanın boyu
<i>E</i>	: Elektrik alan vektörü
<i>f</i>	: Frekans
<i>f_r</i>	: Rezonans frekansı
<i>L</i>	: Bobin
<i>h</i>	: Mikroşerit yama antenine ait alt tabakanın kalınlığı
<i>G(θ, φ)</i>	: Güç kazancı
<i>H</i>	: Manyetik alan vektörü
<i>J</i>	: Elektrik akım yoğunluğu
<i>P_{in}</i>	: Giriş gücü
<i>P_R</i>	: Antenden geri yansıyan güç
<i>P_{rad}</i>	: Antenden yayılan güç
<i>P_T</i>	: Anten terminallerine verilen toplam güç
<i>Q</i>	: Kalite faktörü
<i>Q_c</i>	: İletim kayıpları nedeniyle kalite faktörü
<i>Q_d</i>	: Dielektrik kayıplara bağlı kalite faktörü
<i>Q_{sw}</i>	: Yüzey dalgaları nedeniyle kalite faktörü
<i>Q_t</i>	: Toplam kalite faktörü
<i>R</i>	: Direnç
<i>R_{in}</i>	: Yayılım direnci
<i>R_L</i>	: Return Loss
<i>t</i>	: Mikroşerit yamanın kalınlığı
<i>tan δ</i>	: Kayıp faktörü
<i>U_I</i>	: İzotropik yoğunluk
<i>U_{max}</i>	: Maksimum radyasyon yoğunluğu
<i>U(θ, φ)</i>	: Işıma yoğunluğu

V^-	: Yansıtılan gerilim genliği
V^+	: İleri gerilim genliği
W	: Mikroşerit yamanın genişliği
W_0	: Mikroşerit besleme hattının genişliği
W_g	: Mikroşerit yama antenine ait alt tabakanın genişliği
X_{in}	: Anten reaktansı
y_0	: Anten besleme noktasının konumu
Z_0	: Mikroşerit besleme hattının empedansı
Z_a	: Anten yamasının empedansı
Z_{in}	: Anten giriş empedansı
ϵ_0	: Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
ϵ_r	: Malzemenin elektriksel geçirgenliği
ϵ_{reff}	: Malzemenin etkin elektriksel geçirgenliği
μ_0	: Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
v_0	: Işığın boşluktaki hızı
ρ	: Hacimsel yük yoğunluğu
λ	: Dalga boyu
λ_0	: Serbest uzayın dalga boyu
Γ	: Yansıma katsayısı
Ω	: Direncin birimi
$^\circ C$: Santigrad derece
$^\circ F$: Fahrenheit derece

GİRİŞ

Kablosuz Haberleşmenin Evrimi

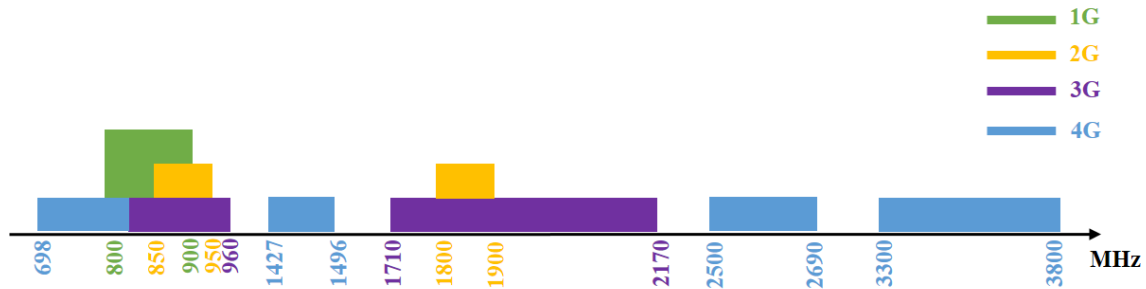
Kablosuz iletişim teknolojisi, son zamanlarda iletişim sistemlerinde dünyadaki önemli araştırma alanlarından biridir. Kablosuz iletişim ağları ve hücrel kavram ilk olarak 1960'larda ve 1970'lerde geliştirildiğinden beri herkesin hayal edebileceğinden çok daha yaygın hale geldi. Kablosuz iletişimde kullanıcıların artan ihtiyaçlarını karşılamak hücrel ağın hızlı büyümesini gerektirmektedir (Patil *et al.* 2012) .

İlk nesil hücrel telefon sistemi (1G), 1980'lerin başında, devre anahtarlmalı ağı sahip analog teknolojiye dayanarak tanıtıldı. 1G mobil sistem sadece frekans modülasyonu (FM) ve Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA) teknikleri kullanılarak ses iletimi için kullanılmıştır. Bu ilk iletişim teknolojilerinde kullanılan antenler, cihazdan çıkıntı yapan tek bant, geniş kamçı biçimli monopollerdi (Arnold 2015). Çalışma frekansları ~800-900 MHz arasındaydı ve kanal kapasitesi 30 kHz ile sınırlıydı (Arshad *et al.* 2019). Veri iletimi yetersizdir ve düşük veri hızına sahiptir. Analog sistemlere dayandığı için veri iletimi güvenli değildir (Patil *et al.* 2012).

1990'larda, ses ve veri gibi hizmetleri bir arada sunan mobil cihazlar için küresel sistem (GSM) standardını kullanan ikinci nesil (2G) cep telefonu sistemleri ortaya çıktı. Daha sonra veri hızının ~150 Kbps'a kadar artırıldığı 2.5G olarak da bilinen genel paket radyo seviyesi (GPRS) geliştirildi. 2.5G'den sonra, GSM evrimi için geliştirilmiş veri hızı (EDGE) olarak bilinen teknoloji 2G şemsiyesi altında tanıtıldı. 2.75G olarak bilinen bu teknoloji ile maksimum veri hızı ~384 Kbps'a yükseltildi (Arshad *et al.* 2019). Bu 2G telefon sistemleri, analog iletim yerine dijital iletim kullanımı ile önceki nesilden farklıdır. 2G için zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) ve kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) teknikleri kullanılmaktadır. Spektrum verimliliğindeki artış nedeniyle 1G analog sistemlere kıyasla sistem kapasitesi üç kat daha fazladır (Patil *et al.* 2012). 2G sistemleri, dijital sinyallerin kullanımı nedeniyle daha az pil gücü tüketir ve mobil pillerin uzun süre dayanmasına yardımcı olur. 2G teknolojisinin kullanımı, cep telefonlarının çalışmasına yardımcı olmak için güçlü dijital sinyaller gerektirir. Belirli bir alanda şebeke kapsama alanı yoksa dijital sinyaller zayıf olacaktır (Bhalla and Bhalla 2010). 2G hücrel telefonlarda antenler, hala harici olarak tek bant kamçı biçimli monopollerdi. Bununla birlikte bazı üreticiler cihazlara dahili entegre antenler uygulayarak kapaklı telefonlar gibi alternatif şekillere geçiş yapmaya başladı (Arnold 2015).

2G sistemlerde veri kapasitesinin sınırlı olması sorunundan dolayı üçüncü nesil (3G) doğdu. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği tarafından IMT-2000 standardının yayınlanmasıyla, birkaç Mbps'lik indirme yönü veri hızlarına ulaşılmaya başlandı (Matalgah and Hammouri 2007). Yüksek hızlı internet erişimi, yüksek kaliteli video ve ses akışı sağlayan UMTS (W-CDMA), WiMax ve CDMA2000 gibi sistemler 3G mobil iletişimin örnekleridir (Cihangir 2014). 3G mobil cihazlarda dahili olarak entegre edilen antenler kullanıldı. Bu antenlerin birden fazla çalışma frekansını, daha yüksek bant genişliği ile desteklemesi gerekir; bu da daha karmaşık tasarımlar ve geometriler gerektirir (Arnold 2015).

3G iletişim sistemlerinin ardından, hücresel iletişim sistemlerinin dördüncü nesli (4G) olarak kabul edilen Gelişmiş Uzun Vadeli Evrim (LTE-A) standardı ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji ile QPSK, 16QAM ve 64QAM modülasyon şemaları düşük hareket kabiliyeti olan bir kullanıcı için indirme yönünde 1Gbps'ye (yüksek hareketlilik için 100Mbit/sn) kadar ve çıkış yönü bağlantı için 500Mbps'ye kadar pik veri hızları elde etmek için kullanılır. OFDMA indirme bağlantısında çoklu erişim için kullanılırken, SC-FDMA çıkış bağlantısı için kullanılır. En yüksek veri hızlarına ulaşmak için çoklu anten sistemlerinden faydalanılması da mümkündür. 4G mobil terminal, eski 3G bantlarında geriye dönük uyumlu olarak çalışabilmelidir, çünkü kullanıcının bulunduğu her yerde 4G baz istasyonu bulunmama riski vardır (Cihangir 2014). Şekil 1'de, 1G'den 4G'ye kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan frekans bantlarının dağılımı gösterilmektedir.



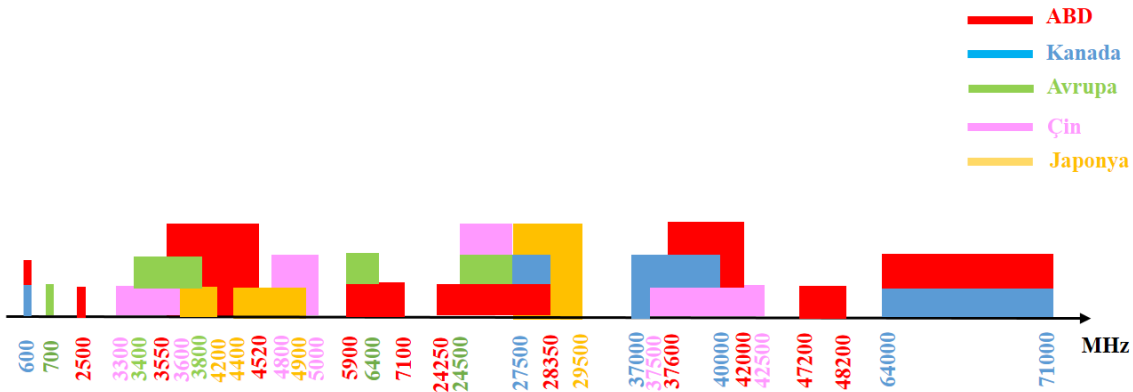
Şekil 1. Kablosuz haberleşme sistemleri için frekans tahsisi

4G birden fazla cihaz bağlantısı ve yüksek veri hızı, daha fazla bant genişliği, düşük gecikme süreli hizmet kalitesi (QoS) ve düşük parazit gereksinimlerini karşılamak için yeterli ve verimli değildir. Bu zorlukları aşmak için beşinci nesil (5G) umut verici bir teknolojidir ve kablosuz teknolojide büyük bir devrim yaratması beklenmektedir (Chettri and Bera 2019). 5G mobil ağ, özellikle önceki hücresel standartların sınırlamalarını ele almayı ve gelecekteki Nesnelerin İnterneti (IoT) için potansiyel bir sağlayıcı olmayı amaçlamaktadır (Akpakwu *et al.* 2017; Popoola *et al.* 2017; Chettri and Bera 2019; Dragičević *et al.* 2019). IoT insan müdahalesi olmadan heterojen cihazlar arasında makine-makine (M2M) iletişimini mümkün kılar (Wortmann and Flüchter 2015; Al-Falahy and Alani 2017). Ev ekipmanlarından günlük

tüketici cihazlarına kablosuz olarak tüm şeyleri birbirine bağlayarak 5G ağlarının tam olarak devreye alınmasıyla etkinleştirilmesi öngörülen IoT teknolojisi tüketici elektroniği, bina güvenliği ve otomasyondaki uygulamalar için ana sağlayıcı olacaktır. Tüketici elektroniği segmentinin önemli bir kısmının ise giyilebilir teknoloji uygulamalarının olması öngörülmektedir.

5G ile hedeflenen, halihazırda kullanımda olan diğer frekansları da entegre edecek bir çözüm oluşturmaktır. Dolayısıyla frekans aralıkları oldukça geniş düşünülmekte ve şu anda kullanımda olan frekanslar ele alınarak bir çözüm oluşturulmaya çalışılmaktadır. ITU (International Telecommunication Union) tarafından yürütülmekte olan ve 2019 yapılan Avrupa 5G gözlemevi toplantısında şekillenen 5G standartları (Uluslararası mobil telekomünikasyonu-IMT) şu anda kullanılan 4G frekanslarını da kapsamaktadır. ITU, düşük (<3 GHz), orta (3-6 GHz) ve yüksek (>6 GHz) frekansların hepsinde çalışacak bir standart oluşturma düşüncesindedir.

Bilinen mikrodalga frekansları ile birlikte milimetre dalga boyu ve Terahertz frekanslarını 5G haberleşme sistemleri için standart frekanslar olarak kullanmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Şekil 2’de bazı ülkelerin 5G planlamasında tahsis ettikleri frekanslar sunulmuştur. Şekil incelendiğinde 24 GHz’in üzerindeki (24-28 GHz, 37-40 GHz ve 64-71 GHz) frekanslar ile birlikte daha düşük frekansların da (600-700MHz, 3,5-3,7 GHz, 4,4-4,9 GHz, 4,8-5 GHz, 5,9-7,1 GHz) kullanımı öngörülmektedir (Geyikoğlu *et al.* 2020; Pujol *et al.* 2019).



Şekil 2. Bazı ülkelerin 5G haberleşme sistemleri için frekans tahsisi

Yüksek frekanslara çıkıldıkça birçok sorunla karşılaşılması öngörülmekle beraber, kısa mesafeli haberleşmenin getireceği bir avantaj ise aynı frekansın farklı hücrelerde tekrar kullanılabilir olmasıdır. Picocell ve femtocell gibi küçük ölçekli hücrelerin kullanılabilirliği bu yaklaşımda öngörülen engellerden bazılarının anten tasarımlarıyla aşılabileceği düşünülmektedir (Feng *et al.* 2016; Ghosh *et al.* 2018).

Geliştirilecek olan 5G şebekelerinin başarıyla devreye sokulması etkili anten dizisi tasarımına bağlıdır. Milimetre dalga yayılımı küçük radyo dalga boyları ve küçük anten boyutlarını gerektirir (Hong *et al.* 2017). Bu, çok sayıda daha küçük boyutlu antenlerin kullanılmasını zorunlu kılar. Dizi antenleri kullanarak sinyalin faz ve genliğinin kontrol edilmesi, elektromanyetik dalgaların arzulanan yönde güçlenmesine yardımcı olurken diğer bütün yönlerde bu dalgalar iptal edilir. Çok yönlü radyasyon kalıpları, Uzamsal Bölmeli Çoklu Erişim (SDMA) ile sonuçlanan uyarlamalı hüzmeye oluşturma teknikleri kullanılarak sabitlenebilir, SDMA yeteneklerini gerçekleştirmek için çok ışınlı akıllı anten dizisi sistemi kullanılmalıdır (Agiwal *et al.* 2016). Her biri 100'den fazla anten elemanı içeren masif eleman antenlerinin uygulanması ise 5G anten teknolojisi olarak incelenmiştir. Çoklu giriş çoklu çıkış aktarım kullanan masif elemanlı antenler Masif MIMO olarak adlandırılır. Masif MIMO'da çok sayıda elemana sahip olan antenin uygun bir şekilde kontrol edilmesi ile antenin yönelimi ve ışınma paterni değiştirilebilir, ayrıca kullanıcıları eş zamanlı olarak bağlayan kullanıcı çoklama yoluyla yüksek frekanslı bant hücresinin sistem kapasitesi artırabilir (Suyama *et al.* 2016).

5G teknolojisi, farklı uygulamalar için birkaç frekans bandında çalışabilen antenler gerektirir. Farklı frekans ve yönlerde birden fazla antenin kullanılması sistemin fiziksel olarak işgal edilmesine yol açar. Dolayısıyla, bir entegre anten yapısında birden fazla frekansa sahip olmak istenmektedir. Bu nedenle, son yıllarda, birçok antenin işlevlerini tek bir yayıcı yapıya entegre eden yeniden yapılandırılabilir anten tasarımları oldukça popüler hale gelmiştir (López 2013).

Giyilebilir Anten Teknolojisi

Giyilebilir teknoloji, bir kişi tarafından giyilebilen ve birbirleriyle doğrudan veya gömülü hücreli bağlantı yoluyla bağlanma yeteneğine sahip cihazları kapsamaktadır (Virili *et al.* 2014). Kullanıcılar, akıllı telefonların tek başına başaramayacakları şekilde yaşam kalitesini yükseltmeyi vaat eden bir mobil cihazı pratik olarak giymeye, giderek daha fazla ilgi göstermektedirler (Seneviratne *et al.* 2017). Giyilebilir cihazların günlük yaşamımızda akıllı saatler, artırılmış gerçeklik gözlükleri ve aynı zamanda birçok medikal ve spor uygulamalarını da kapsayan çeşitli uygulamaları vardır (Sabban 2019). Giyilebilir cihazlar pil, sensörler ve anten gibi diğer bileşenlerle birlikte çalışan kablosuz modüller aracılığıyla harici cihazlarla iletişim kurarlar. Giyilebilir cihazlardaki en önemli bileşenlerden biri olan antenler, giyilebilir kablosuz bağlantının genel verimliliğine katkıda bulunur. Bu antenlerin insan vücudunun farklı bölümlerinde kullanıldıklarında vücut ile uyumlu olması gerekir, bu nedenle esnek malzemeler kullanılarak düşük profilli bir yapıda tasarlanması gerekir. Sonuçta, bu

antenlerin insan vücudunun yakınında minimum bozulma ile çalışabilmesi gerekir. Giyilebilir antenlerdeki yeniden yapılandırılabilirlik özelliği, zayıflama kayıplarıyla mücadele etme, kanal parazitini azaltma ve polarizasyon varyasyonlarıyla mücadele etme yeteneği sağlar. Asıl zorluk, baz devreleri olmadan minimum devre yapısı ile yeniden ayarlanabilirlik sağlamaktır ve daha da önemlisi, insan vücuduna yakın yerleştirilmesinin antende yol açtığı frekans kaymasının etkisini azaltmaktır (Paracha *et al.* 2019).

Tekstil yama anteninin performansı bükülme etkisi altında incelenmelidir (Ferreira *et al.* 2017). Mikroşerit yama antenlerinde, yapı düzlemsel yüzeyden silindirik bir yüzeye dönüştürüldüğünde, anten geometrisi (esas olarak genişlik) dairesel olarak kutuplanmayı muhafaza etmek için ayarlanmalıdır. Bunun nedeni ise bükülmenin temelde antenin genişliğini etkilemesidir (Maimaiti and Baktur 2013). Elrashidi ve arkadaşlarının 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada; üç farklı alttaş malzemesi (RT/duroid-5880 PTFE, K-6098 Teflon/Glass ve Epsilam-10 ceramic-filled Teflon) kullanılarak düzlemsel ve farklı yarıçaplara sahip silindirik gövde üzerine basılan bir mikroşerit antenin TM_{01} modu (Elrashidi *et al.* 2011) ve TM_{10} modu (Elrashidi *et al.* 2011) için rezonans frekansı, kalite faktörü (Q), verimlilik ve kazanç (G) parametreleri karşılaştırılmış ve yarıçap arttıkça rezonans frekansının ve kalite faktörünün neredeyse değişmediği, verim ve kazancın azaldığı görülmüştür. Chauhan ve Negi'nin 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada ise FR4 alttaş kullanılarak tasarlanan düzlemsel ve silindirik yapı üzerine basılan E ve U tipi mikroşerit yama anteninin geri dönüş kaybı, rezonans frekansı, yönlülük, kazanç ve ışınım örüntüsü parametreleri incelendiğinde; konformal antenin rezonans frekansının düzlemsel antene göre nispeten arttığı bildirilmiştir (Chauhan and Negi 2016).

Giyilebilir antenler farklı türde iletkenler ve dielektrik malzemeler kullanılarak tasarlanmaktadır. Antenin değişken şekilli bir yapı üzerinde kullanılması planlanıyorsa, anten alt tabakası şekle uyacak şekilde üretilir (Josefsson and Persson 2006) veya esnek malzemelerden üretilen esnek alt tabaka kullanılır (Koç *et al.* 2018; Polat *et al.* 2019). Bu malzemeler, farklı hava koşullarına (yağmur, kar, buz, vb.) ve uygun EM radyasyon korumasına bağlı olarak minimum etki ile makul ölçüde mekanik deformasyon (bükme, bükme ve sarma) sağlamak için dikkatle seçilir (Paracha *et al.* 2019). Giyilebilir antenlerde alt tabaka malzemesi olarak kot-denim (Grilo *et al.* 2016; Silva Jr *et al.* 2016), aramid kumaş (Hertleer *et al.* 2010) yapılarının yanısıra FlecTron olarak bilinen köpük malzeme (Hertleer *et al.* 2010) ve likit kristal polimer (Abbasi *et al.* 2013) bazlı malzemelerin kullanımı da tercih edilebilir. Esnek antenler için iletken yama kısmının kalın olması tercih edilirken alt tabakanın kalınlığı sabit olmalıdır. Ayrıca iletken malzemenin düşük geçirgenlik (ϵ_r) ve düşük kayıp

tanjantına ($\tan \delta$) sahip olması istenir. Elektro-tekstil antenin, nispeten daha düşük iletkenliği nedeniyle bakır muadili ile karşılaştırıldığında daha az kazanç, verimlilik ve bant genişliğine sahip olduğu bilinmektedir (Paracha *et al.* 2019). Örneğin Loader ve arkadaşlarının 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada, tavlanmış bakırdan üretilen antenlere kıyasla, gümüş kaplı alüminyum veya nikel kaplı grafitli elastomerlerden oluşan antenler için anten verimliliğinin %75 ila %85 arasında azaldığı göstermişlerdir (Loader and Gregory 2015).

Esnek ve giyilebilir antenlerin üretimi için mevcut birkaç yöntem vardır. Bunlar serigrafi baskı, kimyasal dağlama, fleksografi ve mürekkep püskürtme teknikleridir. Kimyasal dağlama tekniği kullanılarak yüksek karmaşıklığa ve ince detaylara sahip desenler üretilebilse de, uzun süreci, düşük verimi, tehlikeli kimyasalların kullanımı (nötralizasyon gereklidir), yan ürünlere ve atıklara ek olarak temiz oda gereksinimi vardır. Serigrafi, kimyasal dağlama işleminin aksine, daha az maliyetli ve çevre dostu bir işlemdir. Bununla birlikte, bu teknikle ilişkili, basılmış desenlerin kalınlığı, geçiş sayısı ve çözünürlüğü üzerindeki sınırlı kontrol de dahil olmak üzere bazı problemler vardır. Mürekkep püskürtme tekniğinde ise yazdırma işlemleri ve kurulumları kullanıcının bilgisayarından tamamen kontrol edilir ve çevresel kirlilik seviyelerini azaltan temiz oda ortamına ihtiyaç duymaz. Flexografi tekniği nispeten iyi çözünürlüğü, düşük maliyeti ve yüksek verimi sayesinde RFID anten üreticileri tarafından büyük ilgi görmüştür. Ayrıca, bu teknik serigrafi mürekkeplerinden daha düşük bir viskoziteli mürekkep gerektirir ve 2,5 μm 'den daha az kalınlıkta görüntülü (basılı) kuru filmler verir. Bu nedenle, fleksografi mürekkeplerinin, tabaka direncindeki artışı telafi etmek için serigrafi baskıda kullanılanlardan daha yüksek yığın iletkenliğine sahip olması gerekir, çünkü basılı antenlerin verimliliği esas olarak izlenen desenin elektriksel iletkenliğine bağlıdır. Yüzey gözenekliliği, hidrofobiklik ve yüzey enerjisi gibi alt tabaka parametrelerinin, basılı izin mürekkep filmi kalınlığı üzerinde doğrudan etkisi vardır (Khaleel *et al.* 2013).

Yeniden Yapılandırılabilir Antenler

Yeniden yapılandırılabilir anten, farklı kablosuz iletişim teknolojileri ile çeşitli uygulamalar için çalışabilir. Bu nedenle, büyük ve karmaşık bir sistem için, yeniden yapılandırılabilir anten farklı anten ihtiyacını azaltır, böylece mevcut sistemi genel olarak geliştirir. Frekans, radyasyon paterni ve polarizasyonu yeniden yapılandırılabilir olmak üzere farklı türleri bulunmaktadır (López 2013). Yeniden yapılandırılabilir antenlerin, 5G uygulamalarında büyük bir rol alması beklenmektedir.

Bir antenin yeniden yapılandırılması; akımların veya antenin elektromanyetik alanlarının yöneliminin istenilen şekilde yeniden dağıtılması, anten empedansı ve / veya

radasyon özelliklerinde geri dönüşümlü değişikliklerin sonucunda elde edilir (Balanis 2011). Bu değişiklikler için anten yapısı üzerinde değişken özelliklere sahip bir eleman olması gerekir. Anten üzerindeki, ayarlanabilir elektromanyetik özelliklere sahip malzemeler veya anahtarlama elemanları konuşlandırılması yoluyla çoklu bant elde edilebilir. Ayrıca hareketli ve dönebilen antenlerin kullanımı ile yeniden yapılandırılabilirlik sağlanabilir (López 2013). Antenin yaması ya da toprak düzlemi, çoklu bant tepkilerini elde etmek için oluklu yapılar ile tasarlanabilir (Bakariya *et al.* 2014). Antenin yeniden yapılandırılması için yaygın olarak kullanılan mekanizmalar elektrikle (Shah *et al.* 2019), mekanik olarak (Zohur *et al.* 2013) veya optik olarak (Pendharker *et al.* 2014) tetiklenen anahtarlama elemanları içerir. Ullah ve diğerleri 2017 yılında devre elemanları ile 9-şekilli ve Epsilon-şekilli antenlerde yeniden yapılandırma sağlamışlardır (Ullah *et al.* 2017). Ayrıca 2018 yılında direnç elemanının iki farklı değeri için açma-kapama durumlarını oluşturan yapay bir anahtar kullanmışlardır (Ullah *et al.* 2018). Ayarlama özelliği için bir başka yöntem, antenin üzerinde tasarlanan kanallarda sıvı malzemenin hareketinin kullanılmasıyla sağlanır (Song *et al.* 2019). Antenlerde yeniden yapılandırılabilirlik için en çok tercih edilen yapılar aşağıda tek tek ele alınmıştır.

PIN-diyot: PIN diyot AÇIK / KAPALI işlevi ile yüzey akımının dağılımını değiştirerek yayılım yapan yama yapısını değiştirir. Açık durumda; bobin ve ona seri bir direnç, kapalı durumda ise bir kapasitör ile paralelinde bir direnç ve bunlara seri bir bobin eşdeğer devreleri ile temsil edilir (Soares 2015). PIN diyotu, çok yüksek frekansta ve yüksek güç uygulamalarında lineer çalışması nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Diğer taraftan öngerilimleme için büyük DC gerilimine ihtiyaç duyar ve bu gerilim araya girme kaybını azaltır. PIN diyotlarda yalıtım performansı spesifikasyonunu belirlemek için gerekli olan daha verimli besleme devresinin tasarlanması geliştirilmesi gereken unsurlardandır (Kumar *et al.* 2020).

Varaktör diyot: Bu diyot türü dahili kapasitansını 0-30 V aralığındaki öngerilim voltajı ile ters orantılı olarak değiştirerek frekans ayarlama işlemi yapabilmektedir (Floc'h and Trad 2017; Koc Polat *et al.* 2020). Varaktör diyot, hızlı frekans ayarlama özelliği getirir (Ramya and Maheswari 2016). Varaktör diyotu voltaja bağlı kapasitansa sahip olduğu için PIN diyot yerine varaktör diyotları kullanılarak antenin rezonans frekansı ve yöneliminde bir miktar iyileşme gözlemlenebilir (Deo *et al.* 2017).

RF-MEMS anahtarlar: Elektronik entegre devre için fotolitografik tekniklerin bir uzantısıdır. Belli küçük bir noktada birleştirilen iki iletken şeritten oluşur ve iki iletken katman arasındaki mesafe önemli bir kapasitans oluşturur. Bu anahtarlar ihmal edilebilir güç tüketimi, çok yüksek yalıtım, çok düşük araya girme kaybı özellikleriyle PIN ve FET

anahtarlarına kıyasla düşük maliyet sunar ancak aynı zamanda düşük hız, zayıf güç kullanma özelliği, yüksek besleme voltajı, yetersiz güvenilirlik gibi dezavantajlara sahiptir (Kumar *et al.* 2020).

Optik Anahtarlar: PIN diyot ve MEMs'lere kıyasla üstün performansları nedeniyle optik olarak tetiklenen fotodiyotlar yeniden yapılandırılabilir antenlerde tercih edilen elemanlardır (Tawk *et al.* 2011). Optik anahtarlar, öngerilim devresi gerektirmedikleri için anten üzerinde fazla fiziksel yer kaplamazlar (Pang *et al.* 2018). Buna ek olarak, düşük voltaj kullanımı antenin elektromanyetik performansını çok fazla etkilemez ve düşük anahtarlama süresi optik anahtarları çekici hale getirir. Yeniden yapılandırılabilir antenler için optik anahtarlar genellikle yüksek dirençli (6000Ω) silikon yonga plakasından kesilir. Bu malzemeye yeterli enerjiye sahip (yakın kızılötesi aralık) fotonlar gönderildiğinde, elektron çiftleri oluşturur ve yalıtım durumundan yakın iletken duruma geçer. Işık kaynağı kaldırıldığında ise silikon önceki durumuna geri döner. Bu nedenle, anahtarın güvenilirliği ışık kaynağının özelliklerine bağlıdır (Panagamuwa *et al.* 2006). Parton ve arkadaşlarının 2016 yılında optik olarak yeniden yapılandırılabilir antenler için önerdikleri iki farklı yaklaşımdan biri RF PIN diyotlarının anahtarlama kontrolünün fototransistör devreleri tarafından yapılmasıdır. Bir diğer yaklaşım ise anahtarlama fonksiyonunun fotodiyotların ters voltaj altında dahili kapasitansları değiştirilerek gerçekleştirilmesidir (Patron *et al.* 2014). PIN Fotodiyot optik anahtarlama için tercih edilen bir diğer elemandır. Optik olarak tetiklenen anahtarlama devreleri, PIN Fotodiyotlar için temel yapılandırmadır. Çünkü kazanç, gürültü faktörü, sahte serbest dinamik aralık ve frekans yanıtı gibi sistem performanslarını birçok yönden iyileştirme potansiyeline sahiptir. Özellikle frekans tepkisi tüm sistemin bant genişliğini ve yüksek frekanslar için çıkış sinyal gücünü belirlediğinden en önemli faktörlerden biridir. Anahtarlama devresinin frekans yanıtı incelendiğinde, PIN Fotodiyotu aydınlatma altında (açık konum) alçak geçiren filtreye ve karanlıkta (kapalı konum) yüksek geçiren filtreye benzer (HERNANDEZ-FUENTES *et al.* 2018). Optik kontrol için diğer bir yaklaşım, antenin rezonans frekansını değiştirmek için antenin toprak düzlemi alanını Si malzeme ile arttırmaktır (Andy *et al.* 2016).

Sıvı malzemeler: Literatürde çok yönlü ayarlanabilir sistemler oluşturmak için sıvı metallerin, RF ve mikrodalga bileşenlerinde (Morishita 2014; Dey 2016), filtreler, frekans seçici yüzeyler (FSS) (Li and Behdad 2012), rezonatörler (Irshad and Peroulis 2011), anahtarlar (Chen and Peroulis 2007) ve anten uygulamalarında (Morishita *et al.* 2013; Pan 2016) kullanımına rastlanmaktadır. Çoğu konvansiyonel yeniden yapılandırılabilir anten, anahtarların açık kapalı özelliklerinden dolayı sürekli ayarlanabilirliği sağlayamaz. Yeniden

yapılandırılabilir bir anten üretmek için sıvı metal kullanımı, konvansiyonel yeniden yapılandırılabilir antenlere kıyasla önemli performans avantajları vaadeden tamamen yeni bir yaklaşım olarak düşünülebilir. Sıvı metaller kullanılarak yeniden yapılandırılabilir antenler ile geliştirilmiş doğrusallık, sürekli ayarlama imkânı ve daha düşük genel güç kayıpları sağlanabilmektedir (Alqurashi and Kelly 2017). Anten üzerinde sıvı hareketi hava basıncı kontrol edilerek mekanik olarak (So *et al.* 2009; Kim *et al.* 2014) sağlanabildiği gibi elektriksel potansiyel (Wang *et al.* 2015) kullanılarak da sağlanabilir.

Yeniden yapılandırılabilirlik elde etmek için anten üzerinde yapılacak olan değişiklikler, antenlerin rezonans frekansını, çalışma bant genişliğini ve yönelimini değiştirmelerini sağlar. Dolayısıyla mevcut antene yapılan bu eklemeler anten performansını optimize etme ihtiyacına yol açacaktır (Kumar *et al.* 2020). Örneğin Nazir ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları bir çalışmada yamaların arasına yerleştirilen PIN diyotunun konumunu değiştirerek antenin çalışma frekansını optimize etmeye çalışmışlardır (Nazir *et al.* 2016). Ayrıca Singh ve arkadaşları, bir PIN diyot bağlantısı ile ana yamaya başka bir yama ekleyerek antenin elektrik uzunluğunu artırmak suretiyle yama anteninin rezonans frekansını değiştirmişlerdir. Antene bağlantısı yapılan yeni yamanın genişliğini 3mm'den 25mm'ye değiştirerek farklı rezonans frekansları elde etmişlerdir. Ayrıca, PIN diyot konumunun rezonans frekansını etkilediğini gözlemlemişlerdir (Singh *et al.* 2018). Bu çalışmalardan görebileceğimiz gibi, mikroşerit yama antenleri yeniden yapılandırılabilir olacak şekilde tasarlandığında, tasarım bittikten sonra genellikle sezgisel yöntemler ve yaklaşımlar ile büyük bir ayarlama çabası gerektirir.

Mikroşerit yama antenin önemli tasarım aşamalarından biri, antenin besleme tipini ve özelliklerini belirlemektir. Empedans uyumu, anten tasarımında geri dönüş kaybı, verimlilik ve kazanç gibi optimum performans parametrelerini elde etmek için zorlu bir adımdır. Yama beslemesinin uygun şekilde seçilmesiyle iyi bir empedans uyumu elde edilebilir. Tek bir frekansta (örn. çeyrek dalga boyu besleme hattı) empedans uyumu nispeten basittir. Bununla birlikte, her bir frekans için farklı elektriksel uzunluklara sahip olmaları nedeniyle yeniden yapılandırılabilir antenlerde empedans uyumu karşılaşılan zorluklardan biridir. Yeniden yapılandırılabilir antenin elektriksel uzunluğu değişikçe, anten farklı frekanslarda çalışacaktır, bu nedenle tüm çalışma frekanslarında iyi empedans uyumu sağlayan tasarımlar dikkate alınmalıdır (Lee *et al.* 2008). Örneğin 2009 yılında Hsieh ve Row, L-şeklinde bir şeritle beslenen çift bantlı yeniden yapılandırılabilir bir anten önermişlerdir ve bu L-şekilli şeridin uzunluğunu uygun şekilde seçerek iyi bir empedans uyumu elde etmişlerdir (Hsieh and Row 2010).

Motivasyon

Yeniden yapılandırılabilir antenler için farklı frekanslarda anten girişi ve besleme arasında empedans eşleşmesi zordur. Bu problemlerin üstesinden gelmek için literatürde yuva veya yarık yükleme, yamaya ayar saplamaları (çıkıntıları) ekleme vb. gibi sezgisel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar iyi performans gösteren antenlere neden olabilir, ancak yeni senaryolar için küçük değişiklikler yapmak genellikle zordur. Yapıdaki küçük bir değişiklik antenin geçersiz bir tasarım haline gelmesine neden olabilir. Yeniden yapılandırılabilir antenlerin sezgisel yaklaşımlar kullanılarak tasarlanması süreci, her bir frekans için ayarlamaların diğer frekanslar için sorun yaratması nedeniyle genellikle çok zahmetli ve zaman alıcıdır. Bu çalışmanın ana motivasyonu, sezgisel yaklaşımlar yerine eşdeğer devre modeli aracılığıyla 5G'de yer alan belirli frekanslar için yeniden yapılandırılabilir bir anten sağlamaktır. Sonrasında da giyilebilir teknolojide kullanılan esnek antenlerde, doğrudan çözüm oluşturan bu eşdeğer devre modelinin çalışabilirliğini göstermektedir.

Çalışmanın Hedefleri ve Literatüre Katkısı

Çalışmamızın temel katkısı, yeniden yapılandırılabilir antenlerde karşılaşılan empedans eşleşmesi problemi için sezgisel yaklaşımlar kullanmak yerine eşdeğer devre yaklaşımı aracılığı ile yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı fikri sunmaktır. Önerilen yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı, sadece kapasitans ayarlamaları kullanarak sezgisel ayarlama çabasını en aza indirmeye çalışmaktadır.

Bu çalışma, yeni bir anten yapısının üretilmesine yardımcı olmak için tasarım süreçlerinde karşılaşılan zorlukları eşdeğer devre tabanlı çözüm yaklaşımı ile kolaylaştırarak, tasarımcının anten uyarlaması için harcadığı çabayı en aza indirmeye çalışması yönüyle, bilginiz dahilinde, literatürde bir ilk olma özelliğini taşımaktadır (Koc Polat *et al.* 2020).

Bu tez çalışmasında, öncelikle uygulamalarda oldukça fazla tercih edilen mikroşerit yama anteni tasarımındaki temel prensipler baz alınarak esnek olmayan ve esnek mikroşerit yama antenleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Daha sonra, esnek olmayan ve esnek yeniden yapılandırılabilir mikroşerit yama antenleri tasarlanmıştır. Yeniden yapılandırılabilir antenlerin tasarımı aşamasında, bu antenlerin elektriksel uzunlukları temel alınmıştır ve anten standart modellere ayrılarak eşdeğer devresi oluşturulmuştur. Tasarımda bu noktaya ulaşıldığında, tüm zorlukların çözümünün kolaylaştığı gözlemlenmiştir. Bu tezde ortaya

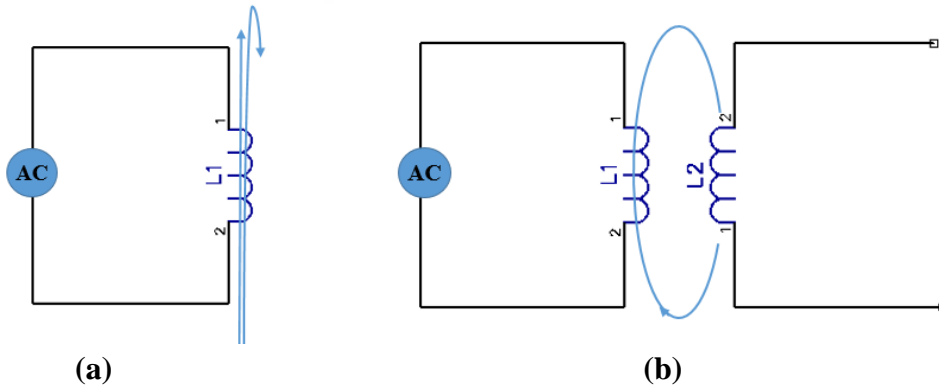
konulan özgün tasarım stratejisi kullanılarak 5G frekanslarında aşağıdaki hedefler doğrultusunda çalışan antenler tasarlanmıştır. Bu bağlamda;

- İlk olarak, önerilen tasarım stratejisinin üretilen antenlerde performans ölçümlerinin yapılması hedeflenmiş ve bu hedef doğrultusunda 5G frekanslarında üretilen bir anten üzerinde önerilen tasarım modeli denenmiş ve başarılı olduğu ortaya konulmuştur. Antene ait komple eşdeğer devre modeli AWR yazılımı ile oluşturulmuştur. Tam dalga analizi ise CST yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu anten 5,4 GHz (WLAN ve 5G), 3,6 GHz (Wi-Max ve 5G) ve 2,45 GHz (Wi-Fi) frekanslarında geçiş yapabilen ve alt tabaka olarak FR4 malzemesi kullanan esnek olmayan yeniden yapılandırılabilir antendir. Eşdeğer devre tabanlı çözüm modeli ile tasarımı doğrudan yapılan bu antenin bir prototipi üretilerek tam dalga analizi ve devre teorisi çözüm sonuçlarını doğrulamak için ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir.
- İkinci olarak ise yine 5G için öngörülen 25,0 GHz ve 6,5 GHz frekanslarında geçiş yapabilen ve alt tabaka olarak kapton kullanan esnek yeniden yapılandırılabilir antenler için bu tasarım stratejisinin uygunluğunu test etmek hedeflenmiştir. Bu amaçla tasarlanan ve eşdeğer devre tabanlı çözüm modelinin ince alt tabakalarda da çalışabildiğini gösteren bu antenin boyutu küçük olduğu için uygulamalarda 45°'den daha büyük açılarda bükülmeyeceği öngörülmektedir. Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anteni 5°, 10°, 20° ve 45°'lik yukarı ve aşağı yönde bükülmeler için benzetim ortamında esneklik testlerine tabi tutularak uygulamalar için uygunluğu gösterilmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Anten Temelleri ve Elektromanyetik Işıma

Bir kablosuz iletişim dizgesinde anten; vericiden aldığı enerjiyi iletişim ortamına yaymak (ışırma) ve ortamdaki elektromanyetik (EM) enerjiyi toplayıp alıcıya aktarmak gibi iki önemli görevi üstlenmektedir (Johnson and Jasik 1984). EM yayılımının anlaşılması için, Şekil 3'teki bir bobini (L_1) çalıştıran bir AC güç kaynağından oluşan basit bir devre ele alınabilir. Şekil 3.a'da bobin ideale, güç kaynağından enerji kaybı olmaz. Ancak bobin bir elektromanyetik alan üretir. Enerji kaybı olmadığından, bu alan tamamen bir depolama alanıdır ve enerji devre içinde döner. Bu enerji döngüsünden dolayı, bobinin gerilimi akımın 90° ilerisindedir, böylece reaktif bir empedans, $Z_L = j\omega L_1$ üretir. Empedansın reaktif doğası, bu tür depolama alanlarına neden reaktif alanlar (dışarıya enerji yaymayan) denildiğini açıklar. Şekil 3.b'deki gibi devrenin yakınına bir bobin ve bir dirençten oluşan ikinci bir devre yerleştirdiğinizde, L_1 'den L_2 'ye olan alan dirençte akımın akmasına neden olur. Bu eylem, reaktif bir alanın diğer elektrikli veya manyetik cihazlara bağılı olarak enerji depolayabileceğini veya aktarabileceğini gösterir (Schmitt 2000).



Şekil 3. (a) Bir indüktör enerjiyi depolayan reaktif bir alan oluşturur, (b) ikinci bir indüktör eklenmesi, metalik temas olmayan bir yüke enerji aktarmak için reaktif alanı kullanır

Antendeki temel ışırma, EM dalgalarla ifade edilir. Maxwell denklemleri tüm EM olayları tanımlar. Şekil 4'te basit bir monopol antenden (iletken telden) geçen zamanla değişen akım göz önüne alındığında, bu akım manyetik alan (H) endükler. Elimizde bir H vektörü varsa ve bu H zamana bağılı değişiyorsa bunun sonucunda elektrik alan vektörü (E) oluşur.

$$B = \mu_0 H \quad (1)$$

Burada B manyetik akı yoğunluğudur ve (Weber / m²) veya (Tesla) birimlerindedir. H 'nin varlığı ile ortaya çıkar. Denklem (2)'de Faraday'ın indüksiyon yasası gereğince zamanla değişen B sonucunda E oluşur ve birimi (Volt / m)'dir.

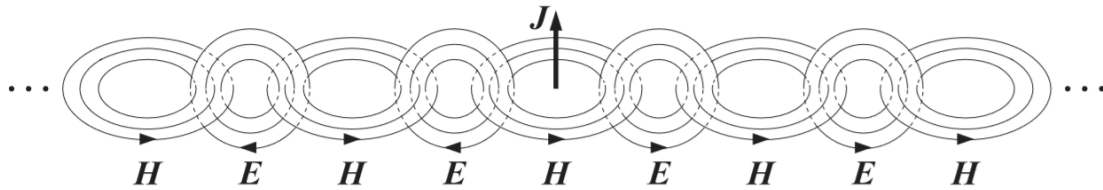
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$D = \varepsilon_0 E \quad (3)$$

Burada D elektrik akı yoğunluğudur ve birimi (Coulomb / m²)'dir. E 'nin varlığı ile ortaya çıkar. Denklem (4)'te Ampere yasası gereğince zamanla değişen D sonucunda H oluşur ve birimi (Amper / m)'dir. Yer değiştirme akım terimi ($\partial D / \partial t$), elektromanyetik dalgaların yayılmasını öngörmeye önemlidir.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4)$$

Burada J elektrik akımı yoğunluğudur, birimi Amper/m²'dir. J , elektromanyetik alanların kaynağı olarak düşünülebilir. Üretilen E ve H bu kaynaklardan yayılır ve alıcı antenlere büyük mesafelerde yayılabilir.



Şekil 4. Yayılan elektromanyetik alanlar (Orfanidis 2004)

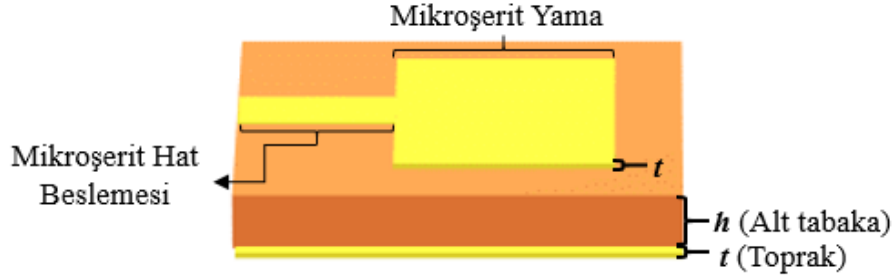
Sonuç olarak doğrusal bir anten üzerindeki zamanla değişen bir akım, dolaşan ve zamanla değişen H üretir, Faraday yasası uyarınca dolaşan bir E üretir, Ampere yasası yoluyla bir manyetik alan oluşturur vb. gibi elektrik ve manyetik alanlar akım kaynağından uzaklaşır (Orfanidis 2004)

Anten Çeşitleri

Radyo dalgalarını iletme ve alma için kullanılan antenlerin çok küçük boyuttan (telsiz telefondaki monopollü anten gibi) 100 metre çapında çok büyük anten reflektörlerine kadar birçok türü vardır. Mikroşerit antenler (genellikle yama antenleri olarak adlandırılır), basitlik ve baskılı devre teknolojisiyle uyumluluğu nedeniyle mikrodalga frekans bölgesinde yaygın olarak kullanılır. Bu nedenle bu tez çalışmasında da mikroşerit yama antenleri üzerinden çalışmalar yürütülmüştür.

Mikroşerit yama anten

Küçük boyutlu, düşük profilli, hafif, düzlemsel ve düz olmayan yüzeylere uygun, montaj yapılırken yapının çok az bir hacmini kaplayan ve üretimi kolay olan Mikroşerit Yama Anten, genellikle dört parçadan oluşan (yama, zemin düzlemi, alt tabaka ve besleme kısmı) tek katmanlı bir tasarımdır. Şekil 5'te dikdörtgen mikroşerit yama antenine ait fiziksel yapı sunulmuştur.



Şekil 5. Mikroşerit yama antenin fiziksel yapısı.

Alt tabaka: Yama ve toprak (zemin düzlemi) arasında uygun aralığı ve mekanik desteği sağlamak için kullanılan yalıtkan alt tabaka malzemesi, anten tasarımında kritik öneme sahiptir. Çünkü elektromanyetik alanları yoğunlaştırarak ve antenlerde istenmeyen radyasyonu önleyerek elektriksel bir işlevi yerine getirir. Elektriksel geçirgenliği (ϵ_r) ve kalınlığı (h), mikroşerit antenin boyutlarını ve çalışma özelliklerini belirler. Örneğin, düşük geçirgenliğe sahip kalın bir alt tabaka, yüksek geçirgenliğe sahip ince bir alt tabakadan daha geniş bir bant genişliği (BW) ve daha düşük verimlilik ile sonuçlanır (Kara 1998).

Mikroşerit antene ait BW , h arttıkça sınırlar dâhilinde artar. Alt tabaka kalınlığı (h) serbest alan dalga boyunun (λ_0) 0,003-0,05'i kadardır ($0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$) (Balanis 2016). Daha kalın bir alt tabaka ise yama boyutunu önemli ölçüde azaltmaz, ancak saçak alanlarının bölgesini genişletir, böylece geniş bir radyasyon halkası ile sonuçlanır (Kara 1998). Daha kalın alt tabaka, kazancı bir dereceye kadar artırır, fakat yüksekliğin artırılması yüzey dalgası uyarımı gibi istenmeyen etkilere yol açabilir. Yüzey dalgaları verimliliği azaltır ve ışıma örüntüsünü bozar (Orban and Moernaut 2009). Alt tabaka geçirgenliği kritiktir ve genellikle üretici tarafından göreceli olarak belirlenir ve ölçülür. Göreceli geçirgenlikte toleransla ilgili küçük bir değişiklik rezonans frekansında değişikliğe neden olabilir (Kara 1998). Alt tabakaya ait dielektrik sabiti tipik olarak $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığındadır (Balanis 2016). Yüksek geçirgenlik yama boyutunu ve saçak alanlarının boyutunu azaltır. Bu da bant genişliğinin azalmasına ve sonuç olarak antenin radyasyon bölgesinin büyümesine, yine E-düzlem radyasyon paterninin genişlemesine yol açar. Bu, anten çapraz polarizasyonunun artacağı anlamına gelir. Öte yandan, daha düşük geçirgenliğe sahip alt tabakaların kullanımı bant

genişliğini artırır ve yüzey dalgası etkilerini azaltır ancak besleyici hat radyasyonunu bastırmak daha zordur. Dalgalar bu tür alt tabakalarda yüksek geçirgenliğe sahip olanlardan daha kolay yayılır, çünkü elektromanyetik alanlar alt tabakaya daha gevşek bağlarla bağlıdır. Sonuç olarak, radyasyon, normalde asimetrik radyasyon desenleri veren yama çevresi etrafındaki dar manyetik akım halkasından kaynaklanmaktadır (Kara 1998).

Mikroşerit yama: Yama, iletken olmayan alt tabakanın bir tarafında konumlanan ve antenin ışın yayan çok ince bir metal şerit veya şerit dizisidir. Mikroşerit yama anteni yamanın şekline göre isimlendirilir. Tipik olarak kare, dikdörtgen, dipol, dairesel, üçgensel, yuvarlak halka ve elips şeklinde yama düzlemleri bulunmaktadır. Yama genişliği seçilirken, yüzey dalgalarının uyarılması nedeniyle küçük bir yama genişliğinin büyük bir bant genişliği, düşük anten verimliliği ve kazancı ile sonuçlandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte, büyük bir yama genişliği radyasyon modelini bozabilecek, bant genişliğini azaltabilen ve verimliliği artırabilecek yüksek dereceli modların uyarılmasına neden olur. Daha yüksek dereceli modlarda uyarımdan kaçınmak için yama genişliği, alt tabaka malzemesindeki dalga boyundan daha az olmalıdır. Giriş empedansı veya ana düzlem ışın genişliklerinin, yama uzunluğundan daha büyük yama genişliği seçilerek kontrol edilebileceği unutulmamalıdır (Kara 1998). Yamanın kalınlığı (t) serbest uzay dalga boyundan (λ_0) çok çok küçük seçilir ($t \ll \lambda_0$) (Balanis 2016).

Zemin düzlemi (toprak): Mikroşerit antenler, radyasyonu yarım bir düzlemlerle sınırlayan bir zemin düzlemi ile korunur. Zemin düzlemi ise alt tabakanın diğer tarafında konumlanan genellikle yama ile aynı metalin kullanıldığı toprak yapısıdır (Balanis 2016). Zemin düzleminin kalınlığı, terminal kenarında çeşitli modların yansıma katsayılarını ve ayrıca uyarma verimliliğini etkiler. Yama ve zemin düzlemi aynı boyuta sahip olduğunda, anten her iki tarafa aynı desenleri yayar. Bu, kazanımı azaltır ve anten artık uyumlu hale getirilemez (Kara 1998). Antenin düzgün çalışabilmesi için toprak düzlemi, alt tabaka kalınlığının (h) 2 ile 3 katı kadar yama kenarlarının ötesine uzanmalıdır (RF and Engineer). Ayrıca, incelenen radyasyon karakteristikleri, geri dönüş kaybı, bant genişliği ve verimlilik, zemin düzlemi boyutu azaldıkça geliştirilmektedir (Tabakh *et al.* 2016).

Güç beslemesi: Mikroşerit antenlerin tasarımında önemli bir diğer madde, anten için besleme yapısı ve bunların konumlarıdır. Özen ve hassasiyetle tasarlanmasına rağmen bir anten için beslemeye yeterince dikkat edilmezse anten düzgün çalışmaz. Dikkate alınması gereken en önemli husus, maksimum güç aktarımıdır (besleme hattının antenin giriş empedansı ile eşleştirilmesi) (Fatthi Alsager 2011). Güç, doğrudan temas ve elektromanyetik indüksiyon olmak üzere iki ana yöntemle anten elemanının içinden veya dışından aktarılabilir.

Birinci yöntem, bir mikroşerit hattı veya alt tabakanın altından bir koaksiyel sonda ile bir iletim hattı kontağı kullanır. Elektromanyetik indüksiyonda veya temassız yöntemde, yama ve besleme yapısı arasında doğrudan fiziksel veya elektrik teması yoktur ve anten elemanına bağlantı, doğrudan besleme mikroşeritinden veya bir ara açıklık yoluyla elektromanyetik indüksiyon ile yapılır (Kara 1998).

Mikroşerit yama beslemesi için kullanılan en popüler yöntemler; mikroşerit hattı, koaksiyel prob, diyafram bağlantısı ve yakınlık bağlantısıdır (Balanis 2016). Mikroşerit besleme hattı da genellikle yamaya kıyasla çok daha küçük genişlikte bir iletken şerittir. Bir mikroşerit hat besleme kullanıldığında, yama bir iç besleme noktası sağlamak için çentiklenebilir. Mikroşerit hat beslemesinin modellemesi ve imalatı kolaydır, iç pozisyonu kontrol edilerek basit bir şekilde eşleşme sağlanabilir. Bu tür doğrudan iletken besleme yöntemleri basitlik avantajına sahiptir, fakat aynı zamanda çeşitli dezavantajlara sahiptir. Bu konfigürasyonlar bant genişliği/besleme radyasyonu dengesinden muzdariptir, burada bant genişliğini arttırmak için alt tabaka kalınlığındaki bir artış, sahte besleme hattının radyasyonunun artmasına, yüzey dalga gücünün artmasına ve muhtemelen artan besleme endüktansına yol açar (Kara 1998; Balanis 2016).

Prob beslemesi olarak da adlandırılan koaksiyel besleme, yama elemanlarını bir paralel besleme substratından zemin düzleminden beslemek için kullanılabilir. Konumu genellikle anten ve iletim hattı arasında mükemmel bir eşleşme sağlayacak şekilde seçilir (Errifi *et al.* 2014). Besleme yamanın merkezinden uzaklaştıkça rezonans direnci artar. Bir yamanın ortasındaki giriş empedansı sıfırdır, çünkü voltaj yamanın ortasında sıfır değerindedir, akım ise yamanın ortasında maksimum değerine ulaşır (Orban and Moernaut 2009). 50Ω giriş direnç noktası, anten elemanının yayılan kenarından beslemeye olan mesafeyi değiştirerek elde edilebilir. Besleme noktasının yeri radyasyon özelliklerini etkileyebilir ve ayrıca hangi modun uyardığını belirler.

Anten Parametreleri

Bir antenin performansını tanımlamak için çeşitli parametrelerin tanımları gereklidir. Parametrelerin bazıları birbiriyle ilişkilidir ve anten performansının tam açıklaması için tüm parametrelerin incelenmesi gerekmez.

Anten empedansı

Bir anten giriş empedansı ($Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$) girişteki voltajı ve akımı antene bağlar. Anten empedansının gerçel kısmı (R_{in}) yayılım direncinden oluşan anten direncidir ve

yayılan ya da anten içinde absorbe edilen gücü temsil etmektedir. Sanal kısmı (X_{in}) ise anten reaktansdır ve anten yakın alanında depolanan gücü temsil etmektedir. Sadece gerçel giriş empedansı olan (imajiner kısmı sıfır) antenin rezonant olduğu söylenir (Sharma *et al.* 2017).

Empedans uyumu anten tasarımında geri dönüş kaybı, verimlilik, kazanç vb. gibi optimum performans parametrelerini elde etmek için zorlu bir adımdır. Bir antenin empedansı frekansa göre değişir. Tek bir frekansta (örneğin çeyrek dalga boyu) empedans uyumu nispeten basittir. Ancak geniş bantta empedans uyumu isteniyorsa, empedans uyumu zor hale gelir.

Geri dönüş kaybı

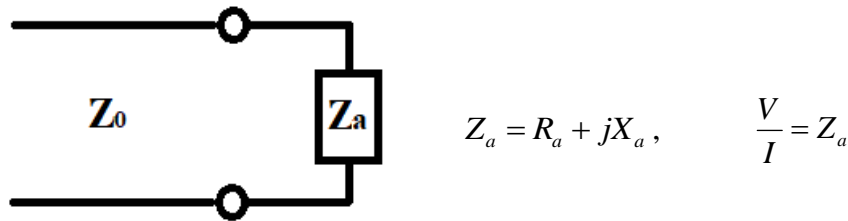
Empedans uyumu ve maksimum güç transferi ile ilgili olan geri dönüş kaybı, anten testi için önemli bir parametredir. Aynı zamanda kaynaktan antene gücün verilmesi için antenin etkinliğinin bir ölçüsüdür. Empedansdaki uyumsuzluk gücün çoğunun yükten uzaklaşmasına yol açar. Denklem (5)'te verildiği üzere, geri dönüş kaybı (RL), antenin geri yansıyan gücünün (P_R), antene gönderilen güce (P_{in}) oranı olarak tanımlanır. İyi bir güç transferi için bu oranın yüksek olması gerekir.

$$RL = 10 \log_{10} \frac{P_R}{P_{in}} \quad (5)$$

Denklemden elde edebileceğimiz bir başka tanımlama ise, geri dönüş kaybı olup dB cinsinden antene gönderilen güç ile yansıyan güç arasındaki farktır (Fatthi Alsager 2011).

Geri dönüş kaybı, Denklem (8) ve (9)'da verildiği gibi, yansıma katsayıları (Γ) ve duran dalga oranı (VSWR) denklemleri ile de hesaplanabilmektedir.

Yansıma katsayıları: Yansıtılan gerilim genliğinin (V^-), ileri gerilim genliğine (V^+) oranıdır. Gerilim yansıma katsayısını belirlemek için iletim hattının karakteristik empedansı (Z_0) kullanılır.

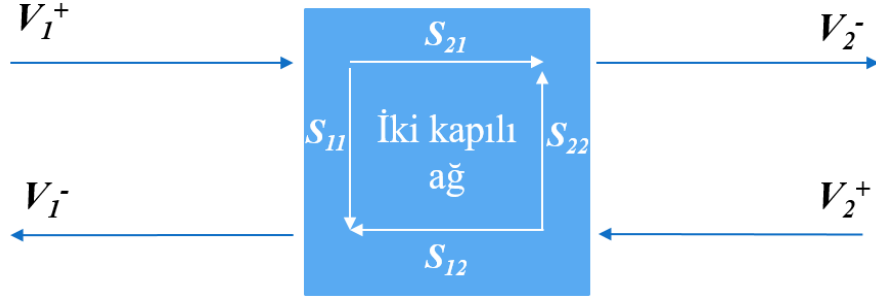


Şekil 6. Sonunda Z_a yük bulunan karakteristik Z_0 empedansına sahip iletim hattı

$$Z_a = \frac{V^+ + V^-}{I^+ + I^-} = \frac{V^+ + V^-}{V^+ - V^-} Z_0 \quad (6)$$

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (7)$$

Şekil 7’de iki kapılı ağ gösterilmiştir. Burada S_{11} yansımaya katsayılarını temsil etmektedir.



Şekil 7. İki kapılı ağ S parametreleri

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad S_{22} = \frac{V_2^-}{V_2^+} \quad S_{12} = \frac{V_1^-}{V_2^+} \quad S_{21} = \frac{V_2^+}{V_1^+}$$

Duran Dalga Oranı (VSWR): İletim hattı boyunca gerilimi çizersek, her yarım dalga boyunda bir tam döngüyü tekrarlayan bir dizi maksimum ve minimum tepe değeri ile karşılaşırız. VSWR Denklem (8)’de verildiği üzere, genliğin maksimum tepe değerinin minimum tepe değerine oranı olarak tanımlanır. Bu parametre anten teknik özelliklerinde kullanılır. Tipik olarak bir bant genişliği üzerinden verilir, böylece anten tarafından bir frekans aralığına ne kadar güç yansıdığına (antenin ne kadar güç yaydığı) dair bir fikre sahip olunur. Duran dalga oranı ile geri dönüş kaybı arasındaki ilişki Denklem (9) ile verilmiştir.

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (8)$$

$$RL = 20 \log_{10} \left| \frac{VSWR + 1}{VSWR - 1} \right| \quad (9)$$

Bant genişliği

Bir antenin bant genişliği “Antenin performansının, bazı özelliklere göre, belirtilen standartlara uygun olduğu frekans aralığıdır”. Bant genişliği tipik olarak VSWR cinsinden ifade edilir. Örneğin, bir anten, VSWR <1,5 ile 100-400 MHz’de çalıştığı şeklinde tanımlanabilir. Bu ifade, yansımaya katsayısının belirtilen frekans aralığı için 0,2’den düşük olduğunu gösterir. Bu nedenle, antene verilen gücün, gücün yalnızca % 4’ü vericiye geri yansır. Alternatif olarak, geri dönüş kaybı $S_{11} = 20 * \log_{10} (0,2) = - 13,98$ dB olarak ifade edilebilir.

Bant genişliğini karakterize etmek için kullanılabilir başka kriterler de vardır. Bu, belirli bir aralıktaki polarizasyon olabilir. Örneğin, bir anten 1,4-1,6 GHz'den itibaren eksenel oranı 3 dB'den az dairesel polarizasyona sahip olarak tanımlanabilir. Bu polarizasyon bant genişliği, antenin çalışmasının yaklaşık olarak dairesel polarize olduğu aralığı belirler.

Yönelim, kazanç ve ışın genişliği

Bir anten sisteminin belirli bir yöne (θ, ϕ) doğru yönlendirici kazancı, ilgili izotropik yoğunlukla (U_I) normalize edilmiş ışın yoğunluğudur $U(\theta, \phi)$. İlgili izotropik yoğunluk, ortalama yayılım yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir (Orfanidis 2004).

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_I} = \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad} / 4\pi} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} = \frac{4\pi}{P_{rad}} \frac{dP}{d\Omega} \quad (10)$$

Denklem (10)'da verilen yönlülük kazancının maksimum değeri olan D_{max} , antenin yönelimi olarak adlandırılır ve belirli bir yöne doğru gerçekleştirilir, örneğin (θ_0, ϕ_0) . Radyasyon yoğunluğu bu yöne doğru maksimum olacaktır, $U_{max} = U(\theta_0, \phi_0)$, öyle ki;

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_I} \quad (11)$$

Yönlülük genellikle dB, yani $D_{dB} = 10 \log_{10} D_{max}$ olarak ifade edilir. Radyasyon yoğunluğu yönlü kazanç açısından tekrar ifade edilirse.

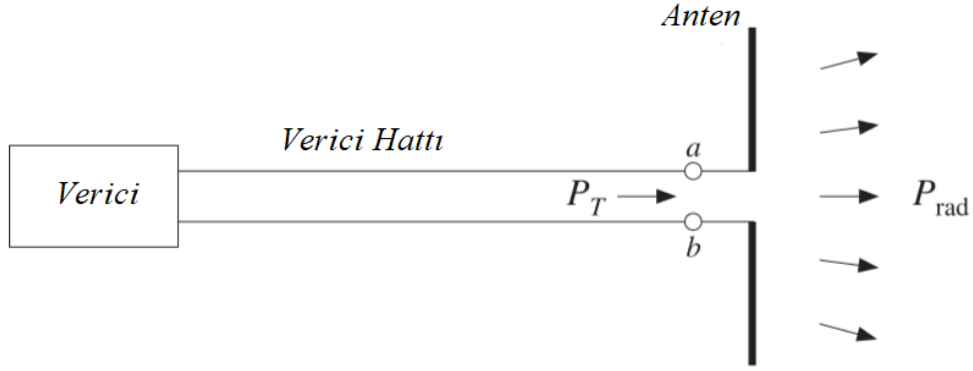
$$\frac{dP}{d\Omega} = U(\theta, \phi) = D(\theta, \phi) U_I = \frac{P_{rad} D(\theta, \phi)}{4\pi} \quad (12)$$

Burada, $P_{rad} D(\theta, \phi)$ ifadesi; (θ, ϕ) yönünde yayılan etkin izotropik güç veya etkin yayılan güç olarak adlandırılır. (θ, ϕ) yönündeki güç yoğunluğu için;

$$\frac{dP}{dS} = \frac{dP}{r^2 d\Omega} = \frac{P_{rad} D(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad (13)$$

Yönlülük ve güç ile ilgili bir kavram, güç kazancı veya bir antenin kazancıdır. Denklem (14)'teki gibi tanımlanır, ancak toplam yayılan güçle normalize etmek yerine, Şekil 8'de gösterildiği gibi bağlanan bir vericiden anten terminalleri tarafından kabul edilen toplam güce (P_T) normalize edilir.

$$G(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{P_T / 4\pi} = \frac{4\pi}{P_T} \frac{dP}{d\Omega} \quad (14)$$



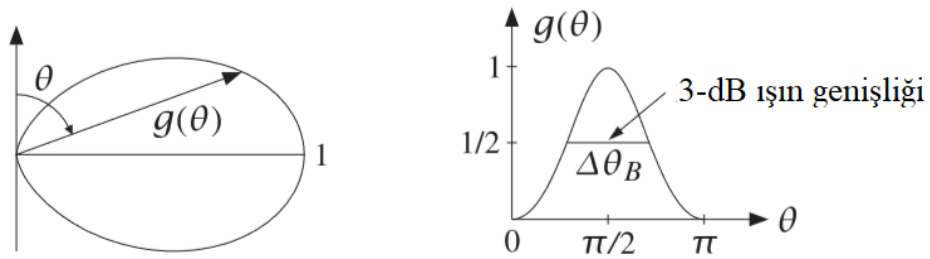
Şekil 8. Antene iletilen güç, yayılan güç (Orfanidis 2004)

Güç kazancı tanımı, iletim hattının anten giriş empedansı ile yanlış eşleştirilmesinden kaynaklanan herhangi bir yansıma kaybı içermez.

Radyasyonun açısal dağılımını ifade ederken, onun maksimum değerine göre değerlendirmek uygundur. Bu nedenle normalize edilmiş güç düzenini veya normalize kazancı Denklem (15) ile tanımlayalım:

$$g(\theta, \phi) = \frac{G(\theta, \phi)}{G_{\max}} \quad (15)$$

Normalize kazanç genellikle, Şekil 9'da gösterildiği gibi, $\rho = g(\theta)$ olacak şekilde kutupsal koordinatlara (ρ, θ) sahip bir kutupsal çizimde görüntülenir. Bu şekil $g(\theta) = \cos^2(0.5\pi \cos\theta) / \sin^2\theta$ eşitliği ile verilen yarım dalga dipol antenin kazancını göstermektedir. 3-dB veya yarı güç ışın genişliği ($\Delta\theta_B = \theta_2 - \theta_1$), normalize kazancın 1/2 veya -3 dB'e eşit olduğu açıların değerleri arasındaki farktır.



Şekil 9. Açıya karşı- Normalize kazancın kutupsal ve normal çizimleri (Orfanidis 2004).

Verimlilik ve kalite faktörü

Antenin verimlilik faktörü Denklem (16) ile tanımlanır,

$$e = \frac{P_{\text{rad}}}{P_T} \quad (16)$$

Genel olarak $0 \leq e \leq 1$ aralığındadır. Kayıpsız bir anten için verimlilik faktörü 1'dir ve

$P_{rad} = P_T$ olacaktır. Böyle bir ideal durumda, yönlülük ve güç kazanımı arasında bir ayrım yoktur.

$$G(\theta, \phi) = eD(\theta, \phi) \quad (17)$$

Verimlilik aynı zamanda kalite faktörü olarak Denklem (18) ile ifade edilebilir. Burada Q_t toplam kalite faktörü, Q_{rad} radyasyon (uzay dalgası) kayıplarına bağlı kalite faktörüdür.

$$e = \frac{1/Q_{rad}}{1/Q_t} = \frac{Q_t}{Q_{rad}} \quad (18)$$

Kalite faktörü, anten kayıplarını temsil eden bir değere sahiptir. Tipik olarak radyasyon, iletim (ohmik), dielektrik ve yüzey dalgası kayıpları vardır. Bu nedenle toplam kalite faktörü (Q_t), tüm bu kayıplardan etkilenir ve genel olarak, Denklem (19)'daki gibi yazılmıştır.

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (19)$$

Burada;

Q_c = iletim kayıpları nedeniyle kalite faktörü (omik).

Q_d = dielektrik kayıplara bağlı kalite faktörü.

Q_{sw} = yüzey dalgaları nedeniyle kalite faktörü.

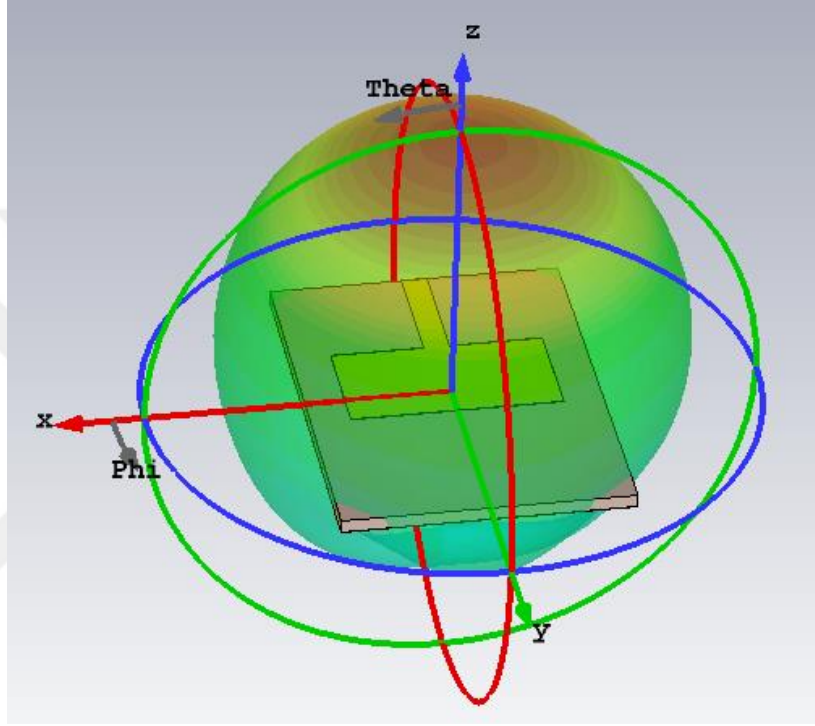
Işıma örüntüsü

Yönün bir fonksiyonu olarak antenden yayılan gücün değişimini tanımlar. Varış açısının bir fonksiyonu olarak bu güç değişimi anten uzak alanında tanımlanır. Antenin ışım özellikleri, uzay koordinatlarının bir fonksiyonu olarak matematiksel bir ifade olarak veya grafiksel gösterilir. Antenlerin ışım diyagramları, alan veya güç değerleri kullanılarak elde edilir. Genelde normalize alan ve normalize güç ifadesi ile karşılaştırılır. Normalize işlemi, alan ve güç diyagramları maksimum değerine göre yapılır. Alan diyagramı E veya H 'nin doğrusal olarak küresel koordinatlarda çizimidir. Güç diyagramı ise elektrik veya manyetik alan genliğinin karesinin doğrusal veya desibel (dB) olarak açıl koordinatlarda çizimidir. Şekil 10'da bir mikroşerit yama antenine ait uzak alan ışım çizimi gösterilmiştir.

Antenin θ ve ϕ 'ye bağlı yaklaşık E ve H ifadeleri de (20) ve (21) denklemleri ile verilmektedir.

$$E_{\theta} \cong jn \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right] \quad (20)$$

$$H_{\phi} \cong j \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right] \quad (21)$$



Şekil 10. Mikroşerit yama antenin 3B ışıma diyagramı

Mikroşerit yama anteni için, yamanın içindeki elektrik alanı E (z yönünde), yama ve zemin düzlemi için normaldir ve manyetik alan H (x ve y yönünde), şerit kenarına paraleldir. Baskın mod için dikdörtgen bir yama antenin polarizasyonu doğrusaldır ve yama boyutları boyunca yönlendirilir. Genel olarak modlar TM_{nmz} olarak belirtilir. z indis değeri, E 'nin varyasyonu ihmal edilebilir olduğu için çoğunlukla atlanır. Dolayısıyla TM_{nm} n ve m ile x ve y yönündeki alan değişimleri olarak kalır. “ x ” yönündeki (empedans genişlik yönü) alan varyasyonu ihmal edilebilir, bu nedenle n 0’dir ve alanın y yönünde (rezonans uzunluk yönü) minimum bir maksimum varyasyonu vardır; bu nedenle temel durumunda m 1’dir. Dolayısıyla TM_{01} notasyonu baskın mod olarak tanımlanır.

Anten polarizasyonu

Bir antenin polarizasyonu, antenden yayılan dalganın polarizasyonudur. Bir düzlem dalganın polarizasyonu elektrik alanının büyüklüğünü ve yönünü zamanın bir fonksiyonu

olarak tanımlar, başka bir deyişle “uzayda belirli bir pozisyon için elektrik alanının yönlendirilmesi” dir. Bir alıcı anten, verici antenle aynı polarizasyonda olmalıdır, aksi halde rezonans olmaz. Polarizasyon doğrusal, dairesel ve eliptik olarak sınıflandırılabilir. Doğrusal polarizasyonda anten, yayılma düzlemindeki gücü yayar, sadece anten, elektrik alanı dünyanın yüzeyine dik iken dikey olarak polarize edilir ve elektrik alanı dünyanın yüzeyine paralel olduğunda yatay olarak polarize olur. Dairesel polarizasyon anteni, tüm düzlemlerde yayılma yönünde (dikey, yatay ve aralarında) güç yayar. Yayılma düzlemi daire içinde döner ve bir dalga periyodunda bir tam döngü oluşturur (Fatthi Alsager 2011).

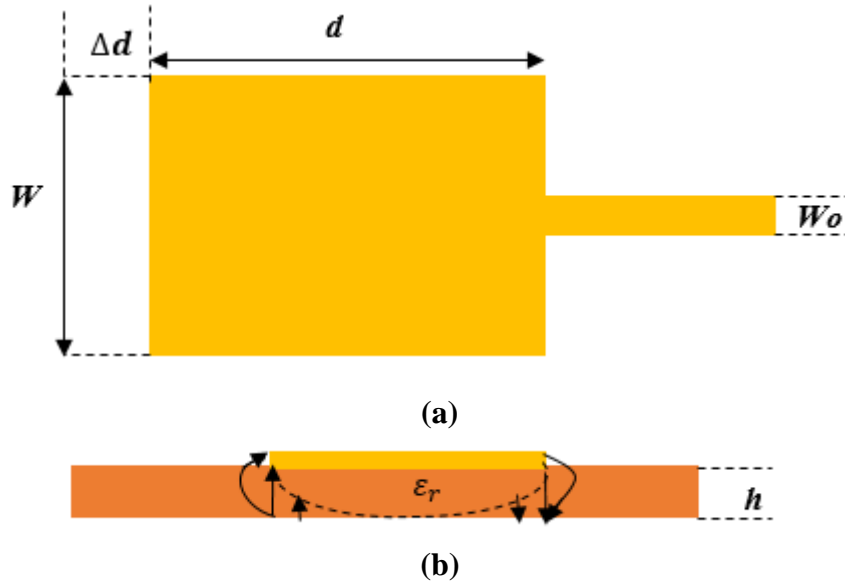


MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında oldukça düşük maliyete sahip, verimli, düşük profilli ve üretilmesi kolay mikroşerit antenler üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Dikdörtgen yama bugüne kadar en yaygın kullanılan mikroşerit anten yapısıdır. İnce yüzeyleri, hem iletim hattı hem de boşluk modellerini kullanarak analiz etmek çok kolaydır (Schaubert *et al.* 1989). Pratik bir model olduğu için bu tez çalışmasında iletim hattı modeli tercih edilmiştir. Mikroşerit antene ait tasarımda kullanılan metotlar bu bölümde açıklanmaktadır.

İletim Hattı Modeli

Şekil 11’de üst ve yan görünüşü verilen dikdörtgen mikroşerit antenlerin pratik tasarımlarına yol açan iletim hattı modeli aşağıda ana hatlarıyla verilmiştir. Bu model, istenilen çalışma frekansında (f_r), kalınlığı (h) ve dielektrik sabiti (ϵ_r) belli olan bir alt tabaka için antenin boyutlarını belirler (Balanis 2016).



Şekil 11. Dikdörtgen mikroşerit yama antenin aktif uzunlukları: (a) üst görünüş, (b) yan görünüş

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (22)$$

Denklem (22) antenin yama genişliğini (W) bulmak için kullanılır. Bu denklemde yer alan, ν_0 ışığın serbest uzay hızıdır. μ_0 ve ϵ_0 ise sırasıyla serbest uzayın manyetik ve elektriksel geçirgenlikleridir.

Mikroşerit, tipik olarak alttabaka ve hava olmak üzere iki farklı dielektrik yapısı içerdiğinden homojen değildir. Elektrik alan hatlarının çoğu havada bir kısmı alt tabakada bulunur. Faz hızları alt tabaka ve havada farklı olacağından, iletim hattı enine elektrik-manyetik (TEM) iletim modunu desteklemez. Dolayısıyla baskın propogasyon modu yarı TEM modu olacaktır. Hattaki dalga yayılımını ve saçklamayı hesaba katacak etkin bir dielektrik sabiti (ϵ_{reff}) elde edilmelidir. ϵ_{reff} değeri ϵ_r 'den küçük olmalıdır, çünkü yama çevresi boyunca saçak alanları alt tabakaya tam olarak dahil edilmemiştir, ayrıca aşağıdaki Şekil 11(b)'de gösterildiği gibi havaya yayılır (Sandeep and Kashyap 2012).

$\frac{W}{h} > 1$ şartı altında ϵ_{reff} Denklem (3.2) ile belirlenir (Balanis 2016).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (23)$$

Temel modda çalışmak için, yamanın uzunluğu $\lambda/2$ 'den biraz daha az olmalıdır, burada λ , $\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{reff}}$ 'ya eşit dalga boyudur. TM₁₀, alanın uzunluk boyunca ($\lambda/2$) değiştiğini ve yamanın genişliğinde hiçbir değişikliğe uğramadığını ifade etmektedir. Genişlik boyunca iki kenardaki elektrik alanının normal bileşenleri, Şekil 11(b)'de görüldüğü gibi zıt yönlerde ve dolayısıyla faz dışıdır. Yama $\lambda/2$ uzunluğunda olduğu için birbirlerini genişlik yönünde iptal ederler. Faz halindeki teğetsel bileşenler, ortaya çıkan alanların, yapının yüzeyine normal olan maksimum yayılan alanı vermek üzere birleştiği anlamına gelir. Bu nedenle, genişlik boyunca kenarlar iki yayılan yuva olarak temsil edilebilir. Genişlikteki saçak alanlar, yayılan yarıklar olarak modellenebilir ve mikroşerit antenin yaması elektriksel olarak fiziksel boyutlarından daha büyük görünür. Yamanın uzunluğu boyunca boyutları her bir uçta Δd mesafesi ile uzatılmıştır.

Anten yamasının uzunluğu Denklem (25) ile bulunur.

$$\frac{\Delta d}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} - 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (24)$$

$$d = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta d \quad (25)$$

Zemin düzleminin genişliği ve boyunu belirlemek için ise genellikle Denklem (26) ve (27)'yi kullanmak uygundur.

$$d_g = 6h + d \quad (26)$$

$$W_g = 6h + W \quad (27)$$

Çeyrek Dalga Dönüştürücü Tekniği ile Empedans Uyumlama

Mikroşerit anten tasarlanırken dikkate alınması gereken en önemli hususlardan birisi de maksimum güç aktarımıdır. Tasarlanan yama için uygun besleme seçilerek iyi bir empedans eşleşmesi ile maksimum güç aktarımı sağlanabilir. Sistemdeki yük kaynak ile eşleşmiyorsa, yükten yansıma nedeniyle; duran dalga paterni üretilir ve tam güç yüke aktarılmaz. Çeyrek dalga dönüştürücü, iki gerçek empedansı tek bir frekansta eşleştirmek için uygun bir yöntemdir (Sharma *et al.* 2017). Denklem (28), anten yamasının giriş empedansı (Z_a) ve besleme hattının karakteristik empedansı (Z_0) arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$Z_{in}(d_f) = Z_0 \left[\frac{Z_a + jZ_0 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_f\right)}{Z_0 + jZ_a \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_f\right)} \right] \quad (28)$$

Burada verilen d_f besleme hattının boyu olup $d_f = \lambda/4$ seçilirse Denklem (29)'daki eşitlik Denklem (30)'daki gibi sadeleşir.

$$Z_{in}\left(d_f = \frac{\lambda}{4}\right) = Z_0 \left[\frac{Z_a + jZ_0 \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4}\right)}{Z_0 + jZ_a \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4}\right)} \right] = \frac{Z_0^2}{Z_a} \quad (29)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{in} Z_a} \quad (30)$$

Denklemlerde yer alan Z_a anten yamasının giriş empedansını belirtmekte olup Denklem (31) ile hesaplanmaktadır (Sharma *et al.* 2017). Z_0 ise besleme hattının karakteristik empedansını temsil etmektedir. Z_0 'ın mikroşerit besleme hattının genişliği (W_0) ile arasındaki ilişki Denklem (32) ve (33) ile verilir.

$$Z_a = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{d}{W} \right)^2 \quad (31)$$

$$\frac{W_0}{h} \leq 1 \text{ şartı altında,}$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right] \quad (32)$$

$$\frac{W_0}{h} > 1 \text{ şartı altında ise;}$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]} \quad (33)$$

Mikroşerit Yama Antenin Eşdeğer Devresi

Mikroşerit yama anteni, iki ucu açık bir iletim hattına benzetilmektedir. Bu yüzden mikroşerit yama antenlerinin eşdeğer devresi, rezonans frekansına uygun R, L, C devre elemanı değerleri kullanılarak tanımlanabilir. Mikroşerit yama anteninin frekansını karşılayan C, L ve R devre elemanlarının değerleri sırasıyla Denklem (34-36) kullanılarak hesaplanabilir (Tiwari *et al.* 2017). Mikroşerit anteni, mikroşerit hat beslemesi ve bunların eşdeğer devreleri Şekil 12’de gösterilmektedir.

$$C = \frac{dW\epsilon_0\epsilon_{eff}}{2h} \cos^{-2} \left(\frac{\pi y_0}{d} \right) \quad (34)$$

Burada, d anten yamasının boyu, y_0 besleme noktasının pozisyonudur

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (35)$$

$$R = \frac{Q}{2\pi f C} \quad (36)$$

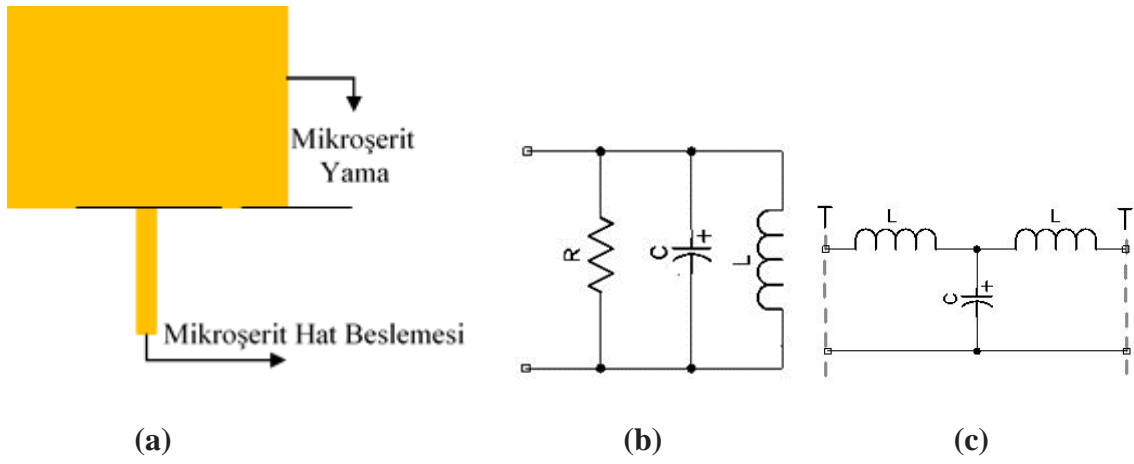
Burada Q rezonatörün kalite faktörüdür ve Denklem (37)’deki gibi hesaplanır.

$$Q = \frac{v_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{4fh} \quad (37)$$

Mikroşerit besleme hattının eşdeğer devresine ait C_L ve L_L devre elemanlarının değerleri Denklem (38) ve (39)’da verildiği şekilde hesaplanabilir (Singh *et al.* 2017).

$$L_L = 100h(4\sqrt{W_f/h} - 4,21) \text{ nH} \quad (38)$$

$$C_L = W_f((9,5\epsilon_r + 1,25)W_f/h + 5,2\epsilon_r + 7) \text{ pF} \quad (39)$$



Şekil 12. Mikroşerit anten ve eşdeğer devresi; (a) Mikroşerit hat beslemeli mikroşerit yama anteni, (b) Mikroşerit yama eşdeğeri, (c) Mikroşerit hat besleme eşdeğeri

Mikroşerit Süreksizlikleri

Herhangi bir mikroşerit hat düz ve kesintisiz uzunluğu ile sürekli bir yapıya sahiptir. Aslında, tek başına ele alınan bu tür düz çizgiler mühendislik kullanımında çok az yere sahiptir. Dirsekler, birden duran açık devreler, genişlik değişiklikleri (basamaklar), boşluk geçişleri iletim hattında süreksizlikler meydana getirir. Bu tür süreksizlikler, çok küçük kapasitanslara ve endüktanslara yol açar (genellikle 0,1 pF ve 0,1 nH'den az). Özellikle bu elementlerin reaktansı, yüksek mikrodalga frekanslarında ve milimetre dalga frekanslarında rezonans frekansını etkileyebileceklerinden önemli hale gelmektedir (Edwards and Steer 2016). Bazı temel tipik süreksizlikler aşağıda verilmiştir.

Genişliklerdeki basamak değişiklikleri: Mikroşerit hatların birçok yapıda genişlik değişimine rastlanmaktadır (çeyrek dalga dönüştürücüsünün mikroşerit yamaya bağlantı yaptığı yerdeki durum genişlik değişikliğidir). Mikroşerit kıvrımı gibi, köşelere bağlı şönt kapasitansı (Cs) baskın eşdeğer devre parametresidir ve eşdeğer endüktanslara yol açan kenar akımı bozuklukları ortaya çıkmaktadır (Edwards and Steer 2016). Şekil 13'te gösterilen adım süreksizliği için eşdeğer devrenin kapasitansı ve endüktansları sırasıyla Denklem (40), Denklem (41) ve (42)'de verilen formülasyonlarla yaklaşık olarak hesaplanabilir (Hong and Lancaster 2004).



Şekil 13. Mikroşerit basamak süreksizliği ve eşdeğer devresi

$$C_s = 0,00137h \frac{\sqrt{\varepsilon_{rel}}}{Z_{c1}} \left(1 - \frac{W_2}{W_1}\right) \left(\frac{\varepsilon_{rel} + 0,3}{\varepsilon_{rel} - 0,258}\right) \left(\frac{W_1/h + 0,264}{W_1/h + 0,8}\right) \text{ (pF)} \quad (40)$$

$$L_{s1} = \frac{L_{w1}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (41)$$

$$L_{s2} = \frac{L_{w2}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (42)$$

Burada;

$$L_{wi} = Z_{ci} \frac{\sqrt{\varepsilon_{rei}}}{v_0} \quad (43)$$

$$L = 0,000987h \left(1 - \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{rel}}{\varepsilon_{re2}}}\right)^2 \text{ (nH)} \quad (44)$$

$$Z_{ci} = \frac{n}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{rei}}} \ln \left[\frac{F_i}{u_i} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u_i}\right)^2} \right] \quad (45)$$

$$\varepsilon_{rei} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u_i}\right)^{-a,b} \quad (46)$$

Burada $i = 1, 2$ için L_{wi} , sırasıyla W_1 ve W_2 genişliklerine ait uygun mikroşeritlerin birim uzunluğu başına endüktanslardır. Z_{ci} ve ε_{rei} , W_i genişliğine karşılık gelen karakteristik empedansı ve etkili dielektrik sabitini belirtir. Bu parametrelerin hesaplanmasında kullanılan katsayılar için detaylı formülasyonlar Denklem (47) ve (50)'de verilmektedir.

$$a_i = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u_i^4 + \left(\frac{u_i}{52}\right)^2}{u_i^4 + 0,432} \right) + \frac{1}{18,7} \ln \left(1 + \left(\frac{u_i}{18,1}\right)^3 \right) \quad (47)$$

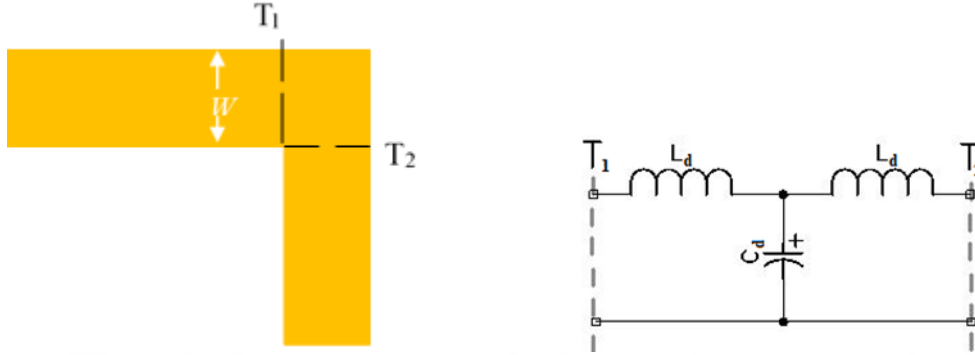
$$b = 0,564 \left(\frac{\varepsilon_r - 0,9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0,053} \quad (48)$$

$$F_i = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30,666}{u_i} \right)^{0,7528} \right] \quad (49)$$

$$u_i = \frac{W_i}{h} \quad (50)$$

W_1 , W_2 ve h büyüklükleri denklemlerde metre cinsinden yerlerine yazılmalıdır.

Dirsekler: Mikroşerit hat devrelerinde dirseklerin gerekli olduğu birçok durum vardır. Bu kıvrımlar genellikle 90 derecelik bir açıda geçer. Çoğu zaman çizgi genişliği değişmez. Mikroşerit hattın bükülmesi (dirsek süreksizliği) eşdeğer devresi ile birlikte, Şekil 14’te gösterilmiştir (Hong and Lancaster 2004). Bükülme kapasitesi ve endüktansı Denklem (51-53) ile verilmiştir (Garg *et al.* 2013).



Şekil 14. Mikroşerit dirsek süreksizliği ve eşdeğer devresi

$$W/h < 1, \frac{C}{W}(pF/m) = \frac{(14\varepsilon_r + 12,5)W/h - (1,83\varepsilon_r - 2,25)}{\sqrt{W/h}} + \frac{0,02\varepsilon_r}{W/h} \quad (51)$$

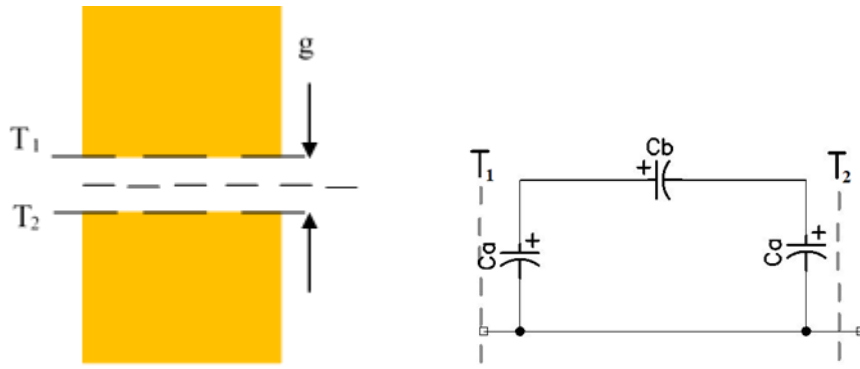
$$W/h \geq 1, \frac{C}{W}(pF/m) = (9,5\varepsilon_r + 1,25)W/h + 5,2\varepsilon_r + 7 \quad (52)$$

$$\frac{L}{h}(nH/m) = 100 \left(4\sqrt{\frac{W}{h}} - 4,21 \right) \quad (53)$$

W ve h büyüklükleri denlemlerde metre cinsinden yerlerine yazılmalıdır.

Kapasitans (C_d), özellikle elektrik alanlarının yoğunlaştığı bükülmenin dış noktası etrafında, köşelerde ek yük birikimi ile ortaya çıkar. Endüktanslar (L_d) akım akışının kesilmesi nedeniyle ortaya çıkar. Bu, özellikle akımın çoğunun mikroşeridin dış kenarlarında aktığını gösterir (Edwards and Steer 2016).

Boşluk geçişleri: Şekil 15’te boşluk geçiş süreksizliği ve eşdeğer devresi gösterilmiştir. Boşluk süreksizliklerinde, açık devre mikroşerit uçları arasındaki enerji bağlantısını yansıtmak için boşluk boyunca iletkenlerinin kuplaj etkisinden kaynaklanan bir kapasitans (C_b) vardır. Saçak alanları topraklı kondansatörlerle (C_a) temsil edilir (Edwards and Steer 2016) ve şerit iletkeninin kenarındaki elektrostatik alan dağılımı bozukluğunun etkisinden hesaplanabilir (Maeda 1972). Bahl ve Garg’ın g/W oranına göre bazı sınırlar ile boşluk kapasitansı için geliştirdikleri formüller Denklem (54) ve (55)’te sıralanmaktadır (Garg and Bahl 1978).



Şekil 15. Mikroşerit boşluk geçiş süreksizliği ve eşdeğer devresi

$$C_a = 0,5C_e \quad (54)$$

$$C_b = 0,5C_o - 0,25C_e \quad (55)$$

Burada C_e ve C_o sırasıyla çift ve tek mod kapasiteleri olarak ifade edilmektedir. Tekli mikroşeride benzer statik bir yaklaşımda, bağlı mikroşerit çizgilerin çift ve tek mod karakteristik empedansları ve etkili dielektrik sabitleri, C_e ve C_o tarafından belirtilen çift ve tek mod kapasiteleri açısından elde edilebilir (Hong and Lancaster 2004).

$$\frac{C_o}{W} (pF/m) = \left(\frac{\epsilon_r}{9,6} \right)^{0,8} \left(\frac{g}{W} \right)^{m_o} \exp(k_o) \quad (56)$$

$$\frac{C_e}{W} (pF/m) = 12 \left(\frac{\epsilon_r}{9,6} \right)^{0,9} \left(\frac{g}{W} \right)^{m_e} \exp(k_e) \quad (57)$$

Burada indisler ve bağımsız değişkenler Denklem (58-63) ile tanımlanmıştır.

$0,1 \leq g/W \leq 1,0$ şartı için;

$$m_o = \frac{W}{h} [0,619 \log(W/h) - 0,3853] \quad (58)$$

$$k_o = 4,26 - 1,413 \log(W/h) \quad (59)$$

$0,1 \leq g/W \leq 0,3$ şartı için;

$$m_e = 0,8675 \quad (60)$$

$$k_e = 2,043 \left(\frac{W}{h} \right)^{0,12} \quad (61)$$

$0,3 \leq g/W \leq 1,0$

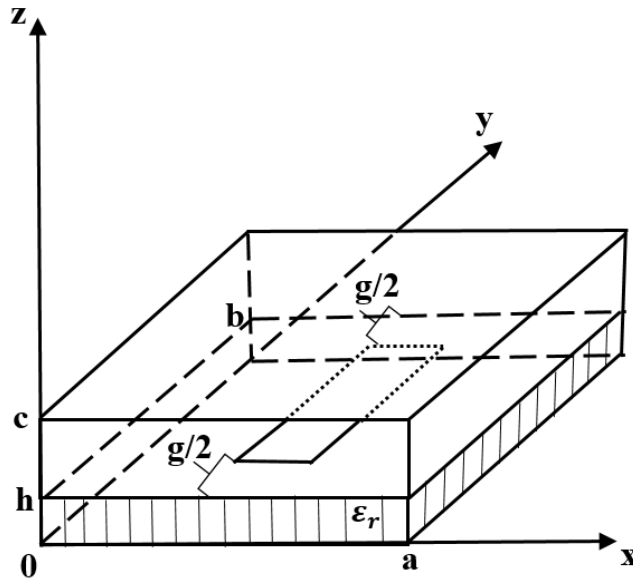
$$m_e = \frac{1,565}{(W/h)^{0,16}} - 1 \quad (62)$$

$$k_e = 1,97 - \frac{0,03}{W/h} \quad (63)$$

Bu ifadelerin doğruluğu $0,5 \leq W/h \leq 2,0$ ve $2,5 \leq \epsilon_r \leq 15$ için % 7 içindedir.

Görüldüğü gibi Bahl ve Garg'ın formülü g/W oranına göre belirli sınırlamalar içerir. Formül sınırlamalar dışındaki aralıklar için kullanılırsa, hesaplanan kapasite değerleri negatif olmaktadır. Bununla birlikte, Maeda'nın yapmış olduğu çalışmada g/W oranı için bir sınır yoktur ve boşluk kapasitansları için analitik bir yöntem sunulmuştur. Burada sunulan analitik yöntem, elektrostatik bir yaklaşıma dayalı problemlerin formüle edilmesi için varyasyonel bir prensip kullanır ve üç boyutlu potansiyel Green fonksiyonlarını kullanarak eşdeğer devre parametreleri için teorik ifadeleri türetir. Sayısal sonuçlar, kesilmesi gereken sonsuz serilerle elde edilir (Maeda 1972).

Şekil 16'da mikroşerit iletim hattının 3 boyutlu analitik konfigürasyonu verilmiştir. Denklem (64-73) arasında türetilen formüller mikroşerit iletim hattındaki boşluk kapasiteleri değerlerini hesaplamak içindir. Boşluk süreksizliklerinin eşdeğer devresindeki kapasitans değerleri Denklem (74) ve (75) ile elde edilmiştir.



Şekil 16. Mikroşerit iletim hattındaki boşluğun analitik konfigürasyonu.

$$\gamma_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (64)$$

Burada a alt tabakanın genişliği, b ise boşluğa göre yamanın dikey boyu (oldukça küçük değer seçilmelidir) ile boşluğun uzunluğunun (g) toplamıdır. Bu büyüklükler denklemde yerlerine metre cinsinden yazılmalıdır.

$$\Gamma_{mn} = \varepsilon_r \cosh(\gamma_{mn}h) \sinh(\gamma_{mn}(c-h)) + \sinh(\gamma_{mn}h) \cosh(\gamma_{mn}(c-h)) \quad (65)$$

Burada c , alt tabaka kalınlığı (h) ile iletken yamanın kalınlığının (t) toplamıdır. Bu büyüklükler denklemde yerlerine metre cinsinden yazılmalıdır.

$$P_m = 2 \left(\frac{2a}{m\pi w} \right) \sin \left(\frac{m\pi w}{2a} \right) + 3 \left(\frac{2a}{m\pi w} \right)^2 \cos \left(\frac{m\pi w}{2a} \right) - 6 \left(\frac{2a}{m\pi w} \right)^3 \sin \left(\frac{m\pi w}{2a} \right) - 6 \left(\frac{2a}{m\pi w} \right)^4 \cos \left(\frac{m\pi w}{2a} \right) - 6 \left(\frac{2a}{m\pi w} \right)^4 \quad (66)$$

Burada, w boşluğun yanındaki kenarın uzunluğunu temsil etmektedir. Denklemde yerine metre cinsinden yazılmalıdır.

$$Q_n = \left(\frac{2b}{n\pi g} \right) \cos \left(\frac{n\pi g}{2b} \right) + K \left[\left(\frac{2b}{n\pi g} \right) \sin \left(\frac{n\pi g}{2b} \right) - \left(\frac{2b}{n\pi g} \right) \left(\frac{2b}{n\pi h} \right) \sin \left(\frac{n\pi g}{2b} + \frac{n\pi h}{2b} \right) \sin \left(\frac{n\pi h}{2b} \right) \right] \quad (67)$$

$$R_n = \left(\frac{2b}{n\pi g} \right) \cos \left(\frac{n\pi g}{2b} \right) + K \left[\left(\frac{2b}{n\pi g} \right) \cos \left(\frac{n\pi g}{2b} \right) - \left(\frac{2b}{n\pi g} \right) \left(\frac{2b}{n\pi h} \right) \cos \left(\frac{n\pi g}{2b} + \frac{n\pi h}{2b} \right) \sin \left(\frac{n\pi h}{2b} \right) \right]$$

(68)

$$C_{te} = \frac{\frac{25}{16} b \left(1 - \frac{g}{b} + K \frac{h}{b} \right)^2}{\sum_{m=1,3,\dots} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{4P_m^2 R_n^2}{a \gamma_{mn} \Gamma_{mn}} \left(\frac{g}{b} \right)^2 \sinh(\gamma_{mn}h) \sinh(\gamma_{mn}(c-h))} \quad (69)$$

$$C_{tm} = \frac{\frac{25}{16} b \left(1 - \frac{g}{b} + K \frac{h}{b} \right)^2}{\sum_{m=1,3,\dots} \frac{2P_m^2}{m\pi \Gamma_{m0}} \left(1 - \frac{g}{b} + K \frac{h}{b} \right)^2 \sinh \left(\frac{m\pi h}{a} \right) \sinh \left(\frac{m\pi(c-h)}{a} \right) \dots} \quad (70)$$

$$\dots + \sum_{m=1,2,\dots} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{4P_m^2 R_n^2}{a \gamma_{mn} \Gamma_{mn}} \left(\frac{g}{b} \right)^2 \sinh(\gamma_{mn}h) \sinh(\gamma_{mn}(c-h))$$

Kapasite C_{te} ve C_{tm} değerleri, uygun K katsayısı seçilerek maksimize edilir.

$$C_0 = \frac{\frac{25}{16} (b-g)}{\sum_{m=1,3,\dots} \frac{2P_m^2}{m\pi \Gamma_{m0}} \sinh \left(\frac{m\pi h}{a} \right) \sinh \left(\frac{m\pi(c-h)}{a} \right)} \quad (71)$$

$$C_e = \frac{1}{2} (C_{te} - C_0) \quad (72)$$

$$C_m = \frac{1}{2}(C_{im} - C_0) \quad (73)$$

Burada, C_e ve C_m eşdeğer devrede sırasıyla kısa ve açık devreye karşılık gelen elektrik ve manyetik duvarların temsilidir.

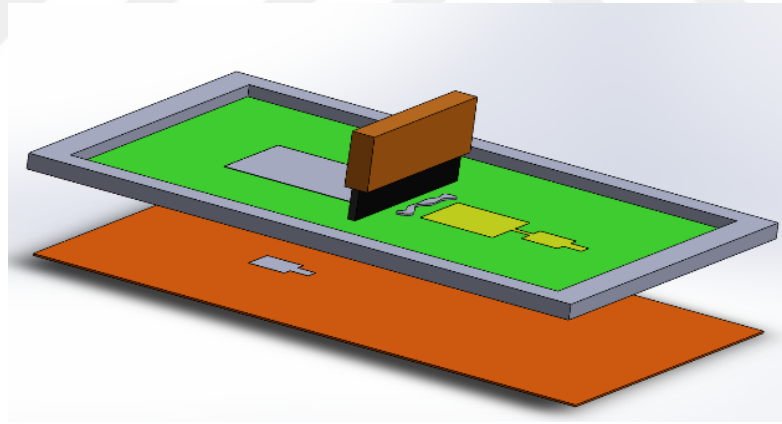
$$C_a = C_m \quad (74)$$

$$C_b = \frac{1}{2}(C_e - C_a) \quad (75)$$

Bu tez çalışmasında tasarlanan yeniden yapılandırılabilir antenler için g/W oranı için bir sınır yoktur ve boşluk kapasitansları için Maeda'nın sunmuş olduğu yöntem kullanılmıştır.

Serigrafi Tekniği

Anten tasarımı için geleneksel teknik, yama tasarımını oluşturmak için metalin çıkarılmasını gerektiren fotolitografik bir işlem kullanarak metalin aşındırılmasını içerir. Bu işlem, büyük miktarlarda kimyasal madde ve enerji gerektirdiğinden ve atık madde ürettiği için zararlı olarak kabul edilir. Ancak, serigrafi tekniği geleneksel tekniğe göre daha ucuz ve daha çevre dostudur (Şekil 17).



Şekil 17. Serigrafi tekniği ile desen aktarma

Serigrafi tekniği, farklı kalınlıklara ve iplik yoğunluklarına sahip dokuma bir elek üzerine kuruludur. Basılı bir desen üretmek için, bir silecek bıçağı desenin yukarisından aşağıya doğru macun ile birlikte baskı yapılarak çekilir. Bu da macunu ekranın açık alanlarından dışarıya alt tabaka üzerine atılmaya zorlar ve böylece istenen desen oluşturulur (Khaleel *et al.* 2013). Serigrafi, anten, RF ID, sensörler vb. birçok uygulama için en kolay, en ucuz ve en esnek üretim tekniklerinden biridir. Baskı tekniklerini kullanarak cam, metal, kağıt, tekstil, plastik, seramik ve ahşap gibi pek çok yüzey üzerinde hemen hemen her türlü tasarımı imal etmek mümkündür (Monne *et al.* 2018). Serigrafi tekniği yama üretimi için iletken mürekkep veya macun gerektirir. Gümüş boya, basılı elektronikler için iletken

macunlar veya mürekkepler arasında en iyi malzemelerden biridir. Basılı alanın iletkenliği ve kalınlığı yeterince yüksekse, antenin performansı bakır folyo antenle aynıdır. Ancak, iletken tabakanın kalınlığı cilt derinliğinden birkaç kat daha büyük olmalıdır (Mäntysalo and Mansikkamäki 2009). İletken gümüş macunu yamalı antenler, bakır eşdeğerine benzer bir performans sağlar (BARV and KARTIC 2014). Antenin bant genişliği artan yüzey direncine bağlı olarak arttığından (Urbani *et al.* 2011), gümüş macun yamalı antenler aynı geometri için bakır antenlere göre daha büyük bant genişliğine sahiptir.



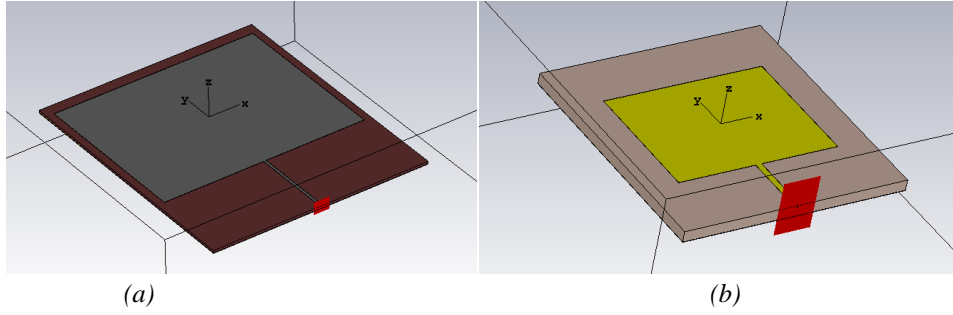
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Mikroşerit Anten Tasarımları ve Üretimi

Verimli, düşük profilli ve üretimi kolay mikroşerit antenler, 5G uygulamaları için yüksek performans, güvenilir ve parazitsiz iletişim sağlamak için iyi adaylardır. 5G için karşılanması gereken bazı önemli tasarım gereksinimleri ise giyilebilir teknolojiler için esneklik, geniş bant aralığı ve izin verilen çalışma frekanslarına uygunluktur (Koc Polat *et al.* 2019). Çalışmanın bu bölümünde, 5G için öngörülen 4,4-4,9 GHz frekans aralığında tek bantta çalışan esnek ve esnek olmayan mikroşerit yama antenleri üretilmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Antenler iletim hattı modeli kullanılarak CST Microwave Studio programında tasarlanmıştır. Tasarlanan antenlerden biri FR4 alt tabaka üzerine bakır yama kullanılarak tasarlanmıştır. FR4 alt tabaka ile iyi bir bant genişliği ve nispeten düşük geri dönüş kaybı elde edilebilir. Bununla birlikte, bu malzemenin esnek bir yapıya sahip olmaması, uygulama alanını daraltmaktadır. Bunun üzerine, esnek yapıya sahip olan kapton alt tabaka üzerine bakır yama kullanılarak başka bir anten tasarlanmıştır. Kapton polimid filmi; fiziksel, kimyasal ve elektriksel özelliklerin iyi dengesi ile bir anten alt tabakası olarak geniş bir frekansta düşük kayıp faktörüne ($\tan \delta = 0,0026$) sahip esnek bir malzemedir. Dahası, kapton polimid, çok düşük profilli (125 μm), 73 ° F'da 165 MPa'lık bir çekme dayanımı, 3500-7000 vol/ mil dielektrik dayanımı ile oldukça sağlam bir materyaldir. Çalışmanın devamında kapton-bakır yama anteni için farklı alt tabaka kalınlıklarındaki sonuçlar incelenmiştir. Bununla birlikte, alt tabakanın kalınlığının artırılması malzemenin esnekliğini azaltmaktadır. Üretilen diğer antenler, yama malzemesi olarak mikro-gümüş macunu kullanılarak değişken sıcaklıklarda üretilen kapton alt tabaka üzerinde tasarlanan antenlerdir. Bu son üretim ile mükemmel iletken yamaya (bakır veya gümüş) kıyasla daha yüksek bant genişliğinin ve daha iyi geri dönüş kaybının elde edildiği görülmektedir.

Mikroşerit antenler için tam dalga modeli

İletim hattı modelini kullanarak FR4 ve kapton polimid alt tabakaları üzerinde tasarlanan antenler Şekil 18'de gösterilmiştir. 4,65 GHz'de çalışacak antenlerin elektriksel boyutları Tablo 1'de verilmiştir. FR4'ün dielektrik sabiti kaptondan daha büyük olduğundan, FR4 bazlı antenin boyutu kapton bazlı antenden daha küçüktür (bkz. Denklem (22-27)).

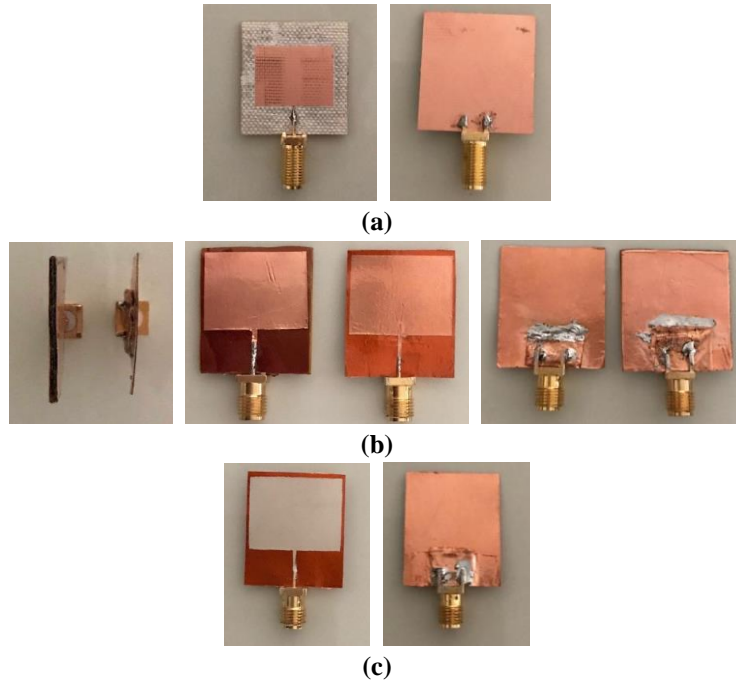


Şekil 18. 4,65 GHz’de tasarımı yapılan düzlemsel mikroşerit yama anteni geometrisi, (a) Kapton alt tabaka-gümüş yama, (b) FR4 alt tabaka-bakır tabaka

Tablo 1. Mikroşerit yama antenleri için yama boyutları

	f_0 (GHz)	ϵ_r	h (mm)	L (mm)	W (mm)	L_g (mm)	W_g (mm)
FR4 (bakır yama)	4,65	4,3	1,3	15,0	19,6	22,8	27,4
Kapton (gümüş yama)	4,65	3,5	0,125	17,23	21,51	17,98	22,26

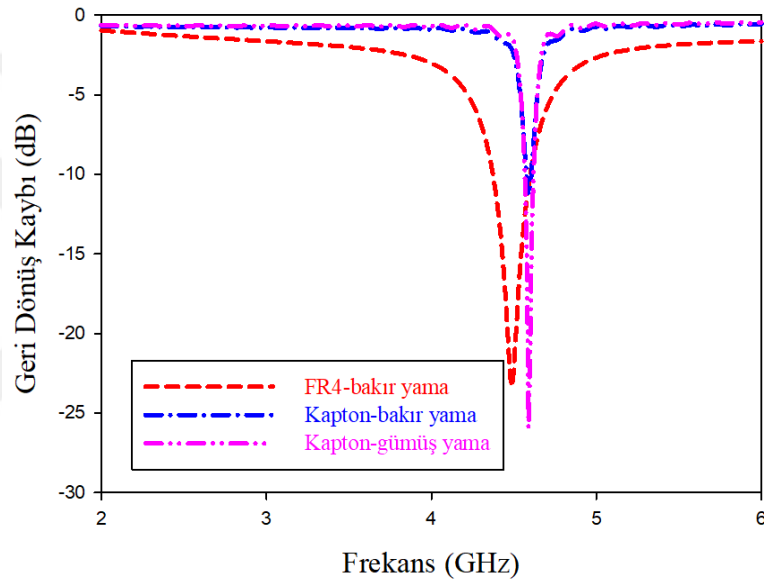
FR4 alt tabakaya sahip bakır mikroşerit yama anteni PCB baskı devre cihazı ile üretilmiştir. Kapton alt tabakaya sahip bakır yama antenleri, kapton alt tabaka üzerine toprak ve yama şekillerinin bakır bant kullanılarak yapılandırılması ile oluşturulmuştur. Son olarak, kapton alt tabaka üzerine gümüş yama kullanılarak antenler tasarlanmıştır. Kapton alt tabaka üzerindeki gümüş iletken yama anteni benzetim ortamında sürekli iletken olarak tasarlanmıştır. Üretim sürecinde, serigrafi tekniği kullanılarak kapton üzerine gümüş macun (mikro malzeme dokulu yüzey) serilir. Bu teknik sayesinde, gümüş macun mikroşerit yama antenlerinin imal edilmesi kolaylaşmıştır. Üretilen mikroşerit yama antenleri Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 19. Farklı malzemelere ait 4,65 GHz de üretilen düzlemsel antenlerin görselleri, (a) FR4 alt tabaka- bakır yama anteninin üst ve alt görünüşleri, (b) Kapton alt tabaka- bakır yama anteninin yan, üst ve alt görünüşleri, (c) Kapton alt tabaka- gümüş macun yama anteninin üst ve alt görünüşleri

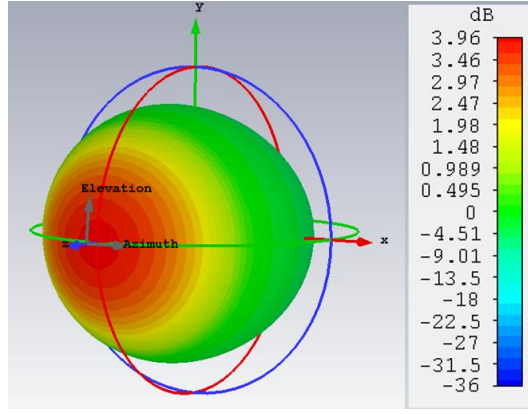
Mikroşerit antenlerin benzetim sonuçlarının karşılaştırmalı incelenmesi

Benzetim ortamında FR4 ve kapton alt tabakalar üzerine tasarlanan antenlere ait geri dönüş kaybı benzetim sonuçları Şekil 20’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, bakır yamalı FR4 bazlı antenin 4,49 GHz rezonans frekansında 223 MHz bant genişliğine, bakır yamalı kapton bazlı antenin 4,59 GHz rezonans frekansında 31 MHz bant genişliğine ve gümüş yama kapton bazlı antenin 4,59 GHz rezonans frekansında 52,8 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, en yüksek h değerine sahip esnek olmayan FR4 bazlı bakır yama anteni en büyük bant genişliğine sahiptir. Bununla birlikte, gümüş yama anteni daha düşük geri dönüş kaybı ile esnek bir malzeme olan kapton alt tabaka üzerindeki bakır banttan daha iyi bir bant genişliğine sahiptir.

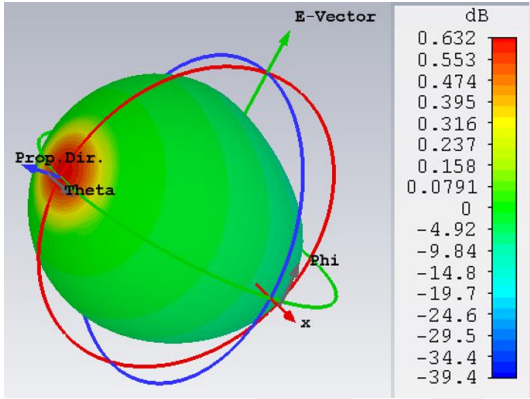


Şekil 20. Benzetim ortamında farklı malzemelere ait antenlerin yansıma katsayıları (S11)

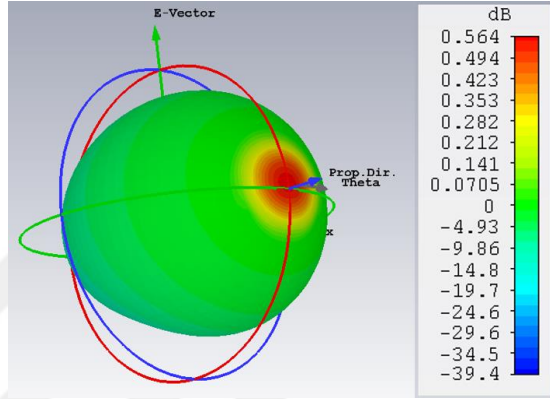
Benzetim ortamında farklı antenlere ait 3B uzak-alan kazanç örüntüleri Şekil 21’de verilmektedir. Kazanç değerleri incelendiğinde, kapton alt tabakaya göre daha yüksek h değerine sahip esnek olmayan FR4 malzemesinin 3,96dB değeri ile en iyi kazancı verdiği görülmektedir. Kapton- gümüş yama anteni ise 0,632dB’lik değer ile kapton-bakır yama anteninin 0,564dB değerine göre nispeten daha iyi kazanç değeri vermiştir.



(a)



(b)



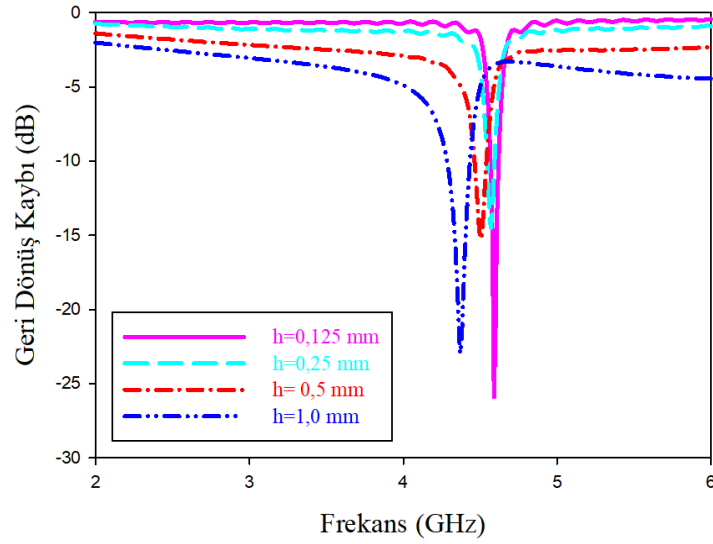
(c)

Şekil 21. Benzetim ortamında farklı antenlere ait 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) FR4-bakır yama, (b) Kapton-gümüş yama, (c) Kapton-bakır yama

Kapton alt tabaka üzerinde gümüş yamanın daha iyi sonuç vermesi ile bu antene ait farklı h değerleri için tasarlanan antenlerin geri dönüş kaybı benzetim sonuçları Şekil 22’de gösterilmiştir. Kalınlığın 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm ve 1,0 mm değerleri için sırasıyla 4,59 GHz rezonans frekansında 52,2 MHz, 4,57 GHz rezonans frekansında 48,4 MHz, 4,5 GHz rezonans frekansında 77 MHz ve 4,37 GHz rezonans frekansında 148 MHz bant genişlikleri elde edilmiştir. Kalınlığın artması ile birlikte bant genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. 0,125mm kalınlığında 0,25mm kalınlığına göre daha büyük bant genişliği elde edilmesinin sebebi, altabaka kalınlığının $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$ sınırları içinde kalması gerekliliği ile açıklanabilir. Aşağıdaki hesaplamada görüldüğü gibi 0,125 mm değeri verilen sınırın en küçük değerinden daha küçüktür.

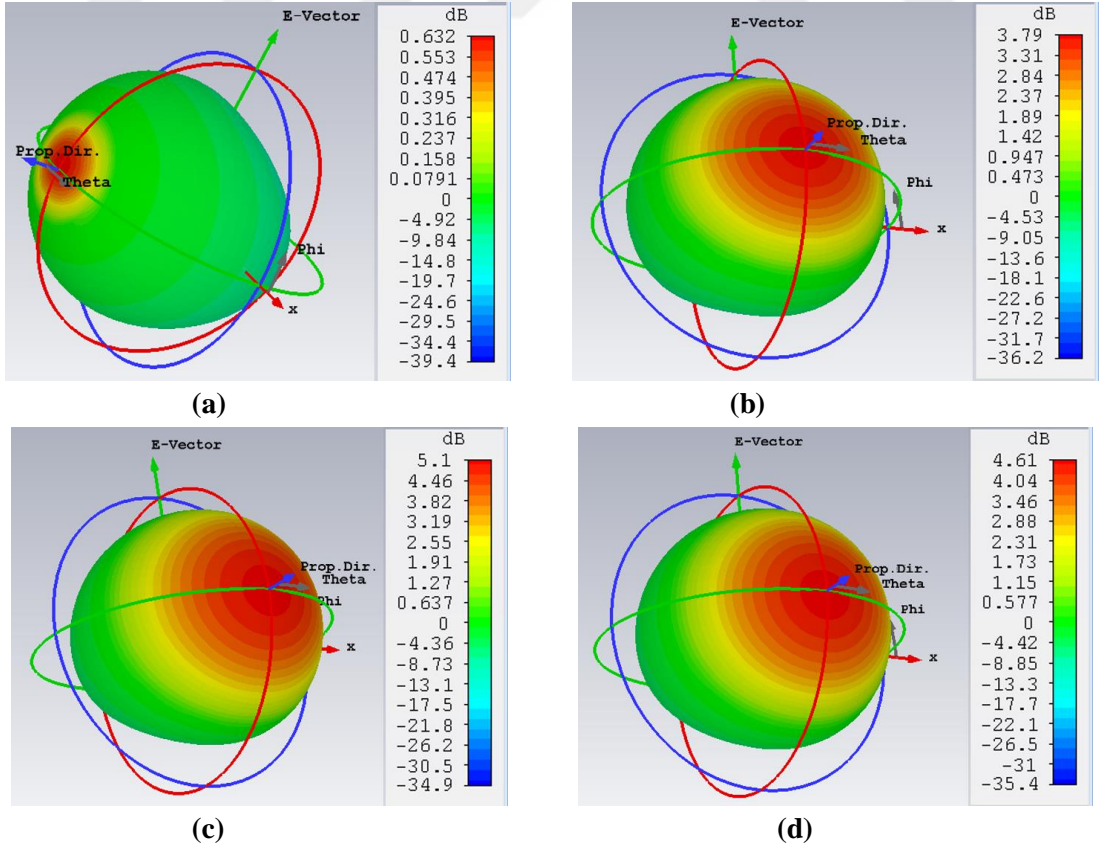
$$4,65 \text{ GHz antenin dalga boyu; } \lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{4,65 \times 10^9} = 0,065$$

$$0,003 \times \lambda_0 = 0,003 \times 0,065 = 0,0001935 \text{ m} = 0,1935 \text{ mm}$$



Şekil 22. Farklı kapton alt tabaka kalınlıkları (h) ile benzetimi yapılan antenlerin yansıma katsayıları

Benzetim ortamında farklı h değerlerine ilişkin antenlerin 3B uzak-alan kazanç örüntüleri Şekil 23'te verilmektedir. 3B uzak alan kazanç örüntüleri incelendiğinde; 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm ve 1,0 mm h değerleri için sırasıyla 0,632 dB, 3,79 dB, 5,1 dB ve 4,61 dB'lik kazanç değerleri elde edilmiştir. h değeri arttıkça kazancın belirli sınırlar dahilinde arttığı gözlemlenmiştir. h 'nin artırılması yüzey dalgası uyarımı gibi istenmeyen etkilere yol açar, bu da verimliliği azaltır ve ışınma örüntüsünde bozulmalara sebebiyet verir.

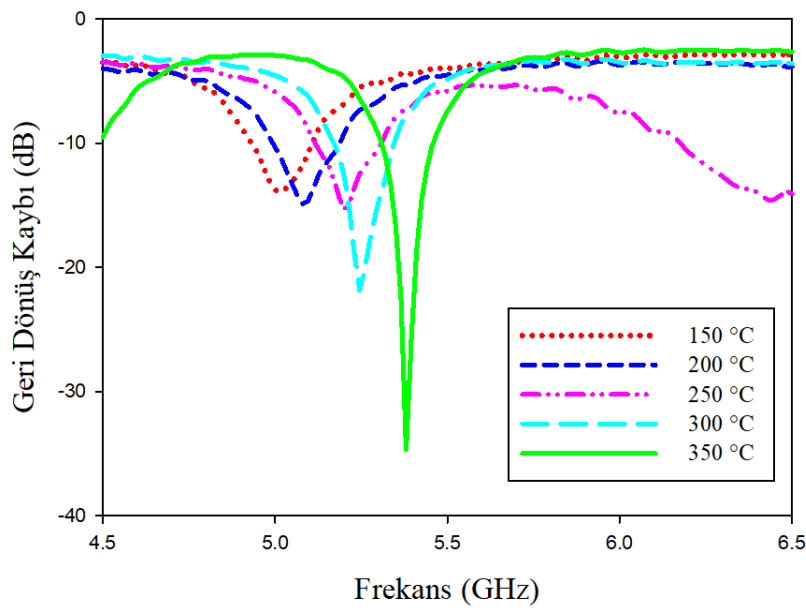


Şekil 23. Benzetim ortamında farklı h değerlerine sahip antenlerin 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) $h=0,125$ mm, (b) $h=0,25$ mm, (c) $h=0,5$ mm, (d) $h=1,0$ mm

SEM analizi

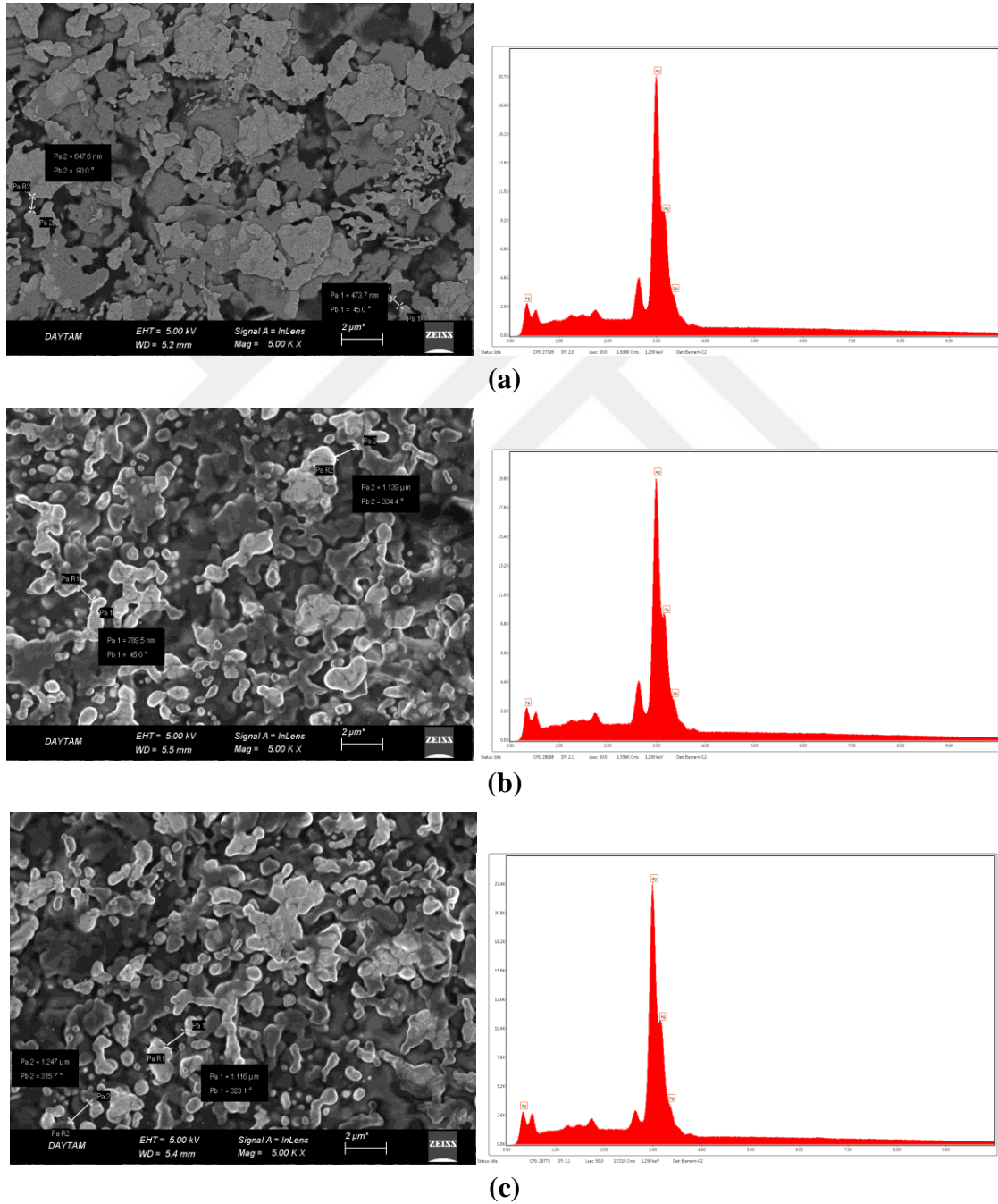
Bu bölümde, kapton-bakır yama antenine göre nispeten daha iyi performans sergileyen kapton-gümüş yama anteninin performansını iyileştirmek için farklı sinterleme sıcaklıklarının etkisi incelemiştir. Serigrafi baskı ile üretilen kapton-gümüş macun yama antenine sinterleme işlemi uygulanır. Üretim aşamasında, ilk olarak, gümüş macundan çözücüyü tamamen buharlaştırmak için, basılan desenler 20 dakika boyunca 120°C’de kurutulur. İkinci aşamada, kapton alt tabakanın erime noktasının altında olan 150°C ile 350°C arasındaki sinterleme sıcaklıklarında konveksiyon fırınına yerleştirilirler. Tek tek antenler, 150-200-250-300-350°C olmak üzere beş farklı sıcaklıkta 15 dakika boyunca argon % 5 hidrojene maruz bırakılarak ısıtılır. Daha sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilirler. Ardından, alt tabakanın altında anten toprağı olarak gümüşün iletkenliğine yakın olan bakır bant tercih edilerek SMA konnektörünün üretilen antene daha iyi bağlanması sağlanır.

Farklı sinterleme sıcaklıklarına sahip imal edilmiş antenlerin ölçülen geri dönüş kaybı sonuçları (S11) Şekil 24’te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, 150 °C’de ısıtılmış antenin 5,01 GHz rezonans frekansında 176,9 MHz bant genişliğine, 200 °C’de ısıtılmış anten 5,08 GHz rezonans frekansında 193,8 MHz bant genişliğine, 250 °C’de ısıtılmış anten 5,2 GHz rezonans frekansında 192,2 MHz bant genişliğine, 300 °C’de ısıtılmış antenin 5,24 GHz rezonans frekansında 172,8 MHz bant genişliğine ve 350 °C’de ısıtılmış antenin 5,32 GHz rezonans frekansında 148,6 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Değerler, sıcaklık arttıkça rezonans frekansının arttığını, bant genişliğinin azaldığını ve geri dönüş kaybının genellikle azaldığını göstermektedir.

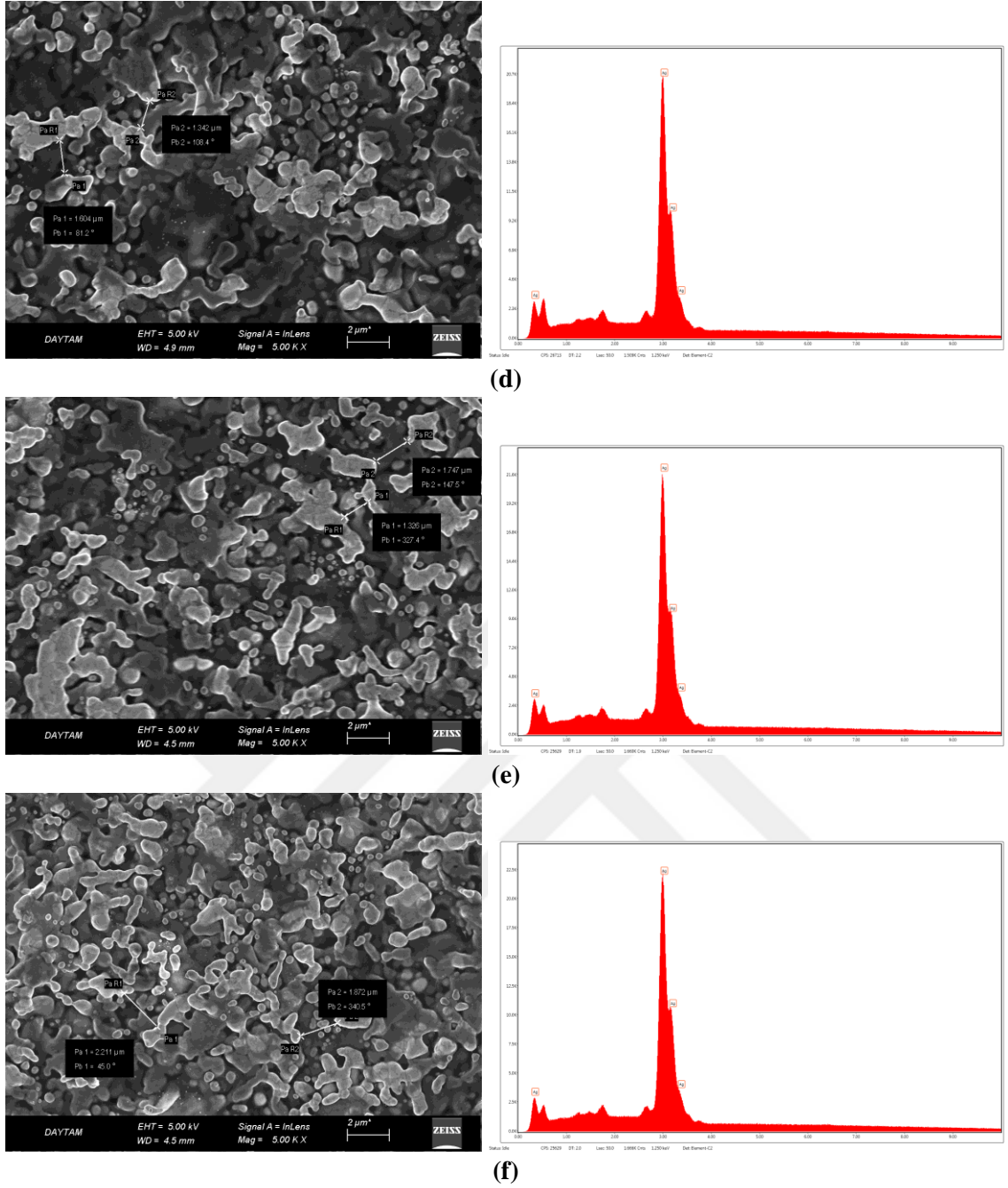


Şekil 24. Farklı sinterleme sıcaklıkları ile üretilen antenlerin ölçülen yansıma katsayıları (S11)

Farklı sıcaklıklarda üretilen antenlere ait SEM görüntüleri ve EDX analizi sonuçları Şekil 25’te verilmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde gözenek boyutları sıcaklık artıçça büyümüştür. Rezonans frekansındaki artış, gümüş macunun artan sıcaklıkla birlikte büyüyen gözenekler ile açıklanabilir. Çünkü gözenek boyutundaki artış, iletkenin toplam boyutunun düştüğü anlamına gelir. EDX grafiklerinde ise gümüş (Ag) oranının yüksek olduğu görülmektedir. Serigrafi üretimi esnasında gümüş uygulanırken işlemler el ile yapıлып, her uygulamada farklı baskı oluşabildiğinden antenlerin Ag miktarlarında farklılıklar gözlemlenmiştir.



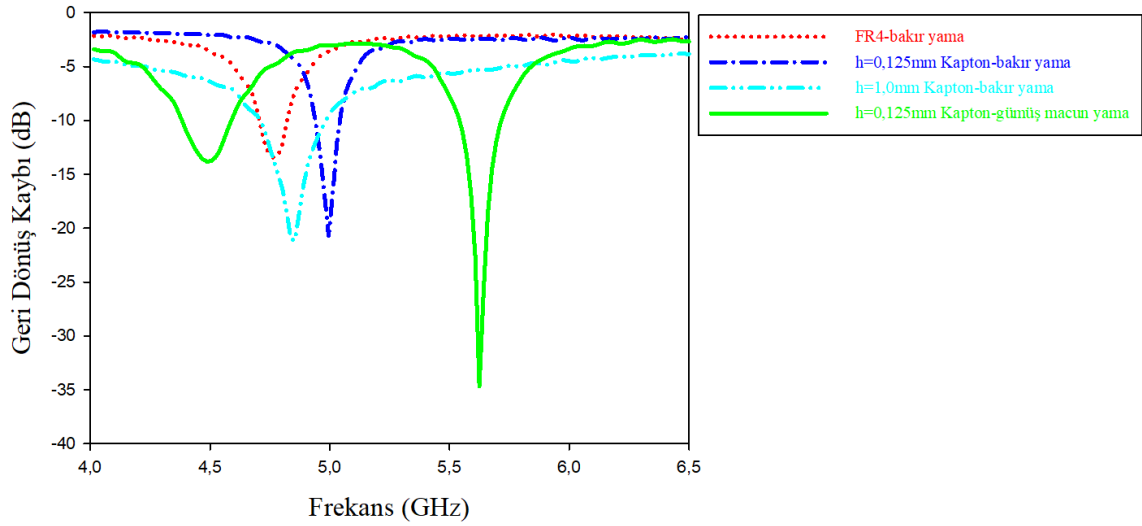
Şekil 25. Farklı sinterleme sıcaklıklarında gümüş macununun FE-SEM görüntüleri; (a) 120°C, (b) 150°C, (c) 200°C,



Şekil 25. Farklı sinterleme sıcaklıklarında gümüş macununun FE-SEM görüntüleri; (d) 250°C, (e) 300°C ve (f) 350°C (devam)

Mikroşerit antenlerin ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı incelenmesi

FR4 ve kapton alt tabakalar ile üretimi yapılan antenlerin ölçülen geri dönüş kaybı sonuçları Şekil 26’da gösterilmiştir. Şekilde, FR4 bazlı anteni 4,76 GHz rezonans frekansında 115 MHz bant genişliğine, $h = 0,125$ mm kapton-bakır yama anteni 4,99 GHz rezonans frekansında 103,3 MHz bant genişliğine, $h = 1$ mm kapton-bakır yama anteni 4,84 GHz rezonans frekansında 268 MHz bant genişliğine, 350 °C’de sinterleme yapılan kapton-gümüş macun yama anteni 4,41 GHz rezonans frekansında 175 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Düşük geçirgenliğe sahip kalın bir kapton alt tabaka, daha yüksek geçirgenliğe sahip kalın bir FR4 alt tabakaya göre daha iyi bant genişliği ile sonuçlanmıştır.



Şekil 26. Farklı malzemeler ile üretilen antenlerin ölçülen yansıma katsayıları (S11)

Benzetim ve üretimi yapılan antenlerin ölçümlerinden elde edilen rezonans frekansı, bant genişliği ve geri dönüş kaybı Tablo 2’de verilmiştir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, kapton alt tabakanın FR4’ten daha düşük geri dönüş kaybı ve daha yüksek bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Bu parametreler kaptonun kalınlığının artırılmasıyla daha da geliştirilebilir. Ancak, alt tabaka kalınlığının artırılması, antenin esnek yapısını olumsuz yönde etkileyecektir.

Tablo 2. Benzetimi ve üretimi yapılan antenlere ait sonuçlar

Malzemeler	Benzetim			Ölçüm		
	f_r (GHz)	BW (MHz)	RL (dB)	f_r (GHz)	BW (MHz)	RL (dB)
FR4 (bakır yama)	4,49	223	-23,348	4,76	115	-13,45
h=0.125 mm Kapton (bakır yama)	4,59	31	-11,9	4,99	103,3	-20,189
h=1 mm Kapton (bakır yama)	4,37	148	-12,281	4,84	268	-21,118
h=0.125mm Kapton (gümüş yama)	4,59	52,8	-25,899			
h=0.125mm Kapton (gümüş macun yama)				5,32	148,6	-34,66

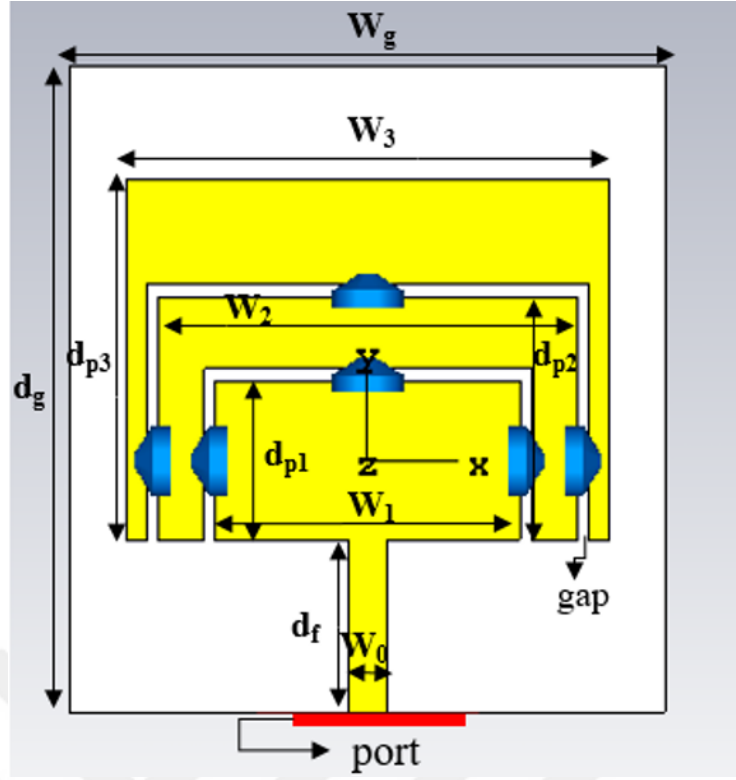
Yeniden Yapılandırılabilir Mikroşerit Yama Anteni Tasarımı

Çalışmanın bu bölümü yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı ve yapılandırmasını içermektedir. Ortak besleme kullanılarak birden fazla frekans arasında geçiş yapması hedeflenen yeniden yapılandırılabilir antenlerde empedans uyumu problemi ile karşılaşmak olası bir durumdur. Eşdeğer devre tabanlı çözüm modeli kullanılarak bu problemin üstesinden

gelinebilir (Koc Polat *et al.* 2020). Bu çalışmada, eşdeğer devre tabanlı çözüm modelini kullanarak tasarımı gerçekleştirilen yeniden yapılandırılabilir bir mikro şerit yama anteni FR4 alt tabaka üzerine tasarlanmıştır. $48,19 \times 38,36 \times 1,53$ mm³ boyutlarındaki bu anten; 2,45 GHz (Wi-Fi), 3,6 GHz (Wi-MAX ve 5G), 5,4 GHz (WLAN ve 5G) frekansları arasında geçiş yapabilmektedir. Önerilen yeniden yapılandırılabilir mikro şerit yama anteni, esas olarak antenin elektrik uzunluğunun, yamalar boyunca yerleştirilen kapasitörler vasıtasıyla yeniden yapılandırılmasıyla tasarlanmıştır. Ayrıca, kapasitans değerleri, rezonans frekanslarına dayanan empedansları eşleştirerek dalganın bir yamadan diğerine düzgün iletimi için ayarlanır. Antenin elektriksel boyutu değiştirilir, böylece yapay anahtarlar nedeniyle yamalar arasında iletim sağlanıp sağlanmadığına bağlı olarak farklı çalışma frekansları elde edilir. Mikroşerit antenlerin temel parametreleri, iletim hattı modeli kullanılarak elde edilmiştir. Mikroşerit hat beslemesi ise Çeyrek Dalga Dönüştürücüsüne göre belirlenir. Önerilen anten için tam dalga benzetimleri CST Microwave Studio yazılımı ile yapılmış ve eşdeğer devre modeli AWR yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Yeniden yapılandırılabilir mikroşerit yama anteni için tam dalga modeli

İletim hattı modeli ilk önce 5,4 GHz, 3,6 GHz ve 2,45 GHz antenleri için yamaların boyutlarını belirlemek için kullanılır. Daha sonra, 5,4 GHz antenin mikro şerit besleme hattı, (Sharma *et al.* 2017)'da verilen çeyrek dalga boyu dönüştürücüsüne göre belirlenir. 5,4 GHz, 3,6 GHz ve 2,45 GHz anten yamaları için iletken bakır tabakaları, iki yamanın birleştirilmesinde ve empedans eşleşmesinde kullanılan ek devre elemanlarının yerleştirilmesi için 1 mm boşluk bırakılarak uygun şekilde birleştirilir. Bununla birlikte, 5,4 GHz antenin besleme hattının artık 3,6 GHz yaması için çeyrek dalga boyu dönüştürücüsü olmadığı unutulmamalıdır. Böylece bir empedans uyumsuzluğu ortaya çıkar. Denklem (28) uygun empedans eşleşmesi için yeni bir Z_a değeri hesaplamak için kullanılır. İlk olarak, Z_a değeri, besleme hattı uzunluğu (d_f), 3,6 GHz anten dalga boyu (λ), 5,4 GHz antenin mikroşerit besleme hattı empedansı (Z_0) ve 50Ω giriş empedansı kullanılarak hesaplanır. Daha sonra, 3,6 GHz antenin yama uzunluğu (d_2) sabit tutularak, W_2 genişliğiyle birlikte Denklem (31)'de yerine konular ve bu denklem W_2 bilinmeyenini çözer. Son olarak, 2,4 GHz anten dalga boyu kullanılarak Denklem (28)'den yeni bir Z_a değeri hesaplanır ve yine Denklem (31)'de bu Z_a değerini sağlayacak W_3 değeri, d_3 değeri sabit tutularak elde edilir.



Şekil 27. Yeniden yapılandırılabilir antenin geometrisi

FR4 alt tabaka üzerinde tasarlanan yeniden yapılandırılabilir anten, Şekil 27'de gösterilmiştir. Ticari olarak temin edilebilir, uygun fiyatlı ve uygulanabilir FR4 alttaşı, 4,3 elektriksel geçirgenliğe (ϵ_r) ve 0,019 tanjant kaybına ($\tan \delta$) sahiptir. Her ışıma yapan yama arasında 1 mm boşluk bırakılmıştır. Alttaşın yüksekliği (h) 1,53 mm'dir. Yeniden yapılandırılabilir antenin ışıma yapan elemanı için hesaplanan elektrik boyutları Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Önerilen antenin boyutları

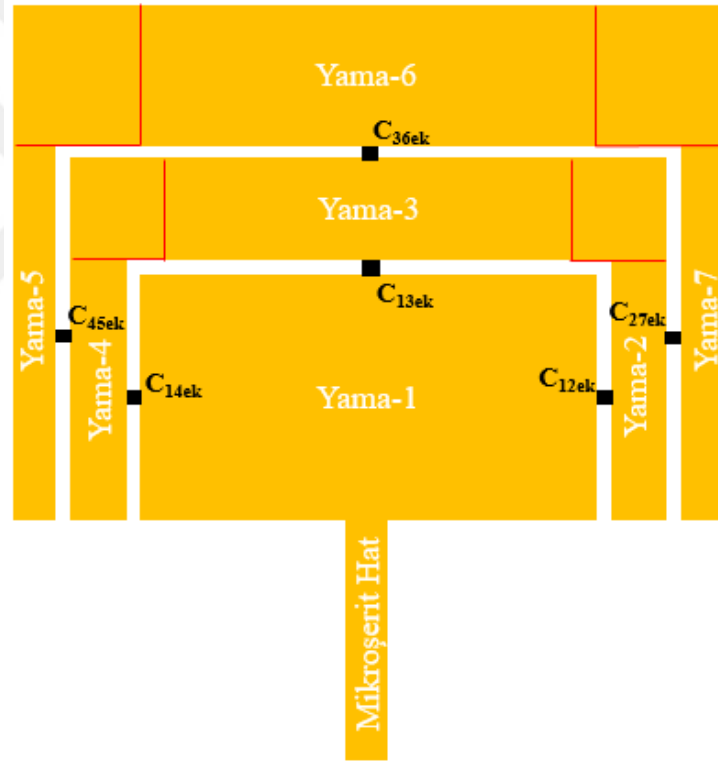
Boyut	Değeri (mm)	Boyut	Değeri (mm)
h	1,53	W_0	3,00
d_{p1}	12,87	W_g	48,19
d_{p2}	19,67	W_1	24,60
d_{p3}	29,18	W_2	33,85
d_f	13,88	W_3	39,01
d_g	38,36	g	1,00

Yeniden yapılandırılabilir mikroşerit yama anteni için eşdeğer devre modeli

Yeniden yapılandırılabilir anten için ortak bir besleme hattının kullanıldığı empedans uyumsuzluğu sorunu ile karşı karşıya kalmak çok olasıdır. Eşdeğer devre modeli bize bu sorunu çözmek için basit bir toplu eleman yerleştirerek iyi bir yaklaşım sunar. Bu eleman için doğru değeri belirlemek amacıyla antenin doğru şekilde modellenmesi gerekir. Yeniden

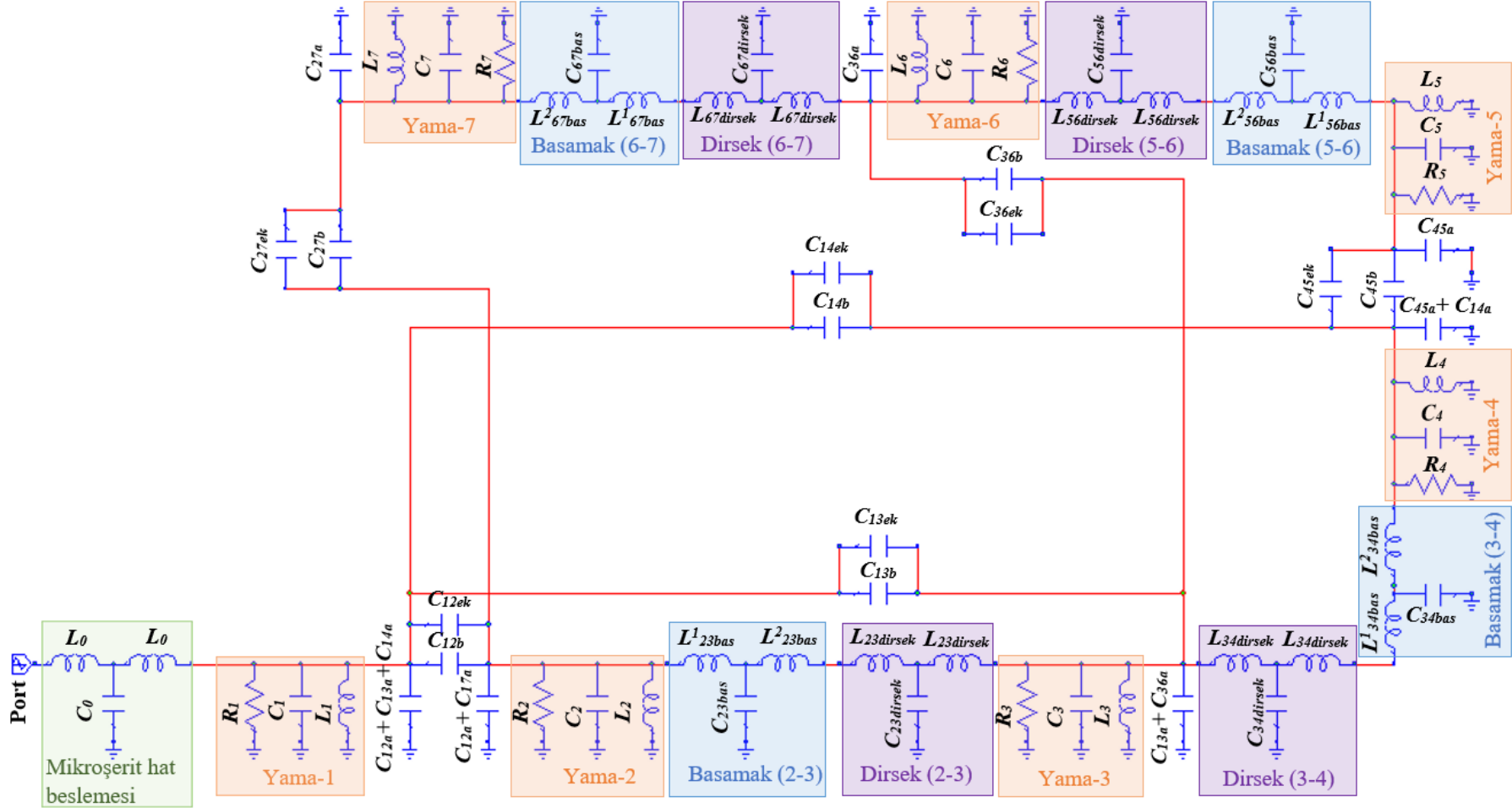
yapılandırılabilir yama antenlerinin tipik süreksizlikleri; basamaklar, dirsekler ve boşluklardır. Bu bölümde ayrıntılı olarak açıklandığı gibi antenin çeşitli parçaları için modelleri kullanarak çok detaylı bir eşdeğer devre kullanılmıştır.

Bölümlendirilmiş yeniden yapılandırılabilir anten yapısı ve boşluk kapasitörleri Şekil 28’de gösterilmektedir. Önerilen anten dirsekleri 90° bir açığa sahiptir. Dirsek bükülmelerinde şerit genişliği eşit değildir ve Şekil 28’deki kırmızı hat ile gösterilen büyük kenar hesaplamaları yaparken kullanılır. Empedans eşleştirme kapasitörleri (C_{mnek}), yamalar (ya da yama genişliğinin orta noktası) arasındaki boşluk boyunca simetri sağlanacak şekilde eklenir. C_{mnek} kapasitörleri akım yoğunluğunun fazla olduğu orta noktalara yerleştirilmiştir. Tüm boşluk, yama ve süreksizliklerin eşdeğer devreleri C_{mnek} kapasitörleri ile birlikte Şekil 29’da gösterilmektedir. Her renkli dikdörtgen kutu yamanın bir yapısı ile ilgilidir (yamanın kendisi, adım, dirsek süreksizliği gibi).



Şekil 28. Süreksizlikler ve empedans eşleştirme kapasitansları ile birlikte sunulan önerilen anten yapısı

Bu tür yapılandırmanın temel avantajı, ayarlama çabalarına çok az yer bırakarak tasarım ve hesaplamaları daha sağlam hale getirmektir. Yamanın yapısı, aynı metodoloji uygulanarak daha yüksek frekanslara bile genişletilebilir. Elde edilen ayrıntılı değerler Tablo 4’te sunulmaktadır.



Şekil 29. Önerilen anten için eşdeğer devre modeli

Tablo 4. Toplu elemanların detaylı değerleri

Antenin Bölümü	Eleman	Değeri	Eleman	Değeri	Elaman	Değeri
Mikroşerit Hat Beslemesi	L_0	0,22 nH	C_0	0,34 pF	-	-
Yama-1	R_1	148,04 Ω	C_1	3,57 pF	L_1	0,24nH
Boşluk (1-2)	C_{12a}	1,84x10 ⁻⁶ pF	C_{12b}	1,71x10 ⁻⁶ pF	-	-
Yama-2	R_2	115,50 Ω	C_2	0,54 pF	L_2	0,19 nH
Basamak (2-3)	L^1_{23bas}	48,59 nH	L^2_{23bas}	37,02 nH	C_{23bas}	1432,1 pF
Dirsek (2-3)	$L_{23dirsek}$	0,55 nH	$C_{23dirsek}$	1,09 pF	-	-
Yama-3	R_3	89,75 Ω	C_3	1,44 pF	L_3	0,15 nH
Boşluk (1-3)	C_{13a}	3,53x10 ⁻⁴ pF	C_{13b}	3,28x10 ⁻⁴ pF	-	-
Dirsek (3-4)	$L_{34dirsek}$	0,55 nH	$C_{34dirsek}$	1,09 pF	-	-
Basamak (3-4)	L^1_{34bas}	37,02 nH	L^2_{34bas}	348,59 nH	C_{34bas}	1432,1 pF
Yama-4	R_4	115,50 Ω	C_4	0,54 pF	L_4	0,19 nH
Boşluk (1-4)	C_{14a}	1,84x10 ⁻⁶ pF	C_{14b}	1,71x10 ⁻⁶ pF	-	-
Boşluk (4-5)	C_{45a}	5,64x10 ⁻⁵ pF	C_{45b}	5,24x10 ⁻⁵ pF	-	-
Yama-5	R_5	64,02 Ω	C_5	0,36 pF	L_5	0,11 nH
Basamak (5-6)	L^1_{56bas}	392,47 nH	L^2_{56bas}	155,95 nH	C_{56bas}	4200,4 pF
Dirsek (5-6)	$L_{56dirsek}$	0,80 nH	$C_{56dirsek}$	2,25 pF	-	-
Yama-6	R_6	123,91 Ω	C_6	2,09 pF	L_6	0,20 nH
Boşluk (3-6)	C_{36a}	5,4x10 ⁻³ pF	C_{36b}	0,005 pF	-	-
Dirsek (6-7)	$L_{56dirsek}$	0,8 nH	$C_{56dirsek}$	2,25 pF	-	-
Basamak (6-7)	L^1_{67bas}	155,95 nH	L^2_{67bas}	392,47 nH	C_{67bas}	4200,4 pF
Yama-7	R_7	64,02 Ω	C_7	0,36 pF	L_7	0,11 nH
Boşluk (2-7)	C_{27a}	5,64x10 ⁻⁵ pF	C_{27b}	5,24x10 ⁻⁵ pF	-	-

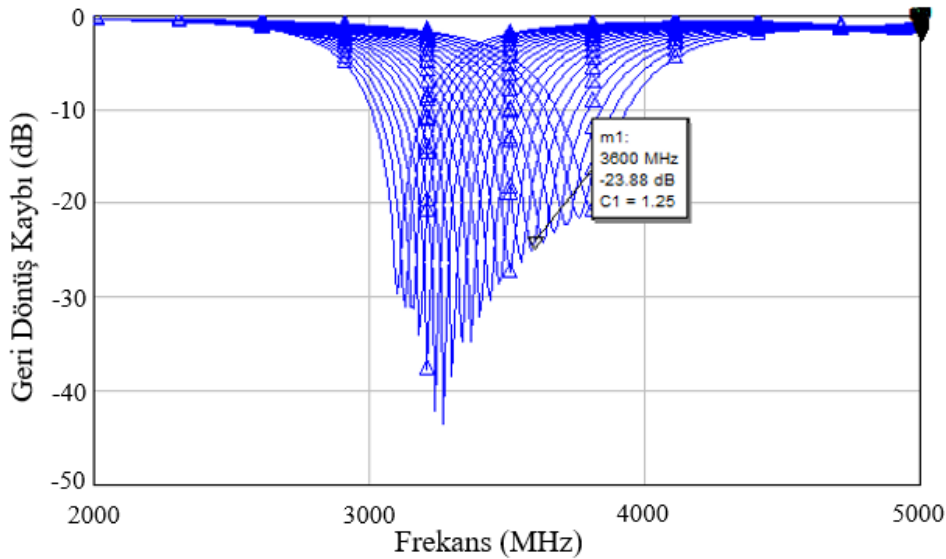
C_{mnek} kapasitörü, anteni istenen frekansta çalıştırmak için boşluğa bağlanır. Böylece, yeniden yapılandırılabilir antenin mevcut dağılım değişikliği elde edilir. Yapay bir anahtar olarak altı adet kapasitör (paralel kapasitör- C_{mnek}) üç farklı mod elde etmek için kullanılır. Önerilen antenin frekans modlarına ilişkin ayrıntılı açıklama Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Önerilen antenin çalışma modları

Mod	Frekans (GHz)	$C_{12ek} = C_{13ek} = C_{14ek}$ (pF)	$C_{45ek} = C_{36ek} = C_{27ek}$ (pF)
Mod-1	CST:	5,27	-
	AWR:	5,35	-
	Ölçüm:	5,40	-
Mod-2	CST:	3,59	1,02
	AWR:	3,60	1,25
	Ölçüm:	3,60	1,12
Mod-3	CST:	2,41	3,50
	AWR:	2,41	3,42
	Ölçüm:	2,45	3,25

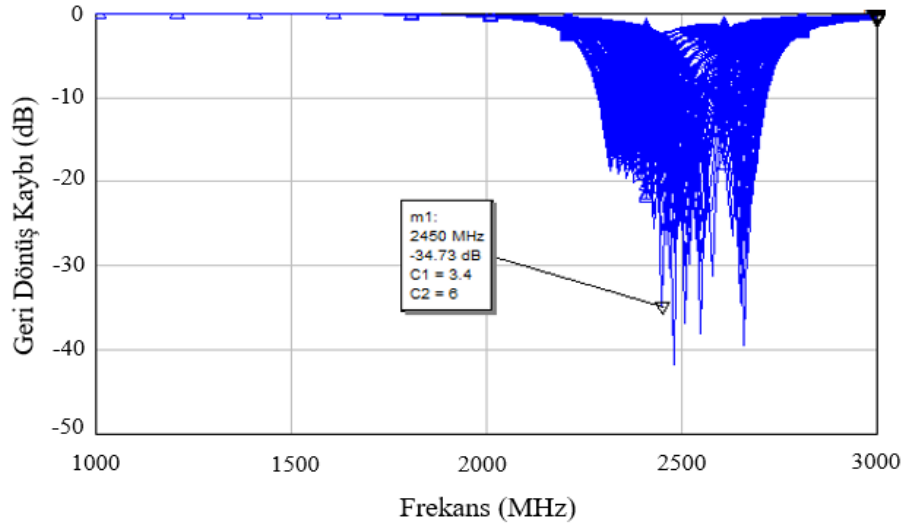
C_{mnek} kapasitörlerinin değerlerini hesaplamak için, CST programında optimizasyon aracı kullanılmıştır. CST programı aracılığıyla önerilen anteni Mod-2'ye ayarlamak için paralel bağlanan empedans eşleştirme kapasitörü değerleri ($C_{12ek} = C_{13ek} = C_{14ek}$) 1,02 pF olmalıdır. Anteni Mod-3'e ayarlamak için paralel bağlanan empedans eşleştirme kapasitörü değerleri ($C_{12ek} = C_{13ek} = C_{14ek}$) ve ($C_{45ek} = C_{36ek} = C_{27ek}$) sırasıyla 3,5 pF ve 1,95pF olmalıdır. Şönt boşluk kapasitörlerine paralel bağlanan empedans eşleştirme kapasitörü bağlı değilse, anten Mod-1'de çalışır.

AWR programında ise değişken C_{mnek} kapasitörlerine ait yansıma katsayısı grafikleri çizdirilerek (Şekil 30) istenilen rezonans frekansına ait grafiğin hangi C_{mnek} kapasitör değerinde elde edildiği incelenmiştir. Analiz için kapasitans ayarı ile birlikte yansıma katsayısı ölçümü için AWR programı CST programından yaklaşık 4 kat daha hızlı çalışmıştır. Ayrıca, her tasarım değişikliğinin, tasarım aşamasında da zaman kazandıran eşdeğer devre üzerinden çok kolay bir şekilde gerçekleştirilebileceği de not edilmelidir.



(a)

Şekil 30. Değişken C_{mnek} kapasitörlerine ait yansıma katsayıları grafikleri; (a) Antenin Mode-2 durumu ($C_{12ek}=C_{13ek}=C_{14ek}=C1=1,25$),



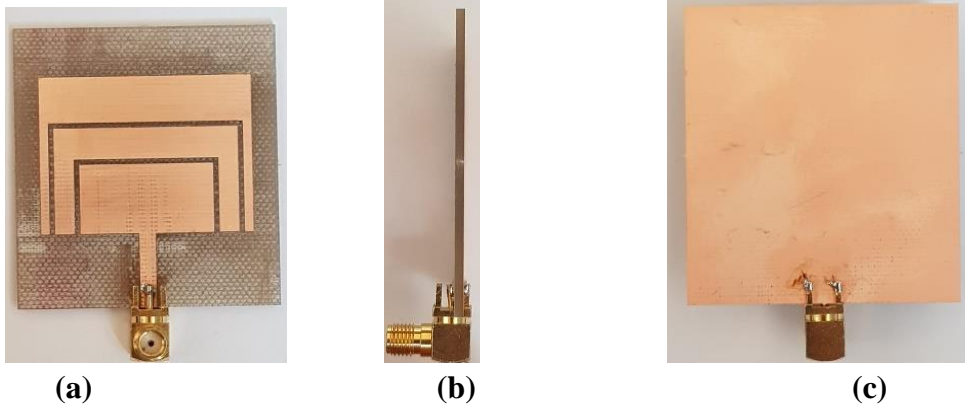
(b)

Şekil 30. Değişken C_{mnek} kapasitörlerine ait yansıma katsayıları grafikleri; (b) Antenin Mode-3 durumu ($C_{12ek}=C_{13ek}=C_{14ek}=C_2=6pF$ and $C_{45ek}=C_{36ek}=C_{27ek}=C_1=3,4pF$) (devam)

Yeniden yapılandırılabilir mikroserit yama anten için elektromanyetik model, yaklaşık eşdeğer devre modeli çözümü ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

2,45 GHz, 3,6 GHz ve 5,4 GHz rezonans frekansları arasında geçiş yapmak için önerilen yeniden yapılandırılabilir yama anteninin, öncelikle tam dalga benzetimleri yapılmış ve eşdeğer bir devre modeli oluşturulmuştur. Ayrıca bu çalışmada ölçümleri almak için önerilen anten üretilmiştir ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Üretilen antenin görüntüleri Şekil 31’de gösterilmektedir. Bu antenler üzerine eklenecek C_{mnek} kapasitörlerinin uygun değerleri CST ve AWR programında ayrı ayrı hesaplanmış olsa da belirli değerler arasında ayarlama imkanı sağlamak için değişken kapasitans değerlerinin kullanılması faydalıdır. Bu nedenle boşluklara değişken kapasitörler eklenmelidir. Bu işlevi gerçekleştirmek için BB837 varaktör diyot tercih edilmiştir. BB837 elemanı kullanılarak 1-28V ters voltaj altında 0,45-7,2 pF kapasite değerleri elde edilebilir.



(a)

(b)

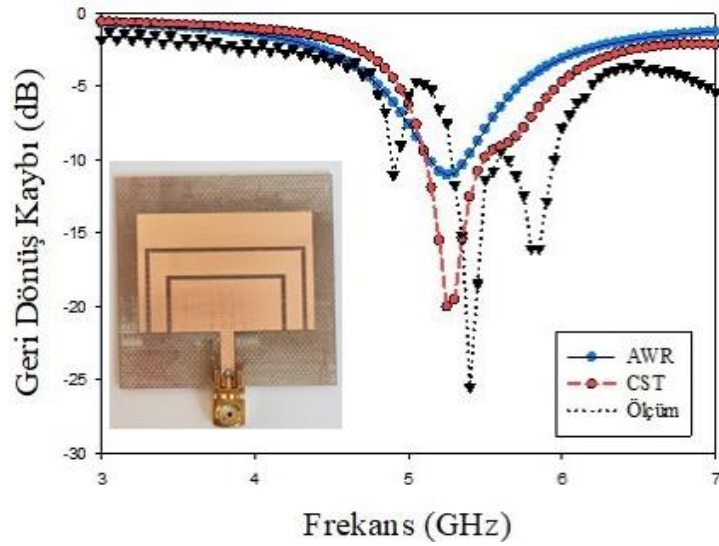
(c)

Şekil 31. Üretilen yeniden yapılandırılabilir antenin görüntüsü; (a) önden görünüm, (b) yandan görünüm, (c) arkadan görünüm

Anten üzerine C_{mek} kapasitörlerinin lehimlenmesi ile üretim tamamlanmıştır. Üretilen antenlerin Network Analizör (Agilent Technologies-N9928A VNA) ile yansımaya katsayıları ölçülmüştür. Anten ölçüm sistemi Şekil 32’de verilmiştir. Üç farklı frekans için AWR, CST programları ve ölçüm sisteminden elde edilen yansımaya katsayıları Şekil 33’te gösterilmektedir.

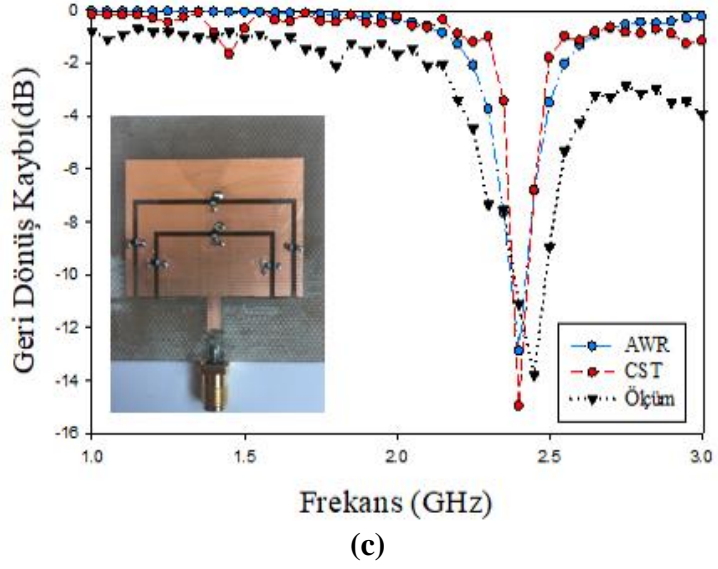
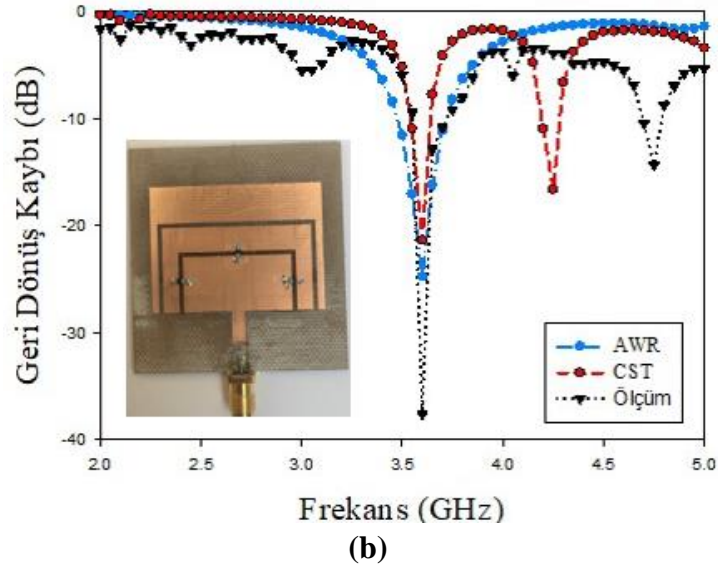


Şekil 32. Yansımaya katsayıları ölçüm sistemi



(a)

Şekil 33. Farklı çalışma bantları için AWR ve CST’de simüle edilmiş ve ölçülen yansımaya katsayıları; (a) Mod-1,

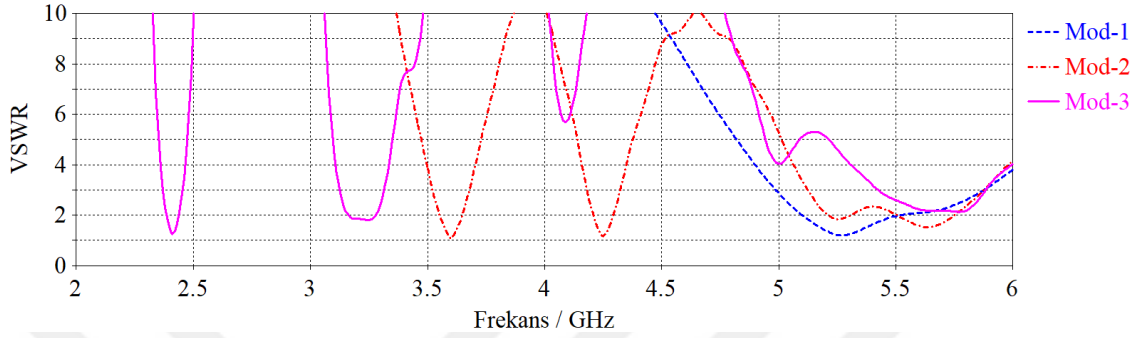


Şekil 33. Farklı çalışma bantları için AWR ve CST’de simüle edilmiş ve ölçülen yansıma katsayıları; (b) Mod-2, (c) Mod-3 (devam)

Kapasiteler anten üzerindeki boşluklara yerleştirilmediğinde (Mod-1) önerilen anten, AWR’de 5,35 GHz’de -15,4 dB, CST’de 5,27 GHz’de -21,08 dB geri dönüş kaybıyla çalışır. Anten Mod-1 konumundayken ölçüm sonuçlarına göre 5,40 GHz’de -25,5 dB dönüş kaybıyla çalışmaktadır. Anten Mod-2 konumundayken, CST’de 3,59 GHz’de -28,23 dB, AWR’de 3,60 GHz’de -21,36 dB ile geri dönüş kaybıyla çalışır. Mod-2 konumundayken ölçülen sonuçlarda ise 3,6 dB’de -37,62 geri dönüş kaybıyla çalışır. Anten Mod-3 konumundayken, CST’de 2,41 GHz’de -19,48 dB, AWR’de 2,41 GHz’de -12,9 dB ile geri dönüş kaybıyla çalışır. Üretilen anten Mode-3 için ise ölçülen sonuçlarda 2,45 GHz’de -13,8 dB geri dönüş kaybıyla çalışır.

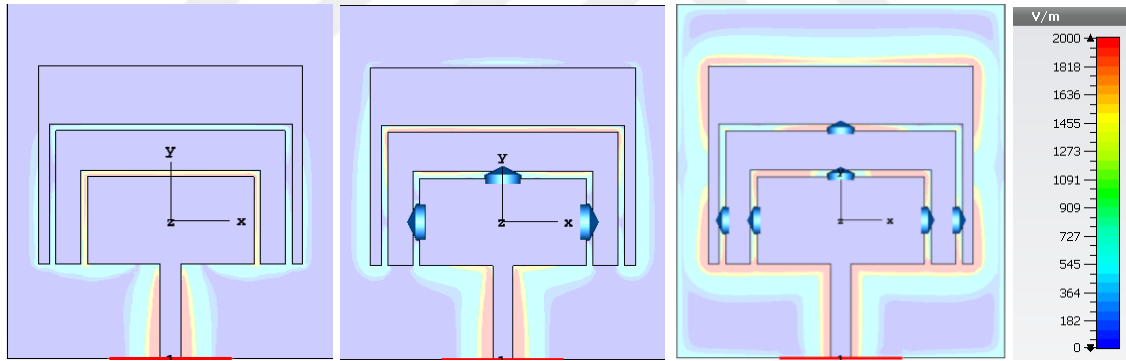
Yeniden yapılandırılabilir mikroşerit yama antenine ait diğer anten parametrelerinin CST benzetim sonuçları

Önerilen antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR), çalıştığı tüm frekans bantları için 1,25'ten azdır. Bu, antenin uygun şekilde eşleştiğini gösterir. Önerilen anten için VSWR grafiği Şekil 34'te gösterilmektedir. Grafikte gösterildiği gibi VSWR 5,27 GHz, 3,6 GHz ve 2,41 GHz'de sırasıyla 1,19, 1,07 ve 1,24'tür.



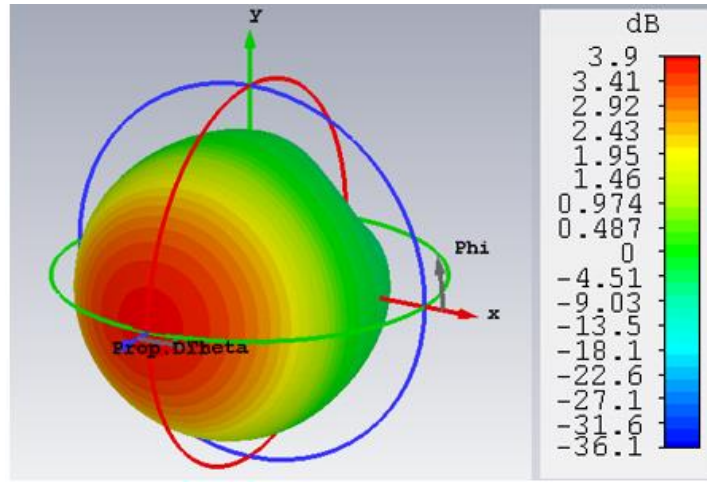
Şekil 34. Tasarımı yapılan yeniden yapılandırılabilir anten için VSWR

Tasarlanan antenin elektrik alan dağılımı, Şekil 35'te gösterilmiştir. Anten yapısı üzerindeki boşluğa yerleştirilen kapasite değerleri ayarlandığında, iki yama arasındaki iletim sağlanır.

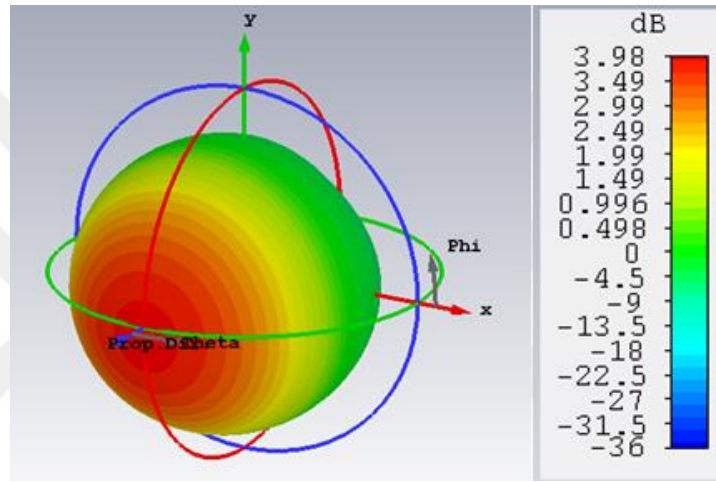


Şekil 35. Tasarımı yapılan antenin farklı çalışma bantları için elektrik alan dağılımı; (a) Mod-1, (b) Mod-2, (c) Mod-3

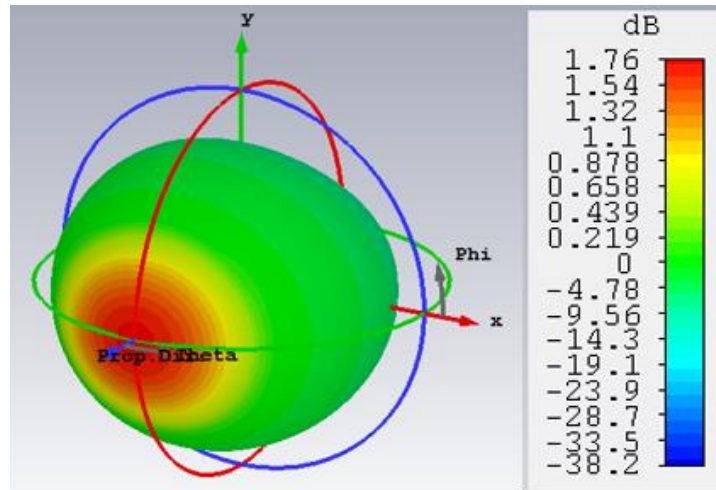
Yapay anahtarlarla elektrik uzunluğunun artırılması, frekans değerinin düşmesine neden olur ve böylece yeni bir anten elde edilmiş olur. Aynı ortak besleme, yeni anten için empedans uyumsuzluğu yaratabilir. Ortak beslemenin yol açtığı empedans uyumsuzluğu, ekleme kaybı değerinde bir artışa neden olur. Ekleme kaybı değeri arttığında, kazancın değerinde azalmanın gerçekleştiği gözlenmiştir. Elde edilen 3B uzak alan kazanç örüntüleri Şekil 36'da verilmiştir. Görüldüğü gibi 5,27 GHz, 3,59 GHz ve 2,41 GHz frekans değeri için sırasıyla 3,9 dB, 3,98 dB ve 1,76 dB kazanç değerleri elde edilmiştir. Azalan frekans değeri ile birlikte kayıplar artmış kazanç azalmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 36. Tasarımı yapılan antenin farklı çalışma 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) Mod-1 (b) Mod-2, (c) Mod-3

Önerilen yeniden yapılandırılabilir antenin CST benzetim sonuçlarının özeti Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Önerilen anten için CST benzetim sonuçları

Anten Parametreleri	Mod-1	Mod-2	Mod-3
Frekans (GHz)	5,27	3,59	2,41
Geri Dönüş Kaybı (dB)	-21,08	-28,23	-19,48
Bant Genişliği (MHz)	371	89,6	50,1
Yönlülük (dBi)	6,89	6,8	6,1
Kazanç (dB)	3,9	3,98	1,76
VSWR	1,19	1,07	1,24
Verimlilik (%)	50,6	52,7	37,2
Empedans (Ω)	49,29	49,30	49,28

Yeniden Yapılandırılabilir Esnek Mikroşerit Yama Anteni

Çalışmanın bu bölümünde esnek bir malzeme olan kapton alt tabaka üzerinde $22,28 \times 16,34 \times 0,38$ mm³ boyutlarında yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anten tasarımı yapılmıştır. Eşdeğer devre tabanlı çözüm modelini (Koc Polat *et al.* 2020) kullanarak tasarımı gerçekleştirilen anten, 5G için öngörülen 5,9-7,1 GHz ve 24,25-28,35 GHz bant aralıkları göz önüne alınarak 6,5 GHz ve 25 GHz rezonans frekansları arasında geçiş yapabilmektedir. Mikroşerit antenin temel parametreleri, iletim hattı modeli kullanılarak elde edilmiştir. Mikroşerit hat beslemesi ise Çeyrek Dalga Dönüştürücüsüne göre belirlenir. Mikroşerit hat beslemesi 25 GHz'de yayılım yapan yamanın içerisine belirli bir mesafe girilerek (içe-doğru besleme) 50 Ω değerindeki giriş empedansı yakalanmaya çalışılmıştır. Önerilen yeniden yapılandırılabilir esnek anten için tam dalga benzetimleri CST Microwave Studio yazılımı ile yapılmış ve eşdeğer devre modeli AWR yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir.

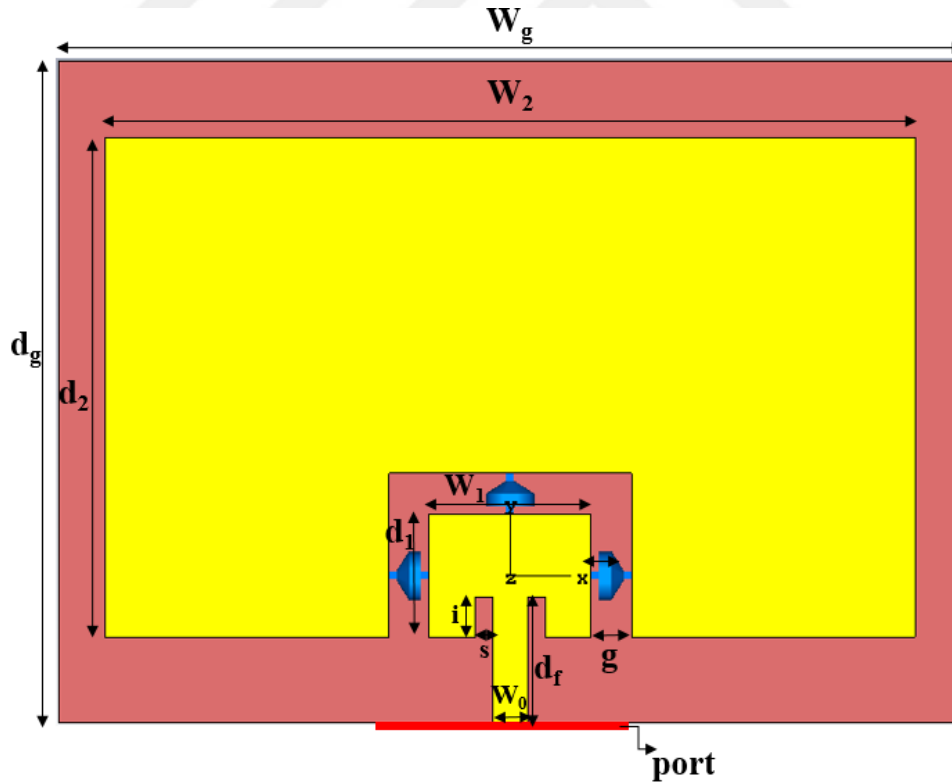
Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anten için tam dalga modeli

İletim hattı modeli ilk önce 25 GHz ve 6,5 GHz rezonans frekansında çalışan anten yamalarının boyutlarını belirlemek için kullanılır. Daha sonra, 25 GHz antenin mikro şerit besleme hattı, içe-doğru besleme tekniği kullanılarak çeyrek dalga boyu dönüştürücüsü göre belirlenir. 25 GHz ve 6,5 GHz anten yamaları için iletken bakır tabakaları, iki yamanın birleştirilmesinde ve empedans eşleşmesinde kullanılan ek devre elemanlarının yerleştirilmesi için 1 mm boşluk bırakılarak uygun şekilde birleştirilir. Bununla birlikte, 25 GHz antenin besleme hattının artık 6,5 GHz yaması için çeyrek dalga boyu dönüştürücüsü olmadığı unutulmamalıdır. Böylece bir empedans uyumsuzluğu ortaya çıkar. Denklem (28) uygun empedans eşleşmesi için yeni bir Z_a değeri hesaplamak için kullanılır. İlk olarak Z_a değeri,

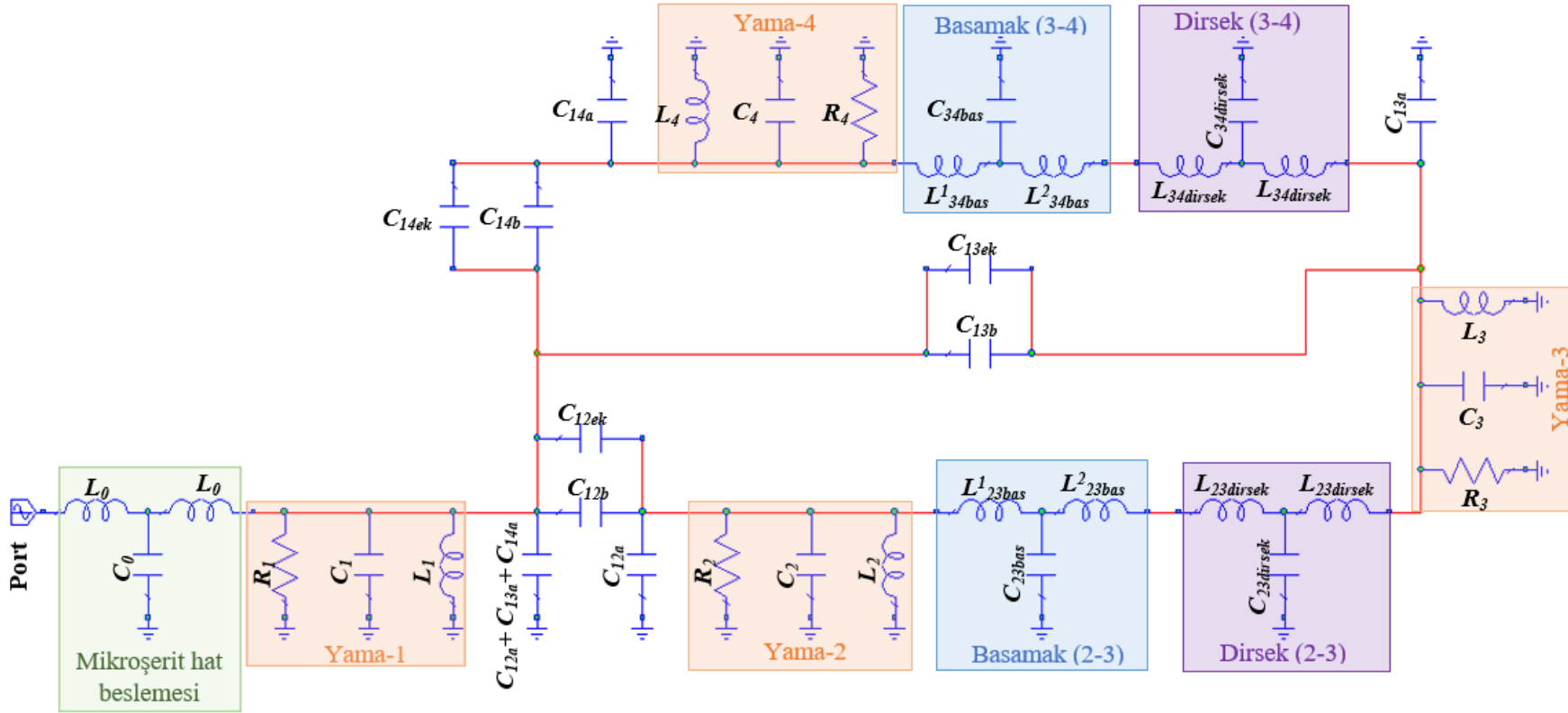
besleme hattı uzunluğu (d_f), 6,5 GHz anten dalga boyu (λ), 25 GHz antenin mikroşerit besleme hattı empedansı (Z_0) ve 50Ω giriş empedansı kullanılarak hesaplanır. Daha sonra, 6,5 GHz antenin yama uzunluğu (d_2) sabit tutularak, W_2 genişliğiyle birlikte Denklem (31)'de yerine konulur ve bu denklem W_2 bilinmeyenini verir. Kapton alt tabaka üzerinde tasarlanan yeniden yapılandırılabilir anten, Şekil 37'de gösterilmiştir. Her ışıma yapan yama arasında 1 mm boşluk bırakılmıştır. Yeniden yapılandırılabilir antenin ışıma elemanı için hesaplanan elektriksel boyutları Tablo 7'de sunulmaktadır.

Tablo 7. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin elektriksel boyutları

Boyut	Değeri (mm)	Boyut	Değeri (mm)
h	0,38	s	0,4325
d_{p1}	3,04	W_0	0,865
d_{p2}	12,32	W_g	22,28
d_f	3,125	W_1	4
d_g	16,34	W_2	20,0
i	1,00	g	1,00



Şekil 37. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin geometrisi



Şekil 39. Yeniden yapılandırılabilir esnek anten için eşdeğer devre modeli

Tablo 8. Yeniden yapılandırılabilir esnek antende yer alan toplu elemanların detaylı değerleri

Antenin Bölümü	Eleman	Değeri	Eleman	Değeri	Eleman	Değeri
Mikroşerit						
Hat	L_0	0,07 nH	C_0	0,09 pF	-	-
Beslemesi						
Yama-1	R_1	201,45 Ω	C_1	0,44 pF	L_1	0,09 nH
Boşluk (1-2)	C_{12a}	$4,43 \times 10^{-9}$ pF	C_{12b}	$4,02 \times 10^{-10}$ pF	-	-
Yama-2	R_2	404,27 Ω	C_2	1,02 pF	L_2	0,18 nH
Basamak (2-3)	L_{23bas}^1	2,89 nH	L_{23bas}^2	2,54 nH	C_{23bas}	646,96 pF
Dirsek (2-3)	$L_{23dirsek}$	0,55 nH	$C_{23dirsek}$	6,43 pF	-	-
Yama-3	R_3	549,29 Ω	C_3	1,02 pF	L_3	0,25 nH
Boşluk (1-3)	C_{13a}	$3,98 \times 10^{-8}$ pF	C_{13b}	$3,61 \times 10^{-9}$ pF	-	-
Dirsek (3-4)	$L_{34dirsek}$	0,55 nH	$C_{34dirsek}$	6,43 pF	-	-
Basamak (3-4)	L_{34bas}^1	2,54 nH	L_{34bas}^2	2,89 nH	C_{34bas}	646,96 pF
Yama-4	R_4	404,27 Ω	C_4	1,02 pF	L_4	0,18 nH
Boşluk (1-4)	C_{14a}	$4,43 \times 10^{-9}$ pF	C_{14b}	$4,02 \times 10^{-10}$ pF	-	-

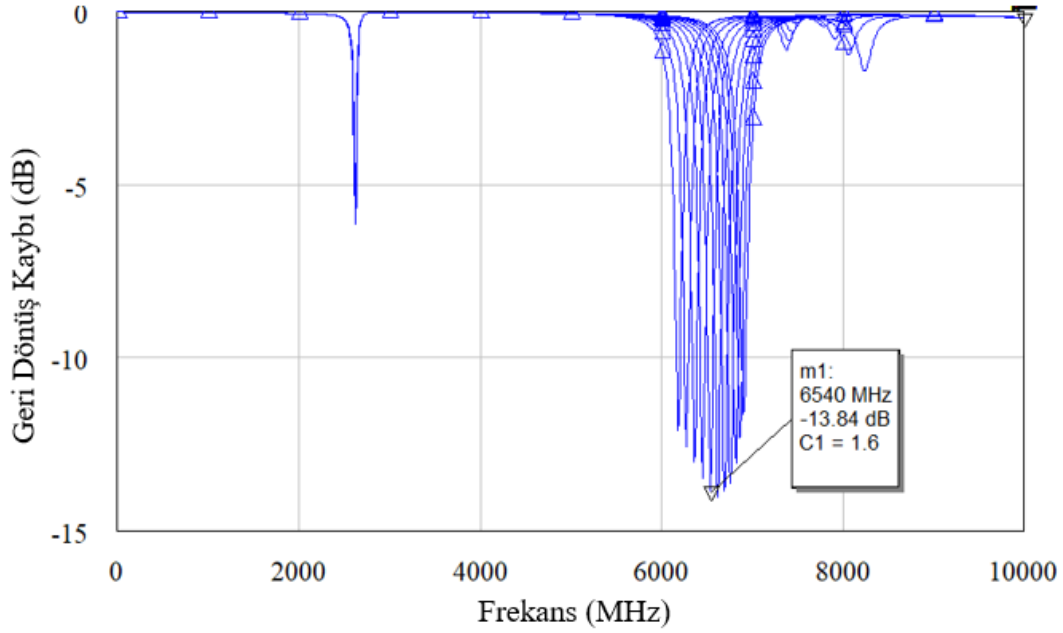
C_{mnek} kapasitörü, anteni istenen frekansta çalıştırmak için boşluğa bağlanır. Böylece, yeniden yapılandırılabilir antenin mevcut dağılım değişikliği elde edilir. Yapay anahtar olarak üç adet kapasitör (paralel kapasitör- C_{mnek}) iki farklı mod elde etmek için kullanılır. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin frekans modlarına ilişkin değerler Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin çalışma modları

Mod		Frekans (GHz)	$C_{12ek} = C_{13ek} = C_{14ek}$ (pF)
Mod-1	CST:	25,18	-
	AWR:	23,52	-
Mod-2	CST:	6,52	0,65
	AWR:	6,47	1,6

C_{mnek} kapasitörlerinin değerlerini hesaplamak için, CST programında optimizasyon aracı kullanılmıştır. CST programı aracılığıyla önerilen yeniden yapılandırılabilir esnek anteni Mod-2’ye ayarlamak için paralel bağlanan empedans eşleştirme kapasitörü değerleri ($C_{12ek} = C_{13ek} = C_{14ek}$) 0,5 pF olmalıdır. Şönt boşluk kapasitörlerine paralel bağlanan empedans eşleştirme kapasitörü bağlı değilse, anten Mod-1’de çalışır. AWR programında ise

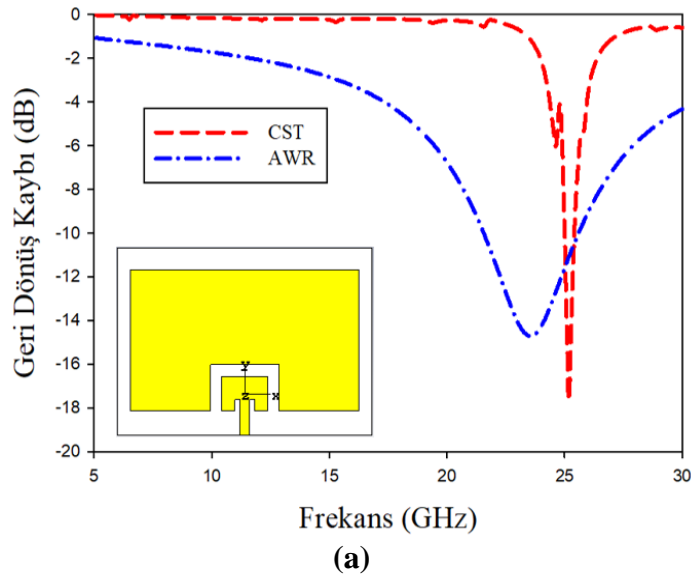
değişken C_{mnek} kapasitörlerine ait yansıma katsayısı grafikleri çizdirildiğinde (Şekil 40) istenilen rezonans frekansına ait grafiğin 1,6 pF C_{mnek} kapasitör değerinde elde edildiği gözlemlenmiştir.



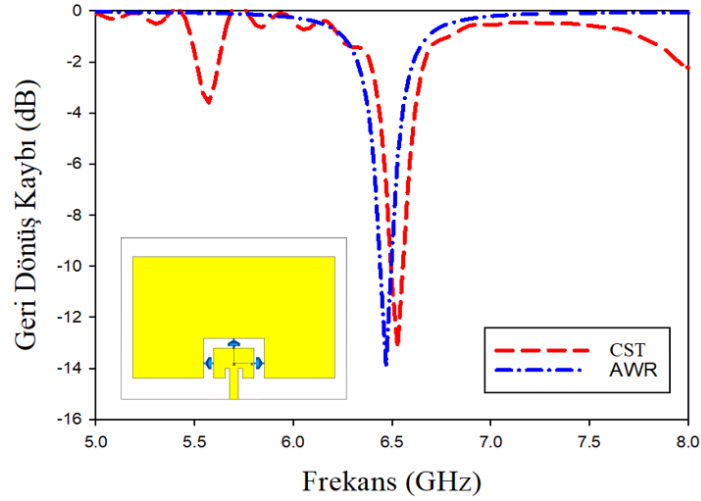
Şekil 40. Değişken C_{mnek} kapasitörlerine ait yansıma katsayıları grafikleri ($C_{12ek}=C_{13ek}=C_{14ek}=C1=1,6$ ve $C_{12b}=C_{13b}=C_{14b}=C2=1$)

Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anteni için elektromanyetik model ve yaklaşık eşdeğer devre modeli çözümü sonuçlarının karşılaştırılması

İki farklı frekans bandı için AWR ve CST programlarından elde edilen yansıma katsayıları Şekil 41’de gösterilmektedir.



Şekil 41. Farklı çalışma bantları için AWR ve CST’de simüle edilmiş yansıma katsayıları; (a) Mod-1,



(b)

Şekil 41. Farklı çalışma bantları için AWR ve CST’de simüle edilmiş yansıma katsayıları; (b) Mod-2 (devam)

Şönt boşluk kapasitelerine paralel bağlanan C_{mnek} kapasiteleri anten üzerindeki boşluklara yerleştirilmediğinde (Mod-1) önerilen anten, AWR’de 23,52 GHz’de -14,71 dB, CST’de 25,18 GHz’de -13,53 dB geri dönüş kaybıyla çalışır. Anten Mod-2 konumundayken ise, CST’de 6,52 GHz’de -13,19 dB, AWR’de 6,47 GHz’de -13,88 dB ile geri dönüş kaybıyla çalışır.

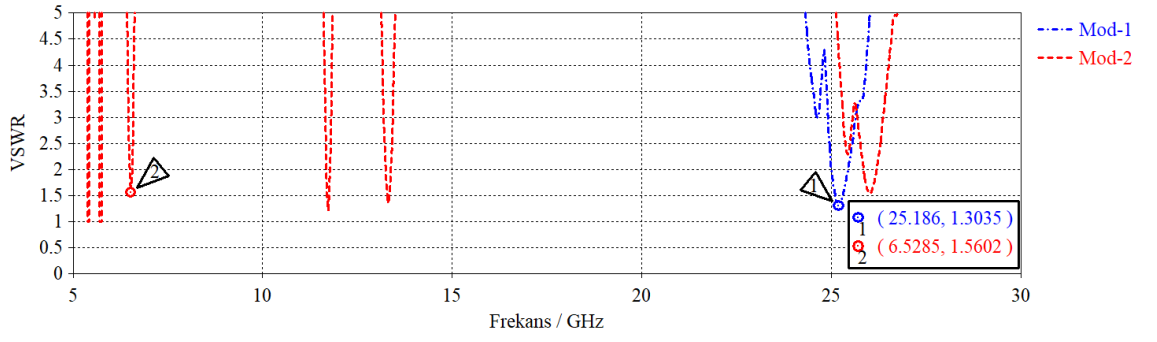
Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama antenine ait diğer anten parametrelerinin CST benzetim sonuçları

Önerilen yeniden yapılandırılabilir antenin benzetim sonuçlarının özeti Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Yeniden yapılandırılabilir esnek anten için benzetim sonuçları

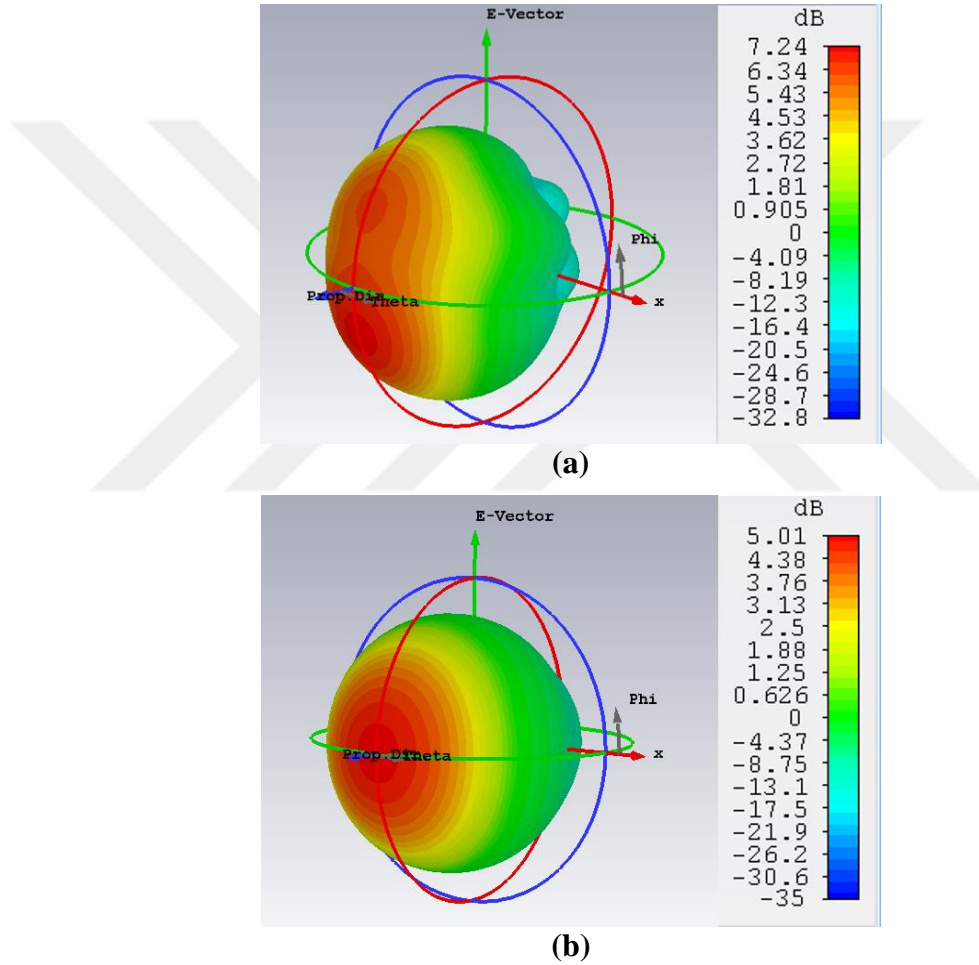
Anten Parametreleri	Mod-1	Mod-2
Frekans (GHz)	25,18	6,52
Geri Dönüş Kaybı (dB)	-17,60	-13,19
Bant Genişliği (MHz)	485	61,2
Yönlülük (dBi)	8,01	6,56
Kazanç (dB)	7,24	5,01
VSWR	1,30	1,56
Verimlilik (%)	83,75	60
Empedans (Ω)	50,193	50,019

Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin gerilim duran dalga oranı (VSWR), işletilen tüm frekans bantları için 1,6’dan azdır. Bu, antenin uygun şekilde eşleştiğini gösterir. Önerilen antenin için (VSWR) grafiği Şekil 42’de gösterilmektedir. Grafikte gösterildiği gibi, VSWR 25,18 GHz ve 6,52 GHz’de sırasıyla 1,30 ve 1,56 değerlerindedir.



Şekil 42. Yeniden yapılandırılabilir esnek anten için VSWR

Elde edilen 3B uzak alan kazanç modelinden (Şekil 43) görüldüğü gibi azalan frekans değeri ile birlikte kayıplar artmış kazanç azalmıştır.

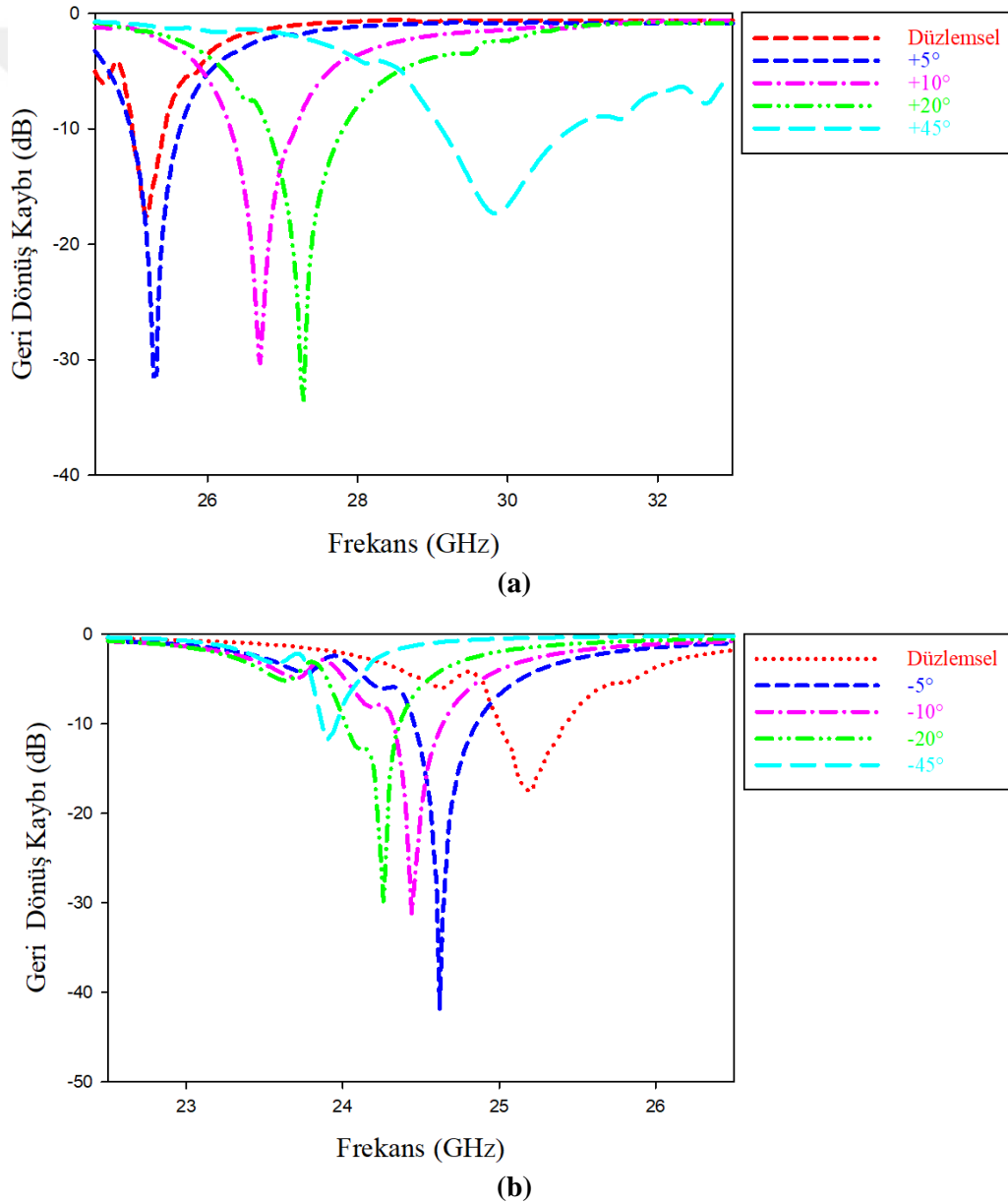


Şekil 43. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı çalışma 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) Mod-1, (b) Mod-2

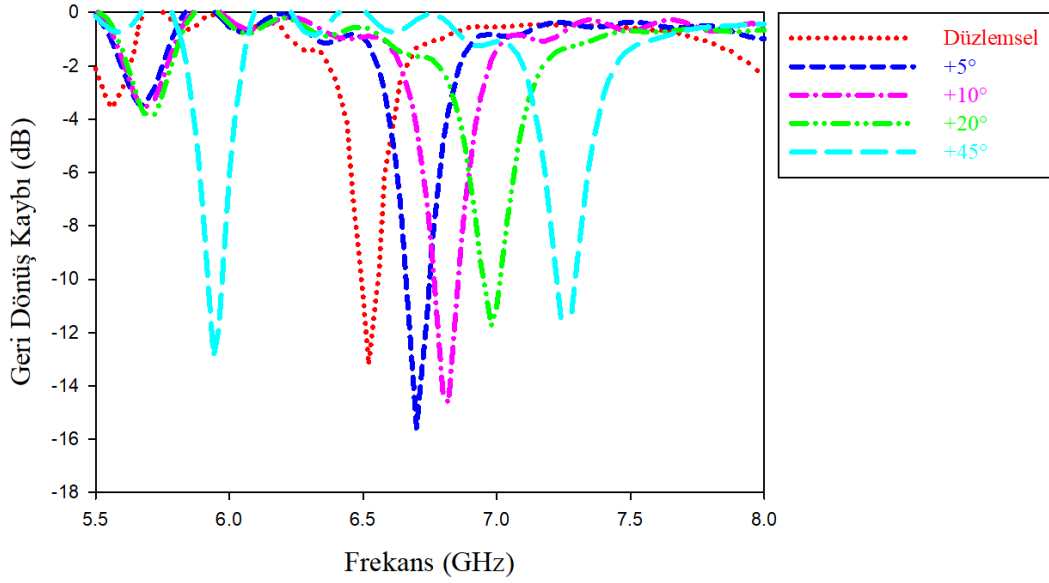
Yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anteni için bükülmenin etkileri

Giyilebilir anten tasarımlarında son derece önemli bir husus, insan vücudunun cihazların yakın çevresindeki etkileri ve vücudun hareketi ile ilişkili bükülmedir. İncelenmekte olan anten oldukça esnek olduğundan, eşleştirme ve radyasyon karakteristiği de dahil olmak üzere farklı derecede bükülme koşullarında olası performans bozulmalarının araştırılması çok önemlidir. Tasarlanan düzlemsel yeniden yapılandırılabilir esnek mikroşerit yama anteni, benzetim ortamında

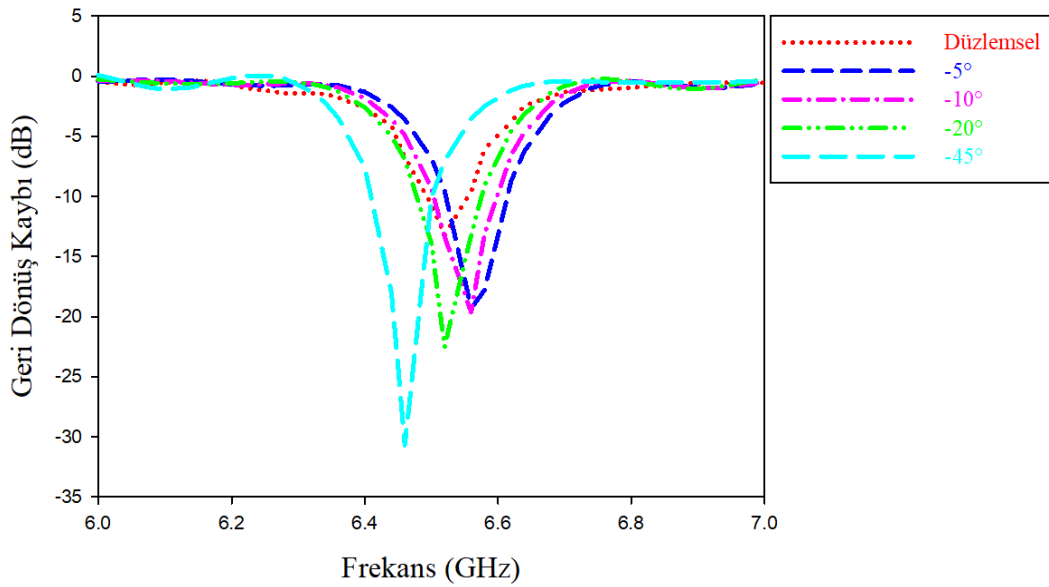
yukarı ve aşağı yönde 5° , 10° , 20° ve 45° bükülme için performansı incelenmiştir. Bu bükülmelerde Mod-1 ve Mod-2 için elde edilen yansımaya katsayıları sırasıyla Şekil 44 ve Şekil 45'te gösterilmiştir. Şekil 44(a)'daki grafik incelendiğinde, Mod-1 için yukarı yönlü daha büyük derecelerde sonlanan bükülmeler (örneğin 45°), etkili anten uzunluğunu önemli ölçüde azaltması nedeniyle çalışma frekansının %18 oranında saparak daha yüksek frekanslara kaydığı görülmüştür. Fakat 45° 'den daha yüksek bükülmeye uygulamalarda rastlanmayacağı düşünülmektedir. Mod-1 için aşağı yönlü bükülmelerde ise (Şekil 44(b)) çalışılan frekansta %5 oranında azalma gözlemlenmiştir. Şekil 45(a)'daki grafik incelendiğinde Mod-2 için yukarı yönlü büyük derecelerdeki bükülmelerde (örneğin 45°), çalışma frekansı %11 oranında saparak daha yüksek frekanslara kaydığı görülmüştür. Mod-2 için aşağı yönlü bükülmelerde ise (Şekil 45(b)) çalışılan frekansta %0,9 oranında azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 44. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı derecelerdeki bükülmeleri için Mod-1 durumunda yansımaya katsayıları; (a) yukarı yönlü bükülme (b) aşağı yönlü bükülme



(a)

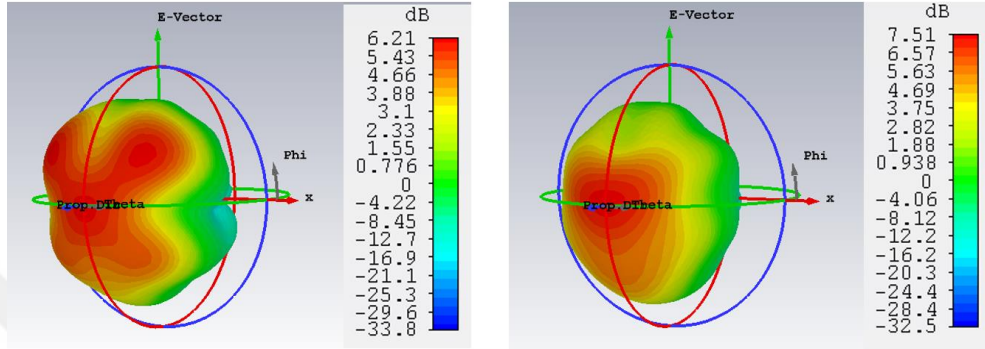
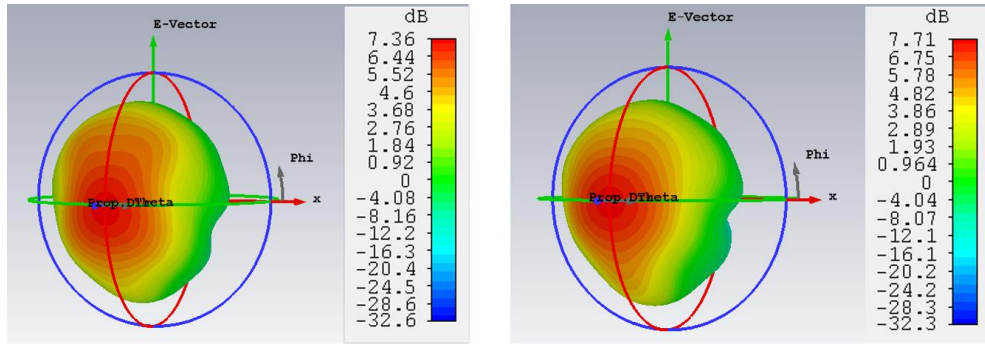


(b)

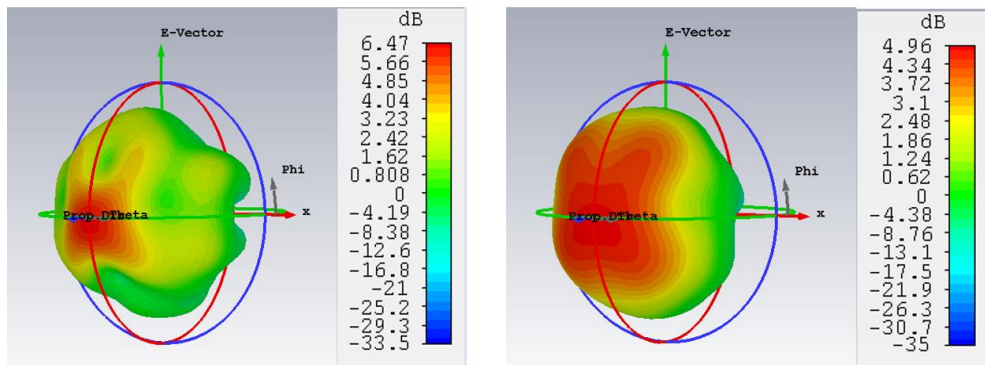
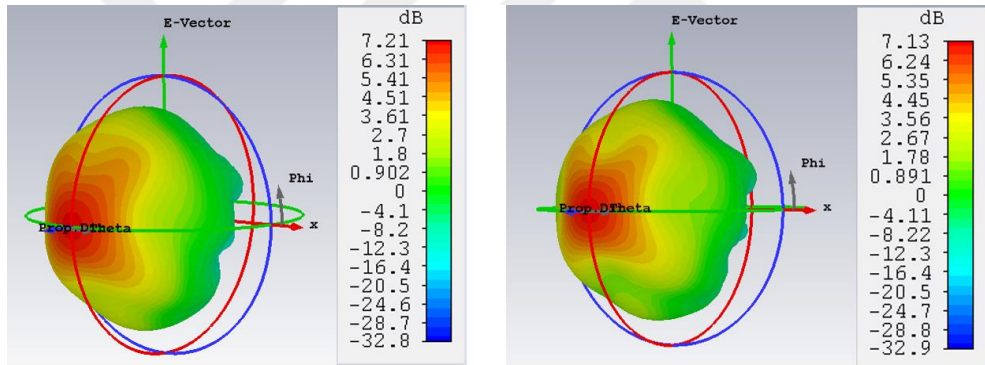
Şekil 45. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı derecelerdeki bükülmeleri için Mod-2 durumunda yansıma katsayıları; (a) yukarı yönlü bükülme (b) aşağı yönlü bükülme

Farklı bükülme derecelerinde Mod-1 ve Mod-2 için elde edilen 3B uzak-alan kazanç örüntüleri sırasıyla Şekil 46 ve 47’de gösterilmiştir.

Farklı açılardaki bükülmeler için elde edilen anten parametrelerine ait benzetim sonuçları Tablo 11’de özetlenmiştir.

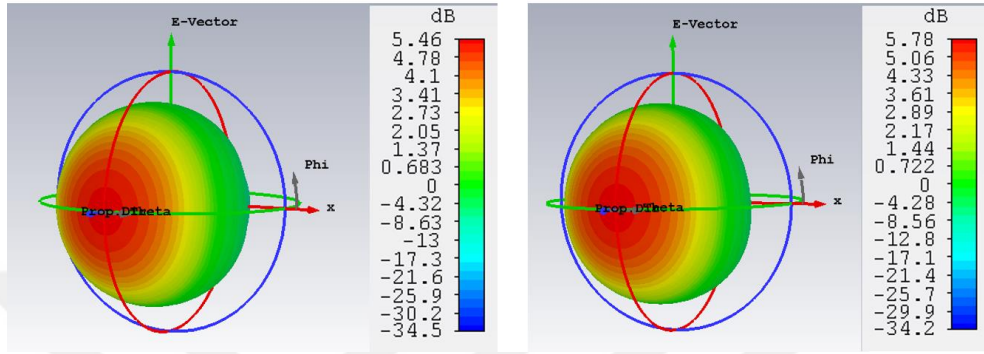
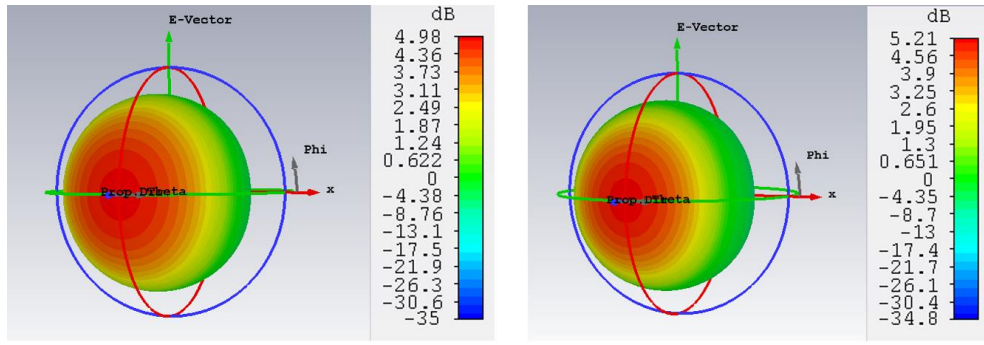


(a)

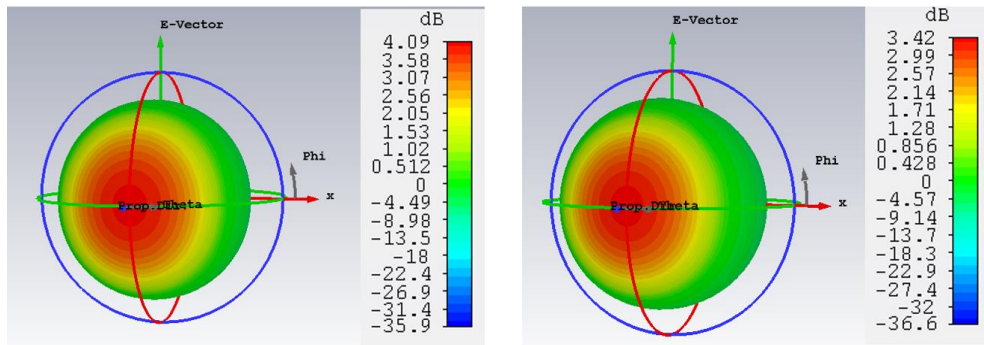
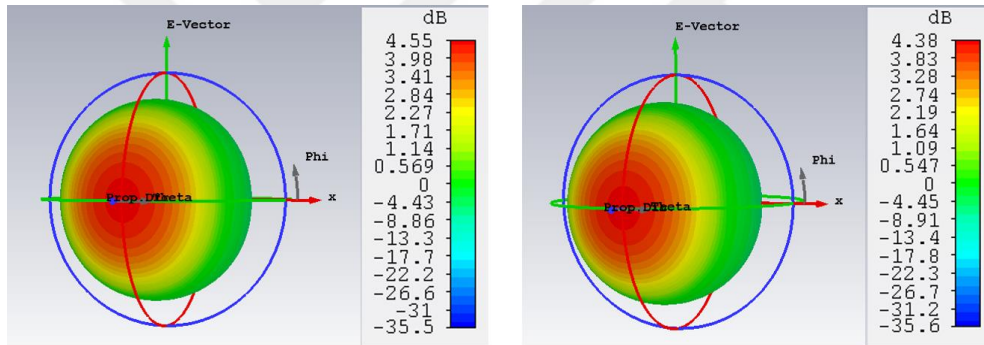


(b)

Şekil 46. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı derecelerdeki bükülmeleri için Mod-1 durumunda 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) yukarı yönlü bükülme (b) aşağı yönlü bükülme



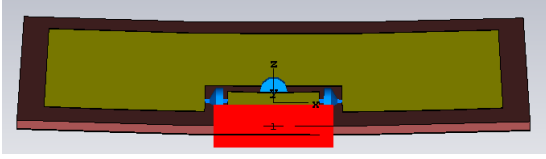
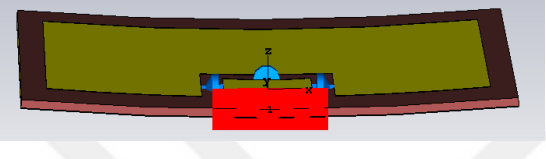
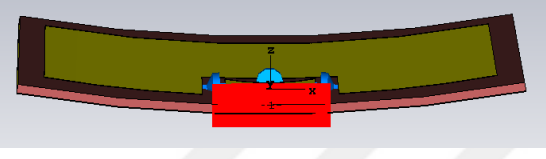
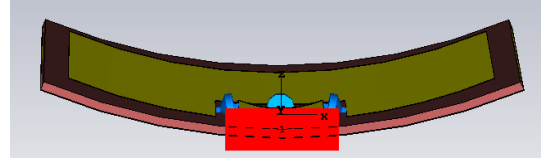
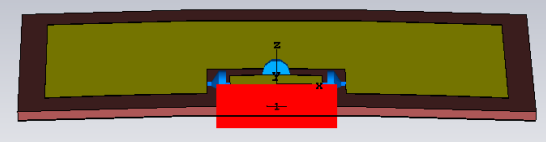
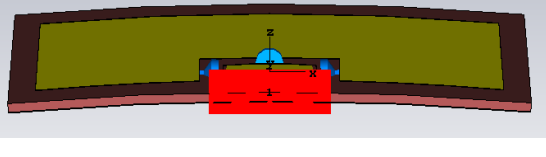
(a)



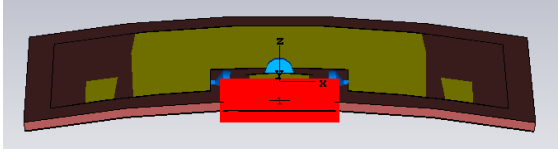
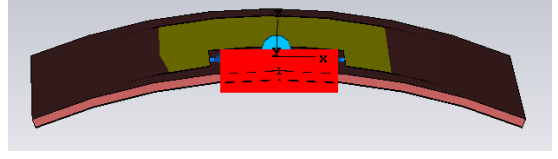
(b)

Şekil 47. Yeniden yapılandırılabilir esnek antenin farklı derecelerdeki bükülmeleri için Mod-2 durumunda 3B uzak-alan kazanç örüntüleri; (a) yukarı yönlü bükülme (b) aşağı yönlü bükülme

Tablo 11. Farklı açılardaki bükülmeler için elde edilen benzetim sonuçları

Bükülme Açısı	Anten Parametreleri	Mod-1	Mod-2
+5°		Frekans (GHz) 25,28 Geri Dönüş Kaybı(dB) -31,448 Bant Genişliği (MHz) 653 Yönlülük (dBi) 8,07 Kazanç (dB) 7,36 VSWR 1,05 Verimlilik (%) 85 Empedans 49,68	6,70 -15,58 87 6,79 4,98 1,39 68 50,50
+10°		Frekans (GHz) 26,7 Geri Dönüş Kaybı(dB) -30,28 Bant Genişliği (MHz) 853 Yönlülük (dBi) 8,48 Kazanç (dB) 7,71 VSWR 1,06 Verimlilik (%) 83,9 Empedans 50,13	6,82 -14,63 90 6,91 5,21 1,45 69,9 50,82
+20°		Frekans (GHz) 27,26 Geri Dönüş Kaybı(dB) -35,51 Bant Genişliği (MHz) 998 Yönlülük (dBi) 6,78 Kazanç (dB) 6,21 VSWR 1,03 Verimlilik (%) 87,7 Empedans 50,28	6,98 -11,74 82 6,97 5,46 1,69 75,70 51,13
+45°		Frekans (GHz) 29,84 Geri Dönüş Kaybı(dB) -17,31 Bant Genişliği (MHz) 1707 Yönlülük (dBi) 8,21 Kazanç (dB) 7,51 VSWR 1,32 Verimlilik (%) 86,7 Empedans 51,37	7,26 -12,24 69 7,18 5,78 1,64 77 52,38
-5°		Frekans (GHz) 24,62 Geri Dönüş Kaybı(dB) -41,79 Bant Genişliği (MHz) 395 Yönlülük (dBi) 8,04 Kazanç (dB) 7,21 VSWR 1,02 Verimlilik (%) 83,1 Empedans 49,509	6,56 -19,29 90 6,64 4,55 1,24 74,9 50,07
-10°		Frekans (GHz) 24,44 Geri Dönüş Kaybı(dB) -31,14 Bant Genişliği (MHz) 313 Yönlülük (dBi) 8,11 Kazanç (dB) 7,13 VSWR 1,06 Verimlilik (%) 79,7 Empedans 49,49	6,54 -19,89 92 6,59 4,38 1,23 60,6 49,98

Tablo 11. (devam)

-20° 	Frekans (GHz)	24,26	6,52
	Geri Dönüş Kaybı(dB)	30,05	-22,53
	Bant Genişliği (MHz)	342	94
	Yönlülük (dBi)	7,66	6,51
	Kazanç (dB)	6,47	4,09
	VSWR	1,06	1,16
	Verimlilik (%)	75,9	57,7
	Empedans	49,42	1,14
	Frekans (GHz)	23,91	6,46
	Geri Dönüş Kaybı(dB)	-11,73	-30,69
-45° 	Bant Genişliği (MHz)	93	87,3
	Yönlülük (dBi)	6,77	6,23
	Kazanç (dB)	4,96	3,42
	VSWR	1,69	1,06
	Verimlilik (%)	70,6	52,38
	Empedans	48,81	49,39

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

IoT ve 5G teknolojisinin kullanılmaya başlamasıyla beraber haberleşme ağlarının bütün katmanlarında farklı çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. IoT ve 5G'nin genişlettiği uygulama alanları ve veri hızlarına cevap verebilecek frekanslarda ve uyumlulukta fiziksel katman unsurlarının oluşturulması gerekmektedir. Bu amaca yönelik olarak tezde yapılan çalışmada fiziksel katmanın bir parçası olan farklı frekanslar arasında geçiş yapmaya yönelik yeniden yapılandırılabilir anten tasarımları ele alınmıştır. Tek bir frekansta çalışan antenlerin tasarım süreçlerinde empedans uyumu tek bir frekans için düşünülmekteyken, yeniden yapılandırılabilir antenlerde birden fazla frekans sözkonusu olduğundan tasarım sürecinin karmaşıklaşması kaçınılmaz bir durumdur. Bu problemin üstesinden gelebilmek için literatürde frekanslı yeniden yapılandırılabilir anten tasarımlarında genellikle monopol, PIFA, F-şekilli, 9-şekilli ve Epsilon-şekilli gibi basit yapılanmalar ele alınmıştır. Bu tezde ele alınan mikroşerit yama antenleri frekanslı yeniden yapılandırılabilir olacak şekilde tasarlandığında, tasarım bittikten sonra genellikle yuva veya yarık yükleme, yamaya ayar saplamaları (çıkıntıları) ekleme, kullanılan yeniden yapılandırma mekanizmalarının konumunu değiştirme vb. gibi sezgisel yaklaşımlar ile büyük bir ayarlama çabası gerektirir. Bu sezgisel yaklaşımlar kullanılarak iyi antenler elde edilebilir, ancak yeni senaryolar için küçük değişiklikler bile yapmak genellikle zordur. Yapıdaki küçük bir değişiklik antenin geçersiz bir tasarım haline gelmesine neden olabilir. Bu nedenle, sezgisel yaklaşımlar kullanılarak daha sonra ayarlama için birkaç benzetim programı çalıştırmak yerine tüm yapı için bir formülasyon sağlayarak doğrudan çözüm ile ayarlama çabasını en aza indirecek çözümlere ihtiyaç vardır. Bu tez çalışması, yeniden yapılandırılabilir antenlerde karşılaşılan empedans eşleşmesi problemi için sezgisel yaklaşımlar kullanmak yerine eşdeğer devre yaklaşımı aracılığı ile yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı fikri sunmaktadır. Önerilen yeniden yapılandırılabilir anten tasarımı, sadece kapasitans ayarlamaları kullanarak sezgisel ayarlama çabasını en aza indirmektedir. Bu eşdeğer devre yaklaşımı ve tek bir kapasite ayarına indirgenmiş özgün çözüm metodolojisinin farklı frekanslara genişletilebilir olduğu, esnek olmayan ve esnek alttabakalar üzerinde uygulanarak gösterilmiştir.

Önerilen metodoloji, iki farklı anten yapısı üzerinde denenmiştir. Bunlardan ilki 5,4 GHz (WLAN ve 5G), 3,6 GHz (Wi-Max ve 5G) ve 2,45 GHz (Wi-Fi) frekanslarında geçiş yapabilen FR4 alt tabaka kullanan esnek olmayan yeniden yapılandırılabilir antendir. Tezde ilgili bölümlerde ayrıntılı olarak sonuçları verilen bu anten üretilmiş ve üretilen bu antenin CST ile elde edilen sonuçlarında; 5,4 GHz, 3,6 GHz ve 2,45 GHz frekanslarında sırasıyla 3,9

dB, 3,98 dB ve 1,76 dB kazanç değerine ve 371 MHz, 89,6 MHz ve 50,1 MHz band genişliğine sahip olduğu görülmüştür. Eşdeğer devre tabanlı çözüm modeli ile tasarımı doğrudan yapılan bu antenin komple eşdeğer devre modeli AWR yazılımı ile oluşturulmuştur. Tam dalga analizi ise CST yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bir prototipi üretilerek tam dalga analizi ve devre teorisi çözüm sonuçlarını doğrulamak için ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Nihayetinde eşdeğer devre yaklaşımı ile tasarımı gerçekleştirilen bu anten için AWR, CST yazılımı ve ölçümden elde edilen sonuçlar birbiriyle uyumludur.

Tasarımı yapılan bir diğer anten ise 5G için öngörülen 25,0 GHz ve 6,5 GHz frekanslarında geçiş yapabilen ve alt tabaka olarak kapton kullanan esnek yeniden yapılandırılabilir antendir. Tasarımı yapılan bu antenin CST ile elde edilen sonuçlarında; 25 GHz ve 6,5 GHz frekanslarında sırasıyla 7,24 dB, 5,01 dB kazanç değerine ve 485 MHz, 61,2 MHz band genişliğine sahip olduğu görülmüştür. Bu anten için de AWR ve CST yazılımı ile elde edilen sonuçlar uyumludur. Ayrıca tasarımı yapılan bu antenin giyilebilir teknolojide kullanılması öngörüldüğünde son derece önemli bir husus olan vücudun hareketi ile ilişkili farklı derecede (yukarı ve aşağı yönde 5°, 10°, 20° ve 45°) bükülme koşullarında benzetimi yapılarak olası performans bozulmaları da CST yazılımında incelenmiştir. Sonuç olarak tasarımı yapılan bu esnek yeniden yapılandırılabilir anten ile eşdeğer devre yaklaşımı metodolojisinin ince alt tabakalarda uygulanabilirliği ve daha yüksek frekanslara genişletilebilir olduğu ortaya konulmuştur.

Bu tez çalışmasında sunulan model, yeniden yapılandırılabilir yapıda daha fazla frekans içerecek şekilde kolaylıkla genişletilebilir. Aynı beslemeye bağlı genişletilebilir bir yapı kullanan, yeniden yapılandırılabilir antenin frekans bantları arasında geçiş, yamalar arasındaki boşluklar üzerine yerleştirilen şönt kapasitörleri vasıtasıyla antenin ışıma yapısının değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu kapasitörler, gelecekteki çalışmalarda farklı anahtarlama mekanizmaları ile kolayca birleştirilebilir. Giyilebilir teknolojide kullanılan esnek yeniden yapılandırılabilir antenler için kullanılan şönt kapasitörlerin de esnek olması gelecekteki çalışma alanı olabilir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, Q.H., Rehman, M.U., Yang, X., Alomainy, A., Qaraqe, K. and Serpedin, E., 2013. Ultrawideband band-notched flexible antenna for wearable applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 1606-1609.
- Agiwal, M., Roy, A. and Saxena, N., 2016. Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(3), 1617-1655.
- Akpakwu, G.A., Silva, B.J., Hancke, G.P. and Abu-Mahfouz, A.M., 2017. A survey on 5g networks for the internet of things: Communication technologies and challenges. *IEEE Access*, 6, 3619-3647.
- Al-Falahy, N. and Alani, O.Y., 2017. Supporting massive m2m traffic in the internet of things using millimetre wave 5g network. In 2017 9th Computer Science and Electronic Engineering (CEECE). IEEE: pp: 83-88.
- Alqurashi, K.Y. and Kelly, J.R., 2017. Continuously tunable frequency reconfigurable liquid metal microstrip patch antenna. In 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. IEEE: pp: 909-910.
- Andy, A., Alizadeh, P., Rajab, K.Z., Kreouzis, T. and Donnan, R., 2016. An optically-switched frequency reconfigurable antenna for cognitive radio applications. In 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE: pp: 1-4.
- Arnold, C.C., 2015. Design, fabrication, and measurement of a multiple-input multiple-output (mimo) antenna for mobile communication.
- Arshad, Q.K.U.D., Kashif, A.U. and Quershi, I.M., 2019. A review on the evolution of cellular technologies. In 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). IEEE: pp: 989-993.
- Bakariya, P.S., Dwari, S., Sarkar, M. and Mandal, M.K., 2014. Proximity-coupled multiband microstrip antenna for wireless applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 646-649.
- Balanis, C.A., 2011. *Modern antenna handbook*. John Wiley & Sons, pp.
- Balanis, C.A., 2016. *Antenna theory: Analysis and design*. John Wiley & Sons, pp.
- BARV, V.L.I.P.T. and KARTIC, N.D.P., 2014. The influence of lamination and conductive printing inks on smart-card operability. *Materiali in tehnologije*, 48(4), 497-504.
- Bhalla, M.R. and Bhalla, A.V., 2010. Generations of mobile wireless technology: A survey. *International Journal of Computer Applications*, 5(4), 26-32.
- Chauhan, B. and Negi, A., 2016. A conformal microstrip patch antenna on cylinder back-to-back e and u shape slot for triple band operation. In 2016 6th International Conference-Cloud System and Big Data Engineering (Confluence). IEEE: pp: 670-674.
- Chen, C.-H. and Peroulis, D., 2007. Liquid rf mems wideband reflective and absorptive switches. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 55(12), 2919-2929.
- Chettri, L. and Bera, R., 2019. A comprehensive survey on internet of things (iot) towards 5g wireless systems. *IEEE Internet of Things Journal*.
- Cihangir, A., 2014. *Antenna designs using matching circuits for 4g communicating devices*.
- Deo, A.P., Sonker, A. and Kumar, R., 2017. Design of reconfigurable slot antenna using varactor diode. In 2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix). IEEE: pp: 511-515.
- Dey, A., 2016. *Frequency tunable antennas and surface microwave imaging system using microfluidic reconfiguration techniques*. Graduate Theses and Dissertations.
- Dragičević, T., Siano, P. and Prabaharan, S., 2019. Future generation 5g wireless networks for smart grid: A comprehensive review. *Energies*, 12(11), 2140.

- Edwards, T.C. and Steer, M.B., 2016. Foundations for microstrip circuit design. John Wiley & Sons,pp.
- Elrashidi, A., Elleithy, K. and Bajwa, H., 2011. The effect of curvature on resonance frequency, gain, efficiency and quality factor of a microstrip printed antenna conformed on a cylindrical body for tm₁₀ mode using different substrates. Journal of Science and Technology, September.
- Elrashidi, A., Elleithy, K. and Bajwa, H., 2011. Resonance frequency, gain, efficiency and quality factor of a microstrip printed antenna as a function of curvature for tm₀₁ mode using different substrates. Journal of Wireless Networking and Communications, 1, 1-8.
- Errifi, H., Baghdad, A., Badri, A. and Sahel, A., 2014. Effect of change in feedpoint on the antenna performance in edge, probe and inset-feed microstrip patch antenna for 10 ghz. International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, 1(4).
- Fatthi Alsager, A., 2011. Design and analysis of microstrip patch antenna arrays. University of Borås/School of Engineering.
- Feng, L., Hu, R.Q., Wang, J., Xu, P. and Qian, Y., 2016. Applying vlc in 5g networks: Architectures and key technologies. IEEE Network, 30(6), 77-83.
- Ferreira, D., Pires, P., Rodrigues, R. and Caldeirinha, R.F., 2017. Wearable textile antennas: Examining the effect of bending on their performance. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 59(3), 54-59.
- Floch, J.M. and Trad, I.B., 2017. Printed planar double inverted-f antenna with large frequency reconfigurability range. In2017 47th European Microwave Conference (EuMC). IEEE: pp: 1289-1292.
- Garg, R. and Bahl, I., 1978. Microstrip discontinuities. International Journal of Electronics Theoretical and Experimental, 45(1), 81-87.
- Garg, R., Bahl, I. and Bozzi, M., 2013. Microstrip lines and slotlines. Artech house,pp.
- Geyikoğlu, M.D., Polat, H.K., Kaburcu, F. and Çavuşoğlu, B., Sar analysis of tri-band antennas for a 5g eyewear device. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 1-8.
- Ghosh, J., Jayakody, D.N.K. and Qaraqe, M., 2018. Downlink capacity of ofdma-cr based 5g femtocell networks. Physical Communication, 29, 329-335.
- Grilo, M., Hiroaki Seko, M. and Salete Correra, F., 2016. Wearable textile patch antenna fed by proximity coupling with increased bandwidth. Microwave and Optical Technology Letters, 58(8), 1906-1912.
- HERNANDEZ-FUENTES, I.O., Villa-Angulo, C., RAMIREZ-ZARATE, J.M., Rascon-Carmona, R. and ANGUIANO-COTA, R.C., 2018. Frequency equivalent circuits for the on and off state of an optically triggered switch based on a pin photodiode. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 26(3), 1464-1478.
- Hertler, C., Van Langenhove, L. and Rogier, H., 2010. Flexible textile based antennas. Materials Technology, 25(2), 101-105.
- Hong, J.-S.G. and Lancaster, M.J., 2004. Microstrip filters for rf/microwave applications. John Wiley & Sons,pp.
- Hong, W., Baek, K.-H. and Ko, S., 2017. Millimeter-wave 5g antennas for smartphones: Overview and experimental demonstration. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 65(12), 6250-6261.
- Hsieh, T.H. and Row, J.S., 2010. Design of dual-frequency circularly-polarized slot antennas with switchable frequency. Microwave and Optical Technology Letters, 52(9), 2023-2029.
- Irshad, W. and Peroulis, D., 2011. A 12–18 ghz electrostatically tunable liquid metal rf mems resonator with quality factor of 1400–1840. In2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. IEEE: pp: 1-4.

- Johnson, R.C. and Jasik, H., 1984. Antenna engineering handbook. New York, McGraw-Hill Book Company, 1984, 1356 p. No individual items are abstracted in this volume.
- Josefsson, L. and Persson, P., 2006. Conformal array antenna theory and design. John Wiley & Sons, pp.
- Kara, M., 1998. Design considerations for rectangular microstrip antenna elements with various substrate thicknesses. *Microwave and Optical Technology Letters*, 19(2), 111-121.
- Khaleel, H.R., Al-Rizzo, H.M., Abbosh, A.I. and Kishk, A., 2013. Design, fabrication, and testing of flexible antennas. *Advancement in microstrip antennas with recent applications*. InTech Vienna, Austria.
- Kim, D., Pierce, R.G., Henderson, R., Doo, S.J., Yoo, K. and Lee, J.-B., 2014. Liquid metal actuation-based reversible frequency tunable monopole antenna. *Applied Physics Letters*, 105(23), 234104.
- Koc Polat, H., Geyikoglu, M.D. and Cavusoglu, B., 2020. A Novel Approach for Production Challenges of Flexible Microstrip Patch Antenna. *Brilliant Engineering*, 1.1. 7-12.
- Koc Polat, H., Geyikoglu, M.D. and Cavusoglu, B., 2020. Modeling and validation of a new reconfigurable patch antenna through equivalent lumped circuit-based design for minimum tuning effort. *Microwave and Optical Technology Letters*.
- Koç, H., Geyikoğlu, M.D., Kaburcuk, F., Çavuşoğlu, B. and Ertuğrul, M., 2018. A microstrip patch antenna operation on cylindrical structures based on silicon rubber. In 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE: pp: 1-4.
- Kumar, N., Kumar, P. and Sharma, M., 2020. Reconfigurable antenna and performance optimization approach. *Wireless Personal Communications*, 1-26.
- Lee, W., Kim, H. and Yoon, Y.J., 2008. A frequency reconfigurable bow-tie slot antenna with wide bandwidth. *Microwave and Optical Technology Letters*, 50(2), 404-406.
- Li, M. and Behdad, N., 2012. Fluidically tunable frequency selective/phase shifting surfaces for high-power microwave applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(6), 2748-2759.
- Loader, B. and Gregory, A., 2015. The performance of conducting elastomer antennas for body worn applications. In 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE: pp: 1-4.
- López, D.R., 2013. Reconfigurable pixel antennas for communications. *Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*,
- Maeda, M., 1972. An analysis of gap in microstrip transmission lines. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 20(6), 390-396.
- Maimaiti, M. and Baktur, R., 2013. Inkjet printed circularly polarized patch antenna on a cylindrical surface. In 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). IEEE: pp: 1854-1855.
- Mäntysalo, M. and Mansikkamäki, P., 2009. An inkjet-deposited antenna for 2.4 GHz applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 63(1), 31-35.
- Matalgah, M.M. and Hammouri, O.M., 2007. International mobile telecommunications-2000 and 3G wireless systems. *Handbook of Computer Networks: LANs, MANs, WANs, the Internet, and Global, Cellular, and Wireless Networks*, 2, 716-750.
- Monne, M.A., Lan, X. and Chen, M.Y., 2018. Material selection and fabrication processes for flexible conformal antennas. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018.
- Morishita, A.M., 2014. Reconfigurable liquid-metal rf devices for wireless communications. [Honolulu]:[University of Hawaii at Manoa],[December 2014],
- Morishita, A.M., Kitamura, C.K., Ohta, A.T. and Shiroma, W.A., 2013. A liquid-metal monopole array with tunable frequency, gain, and beam steering. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 1388-1391.

- Nazir, I., Rana, I.E., Mir, N.U.A. and Afreen, K., 2016. Design and analysis of a frequency reconfigurable microstrip patch antenna switching between four frequency bands. *Progress In Electromagnetics Research*, 68, 179-191.
- Orban, D. and Moernaut, G., 2009. The basics of patch antennas, updated. RF Globalnet (www.rfglobalnet.com) newsletter.
- Orfanidis, S.J., 2004. Electromagnetic waves and antennas. Rutgers University. <https://gctjaipur.files.wordpress.com/2015/08/electromagnetic-waves-and-antennas.pdf> (25.03.2020)
- Pan, H., 2016. Liquid metal reconfigurable antennas. Master's Thesis, Texas A & M University.
- Panagamuwa, C.J., Chauraya, A. and Vardaxoglou, J., 2006. Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(2), 449-454.
- Pang, A.W., Bensmida, S., Gamlath, C.D. and Cryan, M.J., 2018. Non-linear characteristics of an optically reconfigurable microwave switch. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(7), 1060-1063.
- Paracha, K.N., Rahim, S.K.A., Soh, P.J. and Khalily, M., 2019. Wearable antennas: A review of materials, structures, and innovative features for autonomous communication and sensing. *IEEE Access*, 7, 56694-56712.
- Patil, C., Karhe, R. and Aher, M., 2012. Review on generations in mobile cellular technology. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(10), 901-912.
- Patron, D., Daryoush, A.S. and Dandekar, K.R., 2014. Optical control of reconfigurable antennas and application to a novel pattern-reconfigurable planar design. *Journal of Lightwave Technology*, 32(20), 3394-3402.
- Pendharker, S., Shevgaonkar, R. and Chandorkar, A., 2014. Optically controlled frequency-reconfigurable microstrip antenna with low photoconductivity. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 99-102.
- Polat, H.K., Geyikoglu, M.D. and Cavusoglu, B., 2019. The flexible antennas using silver paste with micro particles. In *2019 Fifth International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye)*. IEEE: pp: 1-3.
- Popoola, S.I., Faruk, N., Atayero, A.A., Oshin, M.A., Bello, O.W. and Adigun, M., 2017. 5g radio access network technologies: Research advances. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco. pp: 101-105.
- Pujol, F., Manero, C. and Jaffal, T., 2019. 5G Observatory Quarterly Report 4. 4, 1-85. [Online]. Available at <http://5gobservatory.eu/wp-content/uploads/2019/07/80082-5G-Observatory-Quarterly-report-4-min.pdf>.
- Ramya, S. and Maheswari, M., 2016. Design of frequency reconfigurable antenna using varactor diode. In *International Conference on Engineering Innovations and Solutions*. pp: 136-139.
- RF, P.D. and Engineer, M.D., Analysis and design of the rectangular microstrip patch antennas for tm_{0n0} operating mode.
- Sabban, A., 2019. Small new wearable antennas for iot, medical and sport applications. In *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE: pp: 1-5.
- Sandeep, B.S. and Kashyap, S.S., 2012. Design and simulation of microstrip patch array antenna for wireless communications at 2.4 ghz. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(11), 1-5.
- Schaubert, D.H., Pozar, D.M. and Adrian, A., 1989. Effect of microstrip antenna substrate thickness and permittivity: Comparison of theories with experiment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 37(6), 677-682.

- Schmitt, R., 2000. Understanding electromagnetic fields and antenna radiation takes (almost) no math. *EDN*, 45(5), 77-83.
- Seneviratne, S., Hu, Y., Nguyen, T., Lan, G., Khalifa, S., Thilakarathna, K., Hassan, M. and Seneviratne, A., 2017. A survey of wearable devices and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2573-2620.
- Shah, I., Hayat, S., Basir, A., Zada, M., Shah, S. and Ullah, S., 2019. Design and analysis of a hexa-band frequency reconfigurable antenna for wireless communication. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 98, 80-88.
- Sharma, S., Tripathi, C. and Rishi, R., 2017. Impedance matching techniques for microstrip patch antenna. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(28), 1-16.
- Silva Jr, P., Freire, R.C., Serres, A.J., Silva, P.d.F. and Silva, J.C., 2016. Wearable textile bioinspired antenna for 2g, 3g, and 4g systems. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(12), 2818-2823.
- Singh, A., Aneesh, M. and Ansari, J., 2017. Analysis of microstrip line fed patch antenna for wireless communications. *Open Engineering*, 7(1), 279-286.
- Singh, R.K., Basu, A. and Koul, S.K., 2018. A novel reconfigurable microstrip patch antenna with polarization agility in two switchable frequency bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(10), 5608-5613.
- So, J.H., Thelen, J., Qusba, A., Hayes, G.J., Lazzi, G. and Dickey, M.D., 2009. Reversibly deformable and mechanically tunable fluidic antennas. *Advanced Functional Materials*, 19(22), 3632-3637.
- Soares, A.M.d.S., 2015. Reconfigurable antenna for mobile terminal. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa,
- Song, L., Gao, W., Chui, C.O. and Rahmat-Samii, Y., 2019. Wideband frequency reconfigurable patch antenna with switchable slots based on liquid metal and 3-d printed microfluidics. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 67(5), 2886-2895.
- Suyama, S., Okuyama, T., Inoue, Y. and Kishiyama, Y., 2016. 5g multi-antenna technology. *NTT Docomo Technical Journal*, 17(4), 29-39.
- Tabakh, I., El Idrissi, N.E.A. and Jorio, M., 2016. Impact of a simple dgs size on the radiation characteristics of an elementary mpa. *International Journal of Scientific & Engineering Research (IJSER)*, 7(7), 985-994.
- Tawk, Y., Costantine, J., Hemmady, S., Balakrishnan, G., Avery, K. and Christodoulou, C.G., 2011. Demonstration of a cognitive radio front end using an optically pumped reconfigurable antenna system (opras). *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(2), 1075-1083.
- Tiwari, R.N., Singh, P. and Kanaujia, B.K., 2017. Dual u-slot loaded patch antenna with a modified l-probe feeding. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(3), 646-663.
- Ullah, S., Ahmad, S., Khan, B.A. and Flint, J.A., 2018. A multi-band switchable antenna for wi-fi, 3g advanced, wimax, and wlan wireless applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10(8), 991-997.
- Ullah, S., Hayat, S., Umar, A., Ali, U., Tahir, F.A. and Flint, J.A., 2017. Design, fabrication and measurement of triple band frequency reconfigurable antennas for portable wireless communications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 81, 236-242.
- Urbani, F., Stollberg, D.W. and Verma, A., 2011. Experimental characterization of nanofilm microstrip antennas. *IEEE transactions on nanotechnology*, 11(2), 406-411.
- Virili, M., Rogier, H., Alimenti, F., Mezzanotte, P. and Roselli, L., 2014. Wearable textile antenna magnetically coupled to flexible active electronic circuits. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 209-212.

- Wang, M., Trlica, C., Khan, M., Dickey, M. and Adams, J., 2015. A reconfigurable liquid metal antenna driven by electrochemically controlled capillarity. *Journal of Applied Physics*, 117(19), 194901.
- Wortmann, F. and Flüchter, K., 2015. Internet of things. *Business & Information Systems Engineering*, 57(3), 221-224.
- Zohur, A., Mopidevi, H., Rodrigo, D., Unlu, M., Jofre, L. and Cetiner, B.A., 2013. Rf mems reconfigurable two-band antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 72-75.



ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Hilal KOÇ POLAT
Doğum tarihi:	28 Ocak 1990
Doğum Yeri:	Merkez/Erzurum
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik & Mimarlık Fakültesi
E-mail:	hilal.koc@erzurum.edu.tr
Eğitim	
Lise:	Mecidiye Anadolu Lisesi (Erzurum)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü (2009-2013)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2013-2015)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2015-2020) <i>Misafir Öğrenci:</i> Hacettepe Üniversitesi (2015-2016/ Bahar Yarıyılı) <i>Misafir Öğrenci:</i> University of Putra Malasia (2018-Ocak)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
<u>SCI ve SCI-E Kapsamında</u>	
1. Koc Polat, H. , Geyikoglu, M.D. and Cavusoglu, B., 2020. Modeling and validation of a new reconfigurable patch antenna through equivalent lumped circuit-based design for minimum tuning effort. Microwave and Optical Technology Letters.	
<u>Türkiye Adresli Uluslararası</u>	
2. Koc Polat, H. , Geyikoglu, M.D. and Cavusoglu, B., 2020. A Novel Approach for Production Challenges of Flexible Microstrip Patch Antenna. Brillant Engineering, 1.1. 7-12.	
<u>Uluslararası Bildiriler</u>	
3. Polat, H.K. , Geyikoglu, M.D. and Cavusoglu, B., 2019. The flexible antennas using silver paste with micro particles. In2019 Fifth International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Türkiye). IEEE: pp: 1-3.	
4. Koc, H. , Geyikoglu, M.D. and Cavusoglu, B., 2018. Step By Step Investigation of Reconfigurable Microstrip Patch Antenna. ISASE 2018 International Symposium on Applied Sciences and Engineering, 26-28 November, Erzurum/ Türkiye.	
<u>Ulusal Bildiriler</u>	

5. **Koç, H.**, Geyikoğlu, M.D., Kaburcuk, F., Çavuşoğlu, B. and Ertuğrul, M., 2018. A microstrip patch antenna operation on cylindrical structures based on silicon rubber. In 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE: pp: 1-4.

