



**AÇIKLIK BAĞLAŞIMLI MİKROŞERİT YAMA
ANTENİN METAYÜZEYDEN ESİNLENEN KUSURLU
TOPRAK YAPISI İLE MİNYATÜRLEŞTİRİLMESİ**

Osman KAYA

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Hilal KOÇ POLAT**

**2024
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AÇIKLIK BAĞLAŞIMLI MİKROŞERİT YAMA ANTENİN METAYÜZEYDEN
ESİNLENEN KUSURLU TOPRAK YAPISI İLE MİNYATÜRLEŞTİRİLMESİ**

Osman KAYA

Tez Danışmanı: Hilal KOÇ POLAT

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

27 / 06 / 2024

İmzası

Osman KAYA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AÇIKLIK BAĞLAŞIMLI MİKROŞERİT YAMA ANTENİN METAYÜZEYDEN ESİNLENEN KUSURLU TOPRAK YAPISI İLE MİNYATÜRLEŞTİRİLMESİ

Osman KAYA

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hilal KOÇ POLAT

Bu tez çalışmasında, küp uydu uygulamalarında kullanılmak üzere kompakt bir mikroşerit yama anteni tasarımı amaçlanmıştır. Tasarım olarak açıklık bağlaşımlı beslemeli mikroşerit yama anteni (ACMA) tercih edilmiştir. Öncelikle, ACMA yama ve besleme alt tabakalarının dielektrik değerlerinin minyatürleşme ve ACMA ışıma performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Bunun için farklı dielektrik katsayılarına sahip FR4, RO5880, RO3010 ve RO4360 malzemeleri kullanılarak 8,0 GHz frekansında çalışan FR4-FR4, RT5880-RT5880, RT5880-RO3010 ve RO4360-RO3010 antenleri CST Microwave Studio programı ile tasarlanmıştır. En küçük boyut, dielektrik sabiti en yüksek olan yama alt tabakası ile elde edildiği ve katmalar arasında dielektrik sabiti farkının fazla olduğu durumda anten performansın daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra, 8,0 GHz frekansı için tasarlanan RO4360-RO3010 ve FR4-FR4 antenlerinin toprak düzlemine metayüzeyden esinlenen kusurlu toprak yapısı (DGS) eklenerek anten çalışma frekansı daha düşük frekanslara (6,0 GHz altına) indirilmeye çalışılmıştır. Bu yöntem sayesinde, RO4360-RO3010 antenin çalışma frekansı 7,954 GHz' den 5,64 GHz'e düşürülerek frekansa bağlı %30 oranında küçülme elde edilmiştir. FR4-FR4 anteninin çalışma frekansı ise 8,031 GHz' den 5,095 GHz' e düşürülerek frekansa bağlı %36 oranında küçülme elde edilmiştir. Buna ek olarak, 5,1 GHz frekansında geleneksel bir FR4-FR4 anteni tasarlanarak minyatürleşmiş FR4-FR4 anteni ile karşılaştırılması yapılmıştır. Geleneksel antenin alanı 1890 mm² iken minyatürleşmiş anten 622 mm² alana sahiptir. Bu ise, yaklaşık olarak %67 oranında küçülmeye denk gelmektedir. Sonuç olarak, kazanç bakımından geleneksel antenin değeri %30 daha iyi iken, bant genişliği minyatürleşmiş antende daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca bu tez kapsamında minyatürleşmiş FR4-FR4 anteninin üretimi gerçekleştirilerek S11 parametrelerinin ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının uyumlu olduğu gösterilmiştir.

2024, 65 sayfa

Anahtar Kelimeler: Açıklık Bağlaşımlı Mikroşerit Yama Anten, Birim Hücre Tasarımı, Küp Uydu, Metayüzey, Minyatürleştirme, Kusurlu Toprak Yapısı

ABSTRACT

MS. Thesis

MINIATURIZATION OF APERTURE-COUPLED PATCH ANTENNAS THROUGH METASURFACE INSPIRED DEFECTED GROUND STRUCTURE

Osman KAYA

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hilal KOÇ POLAT

The purpose of this thesis is to design a compact microstrip patch antenna for cubesat applications. Aperture coupled fed microstrip patch antenna (ACMA) has been preferred as a design. First of all, the effect of the dielectric constant of ACMA's patch and feed substrates on miniaturization and ACMA radiation performance was examined. For this, the following four antenna were designed at 8.0 GHz frequency using materials with different dielectric coefficients in the CST Microwave Studio program; FR4-FR4, RT5880-RT5880, RT5880-RO3010, RO4360-RO3010. It is observed that the smallest size is obtained with the substrate with the highest dielectric constant and the performance is better when the dielectric constant difference between the layers is high. In the next stage, an attempt was made to reduce the antenna operating frequency to lower frequencies (below 6.0 GHz) by adding a metasurface-inspired defective ground structure to the ground plane of ACMA's designed at 8.0 GHz operating frequency. Thanks to this method, the operating frequency of the RO4360-RO3010 antenna decreased from 7,954 GHz to 5,64 GHz, meaning a 30% reduction was achieved depending on the frequency. The operating frequency of the FR4-FR4 antenna decreased from 8,031 GHz to 5,095 GHz, meaning a 36% reduction was achieved depending on the frequency. In addition, a conventional FR4-FR4 antenna at 5.1 GHz frequency was designed and compared with the miniaturized FR4-FR4 antenna. While the space covered by the conventional antenna is 1890 mm², the space covered by the miniature antenna is 622 mm². This corresponds to a reduction of approximately 67%. As a result, while the value of the conventional antenna was 30% better in terms of gain, it was seen that the bandwidth was higher in the miniaturized antenna. In addition, in this thesis study, the miniaturized FR4-FR4 antenna was produced and it was shown that the measurement results of the S11 parameters and the simulation results were compatible.

2024, 65 page

Keywords: Aperture-Coupled Microstrip Patch Antenna, Cube-SAT, Unit Cell Design, Metasurface, Miniaturization, Defected Ground Structure

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca yapmış olduğum çalışmalarda bilgi birikimini bana aktaran, yol gösteren, çalışma azim ve isteğimin azaldığı her zaman beni çalışmaya teşvik eden, sürekli yanımda olan kıymetli ve değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hilal KOÇ POLAT' a göstermiş olduğu sabır ve anlayışından dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatıma başladığımdan bu yana maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen babam Yakup KAYA' ya, annem Esengül KAYA' ya, kardeşlerim F. Berra KAYA' ya ve M. Emir KAYA' ya teşekkür ederim.

Tez savunma jüri üyeleri olan değerli ve kıymetli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Uğur YEŞİLYURT ve Dr. Öğr. Üyesi Miraç Dilruba GEYİKOĞLU' na yapmış oldukları değerlendirme ve yönlendirmelerinden dolayı teşekkür ederim.

Yapmış olduğum çalışmalara ekipman ve malzeme desteği sunan, akademik olarak bana değerli bilgilerini aktaran, yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen Milli Savunma Üniversitesi, Kara Harp Okulu, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Bölüm Başkanı Doç. Dr. Semih ÖZDEN' e, Haberleşme ABD. Bşk. Dr. Öğr. Üyesi Mert KARAHAN' a ve bütün bölüm personeline teşekkür ederim.

Bütün süreç boyunca bana destek çıkan arkadaşlarım Emir Osman ÇELİK, Kürşat YILDIZ ve Cihat ZERİN' e teşekkür ederim.

Osman KAYA
Haziran 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM	12
3.1 CST Studio Suite.....	12
3.2 LPKF Protomat S103 Baskı Devre Kazıma Cihazı	13
3.3 Rohde&Schwarz ZNB8 Vector Network Analyser	13
3.4 Mikroşerit Yama Antenler	13
3.4.1 Mikroşerit yama antenleri besleme yöntemleri.....	16
3.5 Açıklık Bağlaşım Beslemeli Mikroşerit Yama Anteni	19
3.6 Malzeme Tabanlı Teknikler ile Anten Minyatürleştirme.....	25
3.7 Metamalzeme ve Metayüzeyler	26
3.8. Parametrelerin Sayısal Çıkarımı Yoluyla Metayüzeylerin Doğrulanması.....	27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	30
4.1 Malzeme Esaslı Minyatürleşme	30
4.1.1 FR4-FR4 tabanlı ACMA için performans analizi	31
4.1.2 RT5880- RT5880 tabanlı ACMA için performans analizi	33
4.1.3 RT5880– RO3010 tabanlı ACMA için performans analizi	35
4.1.4 RO4360– RO3010 tabanlı ACMA için performans analizi.....	38
4.1.5 ACMA’ların karşılaştırmalı performans analizi	40
4.2. Metayüzeyden Esinlen DGS ile Minyatürleşme	42
4.2.1 RO4360-RO3010 anteni metayüzeyden esinlen DGS uygulaması.....	42
4.2.2 FR4-FR4 anteni metayüzeyden esinlen DGS uygulaması	47
4.2.3 Geleneksel FR4-FR4 ACMA.....	53
4.3. Anten Üretim ve Ölçüm Çalışmaları.....	55
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	59

KAYNAKLAR	62
------------------------	-----------



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

dB	Desibel
dBi	İzotropik Desibel
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
mm	Milimetre
W	Watt
β	Faz Sabitini
ϵ	Elektriksel Geçirgenlik
μ	Manyetik Geçirgenlik

Kısaltmalar

ACMA	Aperture Coupled Feed Microstrip Antenna
ADCS	Yönelme Saptama ve Denetleme Sistemi
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
COTS	Ticari Kullanıma Hazır
CP	Dairesel Polarizasyon
CSRR	Tamamlayıcı Bölünmüş Halka Rezonatörü
DGS	Kusurlu Toprak Yapısı
DNG	Çift Negatif
DPS	Çift Pozitif
EM	Elektromanyetik
ENG	Epsilon Negatif
EPS	Elektrik Güç Sistemi
LEO	Alçak Dünya Yörüngesi
MEO	Orta Dünya Yörüngesi
MNG	Mu Negatif
NRW	Nicholson-Ross-Weir
RF	Radio Frekansı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. (a) 6U küp uydu (b) S bant yama anten.....	4
Şekil 2.2. Geleneksel fraktal geometrileri (Werner et al. 2003)	6
Şekil 2.3. Koch eğrisi kuşakları (Best 2002)	6
Şekil 2.4. Peryodik kapasitif yüklü anten tasarımı (Chi et al. 2011)	8
Şekil 2.5. ENG tabanlı birim hücre CST modeli (Iqbal et al 2022)	9
Şekil 2.6. MNG tabanlı birim hücre (a)Geometri (b) CST modeli (Iqbal et al 2022)	9
Şekil 2.7. DNG tabanlı birim hücre (a) Geometri (b) CST modeli (Iqbal et al 2022)....	10
Şekil 3.1. Mikroşerit yama anteni yapısı	14
Şekil 3.2. ACMA yapısı.....	19
Şekil 3.3. ACMA yapısı detaylı gösterimi. (a) Yama alt tabakası üstten görünümü (b) Toprak düzlemi görünümü (c) Besleme alt tabakası üstten görünümü (d) Besleme alt tabakası alttan görünümü (e) Antenin yandan görünümü.	20
Şekil 3.4. Bazı açıklı şekilleri (Günay 2012).....	24
Şekil 4.1. FR4-FR4 ACMA için tasarım görseli	31
Şekil 4.2. FR4-FR4 anteninin geri yansıma katsayısı (S11) grafiğinin benzetim sonucu	32
Şekil 4.3. FR4-FR4 anteninin benzetim ortamında 3-B uzak alan kazanç örüntüsü	32
Şekil 4.4. FR4-FR4 anteni verimlilik grafiği.....	33
Şekil 4.5. RT5880- RT5880 anteninin geri yansıma katsayıları (S11) benzetim sonucu	34
Şekil 4.6. RT5880- RT5880 anteninin benzetim ortamında 3-B uzak alan kazanç örüntüsü	35
Şekil 4.7. RT5880-RT5880 anteni verimlilik grafiği	35
Şekil 4.8. RT5880 – RO3010 anteninin geri yansıma katsayıları (S11) benzetim sonucu	37
Şekil 4.9. RT5880-RO3010 anteninin benzetim ortamında 3-B uzak alan kazanç örüntüsü.....	37
Şekil 4.10. RT5880 – RO3010 antenini verimlilik grafiği	38
Şekil 4.11. RO4360 – RO3010 anteninin yansıma katsayıları (S11) benzetim sonucu .	39
Şekil 4.12. RO4360- RO3010 anteninin uzak alan kazanç örüntü sonucu.....	40
Şekil 4.13. RO4360-RO3010 anteni verimlilik grafiği.....	40

Şekil 4.14. Metayüzeyden esinlen DGS anten tasarımları. (a) Tasarım-1, (b) Tasarım-2, (c) Tasarım-3, (d) Tasarım-4.....	43
Şekil 4.15. Metayüzeyden esinlen DGS tasarımlarının geri yansıma kaybı (S11) değerleri	44
Şekil 4.16. Nihai RO4360 – RO3010 anteninin yansıma katsayıları (S11) benzetim sonucu.....	44
Şekil 4.17. Nihai RO4360-RO3010 anteninin uzak alan kazanç örüntü sonucu	45
Şekil 4.18. Nihai RO4360-RO3010 anteni verimlilik grafiği.....	45
Şekil 4.19. RO4360-RO3010 anteninin yüzey akımları. (a) Ana tasarım (b) Nihai tasarım	46
Şekil 4.20. RO4360-RO3010 anteni için (a) Co polarizasyon grafiği (b) Cross polarizasyon grafiği.....	46
Şekil 4.21. Birim hücrenin CST’ de iki kapılı görseli	47
Şekil 4.22. Birim hücreye ait e ve u sonuçları	47
Şekil 4.23. Metayüzeyden esinlen DGS anten tasarımları. (a) Tasarım-1, (b) Tasarım-2, (c) Tasarım-3, (d) Tasarım-4.....	48
Şekil 4.24. Metayüzeyden esinlen DGS tasarımlarının geri dönüş kaybı (S11) değerleri	48
Şekil 4.25. Nihai FR4-FR4 anteninin yansıma katsayıları (S11) benzetim sonucu.....	49
Şekil 4.26. Nihai FR4-FR4 anteninin uzak alan kazanç örüntü sonucu	49
Şekil 4.27. Nihai FR4-FR4 anteni verimlilik grafiği	50
Şekil 4.28. FR4-FR4 anteninin yüzey akımları. (a) Ana tasarım (b) Nihai tasarım	50
Şekil 4.29. FR4-FR4 anteni için (a) Co polarizasyon grafiği (b) Cross polarizasyon grafiği	51
Şekil 4.30. FR4-FR4 birim hücrenin CST’ de iki kapılı görseli.....	51
Şekil 4.31. FR4-FR4 anteni birim hücreye ait e ve u sonuçları	52
Şekil 4.32. Geleneksel FR4-FR4 anteni geri yansıma katsayısı(S11)	54
Şekil 4.33. Geleneksel FR4-FR4 anteninin benzetim ortamında 3-B uzak alan kazanç örüntüsü.....	54
Şekil 4.34. Geleneksel FR4-FR4 anteni verimlilik grafiği	55
Şekil 4.35. (a) LPKF Baskı cihazı ve kontrol bilgisayarı, (b) LPKF baskı cihazı kazıma alanı.	56

Şekil 4.36. (a) FR4-FR4 antenine ait yama, toprak düzlemi, besleme hattı görünüşleri, (b) FR4-FR4 anteninin arka yüzey görseli (c) FR-FR4 anteni ön yüzey görseli.....	56
Şekil 4.37. S11 parametresinin ölçümü	57
Şekil 4.38. 1U Küp Uydu üzerinde antenin konumu	57
Şekil 4.39. Anten ölçüm ve benzetim sonucu karşılaştırması	57



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Uyduların sınıflandırılması (Tubbal et al. 2006)	1
Çizelge 3.1. Mikroşerit antenlerin besleme yöntemleri karşılaştırması (Altundaş 2016, İpekli 2021).	18
Çizelge 4.1. FR4-FR4 anteni tasarım parametreleri	31
Çizelge 4.2. RT5880- RT5880 anteni tasarım parametreleri	33
Çizelge 4.3. RT5880 – RO3010 anteni tasarım parametreleri.....	36
Çizelge 4.4. RO4360 – RO3010 anteni tasarım parametreleri	38
Çizelge 4.5. Tasarlanan antenlerin özellikleri.....	41
Çizelge 4.6. Ana ve nihai tasarımların karşılaştırılması	52
Çizelge 4.7. Geleneksel FR4-FR4 anteni tasarım parametreleri.....	53
Çizelge 5. 1. Minyatürleştirilen antenin literatüre göre kıyaslaması	61

1. GİRİŞ

Uzun yıllar boyunca, Orta Dünya Yörüngesi (MEO) uyduları uydu endüstrisi ve uzay kuruluşları için tek seçenektir. MEO uyduları 500 ile 1.000 kg kütleye sahiptir, 900 km yükseklikte çalışır, güneş senkronludur ve yüksek güç yani yaklaşık 8,0 kW güç tüketir. Tipik zaman çerçeveleri yaklaşık dört yıldır ve maliyetleri 50 ile 100 milyon ABD doları arasında değişmektedir (Sandau 2010). Buna karşılık, Küp Uydular, halka açık hale gelen uydu endüstrisi için uygun maliyetli bir seçenektir. Küp Uydular Alçak Dünya Yörüngesinde çalışır, küçüktür, hafiftir ve Ticari Kullanıma Hazır (COTS) bileşenleri kullanılarak oluşturulabilir. Kütleleri 1,0 ile 10 kg arasında değişir ve düşük güçtedir yani yaklaşık 2,0 W güç tüketir. Çizelge 1.1'de belirtildiği gibi, orta boy uydulara kıyasla Küp Uydular daha ucuzdur, daha küçük boyutlara sahiptir, daha az güç tüketir ve inşa edilmesi daha kısa sürer ve buna bağlı olarak çok daha sınırlı işlevselliğe sahiptir (Tubbal et al. 2006).

Çizelge 1.1. Uyduların sınıflandırılması (Tubbal et al. 2006)

	Model	Ağırlık (kg)	Maliyet (US \$)	Üretim Süresi	Anten Kazancı	Güç Tüketimi
	Geleneksel	>1.000	0,1-2 B	>5 Yıl	Çok Yüksek	~1.000W
	Orta	500-1.000	50-100 M	4 Yıl	Çok Yüksek	~800 W
Küçük Uydular	Mini	100-500	10-50 M	3 Yıl	Yüksek	53,2
	Micro	10-100	2-10 M	~1 Yıl	Orta	35W
	Nano	1-10	0,2-2 M	<1 Yıl	Orta	7 W
	Pico	1-1,3	20-200 K	<1Yıl	Düşük	2W
	Femto	<0,1	0,1-20 K	<1 Yıl	Düşük	6mW

Elektrikli ve elektronik bileşenlerin minyatürleştirilmesi tekniklerindeki teknolojik gelişmeler, bir zamanlar büyük, karmaşık, zaman alıcı ve son derece yüksek maliyetli olan uydu sistemlerinin küçük, daha az maliyetli ve daha kısa zamanda geliştirilebilmesine olanak sağlamıştır. Bu küçük minyatür uydulara nano uydular denilmektedir ve bunlardan en yaygın olanı küp uydudur. Küp uydular, 10 cm x 10 cm x 10 cm boyutlarında küp şeklinde bir yapı olan ve bir birim (1U) adı verilen standartlaştırılmış bir form faktörü kullanır. Bu tasarım konsepti, 3U, 6U, 12U ve hatta 24U gibi diğer birimlere ölçeklenebilen modüler bir tasarımıdır. Nano uydular, küçük yapıları ve düşük geliştirme ve fırlatma maliyetleri nedeniyle Alçak Dünya Yörüngesinde (LEO) uydu karasal 5G ağlarının gereksinimlerini karşılamak için kullanılabilir (Evans

2014). Nano uydu sisteminin alt sistemleri; iletişim antenleri, elektrik güç sistemi (EPS) modülü, tümleşik bilgisayar& verici, yönelme saptama ve denetleme sistemi (ADCS) modülüdür. Bu sistemlerde yer alan anten yapılarının, yüksek performans parametrelerine (geniş bant genişliği, yüksek kazanç ve verimlilik) sahip ve kompakt özellikleri ile küp uyduların gerekliliklerini karşılayacak şekilde tasarlanması gerekir (Rawls 2014; Ramahatla et al. 2022).

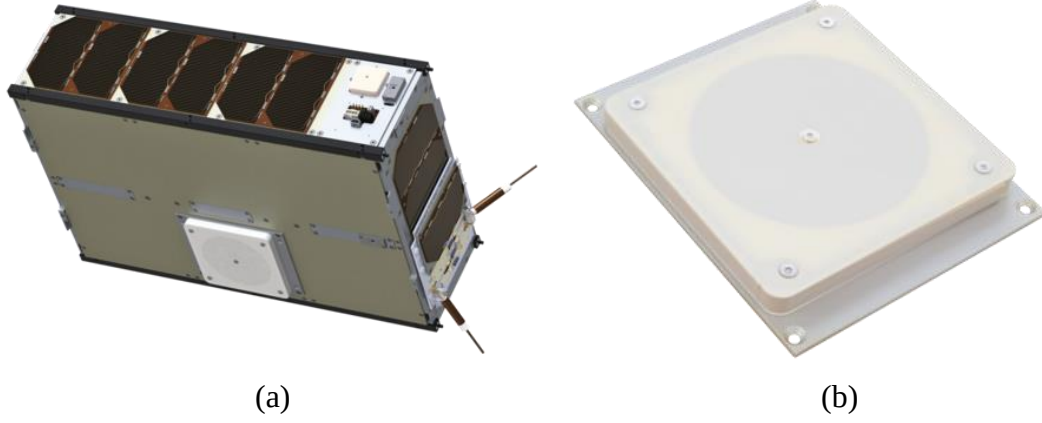
Yapılan tez çalışmasında uzay uygulamalarında kullanılmak üzere kompakt bir mikroşerit yama anteni tasarımı amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda malzeme tabanlı ve topoloji tabanlı minyatürleştirme teknikleri kullanılarak ACMA üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Mikroşerit yama antenleri için açıklık bağlaşımlı besleme tekniği üretim açısından diğer besleme tekniklerine göre zor olsa da modellemesi biraz daha kolaydır ve orta derecede sahte radyasyona sahiptir (Balanis 2016). Bu yüzden bu tez çalışmasında mikroşerit yama antenin beslemesinde açıklık bağlaşımlı besleme tekniği kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ilk önce malzeme tabanlı minyatürleştirme tekniklerinden yüksek dielektrik katsayılı malzemelerin kullanımı üzerine araştırma yapılmıştır. ACMA’ da kullanılan yama alt tabakasının dielektrik katsayısı yamanın boyutunu doğrudan etkilemektedir. Bu etkiyi görmek amacıyla farklı yama ve besleme alt tabaka malzemeleri ile tasarımlar yapılmıştır. Anten alt tabakası olarak dielektrik katsayı değeri 4,3 olan FR4, dielektrik katsayı değeri 2,2 olan RT5880 ve dielektrik katsayı değeri 6,4 olan RO4360 malzemeleri kullanılmış ve tasarlanan antenler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İkinci olarak ise ACMA’ nın toprak düzlemi üzerindeki açıklık etrafına dikdörtgen halka şeklinde yarıklar açılarak birim hücre tasarımı yoluyla iletkenin elektrik ve manyetik geçirgenliğine etkisi incelenmiştir. Burada ACMA’ nın toprak düzlemi tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörü (CSRR) yapısına benzetilerek metayüzeyden esinlenen kusurlu toprak yapısı (DGS) ile anten minyatürleştirme başarılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla literatürde ilk kez bu tez çalışmasında ACMA’ nın toprak düzlemine metayüzeyden esinlenen DGS uygulanarak inceleme gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bu teknik sayesinde minyatürleştirme yapılan anten aynı frekansta çalışan geleneksel antene göre daha yüksek bant genişliğine sahiptir. Minyatürleşmiş antenin kazanç değerinin ise %30 daha az olup bu azalma literatürle karşılaştırılabilir seviyededir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Küp uydularda, boyut ve güç kısıtlamaları nedeniyle, geleneksel uydulardakilere kıyasla daha küçük ve daha hafif antenler kullanılır. Bu antenler, uydu ile yer istasyonu arasındaki haberleşmeyi sağlamak, uydudan veri toplamak ve komut göndermek için kullanılır. Anten seçimi, görev gereksinimleri, güç ve boyut kısıtlamaları, frekans aralığı ve maliyet gibi faktörlere bağlıdır. Antenler genellikle uydu gövdesine entegre edilir veya açılabilir bomlar üzerine monte edilir ve uzay ortamının zorlu koşullarına dayanıklı olacak şekilde tasarlanır. Küp uydu anteni performansı, yörünge ve yer istasyonu konumuna bağlı olarak değişebilir (Samii et al. 2017).

Abulgasem et al. (2021) tarafından yapılan çalışmada küp uydular için tasarlanmış olan anten türleri incelenmiş, küp uydu görevlerine göre uygunluk ve kullanım oranı gösterilmiştir. Küp uydu uygulamaları için en popüler anten türlerinin düzlemsel (patch), monopol/dipol, reflektör, reflektif dizi, helisel ve horn antenler olduğu görülmüştür. Yama ve slot antenler gibi düzlemsel antenlerin üretimi kolaydır, düşük profillidir, düşük maliyetlidir ve diğer Radyo Frekansı (RF) ve mikrodalga devrelerle entegrasyonu kolaydır. Bu özellikler, onları küp uydular için ideal hale getirir. Ek olarak, konuşlandırılabilir antenlerle, yani sarmal ve reflektör antenlerle karşılaştırıldığında, düzlemsel antenler daha küçük alan kaplar ve yerleştirme gerektirmez. Ayrıca yama antenler minyatürleştirmeye olanak sağlamaktadır ve boyutları küçültülerek daha az alan kaplanması sağlanarak diğer bileşenlere daha fazla kullanılabilir bölge bırakır (Abulgasem 2021).

Ticari olarak Küp Uydu tasarımı ve üretimi yapan firmalar şu an piyasada bulunmaktadır. Gomspace firması bu oluşumlardan birisidir. Bu firma farklı boyutlarda Küp Uydu şasesi ve alt sistemlerini üretmektedir. Ürün yelpazeleri incelendiğinde Küp Uydunun haberleşme sisteminde yama anten tercih ettikleri görülmektedir. Şekil 2.1’de Gomspace’in ürettiği 6U’luk küp uydu ve S Bant yama anteni gösterilmektedir (Anonymous 2024a).



Şekil 2.1. (a) 6U küp uydu (b) S bant yama anten

Küp uydular üzerinde kullanılan yama antenlerinin geniş bant genişliği ve yüksek kazançlı antenler olması arzu edilen durumdur. Bunun yanı sıra kullanılan yama anteninin kompakt yapıda olması beklenir. Bu bağlamda yama antenlerini minyatürleştirme çabası ortaya çıkmaktadır.

Anten minyatürleştirme için ilk araştırmalar, bir antenin boyutundaki azalmanın, mevcut antenin performansında genellikle düşük verimlilik ve sınırlı bir bant genişliği ile sonuçlandığını göstermektedir (Fallapour et al. 2018). Son zamanlarda, kabul edilebilir eşleştirme özelliklerini ve çalışma bant genişliğini korumaya çalışırken, farklı anten türlerinin biçim faktörünü (veya genel boyutunu) azaltmak için birçok yeni araştırma yapılmıştır. Bu minyatürleştirme teknikleri genellikle bir antenin elektriksel ve fiziksel özelliklerinin değiştirilmesi ile ilgilidir.

Fallahpour et al. (2018) tarafından yapılan bir inceleme çalışmasında birçok anten minyatürleştirme tekniği incelenmiş ve sınıflandırılmıştır. Anten minyatürleştirme tekniklerini temelde topoloji tabanlı ve malzeme tabanlı teknikler olarak ikiye ayırmıştır. Topoloji tabanlı tekniklere; menderes antenlere, fraktal antenler, tasarlanmış toprak düzlemlili antenler, reaktif yüklü antenler örnek verilebilir. Malzeme tabanlı tekniklere; tasarlanmış alt tabakalar, metayüzeyler ve metamalzeme tabanlı teknikler örnek verilebilir (Fallahpour 2018).

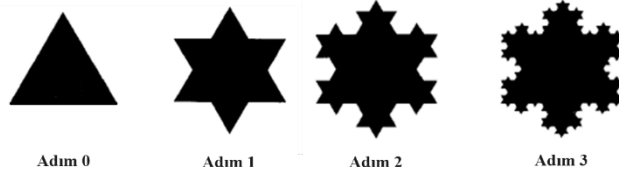
Topoloji tabanlı minyatürleşme tekniklerinde antenlerin geometrisi, akım dağılım yoğunluğu ve elektriksel boyutları değiştirilerek anten özellikleri ayarlanabilir. Bu

özellikler genellikle eşleştirme/giriş empedansı, radyasyon modeli/kazanç, verimlilik, polarizasyon, kalite faktörü ve bant genişliği açısından tanımlanır. Uyarılmış bir anten, hareketli yüklerin toplamından oluşur. Bu nedenle, hızlandırılmış yüklerinden gelen radyasyon, istenen frekanslarda ve açısal yönlerde yapıcı bir şekilde toplanmak üzere iyi yönetilirse, verimli bir yayıcı olabilir. Antenin geometrisinin, akım dağılımının ve elektriksel boyutlarının uygun şekilde tasarlanması gerekir. Bu konseptte dayanarak, istenen radyasyon özelliklerini elde etmek için genel boyutları mümkün olduğu kadar küçük olacak şekilde sınırlandırırken, bir antenin şeklini ve genel geometrisini verimli bir şekilde değiştiren ve optimize eden tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Minyatürleştirme tekniğinin arkasındaki temel fikir, klasik antenlere ek boyutlar eklenmesi ile anten boyutlarını veya alanını en uygun şekilde genişleterek daha büyük yayılan bir yapıyı sığdırmak için mevcut alanı (veya hacmi) verimli bir şekilde kullanmaktır. Bu amaçla, özel matematiksel eğriler ve geometriler bilgisine başvurulur (Fallahpour 2018).

Kıvrımlı anten yapıları ile düz bir çizgi daha kısa uzunluk kaplayacak şekilde bükülerek mevcut alan doldurulabilir. Günümüzde kıvrımlı antenler ticari ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompakt olmaları ve düşük üretim maliyetleri nedeniyle, kıvrımlı antenler ultra yüksek frekansta kullanılır. Aynı frekansta yayılan bir yama/dipol ile karşılaştırıldığında önemli bir boyut küçülmesi gösterir. Kıvrımlı hatlara dayalı antenler yüksek kazanç sağlamayabilir çünkü bitişik kollardaki akımlar 180° faz dışıdır ve uzak alanda birbirlerinin ilgili radyasyonunu iptal etme eğilimindedir. Faerber et al. (2015) yapmış oldukları çalışmada kıvrımlı anteni endoskopi işleminde kullanmak üzere geliştirmişlerdir (Faerber et al. 2015). Bu çalışma için gerekli anten performans parametreleri 58 mm' lik bir anten boyu ile karşılanmasına rağmen, kıvrımlı anten yapısı kullanılarak 25 mm uzunluğunda 10 mm çapında daha küçük bir yapıya sığdırılmıştır.

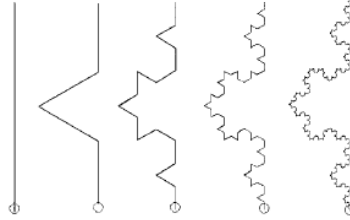
Fraktal yapılar, topolojik boyutlarından daha büyük olabilen ve nispeten uzun bir büyüklüğü çok daha küçük bir alana sığdırmak için kullanılan geometrilerdir. Fraktal geometrinin tasarımlara dahil edilmesi ile geleneksel kendini tekrar eden Öklid geometrisi tabanlı antenlere zıtlık oluşturan yeni bir anten sınıfı meydana gelmiştir (Werner et al. 2003). Fraktal antenler, verimli alan kullanımları nedeniyle çok daha küçük bir alanı işgal ederken, daha büyük antenlere benzer bir radyasyon modeli ve giriş

empedansı sağlayabilir (Wang et al. 2017). Şekil 2.2’ de geleneksel fraktal geometrileri ile kompakt bir UHF fraktal antenin bir prototipi gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Geleneksel fraktal geometrileri (Werner et al. 2003)

Koch eğrisi ailesinden Koch dipolü, aynı frekansta rezonansa giren düz telli bir dipol ile kıyaslandığında daha küçük boyuta sahiptir. Sıradan dipol muadili ile aynı pozisyonda başlayan ve biten bir Koch dipolünün etkili bir şekilde çok daha büyük bir uzunluk ve dolayısıyla daha düşük bir rezonans frekansı sağladığı gözlemlenmiştir. Her yinelemeden sonra, Koch dipolünün toplam uzunluğu $4/3$ kat daha uzun olur. Ancak rezonans frekansı aynı oranda azalmaz. Bunu, her iterasyonda, önceki bölümlerin (fraktallar) daha küçük parçalara bölündüğünü, işletim rezonans frekansının daha aşağı kaydığını ve dalga boyunun daha uzun olduğunu düşünerek açıklanabilir (Best 2002). Bazı Koch eğrileri Şekil 2.3’ te sunulmuştur.



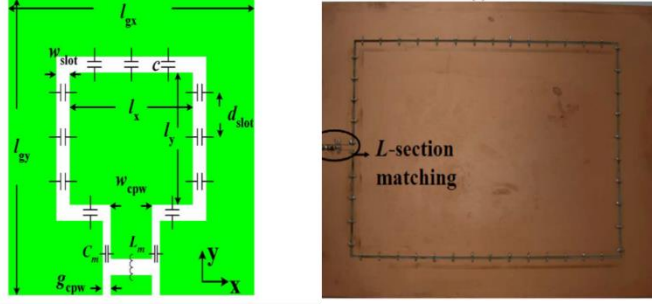
Şekil 2.3. Koch eğrisi kuşakları (Best 2002)

Birçok minyatürleştirme tekniğinde kullanılan bir diğer önemli temel fikir, boyutsal olarak çalışma dalga boyuna göre daha küçük bir antenin elektriksel olarak aynı frekansta normal boyuttaki bir anten gibi çalışabilmesidir. Bunu başarmak için anten yapısındaki dalga yayılımının yavaşlatılması gerekir. Düzlemsel bir antenin toprak düzlemini tasarlayanın anten özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. İletken yer düzlemine dalga boyuna benzer boyutta bir yarığın eklenmesi, geri dönüş akımı yolunu değiştirir. Yarıқта, akımın bir kısmı yer değiştirme akımına dönüşür ve bir kenardan diğerine ve çevreleyen ortama yayılır. Yarığın köşelere yakın kısmı akımı bu köşelerin

etrafına yönlendirme eğilimindedir. Bu iki olayın kombinasyonu, akımda net bir faz kaymasına neden olur ve sonuç olarak akım akışını yavaşlatır. Genel olarak elektromanyetik bant aralığı (band gap) yapıları ve tek boyutlu elektromanyetik bant aralığı yapıları olarak kusurlu zemin yapıları (Defected Ground Structure- DGS) bu konseptte dayalı olarak tasarlanmıştır. Arya (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, geleneksel bir mikroşerit antenin zemin düzlemine yarıklar eklenerek dambıl şekli oluşturulmuştur. Burada boyutları optimize edilerek geleneksel mikroşerit anten muadili ile karşılaştırıldığında yaklaşık %60' lık bir boyut küçültmesi sağlanmıştır. DGS'li anten ~1,8 GHz'de rezonansa girerken, DGS'siz aynı anten ~5,00 GHz'de rezonansa girer (Arya 2010).

Anten bir iletim hattı olarak modellenebildiğinden ve iletim hattı teorisi kullanılarak analiz edilebildiğinden, reaktif yükleme teknikleri de etkili bir minyatürleştirme tekniği olarak uygulanabilir. Bir iletim hattında dalga yayılmasını yavaşlatmak için, reaktif yükler (endüktif veya kapasitif) iletim hattı yapısına etkili bir şekilde dahil edilebilir. Bu tür yükleme, zaman gecikmesi (faz kayması) getirir ve dalga yayılmasını yavaşlatır. Sonuç olarak, yüklü iletim hattı elektriksel olarak daha uzun görünür. Böylece, bir anten reaktif olarak yüklenerek daha düşük bir frekansta çalıştırılabilir (Chi et al. 2011).

Kapasitif veya endüktif yükleme, yayılma sabitini artırarak yavaş dalga yapısına neden olur. Yavaş dalga geliştirme faktörü, “antendeki dalganın yüklü olanın yüksüz yayılma sabitlerine oranı” olarak tanımlanır ve doğrudan anten minyatürleştirme faktörünü etkiler. Chi et al. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, yönlendirilmiş bir dalgayı yavaşlatmak ve bir yavaş dalga yapısı oluşturmak için şönt-toplu kapasitanslarla periyodik olarak yüklenen bir anten önerilmiştir. Şekil 2.4' te önerilen antene ait görseller sunulmuştur. Bir iletim hattının periyodik olarak yüklenerek yayılma sabitini nasıl artırabileceğini ve bunun sonucunda bir yavaş dalga yapısı elde edilebileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.4. Peryodik kapasitif yüklü anten tasarımı (Chi et al. 2011)

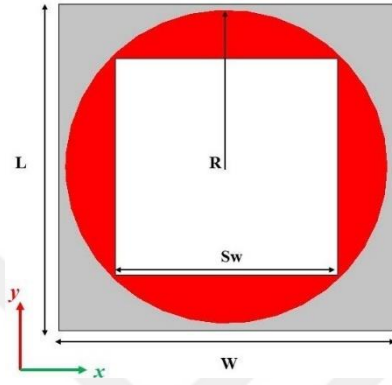
Malzeme tabanlı minyatürleştirme tekniklerinde ise anten yapısında bulunan yalıtkan alt tabaka ve iletkenin elektriksel ve manyetik özelliklerini değiştirerek anten boyutuna küçülme sağlanır. Alt tabakanın daha yüksek bir dielektrik sabiti ile inşa edilmesi, yama için daha yavaş bir dalga yayılımına ve sonuç olarak baskın mod için daha düşük bir rezonans frekansına neden olur. Boyut ve alt tabakanın elektromanyetik özellikleri arasındaki bu ilişkiye dayanarak, yüksek dielektrik sabitine sahip alt tabaka malzemeleri kullanılarak çeşitli minyatürleştirme teknikleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte, alt tabaka için böyle bir malzemenin kullanılması radyasyon etkinliğini azaltabilir. Yüksek dielektrik sabitine sahip alt tabaka, anten empedans uyumunda zorluklara ve dar bant genişliğine neden olabilir. Bununla birlikte, antenin yüksek dielektrik sabiti olan bir malzemeyle uyumlanması gereken uygulamalar için, yüksek dielektrik alt tabaka üzerine inşa edilmiş antenler iyi bir seçenek olabilir. Bu, biyomedikal uygulamalar için insan vücudunun elektriksel geçirgenliğine yakın altlık malzemeli antenler tasarlamak için geçerlidir. Seramik alümina ($\epsilon_r = 9,4$), Rogers 6010 ($\epsilon_r = 10,2$) ve Rogers 3010 ($\epsilon_r = 10,2$) gibi yüksek dielektrik sabitli malzemeler kullanılabilir (Colburn et al. 1999).

Metamalzemeler, doğada bulunmayan ve yapay olarak ortamında üretilen, alışılmışın dışında elektriksel özelliklere sahip olan malzemelerdir. Metamalzemelerin sınıflandırılması hem μ hem de ϵ' nun pozitif olduğu çift pozitif (DPS), ϵ -negatif (ENG), μ -negatif (MNG) ve çift negatif (DNG) gibi temel parametre değerlerine dayanmaktadır (Eleftheriades et al. 2005).

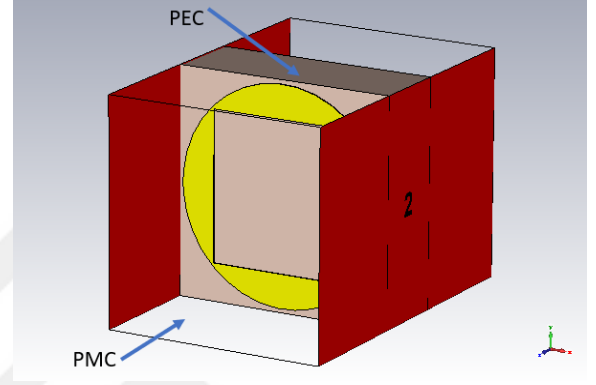
ENG tabanlı metayüzey, negatif bir ϵ değeri elde etmek için tasarlanır (Engheta 2006). Iqbal et al. (2022) tarafından Şekil 3.8'deki birim hücre tasarlanmıştır. Tasarlanan

2. KAYNAK ÖZETLERİ

yapı, kare bir yuvaya sahip dairesel bir yama ve bir Alümina($\epsilon=9,9$) alt tabakadan oluşmaktadır. Bu birim hücrenin bir dizisini düşünersek, dizinin kesme frekansının altında yayılma olmaz ve bir elektromanyetik dalga tam yansıma yapar. Bu davranış, elektromanyetik dalgaların plazmadaki yayılmasına benzer. Birim hücreler arasındaki mesafe dalga boyundan çok daha küçükse, dizi yapısı etkili bir geçirgenlik ϵ_{eff} ile tanımlanan sürekli bir plazma benzeri malzeme olarak düşünülebilir (Iqbal et al 2022).



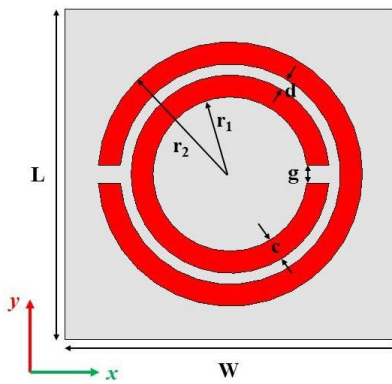
(a)



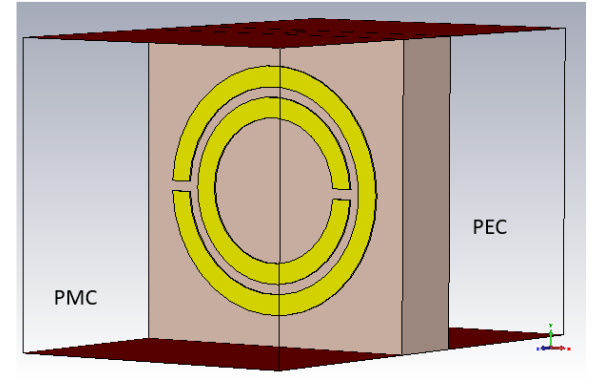
(b)

Şekil 2.5. ENG tabanlı birim hücre CST modeli (Iqbal et al 2022)

MNG tabanlı metayüzey, negatif bir μ değeri elde etmek için tasarlanır. Iqbal et al.(2022) tarafından g boşluğu ile ayrılmış iki eşmerkezli metalik halkadan oluşan ayrık halka resonatorünün (SRR) bir birim hücresi tasarlanmıştır. Yapı, Rogers RT5870 ($\epsilon=2,00$) alt tabakası kullanılarak tasarlanmıştır. Birim hücrenin CST benzetim programında tasarlanan modeli Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



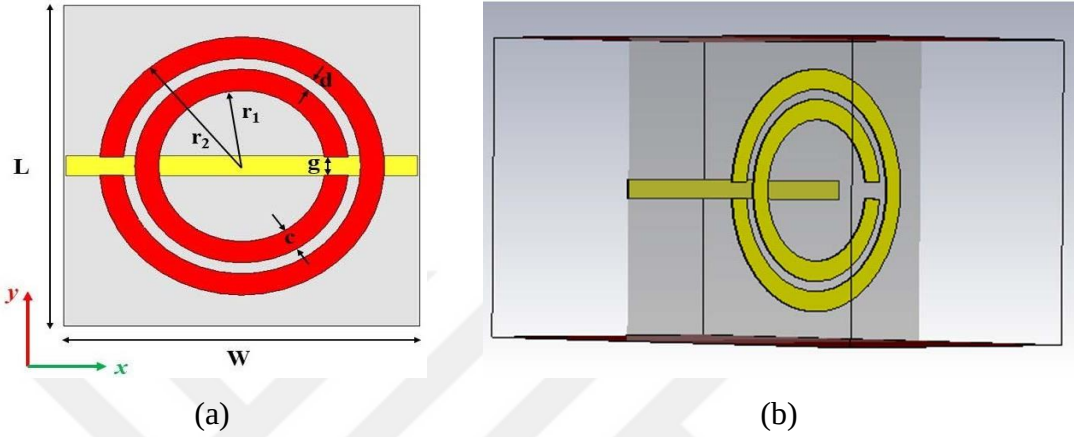
(a)



(b)

Şekil 2.6. MNG tabanlı birim hücre (a)Geometri (b) CST modeli (Iqbal et al 2022)

DNG tabanlı metayüzey; negatif ϵ ve μ değeri elde etmek için tasarlanır. Bu amaçla Iqbal et al. (2022) tarafından, ENG ve yapısını SRR tabanlı MNG yapısıyla birleştirilerek DNG yapısı elde edilmiştir. Tasarlanan birim hücrenin geometrisi ve CST tasarım modeli Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Geçirgenlik parametreleri benzetim ortamında elde edilebileceği gibi matematiksel olarak hesaplanarak elde edilebilir.



Şekil 2.7. DNG tabanlı birim hücre (a) Geometri (b) CST modeli (Iqbal et al 2022)

Bendahmane et al. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek dielektrik değerlikli alt tabaka kullanımı, slot tekniği ve DGS tekniği olmak üzere üç minyatürleştirme tekniği birleştirilmiştir. Kullanılan yöntemler; Minyatürleştirme ve empedans uyumunun iyileştirilmesi için yüksek dielektrik değerlikli alt tabaka ve slot teknikleri kullanılırken, bant genişliğinin artırılması ve referans mikroşerit yama antenin daha da minyatürleştirilmesi için DGS tekniği kullanılmıştır. Minyatürleştirilmiş anten düzlemsel bir yapıya sahiptir ve $15,55 \times 19,80 \text{ mm}^2$ bir alanı kaplar. Yama boyutu alanında %71,24 oranında azalma ve genel boyutta %75,42 oranında azalma sağlanmıştır. Tasarlanan anten çift bantlıdır ve 2,4 GHz ile 5,0 GHz rezonans frekansında çalışır. Sırasıyla %83 ve %68'i aşan ışıma verimliliği elde edilirken bant genişliği değerleri sırasıyla %38 ve %13'tür (Bendahmane et al. 2020).

Raghavendra et al. (2023) tarafından metamateryalden ilham alan kare aralıklı DGS yapılı geniş bantlı dielektrik rezonatör anteni tasarlanmıştır. Tasarlanan antene metamateryale yapısı yaklaşımı uygulanarak DGS anteni elde edilmiştir. Daha sonra bu yapı üzerine dielektrik rezonatör yapısı eklenmiş ve etkileri gözlemlenmiştir. Tasarlanan

anten 3,5 GHz ile 11,6 GHz arasında bir bant genişliğine sahiptir. Kazanç değeri 7,6 dB olarak ölçülmüştür (Raghavendra et al. 2023).

Ripin et al. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada metamalzeme yaklaşımı kullanılarak mikroşerit yama anteni minyatürleştirilmiştir. Bu çalışmada metamalzeme yaklaşımı kullanılarak DGS yapısı oluşturulmuş ve anten minyatürleştirilmesi elde edilmiştir. Toprak düzlemi üzerine üç adet dairesel CSRR deseni uygulanmıştır. Tasarlanan antenin rezonans frekansı 2,45 GHz' dir. Tasarlanan DGS yapısı çift negatif metamalzeme özelliği göstermiş ve değerler Nicolsen Ross Weir yöntemi ile kanıtlanmıştır. Minyatürleşme oranının gözlemlenebilmesi için aynı çalışma frekansında geleneksel bir mikroşerit yama anteni tasarlanmıştır. Yapılan tasarımların benzetim ve ölçüm sonuçlarına göre antenin boyutu %82,77 oranında küçültülmüş ve metamalzeme yaklaşımı sayesinde geri dönüş kaybı %38,23 oranında iyileştirilmiştir (Ripin et al. 2013).

Moussa et al. (2022) tarafında yapılan bir çalışmada metamalzeme ve DGS yapısı birleştirilerek anten minyatürleştirme çalışması yapılmıştır. Metamalzeme tasarımı toprak düzlemine üzerine yapılmıştır. Birim hücre metamalzeme yapısı ilk olarak tasarlanmıştır ve sonraki optimizasyon çalışmaları ile 8 adet birim metamalzeme hücresi kullanımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarımlar 3,50 GHz rezonans frekansında çalışmaktadır. Tasarlanan sistemde minyatürleşme elde edilmiştir daha sonrasında aynı düzleme DGS yapısı entegre edilmiştir. Böylece bant genişliği kazanımı elde edilmiştir. Tasarlanan bu yapı ile %48 oranında bir boyut küçülmesi elde edilmiştir (Moussa et al. 2022).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 CST Studio Suite

Elektronik teknolojisi geliştikçe elektronik ürünlerin içerisinde bulunan elektromanyetik (EM) bileşenlerin önemi ve sayısı artmaktadır. Elektrik, elektronik, iletişim, otomotiv, medikal, enerji vb. sektörlerde meydana gelen çoğu teknolojik gelişmelerde EM bileşenler önemli yer tutmaktadır. Bu pazarlara daha hızlı ve esnek ürün geliştirebilmek için benzetim teknolojileri uygun bir çözüm ortağı olmaktadır.

CST Studio Suite, EM uygulamaları için üç boyutlu modelleme, analiz ve optimizasyon yapmaya olanak sağlayan yazılım ve çoklu fizik benzetim programıdır. Bünyesinde bulunan çeşitli araçlarla frekans spektrumu boyunca çözümler sunar. Modelleri oluşturmak ve düzenlemek için parametrik bir CAD arayüze sahiptir. Solidworks EMC projelerine entegre edilebilmeye olanak sağlar. Modelleme için kütüphanesinde çeşitli malzemeleri barındırır ve bu malzemelerin manyetik, fotonik, biyolojik vb. fiziksel özellikleri tanımlıdır. Benzetim işleminde doğru hücreleme sonuçların doğruluğu için önemli rol almaktadır. CST Studio Suite önemli parçaların hücre kalitesini artırmak için otomatik uyarılama ve hücreleme yapar. Program tarafında kullanılan Perfect Boundary Approximation ile CAD verilerinin doğru bir şekilde modellenmesini sağlar. Bazı modellemeler için sentez araçları bulunur. Anten dizileri için Array Wizard, anten tasarımı için Antenna Magus, dalga kılavuzu için FEST3D araçları vardır.

EM benzetim için Zaman Etkili Alanı (Time Domain) ve Frekans Etki Alanı (Frequency Domain) gibi çözümleyiciler kullanılır. EM çözümleyicilerin, termal ve yapısal mekanik çözümleyiciler ile beraber çalıştırılmasına olanak sağlar. Tasarlanan modellerin üzerinde değişiklik yaparak tasarım parametrelerinin optimize edilmesine olanak sağlayan optimize ediciler bulunur. Tasarlanan sistemlere göre uygun çözümleyiciler seçilmelidir. Zaman Etki Alanı Çözümleyicisi (Time Domain Solver) anten benzetimleri için daha uygundur.

CST Studio Suite, anten performansı, radar, kablolama, enerji, malzeme, RFID, medikal, özgül soğurma oranı SAR, mikrodalga, RF bileşenşeri, EM uyumluluk, otomotiz, sensör vb. endüstriyel uygulamalara modelleme ve simüle etme çözümü sunar (Anonymous 2022).

3.2 LPKF Protomat S103 Baskı Devre Kazıma Cihazı

LPKF ProtoMat S103, hassas mikrodalga ve RF çalışmalar için tasarlanmıştır. 100.000 devire kadar çıkabilen motor sayesinde en keskin geometrileri başarılı bir şekilde oluşturabilir. Sahip olduğu sensörler sayesinde, kazıma derinliği, materyal kalınlığı ve bakır kalınlığını otomatik olarak tespit edebilir. Vakum tablası sayesinde en hassas ve ince malzemeleri kolaylık ile sabitleyebilir ve işleyebilir. Genel olarak yüksek motor hızı, 20 adet otomatik uç değiştirme yuvası, yüksek hassasiyet için granit taban, vakum tablası, otomatik uç derinlik ayarı özelliklerine de sahiptir (Anonymous 2024b).

3.3 Rohde&Schwarz ZNB8 Vector Network Analyser

Rohde & Schwarz firmasından R&S ZNB8, 9,0 kHz ila 8,5 GHz frekans aralığına sahip ağ analizörleri, mobil radyo, elektronik ürünler, havacılık ve savunma uygulamaları için tasarlanmıştır ve ayrıca yüksek hızlı baskılı devre kartı tasarımlarında da kullanılabilir. R&S®ZNB, amplifikatörler, mikserler, filtreler ve kablolar gibi RF bileşenlerinin geliştirilmesi, üretimi ve servisi için idealdir.

Bu vektör ağ analizörü, üzerinde bulunan iki port sayesinde yüksek ölçüm hızı, olağanüstü hassasiyet ve kullanım kolaylığı sunar. 4,0 ms ölçüm hızı, 122 dB ila 140 dB tipik dinamik aralık, 12 dBm ila 15 dBm tipik çıkış gücü, 98 dB güç tarama aralığına sahip ekranlı bir vektör ağ analizörüdür (Anonymous 2024c).

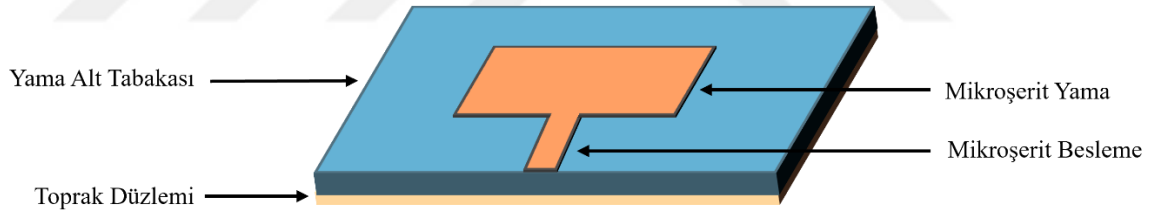
3.4 Mikroşerit Yama Antenler

Mikroşerit anten teknolojisinin fikri 1950’li yıllarda ileri sürülmüştür daha sonra bu teknolojinin hızlı gelişimi 1970’li yılların sonlarına doğru başlamıştır. 1980’lerin

başında temel mikroşerit anten elemanları ve dizileri, tasarım ve modelleme açısından iyi bir şekilde kavranmıştır (Pozar 1995).

Bu anten tasarımının çokça tercih edilmesinde; üretim kolaylığı, üretim maliyetinin az olması, hafif ve küçük bir yapıda olması, verimli olması, kazanç değerlerinin yüksek olması gibi nedenler etkili olmuştur. Dolayısıyla mikroşerit yama antenleri uzay, uydu, radar, havacılık gibi sistemlerde haberleşme ihtiyacı için uygun bir çözüm olmuştur.

Mikroşerit yama antenleri temelde Şekil 3.1’de belirtildiği gibi dört kısımdan oluşmaktadır. Bu katmanlar; ışıyan yama, anten alt tabakası, toprak düzlemi ve besleme hattıdır. Yama, toprak düzlemi ve besleme hattı yüksek iletkenliğe sahip gümüş, altın ve bakır gibi metallerden oluşur. Anten alt tabaka malzemesi ise dielektrik malzeme olarak seçilmektedir (Balanis 2005). Yama kısmı antenin ışıma yapmasını sağlayan kısımdır. Yama ise besleme hattı tarafından uyarılır. Işıyan yama yapısı kare, dikdörtgen, daire, elips olabileceği gibi özgün bir yapıda da olabilir (Altundaş 2016).



Şekil 3.1. Mikroşerit yama anteni yapısı

Anten performansını etkileyen önemli faktörlerden biri de uygun bir dielektrik alt tabaka kullanımıdır. Alt tabaka malzemenin fiziksel ve elektriksel özelliği anten performansı üzerinde etkilidir. Alt tabakanın kalınlaştırılması istenmeyen yüzey dalgaları oluşturur, bu da verime ve bant genişliğine etki eder. Alt tabakanın dielektrik sabitesi ise bant genişliği ve ışıma frekansı üzerinde etkiye sahiptir. Alt tabaka malzemeler genellikle dielektrik sabiti 2,0 ile 12 arasında olan malzemelerdir. Alt tabaka malzemenin düşük dielektrikli ve kalın seçilmesi anten performansını olumlu yönde etkileyecektir. Dolayısı ile bant genişliği artırılmış, verimli ve kazanç değeri yüksek bir tasarım oluşturulacaktır. Alt tabakanın kalınlığı fazla artırılırsa istenmeyen yüzey dalgaları artar ve anten verimini ve anten ışımasını olumsuz yönde etkiler. Alt tabaka olarak yüksek dielektrik sabiti ve

ince bir malzeme seçildiğinde ise antende oluşacak istenmeyen yayılımlar azaltılmış olur fakat meydana gelecek kayıplarda artış görünür bu durumda bant genişliği üzerinde azaltıcı etki oluşturur (İpekli 2021).

Mikroşerit antenler üstün özelliklerinden dolayı birçok uygulamada araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Bu özelliklerden bazıları aşağıdaki gibi verilebilir:

- Hafif ve küçük fiziksel özellikte olması ve sistemlere rahat bir şekilde konumlandırılabilir.
- Üretim kolaylığı, maliyet düşüklüğü ve seri üretime uygundur.
- Besleme hattında yapılacak değişikliklerle doğrusal ve dairesel ışıma elde edebilir.
- Başka devreler ile entegre şekilde üretilebilirler.
- Yönsüz ışıma elde edilebilir.
- Mikrodalga iletim hatlarına uyumlanması kolaydır.
- Üzerinde yapılan çalışmalarla çift veya geniş bantlı olarak çalıştırılabilir.

Mikroşerit antenler sahip olduğu bu olumlu özelliklerin yanında olumsuz özelliklere de sahiptir. Bu olumsuz özelliklerden bazıları aşağıdaki gibi verilebilir.

- Bant genişliği dardır.
- Anten kazançları düşüktür.
- Çoğu mikroşerit anten yarı düzlemde ışıma yapar.
- Işıyan yama ile besleme hattı arasındaki yalıtım zayıftır.
- Güç kapasiteleri düşüktür (Kütük 2012, Altundaş 2016).

Bakıldığı zaman mikroşerit antenler birçok olumlu ve olumsuz özelliklere sahiptir. Fakat yapılan çalışmalarla bu olumsuz özellikler üzerinde iyileştirmeler elde edilir. Örneğin bant genişliğini iyileştirme üzerine yapılan çalışmalar ile %60 oranında artış gözlemlenmiştir (Sainati 1996).

3.4.1 Mikroşerit yama antenleri besleme yöntemleri

Mikroşerit antenler, sahip olduğu birçok olumlu özelliği sayesinde sektörde çokça tercih edilen bir anten türü olmuştur. Bunun yanında dar bant genişliği, düşük kazanç, düşük güç kapasitesi gibi bazı olumsuz özelliklere de sahiptir. Bu olumsuz özellikler anten tasarımında yapılacak değişikliklerle giderilebilir. Bu durumu aşmak için farklı besleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler, mikroşerit antenlerin performansını önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir (Balanis 2016; Hacımehmet 2022).

Mikroşerit antenler besleme yöntemlerine göre temelde ikiye ayrılmaktadır, bunlar; temaslı ve temassız besleme yöntemleridir. Temaslı besleme yönteminde, ışıyan yama ile besleme hattı doğrudan birbirine bağlıdır. Mikroşerit besleme ve koaksiyel besleme yöntemleri temaslı besleme yöntemine örnek verilebilir. Temassız besleme yönteminde ise ışıyan yama ile besleme hattı doğrudan birbirine bağlı değildir. Yama ve besleme hattı arasında gerçekleşen elektromanyetik bağlaşım ile ışıma meydana gelir. Açıklık bağlaşımlı besleme ve yakınlık bağlaşımlı besleme temassız besleme yöntemine örnek verilebilir.

Mikroşerit antenler için doğru besleme yöntemini seçmek, anten performansını önemli ölçüde optimize edebilir ve kullanım alanlarını genişletebilir. Anten performansını etkileyen etmenlerden biri empedans uyumudur. Besleme hattından verilen gücün ışıyan yamaya en verimli şekilde aktarılması bu parametreye bağlıdır. Empedans uyumunun iyi sağlanmadığı durumlarda istenmeyen yan lob ışımaları oluşur ve aktarılan güç verimli bir şekilde iletilemez.

Mikroşerit besleme:

Bu yöntem yapımı ve üretimi en basit olan tekniktir. Besleme hattı yama ile aynı kalınlıkta, aynı düzlemde ve daha düşük genişliktedir. Yama ile besleme hattının aynı düzlemde olması baskı devre teknolojisi ile üretimini mümkün kılmaktadır. Besleme hattı istenmeyen ışımlar oluşturur bu durumda anten performansını etkilemektedir. Ayrıca bant genişliği dardır.

Mikroşerit besleme iki şekilde yamaya gücü aktarır. Besleme hattı ya doğrudan yamaya bağlanır ya da yama ile besleme hattı arasında boşluk oluşturulur. Boşluk oluşturulduğu durumda elektromanyetik bağlaşım ile yama ışıma yapar. Bu yöntemde empedans uyumluluğunun iyi ayarlanması gerekmektedir. Yama ile mikroşerit hattın birleştiği noktada girintiler oluşturulur bu girintilerin boyutuna göre empedans uyumluluğu sağlanmaya çalışılır. Mikroşerit hat genellikle yamaya ortalı şekilde konumlandırılır fakat besleme hattının konumu değiştirilebilir. Bu durum rezonans frekansının kaymasına sebebiyet vermektedir.

Koaksiyel prob ile besleme:

Bu besleme yönteminde güç koaksiyel kablo vasıtası ile ışıyan yamaya aktarılır. Koaksiyel kablonun dış kısmı antenin toprak yüzeyine, iç kısmı ise yamaya lehimlenerek bağlantısı sağlanır. Esnek bir yapıya sahiptir ve antenin diğer parçalarından bağımsızdır. Bu besleme yönteminde anten verimliliği yüksektir, yüzey dalgalarına bağlı istenmeyen ışıma azdır, üretimi ve empedans uyumlaması kolaydır. Fakat dar bant genişliğine sahiptir

Yakınlık bağlaşımlı besleme:

Bu besleme yöntemi temassız besleme yöntemlerinden biridir. Anten yapısı iki dielektrik alt tabakadan oluşmaktadır. Yapı yukarıdan aşağıya doğru; ışıyan yama, yama alt tabakası, besleme hattı, besleme alt tabakası, toprak düzlemi katmanlarından oluşur. Besleme hattı ile yama bağımsız olduğu için yama alt tabakasının kalın seçilmesine olanak sunmaktadır. Yama alt tabakasının kalın olması bant genişliğini artırıcı etki göstermektedir. Mikroşerit hattın uzunluğu, yamanın genişliği ve uzunluğu, alt tabakaların dielektrik sabiti ve kalınlığı empedans uyumlama için kullanılabilecek parametrelerdir. Ayrıca besleme hattının oluşturacağı sahte ışımlar büyük oranda azalmaktadır. Bu anten besleme yöntemi üretim açısından zordur. Çünkü çoklu katman yapısına sahiptir ve hassas hizalama yapmayı gerektirmektedir.

Açıklık bağlaşımlı besleme:

Bu besleme yöntemi de temassız besleme yöntemidir. Anten yapısında yakınlık bağlaşımlı besleme yapısındaki gibi iki dielektrik katman bulunmaktadır. Yapı yukarıdan aşağıya doğru; ışıyan yama, yama alt tabakası, toprak düzlemi, besleme alt tabakası ve toprak düzlemi katmanlarından oluşmuştur. Bu besleme yönteminde toprak düzlemi üzerine yarık açılır ve ışıyan yama besleme hattı üzerinden elektromanyetik bağlaşım ile beslenerek ışıma yapar. Besleme hattının uç kısmında oluşacak olan ışıma toprak yüzeyinin varlığından dolayı yamanın ışıma desenine karışmaz. Fakat arka lob ışımaları oluşturur. Bu antenler yüksek polarizasyon saflığına sahiptir. Bu besleme yöntemi tez çalışması kapsamında tercih edilmiş olup ilerleyen başlıkta daha detaylı açıklanmıştır.

Çizelge 3.1’de mikroşerit yama antenlerin besleme yöntemlerinin karşılaştırmalı bir özeti verilmiştir.

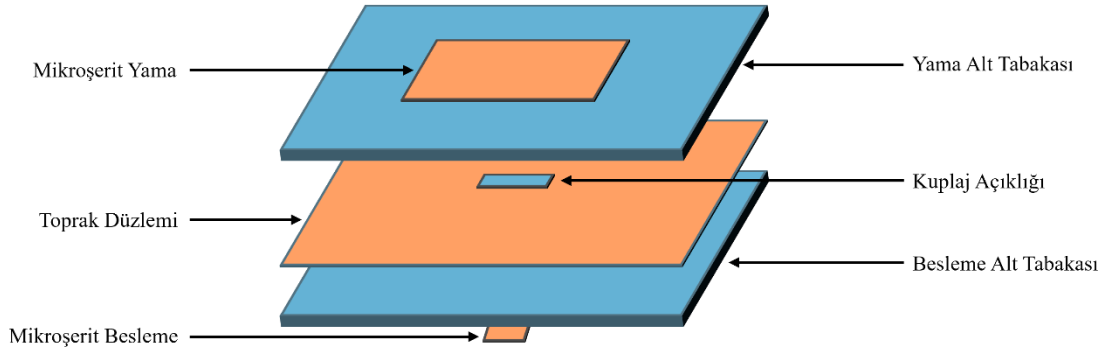
Çizelge 3.1. Mikroşerit antenlerin besleme yöntemleri karşılaştırması (Altundaş 2016, İpekli 2021).

Özellikler	Koaksiyel Besleme	Mikroşerit Besleme	Yakınlık Bağlaşımlı Besleme	Açıklık Bağlaşımlı Besleme
Tasarım	Eş düzlemsel değil	Düzlemsel	Düzlemsel	Düzlemsel
Yönelim saflığı	Zayıf	İyi	Zayıf	Mükemmel
Dayanıklılık	Zayıf	İyi	İyi	İyi
Empedans uyumlama	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Üretim zorluğu	Delme ve lehimleme gerekli	Kolay	Hizalama gerekli	Hizalama gerekli
Bant Genişliği	%2,0-5,0	%2,0-5,0	%13	%21

3.5 Açıklık Bağlaşım Beslemeli Mikroşerit Yama Anteni

Açıklık bağlaşımlı besleme, mikroşerit yama anten besleme yöntemlerinden biridir. Bu besleme yöntemi, genellikle geniş bant uygulamalarında tercih edilir. ACMA'lar 1985 yılında piyasaya sürülmesinden bu yana (Pozar 1985) pek çok alanda uygulaması yapılmış ve çalışma performansı tatmin etmiştir. ACMA temel tasarım yapısının çok yönlülüğü ve esnekliği, araştırmacıların çok sayıda tasarım ve geliştirme yapmasına olanak sağlamıştır. ACMA'nın öne çıkan bazı özellikleri şöyle sıralanabilir:

- %5,0 - %50 aralığında empedans bant genişliğinin başarılablması,
- Yama ve besleme alt tabakalarının bağımsız olarak seçilebilmesi,
- Yama ve besleme hattı için alt tabaka malzemesi üzerinde daha fazla yer sağlanması,
- Dizi anten yapılarına uyumlanabilmesi,
- Teorik olarak sıfır çapraz polarizasyon elde edilmesi,
- Farklı yama şekli, açıklık şekli, besleme hattı tipi gibi birçok parametre ile farklı anten performansı elde etmeye olanak sağlanması.

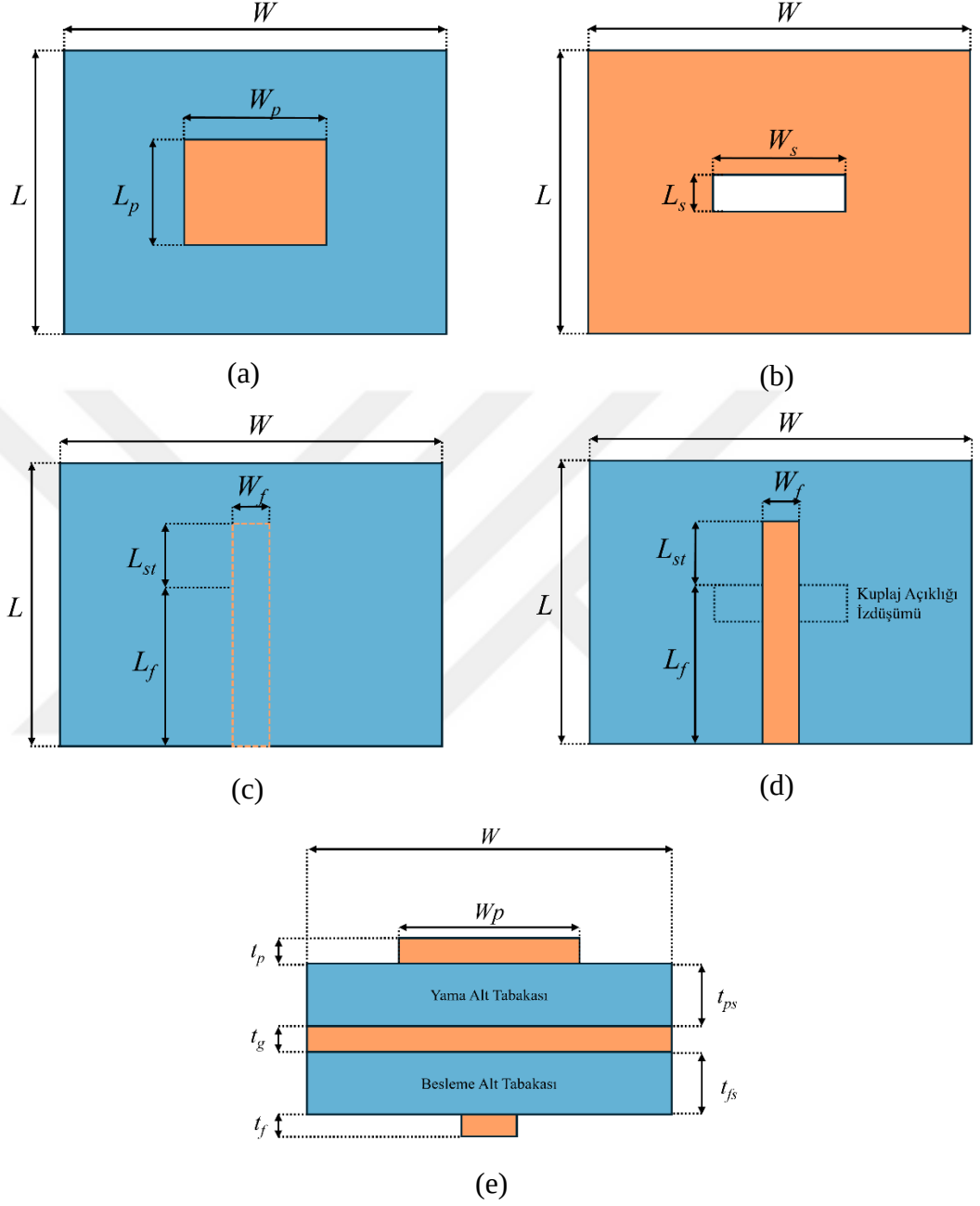


Şekil 3.2. ACMA yapısı

Açıklık bağlaşımlı besleme yapısında Şekil 3.1'de görüldüğü gibi iki adet dielektrik alt tabaka malzeme kullanılır. İki dielektrik alt tabaka arasında ise toprak düzlemi bulunur. Toprak düzlemi üzerinde bir yarık oluşturulur. Işıma yapan yama üst alt tabakanın üst yüzeyinde bulunurken mikroşerit besleme hattı alt tabakanın alt yüzeyinde bulunur. Yama ile besleme hattı birbirine doğrudan bağlı değildir. Yama, toprak yüzeyi üzerindeki yarık vasıtası ile mikroşerit besleme hattından beslenir. Bu

3. MATERYAL ve YÖNTEM

noktada besleme hattı ile yama arasındaki uyumluluğun iyi ayarlanması gerekir. Şekil 3.2' de ACMA'nın her bir katmanı detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. ACMA yapısı detaylı gösterimi. (a) Yama alt tabakası üstten görünümü (b) Toprak düzlemi görünümü (c) Besleme alt tabakası üstten görünümü (d) Besleme alt tabakası alttan görünümü (e) Antenin yandan görünümü.

Bu besleme türü monolitik fazlı diziler için uygun bir yapıya sahiptir. Monolitik devreler, monokristal bir alt tabaka üzerine inşa edilmiş devrelerdir. Örneğin bir anten

dizisinde, besleme ağı yüksek dielektrikli Galyum Arsenit alt tabaka ile, ışıyan yama düşük dielektrik katsayılı bir alt tabaka ile tasarlanabilir. Böylece iki katmanda kullanılan farklı alt tabakalar ise bant genişliği ve ışıma performansı üzerindeki zararlı etkiler engellenmiş olur. Bu yapıda, besleme ağı ile yama arasında toprak düzlemi bulunduğundan dolayı besleme ağının oluşturacağı ışıma asıl ışıma modelini etkilemez. Ayrıca anten elemanlarına yapılan bağlantı doğrudan olmadığı için milimetre dalga frekansında ortaya çıkan büyük öz reaktanslı prob problemi çözülmüş olur. Yama, TM100 baskın modunda rezonans yapar (Pozar 1985).

ACMA malzeme ve topoloji bakımından çokça parametreye sahiptir. Bu parametrelerin her biri anten performansı üzerine etkiye sahiptir. Bu parametreler ve etkileri üzerine aşağıdaki açıklamalar yapılabilir (Pozar 1996).

Yama alt tabakası dielektrik sabiti (ϵ_p):

Alt tabaka malzemesinin dielektrik katsayısı (ϵ_p) anten ışıma verimliliği ve bant genişliği üzerinde oldukça etkilidir. Düşük dielektrik katsayısı daha büyük empedans bant genişliği sağlar ve yüzey dalgası uyarımını azaltır.

Yama alt tabakası kalınlığı (t_{ps}):

Alt tabaka malzemesinin kalınlığı (t_{ps}), anten ile besleme ağı arasındaki kuplaj seviyesi ve bant genişliği üzerinde etkiye sahiptir. Bant genişliğini artırmanın bir yolu alt tabaka malzemesinin kalınlığını artırmaktır. Fakat kalınlık fazla artırılırsa açıklık için daha az kuplaj sağlanır.

Mikroşerit yama uzunluğu (L_p):

Antenlerde ışıyan elemanın uzunluğu (L_p) dalga boyuna bağlı olarak seçilir dolayısıyla yama uzunluğu rezonans frekansı üzerine etki eder.

Mikroşerit yama genişliği (W_p):

Bu parametre antenin rezonans direnci üzerinde etkilidir. Yamanın genişliği (W_p) arttıkça rezonans direncinde azalma meydana gelir. Kare yamalı yapılarda yama genişliği (W_p) ve uzunluğu (L_p) eşit seçilir bu durum yüksek çapraz polarizasyona sebebiyet verir. Tasarlanan sistemde çift ve dairesel polarizasyona ihtiyaç varsa eşit seçilmemelidir.

Besleme alt tabakası dielektrik sabiti (ϵ_f):

Bu parametre besleme hattından açıklığa doğru olan kuplaj üzerinde etkilidir. Etkili bir anten tasarımı için dielektrik değeri 2,0 ile 10,0 arasında olan alt tabaka malzemeler seçilmelidir.

Besleme alt tabaka kalınlığı (t_f):

Besleme hatlarında sahte radyasyonlar oluşabilmektedir. Alt tabaka malzemesinin ince seçilmesi daha düşük sahte radyasyonun oluşmasına olanak sağlar fakat kayıp oluşur. Alt tabaka kalınlığının $0,01\lambda$ ile $0,02\lambda$ arasında seçilmesi uygun olur.

Besleme hattı genişliği (W_f):

Mikroşerit besleme hattının modellenmesinde etken bir büyüklüktür. Mikroşerit hattın karakteristik empedansı üzerinde etkiye sahiptir.

Açıklık uzunluğu (L_s):

Antenin ışıma yapacağı rezonans frekansı ve besleme hattı ile mikroşerit yama arasındaki kuplaj seviyesi üzerinde etkiye sahiptir. Antenin rezonans direnci açıklık uzunluğuna (L_s) bağlı olarak değişir empedans uyumunun sağlanabilmesi için uygun bir değerde seçilmelidir. Açıklık uzunluğu artarsa rezonans direnci de artar. Ayrıca bu parametre geri ışıma seviyesi üzerinde de etkilidir (İşeri 2012).

Açıklık genişliği (W_s):

Mikroşerit yamanın iyi bir ışıma yapabilmesi için mikroşerit besleme hattı ile kuplajın iyi olması gerekir, bu parametrede kuplajın ayarlanabilmesine olanak sağlar fakat açıklık uzunluğu (L_s) kadar etkili değildir. Yaklaşık olarak genişlik ve uzunluk oranının 1/10 değerinde seçilmesi uygundur.

Açıklığa göre besleme hattının konumu:

İyi bir kuplaj için besleme hattı açıklığın merkezine ve açıklığa dik olacak şekilde konumlandırılır. Besleme hattının açılı konumlandırılması veya merkez dışına yerleştirilmesi kuplaj seviyesinin azaltır.

Açıklığa göre yamanın konumu:

İyi bir anten performansı için yama açıklığın üzerinde ortalanmalıdır. Yamanın H-düzleminde hareket ettirmeye oranla E-düzlemi yönünde yani rezonans yönünde hareket ettirmek kuplaj seviyesinde daha fazla değişime neden olacaktır.

Ayar saplamasının uzunluğu (L_{st}):

Bu parça besleme hattının uç kısmına eklenir. Ayar saplaması ACMA'da aşırı reaktansı ayarlamak için kullanılır. Genellikle $\lambda_g/4$ 'den daha küçük seçilir. Saplama uzunluğu azaltılırsa Smith grafiğindeki empedans lokusu kapasitif yönde hareket eder.

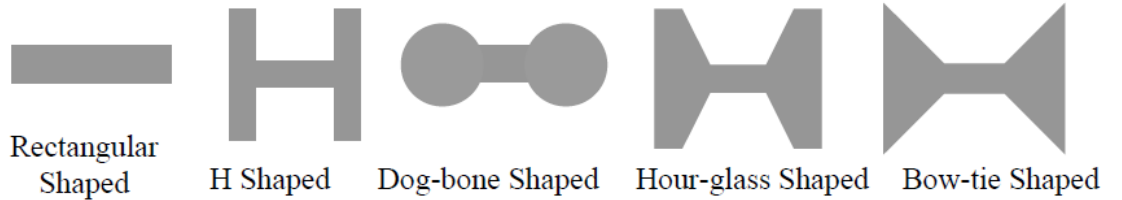
ACMA görüldüğü üzere birçok parametreye sahiptir. Bu parametrelerin geometrik yapısı büyük bir çalışma alanı olmuştur. Araştırmacıların farklı farklı varyasyonlar üzerine çalışmalar yapmasına olanak sağlamaktadır. Bu varyasyon çeşitliliği basılı anten teknolojisi ve çok katmanlı anten yapısından kaynaklanmaktadır. Bazı temel parametreler üzerine yapılabilecek tasarımlar aşağıdaki gibi kategorize edilebilir.

İşıma elemanı:

Genellikle ışıma elemanı olarak kare yamalar kullanılır. Bant genişliğini ve anten performansını artırmak için dairesel yama, istiflenmiş yama, parazitik yama vb. yapılar üzerine çalışmalar yapılabilir.

Açıklık şekli:

Açıklığın uzunluğu ve genişliği kuplaj üzerinde etkilidir. Çoğunlukla açıklık şekli olarak dikdörtgensel açıklık kullanılır. Açıklık şekli değiştirilerek kuplaj oranı değiştirilebilir. Literatür incelendiğinde Şekil 3.4' te verilen çeşitli şekille; köpek kemiği, kum saati, papyon, H şekilli açıklık yapılarına rastlanır. Günay (2012) tasarlamış olduğu açıklık bağlaşımlı antende kum saati şeklinde açıklık kullanırken, Yadav (2022) kare, H şekli, papyon ve kum saati açıklıkları karşılaştırmıştır. Yaptığı çalışma sonucunda kum saati açıklığın maksimum kuplaj ve bant genişliği sağladığını gözlemlenmiştir (Günay 2012, Yadav 2022).



Şekil 3.4. Bazı açıklık şekilleri (Günay 2012)

Besleme hattı tipi:

Temel olarak bu yapılarda mikroşerit besleme hattı kullanılır fakat bu besleme hatları yerine eş düzlemsel dalga kılavuzu, dielektrik dalga kılavuzu vb. yapılar tercih edilebilir.

Polarizasyon:

Normal bir ACMA doğrusal polarizasyona sahiptir fakat üzerinde yapılacak düzenlemeler ile çift polarizasyon veya dairesel polarizasyon elde edilebilir.

Dielektrik katmanlar:

Klasik mikroşerit antenlerde olduğu gibi ACMA’larda dielektrik radom entegresi kolayca yapılabilir. Anten besleme alt tabakaları birden fazla katmandan oluşturulabilir.

3.6 Malzeme Tabanlı Teknikler ile Anten Minyatürleştirme

Son zamanlarda anten performansını artırmak için birçok teknik keşfedilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de anten tasarımlarında metamalzemelerin kullanılmasıdır. Metamalzemeler yapay olarak üretilen malzemelerdir. Doğada bulunan malzemelerin sahip olmadığı elektromanyetik özellikleri bünyesinde bulundurur. Bu malzemeler ile geleneksel anten ile elde edilemeyen yüksek performanslı anten, filtre ve mikrodalga cihaz tasarımı gerçekleştirilir. Metamalzeme yapıları periyodik dalga boyu altı birim hücrelerinden oluşur. Bu hücreler RLC rezonans yapısı özelliği gösterir ve anten sistemindeki elektromanyetik dalgaların yönlendirilmesine olanak sağlar. Bu yapılar, antenin rezonans frekansı ile karşılaştırıldığında düşük rezonans frekansı sunar, bu da antenin minyatürleştirilmesine ve elektromanyetik dalgaların etkilenmesine neden olur, kazanç ve bant genişliğinin artırılmasına ve bir anten sisteminin dairesel polarizasyonunun (CP) elde edilmesine yardımcı olur. Metamalzeme tabanlı yapılar anten minyatürleştirmede tercih edilen bir çözümdür ve bu tabanlı yapılar; metamalzeme yükleme, metamalzemedan esinlenen antenler, metayüzey yükleme ve kompozit sağ/sol el tabanlı antenler olarak sınıflandırılmıştır. Her sınıf kendi içerisinde birçok tekniği barındırmaktadır. Çizelge 3.2’ de bu tekniklerin bazıları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Metamalzeme tabanlı anten minyatürleştirme (Kumar 2021)

Metamalzeme Tabanlı Anten Minyatürleştirme	Metamalzeme Yükleme	- Negatif e/u malzemeler - Yüksek e/u kabuklar - Fotonik kristaller - Yakın alan rezonans parazitik
	Metamalzemedan Esinlenen Anten	- Bölünmüş halka rezonatörü - Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörü
	Metayüzey Yükleme	- Elektromanyetik bant aralığı - Reaktif empedans yüzey - Yüksek empedans yüzey - Frekans seçici yüzey
	Kompozit Sağ/Sol El Malzemeler	- Sıfırıncı dereceden rezonatör - İlk negatif/pozitif düzen rezonatörü

3.7. Metamalzeme ve Metayüzeyler

Malzemelerin elektromanyetik özellikleri yapısal parametrelere, yani ENG, MNG ve DNG malzemeleri üreten elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) temel alınarak sınıflandırılır. Metamalzemeler, doğada bulunmayan ve yapay olarak ortamında üretilen, alışılmışın dışında elektriksel özelliklere sahip olan malzemelerdir. Negatif elektrik ve manyetik geçirgenliğe sahiptirler. Bu yapılar anten uygulamalarında kazanç artırma, boyut küçültme, soğurucu vb. olarak kullanılmaktadır. Metamalzemeler, 3 boyutlu periyodik yapılar olarak ortaya çıkmıştır (Ben 2009). Metamalzemeler, çalışma dalga boyundan daha küçük bir boyutta olan periyodik tasarımlardır. Diğer bir açıdan metayüzeyler, metamalzemelerin 2 boyutlu karşılıklarıdır. Bu tür ultra ince ve 2 boyutlu yapı, dalga yayılımında istenmeyen kayıpları ve güçlü dağılımları azaltmaya yarar ve mikro ve nano yapıların kolay üretimi için uygundur (Chen et al. 2016). Metamalzemelerin sınıflandırılması hem μ hem de ϵ ' nun pozitif olduğu çift pozitif (DPS), ϵ -negatif (ENG), μ -negatif (MNG) ve çift negatif (DNG) gibi temel parametre değerlerine dayanmaktadır. Bu sınıflardan dielektrikler, manyetik malzemeler ve plazmalar sırasıyla DPS, MNG ve ENG değerleriyle doğada var olan malzemelerdir. Ancak DNG malzemesi doğada mevcut değildir ve üretim için tasarlanmıştır (Eleftheriades et al. 2005).

Doğada bulunan malzeme ve metamalzemeleri ayırtılabilmek için bir yolu, anten elemanları üzerinden geçen akımın yayılma faz sabitini (β) kullanmaktır. Eğer β sabiti değeri pozitifse ($\beta > 0$) malzeme doğal yapıdadır, eğer ki değeri negatif veya sıfır ise

($\beta \leq 0$) malzeme metamalzemedir (Kumar et al. 2021). Ayrıca bir malzemenin elektromanyetik davranışını anlamlandırabilmek için elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) değerlerinden faydalanılır. Bu değişkenlere göre malzemenin elektromanyetik davranışı Çizelge 3.3’ de sunulmuştur (Parmaksız 2024).

Çizelge 3.3. Malzemelerin elektromanyetik özellikleri

Elektriksel Geçirgenlik (ϵ)	Manyetik Geçirgenlik (μ)	Özelliği
$\epsilon > 0$	$\mu > 0$	Hem ϵ hem de μ ’nün pozitif olduğunu ve EM dalgalarının yayılabileceği dielektrik malzemeler gibi doğada kolayca bulunan çift pozitif bir yapı (DPS) veya sağ yönlü ortam (RHM) oluşturduğunu gösterir.
$\epsilon < 0$	$\mu > 0$	Bu malzemeler Epsilon Negatif (ENG) olarak tanımlanmıştır. Bu durumda elektromanyetik dalgalar sönümlenir ve enerji iletimi gerçekleşmez. Plazma maddeler bu özelliكتedir.
$\epsilon < 0$	$\mu < 0$	Hem ϵ hem de μ negatif olup doğada bulunmayan çift negatif (DNG) veya solak ortam (LHM) verir. Yapay elde edilen malzemeler bu özelliكتedir. Metamalzemeler de bu sınıfa aittir.
$\epsilon > 0$	$\mu < 0$	Bu malzemeler Epsilon Negatif (ENG) olarak tanımlanmıştır. Bu durumda elektromanyetik dalgalar sönümlenir ve enerji iletimi gerçekleşmez. Ferrit malzemeler bu özelliكتedir.

3.8. Parametrelerin Sayısal Çıkarımı Yoluyla Metayüzeylerin Doğrulanması

Metayüzeylerde elektromanyetik davranış temel Maxwell denklemleri aracılığıyla gösterilmektedir. Birim hücrelerin tasarımının doğrulanması, Kramers-

Kronig kuralı (ENG için) ve Nicholson-Ross-Weir (MNG ve DNG için NRW) yoluyla parametrelerin sayısal çıkarımı açıklanır (Iqbal et al 2022).

Kramers-Kronig kuralı

Tasarlanan birim hücre, rezonans frekansında negatif ε değeri ve pozitif μ değeri ile ENG malzemenin özelliklerini doğrulamak için Kramers-Kronig bağıntılarından yararlanılarak etkili bağıl geçirgenlik (ε) ve geçirgenlik (μ) aşağıdaki ilişki aşağıda verilen bağıntılar ile elde edilir.

$$Z_{eff} = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 + S_{21}^2}{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (3.1)$$

$$R_{01} = \frac{Z_{eff} + 1}{Z_{eff} - 1} \quad (3.2)$$

$$e^{in_{eff}k_0d_{eff}} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11}R_{01}} \quad (3.3)$$

$$n_{eff} = \frac{1}{k_0d_{eff}} \text{Im}[\ln(e^{in_{eff}k_0d_{eff}})] + 2\pi m - i\text{Re}[n(e^{in_{eff}k_0d_{eff}})] \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{n_{eff}}{Z_{eff}} \& \mu_{eff} = n_{eff}Z_{eff} \quad (3.5)$$

Burada m , karmaşık bir logaritmanın dal indeksini belirten bir tam sayıdır, yani $m=0,1,2,\dots$, (ilk dallanma için sıfır tutun), d_{eff} birim hücrenin kalınlığıdır, k_0 dalga sayısıdır.

Negatif μ ve pozitif ε değerlerini matematiksel olarak doğrulamak için Nicholson Rose Weir yöntemi (Schwarz 2012) kullanılır. NRW yönteminin kullandığı prosedür aşağıdaki denklemlerden çıkarılır;

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (3.6)$$

Yansıma katsayısı:

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 + 1} \quad (3.7)$$

İletim katsayısı T:

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (3.9)$$

Manyetik geçirgenlik şu şekilde verilir:

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{\frac{1}{\Lambda} (1 - \Gamma) \sqrt{1/\lambda_0^2 - 1/\lambda_c^2}} \quad (3.1)$$

Elektriksel geçirgenlik şu şekilde verilir:

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left[\frac{1}{\lambda_c^2} - \frac{1}{2\pi L} \ln(1/T) \right] \quad (3.10)$$

Burada λ_0 ve λ_c sırasıyla serbest uzay ve kesim dalga boylarıdır, L ise örneğin uzunluğudur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında küp uydu sistemlerinde kullanılmak üzere minyatürleşmiş bir ACMA tasarlanmıştır. Küp uydular düşük hacimli bir yapıda oldukları için kullanılacak elemanların mümkün oldukça hafif ve düşük profilli tercih edilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında düzlemsel anten olan mikroşerit yama anten yapısı düşük profil, düşük maliyet, hafiflik ve üretim kolaylığı gibi avantajlarından dolayı tercih edilmiştir. Fakat mikroşerit yama antenleri bu avantajların yanında dar bant genişliği dezavantajına sahiptir. Mikroşerit yama antenlerin bazı parametreleri farklı besleme teknikleri ile değiştirilebilmektedir. Yapılan çalışmada diğer besleme yöntemlerine göre daha fazla empedans bant genişliğine çıkılmasına olanak sağlayan (Altundaş 2016; Koçer 2009) ve besleme ağının nihai noktasında meydana gelecek ısımanın yama ısımasına etki etmesini engelleyen açıklık bağlaşımlı besleme yöntemi tercih edilmiştir.

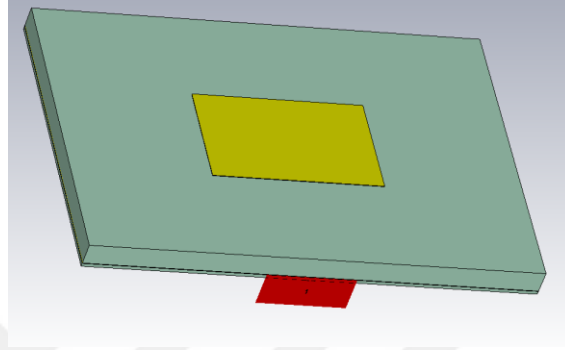
Antenin elektriksel boyutunu küçültmek amacıyla kullanılabilecek birçok teknik bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında alt tabaka malzemesinin dielektrik özelliklerinin seçimi ve toprak yüzeyine oluşturulan metayüzeyden esinlenen yapıların minyatürleşmeye katkısı sayesinde anten boyutunda geleneksel mikroşerit yama antenine göre minyatürleşme başarılmıştır.

4.1 Malzeme Esaslı Minyatürleşme

Minyatürleşme için en uygulanabilir yöntemlerden birisi antenin ısıma yapan elemanı olan yamayı, dielektrik sabiti yüksek olan alt tabaka üzerine yerleştirmektir. Yüksek dielektrik sabitine sahip alt tabaka yama boyutunu küçülttüğü için bu durum doğrudan antenin boyutlarına etki etmektedir. ACMA'da dielektrik sabitinin minyatürleşme üzerine etkisini incelemek amacıyla, yama alt tabakası ve besleme alt tabakası farklı değerlere sahip dielektrik malzemelerin kombinasyonları kullanılarak tasarımlar yapılmıştır. Bu analizi yapabilmek için CST Studio Suite programında 8,0 GHz merkez frekansında çalışan anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan alt tabakalar dielektrik sabiti değeri 2,2 ile RT 5880, 4,3 ile FR4, 6,4 ile RO4360 ve 10,2 ile RO3010 malzemeleridir.

4.1.1 FR4-FR4 tabanlı ACMA için performans analizi

Tasarlanan antenlerden ilki 8,0 GHz merkez frekansı hedef alınarak, yama alt tabakası ve besleme alt tabakası için FR4 ($\epsilon_r=4,3$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenin geometrisi Şekil 4.1’ de, tasarlanan anten geometrisine ait fiziksel boyutlar Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

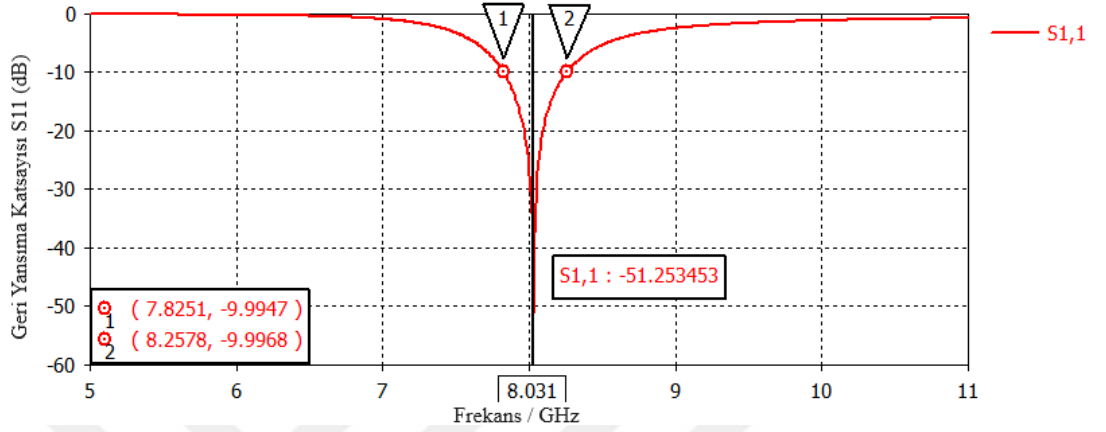


Şekil 4.1. FR4-FR4 ACMA için tasarım görseli

Çizelge 4.1. FR4-FR4 anteni tasarım parametreleri

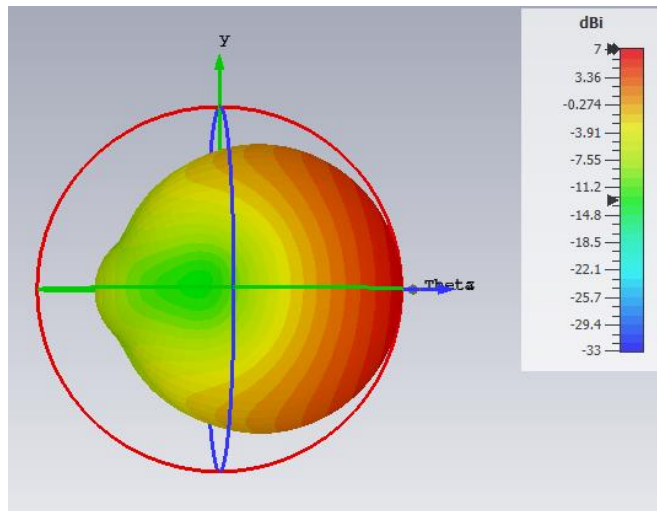
Büyüklik	Açıklama	Değeri (mm)
L	Alt tabakaların uzunluğu	20,34
W	Alt tabakaların genişliği	30,206
L_p	Yama boyu	7,102
W_p	Yama genişliği	11,456
t_p	Yama kalınlığı	0,035
t_{ps}	Yama alt tabaka kalınlığı	1,6
t_g	Toprak düzlemi kalınlığı	0,035
W_s	Açıklık genişliği	0,374
L_s	Açıklık uzunluğu	5,291
t_{fs}	Besleme alt tabaka yüksekliği	0,25
L_f	Besleme hattı uzunluğu	10,317
W_f	Besleme hattı genişliği	0,5
t_f	Besleme hattı kalınlığı	0,035
L_{st}	Ayar saplaması uzunluğu	2,725

FR4-FR4 anteni için geri yansıma katsayıları grafiği (S_{11} parametresi) benzetim sonucu Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde FR4-FR4 antenin 8,031 GHz merkez frekansı için -51,25 dB geri dönüş kaybı değerine ve 433 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir.



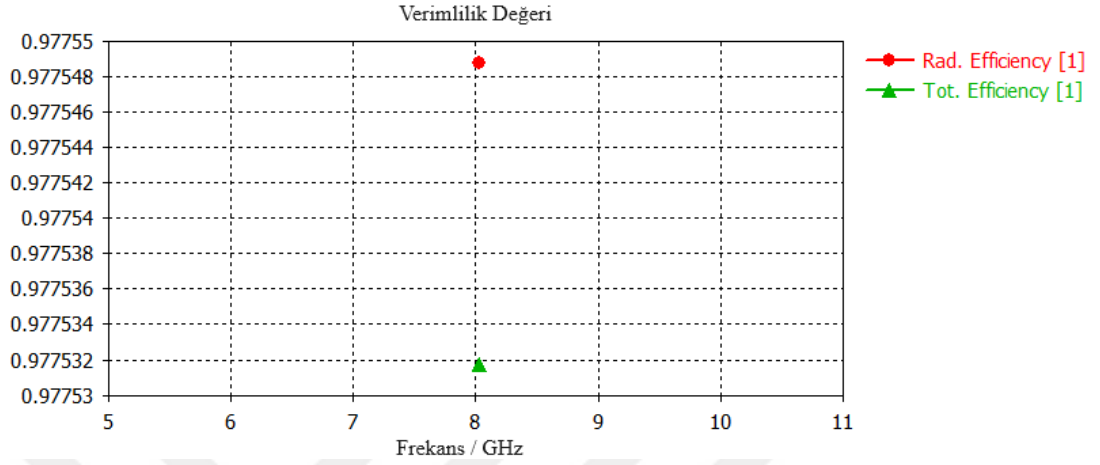
Şekil 4.2.FR4-FR4 antenin geri yansıma katsayısı (S_{11}) grafiğinin benzetim sonucu

FR4-FR4 antenin benzetim ortamında elde edilen uzak alan kazanç örüntüsü Şekil 4.3’te gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 8,031 GHz’ de gerçekleştirilmiş kazanç (realized gain) değeri 7,0 dBi olarak bulunmuştur.



Şekil 4.3.FR4-FR4 antenin benzetim ortamında 3-B uzak alan kazanç örüntüsü

FR4-FR4 antenine ait verimlilik değeri Şekil 4.4' te gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 8,031 GHz frekansında verimlilik değerinin yaklaşık olarak %97,7 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.4. FR4-FR4 anteni verimlilik grafiği

4.1.2 RT5880- RT5880 tabanlı ACMA için performans analizi

Tasarlanan antenlerden ikincisi yine 8,0 GHz merkez frekansı için yama alt tabakası ve besleme alt tabakası olarak FR4 malzemesine göre daha düşük dielektrik sabitine sahip RT5880 ($\epsilon_r=2,2$) kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. FR4- FR4 anteni ile benzer geometriye sahip RT5880- RT5880 anteni için fiziksel boyutlar Çizelge 4.2' de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde alt tabaka boyutlarının FR4 tabanlı antenin boyutuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

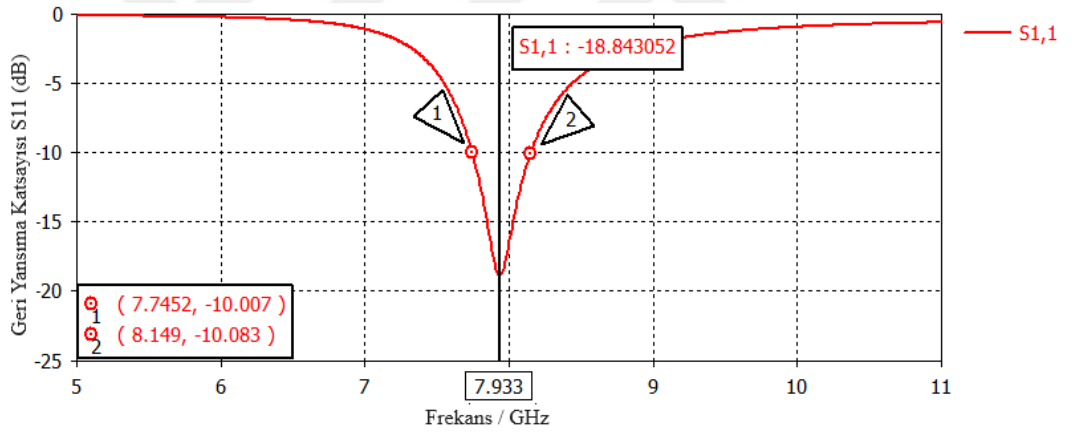
Çizelge 4.2. RT5880- RT5880 anteni tasarım parametreleri

Büyüklik	Açıklama	Değeri (mm)
L	Alt tabakaların uzunluğu	27,38
W	Alt tabakaların genişliği	33,56
L_p	Yama boyu	10,37
W_p	Yama genişliği	14,81
t_p	Yama kalınlığı	0,035
t_{ps}	Yama alt tabaka kalınlığı	1,575
t_g	Toprak düzlemi kalınlığı	0,035

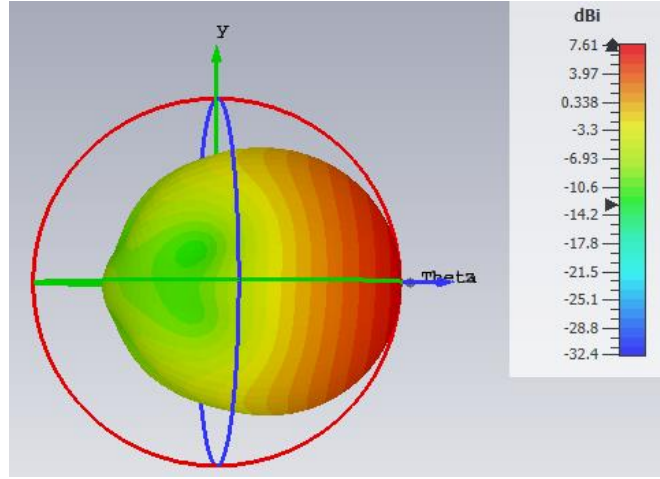
Çizelge 4.2. (Devam)

W_s	Açıklık genişliği	0,374
L_s	Açıklık uzunluğu	6,46
t_s	Besleme alt tabaka kalınlığı	0,254
L_f	Besleme hattı uzunluğu	13,69
W_f	Besleme hattı genişliği	0,8
t_f	Besleme hattı kalınlığı	0,035
L_{st}	Ayar saplaması uzunluğu	3,47

RT5880- RT5880 antenine ait geri yansıma katsayıları (S_{11}) grafiği benzetim sonucu Şekil 4.5’ te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde tasarlanan antenin 7,93 GHz merkez frekansı için -18,84 dB geri dönüş kaybı değerine ve 403 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir.

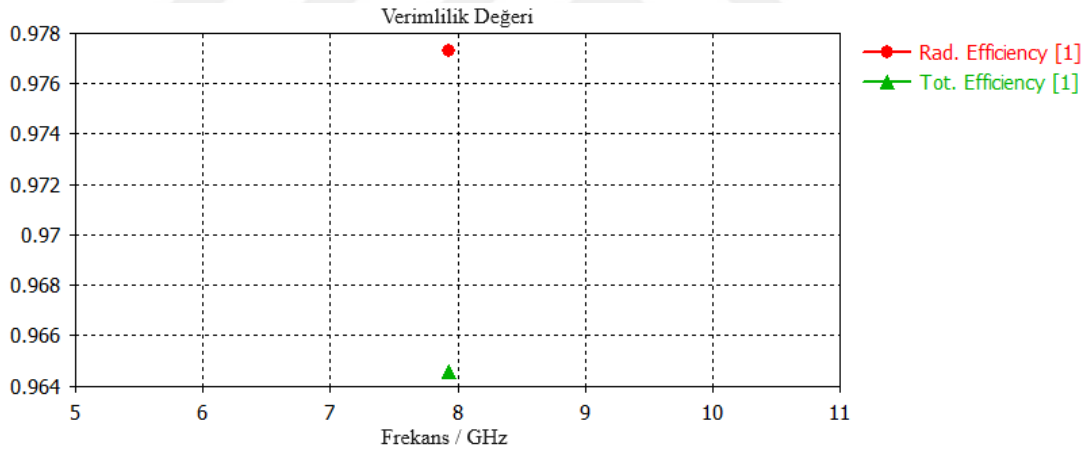
Şekil 4.5. RT5880- RT5880 anteninin geri yansıma katsayıları (S_{11}) benzetim sonucu

RT5880- RT5880 anteninin benzetim ortamında elde edilen uzak alan kazanç örüntüsü Şekil 4.6’ da gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 7,93 GHz’ de gerçekleştirilmiş kazanç değeri 7,61 dBi olarak bulunmuştur.



Şekil 4.6. RT5880- RT5880 anteninin benzetim ortamında 3-B uzak alan kazanç örüntüsü

RT5880- RT5880 antenine ait verimlilik değeri Şekil 4.7’ de gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 7,93 GHz frekansında verimlilik değerinin yaklaşık olarak %96,5 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7. RT5880-RT5880 anteni verimlilik grafiği

4.1.3 RT5880– RO3010 tabanlı ACMA için performans analizi

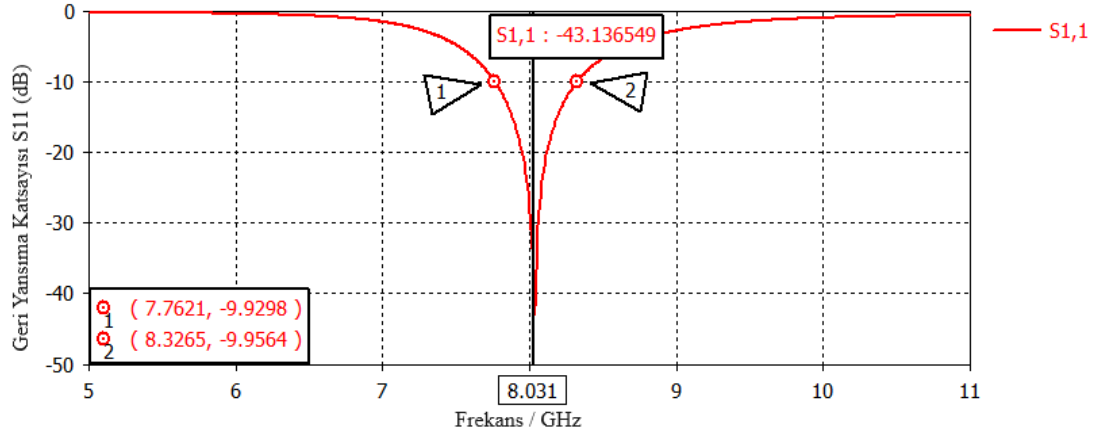
Tasarlanan antenlerden üçüncüsü besleme ve yama alt tabakalarının etkilerini ayrı ayrı inceleyebilmek için farklı alt tabaka malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu anten yine 8,0 GHz merkez frekansı hedef alınarak ve yama alt tabakası için RT5880 ($\epsilon_r=2,2$), besleme alt tabakası olarak da FR4 malzemesine göre daha yüksek dielektrik sabitine sahip RO3010 ($\epsilon_r=11,2$) kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan diğer iki anten ile benzer geometriye sahip RT5880- RO3010 anteni için fiziksel boyutlar

Çizelge 4.3’ de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde alt tabaka boyutlarının ikinci antenin alt tabaka boyutuna göre fazla değişmediği görülmektedir.

Çizelge 4.3. RT5880 – RO3010 anteni tasarım parametreleri

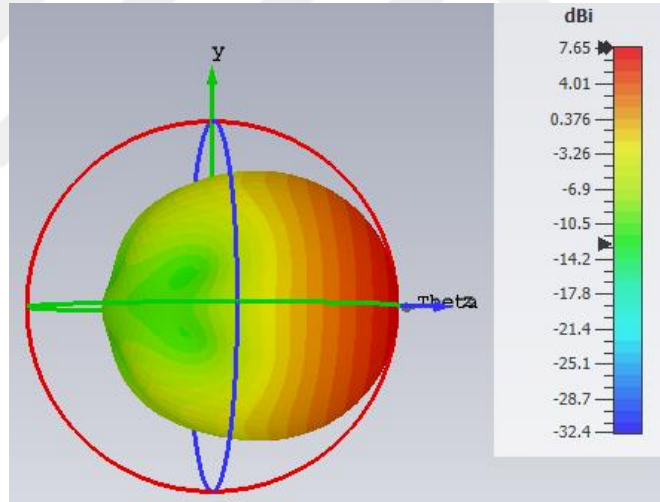
Büyükklük	Açıklama	Değeri (mm)
L	Alt tabakaların uzunluğu	28,66
W	Alt tabakaların genişliği	33,75
L_p	Yama boyu	10,5
W_p	Yama genişliği	15
t_p	Yama kalınlığı	0,035
t_{ps}	Yama alt tabaka kalınlığı	1,575
t_g	Toprak düzlemi kalınlığı	0,035
W_s	Açıklık genişliği	0,374
L_s	Açıklık uzunluğu	5,765
t_{fs}	Besleme alt tabaka kalınlığı	0,254
L_f	Besleme hattı uzunluğu	14,33
W_f	Besleme hattı genişliği	0,35
t_f	Besleme hattı kalınlığı	0,035
L_{st}	Ayar saplaması uzunluğu	1,46

Tasarlanan antene ait geri yansıma katsayıları(S_{11}) grafiği benzetim sonucu Şekil 4.8’ de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde RT5880-RO3010 antenin 8,03 GHz merkez frekansı için -43,1 dB geri dönüş kaybı değerine ve 560 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir.



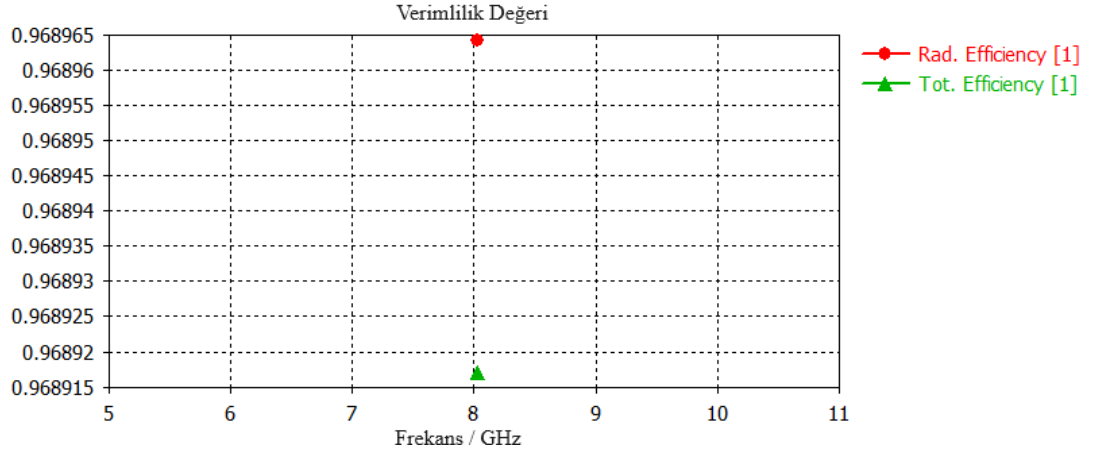
Şekil 4.8. RT5880 – RO3010 antenin geri yansımaya katsayıları (S11) benzetim sonucu

RT5880 – RO3010 antenin benzetim ortamında elde edilen uzak alan kazanç örüntüsü Şekil 4.9’ da gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 8,03 GHz’ de gerçekleştirilmiş kazanç değeri 7,65 dBi olarak bulunmuştur.



Şekil 4.9. RT5880-RO3010 antenin benzetim ortamında 3-B uzak alan kazanç örüntüsü.

RT5880 – RO3010 antenine ait verimlilik değeri Şekil 4.7’ de gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 8,03 GHz frekansında verimlilik değerinin yaklaşık olarak %96,8 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.10. RT5880 – RO3010 antenini verimlilik grafiği

4.1.4 RO4360– RO3010 tabanlı ACMA için performans analizi

Tasarlanan antenlerden dördüncüsü 8,0 GHz merkez frekansı hedef alınarak yama alt tabakası için RT5880 malzemesine göre daha yüksek dielektrik sabitine sahip RO4360 ($\epsilon_r=6,4$) ve besleme alt tabakası için RO3010 ($\epsilon_r=11,2$) malzemeleri kullanılarak tasarım gerçekleştirilmiştir. Diğer üç anten ile benzer geometriye sahip RO4360- RO3010 anteni için fiziksel boyutlar Çizelge 4.4’ de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde diğer üç antene göre anten alt tabaka boyutlarında neredeyse yarı yarıya düşüş başarılmıştır.

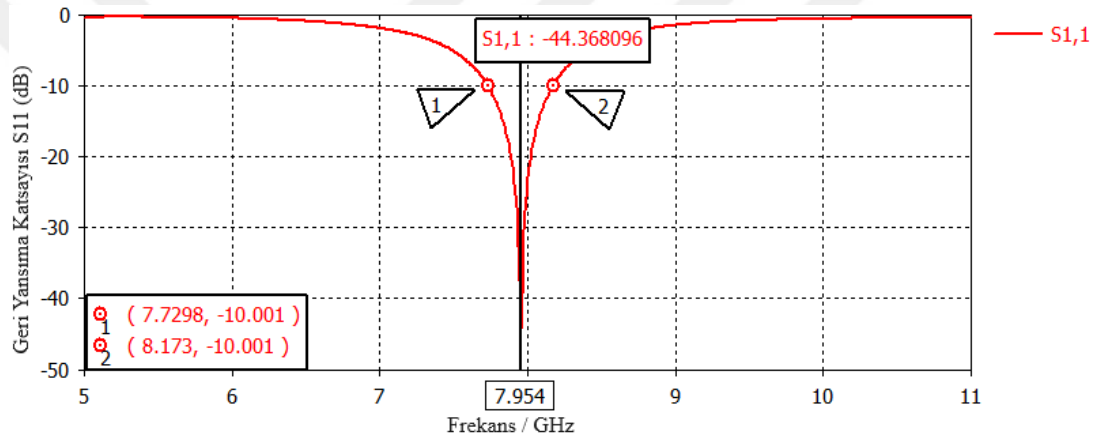
Çizelge 4.4. RO4360 – RO3010 anteni tasarım parametreleri

Büyüklik	Açıklama	Değeri (mm)
L	Alt tabakaların uzunluğu	14,33
W	Alt tabakaların genişliği	16,375
L_p	Yama boyu	5,7
W_p	Yama genişliği	7
t_p	Yama kalınlığı	0,035
t_{ps}	Yama alt tabaka kalınlığı	1,52
t_g	Toprak düzlemi kalınlığı	0,035
W_s	Açıklık genişliği	0,374
L_s	Açıklık uzunluğu	5,765
t_{fs}	Besleme alt tabaka kalınlığı	0,254
L_f	Besleme hattı uzunluğu	7,165

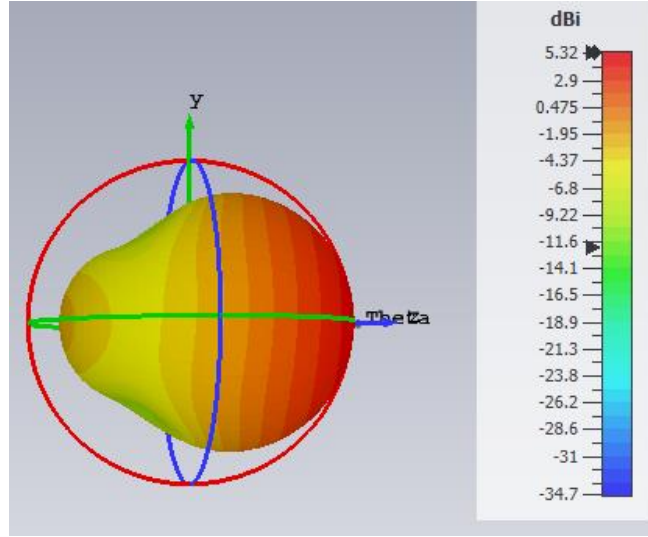
Çizelge 4.4. (Devam)

W_f	Besleme hattı genişliği	0,2
t_f	Besleme hattı kalınlığı	0,035
L_{st}	Ayar saplaması uzunluğu	4,5

RO4360- RO3010 antenine ait geri yansıma katsayıları (S_{11}) grafiği benzetim sonucu Şekil 4.11’ de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde RO4360-RO3010 anteninin 7,95 GHz merkez frekansı için -44,3 dB geri dönüş kaybı değerine ve 445 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir.

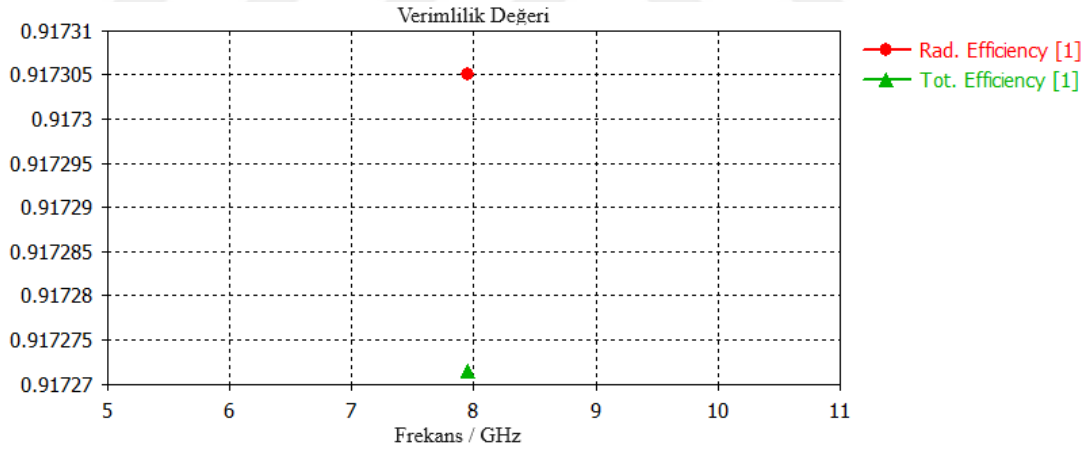
Şekil 4.11. RO4360 – RO3010 anteninin yansıma katsayıları (S_{11}) benzetim sonucu

RO4360- RO3010 anteninin benzetim ortamında elde edilen uzak alan kazanç örüntüsü Şekil 4.12’ de gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 7,95 GHz’ de gerçekleştirilmiş kazanç değeri 5,32 dBi olarak bulunmuştur.



Şekil 4.12. RO4360- RO3010 antenin uzak alan kazanç örüntü sonucu

RO4360 – RO3010 antenine ait verimlilik değeri Şekil 4.13’ te gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 7,95 GHz frekansında verimlilik değerinin yaklaşık olarak %91,7 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.13. RO4360-RO3010 anteni verimlilik grafiği

4.1.5 ACMA’ların karşılaştırmalı performans analizi

ACMA tasarımları için ilk olarak piyasada rahatça elde edilebilen ve çoğu araştırmacı tarafından tercih edilen FR4 ($\epsilon_r=4,3$) alt tabaka kullanılarak başlanılmıştır. Daha sonra malzeme tabanlı minyatürleşmeyi gözlemlemek adına daha düşük dielektrik sabite sahip olan RT5880 ($\epsilon_r=2,2$) alt tabakası ile tasarım gerçekleştirilmiştir. Beklenildiği üzere anten boyutlarında artış meydana gelmiştir. Elde edilen anten kazancının iyi olduğu

görülmektedir fakat verimlilik ve bant genişliği parametrelerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. ACMA'ların iyi ışıma yapmaları için Pozar, (Pozar 1996) yama alt tabakasının düşük dielektrik sabitli besleme alt tabakasının ise yüksek dielektrik sabitli seçilmesinin uygun olacağını belirtmiştir. Bu tavsiyeden yola çıkarak üçüncü tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda anten alt tabakası aynı kalırken besleme alt tabakası yüksek dielektrik sabitine sahip olan RO3010 ($\epsilon_r=11,2$) seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde antenin geri dönüş kaybının, kazancının, bant genişliğinin iyileştiği sonucuna varılmaktadır. Üçüncü tasarım ile iyi performanslı bir anten elde edilmiştir fakat boyut olarak daha kompakt anten tasarlanmak istenmektedir. Dolayısı ile dördüncü tasarımda yama alt tabakası olarak daha yüksek dielektrik sabitli bir malzeme olan RO4360 ($\epsilon_r=6,4$) tercih edilmiştir. Tasarımı yapılan dört farklı antenin performanslarının karşılaştırmalı analizinin bir özeti Çizelge 4.5' te sunulmuştur. Çizelge 4.5 incelendiğinde boyut ve performans açısından RO4360- RO3010 anteninin uygulamalarda öncelikli tercih edilebileceği söylenebilir.

Çizelge 4.5. Tasarlanan antenlerin özellikleri

	FR4 FR4	RT5880 RT5880	RT5880 RO3010	RO4360 RO3010
Alt tabaka boyutları en x boy x yükseklik	20,6 x 30,2 x 1,955	27,38 x 33,56 x 1,934	28,66 x 33,75 x 1,934	14,33 x 16,37 x 1,87
Yama boyutu $L_p \times W_p$	7,10 x 11,45	10,37 x 1,81	10,5 x 15	5,7 x 7
Merkez frekansı	8,031 GHz	7,93 GHz	8,031 GHz	7,954 GHz
Kazanç	7,0	7,61	7,65	5,32
Verimlilik	%97,7	%96,5	%96,8	%91,7
Bant Genişliği	433 Mhz	403MHz	560MHz	445MHz

4.2. Metayüzeyden Esinlen DGS ile Minyatürleşme

Tez çalışmasının bu bölümünde metayüzeyden esinlenen DGS ile minyatürleştirme çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu kapsamda ACMA'nın toprak düzlemine birim hücre tasarımı uygulanarak iletkenin elektrik ve manyetik geçirgenliğini değiştirmek suretiyle antende küçülme sağlanmıştır. Birim hücre yapısı, toprak düzleminde yer alan besleme açıklığının etrafına dikdörtgen şeklinde halka yarıkları eklenerek oluşturulmuştur. Dikdörtgen halkalar oluşturulurken, bazı dikdörtgen halka yarıklarının besleme hattı üzerine gelen kısımları toprak düzleminde çıkarılmamıştır. Nihai metayüzey deseni, parametrik çalışmalar sonucunda daha düşük frekanslarda optimum performans parametrelerine sahip antenin tasarımı ile oluşturulmuştur. Metayüzeyden esinlenen DGS ile minyatürleşme tekniği, bir önceki bölümde tasarladığımız en düşük boyuta sahip RO4360-RO3010 anteni ve -tasarlanan ACMA benzetim ve üretim sonucunda performans değerlendirmelerinin uyumunu ortaya koymak için- piyasada temini daha kolay FR4 malzeme ile tasarlanan FR4-FR4 anteni üzerinde uygulanmıştır.

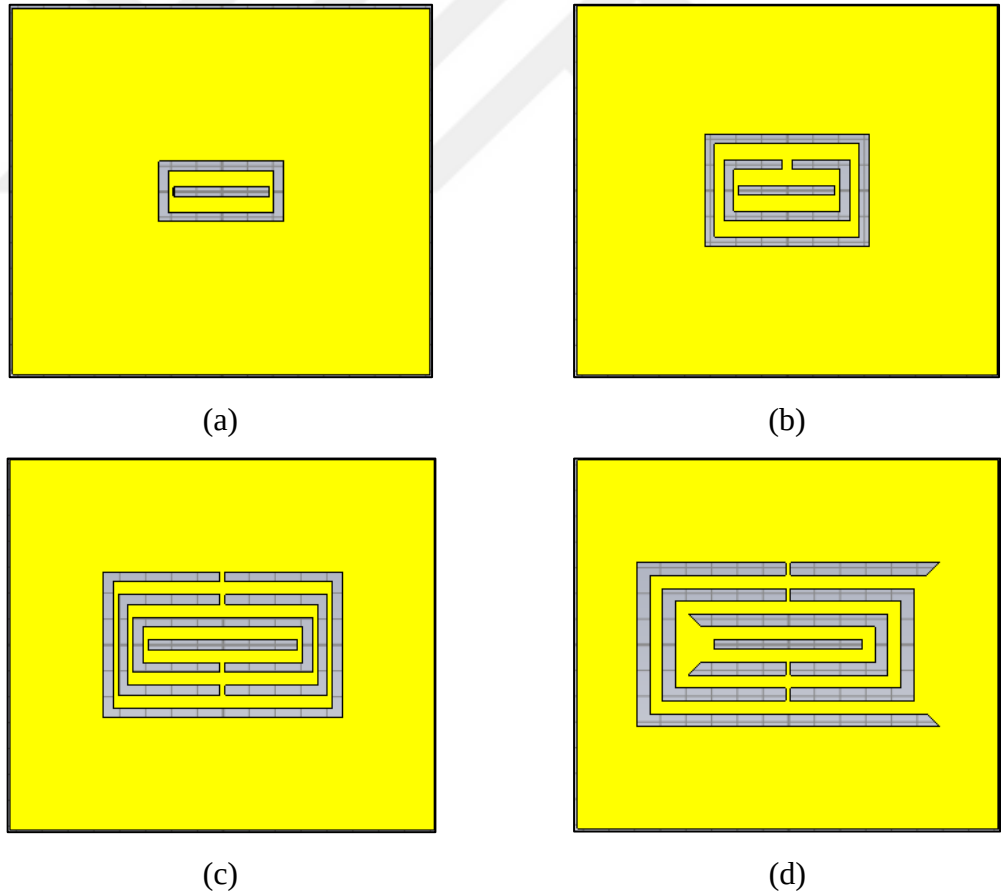
4.2.1 RO4360-RO3010 anteni metayüzeyden esinlen DGS uygulaması

8,0 GHz için tasarladığımız RO4360-RO3010 antenin boyutlarını değiştirmeden daha düşük frekanslarda ışıma yapmasını sağlayabilmek için toprak düzlemine kare şeklinde halkalar eklenmiştir. Bu amaçla 6,0 GHz' in altındaki frekanslara inilmesi hedeflenmiş ve ilgili frekanslarda antenin performansı incelenmiştir. Uygulanan tasarım şekillerinden bazıları Şekil 4.14' te gösterilmektedir. Bu tasarımlara ait geri dönüş katsayıları grafiği Şekil 4.15' te sunulmuştur.

Tasarıma ilk olarak Şekil 4.15(a)' da görüldüğü gibi kuplaj açıklığının etrafına dikdörtgen halka şeklinde bir yarık açılarak (Tasarım-1) başlanmıştır. Açılan bu yarık ile merkez frekansının bir miktar alt frekansa doğru kayması öngörülmüştür, fakat Şekil 4.15' teki grafik incelendiğinde, merkez frekansının değişmediği ve geri dönüş katsayı değerlerinin arttığı görülmektedir. Daha sonra tasarlanan yapıya ikinci bir dikdörtgen yarık eklenmiştir (Tasarım-2). Mikroşerit beslemenin üzerine gelen kısımlarda yarıkların kapatılması veya boş bırakılması anten performansını oldukça değiştirmektedir. Bundan

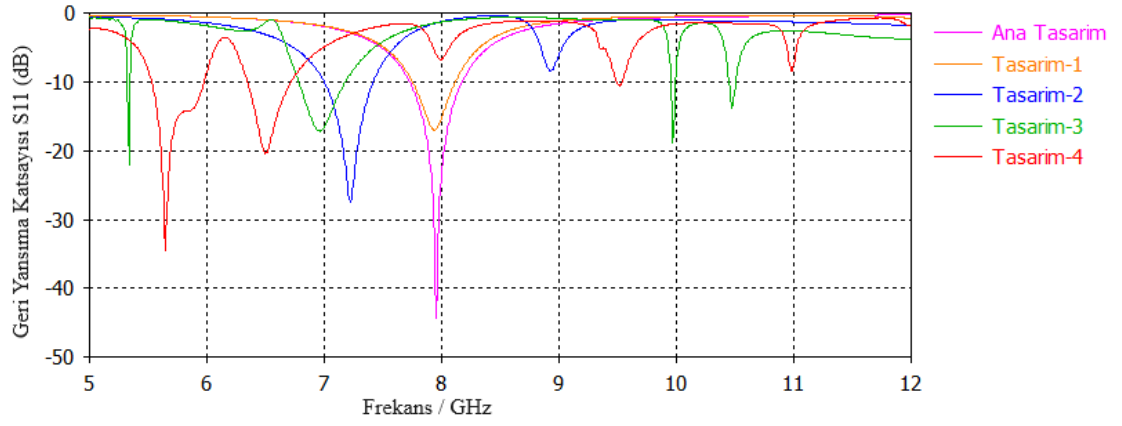
dolayı en uygun performansı bulmak için benzetim programında parametrik çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan çalışmalar neticesinde, Şekil 4.15' te Tasarım-2 için merkez frekansının yaklaşık 7,2 GHz'e kadar düştüğü görülmektedir. Bir sonraki aşamada üçüncü bir dikdörtgen yarık daha eklenmiştir. Yürütülen parametrik çalışmalarla birlikte antenin 6,0 GHz'in altında ışıma yaptığı gözlemlenmiştir. Fakat ilgili frekansta bant genişliğinin düşük bir seviyede olduğu düşünülmektedir. Tasarım-3 üzerinde değişik topolojiler denenerek Şekil 4.14 (d)' teki nihai tasarım (Tasarım-4) elde edilmiştir.

Şekil 4.15' te yapılan metayüzeyden esinlen DGS tasarımlarına ait geri dönüş kaybı katsayı grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde 7,95 GHz' de çalışan RO4360-RO3010 anteninin toprak düzleminde oluşturulan metayüzeyden esinlen DGS uygulaması ile 5,64 GHz frekansı gibi daha düşük bir frekansta antenin çalışması başarılmıştır.

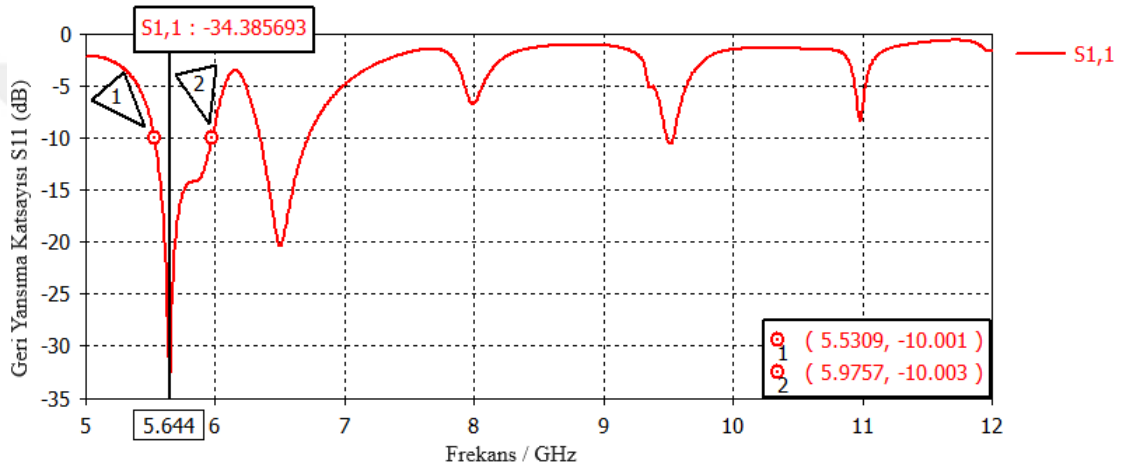


Şekil 4.14. Metayüzeyden esinlen DGS anten tasarımları. (a) Tasarım-1, (b) Tasarım-2, (c) Tasarım-3, (d) Tasarım-4.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

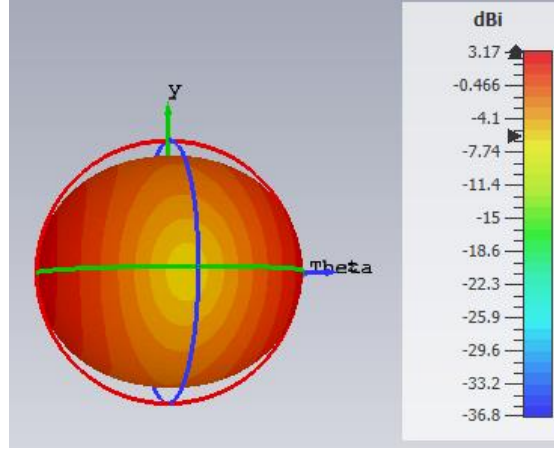


Şekil 4.15. Metayüzeyden esinlen DGS tasarımlarının geri yansımaya kaybı (S11) değerleri

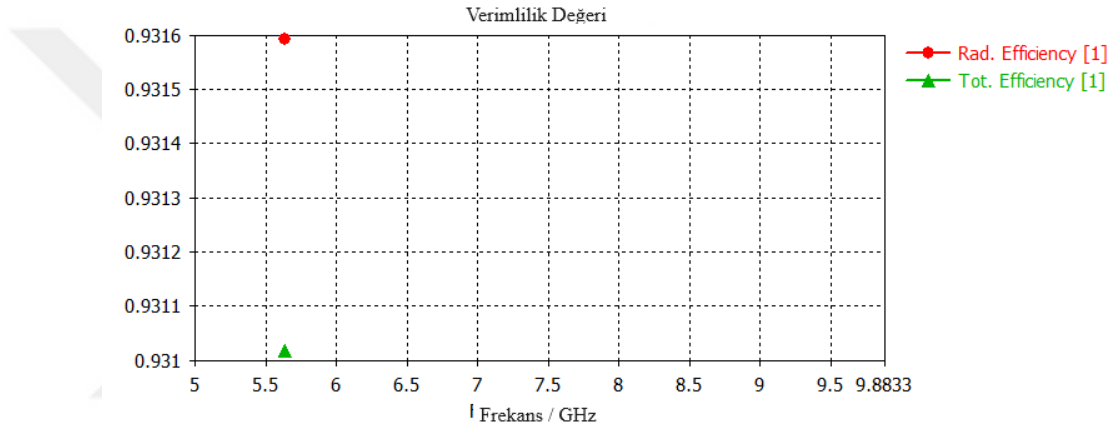


Şekil 4.16. Nihai RO4360 – RO3010 antenin yansımaya katsayıları (S11) benzetim sonucu.

Tasarım-4 antenin benzetim ortamında elde edilen geri yansımaya katsayısı grafiği Şekil 4.16’da uzak alan kazanç örüntüsü Şekil 4.17’ de, anten verimliliği Şekil 4.18’de gösterilmektedir. Nihai anten için 5,64 GHz’ de gerçekleştirilmiş kazanç değerinin 3,17 dBi olduğu, S11 geri yansımaya değerinin -34,3 dB, bant genişliğinin 445 MHz, verimliliğin ise yaklaşık olarak % 93,1 olduğu görülmektedir.

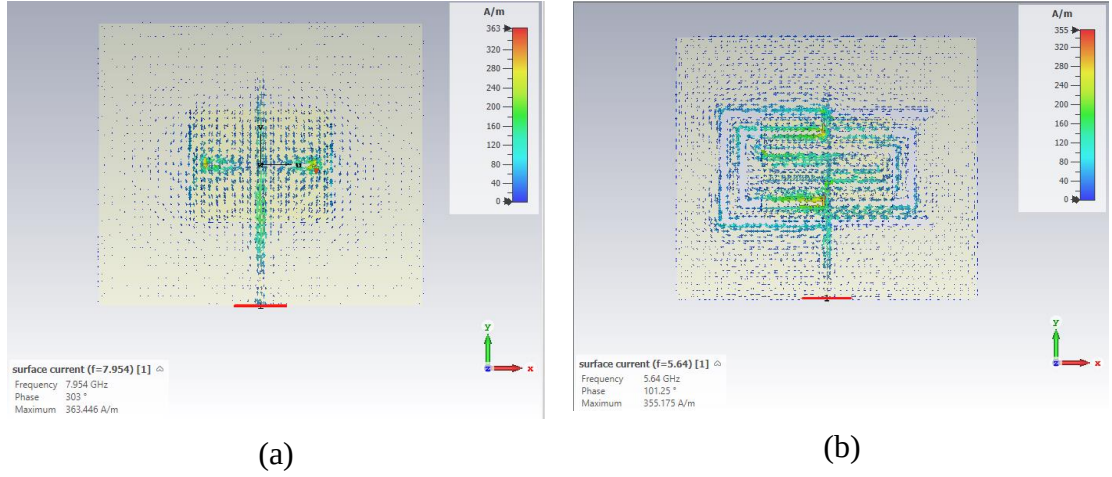


Şekil 4.17 Nihai RO4360-RO3010 antenin uzak alan kazanç örüntü sonucu



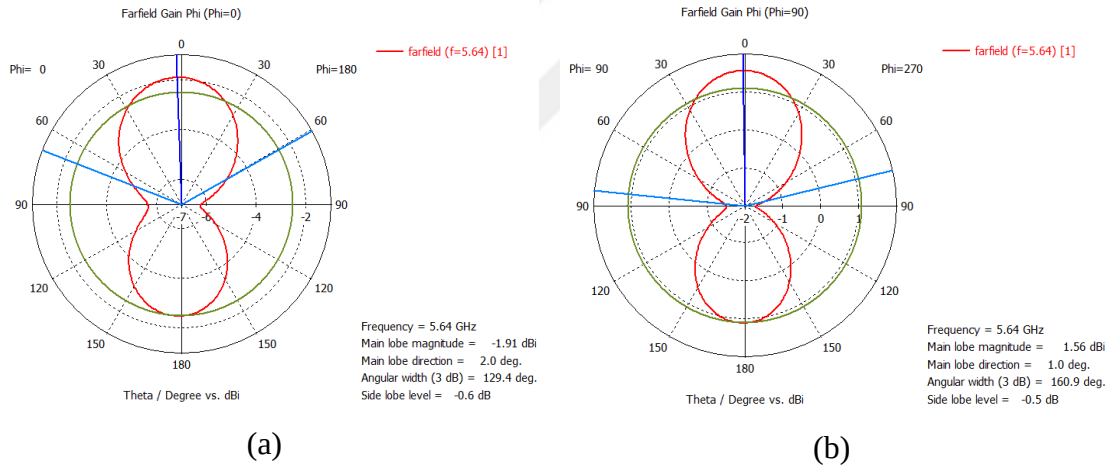
Şekil 4.18. Nihai RO4360-RO3010 anteni verimlilik grafiği

Yapılan tasarımlar üzerindeki yüzey akımları Şekil 4.19’ de gösterilmektedir. Tasarlanan ana anten ile metayüzey yaklaşımlı anten karşılaştırılmıştır ve metayüzeyden esinlen DGS uygulanmış antende yüzey akımlarının daha fazla yol katettiği gözlemlenmiştir. Bu durum antenin daha düşük bir frekansta yayılım yapmasına olanak sağlamaktadır.



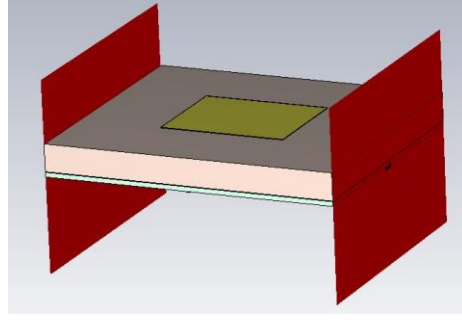
Şekil 4.19. RO4360-RO3010 antenin yüzey akımları. (a) Ana tasarım (b) Nihai tasarım

Tasarlanan nihai antene ait co-polarizasyon ve cross polarizasyon grafikleri Şekil 4.20’ de gösterilmektedir.

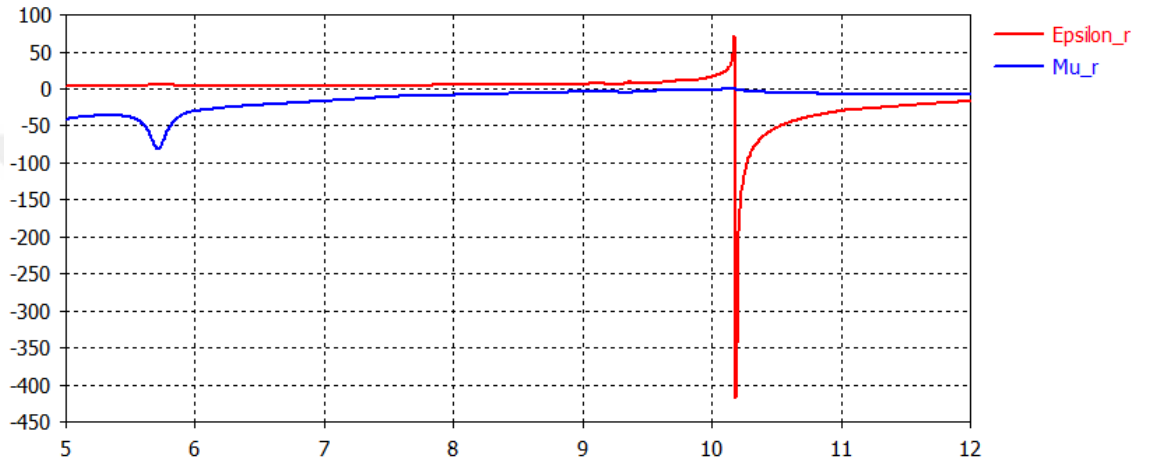


Şekil 4.20. RO4360-RO3010 anteni için (a) Co polarizasyon grafiği (b) Cross polarizasyon grafiği.

Tasarım 4 anteni, toprak tabakasındaki kuplaj açıklığını merkezine alan ve 0,5mm mesafesi ile ayrılmış üç adet dikdörtgensel şekil oluşturan yarıklardan oluşan bir birim hücresi olarak tasarlanmıştır. Şekil 4.21’ de gösterildiği gibi antenin yayın yapmayan kenarlarına iki ayrı port yerleştirilmiş ve CST mikrodalga programında benzetiminden elde edilen sonuçlar Şekil 4.22’ de sunulmuştur. Tasarlanan nihai yapı ile μ negatif özellikleri tamamen karşılanır. Birim hücre, rezonans frekansında negatif μ ve pozitif ϵ değerlerine sahiptir.



Şekil 4.21 Birim hücrenin CST’ de iki kapılı görseli



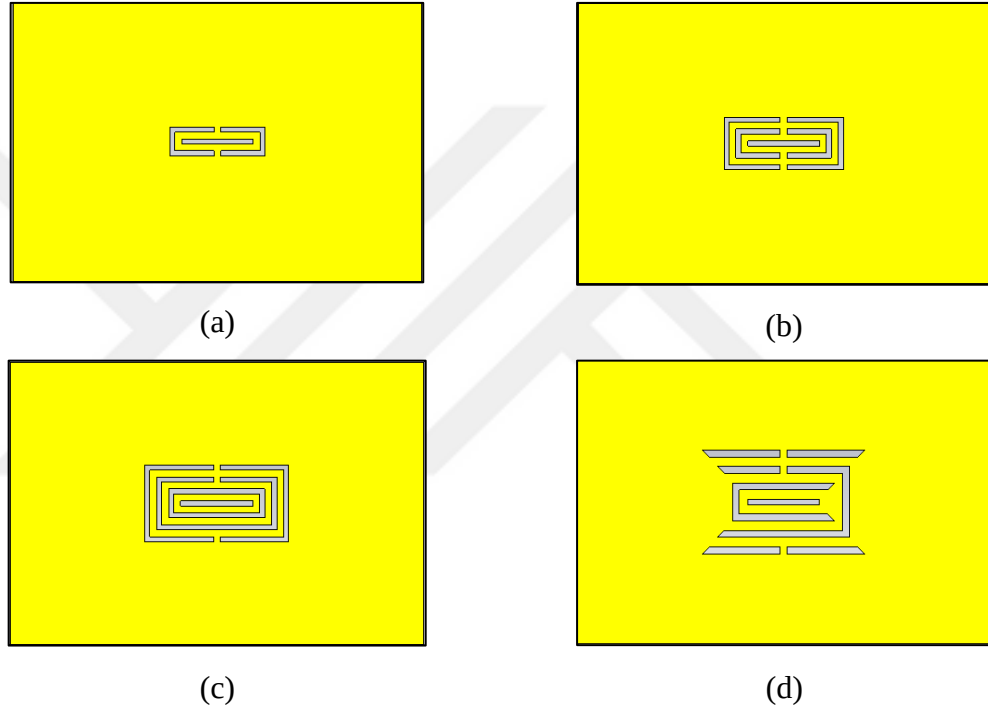
Şekil 4.22 Birim hücreye ait e ve u sonuçları

4.2.2 FR4-FR4 anteni metayüzeyden esinlen DGS uygulaması

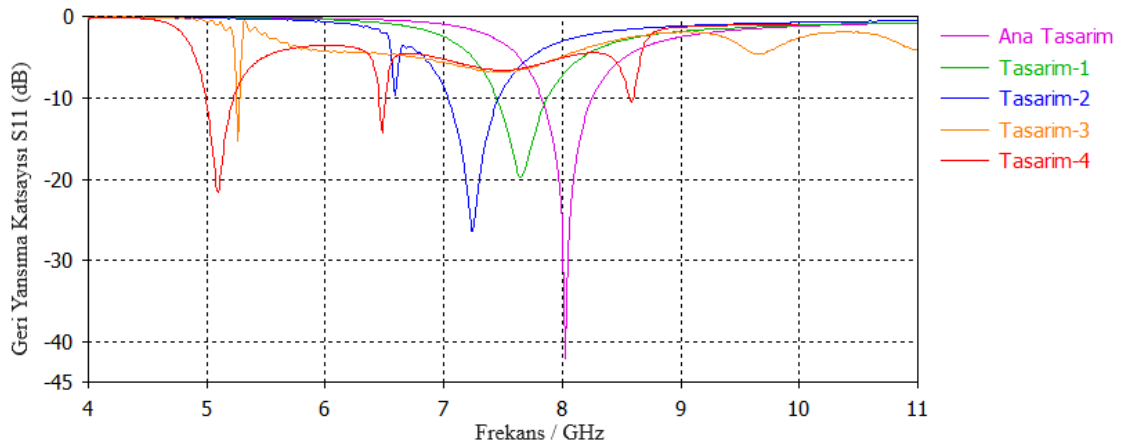
8,0 GHz için tasarladığımız FR4-FR4 antenin boyutlarını değiştirmeden daha düşük frekanslarda ışıma yapmasını sağlayabilmek için toprak düzlemine kare şeklinde halkalar eklenmiştir. Bu amaçla 6,0 GHz’ in altındaki frekanslara inilmesi hedeflenmiş ve ilgili frekanslarda antenin performansı incelenmiştir. Uygulanan tasarım şekillerinden bazıları Şekil 4.23’ te gösterilmektedir. Bu tasarımlara ait geri dönüş katsayıları grafiği Şekil 4.24’ de sunulmuştur.

Tasarıma ilk olarak Şekil 4.23(a)’ da görüldüğü gibi kuplaj açıklığının etrafına dikdörtgen halka şeklinde bir yarık açılarak (Tasarım-1) başlanmıştır. Açılan bu yarık ile merkez frekansının bir miktar alt frekansa doğru kaydığı görülmektedir. Daha sonra tasarlanan yapıya ikinci bir dikdörtgen yarık eklenmiştir (Tasarım-2). Mikroşerit beslemenin üzerine gelen kısımlarda yarıkların kapatılması veya boş bırakılması anten

performansını oldukça değiştirmektedir. Bundan dolayı en uygun performansı bulmak için benzetim programında parametrik çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan çalışmalar neticesinde, Şekil 4.24' de Tasarım-2 için merkez frekansının yaklaşık 7,24 GHz'e kadar düştüğü görülmektedir. Bir sonraki aşamada üçüncü bir dikdörtgen yarık daha eklenmiştir. Yürütülen parametrik çalışmalarla birlikte antenin 6,0 GHz'in altında ışıma yaptığı gözlemlenmiştir. Fakat ilgili frekansta bant genişliğinin düşük bir seviyede olduğu düşünülmektedir. Tasarım-3 üzerinde farklı topolojiler denenerek Şekil 4.23 (d)' deki nihai tasarım (Tasarım-4) elde edilmiştir.

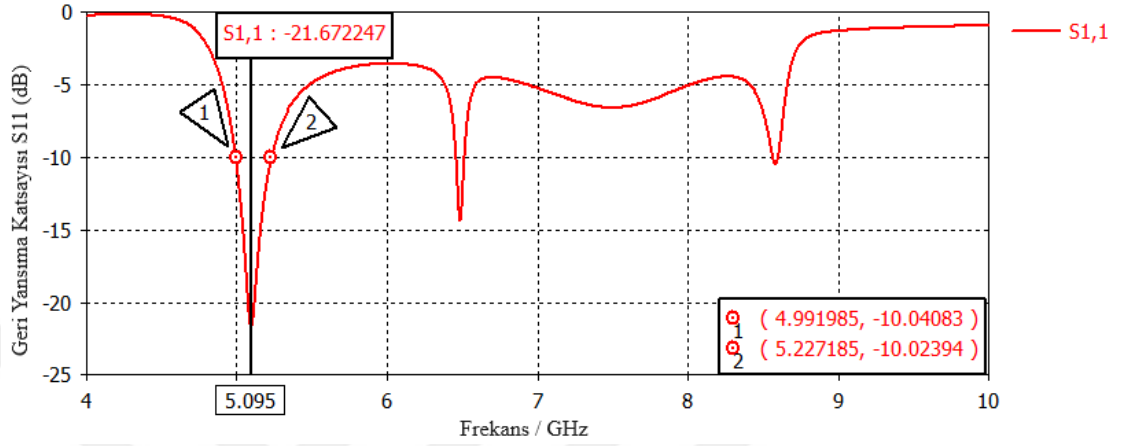


Şekil 4.23. Metayüzeyden esinlen DGS anten tasarımları. (a) Tasarım-1, (b) Tasarım-2, (c) Tasarım-3, (d) Tasarım-4.



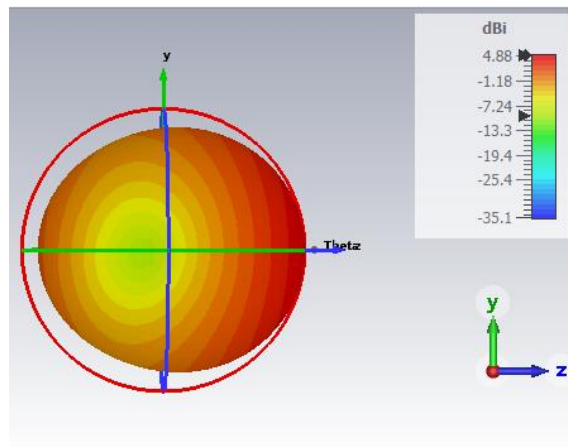
Şekil 4.24. Metayüzeyden esinlen DGS tasarımlarının geri dönüş kaybı (S11) değerleri

Şekil 4.24’ de yapılan metayüzeyden esinlen DGS tasarımlarına ait geri dönüş kaybı katsayı grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, 8,03 GHz’ de çalışan FR4-FR4 antenin toprak düzleminde oluşturulan metayüzey uygulaması ile 5,09 GHz frekansı gibi daha düşük bir frekansta antenin çalışması başarılmıştır.

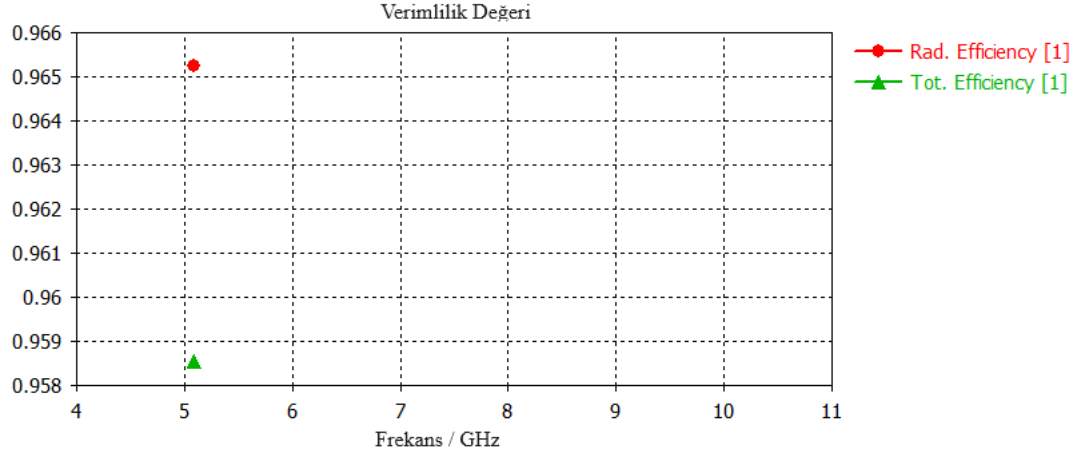


Şekil 4.25. Nihai FR4-FR4 antenin yansımaya katsayıları (S11) benzetim sonucu

Tasarım-4 (FR4-FR4) antenin benzetim ortamında elde edilen geri yansımaya katsayısı grafiği Şekil 4.25 ‘te, uzak alan kazanç örüntüsü Şekil 4.26’ da, anten verimliliği Şekil 4.27’ de gösterilmektedir. Nihai anten için gerçekleştirilmiş kazanç değerinin 5,09 GHz’ de 4,88 dBi, S11 geri yansımaya değerinin -21,6 dB, bant genişliğinin 236 MHz ve anten verimliliğinin yaklaşık %96 olduğu görülmektedir.

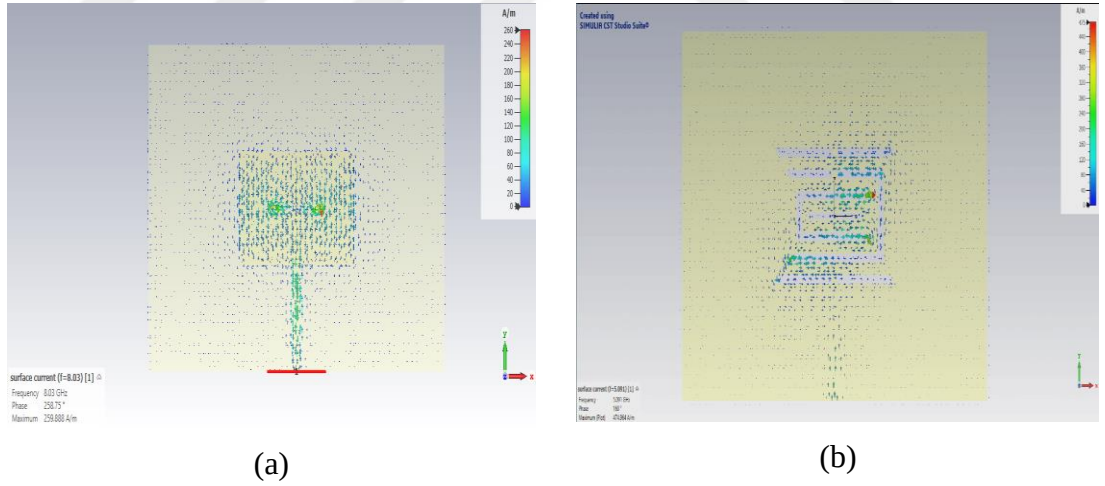


Şekil 4.26. Nihai FR4-FR4 antenin uzak alan kazanç örüntü sonucu



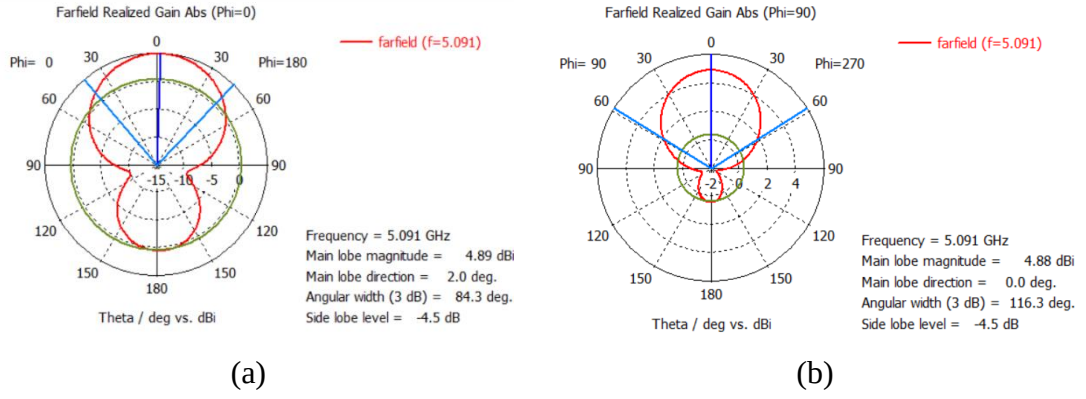
Şekil 4.27. Nihai FR4-FR4 anteni verimlilik grafiği

Yapılan tasarımlar üzerindeki yüzey akımları Şekil 4.28’ de gösterilmektedir. Tasarlanan ana anten ile metayüzey yaklaşımı anten karşılaştırılmıştır ve metayüzeyden esinlen DGS uygulanmış antende yüzey akımlarının daha fazla yol katettiği gözlemlenmiştir. Bu durum antenin daha düşük bir frekansta yayılım yapmasına olanak sağlamaktadır.



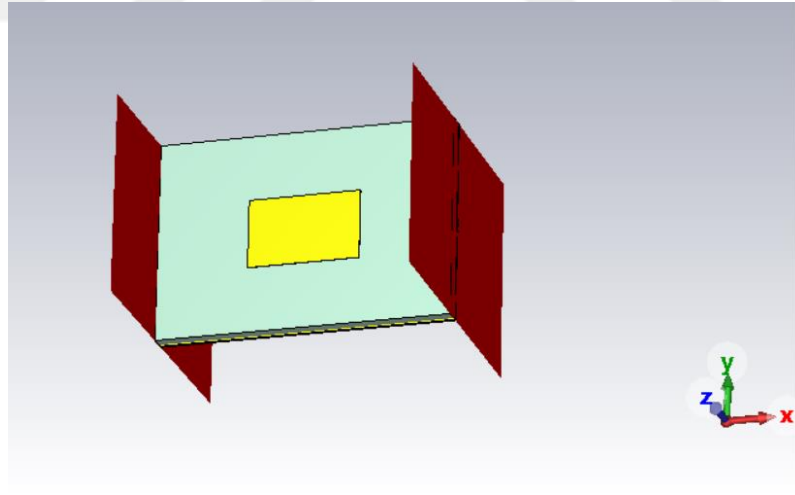
Şekil 4.28. FR4-FR4 antenin yüzey akımları. (a) Ana tasarım (b) Nihai tasarım

Tasarlanan nihai antene ait co-polarizasyon ve cross polarizasyon grafikleri Şekil 4.29’ da gösterilmektedir.

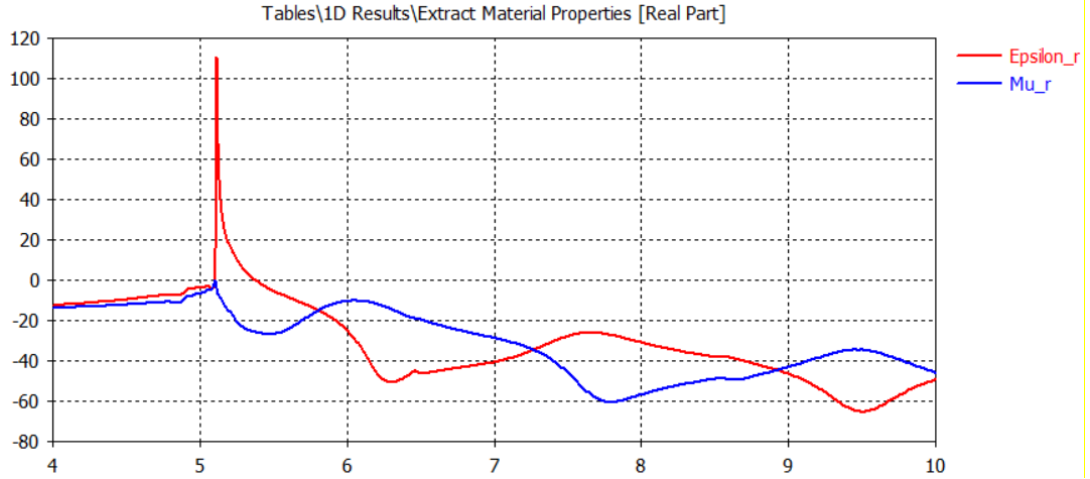


Şekil 4.29. FR4-FR4 anteni için (a) Co polarizasyon grafiği (b) Cross polarizasyon grafiği

Tasarım 4 anteni, toprak tabakasındaki kuplaj açıklığını merkezine alan ve 0,6mm mesafesi ile ayrılmış 0,5mm açıklık mesafesinde üç adet dikdörtgensel şekil oluşturan yarıklardan oluşan bir birim hücresi olarak tasarlanmıştır. Şekil 4.30’ da gösterildiği gibi antenin yayın yapmayan kenarlarına iki ayrı port yerleştirilmiş ve CST mikrodalga programında benzetiminden elde edilen sonuçlar Şekil 4.31’ de sunulmuştur. Tasarlanan nihai yapı ile μ negatif özellikleri tamamen karşılanır. Birim hücre, rezonans frekansında negatif μ ve pozitif ϵ değerlerine sahiptir.



Şekil 4.30. FR4-FR4 birim hücrenin CST’ de iki kapılı görseli



Şekil 4.31. FR4-FR4 anteni birim hücreye ait e ve u sonuçları

Yapılan tasarımlar sonucunda ACMA' ların toprak düzlemi üzerine metayüzeyden esinlen DGS yapıları eklenmiş ve minyatürleştirme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çizelge 4.6' da elde edilen sonuçların bir özeti sunulmuştur. Toprak düzlemine uygulanan metayüzey yaklaşımları ile RO4360-RO3010 antenin çalışma frekansının 7,954 GHz'den 5,64 GHz' düştüğü buna bağlı olarak yaklaşık %30 minyatürleşme sağlandığı görülmektedir. Anten kazancında düşüş meydana gelirken bant genişliği korunmuştur. FR4-FR4 antenin çalışma frekansı ise toprak düzlemine uygulanan metayüzeyden esinlen DGS sayesinde 8,031 GHz' den 5,095 GHz'e inmiş buna bağlı olarak yaklaşık %36,5 minyatürleştirme elde edilmiştir. Minyatürleştirilen antenin kazanç ve bant genişliğinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Fakat bant genişliğinde neredeyse 1/2 oranındaki azalma literatürdeki minyatürleşmiş antenler ile kıyaslandığında daha azdır.

Çizelge 4.6. Ana ve nihai tasarımların karşılaştırılması

	RO4360 RO3010	Nihai RO4360/RO3010	FR4 FR4	Nihai FR4-FR4
Alt tabaka boyutları	14,33 x	14,33 x	20,6 x	20,6 x
en x boy x	16,37 x	16,37 x	30,2 x	30,2 x
yükseklik	1,87	1,87	1,955	1,955

Çizelge 4.6. (Devam)

Yama boyutu $L_p \times W_p$	5,7 x 7	5,7 x 7	7,10 x 11,45	7,10 x 11,45
Merkez frekansı	7,954 GHz	5,64 GHz	8,031 GHz	5,095 GHz
Kazanç	5,32 dBi	3,17 dBi	7,0 dBi	4,88 dBi
Verimlilik	%91,7	%93,1	%97,7	%96
Bant Genişliği	445 MHz	445 Mhz	433 Mhz	236 Mhz

4.2.3 Geleneksel FR4-FR4 ACMA

Tasarlanmış olan antenlerin toprak düzlemine metayüzey yaklaşımı uygulanarak çalışma frekansları olabildiğince aşağı çekilmiştir. Düşürülmüş olan ilgili frekansta normal bir açıklı bağlaşımlı anten tasarlansaydı boyutları ve performansı ne olurdu karşılaştırmak adına FR4-FR4 minyatürize antenin çalışma frekansında (5,095GHz) geleneksel bir ACMA tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan ölçüler Çizelge 4.7’de verilmiştir.

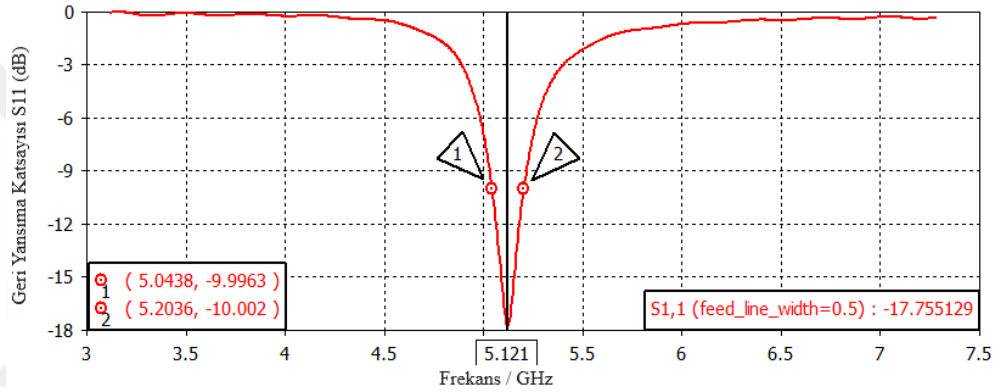
Çizelge 4.7. Geleneksel FR4-FR4 anteni tasarım parametreleri

Büyüklik	Açıklama	Değeri (mm)
L	Alt tabakaların uzunluğu	40,71
W	Alt tabakaların genişliği	46,45
L_p	Yama boyu	11,8
W_p	Yama genişliği	17,6
t_p	Yama kalınlığı	0,035
t_{ps}	Yama alt tabaka kalınlığı	1,6
t_g	Toprak düzlemi kalınlığı	0,035
W_s	Açıklık genişliği	0,55
L_s	Açıklık uzunluğu	7,0
t_{fs}	Besleme alt tabaka yüksekliği	0,25

Çizelge 4.7. (Devam)

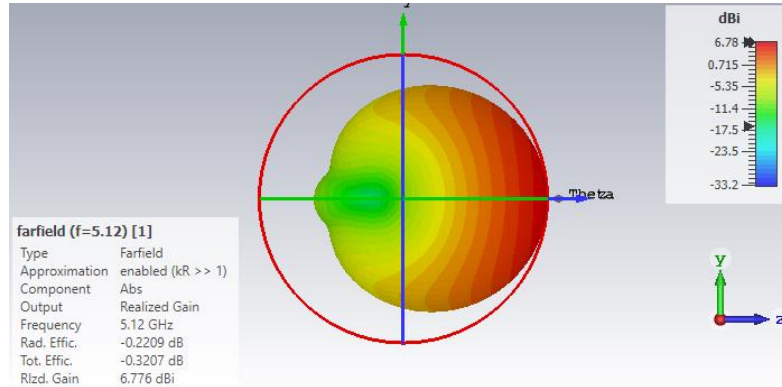
L_f	Besleme hattı uzunluğu	15,87
W_f	Besleme hattı genişliği	0,5
t_f	Besleme hattı kalınlığı	0,035
L_{st}	Ayar saplaması uzunluğu	5,0

Geleneksel FR4-FR4 antenine ait geri yansıma katsayıları (S11) grafiği benzetim sonucu Şekil 4.11’ de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde Geleneksel FR4-FR4 antenin 5,12 GHz merkez frekansı için -17,7 dB geri dönüş kaybı değerine ve 160 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir.



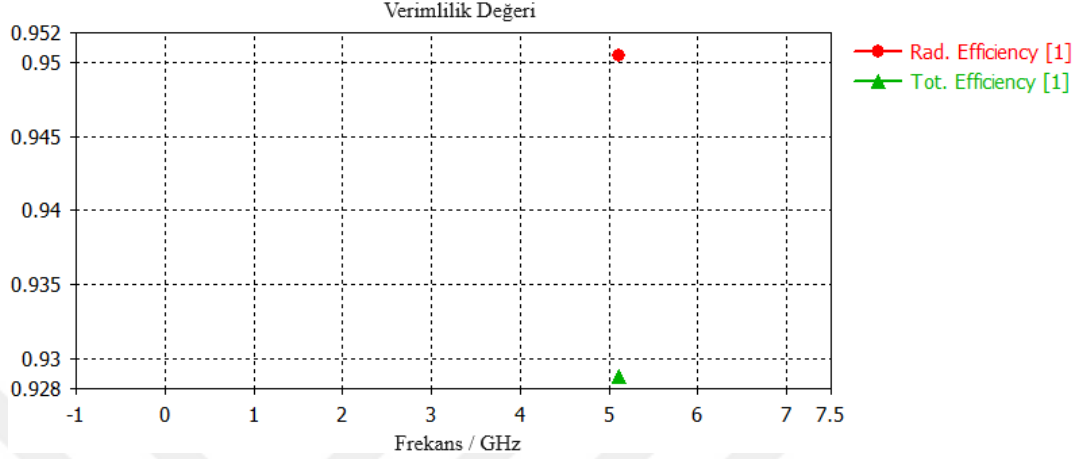
Şekil 4.32. Geleneksel FR4-FR4 anteni geri yansıma katsayısı(S11)

Geleneksel FR4-FR4 antenin benzetim ortamında elde edilen uzak alan kazanç örüntüsü Şekil 4.33’te gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 5,12 GHz’ de gerçekleştirilmiş kazanç (realized gain) değeri 6,78 dBi olarak bulunmuştur.



Şekil 4.33. Geleneksel FR4-FR4 antenin benzetim ortamında 3-B uzak alan kazanç örüntüsü.

Geleneksel FR4-FR4 antenine ait verimlilik değeri Şekil 4.34’ te gösterilmektedir. Tasarlanan anten için 5,12 GHz frekansında verimlilik değerinin yaklaşık olarak %93,0 olarak bulunmuştur.



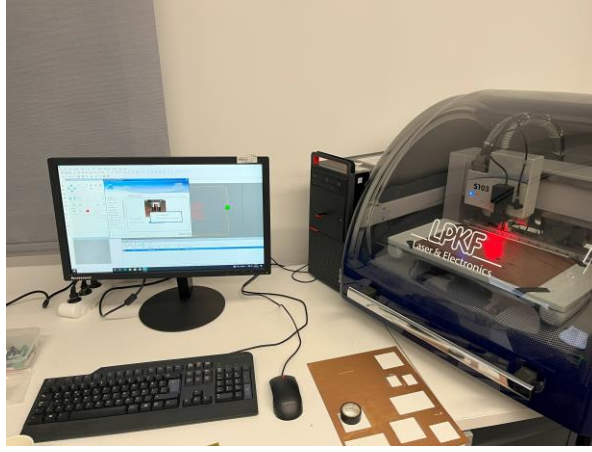
Şekil 4.34. Geleneksel FR4-FR4 anteni verimlilik grafiği

4.3. Anten Üretim ve Ölçüm Çalışmaları

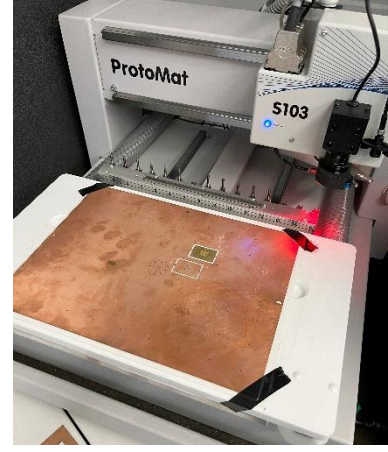
Tasarımı gerçekleştirilen antenlerden FR4 alt tabakaya sahip olan anten LPKF Circuit Pro cihazı (Şekil 4.35) ile üretilmiştir. Şekil 4.36’da üretilen açıklık bağlaşımlı mikroşerit yama anteninin görselleri verilmiştir. Üretilen antenin ölçümü Rohde&Schwarz ZNB8 Vector Network Analyzer ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak ölçüm cihazı probu kalibrasyon işlemine tabii tutulmuştur ardından SMA konnektör uyumlu ölçüm probu ile ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm cihazı ile S11 geri yansıma katsayı değeri ölçülmüştür. Şekil 4.37’ de anten ve ölçüm sistemine ait bir görsel sunulmuştur.

Üretilen antenin bir birimlik bir Küp Uydu üzerinde nasıl durduğunu gözlemlemek için üç boyutlu yazıcıdan 1U Küp Uydu basılmıştır. Şekil 4.38’ de üretilen antenin Küp Uydu üzerinde kapladığı alan açıkça görülmektedir.

Yapılan üretim ve ölçümler Milli Savunma Üniversitesi, Kara Harp Okulu, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü bünyesindeki laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

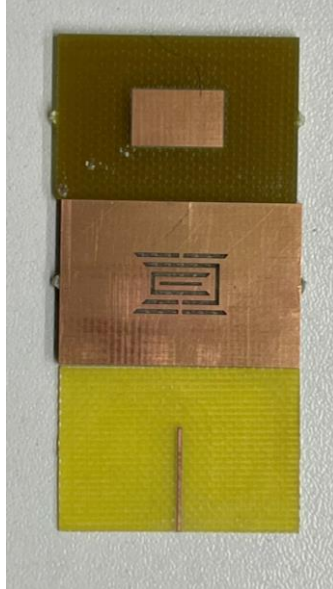


(a)

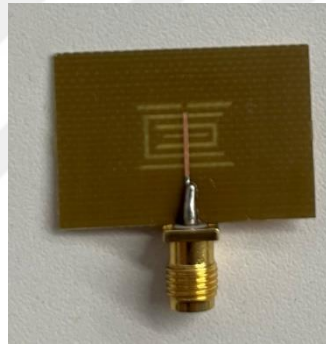


(b)

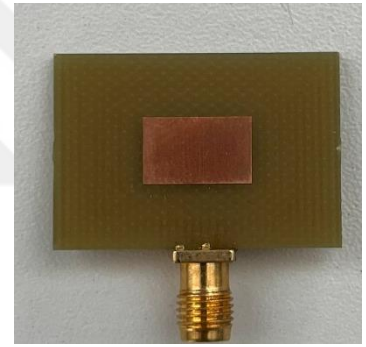
Şekil 4.35. (a) LPKF Baskı cihazı ve kontrol bilgisayarı, (b) LPKF baskı cihazı kazıma alanı.



(a)



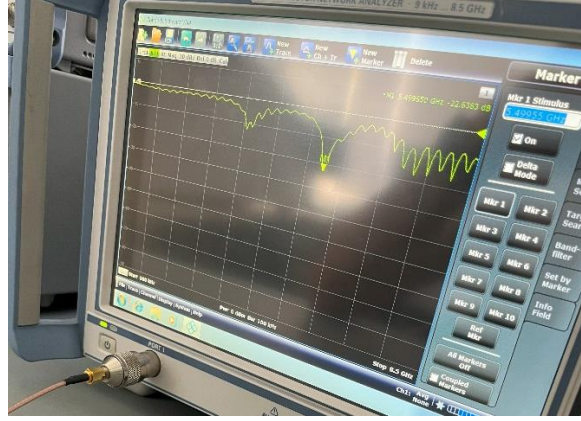
(b)



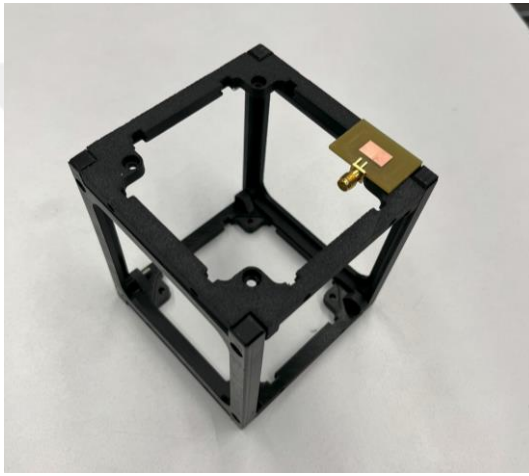
(c)

Şekil 4.36. (a) FR4-FR4 antenine ait yama, toprak düzlemi, besleme hattı görünümü, (b) FR4-FR4 antenin arka yüzey görseli (c) FR4-FR4 anteni ön yüzey görseli.

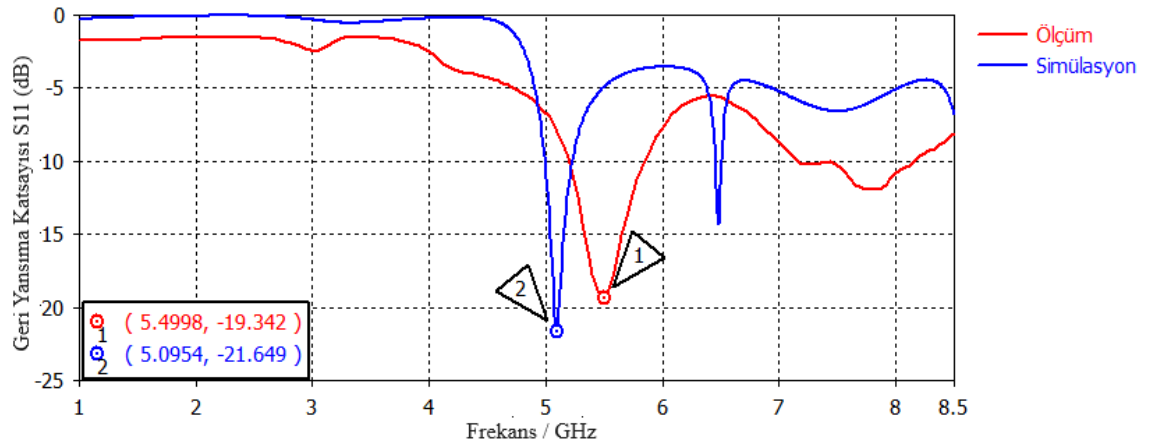
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.37. S11 parametresinin ölçümü



Şekil 4.38. 1U Küp Uydu üzerinde antenin konumu



Şekil 4.39. Anten ölçüm ve benzetim sonucu karşılaştırması

Minyatürleşmiş FR4-FR4 antenine ait geri dönüş kaybı grafiğinin benzetim ve ölçüm sonuçları Şekil 4.39’ da verilmiştir. Yapılan ölçüm neticesinde üretilen antenin

5,49 GHz frekansında -19,3 dB geri yansıma katsayı değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Benzetim ile ölçüm arasındaki 0,4 GHz frekans kayması mevcuttur. Frekans kaymasına sebepleri şu şekilde sıralanabilir. Yapı çift katmanlı bir yapıdadır ve benzetim programındaki tasarıma göre iki katman tamamen yapışık haldedir fakat üretim gerçekleştirilen antende ister istemez iki katman arasında boşluk oluşmaktadır. SMA konnektörün konumlandırılması, lehimlenmesi ve katmanları hizalamak oldukça uğraş ve iyi bir işçilik gerektirmektedir. Tam kapsamlı bir yankısız oda olmadığı için çevresel gürültüler anten parametrelerini etkilemektedir. Kullanılan alt tabaka malzemesi ve test ekipmanlarında üretimsel hatalar bulunabilir. Ölçüm grafiğinde ortamın gürültü etkisi kaldırılmıştır.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında küp uydu sistemlerine entegre edilebilir bir anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Küp uydular küçük boyutlarda olduğu için boş alanlar en etkili şekilde kullanılmalıdır. Bundan dolayı kullanılabilecek her türlü parçanın boyutunun küçük olması gerekmektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmalarla anten boyutlarını küçültebilmek amaçlanmıştır. Bunun için farklı minyatürleştirme teknikleri araştırılmış ve uygulanmıştır.

Yapılan tasarımlarla ilk olarak alt tabaka malzemenin anten boyutu üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaç için, farklı dielektrik sabitine sahip alt tabaka malzemeleri ile 8,0 GHz frekansında çalışan dört farklı ACMA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzemeler dielektrik sabitleri 2,2 ile RT 5880, 4,3 ile FR4, 6,4 ile RO4360 ve 10,2 ile RO3010'dur. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, yama alt tabakasının dielektrik sabitinin anten boyutuna doğrudan etki ettiği ve beklendiği üzere yüksek dielektrik sabitine sahip olan yama alt tabakası ile 8,0 GHz çalışma frekansında en küçük boyuta sahip anten başarılmıştır. Ayrıca yama ve besleme alt tabakaları arasında dielektrik sabiti farkının fazla olması (yama alt tabakası ne kadar düşük dielektrik sabitine sahip, besleme tabakası ise ne kadar yüksek dielektrik sabitine sahip olursa) antenin kazanç, verimlilik ve bant genişliği üzerinde olumlu etki gösterdiği görülmüştür (*bkz. Çizelge 4.5*).

Tez çalışmasının ikinci aşamasında 8,0 GHz çalışma frekansında tasarlanan antenler üzerinde değişiklik yapılarak anten çalışma frekansı daha düşük frekanslara (6,0 GHz altına) indirilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda daha düşük frekanslarda çalışan antenin dalga boyunun daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu noktada sıfırdan 6,0 GHz'in altı için geleneksel bir anten tasarımı düşünüldüğünde, anten boyunun daha büyük olduğu vurgulanmalıdır. Çalışma kapsamında ACMA'nın toprak düzlemine metayüzeyden esinlenen DGS eklenerek çalışma frekansı 6,0 GHz' in altına düşürülmesi başarılmıştır. Böylece 8,0 GHz çalışma frekansına sahip antenin dalga boyunda daha düşük frekanslardaki (daha yüksek dalga boyundaki) yapının anten olarak çalıştığı gözlemlenmiştir. Metayüzeyden esinlenen DGS, daha önce tasarlanan dört antenden en küçük boyuta sahip olan RO4360-RO3010 anteni ve tez kapsamında üretiminin yapılması

için piyasada kolay erişilebilir olan FR4 malzemesinin kullanıldığı FR4-FR4 anteni üzerine uygulanmıştır.

Metayüzeyden esinlenen DGS sayesinde RO4360-RO3010 anteninin çalışma frekansı 7,954 GHz' den 5,64 GHz'e düşmüştür bu da frekansa bağlı olarak yaklaşık %30,0 küçülme oranına denk gelmektedir. Minyatürleşmiş anten için bant genişliğinin yine 445 MHz değerinde olup değişmediği, verimliliğin %91,7' den %93,1' e çıktığı, gerçekleştirilmiş kazanç değerinin ise 5,32 dBi değerinden 3,17 dBi değerine (~%40) düştüğü gözlemlenmiştir (*bkz.* Çizelge 4.7).

FR4-FR4 anteni için uygulanan metayüzeyden esinlenen DGS anten çalışma frekansını 8,031 GHz' den 5,095 GHz'e düşürmüştür. Bu da frekansa bağlı olarak yaklaşık %36,0 oranında bir küçülme demektir. Bu çalışma kapsamında ayrıca FR4-FR4 nihai anteninin çalışma frekansında (5,12 GHz) çalışan bir ACMA anteni tasarlanarak minyatürleşmiş nihai FR4-FR4 anteni ile karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7' de gösterilmiştir. Geleneksel antenin alanı 1890 mm² iken minyatürleşmiş antenin alanı 622 mm²'dir. Bu da yaklaşık olarak %67 oranında küçülmeye denk gelmektedir. Kazanç bakımından geleneksel antenin değeri %30 daha iyi iken, bant genişliği minyatürleşmiş antende daha fazla olduğu görülmüştür (*bkz.* Çizelge 4.7).

Tez kapsamında yapılan anten ile literatürdeki metayüzey yapıları kullanılarak minyatürleştirme yapılan antenlerin karşılaştırmalı bir özeti Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Nihai FR4-FR4 anteninde minyatürleştirme oranı yaklaşık değerde elde edilirken verimlilik ve özellikle de bant genişliği bakımından üstün bir performans sergilemektedir. Kazanç değerindeki %30 düşüş ise literatürdeki antenlerle kıyaslanabilir düzeydedir ve minyatürleş antenin kazancı (4,88dBi) uygulamalar için yeterli düzeydedir.

Bu tez çalışmasında dikkat edilmesi gereken husus, literatürde yapılmış metayüzey (antenden bağımsız bir yapının eklenmesi ile oluşan etki) ile minyatürleşme çalışmalarından farklı olarak antenin toprak tabakasındaki kusurlu yapı sayesinde metayüzey özelliğinin antene kazandırılmasıdır. Bu sayede performansı yüksek antenlerin kompakt yapıda tasarımı başarılmıştır.

Çizelge 5. 1. Minyatürleştirilen antenin literatüre göre kıyaslaması

	Ramzan et al. 2015	Ramzan et al. (2015) Minyatür	L.Zhu et al. (2015)	L.Zhu et al. (2015) Minyatür	Geleneksel FR4-FR4	Nihai FR4-FR4
Alt tabaka boyutları	40 x	28x	35 x	20 x	40,7 x	20,6 x
en x boy x yükseklik	40 x 1,629	28x 1,629	35 x 1,629	20 x 1,629	46,45 x 1,955	30,2 x 1,955
Yama boyutu	15,95 x	8 x	25 x	12 x	11,9 x	7,10 x
L_pxW_p	15,95	8	19,2	10	17,62	11,45
Merkez frekansı	~5,15GHz	~5,15GHz	4,0 GHz	4,0 GHz	5,12 GHz	5,095 GHz
Kazanç	7,35 dBi	5,72 dBi	5,2 dBi	5,1 dBi	6,78 dBi	4,88 dBi
Verimlilik	%98,6	%78	%80	%84	%93	%96
Bant Genişliği	103 MHz	21,2 MHz	90 MHz	90 MHz	160 Mhz	236 Mhz
Minyatürleşme Oranı	%51		%67		%67	

Bu tez çalışmasında kusurlu toprak düzlemi birim hücre metayüzey tasarımından etkilenmiştir. Gelecek çalışmalarda toprak düzlemi üzerinde oluşturulan kusurlu yapı periyodik veya aperiodyik birim hücre dizisi olarak tasarlanabilir ve anten performansında daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Altundaş, 2016, Ultra Geniş Bant (UGB) Haberleşme Sistemleri İçin Mikroşerit Yama Anten Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 91, Kayseri.
- Anonim, 2022, Simulia CST Studio Suite Elektromanyetik Alan Simülasyon Yazılımı
- Anonymous, 2012. Tech. Rep. Measurement of dielectric material properties. measurement techniques, Version 5, Rohde & Schwarz Inc., Columbia, US, MD.
- Anonymous, 2024a. Web Sitesi: <https://gomspace.com/6u-standard.aspx>, Erişim Tarihi: 23.05.2024.
- Anonymous, 2024b. Web Sitesi: <https://tamara.com.tr/lpkf-protomat-s104>, Erişim Tarihi: 27.05.2024.
- Anonymous, 2024c. Web Sitesi: https://www.rohde-schwarz.com/in/products/test-and-measurement/network-analyzers/rs-znb-vector-network-analyzer_63493-11648.html, Erişim Tarihi: 27.05.2024.
- Arya, A. K., Kartikeyan, M. V. and Patnaik, A. 2010. On The Size Reduction Of Microstrip Antenna With DGS, 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 05-10 September, Rome, Italy.
- Balanis, A. C. 2016. Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons Ltd, Hoboken, New Jersey, No. 3, Canada.
- Bendahmane, Z., Ferouani, S. and Sayah, C. 2020. High permittivity substrate and dgs technique for dual-band star-shape slotted microstrip patch antenna miniaturization. Progress In Electromagnetics Research C, 102, 163–174.
- Best, S. R. 2002. On the resonant properties of the Koch fractal and other wire monopole antennas. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 1, 74–76.
- Chi, P. L., Waterhouse, R. and Itoh, T. 2011. Antenna miniaturization using slow wave enhancement factor from loaded transmission line models. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 59(1), 48–57.
- Chen, H. T., Taylor, A. J. and Yu, N. 2016. A review of metasurfaces: Physics and applications. Reports on Progress in Physics, Institute of Physics Publishing, 79, 7.
- Eleftheriades G. V. and Balmain K. G. 2005. Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principle and Applications. Wiley, 1436.
- Evans, B.G. 2014. The role of satellites in 5G. 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2756-2760.

- Fallahpour, M. and Zoughi, R. 2018. Antenna miniaturization techniques: a review of topology- and material-based methods. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 60(1), 38–50.
- Günay, M. 2012. Design of dual aperture coupled antenna and offset slot fed aperture coupled microstrip antenna. Master Thesis, Yeditepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 96, İstanbul.
- Hacı Mehmet, M. 2022. X bant mikroşerit halka yama anten tasarımı ve besleme türlerine göre performanslarının değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 215-221.
- Iqbal, K., Khan, Q. U. 2022. Review of metasurfaces through unit cell design and numerical extraction of parameters and their applications in antennas. *IEEE Access*, 10, 112368–112391.
- İşeri, K. 2012. Analysis of dual - polarized aperture - coupled microstrip antennas with H-shaped slots and equivalent circuit modeling of H shaped slots. Master Thesis, Middle East Technical University, 80, Ankara.
- Kalınay, G. 2021. 5G mobil haberleşme için çift bantlı ve düşük maliyetli mikroşerit yama anten tasarımı ve üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 53, Erzurum.
- Koçer, D. 2009, Daire ve dikdörtgen geometrik yapıları mikroşerit antenlerin simülasyonu ve rezonans frekanslarının yapay sinir ağları ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalı, 141, Konya.
- Kumar, P., Ali, T. and Pai, M. M. M. 2021. Electromagnetic metamaterials: A new paradigm of antenna design. *IEEE Access*, 9, 18722–18751.
- Moussa, F. Z., Ferouani, S. and Belhade, Y. 2022. New design of metamaterial miniature patch antenna with DGS for 5G mobile communications. *Microwave Review*, 28(2), 9–16.
- Munk, B. A. 2008. *Metamaterials: Critique and Alternatives*. Metamaterials: Critique and Alternatives. John Wiley and Sons Inc. pp. 1–189, New Jersey, Canada.
- Parmaksız, Y. 2024. Dairesel yarık halka rezonatör metamateryallerin anten kazancına etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 41, Antalya.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., Stewart, W. J. 1998. Low frequency plasmons in thin-wire structures. *Journal of Physics Condensed Matter*, 10(22), 4785–4809.
- Pozar, D. M. 1996. A review of aperture coupled microstrip antennas. History, operation, development, and applications. University of Massachusetts at Amherst, US.

- Pozar, D. M., Schaubert D. H. 1995. Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays. John Wiley & Sons, Inc., 448, Canada.
- Raghavendra, C., Neelaveni Ammal, M. and Madhav, B. T. P. 2023. Metamaterial inspired square gap defected ground structured wideband dielectric resonator antenna for microwave applications. *Heliyon*, 9(2), 1-15.
- Rahmat-Samii, Y., Manohar, V. and Kovitz, J. M. 2017. For satellites, think small, dream big: a review of recent antenna developments for cubesats. *IEEE Antennas and Propagation Magazine. IEEE Computer Society*. 59(2), 22-30.
- Ramahatla, K., Mosalaosi, M., Yahya, A. ve Basutli, B. 2022. Multiband reconfigurable antennas for 5G wireless and cubesat applications: a review. *IEEE Access*, 10, 40910–40931.
- Ramzan, M. and Topalli, K. 2015. A miniaturized patch antenna by using a csrr loading plane. *International Journal of Antennas and Propagation*, 1, 1-9 .
- Rawls, A. M. 2014. Cubesat general subsystem performance specication. Master Thesis, The Faculty of the Department of Aerospace Engineering, San Jose State University San Jose State Univ., 52, San Jose, CA, USA.
- Ripin, N., Saidy, W. M. A. W., Sulaiman, A. A., Rashid, N. E. A. and Hussin, M. F. 2013. Miniaturization of microstrip patch antenna through metamaterial approach, *IEEE Student Conference on Research and Development*, 16-17 december, IEEE 365–369. Putrajaya, Malaysia.
- Sainati, R. A. 1996. CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications. Artech House Antenna Library, Inc., 255, US.
- Sandau, R. 2010. Status And Trends of Small Satellite Missions For Earth Observation. *Acta Astronautica, Elsevier*, 66, 1-12.
- Sydoruk, O., Tatartschuk, E., Shamonina, E., and Solymar, L. 2009. Analytical formulation for the resonant frequency of split rings. *Journal of Applied Physics*, 105(1), 1-13.
- Szabó, Z., Park, G. H., Hedge, R., and Li, E. P. 2010. A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58(10), 2646–2653.
- Toktas, A., Akdagli, A. 2015. Designs of multiple input multiple output antennas for GSM, LTE, WIMAX and WLAN standards. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1, 61-82.
- Tubbal, F. E. M., Raad, R. and Chin, K. W. 2015. A survey and study of planar antennas for pico-satellites. *IEEE Access*, 3, 2590 – 2612.
- Wang, F., Bin, F., Sun, Q., Fan, J. and Ye, H. 2017. A compact UHF antenna based on complementary fractal technique. *IEEE Access*, 5, 21118–21125.

- Werner, D. H., Ganguly, S. 2003. An overview of fractal antenna engineering research. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 45(1), 38–57.
- Yadav, M. P., Singh, R. K. and Ray, K. P. 2022. a comparative investigation on effect of coupling in aperture coupled microstrip antennas. Progress In Electromagnetics Research, 124, 69–79.
- Zhu, H. L., Cheung, S. W. and Yuk, T. I. 2015. Miniaturization of patch antenna using metasurface. Microwave and Optical Technology Letters, 57(9), 2050–2056.

