



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**KU BANT MİKROŞERİT YAMA
ANTEN TASARIMI VE ANTEN
ÜZERİNDE OLUŞTURULAN
ÇEŞİTLİ YARIKLARIN ANTEN
IŞIMASINA ETKİSİNİN ANALİZİ**

Nurettin BEBEK

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK 2021



İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ



**KU BANT MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI VE ANTEN
ÜZERİNDE OLUŞTURULAN ÇEŞİTLİ YARIKLARIN ANTEN İŞİMASINA
ETKİSİNİN ANALİZİ**

Nurettin BEBEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2021

Nurettin BEBEK tarafından hazırlanan “KU BANT MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI VE ANTEN ÜZERİNDE OLUŞTURULAN ÇEŞİTLİ YARIKLARIN ANTEN İŞİMASINA ETKİSİNİN ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Başkan: Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Mehmet Ali BELEN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Erdem ASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 21/01/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nurettin BEBEK

21/01/2021

KU BANT MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI VE ANTEN ÜZERİNDE
OLUŞTURULAN ÇEŞİTLİ YARIKLARIN ANTEN IŞIMASINA ETKİSİNİN ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Nurettin BEBEK

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

ÖZET

Bu çalışma kapsamında Ku bant uydu haberleşme teknolojilerinde kullanılabilecek yarıklı mikroşerit yama anten tasarımı hedeflenmiştir. Frekans spektrumunda Ku bant frekans aralığı 12-18 GHz'dir. Bölgesel haberleşme için uygun olduğundan Ku bant frekans aralığı uydu haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır. Uydu haberleşme teknolojileri çok hızlı gelişmeler göstermektedir. Bu gelişmeler ışığında sürekli artan ihtiyaçların karşılanması için uydu haberleşmesinde kullanılacak donanımların da modernize edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu donanımların boyutları küçülmekte, çoklu hizmetleri eş güdümlerle sağlamakla birlikte yüksek hızlarda veri indirebilme ve yükleme özellikleri için daha geniş bant genişlikleri gerekmektedir.

Gereksinimlerin karşılanması için burada kullanılan tasarım Ku bant yarıklı mikroşerit yama antenlerdir. Mikroşerit yama antenler; küçük boyutlardaki düzlemsel yapısı, çok hafif olması, montajlamadaki kolaylığı, ışımaya yapan yama üzerinde yapılabilecek modifikasyonlarla çeşitli özellikler kazanabilmesi, baskı devre teknikleri ile kolaylıkla üretilebilmesi yönünden uzay endüstrisi, kablosuz haberleşme, askeri sistemler, GPS uygulamaları gibi birçok alanda tercih edilmektedir. Mikroşerit yama antenler için ışımaya verimliliğinin düşük olması, kalite faktörünün yüksekliği, beslemeden kaynaklı sahte ışımalar, dar bant genişlikleri ise dezavantajları arasında yer almaktadır. Birtakım metodlar kullanılarak istenmeyen bu dezavantajlar minimize edilebilmektedir.

Ele alınan çalışmada mikroşerit beslemeli Ku bant yarıklı mikroşerit yama antenler üzerinde durulmuştur. Öncelikle transmisyon (iletim) hattı modeli yöntemindeki hesaplamalar kullanılarak 12 GHz rezonans merkez frekansına sahip referans Ku bant mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Standart 1,524 mm kalınlığındaki Rogers RT/duroid 6002 dielektrik malzeme kullanılarak 12 GHz rezonans merkez frekansına sahip referans Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları hesaplanmıştır. Sonraki bölümlerde, referans Ku bant mikroşerit yama antenin ölçüleri değiştirilmeden ışımaya yapacak yama üzerinde oluşturulan çeşitli şekil ve boyutlardaki yarıkların anten ışımaya etkisi incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Antenlerin tasarım, optimize ve simülasyonu Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) programı ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Ku bant, mikroşerit yama anten, yarıklı yama
Sayfa Adedi : 71
Danışman : Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

DESIGN OF KU BAND MICROSTRIP PATCH ANTENNA AND ANALYSIS OF
EFFECT OF VARIOUS SLOTS FORMED ON THE ANTENNA TO ANTENNA
RADIATION
(M. Sc. Thesis)

Nurettin BEBEK

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

January 2021

ABSTRACT

The aim is to design a slotted microstrip patch antenna that can be used in Ku band satellite communication technologies. In the frequency spectrum, the Ku band frequency range is 12-18 GHz. Ku band frequency range is used in satellite communication systems since it has regional communication. Satellite communication technologies develop so rapidly. In light of these developments, it is necessary to modernize the equipment to be used in satellite communication in order to meet the ever increasing needs. These hardware are smaller in size, providing multiple services at the same time, but larger bandwidths are required for downloading and uploading data at high speeds.

Ku band slotted microstrip patch antenna designs can be used to meet the requirements. Microstrip patch antennas are preferred in many fields such as aerospace industry, wireless communication, military systems, GPS applications through of their small size planar structure, being very light, ease of mounting, gaining various features with modifications that can be made on the radiating patch, and being easily produced by printed circuit techniques. The disadvantages of microstrip patch antennas are the low radiation efficiency, the high quality factor, the fake radiation from the feed zone and the narrow bandwidths. By using a number of methods, these undesirable disadvantages can be minimized.

In this study, Ku band slotted microstrip patch antennas with microstrip feeding were emphasized. Firstly, reference Ku band microstrip patch antenna had been designed at 12 GHz resonance center frequency by using transmission line method calculations. The dimensions of the reference Ku band microstrip patch antenna at 12 GHz resonance center frequency were calculated using by Rogers RT/duroid 6002 dielectric material with the standard thickness of 1,524 mm. The effect of the slits and slot of various shapes and sizes on the radiated patch which was designed without changing the dimensions of the reference Ku band microstrip patch antenna was examined and evaluated. The antennas were designed, optimized and simulated via Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS).

Key Words : Ku band, microstrip patch antenna, slotted patch

Page Number : 71

Supervisor : Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleőme safhalarında yönlendirmeleriyle yol gösteren kıymetli bilgilerini benimle paylaşan değerli danışman hocam Prof. Dr. Yakup HAMEŞ'e; malzeme temini, anten üretimi ve ölçümü konusunda imkanlarını benden esirgemeyen saygı değer hocalarım Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN, Doç. Dr. Merih PALANDÖKEN, Arő. Gör. Dr. Alper ÇALIŐKAN, Arő. Gör. Dr. Olcay ALTINTAŐ ve Arő. Gör. Cem GÖÇEN'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bunun yanında manevi destekleri ile bana güç veren kendilerini yanımda hissettiğim Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümündeki lisansüstü çalışma arkadaşlarıma, tüm zorlukları benimle göğsleyen hayatımın her döneminde bana destek olan aileme ve özellikle sevgili annem Zeynep BEBEK'e gönülden teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. MİKROŞERİT YAMA ANTENLER	3
2.1. Mikroşerit Yama Antenlerin Temel Özellikleri	3
2.2. Mikroşerit Yama Antenleri Besleme Yöntemleri.....	5
2.2.1. Mikroşerit besleme.....	5
2.2.2. Koaksiyel prob besleme.....	6
2.2.3. Elektromanyetik kuplaj besleme	6
2.3. Bant Genişliği Artırımı ve Çoklu Frekans Operasyonu	7
2.3.1. Q faktörünün düşürülmesi	7
2.3.2. Empedans eşleştirme ağı	8
2.3.3. Çoklu rezonanslar	8
2.4. Mikroşerit Yama Antenleri Analiz Teknikleri	9
2.4.1. Transmisyon hat modeli	9
2.4.2. Kavite modeli	16
2.4.3. Tam dalga modeli	17
3. ANTEN PARAMETRELERİ	18
3.1. Işıma Örüntüsü	18

	Sayfa
3.2. Yönlülük.....	18
3.3. Verimlilik.....	19
3.4. Kazanç.....	19
3.5. Ön-Arka Oranı.....	19
3.6. Geri Dönüş Kaybı.....	19
3.7. Kutuplanma (Polarizasyon).....	20
3.8. Hüzme Genişliği.....	21
3.9. Kalite Faktörü, Verimlilik ve Bant Genişliği.....	21
4. MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI.....	24
4.1. Dikdörtgensel Mikroşerit Yama Anten Tasarımı.....	24
4.1.1. Mikroşerit yama anten tasarımı temel değişkenleri.....	24
4.2. Referans Ku Bant Mikroşerit Yama Anten Tasarımı.....	25
4.3. U-Yarıklı Ku Bant Mikroşerit Yama Anten Tasarımı.....	34
4.4. U-Yarık Yeri Değiştirilmiş Ku Bant Mikroşerit Yama Anten Tasarımı.....	41
4.5. U-Yarık Yeri Değiştirilmiş Ku Bant Mikroşerit Yama Antenin Dikey Yarıklı Tasarımı.....	49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	64
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları.....	27
Çizelge 4.2. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları	35
Çizelge 4.3. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları	42
Çizelge 4.4. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin ve bu anten üzerinde oluşturulan dikey yarıkların boyutları	50
Çizelge 5.1. Tasarlanan anten modellerinin performans değerleri	66



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Mikroşerit yama anten temel modeli	3
Şekil 2.2. Mikroşerit besleme	5
Şekil 2.3. Dikdörtgensel mikroşerit yama antende saçaklama	10
Şekil 2.4. Dikdörtgensel mikroşerit yama antenin yandan görünümü.....	10
Şekil 2.5. Dikdörtgensel mikroşerit yama ve onun transmision hat eğiti devresi	13
Şekil 2.6. Empedans uyumlaştırma yarıkları y_0	15
Şekil 3.1. Işıma örüntüsü ile anten yönlülüğünün gösterimi	18
Şekil 3.2. Işıma örüntüsü ile anten yarım-güç hüzmeye genişliğinin gösterimi.....	21
Şekil 4.1. Referans Ku bant mikroşerit yama anten.....	27
Şekil 4.2. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin geri dönüş kaybı.....	28
Şekil 4.3. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin VSWR grafiği	29
Şekil 4.4. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin giriş empedansı	30
Şekil 4.5. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de yüzey akımı	30
Şekil 4.6. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de yönlülük 3-boyutlu ışıma örüntüsü.....	31
Şekil 4.7. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de kazanç 3-boyutlu ışıma örüntüsü.....	31
Şekil 4.8. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de yönlülük 2-boyutlu görünümü.....	32
Şekil 4.9. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de kazanç 2-boyutlu görünümü.....	32
Şekil 4.10. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü	33
Şekil 4.11. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü	33
Şekil 4.12. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama anten	34
Şekil 4.13. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin geri dönüş kaybı	35

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin VSWR grafiği.....	36
Şekil 4.15. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin giriş empedansı.....	37
Şekil 4.16. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de yüzey akımı	38
Şekil 4.17. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de yönlülük 3-boyutlu ışınma örüntüsü.....	38
Şekil 4.18. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü.....	39
Şekil 4.19. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de yönlülük 2-boyutlu görünümü.....	39
Şekil 4.20. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de kazanç 2-boyutlu görünümü.....	40
Şekil 4.21. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü	40
Şekil 4.22. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü.....	41
Şekil 4.23. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama anten	42
Şekil 4.24. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin geri dönüş kaybı	43
Şekil 4.25. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin VSWR grafiği	44
Şekil 4.26. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin giriş empedansı.....	45
Şekil 4.27. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz'de yüzey akımı	46
Şekil 4.28. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz'de yönlülük 3-boyutlu ışınma örüntüsü	46
Şekil 4.29. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz'de kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü.....	47
Şekil 4.30. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz'de yönlülük 2-boyutlu görünümü.....	47
Şekil 4.31. U-yarıklı yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz'de kazanç 2-boyutlu görünümü.....	48

Şekil	Sayfa
Şekil 4.32. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü	48
Şekil 4.33. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü.....	49
Şekil 4.34. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antende dikey yarıklar.....	50
Şekil 4.35. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açıldıktan sonra geri dönüş kaybı.....	51
Şekil 4.36. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açıldıktan sonra VSWR grafiği	52
Şekil 4.37. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açıldıktan sonra giriş empedansı	53
Şekil 4.38. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de yüzey akımı.....	54
Şekil 4.39. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de yönlülük 3-boyutlu ışına örüntüsü.....	54
Şekil 4.40. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de kazanç 3-boyutlu ışına örüntüsü.....	55
Şekil 4.41. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de yönlülük 2-boyutlu görünümü	55
Şekil 4.42. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de kazanç 2-boyutlu görünümü	56
Şekil 4.43. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü	56
Şekil 4.44. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü.....	57
Şekil 4.45. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de yüzey akımı.....	57
Şekil 4.46. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de yönlülük 3-boyutlu ışına örüntüsü.....	58
Şekil 4.47. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de kazanç 3-boyutlu ışına örüntüsü	58
Şekil 4.48. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de yönlülük 2-boyutlu ışına görünümü.....	59

Şekil	Sayfa
Şekil 4.49. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz'de kazanç 2-boyutlu ışınma görünümü	59
Şekil 4.50. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz'de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü	60
Şekil 4.51. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz'de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü	60
Şekil 4.52. Üretilen antenin ölçüm ortamındaki görünümü.....	61
Şekil 4.53. Üretilen antenin ölçülen geri dönüş kaybı.....	61
Şekil 4.54. Üretilen antenin 12,97 GHz'de kazanç ışınma örüntüsü.....	62
Şekil 4.55. Üretilen antenin 14,97 GHz'de kazanç ışınma örüntüsü.....	63
Şekil 4.56. Üretilen antenin 14,51 GHz'de kazanç ışınma örüntüsü.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
B_1	İlk yarıktaki suseptans (iletkenlik değerinin sanal kısmı)
E_1	İlk yarıktaki elektrik alan
e_{cd}	Antenin ışınım verimi
f_r, f_o	Rezonans ve operasyon frekansı
f_{rc}	Saçaklama etkisi ile rezonans frekansı
G_1	Giriş iletkenliği
G_{12}	Çıkış-giriş transfer iletkenliği
G_t	Toplam iletkenlik
H_2	İkinci yarıktaki manyetik alan
h	Dielektrik malzemenin kalınlığı
J_0	Birinci tip sıfırıncı dereceden Bessel fonksiyonu
k_0	Boş uzay propagasyon sayısı
L	Dikdörtgenel yamanın uzunluğu
L_{eff}	Dikdörtgenel yamanın etkin uzunluğu
Q_c	İletkenlik kalite faktörü
Q_{rad}	İşınım kalite faktörü
Q_t	Toplam kalite faktörü
P_{rad}	İşınım gücü
q	Saçaklama faktörü
R_{in}	Giriş direnci
S_{11}	Geri dönüş kaybı
t	Yama ve toprak düzlem kalınlığı
$VSWR$	Voltaj duran dalga oranı
V_0	İki yarık arası gerilim
W	Dikdörtgenel yamanın genişliği
W_0, W_f	Mikroşerit iletim hattı genişliği

Simgeler	Açıklamalar
W_1, W_2	Empedans uyumlaştırma yarık genişliği
y_0	Referans anten empedans uyumlaştırma yarık uzunluğu
y_1	Tasarımlardaki empedans uyumlaştırma yarık uzunluğu
Y_{in}	Giriş admitansı
Z_c	İletim hattı karakteristik empedansı
Z_{in}	Giriş empedansı
ϵ_0	Boş uzay dielektrik katsayısı
ϵ_r	Dielektrik malzeme katsayısı
ϵ_{eff}	Etkin dielektrik katsayısı
μ_0	Boş uzay manyetik geçirgenlik katsayısı
v_0	Boş uzay ışık hızı
λ_0	Boş uzay dalga boyu
φ	Küresel koordinat sistemi boylam açısı
θ	Küresel koordinat sistemi enlem açısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
BW	Band Width
CST MWS	Computer Simulation Technology Microwave Studio
DB	Decibel
DBI	Decibel Isotropic
FEM	Finite Element Method
GHZ	Gigahertz
GPS	Global Positioning System
HPBW	Half Power Beam Width
ITU	International Telecommunication Union
MHZ	Megahertz
MM	Milimeter
MOM	Method of Moments
TLM	Transmission Line Method
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

1. GİRİŞ

Bu bölümde haberleşme ve mikroşerit yama antenlerin tarihsel gelişim süreci hakkında bilgi verilmiştir.

Modern toplumun önemli bir özelliği, insanların bir anda duygularını ifade edebilme, bilgi aktarabilme veya dünyanın farklı bölgelerindeki insanlara ulaşabilmeleridir. Bugün uzaktaki insanlara kısa sürede ulaşmak istediğimizde, teknolojiden yardım almamız gerekir. Tarih boyunca, insanlar bu duruma birçok farklı yoldan çözüm aramıştır. Örneğin, uzun mesafeleri kapsayan güvercinler, koşucular veya atlılarla mesajlar gönderilmiştir. Daha da hızlı olan davul, boynuz, ıslık kullanımı ya da Amerika yerlileri tarafından kullanılan duman sinyalleri en bilinen örnekleridir. Bu ilk yöntemler geniş kitlelere ulaşamamıştır. Ayrıca daha fazla bilgi gönderimi için daha çok zaman gereksinimi oluşmuştur. Bu durum insanların iletişim için elektrik sinyallerini kullanmasıyla değişmiştir [1].

Elektrik sinyalleri ilk kez 1837'de telgraf haberleşmesinde kullanılmış ve 1840'ların başından beri ise Mors kodu uluslararası iletişim standardı olmuştur. 1876'dan sonra, Bell telefonu geliştirdiğinde, ses analog sinyallerle iletilebilmiştir. Hem telgraf hem de telefon haberleşmesinde sinyalleri aktarmak için kablolar kullanılmıştır. Büyük şehirlerde çok fazla miktarda asılı kabloların varlığı, kablo miktarını azaltmayı gerektirmiş ve insanları iletişim kurmak için bir tür kablosuz haberleşme yolu bulmaya yöneltmiştir. 1865 yılında Maxwell, elektrik ve manyetik alanların ışık hızıyla uzayda yayılan elektromanyetik dalgalar olduğunu ve hızlandırılmış elektrik yüklerinin elektromanyetik dalgalar göndereceğini gösteren teorisini yayımlamıştır. 1888'de Hertz, vericiden gönderilen kıvılcımları, belirli bir mesafe uzağa yerleştirilmiş bir bakır halkanın uçlarında yeniden elde eden bir dipol alıcısı yaparak Maxwell'in teorisini ispatlamıştır. 1897'de Marconi, başkaları tarafından geliştirilen fikir ve cihazlara dayanan ve Hertz'in çalışmalarında Mors mesajı göndermek için yaptığı kıvılcımları kullanan telgraf vericisinin patentini almıştır. Daha sonra Fessenden, radyo dalgaları oluşturmak için kıvılcımın gerekli olmadığını fark etmiş, bunun yerine yüksek frekanslı sürekli dalga kullanmıştır. Bu sadece Mors kodu değil, ses ve müzik göndermek için de kullanılabilen ve frekans spektrumunda kıvılcım kullanan vericilere göre çok daha az dağılıma sahip bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. 1906'da triyot vakum tüpünün icadı ile genlik modülasyonu mümkün hale gelmiş ve 1933'te Armstrong, frekans modülasyonunun

faydalarını göstermiştir. Bu buluşlar iletişim teknolojisinin ve modern toplumun temelini oluşturmuştur [2].

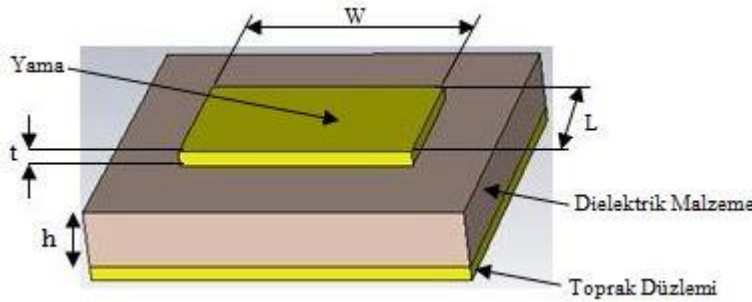
Mikroşerit anten kavramı, 1953 yılında Deschamps tarafından mikroşerit iletim hattının tanıtılmasından sonra gündeme gelmiştir. 1955'te Gutton ve Baissinot ilk mikroşerit anteninin patentini almıştır. Birkaç yıl sonra, 1969'da Denlinger, dikdörtgen ve dairesel mikroşerit rezonatörlerin (yamaların) verimli radyatörler olarak nasıl çalışabileceğini göstermiştir. Füzelerin ve uzay taşıtlarının yüzeylerine montajı yapılabilecek düzlemsel ince ve uyumlu anten ihtiyacı, mikroşerit antenlerin gelişimini gerektirmiştir ve ilk mikroşerit yama antenler 1970'lerin başında Howel ve Munson tarafından geliştirilmiştir. İlk ve basit mikroşerit yama antenler dar bant genişliğine ve düşük verimliliğe sahiptir. Araştırmacılar yıllarca çalışmalar yaparak bu dezavantajların üstesinden gelmek, mikroşerit yama antenlerin işlevlerini artırmak için farklı yöntemler geliştirmişlerdir [3, 4].

2. MİKROŞERİT YAMA ANTENLER

Bu bölümde mikroşerit yama antenlerin karakteristik özellikleri, değişkenleri, besleme metotları ve analiz teknikleri ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

2.1. Mikroşerit Yama Antenlerin Temel Özellikleri

Bir mikroşerit yama anten; en basit ifadesiyle iletken iki paralel levhanın, çok kalın olmayan bir dielektrik malzeme ile birbirinden ayrılması sonucu meydana gelir. Üst yüzeyi (yama yüzeyi) ışıma amaçlı iletken malzeme iken alt yüzeyi ise topraklama amaçlı iletken malzemeden oluşur. Değişik iletkenlik karakteristiğe sahip malzemelerden oluşturulmuş farklı yama şekilleriyle çeşitli özelliklerde ışıma yapan mikroşerit yama antenler tasarlanabilir. Yamamın şekli dikdörtgen, dairesel, eliptik, üçgen veya diğer varyasyonları olabilir [5, 6]. Şekil 2.1’de dikdörtgensel mikroşerit yama anten temel modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Mikroşerit yama anten temel modeli

Dikdörtgensel mikroşerit yama antenlerde t kalınlığındaki bir yamada $t \ll \lambda_0$ (boş uzay dalga boyu), h dielektrik malzeme kalınlığı olmak üzere, genellikle $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$; ϵ_r (dielektrik sabiti) değeri için $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$, L uzunluğundaki dikdörtgen yama için ise $0,333\lambda_0 \leq L \leq 0,5\lambda_0$ değerleri vardır. Maksimum ışıma genellikle yamanın normaline doğrultusunda gerçekleşir. Mikroşerit yama antenler, yamanın kenarlarından toprak düzleme doğru teğetsel elektrik alanlar ile ışırlar. İyi bir ışıma, düşük dielektrik sabitli kalın bir dielektrik malzeme ile sağlanır. Bu özelliklerde çalışma frekansını sağlamak için antenin boyutları değiştirilebilir. Anten boyutlarını küçültmek için dielektrik sabiti yüksek malzeme tercih edilebilir. Bu durumda ise daha dar bant genişliği ve daha düşük verim elde edilir. Anten tasarımında dikkat edilmesi gereken nokta antenin boyutu ile antenin performansı

arasında optimizasyonu sağlayabilmektir [4]. Mikroşerit yama antenler, boyutlarının artmaması için genellikle 1-100 GHz aralıklarında tasarlanır [7].

Işıma yapan yamada şekil seçimi; bant genişliği, polarizasyon, yan loblar (kulakçıklar) ve kazanç gibi farklı faktörlere bağlıdır. Şekil ne kadar karmaşık olursa, antenin karakteristiklerini analiz etmek o kadar zor olur. İstenen rezonans frekansına yaklaşıldığında yama yüzey akımları genliği daha büyür. Bu da iletken boyutu dalga boyunun yaklaşık yarısı olduğunda ortaya çıkmaktadır. Anten böylece bu dalga boyu frekansında rezonansa gelerek ışımaya yarar. Elektrik alan yamanın sonunda devam edeceğinden yamanın açık uçlarında saçaklanmaya yol açar bu da yamanın boyutunun olduğundan daha büyük davranmasına neden olur [8]. Mikroşerit yama antenler, özel yama şekli seçildiğinde, rezonans frekansı, polarizasyon, ışımaya örüntüsü (paterni) ve empedans özellikleri bakımından çok yönlüdür. Ek olarak, yama ile yer düzlemi arasına pim ve varaktör diyotları gibi yükler eklenerek değişken rezonans frekansı, empedans, polarizasyon ve ışımaya örüntüsüne sahip uyumlu antenler tasarlanabilir [9-12].

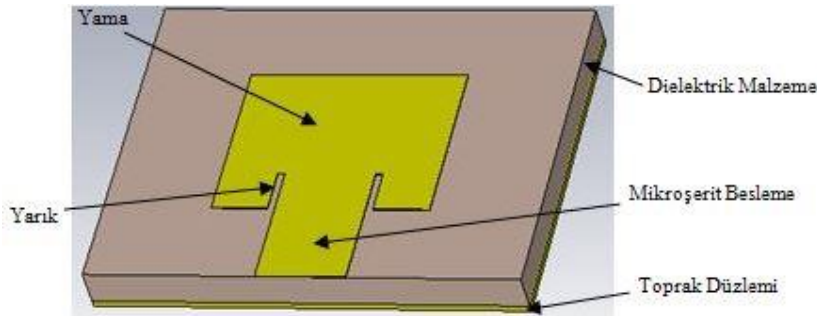
Uçak, uzay aracı, radar, füze ve uydu uygulamaları gibi radyo haberleşmesinin kullanıldığı ticari ya da kamusal uygulamalarda küçük boyutlu antenlere duyulan ihtiyaçlar, mikroşerit yama antenler için oldukça geniş bir çalışma alanı sağlamış, bu antenlerin kullanılabilirliğini göstererek mikroşerit antenler üzerine yapılacak araştırmaları teşvik etmiştir [13-21]. Bu tip antenler; küçük boyutlu, hafif, ucuz, kolay imalat, sağlam yapısı, kompaktlık, yapıdaki uyumluluk, düzlemsel olması gibi çeşitli önemli özelliklere sahiptir. Buna karşın, mikroşerit antenler omik kayıp, beslemeden kaynaklanan sahte ışımaya, sınırlı güç kapasitesi ve dar bant genişliği gibi bazı olumsuz özelliklere de sahiptir. Bazı özel uygulamalarda; örneğin güvenlik sistemlerinde, askeri sistemlerde, dar bant çalışmalar da gerekmektedir [22-28]. Mikroşerit yama antenler yüksek kalite faktörüne (Q) sahiptir. Q değeri anten kayıplarını ifade eder. Yüksek Q değeri; dar bant genişliği, düşük kazanç ve düşük verimlilik gibi istenmeyen sonuçlara neden olur. Verimliliği ve bant genişliğini artırabilmek için dielektrik malzemenin kalınlığı artırılabilir. Ama dielektrik malzeme kalınlığının fazla artırılması, istenmeyen yüzey dalgaları oluşturur ve bu da ışımaya gücünün azalmasına neden olur. Yüzey dalgaları, dielektrik malzeme üzerinde; köşe noktaları, topraklama noktası ve kıvrım olan bölgeler gibi süresizlik içeren noktalardan saçılarak, antenin özelliklerini bozmaktadır [29-33]. Yarık, oyuklu yapılar kullanarak geniş bant özelliği korunabilir ve yüzey dalgaları önlenir [34, 35].

2.2. Mikroşerit Yama Antenleri Besleme Yöntemleri

Mikroşerit yama antenler farklı tekniklerle beslenebilir. Sinyalin antene efektif aktarımı için besleme tekniği önemlidir. Bu teknikler temaslı ve temassız olarak iki grupta incelenebilir. Temaslı teknikte; kaynaktan gelen güç, yamaya doğrudan temas eden bir yapıyla iletilirken temassız teknikte güç iletimi; yama ile mikroşerit hat arasında elektromanyetik kuplajla sağlanır. Bir yama anteni beslemek için mikroşerit besleme, koaksiyel prob besleme ve elektromanyetik kuplaj besleme olarak üç yaygın teknik vardır [36]. Tasarımda mikroşerit besleme kullanılmıştır. Simülasyonlarda besleme kaynağı için oluşturulan dalga kılavuzu portu, mikroşerit besleme ucuna yerleştirilmiştir. Dalga kılavuzu portu boyutları için CST MWS uygulamasındaki Macros > Solver > Ports > Calculate port extension coefficient penceresindeki hesaplamalardan yararlanılmıştır.

2.2.1. Mikroşerit besleme

Mikroşerit besleme, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi antenin doğrudan kendisine bağlı bir mikroşerit hatla beslendiği anlamına gelir. Basit bir besleme yöntemidir ve kolayca imal edilebilir.



Şekil 2.2. Mikroşerit besleme

Yöntemin faydası hem besleme ağının hem de yamanın aynı düzlemde olmasıdır. Mikroşerit beslemesinin dezavantajı, empedans eşleşmesindeki zorluklardır, çünkü yamanın kenarındaki giriş direnci nispeten yüksektir. Daha iyi empedans eşleşmesi için iki farklı teknik yaygın olarak kullanılmaktadır.

Birincisi, besleme hattı ile yama arasında bir çeyrek dalga transformatörü kullanmak, diğeri ise yamanın beslendiği hattın iki yanına iç yarıklar yapmaktır. Ancak, sahte ve istenmeyen radyasyonlar genellikle bu yöntemin performansını biraz düşürmektedir.

2.2.2. Koaksiyel prob besleme

Koaksiyel prob beslemesi, yamanın aşağıdan, toprak düzlemi ve alt tabakaya bağlı olan bir koaksiyel probdan besleme tekniğidir. Giriş empedansı, yamanın üzerindeki yerin konumuna bağlıdır. Bu yöntemde koaksiyel probun iç iletkeni ışımaya yapan yamaya bağlıyken dış iletkeni ise antenin toprak düzlemine bağlanır böylece besleme hattı ve yama, toprak düzleminden ayrılır ve bu sayede birbirlerinden korunurlar. Daha büyük bant genişliği ve daha az sahte radyasyon için bu beslemeyi tasarlamının çeşitli yolları vardır. Uygulamalarda koaksiyel beslemeli yapı, çok sayıda lehim noktası ve koaksiyel hatlar gerektirdiğinden dolayı dizi antenler için çok uygun değildir. Probu besleme yöntemi ayrıca sahte radyasyon ve yüzey dalgalarını da artırabilir [36].

Yama antenlerde daha fazla bant genişliği elde etmek için kalın dielektrik malzemeler (substratlar) kullanılabilir. Fakat kalın alt tabakaya sahip antenlerde koaksiyel prob besleme tekniği, giriş indüktansını artırır ve bu istenmeyen bir durumdur.

2.2.3. Elektromanyetik kuplaj besleme

Bir mikroşerit yama anteni, temas etmeyen besleme teknikleri kullanarak da beslemek mümkündür. Gömülü mikroşerit iletim besleme hattını barındıran iki katmanlı bir alt tabakaya (dielektrik malzemeye) sahip yakınlık (proximity) beslemesi temassız besleme tekniklerindedir. Yama, mikroşerit hattın üzerine yerleştirilmiş bir alt tabakanın üzerindedir. Yakınlık kuplajı yamanın, daha kalın bir dielektrik malzemenin üzerine yerleştirilmesini sağlar ve bu da bant genişliğini artırır. Ayrıca besleme hattı daha ince bir alt tabakaya sahiptir. Bu durum sahte ışımayı azaltır. İmalatı, tek dielektrik tabakalı koaksiyel veya mikroşerit iletim hattı beslemesine göre zordur. Çünkü iki alt dielektrik malzemenin birleştirilmesi gerekmektedir [37]. Açıklık beslemede ise açıklığa sahip toprak düzlemi ile ayrılmış iki farklı dielektrik malzeme tipi kullanılır. Alttaki dielektrik malzemenin alt kısmından, iki dielektrik malzeme arasındaki toprak düzleminde bulunan bir açıklık boyunca beslenen bir kuplaj besleme hattı vardır.

2.3. Bant Genişliği Artırımı ve Çoklu Frekans Operasyonu

Antenin bant genişliği, antenin etkili bir şekilde iletişimde olduğu frekans bandının bir parçasıdır. Bant genişliği, antenin bir giriş yansıma katsayısına sahip olduğu frekans aralığının (S parametresi S_{11}) -10 dB'den az olduğu, voltaj duran dalga oranının (VSWR) mikroşerit yama antenlerde genellikle 2'den daha düşük olduğu bölgedir.

Eğer bant genişliği dar ise iletilen frekansta çeşitli sebeplerle de küçük değişiklikler (frekans kaymaları) meydana gelmişse sinyal, alıcı anten tarafından alınamayabilir. Örneğin, sıcaklıktaki değişikliklerle antende kullanılan malzemelerin özellikleri değişebilir. Bu durum merkez frekansının kaymasına neden olabilir ve eğer anten dar bir bant genişliğine sahipse, merkez frekansının kayması sorun teşkil edebilir [37].

Temel mikroşerit yama antenler dar bant genişliğine sahiptir, bu nedenle bant genişliğini artırmaya yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Yöntemler üç farklı yaklaşıma ayrılabilir; Q (kalite faktörü) düşürülmesi, empedans eşleştirme ağı ve çoklu rezonanslar.

2.3.1. Q faktörünün düşürülmesi

Temel mikroşerit yama antenler, düşük bant genişliğine ve yüksek Q değerine sahiptir. Bant genişliği ile Q değeri ters orantılıdır. Yani Q seviyesinin düşürülmesi bant genişliğini artırır. Q, antendeki kayıpları temsil eder. Yamanın şekli Q'yu etkileyebilir, çok fazla olmasa da ve yama şekli ışınım performansı için önemli olduğundan, yama şeklini değiştirmek her zaman Q değerini düşürmenin pratik bir yolu değildir [36].

Q'yu düşürmenin başka bir yolu, düşük bağıl geçirgenliği olan daha kalın bir dielektrik malzeme kullanmaktır. Kalın bir dielektrik malzemenin düşük geçirgenliğe sahip kombinasyonu antenler için performans artırıcı özelliklerdendir. Fazla kalın dielektrik malzemelerin bir dezavantajı, yüzey dalgalarını artırması ve böylece daha düşük ışınım verimi vermesidir, ancak verim daha düşük geçirgenliğe sahip dielektrik malzeme ile optimize edilebilir [38].

2.3.2. Empedans eşleştirme ağı

Bant genişliğini iyileştirmek için bir empedans eşleştirme ağı tanımlanabilir. Bunu yapmanın farklı yolları vardır, saplama ya da çeyrek dalga transformatörü ile ayrı bir ağ oluşturulabilir ya da yuvalar ve çentikler kullanılarak doğrudan yamanın üzerine bu ağ yapılabilir. Ayrıca çentikli bir yama ve/veya bir yuvaya sahip bir yama çoklu frekans operasyonları için de tasarlanabilmektedir [39].

2.3.3. Çoklu rezonanslar

Çoklu rezonanslar eklenerek, bant genişliği geliştirilebilir. Yakın aralıklı rezonans frekanslarına sahip ekstra rezonatörler tanımlanabilir. Bu, yamadaki yuvalar ve parazitik yamalar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Farklı rezonanslar yakınsa bant genişliği artar, rezonanslar ayrıysa anten birden fazla frekans için çalışmış olur.

Bir yamada yarıklar oluşturarak ya da yamanın şeklini değiştirerek çoklu rezonans frekansları elde edilebilir. Yamaların farklı boyutları farklı frekanslarda yayılmalarını sağlar. Örneğin, H şeklinde bir yarık iki katlı dipol olarak kabul edilebilir. Hem X hem de Ku bandında çalışabilen bir anten yapmak için yaprak şeklinde ve daha özel olarak lale şeklinde mikroşerit yama antenler kullanılmıştır. Düzenlenmiş yaprak şeklindeki mikroşerit yama antenler, yüksek ışıma performansı, küçük boyutu, geniş bant genişliği ve ayrıca çok bantlı çalışma özelliği sağlayabilen önemli avantajlara sahiptir. Dezavantajı karmaşık şekli nedeniyle performans özelliklerinin analizinin zorluğudur [40]. Çoklu frekanslarda çalışmak için yuvalar (slots), yarıklar (slits) ve farklı yama şekillerinin kullanıldığı birçok örnek mevcuttur. Bu yuvalar/yarıklar ve/veya farklı yama şekilleri Ku bandında çoklu frekans operasyonu ile kablosuz haberleşme için kullanılabilir [41, 42].

Birden fazla rezonans elde etmek için parazitik yamalar da kullanılabilir. Parazitik yamalar, ana yamayla aynı düzlemde yamanın etrafında konuşlu bulunur. Diğer bir yöntem, parazitik yamaların ana yamanın üstünde katmanlar halinde istiflenmesidir. Parazitik yamalar, ana yamayla olan elektromanyetik kuplaj sayesinde ışıma yapar ve farklı frekanslarla da ışıma sağlarsa, bant genişliğini artırır [43].

2.4. Mikroşerit Yama Antenleri Analiz Teknikleri

Mikroşerit yama antenleri analiz etmek için kullanılan en gözde metotlar, transmisyona (iletim) hat (TLM), kavite ve tam dalga modelleridir. Transmisyona hat modeli, yama antenlerinin analizinde kullanılan en basit modeldir. Fiziksel analiz kabiliyeti iyi, kuplaj modellemesi daha zor olan bir tekniktir.

2.4.1. Transmisyona hat modeli

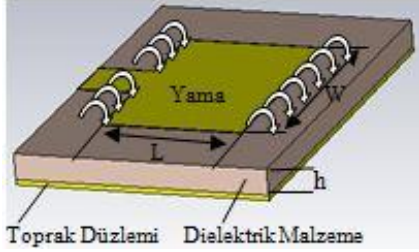
Dikdörtgenel bir yama bu teknikte, iki ucunda ışımaya yapan ve genişliği empedans ve etkin bağıl geçirgenliği (permittivity) belirleyen düşük empedanslı bir mikroşerit hat olarak kabul edilir. Yama boyunca etkin uzunluk yarım dalga boyuna yaklaştığında ışımaya gerçekleşir. Yamanın ışımaya yapan kenarları, paralel plaka ışımaya kondüktansı ve kapasitif suseptansı (iletkenlik değerinin sanal kısmı) ile yüklüdür.

Yamadaki ışımaya, yama ucundaki alanlarından kaynaklandığı kabul edilir. Bir dikdörtgenel mikroşerit yama anten, W genişliğinde, h kalınlığında, L uzunluğunda kabul edilirse transmisyona hat modelinde bu anten, iletim hattını yüksek olmayan bir empedans değerinde tutan aralarında L uzunluğu bulunan iki yarık ile ifade edilir. Yamanın sonundaki alanlar yama düzlemine göre teğet ve normal bileşenlere ayrılır. Normal bileşenler yarım dalga boyu mesafede birbirlerini terslediğinden faz dışı kalır ve bu nedenle geniş alanda ışımaya katkıda bulunamaz. Fazdaki teğetsel bileşenler toplanır ve yama yüzeyine ışımaya normalini verir. Bu durum, yamanın birbirinden yarım dalga boyu mesafe uzağa yerleştirilmiş iki paralel yarıktan ışımaya yapması şeklinde ifade edilir [44].

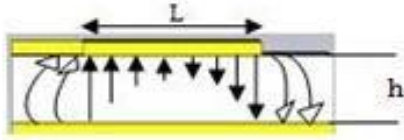
Saçaklama etkisi

Yama boyutlarının sonlu olması nedeniyle, yama uçlarındaki alanlar toprak düzlemine doğru saçaklama gösterir. Şekil 2.3'te mikroşerit yama antenin ışımaya yapan iki yarıklı yapı gibi davrandığı gösterilmiştir. Saçaklama miktarı yamanın boyutlarına ve dielektrik malzemenin kalınlığına göre değişir. xy -düzleminde saçaklama, yamanın L uzunluğunun, dielektrik malzemenin h kalınlığına oranı (L/h) ve dielektrik malzeme sabitinin (ϵ_r) bir fonksiyonudur. $L/h \gg 1$ sağlanırsa saçaklama azalır. Şekil 2.4'te saçaklama durumunda elektrik alan bileşenlerinin homojen olmayan hava ve dielektrik malzeme hattında yayılımı

gösterilmiştir. Elektrik alan bileşenlerinin büyük çoğunluğu dielektrik malzeme içerisine nüfuz ederken, az bir bileşen havada yayılır.



Şekil 2.3. Dikdörtgensel mikroşerit yama antende saçaklama



Şekil 2.4. Dikdörtgensel mikroşerit yama antenin yandan görünümü

$W/h \gg 1$ ve $\epsilon_r \gg 1$ durumunda elektrik alan bileşenleri dielektrik malzeme içerisine yönelir. Fakat az miktarda saçaklama etkisiyle mikroşerit hattın elektriksel boyutu, kendi fiziksel boyutundan büyük olur. Dalgaların bir bölümü dielektrik malzeme içerisinde, bir bölümü de havada yayıldığından hat üzerindeki dalga yayılımını ve saçaklama etkisini hesaba dahil edebilmek için etkin dielektrik sabitinin (ϵ_{reff}) tanımlanması gerekir. Mikroşerit yama anten, kendi fiziksel boyutları ile bir dielektrik malzeme içerisine yerleştirilmiş gibi düşünülür ve etkin dielektrik sabiti olarak da yayılımın tek bir dielektrik sabitine sahip bu ortamda olduğu varsayılır. Dielektrik malzeme üzerinde havayla temasta olan bir yama için etkin dielektrik sabiti, $\epsilon_r > \epsilon_{reff} > 1$ eşitsizliğini sağlar. $\epsilon_r \gg 1$ durumunda ϵ_{reff} değeri ϵ_r değerine daha yaklaşıktır. Yüksek çalışma frekanslarında, elektrik alan bileşenleri dielektrik malzeme içine yöneleceğinden mikroşerit hat tek dielektrik malzemeden oluşmuş homojen hat gibi davranacağından ϵ_{reff} değeri ϵ_r değerine daha da yaklaşıktır. Düşük frekanslarda, ϵ_{reff} değeri genellikle değişken değildir ama anlık frekanslara göre değişim göstererek etkin dielektrik sabiti artabilir. Etkin dielektrik sabitinin ilk değerlerine statik değerler denir [45].

$$W/h > 1 \text{ durumu için, } \epsilon_{reff} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \text{ dir.} \quad (2.1)$$

Mikroşerit yama antenin etkin değerleri

Saçaklama sebebiyle mikroşerit yamanın elektriksel boyutları fiziksel boyutlarından daha büyüktür. Bu durum Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Yamanın L uzunluğu, her iki ucundan ΔL kadar artar [46]. Normalize uzunluk artışı için kullanılabilir pratik yaklaşık ifade,

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (2.2)$$

Yama uzunluğu her iki uçtan ΔL kadar uzayacağından, yamanın etkin uzunluğu,

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (2.3)$$

Mikroşerit antenin rezonans frekansı, uzunluğunun bir fonksiyonudur.

$$f_r = \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.4)$$

Mikroşerit yama antenin rezonans frekansı saçaklama etkisi de dikkate alındığında

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \\ &= -2 + \cos(X) + X S_i(X) + \frac{\sin(X)}{X} \\ X &= k_0 W \\ &= q \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = q \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

v_0 : serbest uzay ışık hızı olmak üzere

$$q = \frac{f_{rc}}{f_r} \text{ olur.} \quad (2.6)$$

Burada q (uzunluk azaltma faktörü) saçaklama faktörüdür. Dielektrik malzeme kalınlığı artarsa, saçaklama artar ve düşük frekanslarda ışınım yapan kenarlar ile fiziksel boyut arasında daha büyük farklılıklar olur. Transmisyon hat tekniğinde, ϵ_r , f_r ve h belirlendikten sonra dikdörtgenel mikroşerit yamanın genişliği (W) ve uzunluğu (L) bulunur [47].

Yukarıdaki eşitliklerden yamanın genişliği ve uzunluğu,

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.7)$$

$$L = \frac{v_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \text{ olur.} \quad (2.8)$$

Rezonans giriş empedansı

$$Z_{in} = R_{in} + jX \quad (2.9)$$

Burada; Z_{in} anten giriş empedansı, R_{in} anten giriş rezistansı, X anten giriş reaktansıdır. Birimi Ohm olan empedans değerini bulabilmek için iletkenlik değerleri yaklaşımlarından yola çıkılabilir.

Transmisyon hat modelinde ışınım yapan yarıklar paralel eşdeğer admitans devresi ile gösterilir. W genişliğindeki ilk yarığın admitansı Y_1 , kondüktansı G_1 , suseptansı B_1 ise,

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \text{ için} \quad (2.10)$$

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right]; \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (2.11)$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0,636 \ln(k_0 h)]; \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (2.12)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2.13)$$

k_0 : boş uzay yayılım sabiti, λ_0 : boş uzay dalga boyu

$$G_1 = \frac{2P_{rad}}{|V_0|^2} \quad (2.14)$$

P_{rad} : Işıyan güç, V_0 : İki yarık arası gerilim

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (2.15)$$

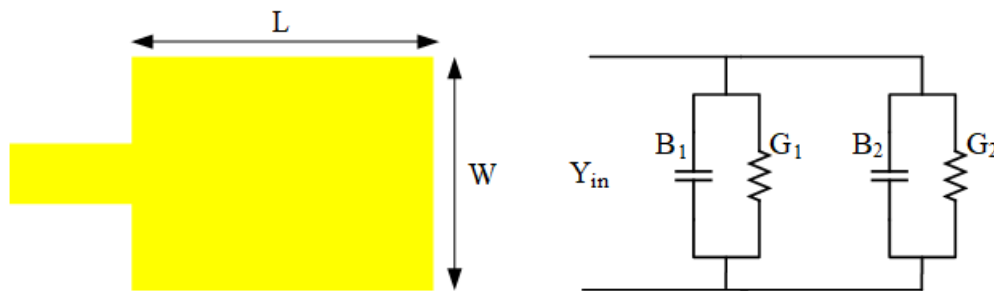
$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \quad (2.16)$$

$$X = k_0 W \quad (2.17)$$

Eşitliklerin asimptotik değerleri alındığında;

$$G_1 = \begin{cases} \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda_0}\right)^2 & W \ll \lambda_0 \\ \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda_0}\right) & W \gg \lambda_0 \end{cases} \text{ elde edilir.} \quad (2.18)$$

İkinci yarık içinse eşitlikler birinci yarıktaki gibi tanımlanabilir ($0,48\lambda < L < 0,49\lambda$).



Şekil 2.5. Dikdörtgenel mikroşerit yama ve onun transmisyon hat eşiti devresi

Empedans uyumlaştırma sonucu her iki yarığın sanal değerleri eşit büyüklükte ve zıt işaretli olacağından toplam eşdeğer admitansı için sanal değerler birbirini yok eder. Girişten bakılan admitans (Y_{in}) ve empedans (Z_{in}) değerleri,

$$Y_{in} = 2G_1 \quad (2.19)$$

yarıkların birbirine etkisi de hesaplanacak olursa,

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \text{ şeklinde hesaplanır.} \quad (2.20)$$

İşlemdeki artı (+) işareti tek rezonans voltaj modları için kullanılırken eksi (-) işareti ise çift rezonans voltaj modları için kullanılır.

Uzak alan için birlikte iletkenlik,

$$G_{12} = \frac{1}{|V_0|^2} \operatorname{Re} \iint_S (E_1 \times H_2^*) ds \quad (2.21)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta \text{ olarak hesaplanır.} \quad (2.22)$$

E_1 : İlk yarıktan ışıyan elektrik alan,

H_2 : İkinci yarıktan ışıyan manyetik alan,

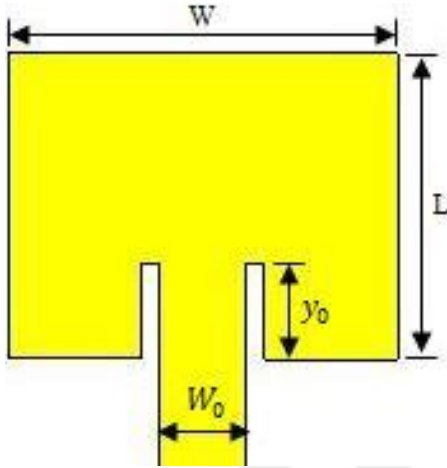
V_0 : İki yarık arasındaki voltaj,

J_0 : Birinci tip sıfırıncı dereceden Bessel fonksiyonu.

G_{12} ortak iletkenlik değeri hesaplamalar sonucunda G_1 tek başına kendi iletkenlik değerinin yanında ihmal edilebilecek seviyededir. Bu durumda iletkenlik $2G_1$ olarak hesaba katılabilir.

$$\text{Sonuç olarak } Z_{in} = R_{in} = \frac{1}{2G_1} \text{ eşitliği kullanılabilir.} \quad (2.23)$$

Eşitliklere bakıldığında dielektrik malzeme kalınlığı giriş rezistansını doğrudan etkilememektedir. Çok küçük kalınlık değerleri için $k_0h \ll 1$ durumunda giriş rezistansı dielektrik malzeme kalınlığına (h) bağlı değildir. W/L oranının 2 değerini geçmemesi şartıyla W yama genişliği artırılarak giriş rezistansı azaltılabilir.



Şekil 2.6. Empedans uyumlaştırma yarıkları y_0

Şekil 2.6'da mikroşerit beslemeli yamanın giriş kısmında açılan empedans uyumlaştırma yarıkları y_0 gösterilmiştir. Yamanın giriş rezistansı, giriş besleme yarıkları marifetiyle değiştirilebilir. Bu yöntem kullanılarak mikroşerit hattın kendine özgü empedansı ile giriş empedansı uyumlaştırılabilir.

Mikroşerit hattın kendine özgü empedansı (Z_c),

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right]; & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}; & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (2.24)$$

eşitlikleriyle hesaplanabilir [48].

İfadeden de anlaşılacağı gibi 16 mikroşerit iletim hattın empedansı, 16 mikroşerit iletim hattın genişliği (W_0), etkin dielektrik sabiti (ϵ_{reff}), dielektrik malzemenin kalınlığına (h) bağlıdır. Girişteki yarık için giriş rezistansı uyumlaştırma karakteristiği,

$$R_{in(y=y_0)} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (2.25)$$

$$R_{in(y=y_0)} = R_{in(y=0)} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \text{ formülleri ile ayarlanabilir [18, 48].} \quad (2.26)$$

Besleme hattının iki yanındaki yarıklar giriş kapasitansı meydana getirir. Bu değer rezonans frekansına etkisi %1 gibi çok düşük bir değerdir.

Mikroşerit yamanın kenarlarında yani $y_0 = 0$ bölgesinde voltaj en yüksek değerde iken, akımsa en düşük değerdedir. Giriş empedansı bu bölgede en yüksek değerdedir ve bu değer genellikle 150 ile 300 Ohm arasında değişmektedir. En düşük empedans değeri ise voltajın sıfır akımın ise en yüksek olduğu yer yamanın orta noktasında $y_0 = L/2$ bölgesinde sağlanır. Girişteki besleme hattının yanındaki yarıklar, yamanın merkezine doğru artırıldığında, rezonans giriş empedansı $\cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right)$ ifadesi ile orantılı olarak hızlı bir şekilde azalacak ve merkezde sıfıra yaklaşacaktır [4].

2.4.2. Kavite modeli

Kavite (boşluk) modelinde, yama ile toprak düzlemi arasındaki boşluk, kenarlarından yayılan bir rezonans elektromanyetik boşluk olarak kabul edilir. Boşluğun yan duvarlarındaki teğet elektrik alanları, eşdeğer manyetik akımlarla değiştirilir. Boşluğun yan duvarlarının mükemmel manyetik iletkenler olduğu varsayılırken, yama ve toprak düzleminin mükemmel elektrik iletkenleri olduğu kabul edilir. Boşluk modeli, disk, dikdörtgen, elipsel ve üçgenel gibi geometriye yamalar için uygundur. Daha karmaşık olan şekiller daha küçük ve daha basit şekillere bölünerek analiz edilebilir. Modellerin farklı versiyonları mevcuttur ve burada verilen geometrilerden farklı özelliklere sahip olabilirler. Örneğin, boşluk modeli, yalnızca normal şekiller değil ayrılabilir geometrik şekillerde de kullanım için geliştirilebilir [49].

2.4.3. Tam dalga modeli

Tam dalga yöntemi, diğer sayısal yöntemlerin arasında; momentler metodu (MoM) ve sonlu element metodunu (FEM) kullanan modeldir. Bu yöntemler daha doğru cevap verir ancak basitleştirilmiş yöntemlerden daha ağır ve daha karmaşık hesaplamalar gerektirir, bu nedenle hesaplamalar için bilgisayar programları kullanılır. MoM 1968’de tanıtılmıştır. MoM, dielektrik malzemeler için Green fonksiyonlarını kullanarak, integral denklemlerini çözmek için kullanılır. Green fonksiyonlarının işlevleri, mevcut dağılımlardan gelen alanları hesaplamak için kullanılır [50]. MoM antenin küçük bölgelerinde akım olduğu varsayımıyla başlar. Daha sonra, akımları bir dizi temel fonksiyonda genişletir ve genişleyen bileşenleri için çözer. Alanların daha iyi değerlendirilebilmesi için iyi bir temel fonksiyon seçimi önem arz etmektedir. MoM sürecinde, dönüşüm için zaman alıcı sayısal yöntemler gerektiren matrisler elde edilir ve bu matrisler kullanılır [49]. FEM ilk olarak 1975’te elektromanyetik problemleri çözmek için kullanılmıştır [51]. Problemin yapısı FEM kullanıldığında kübik hücrelere ayrılır, bu yüzden bu bir bilgisayar programı gerektirir. Çözmeye başlamadan önce program yapıyı bir ağı bölebilir. Analiz, frekans alanında gerçekleştirilir ve ilgilenilen her frekans için tekrarlar. Sınır yüzeyleri üzerindeki akımlar, olay alanları ile denklik teoreminin kullanılmasıyla hesaplanır ve daha sonra alan ışınma örüntüsü bu sınır akımlarından hesaplanır. Eşdeğer teorem kullanılarak, elektrik alanları hesaplamalarını kolaylaştıran güvenilir manyetik akımlar kullanılabilir [49].

3. ANTEN PARAMETRELERİ

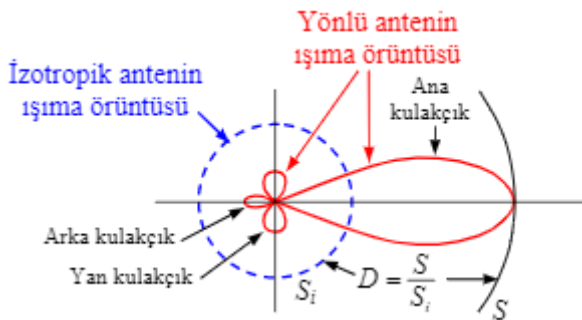
Antenin çalışma kabiliyetini gözlemleyebilmek ve tanımlamak için birtakım parametrelerden yararlanır [4].

3.1. Işıma Örüntüsü

Işıma örüntüsü (pateni), antenin uzay koordinatlarındaki ışıma özelliklerinin grafiksel bir gösterimidir. Bu örüntü, güç, ışıma yoğunluğu, yönlülük, faz veya polarizasyonu içerir. Örüntüde yan loblar (kulakçıklar) gibi düşük değerlere sahip kısımların ayrıntılı bir görüntüsünü elde etmek için çizimler desibel olarak yapılır. Bir antenin ışıma örüntüsü, antenin uzak alan (far-field) bölgesindeki elektromanyetik alan şiddeti değeriyle elde edilir. Antene yakın olan bölge yakın alan, uzak olan bölgeler ise uzak alan olarak tanımlanır. Yakın alan, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin düzlem dalga karakteri göstermedikleri bölgedir; bu bölgede daha çok reaktif enerji birikimi olur. Uzak alan ise düzlem dalga yaklaşımının yapılabildiği bölgedir. Yakın ve uzak alan tanımları anten cinsine ve etkileşimlere göre, frekans, anten boyutları gibi değişkenler cinsinden belirlenmektedir [52].

3.2. Yönlülük

Bir anizotropik kaynağın yönlülüğü (D), antenin en fazla ışıma yaptığı yöndeki güç yoğunluğunun aynı güçteki bir izotropik antenin uzak alanda oluşturduğu güç yoğunluğuna oranıdır. Yönlülük, genellikle desibel veya izotropik desibel (dBi) cinsinden verilir. İzotropik desibel, izotropik bir antene göre ölçüldüğü anlamına gelir [53].



Şekil 3.1. Işıma örüntüsü ile anten yönlülüğünün gösterimi

3.3. Verimlilik

Verimlilik (e_r), antenin yaydığı ışımaya gücünün (P_r) antene uygulanan elektriksel giriş gücüne (P_i) oranıdır. 0 ile 1 arasında değer alır. Anten kayıplarının bir ölçüsüdür. Anten kayıpları; yansıma kayıpları, omik kayıplar ya da dielektrik kayıplardan kaynaklanabilir.

$$e_r = \frac{P_r}{P_i} \text{ ile gösterilir.} \quad (3.1)$$

3.4. Kazanç

Kazanç (G), belirli bir doğrultuda ışımaya yoğunluğunun aynı miktarda güç ileten bir izotropik kaynaktan ışınan yoğunluğa oranı olarak tanımlanabilir. Anten kazancı, antenin verimliliği (e_r) ile yönlülüğünün (D) çarpımıdır. Kayıpsız bir antenin kazancı antenin yönlülüğüne eşittir. Kazanç, 4π ışımaya yoğunluğunun toplam giriş gücüne oranı olarak hesaplanır ve genellikle desibel veya izotropik desibel cinsinden verilir.

$$G = e_r D = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi f^2 A_e}{c^2} \quad (3.2)$$

Anten kazancı G , anten etkin alanı A_e , taşıyıcı frekans f , ışık hızı c , taşıyıcı dalga boyu λ ile gösterilmiştir.

3.5. Ön-Arka Oramı

Yönlü bir antenin maksimum yönlülüğünün (normalde beklenen), maksimum değere göre 180° döndürülen yöndeki yönlülüğüne oranıdır. Bu değer yüksek çıkması yönlülüğün iyi seviyede olduğunu gösterir.

3.6. Geri Dönüş Kaybı

Antenin giriş terminallerinde tespit edilen güç miktarının ne kadarının iletimde olduğunun ne kadarının yansıdığına bir ölçüsüdür. Anten giriş empedansının ve iletim hattı karakteristik empedansının uyumluluk durumunu gösterir. Bu uyumluluk maksimum güç transferi için önemlidir. Yansıma büyüklük katsayısı, antenden geri yansıyan gerilimin

kendisine gönderilen gerilime oranı olarak tanımlanır. Giriş yansıma katsayısı genellikle Γ ile gösterilir ve 0 ile 1 arasında boyutsuz bir sayıdır. Mükemmel bir eşleşmede $\Gamma = 0$ anlamına gelir. S parametreleri yüksek frekans ağları tanımlayabilmek için kullanılır [54]. Yansıma katsayısının büyüklüğü, geri dönüş kaybı S_{11} ile desibel (dB) cinsinden de ifade edilir, ayrıca bu değer antenin bant genişliğini gösteren ölçüdür. Bant genişliği, S_{11} 'in -10 dB değerinden daha az olduğu frekans bandı olarak kabul edilir.

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_{in}}, V_r \text{ antenden yansıyan voltaj, } V_{in} \text{ antene iletilen voltaj olmak üzere} \quad (3.3)$$

$$S_{11} (dB) = 20 \log(\Gamma) \text{ ya da } 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \text{ şeklinde ifade edilir.} \quad (3.4)$$

Empedans eşleşmesinin diğer bir ölçümü, giriş yansıma katsayısının bir fonksiyonu olan voltaj duran dalga oranı (VSWR)'dir. Güç, giriş yansıma katsayısı, empedanslar ve VSWR arasındaki ilişki,

$$\frac{P_r}{P_i} = |\Gamma|^2 = \frac{|Z_{in} - Z_c|^2}{|Z_{in} + Z_c|^2} = \left| \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right|^2 \text{ olarak ifade edilir [45].} \quad (3.5)$$

Burada P_r yansıyan güç, P_i gelen güç, Z_{in} anten giriş empedansı ve Z_c ise iletim hattının karakteristik empedansıdır. Mükemmel bir eşleşme için VSWR değeri eşitliklerde de görüldüğü üzere 1 olmalıdır.

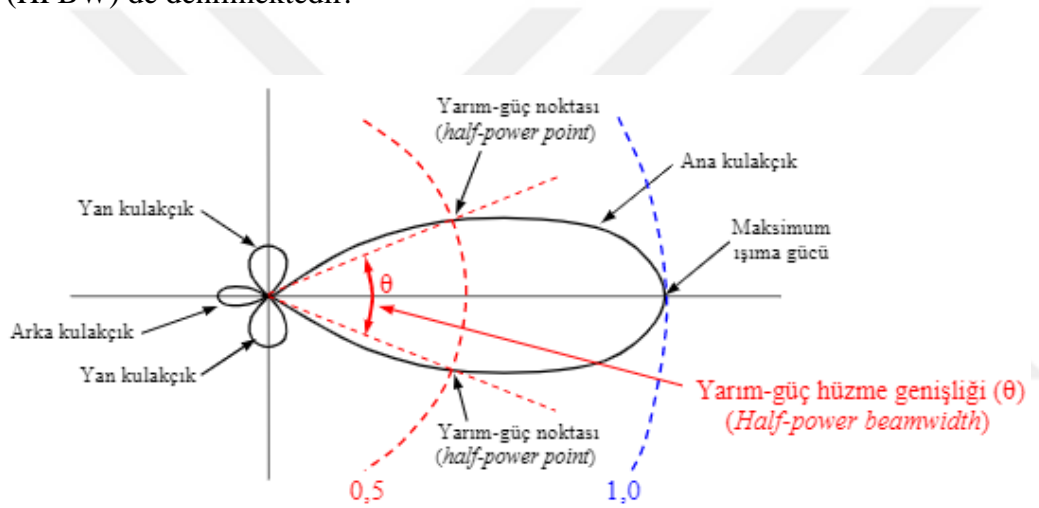
3.7. Kutuplanma (Polarizasyon)

Dalga bir yöne doğru yayıldığı zaman içerisinde elektrik alanın çizdiği biçim dalga polarizasyonunu açıklar. Üç çeşit kutuplanma vardır. Bunlar; doğrusal, dairesel ve eliptik kutuplanmalardır. Eğer elektrik alan vektörü zamana bağlı olarak yalnızca bir doğrultu boyunca ilerliyorsa buna doğrusal kutuplanma ve elektrik alan yatay ise yatay kutuplanma dikey ise dikey kutuplanma, eğer alan vektörü dairesel ilerleyerek her bir dalga boyunda 360° dönüyorsa dairesel kutuplanma ve dönüş yönüne göre sağ el ya da sol el kutuplanma, eğer elektrik alanın izlediği bu yol bir elips şeklindeyse buna da eliptik kutuplanma ve elektrik alanın izlediği yol saat yönündeysen sağ el kutuplanma, saat yönünün tersineyse sol

el kutuplanma şeklinde ifade edilir. Elektrik ve manyetik alan vektörleri, birbirine dik olarak elektromanyetik dalga yayılma yönüne dik bir düzlem içinde bulunur. Buna düzlem dalga denir. Birbirine dik olan ve açısal hızla dönen bu iki vektör elektrik alan vektörünün dönüş yönüne göre bir elektromanyetik alan oluşturur.

3.8. Hüzme Genişliği

Yönlü bir antenin hüzme genişliği ışınım diyagramında en fazla ışınım gücünün yarıya düştüğü yönler arasındaki açıdır. Bu yönlerde güç seviyesi en fazla gücün 3 dB altındadır. Desibelde bu, -3 dB olan noktaları ifade eder. Hüzme genişliğine, yarım güç hüzme genişliği (HPBW) de denilmektedir.



Şekil 3.2. Işınım örüntüsü ile anten yarım-güç hüzme genişliğinin gösterimi

3.9. Kalite Faktörü, Verimlilik ve Bant Genişliği

Optimum anten etkinliği elde edebilmek için kalite faktörü, bant genişliği ve verimlilikten birinin optimize edilmesi diğerinin performansını azaltabilir. Kalite faktörü, anten kayıplarının bir ölçüsüdür. Bu kayıplar ışınım, dielektrik, iletkenlik ve yama yüzeydeki dalga kayıplarından oluşur. Toplam kalite faktörü ise tüm bu kayıpların tamamı anlamına gelmektedir.

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (3.6)$$

Q_t toplam kalite faktörü, Q_c iletkenlik kayıpları kalite faktörü, Q_d dielektrik kayıpları kalite faktörü, Q_{rad} ışınım kayıpları kalite faktörü, Q_{sw} yüzey dalgaları kalite faktörünü temsil etmektedir.

Oldukça ince dielektrik malzemeli mikroşerit yama antenlerde yüzey dalgaları ihmal edilebilecek kadar düşük seviyededir. Kalın dielektrik malzemeli mikroşerit yama antenlerde ise yüzey dalgalarının neden olduğu kayıplar kayda değer seviyededir. Kalın dielektrik malzemeye sahip mikroşerit yama antenler üzerinde kavite (boşluk) oluşturarak bu kayıplar azaltılabilir. Oldukça ince dielektrik malzemeli antenlerde yani $h \ll \lambda_0$ durumunda kalite faktörü ifadeleri,

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3.7)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (3.8)$$

$$Q_{rad} = \frac{2W \epsilon_r}{hG_t / l} K \quad (3.9)$$

Burada, G_t / l ışınım bölgesinin birim uzunluğu için toplam iletkenliği, $\tan \delta$ dielektrik malzeme kayıp tanjantı, σ ise toprak ve yamanın iletkenliğidir. Etkin moddaki dikdörtgenel bölgedeki ışınım açıklığı,

$$K = \frac{L}{4} \quad (3.10)$$

$$G_t / l = \frac{G_{rad}}{W} \quad (3.11)$$

Q_{rad} , dielektrik malzeme kalınlığı ile ters orantılı şekilde artar veya azalır. Bant genişliği (BW), anten için çalışma şartlarının sağlandığı, merkez frekansının iki yanında alt frekans ile üst frekans arasında yer alan frekans aralığıdır. BW, VSWR değerinin 2'den daha küçük olduğu aralık olarak da ifade edilebilir [53].

Mikroşerit yama antenin bant genişliği, toplam kalite faktörü ile ters orantılıdır.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_t} \quad (3.12)$$

Anten girişindeki empedans uyumlaştırma işlemini de dikkate almak gerekir. Rezonans frekansında VSWR değerinin ışınım şartını sağlayan sınır değerlerinin olabildiğince altında bir değerde olması sağlanmalıdır. Empedans uyumlaştırılması dikkate alınarak antenin oransal bant genişliği,

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{VSWR-1}{Q_t \sqrt{VSWR}} \text{ ile ifade edilebilir.} \quad (3.13)$$

Dikdörtgen şekilli mikroşerit yama bir anten için belli bir rezonans frekansındaki bant genişliği antenin hacmi ile doğru orantılıdır. Bant genişliği dielektrik malzeme sabiti karekökünün çarpmaya göre tersi ile de orantılıdır.

$$\text{Bant genişliği (BW)} \sim \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.14)$$

Bir mikroşerit yama antenin bant genişliği dielektrik malzeme kalınlığı ile doğru orantılıdır. Dielektrik malzemenin kalınlığı arttıkça bant genişliği de artar.

Antenin ışınım verimliliği, antenin giriş gücünün ne kadarının ışıdığı ile ifade edilebilir. Toplam anten verimi, giriş terminallerinde ve antenin kendisinde bulunan kayıpları dikkate almak için kullanılır. Antenin ışınım verimi; iletim ve dielektrik kayıp bileşenlerinin hesaba katıldığı, birleştirilerek e_{cd} olarak ifade edilen anten parametresidir.

$$e_{cd} = \frac{P_r}{P_i} \text{ olarak matematiksel gösterilebilir.} \quad (3.15)$$

Anten verimi kalite faktörü ile de ifade edilebilir:

$$e_{cdsw} = \frac{1/Q_{rad}}{1/Q_t} = \frac{Q_t}{Q_{rad}} \quad (3.16)$$

4. MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI

Bu bölümde mikroşerit yama antenler Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) tasarım ve simülasyon programıyla Ku bandında (12-18 GHz) tasarlanıp, simüle edilerek sonuçlar incelenmiş, antenlerin karakteristik ve parametrik özellikleri üzerinde durulmuştur. İlk aşamada oluşturulan referans Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları değiştirilmeden yama üzerinde oluşturulan çeşitli şekil ve boyutlardaki yarıkların anten ışımasına etkisi üzerine çalışılmıştır.

4.1. Dikdörtgenel Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Çalışmada söz konusu mikroşerit yama antenlerin tamamı, mikroşerit beslemeli dikdörtgenel şekilli antenler olup bu antenler üzerinde çeşitli yarıklı yapılar kullanılmıştır. İlk olarak referans 12 GHz mikroşerit yama anten tasarımı yapıldıktan sonra üzerinde yarıklı yapılar oluşturulmuş ve anten optimizasyonu sağlanarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Transmisyon hat modeli ile dikdörtgenel mikroşerit yama antenin ilk boyutları hesaplanarak tasarıma başlanmıştır ve CST MWS programı ile bu boyutların optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Mikroşerit yama anten tasarımı temel değişkenleri

Yama anten tasarımında başlangıçta rezonans frekansı, dielektrik malzemenin kalınlığı ve dielektrik sabitinin belirlenmesi gerekir.

Rezonans frekansı

Antenin çalışması istenen frekans bandını kapsamaması ve verimli ışıma yapması arzulanan durumdur. Rezonans frekans (f_r), sabit durum tepkisinin büyüklüğü maksimum olduğu veya giriş empedansının sanal kısmı sıfıra giderken meydana gelen bir sistemdeki frekans olarak tanımlanabilir. Antenin kullanacağı frekans aralığının merkezi, rezonans frekansını belirler. Düşük frekanslarda anten boyutları artacağından mikroşerit antenler yüksek frekanslarda tercih edilir.

Dielektrik malzemenin kalınlığı

Bu malzeme, yama ile toprak düzlemi arasındaki dielektrik tabakadan oluşur. Kalınlığı genellikle $h \ll \lambda_0$ sağlanmak üzere $0,003 \lambda_0 \leq h \leq 0,05 \lambda_0$ aralığında seçilir. Dielektrik malzemenin kalınlığının artırılması yüzey akımları olmadığı varsayılırsa verimliliği %90, bant genişliğini ise %35'lere kadar artırabildiği değerlendirilmektedir. Fakat kalınlığın fazla artması, istenmeyen yüzey dalgaları oluşturur ve ışıma için kullanılan güç, yüzey dalgalarında harcanır bununla birlikte dielektrik malzemenin süreklilik göstermediği noktalarda saçılmalar oluşturur. Tüm bu nedenler antenin ışıma örüntüsünde bozulmalara yol açar.

Dielektrik sabiti

Dielektrik malzeme tercihinde dikkat edilen dielektrik malzeme sabiti (ϵ_r) anten çalışma prensibini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdendir. Bu sabit genellikle $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığındadır. Dielektrik sabiti antenin boyutlarının belirlenmesinde önemli parametredir. Yüksek dielektrik sabitli malzeme seçimi, antenin boyutlarını küçültür fakat yamanın uçlarında oluşan saçaklamayı artırarak antenin elektriksel boyutunu artırır. Tasarımda düşük dielektrik sabitine sahip dielektrik malzemelerin tercih edilmesi, antenin boyutlarını artırır ama daha fazla verim ve bant genişliği sağlar.

4.2. Referans Ku Bant Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Mikroşerit yama antenler, montaj kolaylığını sağlayan düzlemsel yapısı, hafifliği ve uygun boyutları sayesinde uydu haberleşme sistemlerinde kullanılabilir. Burada diğer bölümlerde de değerlendirmelerde bulunmak üzere referans Ku bant Mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Bu referans anten için rezonans merkez frekansı 12 GHz olarak seçilmiştir. Dielektrik malzeme olarak $\epsilon_r = 2,94$; $\tan \delta = 0,0012$; $h = 1,524$ mm özelliklerinde Rogers RT/duroid 6002 kullanılmıştır.

TLM hesaplamaları kullanılıp elde edilen ilk değerler $W = 8,9$ mm ve $L = 6,4$ mm; CST MWS programı ile dalga kılavuzu kapısı (port) marifetiyle optimize edildikten sonra $W = 8,9$ mm ve $L = 6,9$ mm olarak belirlenmiştir. f_r rezonans frekansını, ϵ_r dielektrik

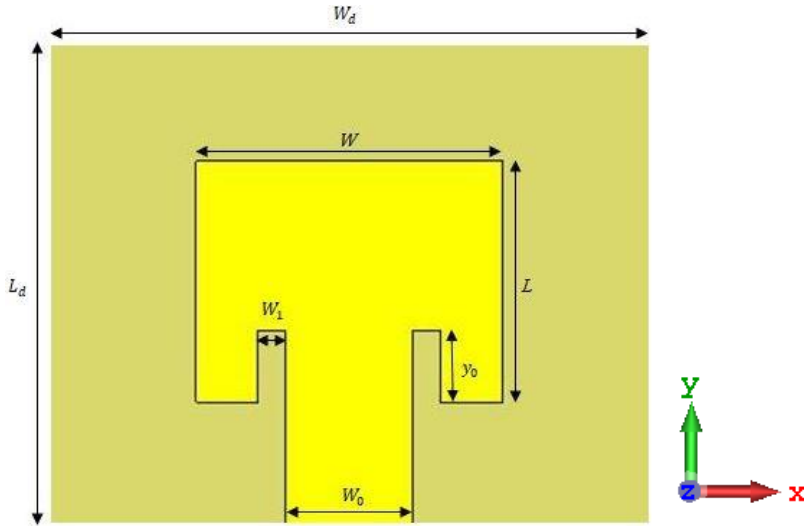
malzeme sabitini, h dielektrik malzeme kalınlığını, W ışıma yapan yamanın genişliğini, L ışıma yapan yamanın uzunluğunu ifade etmektedir.

Mikroşerit beslemeli antenlerde, besleme ucu mikroşerit hattın girişindedir. Gelen güç uçtan mikroşerit iletim hattı boyunca yayılır. Geri yansıma kayıplarını azaltmak için empedans uyumlaştırılması yapmak bir zorunluluktur.

Empedans uyumlaştırmak için giriş probu direnci, mikroşerit hattın karakteristik direncine eşit olmalıdır. Empedans uyumlaştırılması, empedansın kapasitif ya da endüktif değerleri rezistif değere kıyasla çok küçük olduğunda konjuge empedans uyumlaştırma kuralına göre rezistif değerler birbirine eşit olacak şekilde uyumlaştırmaya çalışılır. 50 Ohm'luk problar yaygın olarak kullanılmaktadır. Buradaki tasarımlarda da empedans uyumlaştırması için ışıma yapacak yamanın giriş empedansı 50 Ohm'a uyumlaştırılmıştır.

Mikroşerit besleme ile ışıma yapan yamanın birleştiği yerdeki empedans değerleri genellikle 150 - 300 Ohm aralığında olmaktadır. Empedans dönüştürme hesaplamalarına göre uyumluluk yakalanabilmesi için mikroşerit besleme ile ışıma yapan yama birleştirilirken yamanın her iki yanına iki paralel yarık oluşturulur. İstenen giriş empedansı değeri sağlanana kadar bu iki eş birbirine paralel yarık y_0 uzunluğu kadar yama içine doğru düzenlenerek iletim hattı ile yama bağlantı yeri belirlenir. Yani burada y_0 uzunluğu değiştirilerek antenin var olan giriş empedansı ayarlanır ve empedanslar uyumlaştırılır.

Yamanın genişliği ve dielektrik malzemenin kalınlığı antenin giriş empedansına etki eden faktörlerdendir. Işıma yapan yaman genişliği büyütülürse, antenin giriş empedansı bir miktar azaltılabilir ama bu değer antenin ışıma verimliliğinin azalmaması için $W/L < 2$ şartını sağlaması gerekir. Rezonans frekansı ve dielektrik sabiti, giriş empedansını etkileyen büyüklüklerdir. Mikroşerit besleme genişliği (W_0) ve etkin dielektrik sabiti de ışıma yapan yamanın giriş empedansını etkileyen niteliklerdendir.

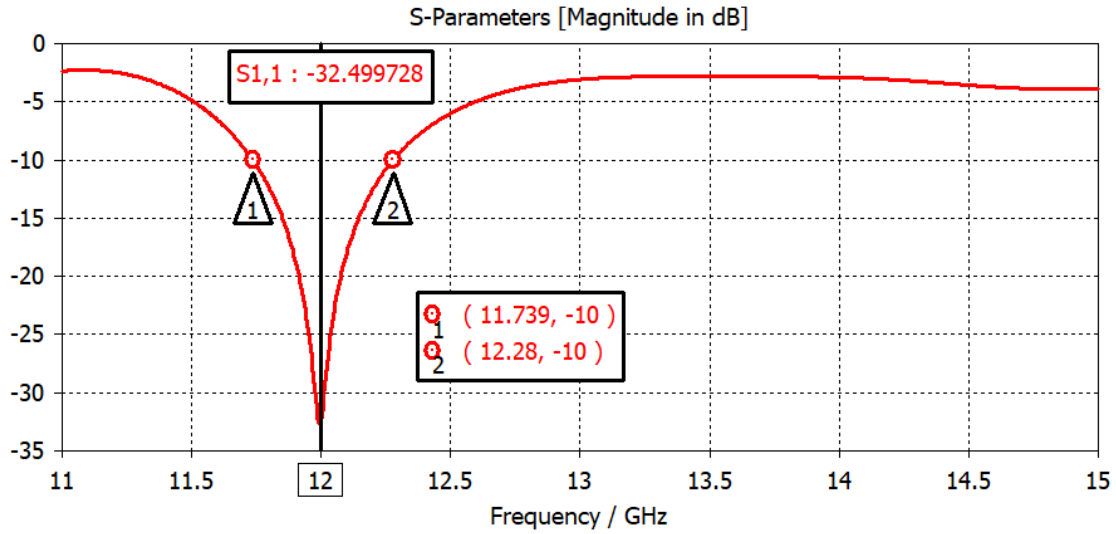


Şekil 4.1. Referans Ku bant mikroşerit yama anten

Şekil 4.1’de referans Ku bant mikroşerit yama antenin mikroşerit besleme genişliği ve iletim hattının her iki yanındaki eş yarıklar görülmektedir. Yamanın genişliği W , yamanın uzunluğu L , iletim hattının genişliği W_0 , iletim hattının her iki yanındaki birbirine paralel eş yarıkların genişlikleri W_1 ve bu yarıkların yama içine doğru uzunlukları y_0 ile gösterilmiştir. W_g toprak düzlemin genişliği, L_g toprak düzlemin uzunluğu, t toprak ve yamanın kalınlığı, W_d dielektrik malzemenin genişliği, L_d dielektrik malzemenin uzunluğudur. Toprak düzleminin ve dielektrik malzemenin boyutları ışıma yapan yamanın boyutlarının iki katı olarak belirlenmiştir. Işıma yapan referans Ku bant mikroşerit yama, dielektrik malzeme düzleminin merkezindedir.

Çizelge 4.1. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları

$W_g = W_d$	17,8 mm	$W_0 = W_f$	3,7 mm
$L_g = L_d$	13,8 mm	W_1	1,0 mm
W	8,9 mm	y_0	2,244 mm
L	6,9 mm	t	0,035 mm

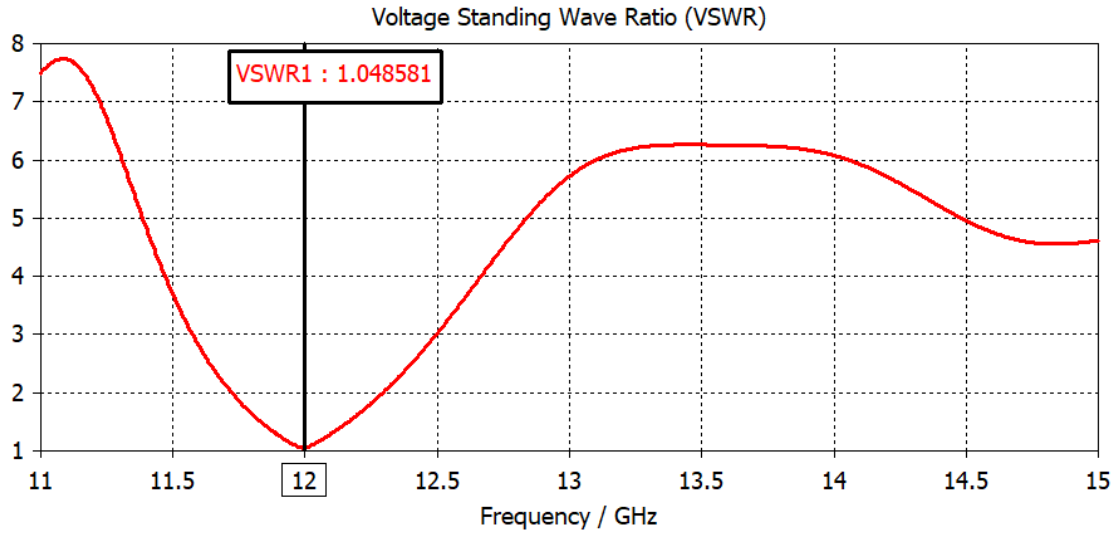


Şekil 4.2. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin geri dönüş kaybı

Şekil 4.2’de tasarlanan referans antenin S_{11} geri dönüş kaybı gösterilmiştir. Geri dönüş kaybının büyüklüğü S_{11} , desibel (dB) cinsinden ifade edilir, ayrıca bu değer antenin bant genişliğini gösteren bir ölçüdür. Bant genişliği, S_{11} ’in -10 dB değerinden daha küçük değerler aldığı bölge olarak tanımlanabilir.

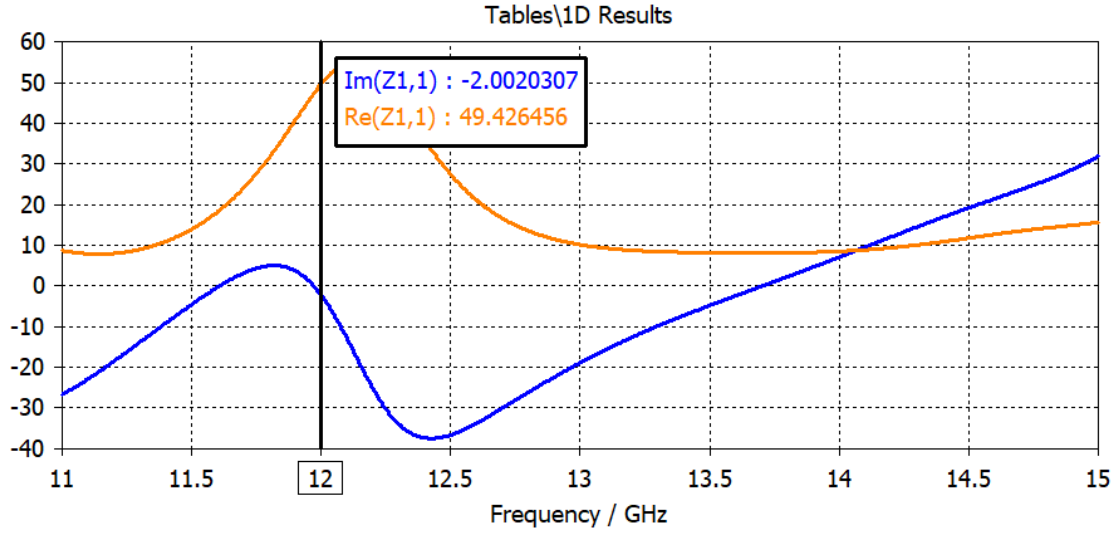
Gözlemlenebilecek değişiklikler için 11-15 GHz frekans aralığı seçilmiştir. Antenin ışıyabilmesi için voltaj duran dalga oranı $VSWR \leq 2$ ve geri dönüş kaybının $S_{11} \leq -10$ dB koşulunu sağlaması gerekir. Aranan bu değerlerin sağlandığı bölge 11,739-12,280 GHz aralığıdır ve antenin rezonans merkez frekansı 12 GHz’dir. Rezonans merkez frekansında geri dönüş kaybı $S_{11} = -32,50$ dB olarak görülmektedir. Bu değer -10 dB değerinden çok daha küçüktür ve elde edilen geri dönüş kaybı değeri oldukça iyidir. Referans mikroşerit yama anten, 12 GHz rezonans frekansında 11,739-12,280 GHz frekans aralığında 541 MHz’lik bant genişliğine sahiptir. Bu değer %4,51 bant genişliği anlamına gelir.

Diğer bölümlerde tasarlanan antenler için referans anten olarak kullanılan bu anten, 12-18 GHz Ku bant frekans bölgesinde ışıma yapmaktadır.



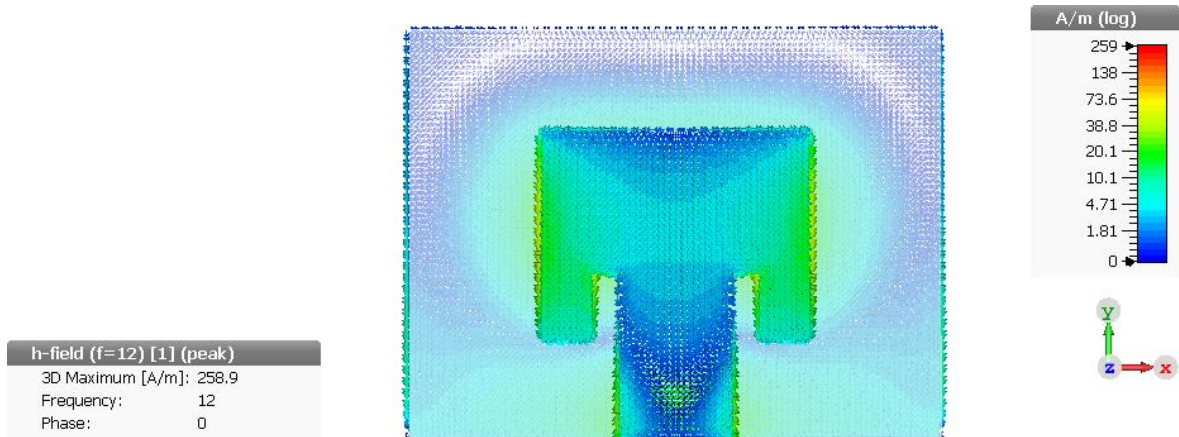
Şekil 4.3. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin VSWR grafiği

Şekil 4.3'te değişikliklerin gözlemleneceği frekans aralığı 11-15 GHz olarak belirlenmiştir. Bu aralıkta voltaj duran dalga oranı (VSWR) değişimi incelenmektedir. VSWR değeri, $1 \leq \text{VSWR} < \infty$ aralığında değişir. Antenin iletimde olma şartlarından biri $\text{VSWR} \leq 2$ 'nin sağlanmasıdır. Bu o bölgenin ışımaya yapabilecek kadar empedans uyumluluğu olduğu anlamına gelir. Ulaşılmaya çalışılan ve idealde en uygun empedans uyumlaştırılmasının sağlandığı tam uyumluluk durumu VSWR'nin 1 olduğu bölgedir. Bu durumda iletim hattından antene gelen güçte geri yansıma yoktur denilebilir. Şekil 4.3'te antenin bant genişliği içerisinde voltaj duran dalga oranı değerlerinin 1'e yakın çok küçük değerler olduğu, empedans uyumlaştırma çalışmasının aranan rezonans frekansında başarılı olarak sağlandığı görölmektedir. Burada mikroşerit iletim hattından geri yansımaların minimize edildiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.3'teki grafikte rezonans frekansı 12 GHz için voltaj duran dalga oranı yaklaşık 1,05 olarak tespit edilmiştir.



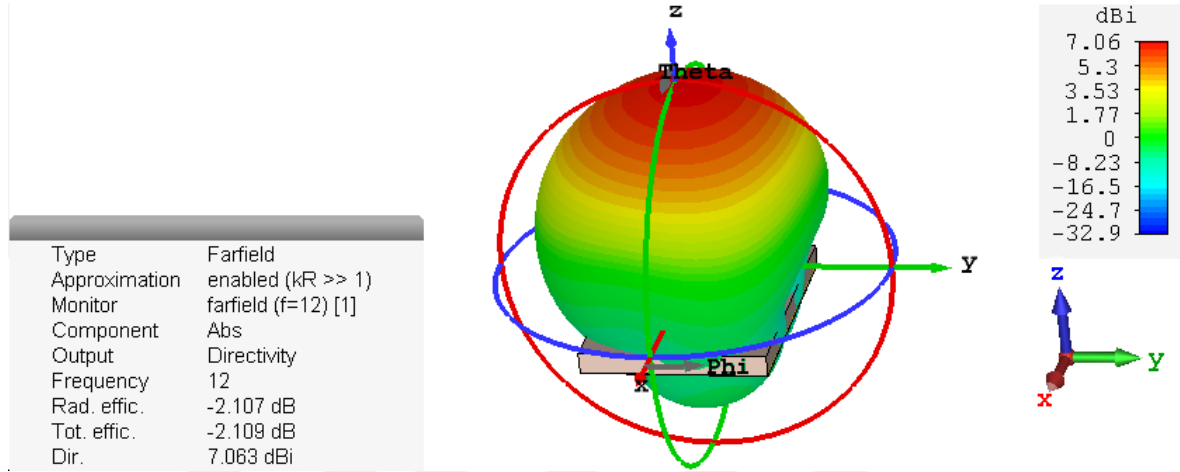
Şekil 4.4. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin giriş empedansı

Şekil 4.4'te değişikliklerin gözlemleneceği frekans aralığı 11-15 GHz olarak belirlenmiştir. Burada giriş empedansının (Z_{in}) belirlenen aralıktaki frekanslara göre değişimi incelenmektedir. Mikroşerit besleme hattının her iki yanında bulunan paralel empedans uyumlaştırma yarıkları, rezonans frekansında 50 Ohm giriş empedansına ulaşılabilmesi için düzenlenmiştir. Empedans uyumlaştırılmasında 50 Ohm'luk probun (konnektörün) empedans değeri için mikroşerit iletim hattının 50 Ohm'luk empedans değeri bölgesine yakın olduğu tespit edilmiştir. 12 GHz rezonans frekansı için empedans değeri $Re(Z_{in})$ değeri 49,43 Ohm ve $Im(Z_{in})$ değeri ise yaklaşık -2,00'dir. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz rezonans frekansında 50 Ohm için empedans uyumluluğu iyi seviyededir.

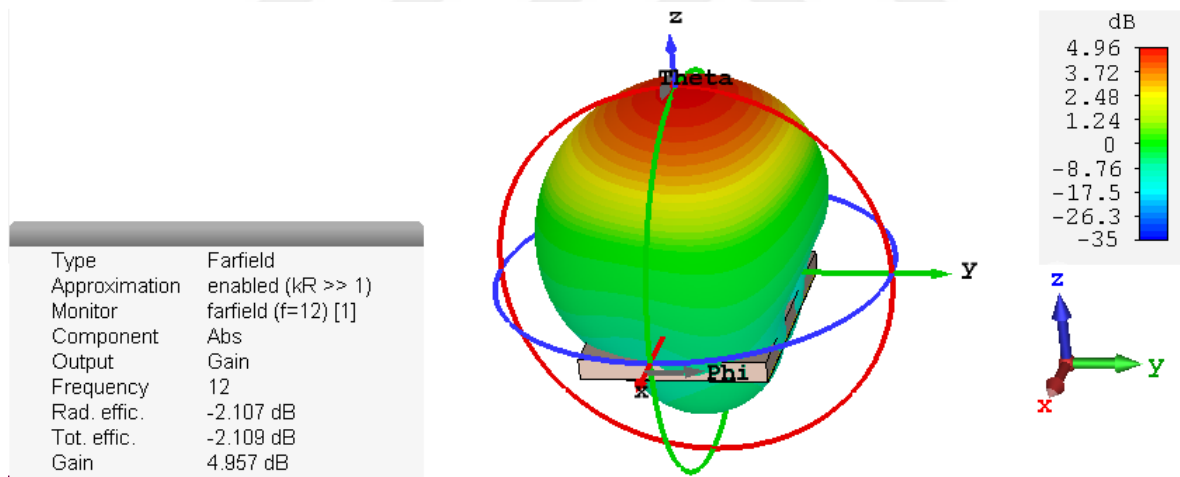


Şekil 4.5. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de yüzey akımı

Şekil 4.5'te referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'deki yüzey akımı gösterilmiştir. Yüzey akımının yamanın -x ve x doğrultusundaki kenar bölgelerinde arttığı gözlemlenmiştir.

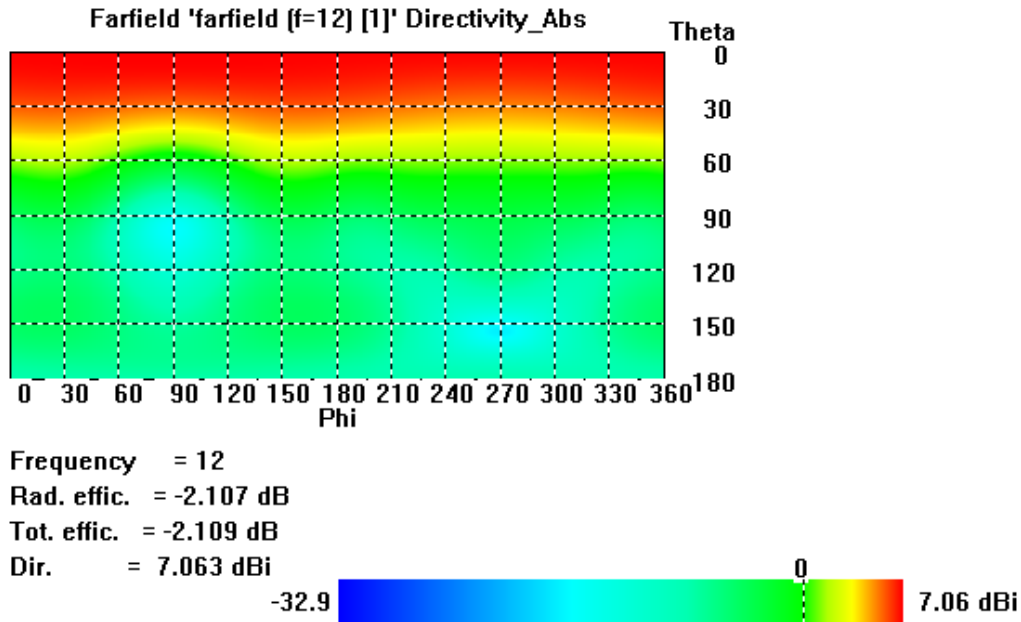


Şekil 4.6. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de yönlülük 3-boyutlu ışımaya örüntüsü

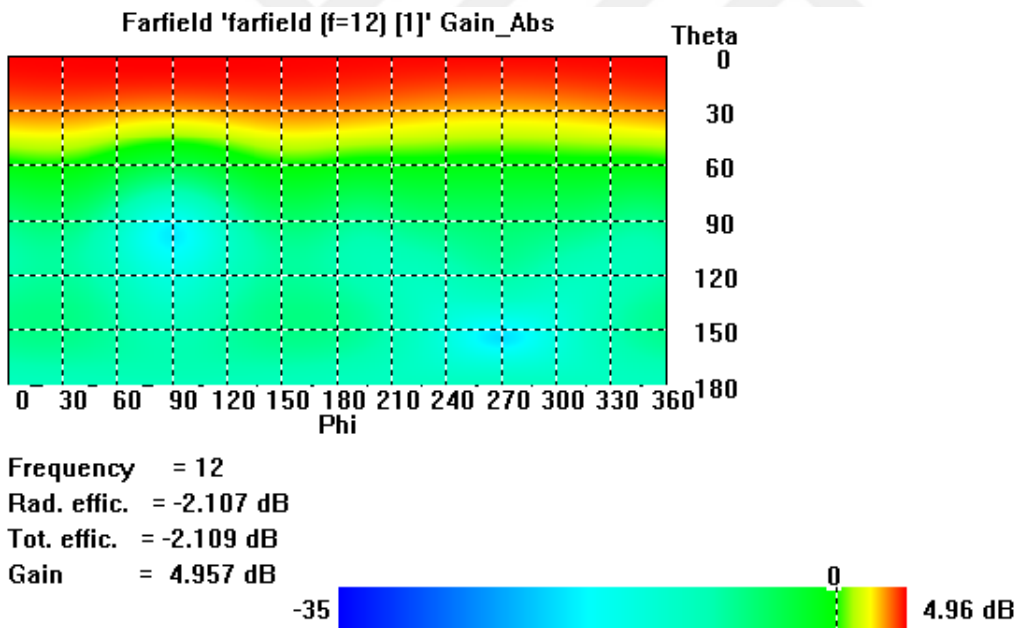


Şekil 4.7. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de kazanç 3-boyutlu ışımaya örüntüsü

Şekil 4.6'da referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz rezonans frekansındaki yönlülük, Şekil 4.7'de ise kazanç 3-boyutlu ışımaya örüntüsü gösterilmiştir. Antenin bir yönde ışımaya yapması isteniyorsa normal ekseninde olabildiğince en yüksek yönlülük ve arka lobunda ise minimum ışımaya şiddeti hedeflenir. Bu durum ışımaya antenin yönlülüğünde saçılmadan daha uzak mesafelerdeki hedeflere doğru gidebilmesini sağlamaktadır. Anten, 12 GHz rezonans frekansı için en fazla ($\varphi = 90^\circ$ ve $\theta = 3^\circ$) 7,06 dBi değerinde yönlülüğe, %61,53 ışımaya verimliliğiyle yaklaşık 4,96 dB değerinde kazançla sahiptir.

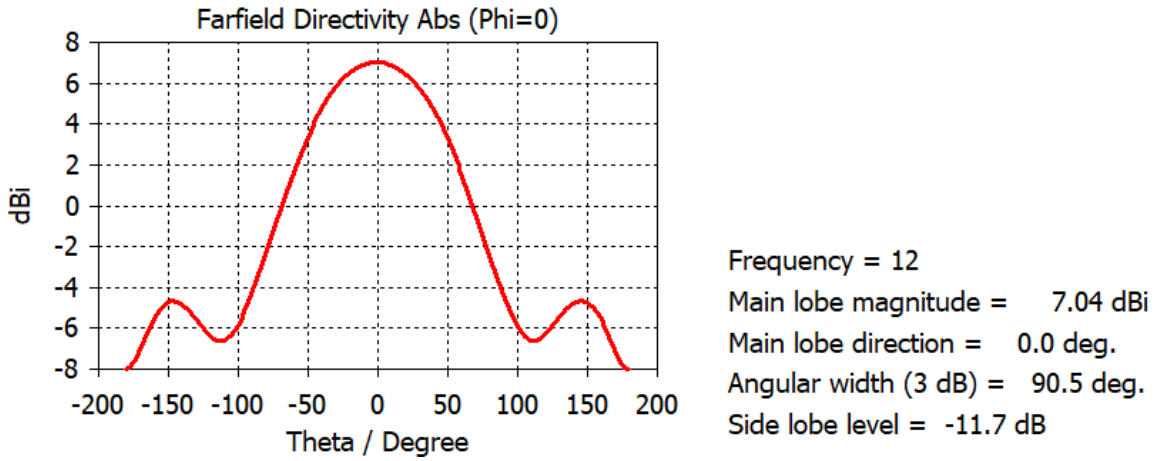


Şekil 4.8. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de yönlülük 2-boyutlu görünümü

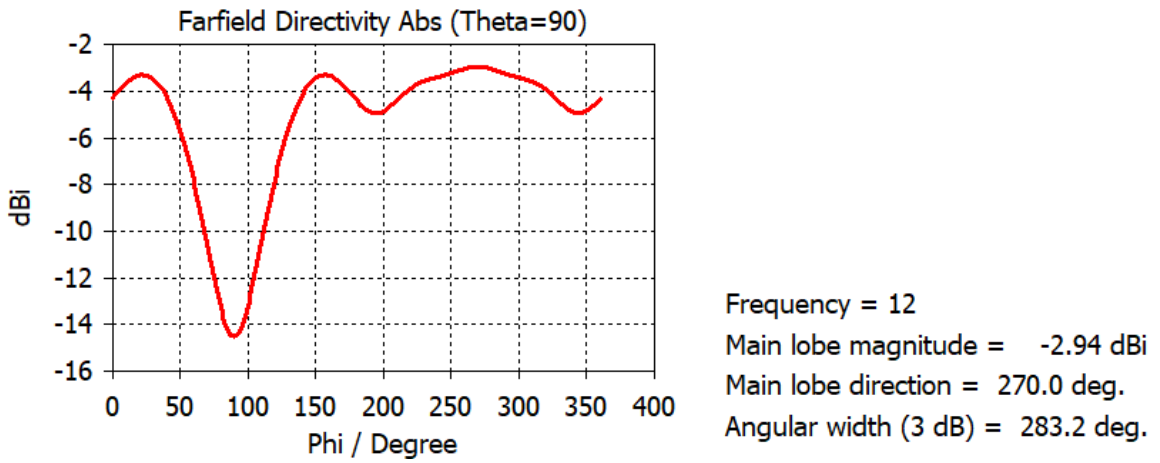


Şekil 4.9. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de kazanç 2-boyutlu görünümü

Şekil 4.8'de 12 GHz rezonans frekansındaki antenin dikey ve yatay düzlemlerdeki yönlülüğü, Şekil 4.9'da ise kazancı 2-boyutlu gösterilmiştir. Küresel koordinat sisteminde, ışınma değerlerini gösteren $\phi = 0^\circ$ (xz-düzlemi) ve $\theta = 90^\circ$ (xy-düzlemi) düzlemleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.10. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü



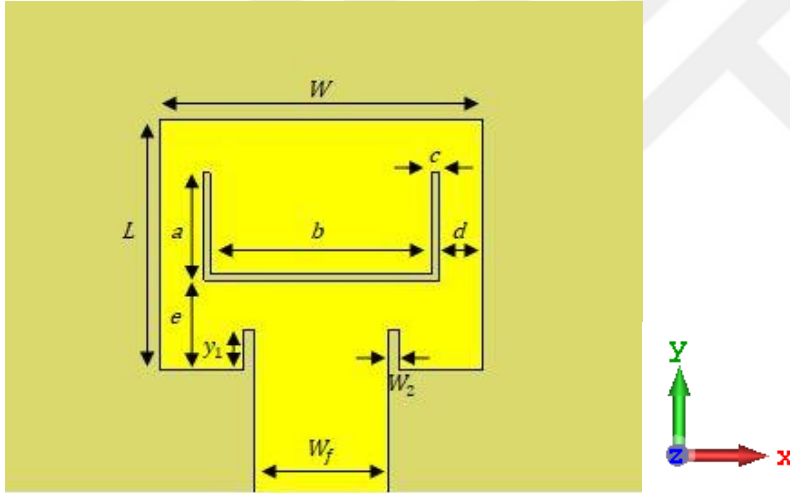
Şekil 4.11. Referans Ku bant mikroşerit yama antenin 12 GHz'de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü

Şekil 4.10'da antenin bulunduğu düzleme dik olan xz -düzlemindeki yönlülüğü gösterilmiştir. Bu düzlemde $\theta = 0^\circ$ yani z doğrultusunda (normali yönünde) 7,04 dBi değerinde ön lob yönlülüğe sahipken arka lobu $\theta = 180^\circ$ doğrultusunda ise ışıma şiddeti -8,00 dBi değerine düşmektedir. Ön lobu ile arka lobu arasında 15,04 dBi değerinde önden arkaya oranı vardır. 12 GHz rezonans frekansı için Şekil 4.10'da $\varphi = 0^\circ$ düzlemine göre en fazla ışımanın $\theta = 0^\circ$ açısı yönünde (7,04 dBi) ve dikey hüzmeye genişliğinin $90,5^\circ$; Şekil 4.11'de ise $\theta = 90^\circ$ düzlemine göre en fazla ışımanın $\varphi = 270^\circ$ açısı yönünde (-2,94 dBi) ve yatay hüzmeye genişliğinin $283,2^\circ$ olduğu görülmektedir.

4.3. U-Yarıklı Ku Bant Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Bu başlık altında $17,8 \times 13,8 \text{ mm}^2$ ölçülerine sahip dielektrik malzeme üzerine tasarlanan referans Ku bant mikroşerit yama antenin ölçülerini değiştirmeden yama üzerinde U-yarık açarak anten düzenlemesi yapılmış ve ilk durumundaki 12 GHz rezonans merkez frekanslı referans antenin sahip olduğu özellikler ile son durumda üzerine U-yarık açılan antenin kazandığı özellikler değerlendirilmiştir. Mikroşerit besleme hattının iki yanında bulunan empedans uyumlaştırma yarıkları kullanılarak mikroşerit besleme hattı ile ışımaya yapan yama arasında empedans uyumlaştırılması sağlanmıştır.

U-yarık boyutları literatür çalışması sonrası denemelerle belirlenmiş ve yama üzerindeki konumu değiştirilip kazandığı yeni karakteristik özellikler de sonraki bölümlerde incelenmiştir.



Şekil 4.12. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama anten

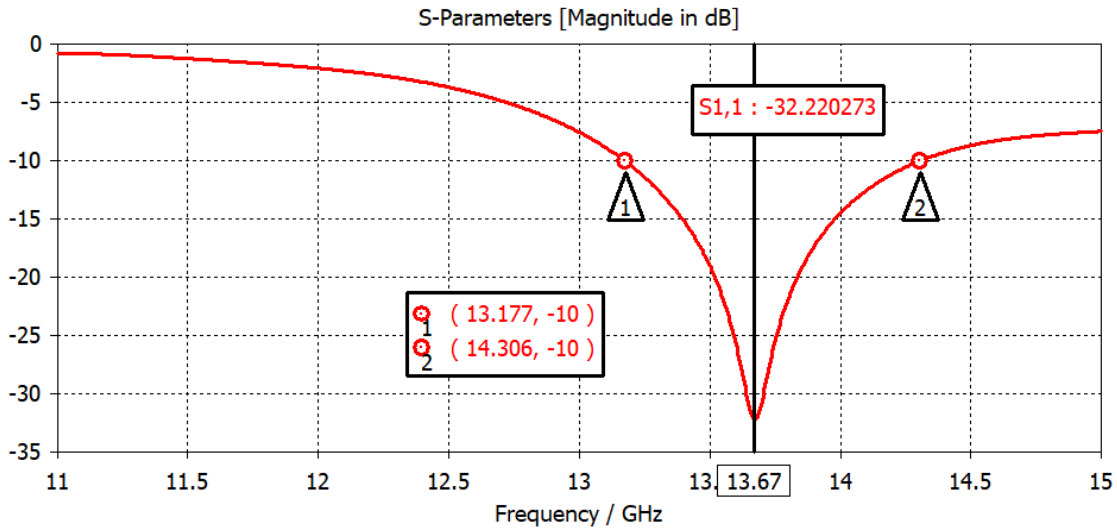
Şekil 4.12'de tasarlanan U-yarıklı mikroşerit yama anten gösterilmiştir. Anten, 12 GHz rezonans merkez frekansında çalışan referans antende olduğu gibi $17,8 \times 13,8 \text{ mm}^2$ boyutlara ve 1,524 mm kalınlığa sahip Rogers RT/duroid 6002 dielektrik malzeme üzerinde tasarlanmıştır. Dielektrik malzeme altında dielektrik malzemenin boyutlarında ve 0,035 mm kalınlığında toprak düzlemi bulunmaktadır. Işıma yapan dikdörtgensel bakır yamanın kalınlığı da 0,035 mm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları

$W_g = W_d$	17,8 mm	y_1	1,1 mm
$L_g = L_d$	13,8 mm	a	3,0 mm
W	8,9 mm	b	6,1 mm
L	6,9 mm	c	0,2 mm
$W_0 = W_f$	3,7 mm	d	1,2 mm
W_2	0,3 mm	e	2,44 mm

Toprak düzleminin ve dielektrik malzemenin boyutları ışınım yapan yamanın boyutlarının iki katı olarak belirlenmiştir. Işınım yapan yama dielektrik malzeme düzleminin merkezindedir.

Tasarımda W , L , W_g , L_g , W_d , L_d , W_f , h , ϵ_r büyüklükleri korunmuş ve antenin boyutları değiştirilmemiştir. Ayrıca a , b , c değerleri U-yarığının boyutlarını ve d , e U-yarığının yama üzerindeki konumunu belirtmektedir. W_2 ve y_1 büyüklükleri empedans uyumlaştırma için kullanılırken mikroşerit besleme genişliği W_f ise 12 GHz rezonans merkez frekanslı referans antenin mikroşerit besleme genişliği W_0 ile aynı değerde alınmış olup karakteristik giriş empedans değeri korunmaya çalışılmıştır.

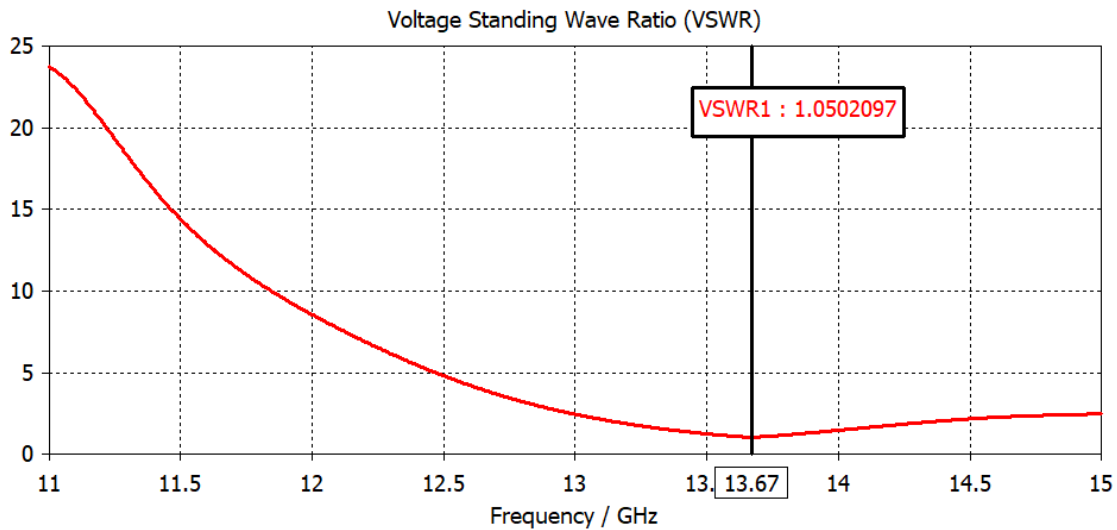


Şekil 4.13. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin geri dönüş kaybı

Şekil 4.13'te tasarlanan U-yarıklı mikroşerit yama antenin S_{11} geri dönüş kaybı gösterilmiştir. Gözlemlenecek değişiklikler için 11-15 GHz frekans aralığı alınmıştır. Antenin ışıyabilmesi için gerekli durumlardan voltaj duran dalga oranı $VSWR \leq 2$ ve geri

dönüş kaybı $S_{11} \leq -10$ dB koşulunun sağlanması gerekir. Aranılan bu koşulların sağlandığı bölge 13,177-14,306 GHz aralığıdır ve antenin rezonans merkez frekansı 13,67 GHz'dir. Bu frekanstaki geri dönüş kaybı $S_{11} = -32,22$ dB olarak görülmektedir. Anten 13,67 GHz rezonans frekansında 13,177-14,306 GHz bölgesinde 1129 MHz bant genişliğine sahiptir. Bu değer %8,26 değerinde bant genişliği anlamına gelir. U-yarıklı mikroşerit yama antenin ışınım yaptığı 13,177-14,306 GHz frekans aralığı, 12-18 GHz değerleri arasındaki Ku bant frekans bölgesi içerisinde yer almaktadır.

Referans olarak alınan 12 GHz rezonans frekansında çalışan Ku bant mikroşerit yama anten, üzerinde U-yarığı oluşturulduktan sonra U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antene dönüşmüştür. Yeni antenin merkez frekansı 1670 MHz pozitif yönde kayarak 13,67 GHz değerine artmış, bant genişliği ise 588 MHz artarak 1129 MHz olmuştur.

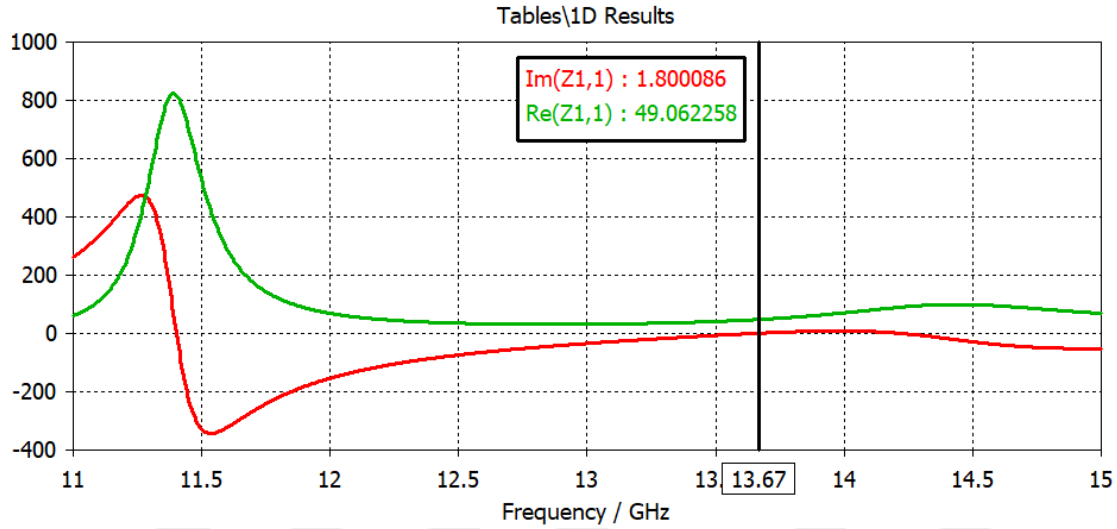


Şekil 4.14. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin VSWR grafiği

Şekil 4.14'te değişikliklerin gözlemleneceği frekans aralığı 11-15 GHz olarak belirlenmiştir. Bu aralıkta voltaj duran dalga oranı VSWR değişimi incelenmektedir. VSWR değeri, $1 \leq \text{VSWR} < \infty$ aralığında değişir. Antenin iletimde olma şartlarından biri olan $\text{VSWR} \leq 2$ 'nin sağlandığı bölgede empedans uyumunun ışınım yapabilecek kadar uyumlu olduğu söylenebilir. Ulaşılmaya çalışılan ve idealde en uygun empedans değerinin sağlandığı tam uyumluluk durumu $\text{VSWR} = 1$ olduğu bölgedir. Bu durumda iletim hattından antene gelen güçte geri yansıma yoktur denilebilir. Antenin bant genişliği içerisinde voltaj duran dalga oranı değerlerinin 1'e yakın çok küçük değerler olduğu, mikroşerit iletim

hattından geri yansımaların minimize edildiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.14'te rezonans frekansı 13,67 GHz için voltaj duran dalga oranı 1,05 olarak tespit edilmiştir.

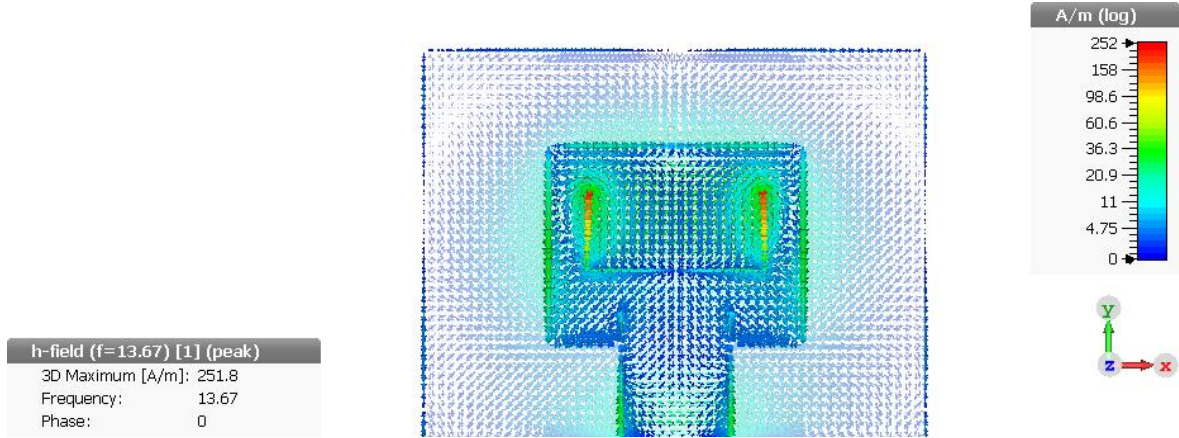
VSWR, U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama anten modelinde de 1 değerine çok yakındır. Giriş empedans uyumunun U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin rezonans merkez frekansında da iyi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin giriş empedansı

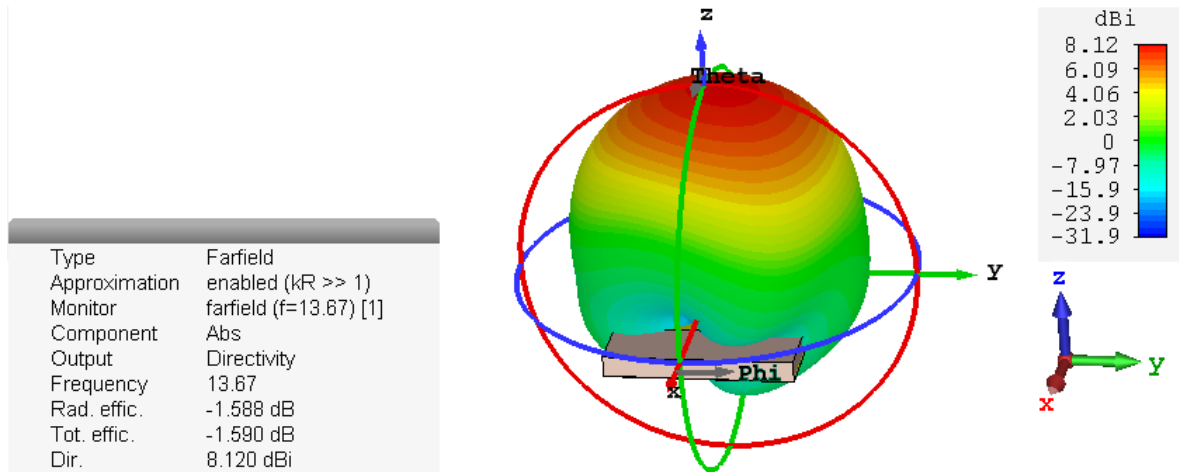
Şekil 4.15'te değişikliklerin gözlemleneceği frekans aralığı 11-15 GHz olarak belirlenmiştir. Burada giriş empedansı Z_{in} değerinin belirlenen aralıktaki frekanslara göre değişimi incelenmektedir. Mikroşerit iletim hattının her iki yanında bulunan paralel empedans uyumlaştırma yarıkları, rezonans frekansında 50 Ohm giriş empedansına ulaşılabilmesi için düzenlenmiştir. Empedans uyumlaştırılmasında mikroşerit iletim hattının empedans değerinin, kullanılan 50 Ohm'luk probun (konnektörün) empedans değerine yakın olduğu tespit edilmiştir.

13,67 GHz rezonans frekansı için empedans değeri $Re(Z_{in})$ değeri 49,06 Ohm ve $Im(Z_{in})$ değeri ise 1,80'dir. Burada $Re(Z_{in})$ değerinin 50 Ohm değerine çok yakın olduğu ve $Im(Z_{in})$ değerinin ise ihmal edilebilecek kadar küçük bir değere sahip olduğu görülmektedir. Giriş empedans değerinin anten empedans uyumlaştırması için iyi olduğu söylenebilir.

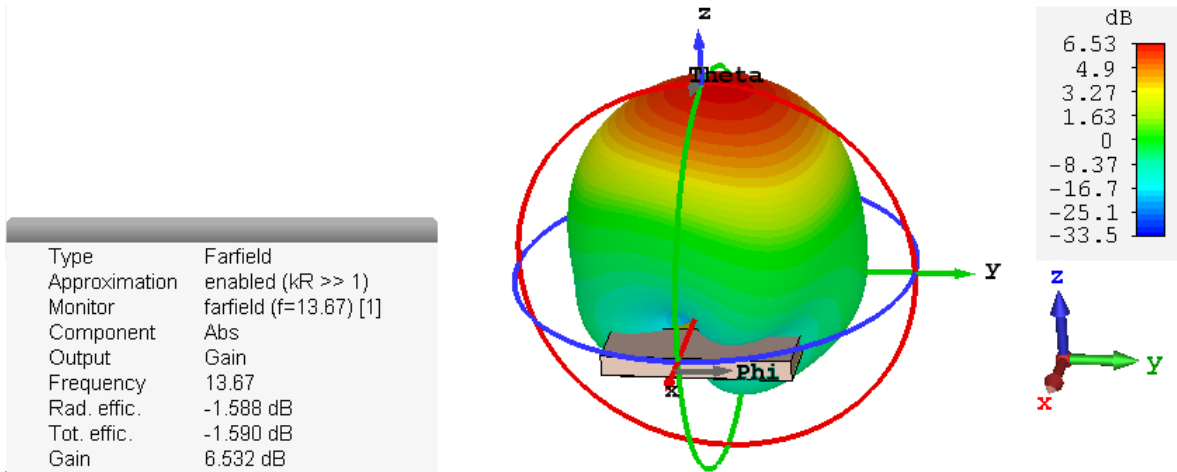


Şekil 4.16. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de yüzey akımı

Şekil 4.16'da U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'deki yüzey akımı gösterilmiştir. Akımın özellikle U-yarıklı yapının yan kollarının üst bölgesine doğru arttığı gözlemlenmiştir.

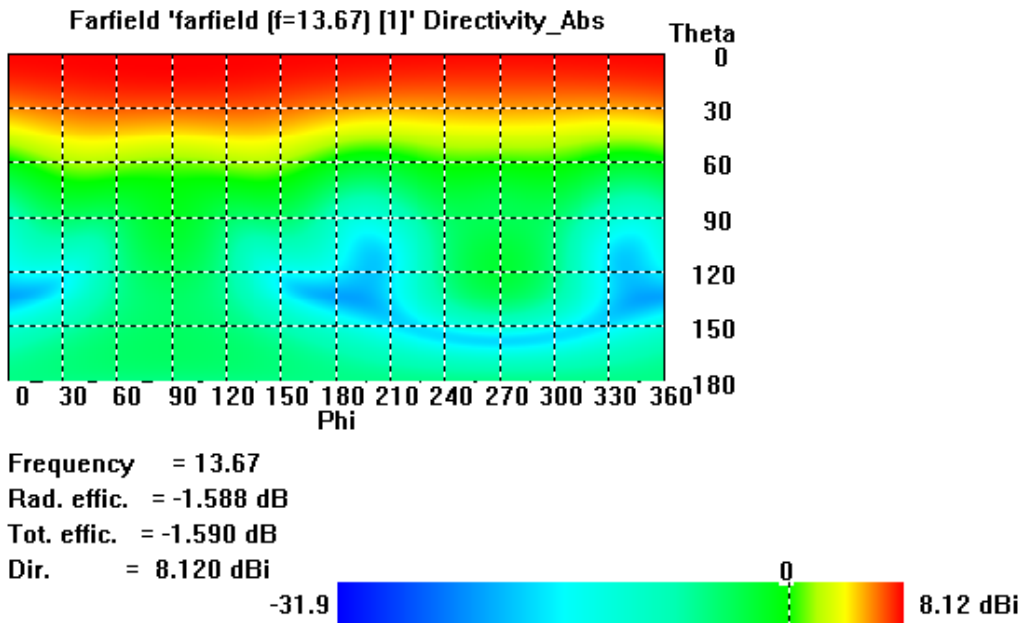


Şekil 4.17. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de yönlülük 3-boyutlu ışınma örüntüsü

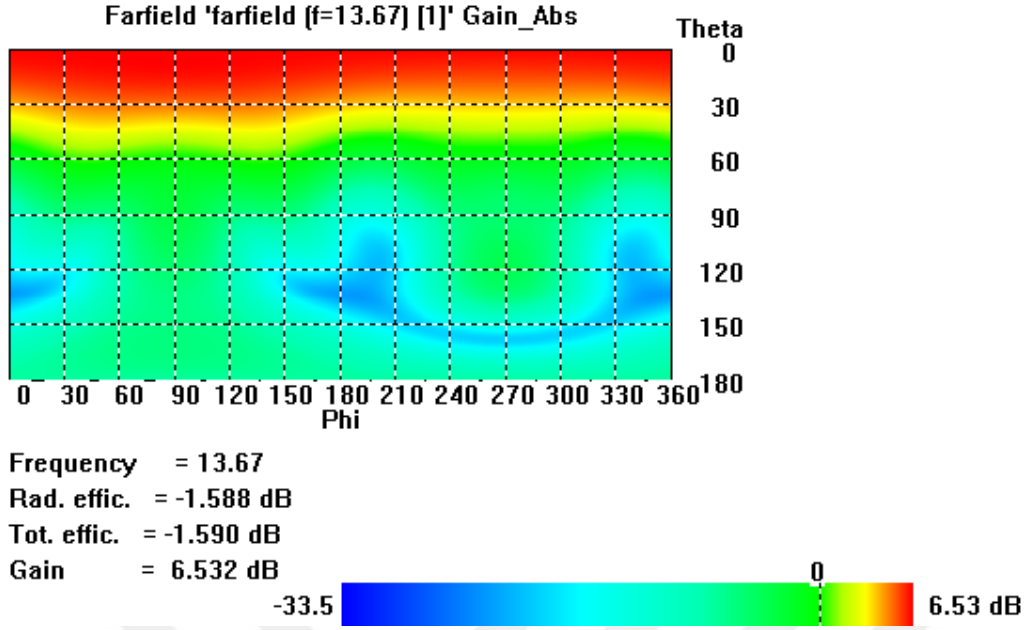


Şekil 4.18. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz’de kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü

Şekil 4.17’de U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz rezonans frekansındaki yönlülük, Şekil 4.18’de ise kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Antenin bir yönde ışınma yapması isteniyorsa normali ekseninde olabildiğince en yüksek yönlülük ve arka lobunda ise minimum ışınma şiddeti hedeflenir. Bu durum ışınmanın antenin yönlülüğünde saçılmadan daha uzak mesafelerdeki hedeflere doğru gidebilmesini sağlar. Anten 13,67 GHz rezonans frekansında en fazla ($\varphi = 90^\circ$ ve $\theta = 6^\circ$) 8,12 dBi değerinde yönlülüğe, %69,34 civarında ışınma verimliliğiyle yaklaşık 6,53 dB değerinde kazançta sahiptir.

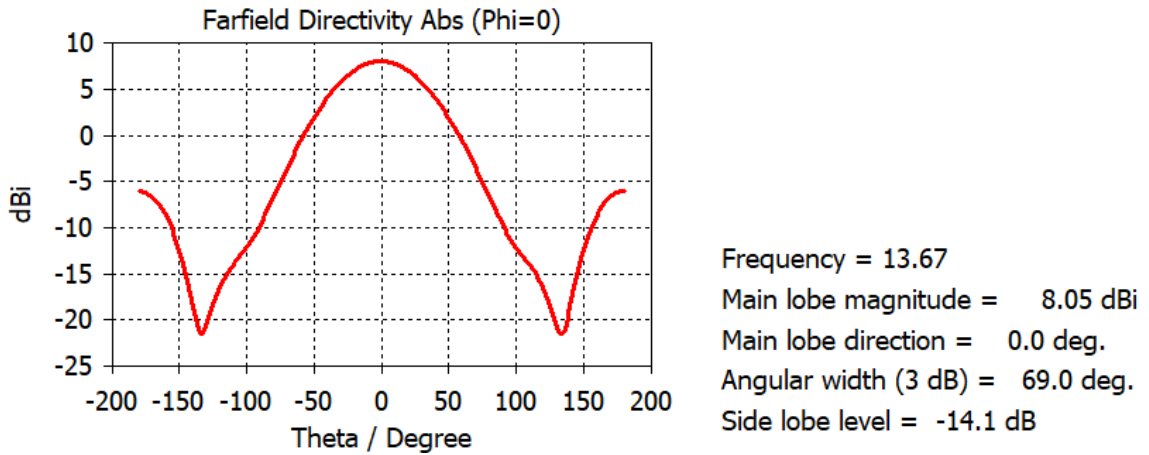


Şekil 4.19. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz’de yönlülük 2-boyutlu görünümü

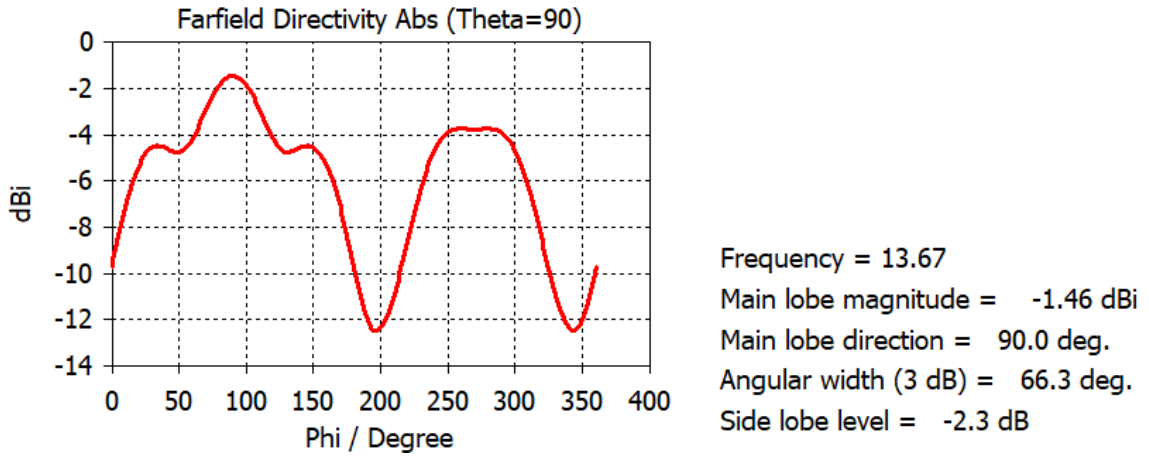


Şekil 4.20. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de kazanç 2-boyutlu görünümü

Şekil 4.19'da 13,67 GHz rezonans frekansındaki antenin dikey ve yatay düzlemlerdeki yönlülüğü, Şekil 4.20'de ise kazancı 2-boyutlu gösterilmiştir. Küresel koordinat sisteminde, ışıma değerlerini gösteren $\varphi = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ düzlemleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.21. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü



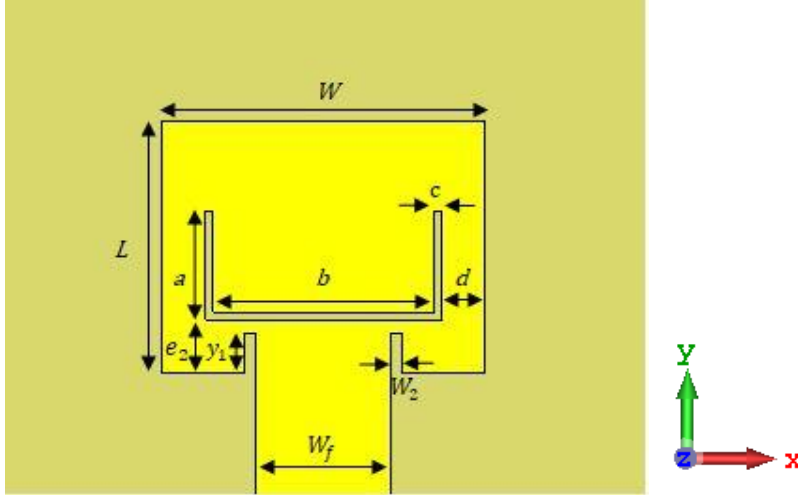
Şekil 4.22. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin 13,67 GHz'de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü

Şekil 4.21'de antenin bulunduğu düzleme dik olan xz-düzlemindeki antenin yönlülüğü gösterilmiştir. Bu düzlemde $\theta = 0^\circ$ yani z-doğrultusunda 8,05 dBi değerinde yönlülüğe sahipken arka lobu $\theta = 180^\circ$ doğrultusunda ise ışıma şiddeti -6,01 dBi değerine düşmektedir. Ön lobu ile arka lobu arasında 14,06 dBi değerinde önden arkaya oranı vardır. 13,67 GHz rezonans frekansı için Şekil 4.21'de $\varphi = 0^\circ$ düzlemine göre en fazla ışımamanın $\theta = 0^\circ$ açısı yönünde (8,05 dBi) ve dikey hüzmeye genişliğinin $69,0^\circ$; Şekil 4.22'de ise $\theta = 90^\circ$ düzlemine göre $\varphi = 90^\circ$ açısı yönünde (-1,46 dBi) ve yatay hüzmeye genişliğinin $66,3^\circ$ olduğu görülmektedir.

U-yarıklı anten, elde edilen bulgulara göre 12 GHz rezonans frekansında çalışan referans antenden daha yüksek yönlülüğe, ışıma verimliliği ve kazançla sahiptir.

4.4. U-Yarıklı Yeri Değiştirilmiş Ku Bant Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Burada önceki bölümde tasarlanan U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antendeki yama, dielektrik malzeme ve toprak düzlemin boyutları değiştirilmeden U-yarığının boyutları da korunarak sadece U-yarıklı yerinin -y doğrultusu yönünde 1 mm taşınmasının anten ışımaya etkisi üzerinde durulmuştur. Mikroşerit besleme hattının iki yanındaki empedans uyumlaştırma yarıkları ile empedans uyumlaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 4.23. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama anten

U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama anten, referans Ku bant mikroşerit yama antende olduğu gibi $17,8 \times 13,8 \text{ mm}^2$ boyutlara ve 1,524 mm kalınlığa sahip Rogers RT/duroid 6002 dielektrik malzeme üzerine tasarlanmıştır. Dielektrik malzeme altında dielektrik malzemenin boyutlarında ve 0,035 mm kalınlığında topraklama düzlemi bulunmaktadır. Işıma yapan U-yarık yeri değiştirilmiş dikdörtgensel mikroşerit yama ise 0,035 mm kalınlığındaki bakırdır.

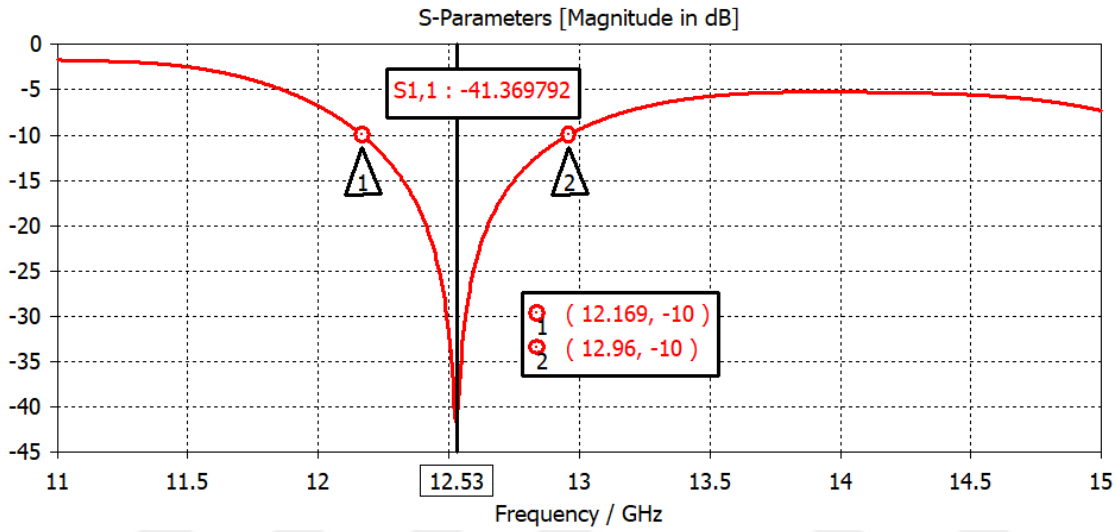
Çizelge 4.3. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları

$W_g = W_d$	17,8 mm	y_1	1,1 mm
$L_g = L_d$	13,8 mm	a	3,0 mm
W	8,9 mm	b	6,1 mm
L	6,9 mm	c	0,2 mm
$W_0 = W_f$	3,7 mm	d	1,2 mm
W_2	0,3 mm	e_2	1,44 mm

Toprak düzleminin ve dielektrik malzemenin boyutları ışına yapan yamanın boyutlarının iki katı olarak belirlenmiştir. Işıma yapan yama dielektrik malzeme düzleminin merkezindedir.

Tasarımda $W, L, W_g, L_g, W_d, L_d, W_f, h, \epsilon_r$ büyüklükleri korunmuştur. U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin ve U-yarığının boyutları değiştirilmemiştir. Ayrıca a, b, c , değerleri açılan U-yarığın boyutlarını ve d ve e_2 U-yarığının yama üzerindeki konumunu belirtmektedir. d , U-yarığının yan kollarının yamanın kenarlarına olan uzaklığını

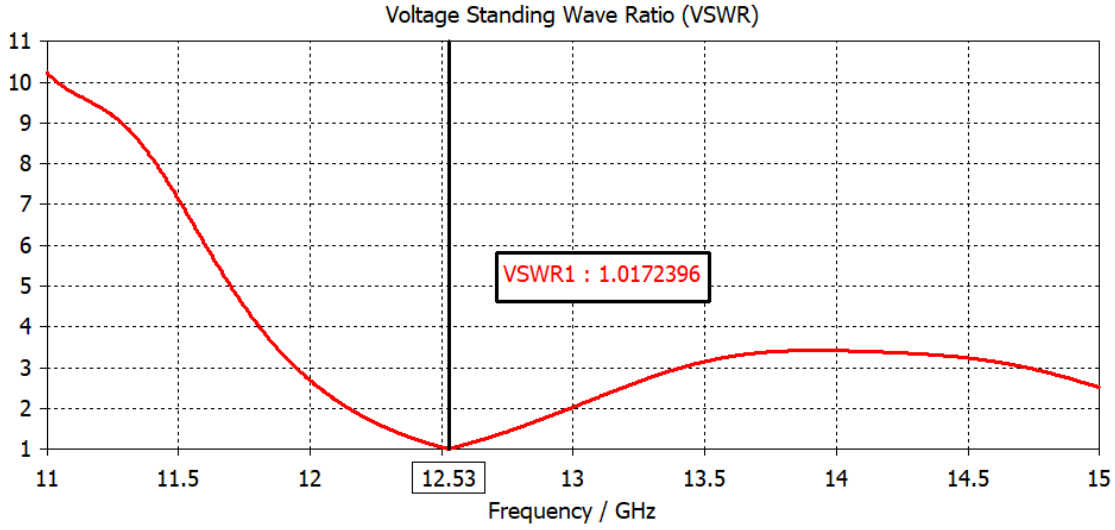
göstermektedir ve bu değer de değiştirilmemiştir. e_2 ise U-yarığı tabanının yamanın $-y$ doğrultusu tarafındaki kenarına olan uzaklığını göstermektedir. Bu değer e' 'ye göre yama üzerinde 1 mm $-y$ doğrultusu yönünde taşınmıştır. W_2 ve y_1 büyüklükleri ise empedans uyumlaştırma için kullanılırken mikroşerit besleme genişliği W_f ise referans antenin besleme genişliği W_0 değeri ile aynı değerde alınmış olup karakteristik giriş empedans değeri korunmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.24. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin geri dönüş kaybı

Şekil 4.24'te tasarlanan U-yarık yeri $-y$ eksenine doğru 1 mm taşınan U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama antenin S_{11} geri dönüş kaybı gösterilmiştir. Gözlemlenecek değişiklikler için 11-15 GHz frekans aralığı seçilmiştir. Antenin ışıyabilmesi için istenen durumlardan $VSWR \leq 2$ ve geri dönüş kaybı $S_{11} \leq -10$ dB koşulunun sağlanması gerekir. Aranılan bu değerlerin sağlandığı bölge 12,169-12,960 GHz aralığıdır ve anten rezonans merkez frekansı 12,53 GHz'dir. Bu frekansta geri dönüş kaybı $S_{11} = -41,37$ dB olarak görülmektedir. Anten 12,53 GHz rezonans frekansında 12,169-12,960 GHz bölgesinde 791 MHz bant genişliğine sahiptir. Bu değer %6,31 değerinde bant genişliği anlamına gelir. U-yarık yeri değiştirilmiş mikroşerit yama antenin ışıma yaptığı 12,169-12,960 GHz frekans aralığı, 12-18 GHz arasındaki Ku bant frekans bölgesi içerisinde yer almaktadır.

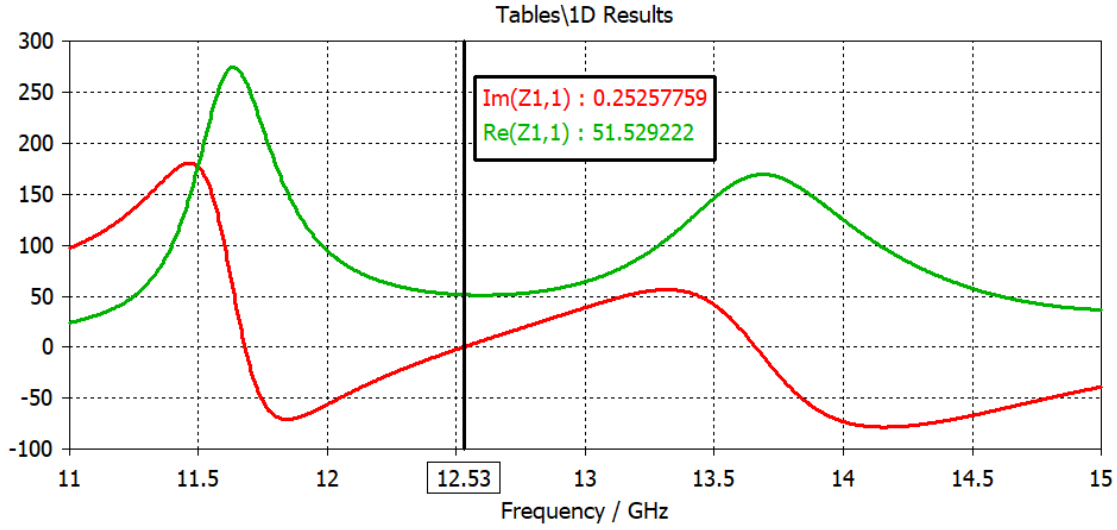
Antenin rezonans merkez frekansı, referans olarak alınan 12 GHz Ku bant mikroşerit yama antenin rezonans merkez frekansına göre 530 MHz pozitif yönde kayarak 12,53 GHz değerine artmış, bant genişliği ise 250 MHz artarak 791 MHz olmuştur.



Şekil 4.25. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin VSWR grafiği

Şekil 4.25'te değişikliklerin gözlemleneceği frekans aralığı 11-15 GHz olarak belirlenmiştir. Bu aralıkta voltaj duran dalga oranı VSWR değişimi incelenmektedir. VSWR değeri, $1 \leq \text{VSWR} < \infty$ aralığında değişir. Antenin iletimde olma şartlarından biri olan $\text{VSWR} \leq 2$ 'nin sağlandığı bölgede empedans uyumunun ışıma yapabilecek kadar uyumlu olduğu söylenebilir. Ulaşılmaya çalışılan ve idealde en uygun empedans değerinin sağlandığı tam uyumluluk durumu voltaj duran dalga oranının $\text{VSWR} = 1$ olduğu bölgedir. Bu durumda iletim hattından antene gelen güçte geri yansıma yoktur denilebilir. Antenin bant genişliği içerisinde voltaj duran dalga oranı değerlerinin 1'e yakın çok küçük değerler olduğu, empedans uyumlaştırma çalışmasının aranan rezonans frekansında başarılı olarak sağlandığı görülmektedir. Burada mikroşerit besleme hattından geri yansımaların minimize edildiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.25'teki grafikte rezonans frekansı 12,53 GHz için voltaj duran dalga oranı yaklaşık 1,02 olarak tespit edilmiştir.

VSWR, U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin rezonans frekansında 1 değerine çok yakındır. Giriş empedans uyumunun U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin rezonans frekansında da iyi olduğu söylenebilir.

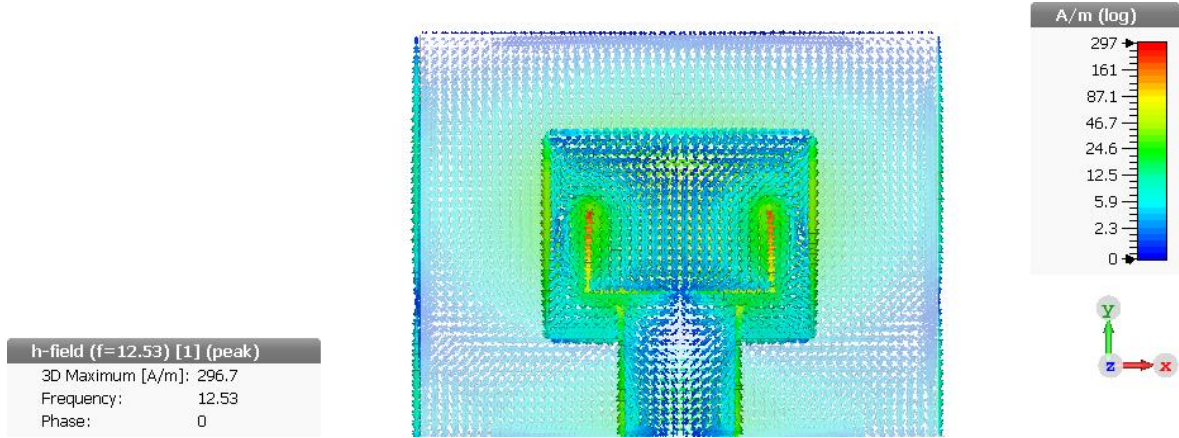


Şekil 4.26. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin giriş empedansı

Şekil 4.26’da değişikliklerin gözlemleneceği frekans aralığı 11-15 GHz olarak belirlenmiştir. Burada giriş empedansının Z_{in} belirlenen aralıktaki frekanslara göre değişimi incelenmektedir. Mikroşerit iletim hattının her iki yanında bulunan paralel empedans uyumlaştırma yarıkları, rezonans frekansında 50 Ohm giriş empedansına ulaşılabilmesi için düzenlenmiştir. Empedans uyumlaştırılmasında mikroşerit iletim hattının 50 Ohm’luk empedans değerinin, kullanılan probun (konnektörün) 50 Ohm’luk empedans değerine yakın olduğu tespit edilmiştir.

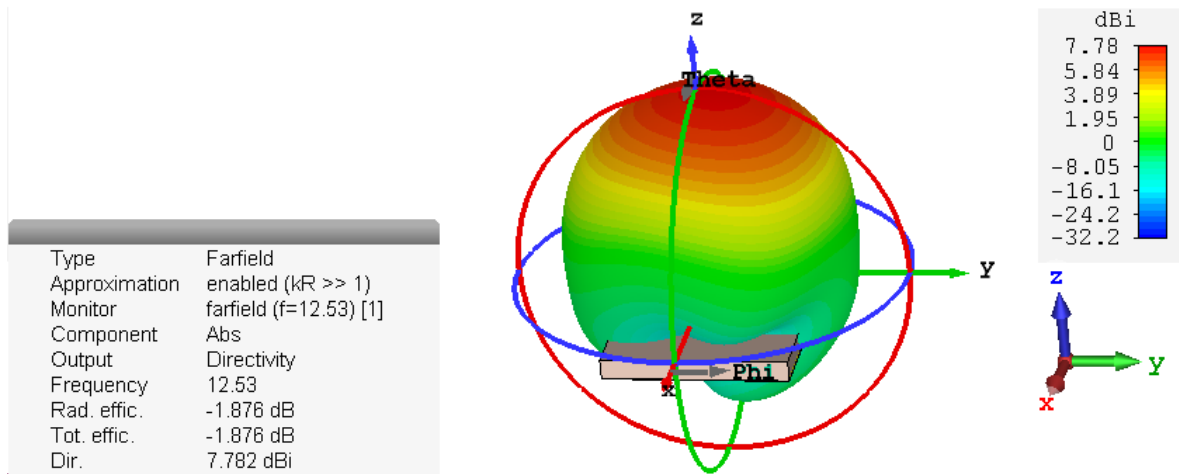
12,53 GHz rezonans frekansı için empedans değeri $Re(Z_{in})$ 51,53 Ohm ve $Im(Z_{in})$ değeri ise 0,25’dir. Burada $Re(Z_{in})$ değerinin 50 Ohm değerine çok yakın olduğu ve $Im(Z_{in})$ değerinin ise ihmal edilebilecek kadar küçük bir değere sahip olduğu görülmektedir.

U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz rezonans frekansı için empedans uyumluluğu iyi seviyededir.

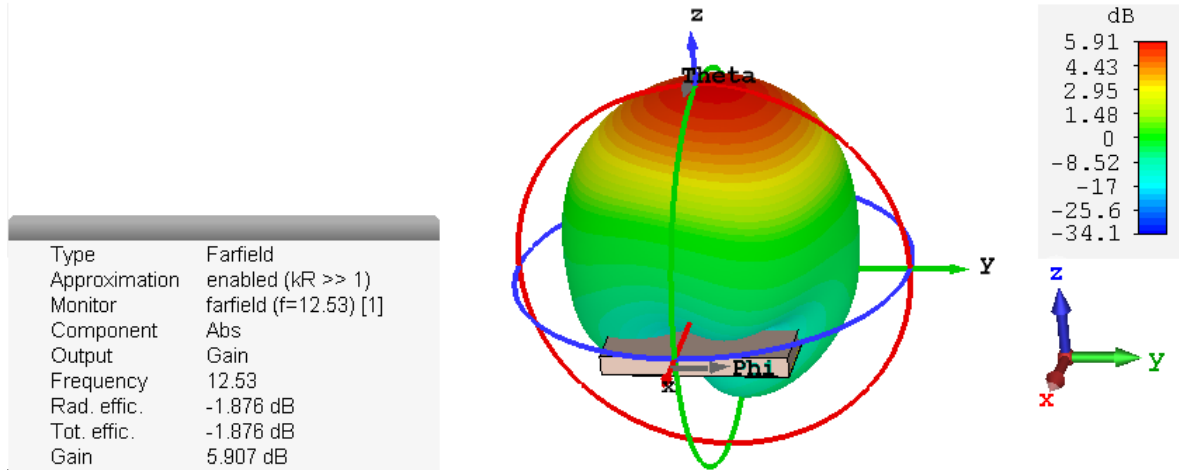


Şekil 4.27. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’de yüzey akımı

Şekil 4.27’de U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’deki yüzey akımı gösterilmiştir. Akımın özellikle U-yarıklı yapının yan kollarının üst bölgesine doğru arttığı gözlemlenmiştir.

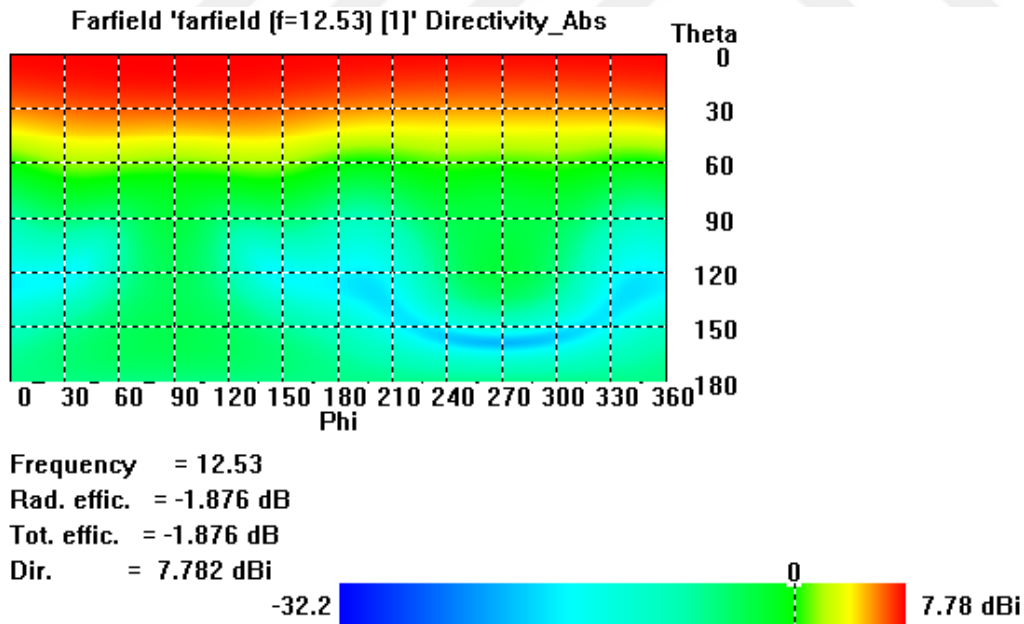


Şekil 4.28. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’de yönlülük 3-boyutlu ışınma örüntüsü

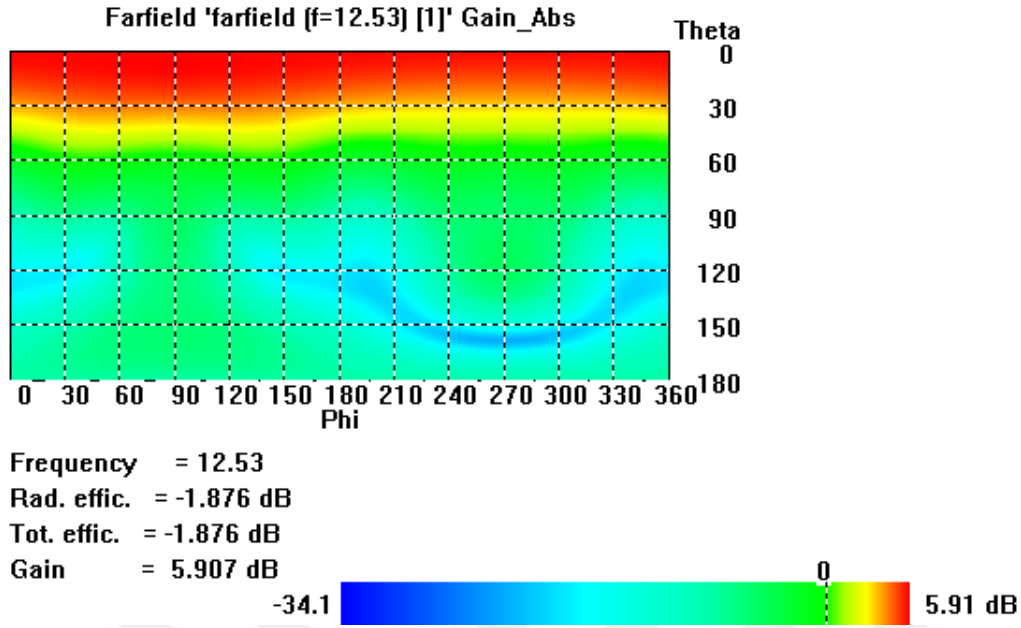


Şekil 4.29. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’de kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü

Şekil 4.28’de U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz rezonans frekansındaki yönlülük, Şekil 4.29’da ise kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Anten 12,53 GHz rezonans frekansında en fazla ($\varphi = 90^\circ$ ve $\theta = 6^\circ$) 7.78 dBi yönlülüğe, %64,92 ışınma verimliliğiyle 5,91 dB değerinde kazançta sahiptir.

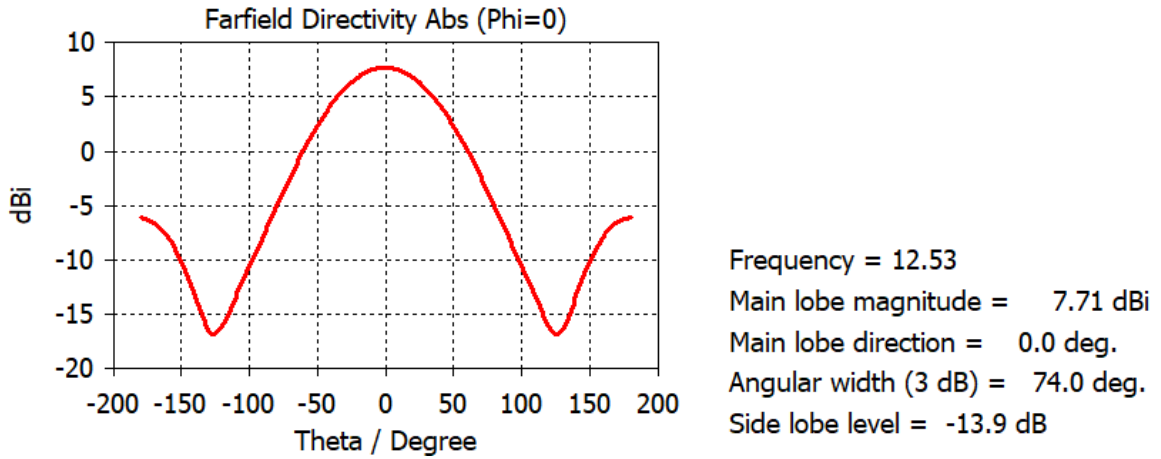


Şekil 4.30. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’de yönlülük 2-boyutlu görünümü

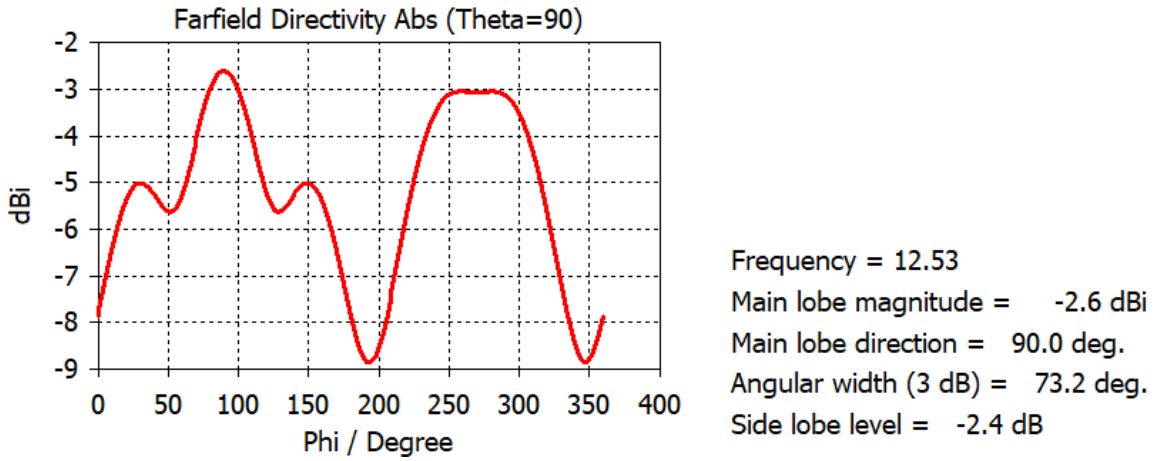


Şekil 4.31. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’de kazanç 2-boyutlu görünümü

Şekil 4.30’da 12,53 GHz rezonans frekansındaki antenin dikey ve yatay düzlemlerdeki yönlülüğü, Şekil 4.31’de ise kazancı 2-boyutlu gösterilmiştir. Küresel koordinat sisteminde, ışınma değerlerini gösteren $\varphi = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ düzlemleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.32. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz’de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü



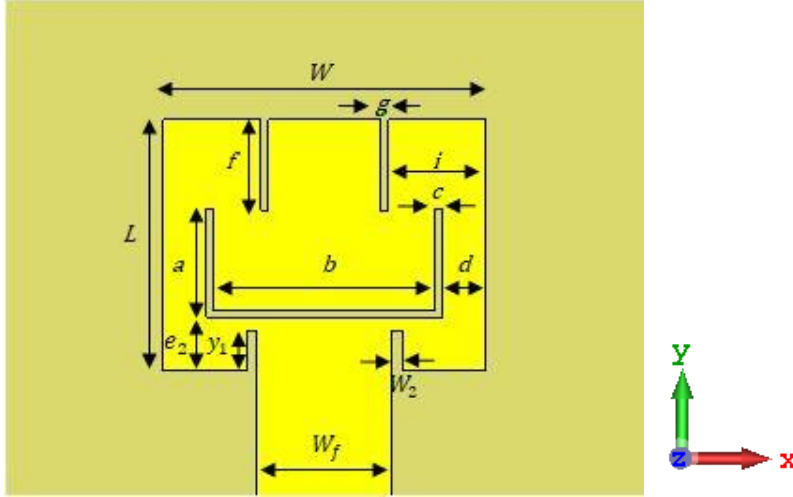
Şekil 4.33. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz'de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü

Şekil 4.32'de antenin bulunduğu düzleme dik olan xz-düzlemindeki antenin yönlülüğü gösterilmiştir. Bu düzlemde $\theta = 0^\circ$ yani z doğrultusunda (normali yönünde) 7,71 dBi değerinde yönlülüğe sahipken arka lobu $\theta = 180^\circ$ doğrultusunda ise ışıma şiddeti -6,15 dBi değerine düşmektedir. Ön lobu ile arka lobu arasında 13,86 dBi değerinde önden arkaya oranı vardır. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz rezonans frekansı için Şekil 4.32'de $\varphi = 0^\circ$ düzlemine göre en fazla ışımının $\theta = 0^\circ$ açısı yönünde (7,71 dBi) ve dikey hüzmeye genişliğinin $74,0^\circ$; Şekil 4.33'te ise $\theta = 90^\circ$ düzlemine göre $\varphi = 90^\circ$ açısı yönünde (-2,6 dBi) ve yatay hüzmeye genişliğinin $73,2^\circ$ olduğu görülmektedir.

U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama anten, referans Ku bant mikroşerit yama antene göre daha yüksek yönlülüğe, ışıma verimliliği ve kazançta sahiptir.

4.5. U-Yarık Yeri Değiştirilmiş Ku Bant Mikroşerit Yama Antenin Dikey Yarıklı Tasarımı

Bu bölümde U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yamanın, dielektrik malzeme ve toprak düzleminin boyutları değiştirilmeden yamanın üst bölgesinde y-eksenine göre simetrik dikey yarıklar açılmasının anten ışımına etkisi üzerinde durulmuştur. Mikroşerit besleme hattının iki yanındaki empedans uyumlaştırma yarıkları kullanılarak mikroşerit besleme ile ışıma yapan yama arasında empedans uygunlaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 4.34. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antende dikey yarıklar

U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama anten, 12 GHz rezonans merkez frekansında çalışan referans Ku bant mikroşerit yama antende olduğu gibi $17,8 \times 13,8 \text{ mm}^2$ boyutlara ve 1,524 mm kalınlığa sahip Rogers RT/duroid 6002 dielektrik malzeme üzerine tasarlanmıştır. Dielektrik malzeme altında dielektrik malzemenin boyutlarında ve 0,035 mm kalınlığında topraklama düzlemi bulunmaktadır. Işıma yapan dikdörtgensel mikroşerit yama ise 0,035 mm kalınlığında bakırdır.

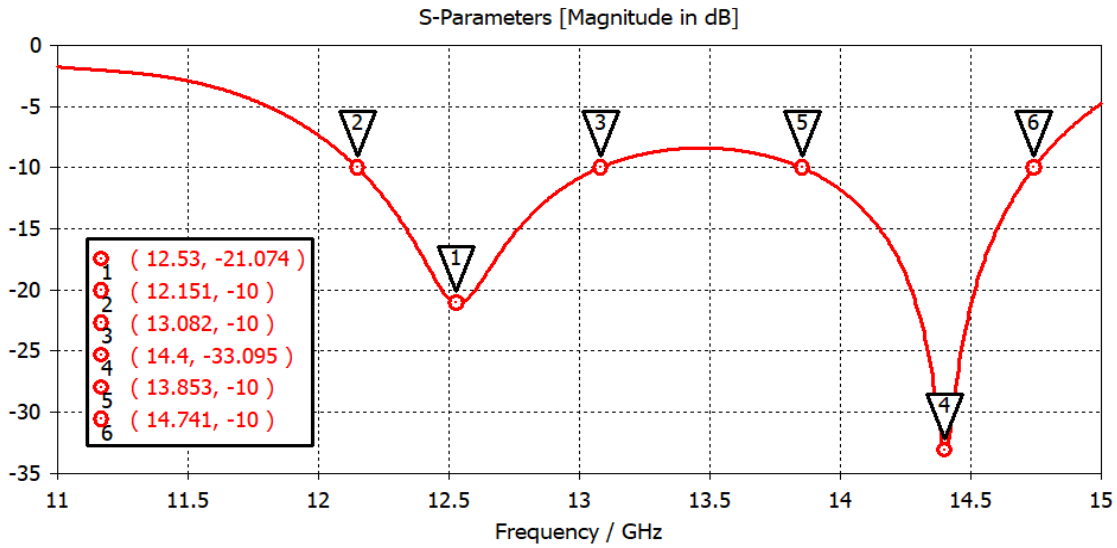
Çizelge 4.4. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin ve bu anten üzerinde oluşturulan dikey yarıkların boyutları

$W_g = W_d$	17,8 mm	W_2	0,3 mm	d	1,2 mm
$L_g = L_d$	13,8 mm	y_1	1,1 mm	e_2	1,44 mm
W	8,9 mm	a	3 mm	f	2,5 mm
L	6,9 mm	b	6,1 mm	g	0,2 mm
$W_0 = W_f$	3,7 mm	c	0,2 mm	i	2,7 mm

Toprak düzleminin ve dielektrik malzemenin boyutları ışına yapan yamanın boyutlarının iki katı olarak belirlenmiştir. Işıma yapan yama dielektrik malzeme düzleminin merkezindedir.

Tasarımda $W, L, W_g, L_g, W_d, L_d, W_f, h, \epsilon_r$ büyüklükleri korunmuştur. Ku bant mikroşerit yama antenin ve U-yarığının boyutları değiştirilmemiştir. Ayrıca a, b, c değerleri açılan U-yarığının boyutlarını ve d, e_2 yarığın yama üzerindeki konumunu belirtmektedir. d , U-yarığının yan kollarının yamanın kenarlarına olan uzaklığını göstermektedir ve bu değer

de değiştirilmemiştir. e_2 ise U-yarığı tabanının yamanın $-y$ doğrultusu tarafındaki kenarına olan uzaklığını göstermektedir. Bu değer e' 'ye göre $-y$ yönünde yama üzerinde 1 mm taşınmıştır. f üstten açılan dikey yarıkların uzunluğu, g ise üstten açılan dikey yarıkların genişliğidir. W_2 ve y_1 büyüklükleri ise empedans uyumlaştırma için kullanılırken mikroşerit besleme genişliği W_f ise referans antenin besleme genişliği W_0 değeri ile aynı değerde alınmış olup giriş empedans değeri korunmaya çalışılmıştır.



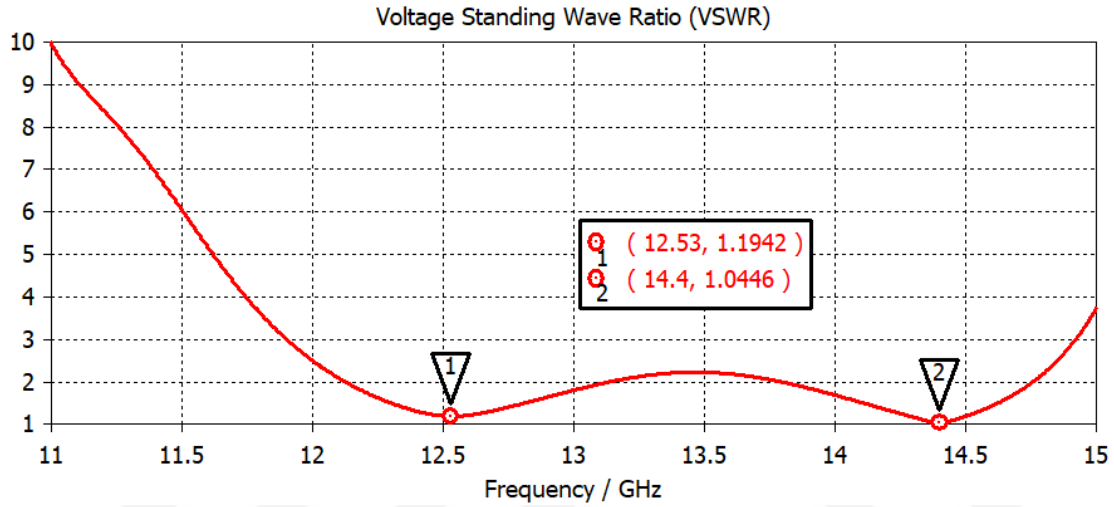
Şekil 4.35. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açıldıktan sonra geri dönüş kaybı

Şekil 4.35'te tasarlanan U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin üst bölgesinde y -eksenine göre simetrik dikey yarıklar oluşturduktan sonra S_{11} geri dönüş kaybı gösterilmiştir. Gözlemlenecek değişiklikler için 11-15 GHz frekans aralığı seçilmiştir. Antenin ışıyabilmesi için istenen durumlar $VSWR \leq 2$ ve geri dönüş kaybı $S_{11} \leq -10$ dB koşulunun sağlanmasıdır. Aranan bu değerlerin sağlandığı birinci bölge 12,151-13,082 GHz aralığıdır ve antenin birinci bölge rezonans merkez frekansı 12,53 GHz'dir. Bu frekansta geri dönüş kaybı $S_{11} = -21,07$ dB olarak görülmektedir. Anten 12,53 GHz rezonans frekansında 12,151-13,082 GHz bölgesinde 931 MHz bant genişliğine sahiptir. Bu değer yaklaşık olarak %7,43'lük bant genişliğine karşılık gelir. Anten birinci bölgede 12-18 GHz arasındaki Ku bant frekans aralığında ışıma yapmaktadır.

Aranan koşulların sağlandığı ışımının gerçekleşeceği ikinci bölge ise 13,853-14,741 GHz aralığıdır ve antenin ikinci bölgedeki rezonans merkez frekansı 14,4 GHz'dir. Bu frekansta geri dönüş kaybı $S_{11} = -33,10$ dB olarak görülmektedir. Anten 14,4 GHz rezonans

frekansında 13,853-14,741 GHz bölgesinde 888 MHz bant genişliğine sahiptir. Bu değer yaklaşık olarak %6,17'lik bant genişliğine karşılık gelir. Anten ikinci bölgede de 12-18 GHz arasındaki Ku bant frekans aralığında ışına yapmaktadır.

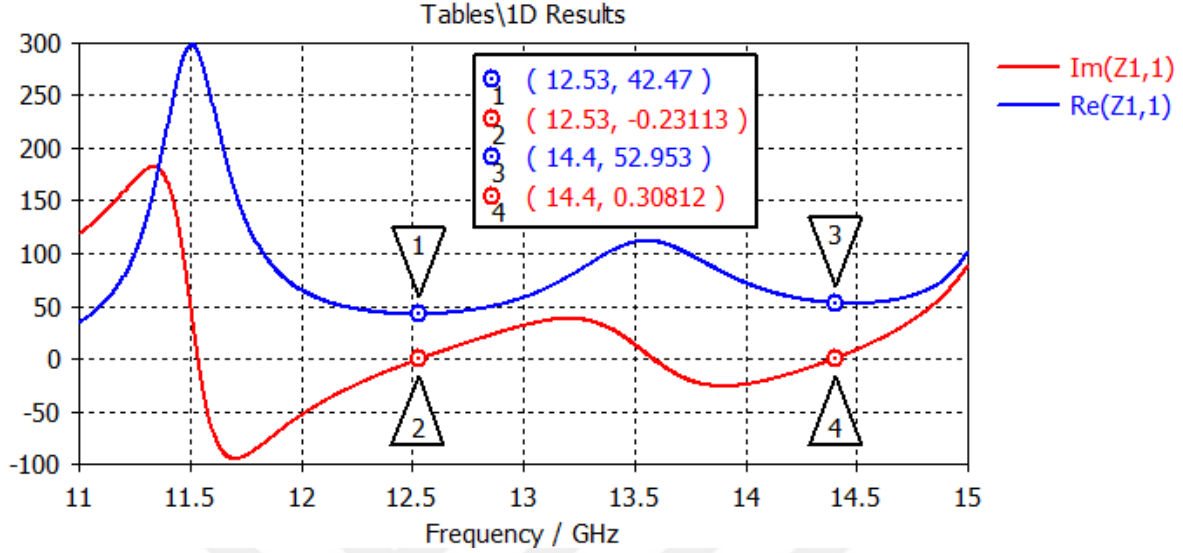
Önceki başlıklar altında tasarlanan antenlerde 11-15 GHz aralığında tek bant mevcut iken U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin üst bölgesinde y-eksenine göre simetrik dikey yarıklar oluşturulmasıyla anten çift bant özelliği göstermiştir.



Şekil 4.36. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açıldıktan sonra VSWR grafiği

Şekil 4.36'da değişikliklerin gözlemleneceği frekans aralığı 11-15 GHz olarak belirlenmiştir. Bu aralıkta voltaj duran dalga oranı VSWR değişimi incelenmektedir. VSWR değeri, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi $1 \leq \text{VSWR} < \infty$ aralığında değişir. Antenin iletimde olma şartlarından biri olan $\text{VSWR} \leq 2$ 'nin sağlandığı bölgede empedans uyumunun ışına yapabilecek kadar uyumlu olduğu söylenebilir. Ulaşılmaya çalışılan ve idealde en uygun empedans değerinin sağlandığı tam uyumluluk durumu $\text{VSWR} = 1$ olduğu bölgedir. Bu durumda iletim hattından antene gelen güçte geri yansıma yoktur denilebilir. Antenin çift bant genişliği içerisinde voltaj duran dalga oran değerlerinin 1'e yakın çok küçük değerler olduğu, empedans uyumlaştırma çalışmasının elde edilen rezonans frekanslarında başarılı olarak sağlandığı görülmektedir. Burada mikroşerit besleme hattından geri yansımaların minimize edildiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.36'daki grafikte rezonans frekansı 12,53 GHz için VSWR 1,19; rezonans frekansı 14,4 GHz için VSWR ise 1,04 olarak tespit edilmiştir.

Voltaj duran dalga oranının her iki rezonans merkez frekansında ideale yakın değerler alması, giriş empedans uyumunun iyi olduğunu göstermektedir.

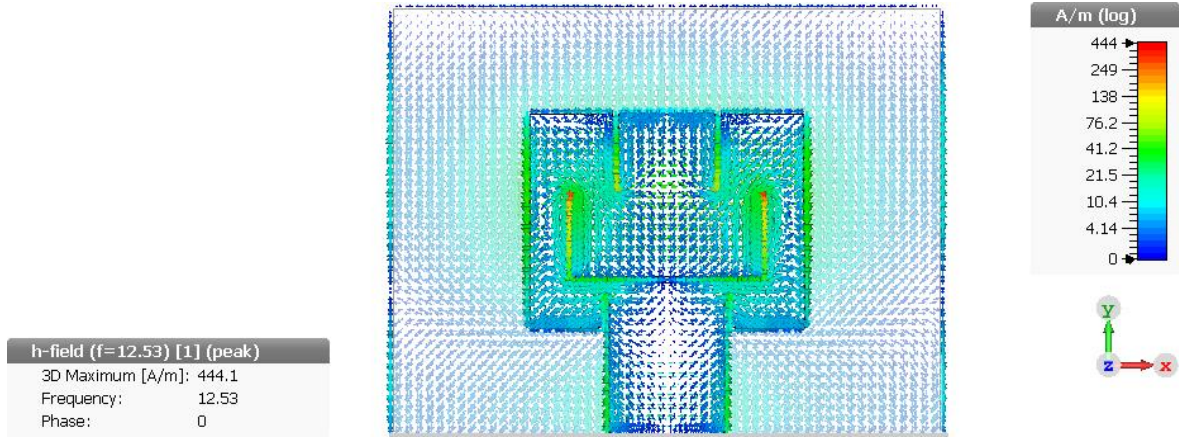


Şekil 4.37. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açıldıktan sonra giriş empedansı

Şekil 4.37’de değişikliklerin gözlemleneceği frekans aralığı 11-15 GHz olarak belirlenmiştir. Burada giriş empedansının (Z_{in}) belirlenen aralıktaki frekanslara göre değişimi incelenmektedir. Mikroşerit beslemenin her iki yanında bulunan paralel empedans uyumlaştırma yarıkları, rezonans frekansında 50 Ohm giriş empedansına ulaşılabilmesi için düzenlenmiştir. Empedans uyumlaştırılmasında mikroşerit besleme empedans değerinin, 50 Ohm’luk probun (konnektörün) empedans değerine yakın olduğu tespit edilmiştir.

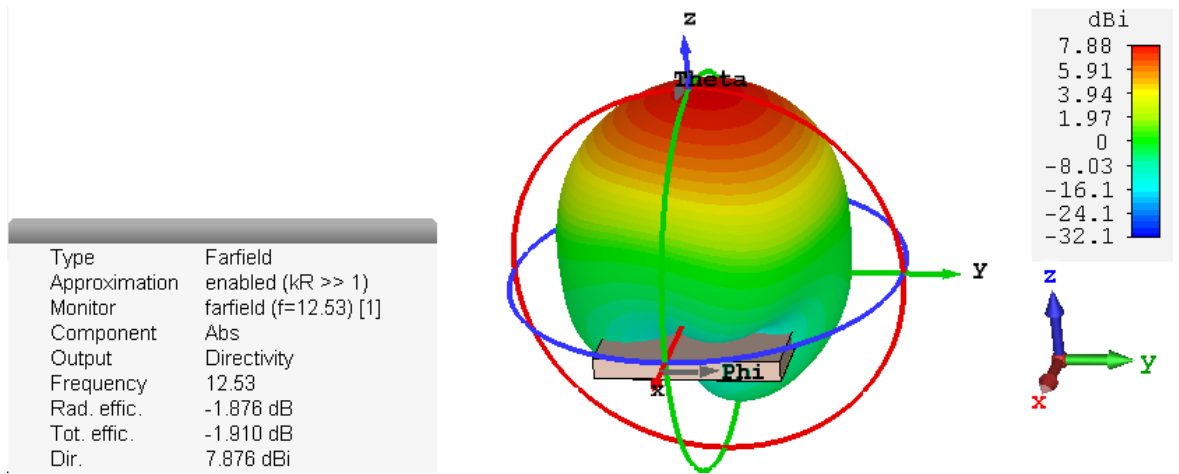
12,53 GHz rezonans frekansı için empedans değeri $Re(Z_{in})$ değeri 42,47 Ohm ve $Im(Z_{in})$ değeri ise -0,23’tür. 14,4 GHz rezonans frekansı için ise $Re(Z_{in})$ değeri 52,95 Ohm ve $Im(Z_{in})$ değeri ise 0,31’dir. Burada $Re(Z_{in})$ değerlerinin 50 Ohm’a yakın olduğu ve $Im(Z_{in})$ değerlerinin ise ihmal edilebilecek kadar küçük değerlere sahip olduğu görülmektedir.

12,53 GHz rezonans frekansı için empedans değeri biraz düşük kalmakla birlikte 14,4 GHz rezonans frekansında da 50 Ohm için empedans uyumluluğu iyi seviyededir.

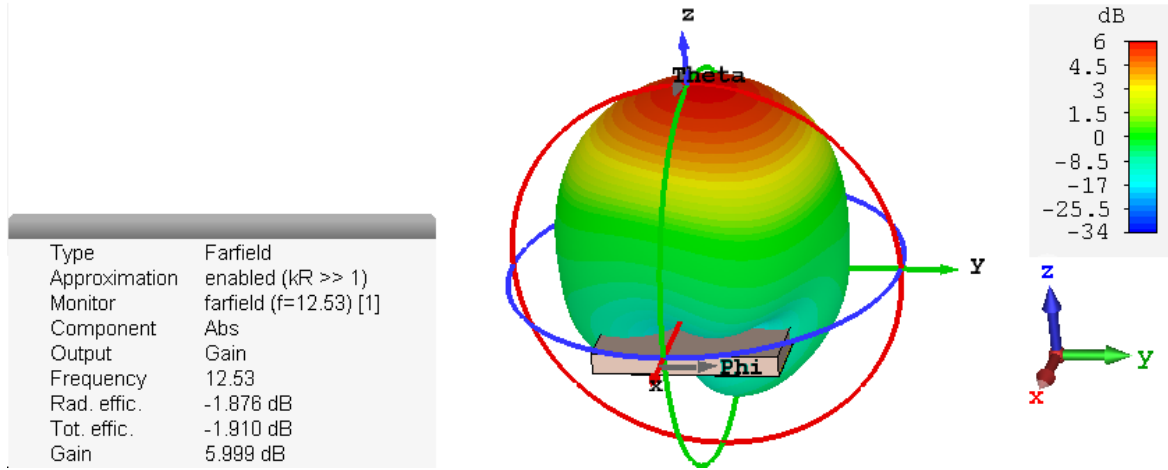


Şekil 4.38. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de yüzey akımı

Şekil 4.38’de U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’deki yüzey akımı gösterilmiştir. Akımın özellikle U-yarıklı yapının yan kollarının üst bölgesine doğru arttığı gözlemlenmiştir.

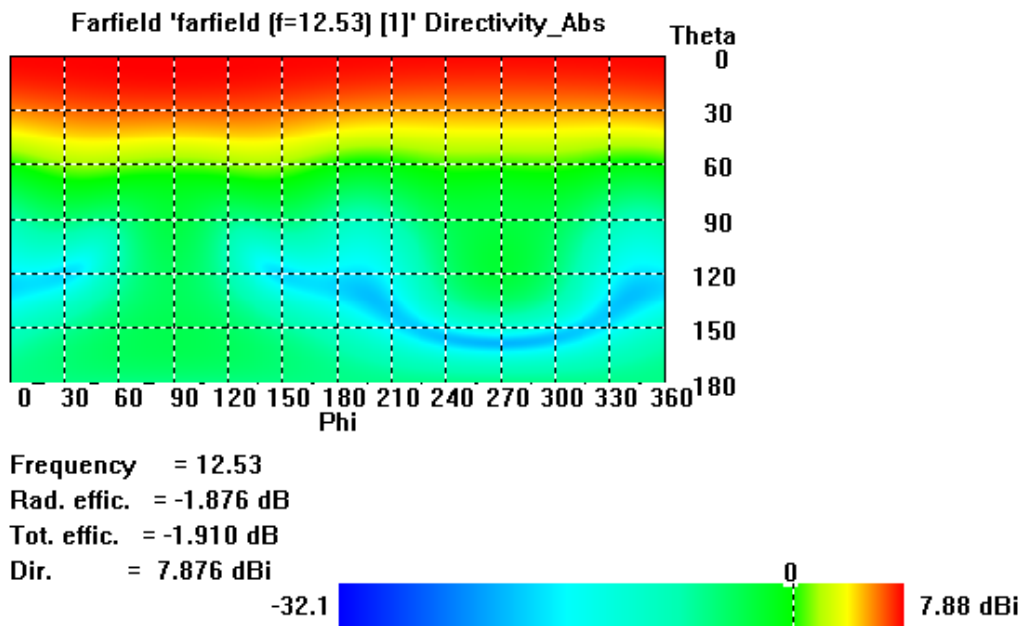


Şekil 4.39. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz’de yönlülük 3-boyutlu ışınma örüntüsü

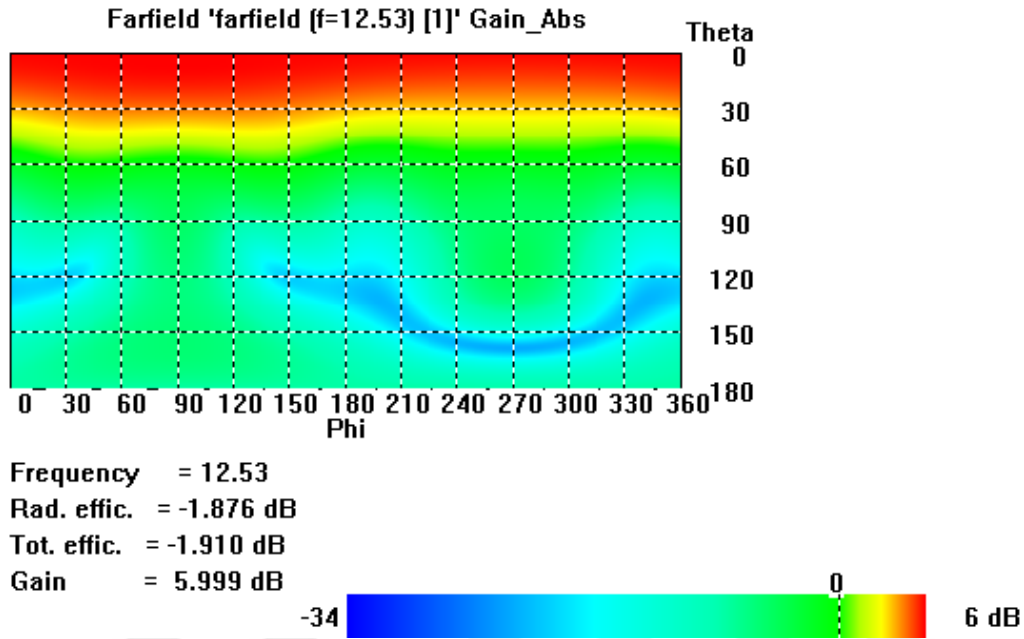


Şekil 4.40. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz'de kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü

Şekil 4.39'da U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin üst bölgesinde (y-doğrultusu kenarında) y-eksenine göre simetrik dikey yarıklar oluşturulmasından sonra 12,53 GHz rezonans frekansında ışınma yapan antenin yönlülük, Şekil 4.40'ta ise kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Bu durumda 12,53 GHz rezonans frekansında en fazla 7,88 dBi değerinde yönlülük değeri elde edilmiştir. Anten 12,53 GHz rezonans frekansı için en fazla ($\varphi = 90^\circ$ ve $\theta = 5^\circ$) 7,88 dBi değerinde yönlülüğe, %64,92 civarında ışınma verimliliğiyle yaklaşık 6,00 dB değerinde kazanç sahiptir.

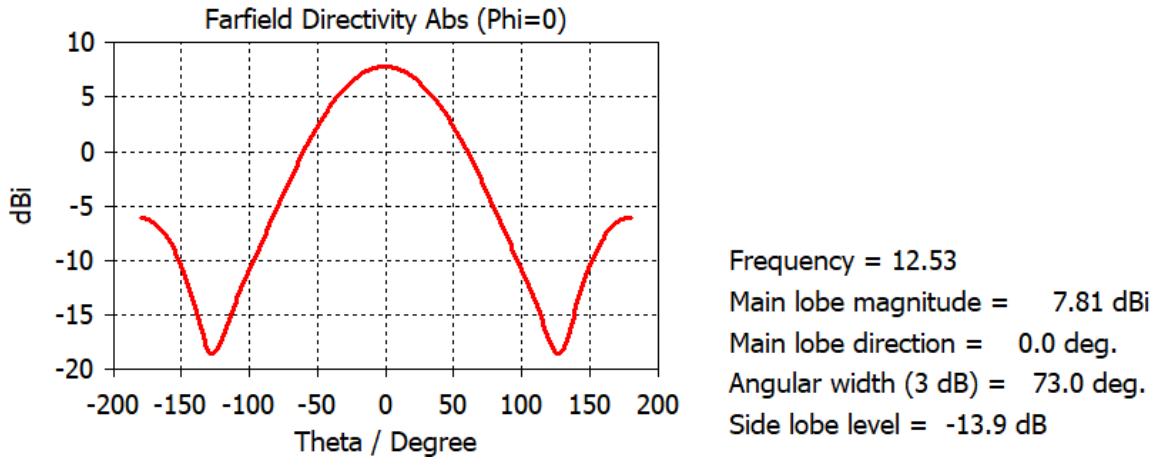


Şekil 4.41. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz'de yönlülük 2-boyutlu görünümü

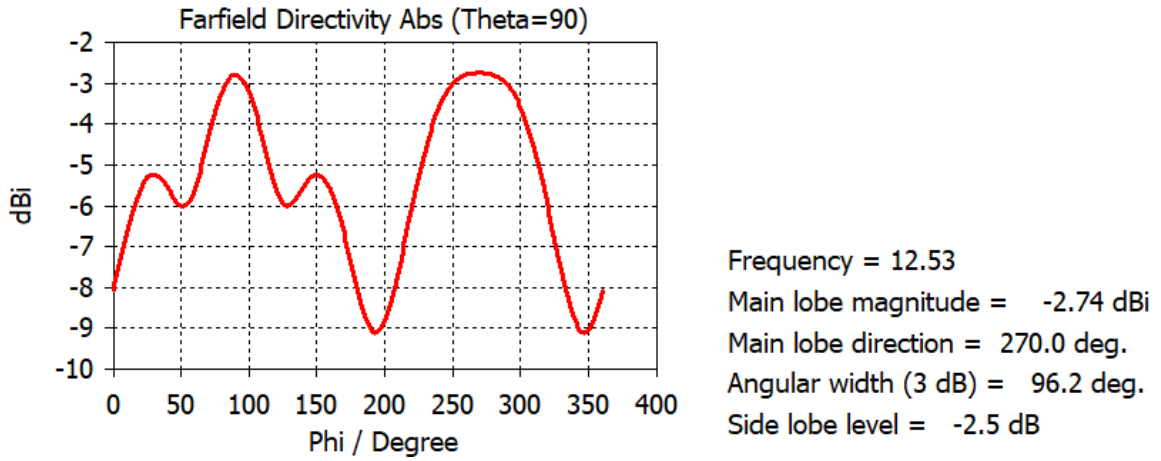


Şekil 4.42. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 12,53 GHz'de kazanç 2-boyutlu görünümü

Şekil 4.41'de 12,53 GHz rezonans frekansında antenin dikey ve yatay düzlemlerdeki yönlülüğü, Şekil 4.42'de ise kazancı 2-boyutlu gösterilmiştir. Küresel koordinat sisteminde, ışım değerlerini gösteren $\varphi = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ düzlemleri dikkate alınmıştır.

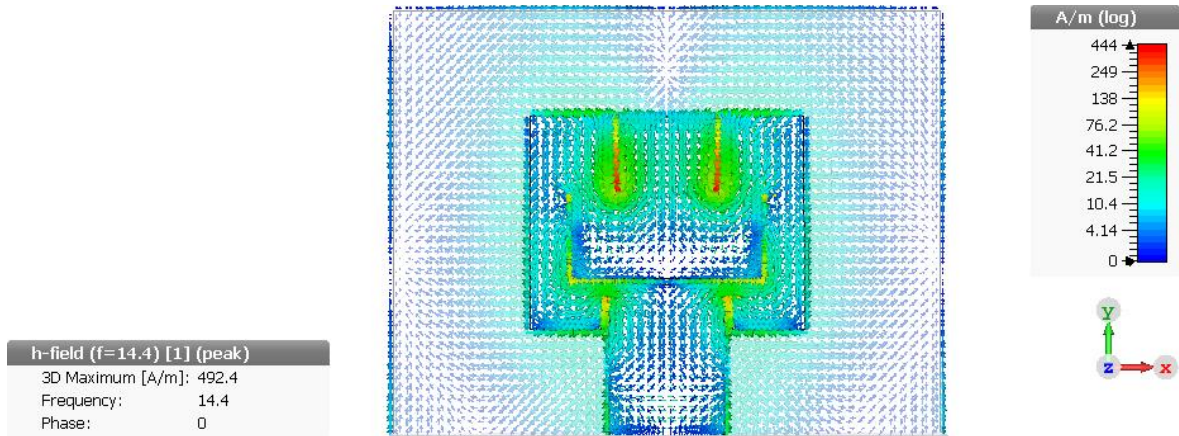


Şekil 4.43. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz'de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü



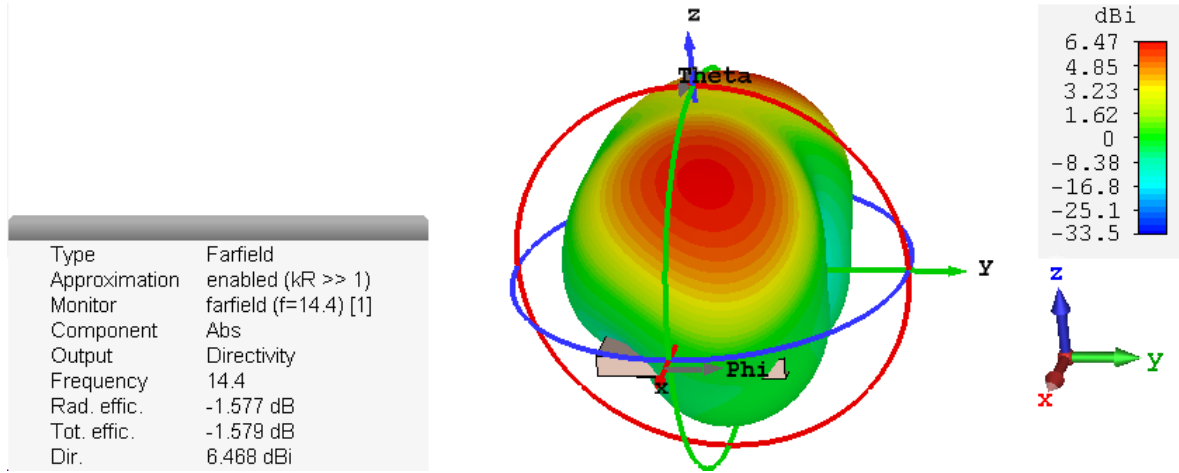
Şekil 4.44. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin 12,53 GHz'de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü

Şekil 4.43'te antenin bulunduğu düzleme dik olan xz-düzleminde antenin yönlülüğü gösterilmiştir. Bu düzlemde $\theta = 0^\circ$ yani normali yönünde (z-doğrultusunda) 7,81 dBi değerinde yönlülüğe sahipken bu değer arka lob yani $\theta = 180^\circ$ doğrultusunda ise ışıma şiddeti -6,05 dBi değerine düşmektedir. Ön lobu ile arka lobu arasında 13,86 dBi değerinde önden arkaya oranı vardır. Antenin 12,53 GHz rezonans frekansı için Şekil 4.43'te $\varphi = 0^\circ$ düzlemine göre en fazla ışımanın $\theta = 0^\circ$ açısı yönünde (7,81 dBi) ve dikey hüzmeye genişliğinin $73,0^\circ$; Şekil 4.44'te ise $\theta = 90^\circ$ düzlemine göre $\varphi = 270^\circ$ açısı yönünde (-2,74 dBi) ve yatay hüzmeye genişliğinin $96,2^\circ$ olduğu görülmektedir.

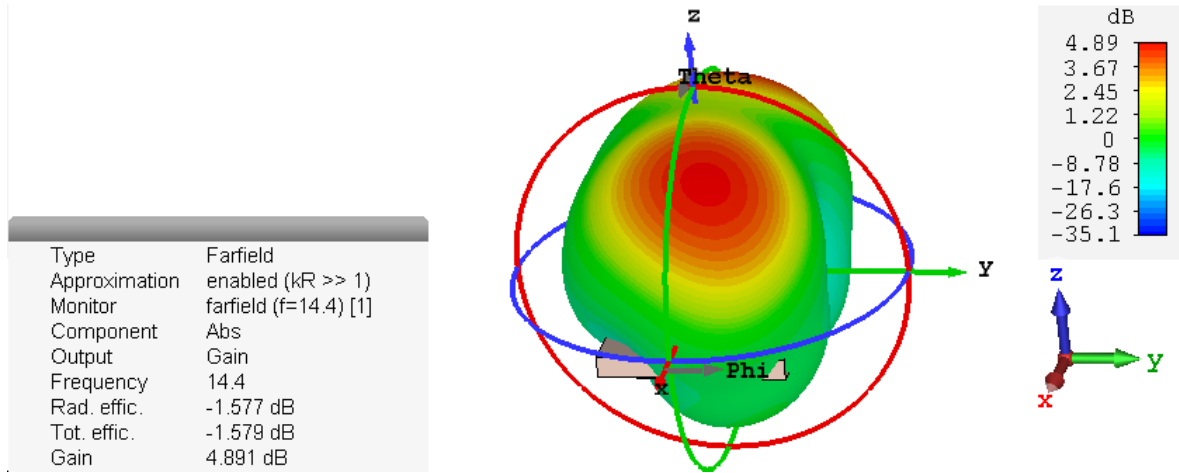


Şekil 4.45. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz'de yüzey akımı

Şekil 4.45'te U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant Mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz'deki yüzey akımı gösterilmiştir. Akımın açılan dikey yarıkların -y yönüne doğru olan bölümünde arttığı gözlemlenmiştir.

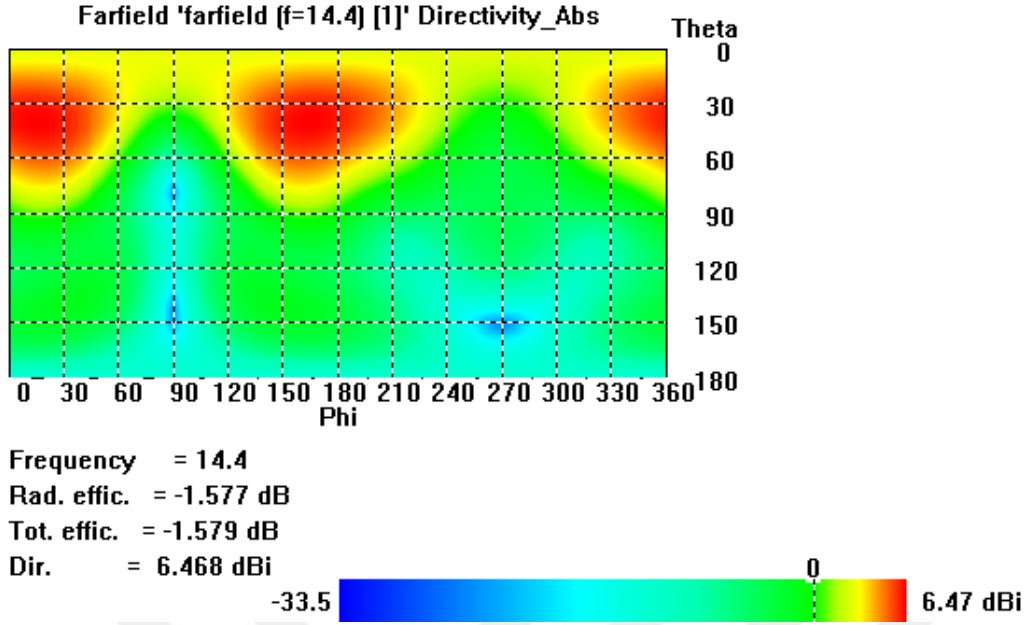


Şekil 4.46. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de yönlülük 3-boyutlu ışınma örüntüsü

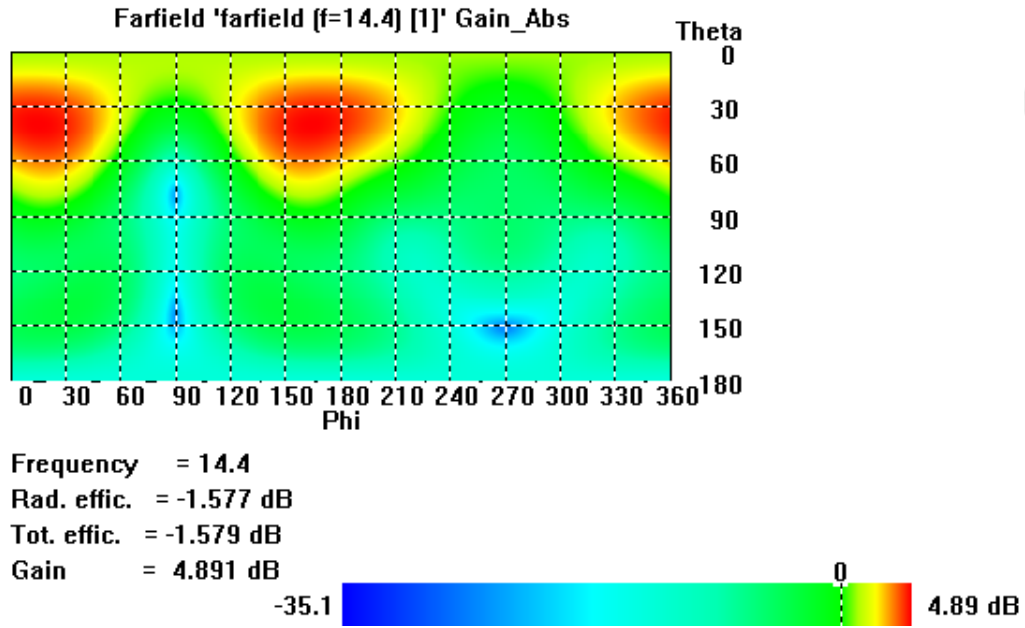


Şekil 4.47. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü

Şekil 4.46’da U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin üst bölgesinde (y-doğrultusu kenarında) y-eksenine göre simetrik dikey yarıklar oluşturulmasından sonra 14,4 GHz rezonans frekansında ışınma yapan antenin yönlülük, Şekil 4.47’de ise kazanç 3-boyutlu ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Bu durumda 14,4 GHz rezonans frekansında en fazla 6,47 dBi değerinde yönlülüğü vardır. Anten 14,4 GHz rezonans frekansı için en fazla ($\varphi = 16^\circ$, $\theta = 40^\circ$ ve $\varphi = 164^\circ$, $\theta = -40^\circ$) 6,47 dBi değerinde yönlülüğe, %69,55 civarında ışınma verimliliğiyle yaklaşık 4,89 dB değerinde kazançta sahiptir.

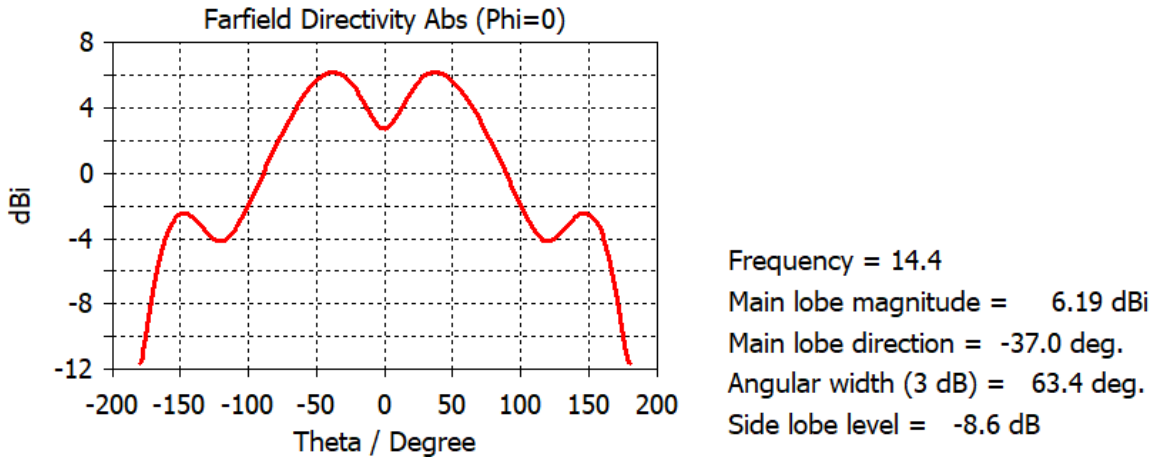


Şekil 4.48. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de yönlülük 2-boyutlu ışınma görünümü

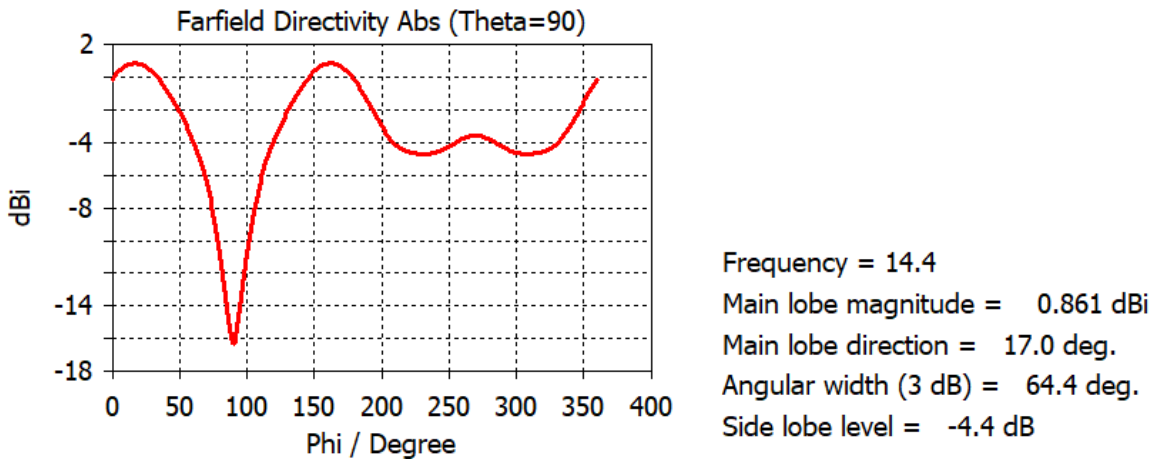


Şekil 4.49. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de kazanç 2-boyutlu ışınma görünümü

Şekil 4.48’de 14,4 GHz rezonans frekansında antenin dikey ve yatay düzlemlerdeki yönlülüğü, Şekil 4.49’da ise kazancı 2-boyutlu gösterilmiştir. Küresel koordinat sisteminde, ışınma değerlerini gösteren $\varphi = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ düzlemleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.50. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de $\varphi = 0^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü

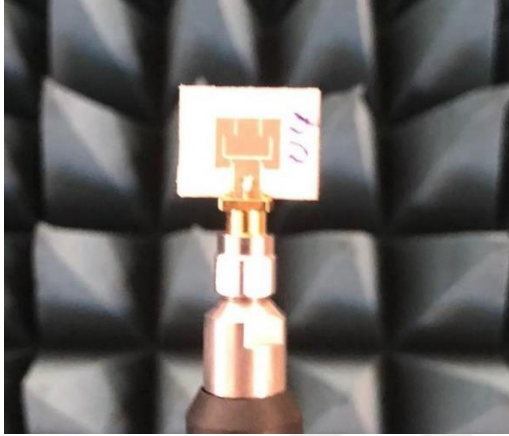


Şekil 4.51. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar açılmasıyla 14,4 GHz’de $\theta = 90^\circ$ düzlemi yönlülük görünümü

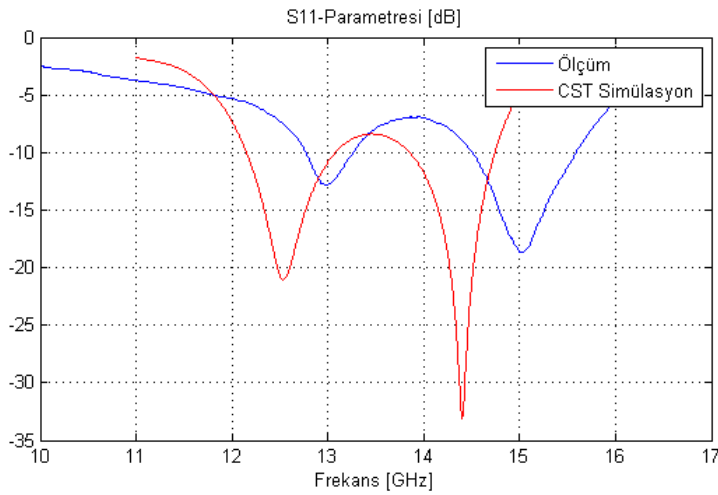
Şekil 4.50’de antenin bulunduğu düzleme dik olan xz-düzleminde antenin yönlülüğü gösterilmiştir. Aynı düzlemde z-doğrultusunun her iki yanına $\theta = 37^\circ$ ’de anten en fazla 6,19 dBi değerinde yönlülüğe sahipken arka lob $\theta = 143^\circ$ doğrultusunda ise ışıma şiddeti -1,31 dBi değerine düşmektedir. Ön lobu ile arka lobu arasında 7,5 dBi değerinde önden arkaya oranı vardır. Antenin 14,4 GHz rezonans frekansı için Şekil 4.50’de $\varphi = 0^\circ$ düzlemine göre en fazla ışımının $\theta = 37^\circ$ ve $\theta = -37^\circ$ açısı yönünde (6.19 dBi) dikey hüzmeye genişliğinin $63,4^\circ$; Şekil 4.51’de ise $\theta = 90^\circ$ düzlemine göre $\varphi = 17^\circ$ ve $\varphi = 163^\circ$ açısı yönünde (0,861 dBi) yatay hüzmeye genişliğinin $64,4^\circ$ olduğu görülmektedir.

U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antene dikey yarıklar eklenerek tasarlanan anten, referans antenden daha yüksek yönlülüğe, ışımaya verimliliği ve kazançla sahiptir.

Üretilen antenin ölçümü için 3115 Double-Ridged Guide Horn Antenin kazanç-3m değerleri referans alınmıştır.



Şekil 4.52. Üretilen antenin ölçüm ortamındaki görünümü



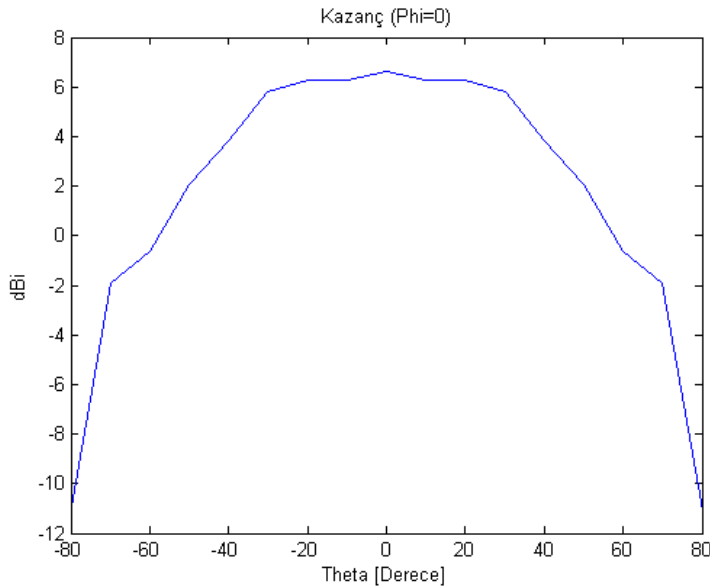
Şekil 4.53. Üretilen antenin ölçülen geri dönüş kaybı

Şekil 4.53'teki grafikte antenin 10-17 GHz bölgesinde birinci bölge rezonans merkez frekansı 12,97 GHz'dir. Bu frekansta geri dönüş kaybı $S_{11} = -12,77$ dB olarak bulunmuştur. Anten birinci bölgede 12,77-13,3 GHz aralığında 530 MHz bant genişliğine sahiptir. Bu

değer yaklaşık olarak %4,1'lik bant genişliğine karşılık gelir. Anten birinci bölgede 12-18 GHz arasındaki Ku bant frekans aralığında ışıma yapmaktadır.

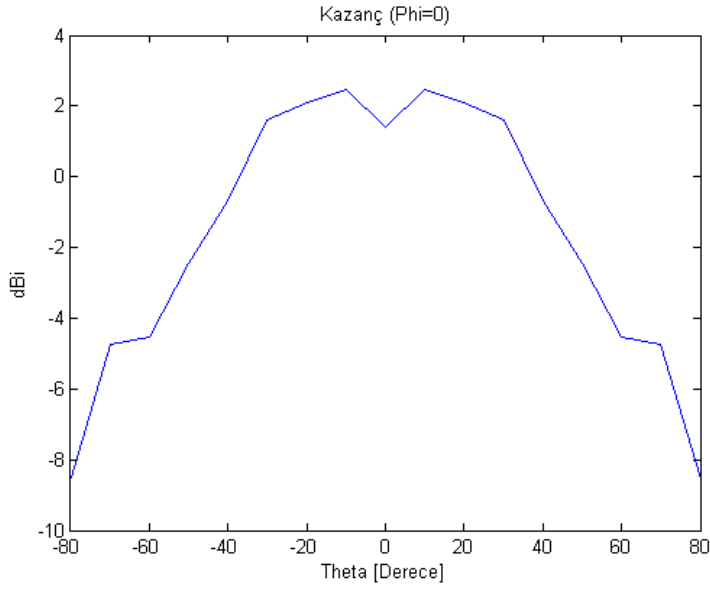
Antenin 10-17 GHz bölgesinde ikinci bölge rezonans merkez frekansı 14,97 GHz'dir. Bu frekansta geri dönüş kaybı $S_{11} = -18,21$ dB olarak bulunmuştur. Anten ikinci bölgede 14,51-15,58 GHz aralığında 1070 MHz bant genişliğine sahiptir. Bu değer yaklaşık olarak %7,16'lük bant genişliğine karşılık gelir. Anten ikinci bölgede 12-18 GHz arasındaki Ku bant frekans aralığında ışıma yapmaktadır.

Simülasyonda elde edilen 12,53 GHz ve 14,4 GHz rezonans merkez frekanslarının sırasıyla 12,97 GHz ve 14,97 GHz rezonans merkez frekanslarına kaydığı, dolayısıyla bantlarda kaymalar olduğu tespit edilmiştir. Bu bant kaymasına; antende milimetre uzunluğundan daha kısa boyutlarda açılan yarık ölçüleri hassasiyetinin ve kazımadaki dielektrik malzeme bozulmalarının neden olabileceği aşıkardır. Yüksek frekanslarda çalışılması sebebiyle mikroskobik ortamlarda lazerli kesim uygulamalarının kullanımı ve anten yapım optimizasyonunun geliştirilmesi ile bu durumu önleyebilmenin mümkün olabileceği söylenebilir. Çalışmamızda simülasyon sonuçları ile mevcut koşullardaki üretim sonuçlarının oldukça yakın sayılabilecek derecede örtüştüğü görülmektedir.



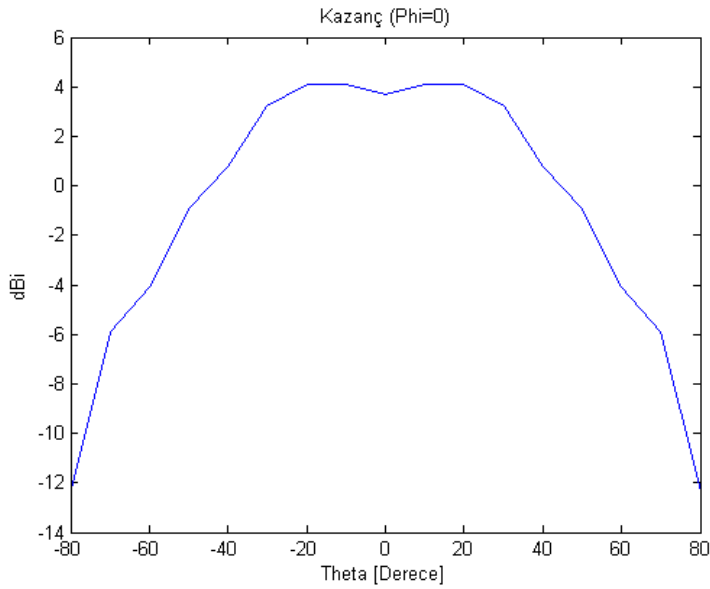
Şekil 4.54. Üretilen antenin 12,97 GHz'de kazanç ışıma örüntüsü

Şekil 4.54'te üretilen antenin 12,97 GHz'de $\varphi = 0^\circ$ için kazanç ışıma örüntüsü ölçüm sonucu gösterilmiştir. Anten burada yaklaşık 6,62 dBi değerinde kazanca sahiptir.



Şekil 4.55. Üretilen antenin 14,97 GHz’de kazanç ışınma örüntüsü

Şekil 4.55’te üretilen antenin 14,97 GHz’de $\varphi = 0^\circ$ için kazanç ışınma örüntüsü ölçüm sonucu gösterilmiştir. Anten burada yaklaşık 2,5 dBi değerinde kazançla sahiptir.



Şekil 4.56. Üretilen antenin 14,51 GHz’de kazanç ışınma örüntüsü

Şekil 4.56’da 14,51 GHz seviyelerinde yapılan ölçüm sonucunda kazancın 4,1 dBi değerlerine kadar çıktığı gösterilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dikdörtgenel şekilde, mikroşerit beslemeli düzlemsel antenler üzerinde incelemelerde bulunmuş, başlangıçta tasarlanan 12 GHz rezonans merkez frekanslı Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları korunarak yama üzerinde oluşturulan çeşitli yarı ve bu yarıkların konum değişikliklerinin anten ışımaya etkileri analiz edilmiştir. Tasarlanan antenler CST MWS üzerinde optimize edilerek simüle edilmiş, elde edilen bulgular üzerinden antenlerin performansları irdelenmiştir. Ku bandındaki mikroşerit yama üzerinde U-yarık oluşturulmuş olup antenin performansı gözlemlenmiş ve oluşturulan bu U-yarığının ışımaya yapan yama üzerindeki yeri değiştirilerek bu değişikliğin antenin performansına etkisi incelenmiştir. Yama üzerinde bu tip yarıklar oluşturulurken referans antenin boyutlarının değiştirilmemesine dikkat edilmiştir. U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin üst bölgesinde (y-doğrultusu kenarına) y-eksenine göre simetrik 2 dikey yarık daha oluşturularak antende ek rezonans frekansı elde edilmiştir. Antene 11-15 GHz aralığında çift bant özelliği kazandırılarak çift bantta ışımaya yapabilme yeteneği sağlanmıştır. Besleme yarıkları ile gelen güçte yansıma olmaması için antenin rezonans frekansındaki empedans değeri ile giriş mikroşerit besleme hattı empedans değerleri uyumlaştırılmaya çalışılmıştır.

İletim hattı metodu yardımıyla ilk adımda referans anten olarak 12 GHz rezonans merkez frekansına sahip Ku bant mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Bu temel anten 11,739-12,280 GHz bölgesinde 541 MHz'lik bant genişliğinde ışımaya gerçekleştirmiştir. Bant genişliği iyi olmakla birlikte anten üzerinde yarıklı modeller kullanılarak ya da dielektrik malzeme yüksekliği belli oranlarda değiştirilerek bu değer artırılabilir.

İkinci adımda 12 GHz rezonans merkez frekansına sahip referans Ku bant mikroşerit yama üzerinde U-yarık oluşturularak 13,67 GHz'de rezonansa gelen bir tasarım elde edilmiştir. Yeni elde edilen anten 13,177-14,306 GHz bölgesinde 1129 MHz bant genişliğinde ışımaya gerçekleştirmiştir. Açılan U-yarıkla bant genişliği ciddi bir şekilde artmış, yönlülüğü ve ışımaya verimliliğinde etkili artışlar gözlemlenmiştir.

Üçüncü adımda U-yarığın boyutları değiştirilmeden sadece yeri değiştirilerek elde edilen tasarımda rezonans merkez frekansının 12,53 GHz'e kaydığı görülmüştür. Yani U-yarığı, yama alt yüzeyine (-y-eksenine) doğru taşındığında rezonans merkez frekansı azalmıştır fakat her koşulda 12 GHz rezonans merkez frekanslı Ku bant mikroşerit yama antenin

rezonans frekansından daha yüksek değerde rezonans merkez frekansı elde edilmiştir. Bu adımda elde edilen anten 12,169-12,960 GHz bölgesinde 791 MHz bant genişliğinde ışıma gerçekleştirmiştir. 12 GHz rezonans merkez frekanslı referans antene göre bant genişliği, yönlülüğü ve ışıma verimliliği daha iyi olmakla birlikte U-yarık konumu değiştirilmemiş antene göre değerler biraz düşmüştür.

Dördüncü adımda üçüncü adımda oluşturulan U-yarık yeri değiştirilmiş Ku bant mikroşerit yama antenin üst bölgesinde (y-doğrultusundaki kenarda) y-eksenine göre simetrik 2 dikey yarık daha oluşturulmuştur. 12,53 GHz'de ışıma yapan anten dikey yarıkların oluşturulması ile 12,53 GHz ve 14,4 GHz rezonans merkez frekansları olmak üzere 11-15 GHz aralığında çift bant anten özelliği kazanmıştır. Yani bu tasarımda 12,53 GHz ve 14,4 GHz'de rezonans merkez frekansa sahip iki bölgeli bir tasarım elde edilmiştir. U-yarık bu çift bantta 12,53 GHz rezonans merkez frekansa sahip bölgeyi (alt frekans bandı) kontrol ederken ışıma yapan yamanın üst bölgesinde y-eksenine simetrik açılan 2 dikey yarık ise bu bantlardan yüksek frekanslı 14,4 GHz rezonans merkez frekansına sahip bölgeyi (üst frekans bandı) kontrol ettiği tespit edilmiştir. Açılan dikey yarıklar y eksenine simetrik olarak birbirinden uzaklaştırıldığında 14,4 GHz rezonans merkez frekanslı bant, alt frekans bandına yaklaşırken aynı şekilde birbirine yaklaştırıldığında 14,4 GHz rezonans merkez frekanslı bant, daha üst frekans bölgesine doğru kaymalar göstermiştir. Dördüncü adımda tasarlanan U-yarıklı Ku bant mikroşerit yama anten, 12,53 GHz rezonans merkez frekansında 12,151-13,082 GHz bölgesinde 931 MHz bant genişliğinde; 14,4 GHz rezonans merkez frekansında ise 13,853-14,741 GHz bölgesinde 888 MHz bant genişliğinde ışıma gerçekleştirmiştir. Bant genişlikleri, yönlülük ve kazanç değerleri her iki bantta da iyi seviyede olan çift bantlı antende 12,53 GHz rezonansında z-doğrultusuna yakın ($\theta = 5^\circ$) yönlülüğe sahipken yüksek frekanslı bandın rezonans merkez frekansı olan 14,4 GHz'de ise normalin (z-ekseninin) her iki yanına 40° açı doğrultusunda ($\varphi = 16^\circ$, $\varphi = 164^\circ$) en fazla yönlülüğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca $\varphi = 0^\circ$ düzlemi (xz düzlemi) ve $\theta = 90^\circ$ düzlemi (xy düzlemi) için de incelemelerde bulunulmuştur.

Yapılan analizlerde referans olarak tasarlanan temel 12 GHz Ku bant mikroşerit yama antenin boyutları korunarak yama üzerinde oluşturulan yarıklarla ve bu yarıkların yerlerinin değiştirilmesiyle yönlülük, kazanç ve verimin artırılabilceği, rezonans frekansında kaymalar olabileceği hatta uygun yarıkların eklenmesi ile belirlenen frekans aralığında çift bant elde edilebileceği, böylece antenlerin ışıma özelliklerinin iyileştirilebileceği

gösterilmiştir. Çizelge 5.1’de tasarlanan anten modellerinin performans değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Tasarlanan anten modellerinin performans değerleri

F (GHz)	BW (MHz)	BW (%)	S₁₁ (dB)	VSWR	D_{max} (dBi)	G_{max} (dB)	e_r (%)	HPBW_v φ = 0°	HPBW_h θ = 90°
12,00	541	4,51	-32,50	1,05	7,06	4,96	61,6	90,5°	283,2°
13,67	1129	8,26	-32,22	1,05	8,12	6,53	69,3	69,0°	66,3°
12,53	791	6,31	-41,37	1,02	7,78	5,91	64,9	74,0°	73,2°
12,53	931	7,43	-21,07	1,19	7,88	6,00	64,9	73,0°	96,2°
14,40	888	6,17	-33,10	1,04	6,47	4,89	69,5	63,4°	64,4°

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından belirlenen standartlara göre Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumunun belirlediği uydu haberleşme hizmetlerinde sabit uydu haberleşmesi milli frekans planında Ku frekans kullanım bandı 10,7-12,75 GHz aralığında uydu-yer arası veri indirme hizmetlerinde kullanılırken 12,75-13,25 ve 13,75-14,50 GHz aralığında ise yer-uydu arası veri gönderme hizmetlerinde kullanılmaktadır [55]. Burada belirtilen frekans bant aralıkları içinde tasarlanan Ku frekans çift bant antenle de veri gönderme ve veri alma için bant paylaşımı yapıp ikinci bir antene gerek kalmadan tek bir antenle hem veri gönderme hem veri alma işlemi gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Chakravarthi, P. (1992). The history of communications from cave drawings to mail messages. *IEEE AES Magazine*, 7, 30-35.
2. Consonni, D. and Silva, M. T. M. (2010). Signals in Communication Engineering History. *IEEE Transactions on Education*, 53(4), 621-630.
3. Kevin, C. C. H. (2007). Designs of Wideband Differential-Fed Patch Antennas: Analysis and Application. *PhD thesis*, City University of Hong Kong.
4. Balanis, C. A. (1997). *Antenna Theory Analysis and Design*. John Wiley and Sons, Arizona State University.
5. Lo, Y. T., Solomon, D. and Richards, W. F. (1979). Theory and experiment on microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 27(2), 137-145.
6. Richards, W. F., Lo, Y. T. and Harrison, D. D. (1981). An improved theory for microstrip antennas and applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 29(1), 38-46.
7. Nikolava, N. K. (2004). *Antenna Theory: Analysis and Design*. Lecture Notes.
8. Zürcher, J. F. and Gardiol, F. (1995). *Broadband Patch Antennas*. Artech House.
9. Bhartia, P. and Bahl, I. J. (1982). Frequency Agile Microstrip Antennas. *Microwave Journal*, 25, 67-70.
10. Ali-Khan A., Richards, W. F. and Long, S. A. (1989). Impedance Control of Microstrip Antennas Using Reactive Loading. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 37(2), 247-251.
11. Richards, W. F. and Long, S. A. (1986). Adaptive Pattern Control of a Reactively Loaded, Dual Mode Microstrip Antenna. *Proc. Intl. Telemetry Conf.*, Las Vegas, 291-296.
12. Purchine, M. P., Aberle, J. T. and Birtcher, C. R. (1993). A Tunable L-Band Circular Microstrip Patch Antenna. *Microwave Journal*, 36(10), 80-88.
13. Deschamps, G. A. (1953). Microstrip Microwave Antennas. *Presented at the Third USAF Symposium on Antennas*, 1, 189-195.
14. Gutton, H. and Baissinot, G. (1955). *Flat Aerial for Ultra High Frequencies*. French Patent No. 703 113.
15. Munson, R. E. (1974). Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 22(1), 74-78.
16. Howell, J. W. (1975). Microstrip Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(1), 90-93.

17. Derneryd, A. G. (1976). Linearly Polarized Microstrip Antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 24(6), 846–851.
18. Shen, L. C., Long, S. A., Allarding, M. R. and Walton, M. D. (1977). Resonant Frequency of a Circular Disc, Printed-Circuit Antenna. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 25(4), 595–596.
19. Agrawal, P. K. and Bailey, M. C. (1977). An Analysis Technique for Microstrip Antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 25(6), 756–759.
20. Bahl, I. J. and Bhartia, P. (1980). *Microstrip Antennas*. Artech House, Dedham, MA.
21. Bhartia, P., Rao, K. V. S. and Tomar, R. S. (1991). *Millimeter-Wave Microstrip and Printed Circuit Antennas*. Artech House, Boston, MA.
22. Saikavara, K. (2011). *Methods to Design Microstrip Patch Antennas for Modern Applications in Microstrip Antennas*. In Tech Org, Ch 9, 173-236.
23. Motin, M. A., Hasan, M. I., Habib, M. S. M. and Sheikh, R. I. (2013). Design of a Modified Rectangular Patch Antenna for Quad Band Application. Informatics, Electronics & Vision (ICIEV). *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, Dhaka, 1-4.
24. Row, J. S. and Tsai, J. F. (2014). Frequency Reconfigurable Microstrip Patch Antennas with Circular Polarization. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 1112-1115.
25. Sharma, V., Sharma, M. M. (2014). Circularly Polarized Broadband Triangular Microstrip Antenna with Slits for C Band. *2014 International Conference on Signal Propagation and Computer Technology (ICSPCT 2014)*, Ajmer, 438-441.
26. Abdalla M. A. and Hu Z. (2012). A compact dual band meta-material antenna for wireless applications. *2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, 1-4.
27. Redzwan, F. N. M., Ali, M. T., Tan, M. N. and Miswadi, N. F. (2014). Dual-Band Planar Inverted F-Antenna with Parasitic Element for LTE and WiMAX Mobile Communication. *2014 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies*, Bandung, 62-67.
28. Pozar, D. M. (1992). Microstrip Antennas. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 79-91.
29. Krowne, C. M. (1983). Cylindrical-Rectangular Microstrip Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31(1), 194-199.
30. Fonseca, S. D. A. and Giarola, A. (1984). Microstrip Disk Antennas, Part I: Efficiency of Space Wave Launching. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 32(6), 561-567.
31. Fonseca, S. D. A. and Giarola, A. (1984). Microstrip disk antennas, Part II: The problem of surface wave radiation by dielectric truncation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 32(6), 568-573.

32. Huang, J. (1983). The Finite Ground Plane Effect on the Microstrip Antenna Radiation Patterns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31(4), 649-653.
33. Lier, I. and Jakobsen K. R. (1983). Rectangular Microstrip Patch Antennas with Infinite and Finite Ground Plane Dimensions. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31(6), 978-984.
34. Mailloux, R. J. (1987). On the Use of Metallized Cavities in Printed Slot Arrays with Dielectric Substrates. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 35(5), 477-487.
35. Aberle, J. T. and Zavosh, F. (1994). Analysis of Probe-Fed Circular Microstrip Patches Backed by Circular Cavities. *Electromagnetics*, 14(2), 239-258.
36. Chen, Z. N. and Chia, M. (2006). *Broadband Planar Antennas*. John Wiley & Sons.
37. Yağcı, B., Palamutçuoğlu, O. and Paker, S. (2005). Evre kaydırımlı mikroşerit yama anten dizili Ku band alıcı tasarımı. *İTÜDERGİSİ/d*, 4(1), 43-49.
38. Kevin, C. C. H. (2007). Designs of Wideband Differential-Fed Patch Antennas: Analysis and Application. *PhD thesis*, City University of Hong Kong.
39. Mishra, A., Singh, P., Yadav, N. P., Ansari, J. A. and Vishvakarma, B. R. (2009). Compact shorted microstrip patch antenna for dual band operation. *Progress In Electromagnetics Research C*, 9, 171-182.
40. Ozkaya, U. and Seyfi, L. (2015). Dimension optimization of microstrip patch antenna in X/Ku band via artificial neural network. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2520-2526.
41. Dubey, S. K., Pathak S. K. and Modh, K. K. (2011). High gain multiple resonance Ku-band microstrip patch antenna. *2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, Kolkata, 1-3.
42. Samsuzzaman, M., Islam, M. T., Misran, N., and Ali, M. A. M. (2013). Dual band X shape microstrip patch antenna for satellite applications. *Procedia Technology*, 11, 1223-1228.
43. Gulzar, A., Inayatullah Babar, M. and Irfan, M. (2017). A novel wideband microstrip patch antenna for satellite communication in Ku-band. *Journal of Engineering and Applied Sciences (JEAS)*, 36(2).
44. Zhong, S. S. (2011). *Antenna Theory and Techniques*. Publishing House of Electronics Industry, Beijing.
45. Balanis, C. A. (1989). *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons, New York.
46. Garg, R., Bhartia, P. and Bahl, I. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House Inc.

47. Tong, K. F., Lee, K. F., Lee, R. Q. and Luk, K. M. (2000). A Broad-Band U-Slot Rectangular Patch Antenna on a Microwave Substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48(6), 954-960.
48. Carver, K. R. and Mink, J. W. (1981). Microstrip Antenna Technology. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 29(1), 2-24.
49. Milligan, T. A. (2005). *Modern Antenna Design*. John Wiley & Sons, 2nd edition.
50. Swanson, D. G. and Hofer, W. J. R. (2003). *Microwave Circuit Modeling Using Electromagnetic Field Simulation*. Artech House.
51. Yeh, C. and Shimabukuro, F. (2008). *The Essence of Dielectric Waveguides*. Springer.
52. Cheng, D. K. (1993). *Fundamentals of engineering electromagnetics*. Prentice Hall.
53. Saunders, S. R. (2001). *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. John Wiley & Sons.
54. Caspers, F. (2011). RF engineering basic concepts: S-parameters. *CERN Yellow Report*, 7, 67-93.
55. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (2018). *Uydu Altyapı Sistemleri Telsiz Arayüz Özellikleri Dokümanları*. Versiyon: 1.0.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BEBEK, Nurettin





TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

