

**5G MOBİL UYGULAMALARI İÇİN ÇİFT BANTLI MIMO
ANTEN TASARIMI**

**DUAL BAND MIMO ANTENNA DESIGN FOR 5G
MOBILE APPLICATIONS**

AHMET ÖNAL

PROF. DR BİRSEN SAKA TANATAR

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

5G MOBİL UYGULAMALARI İÇİN ÇİFT BANTLI MIMO ANTEN TASARIMI

Ahmet ÖNAL

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Eylül 2022, 92 sayfa

Bu tez 5G mobil uygulamaları için 28 GHz - 38 GHz bantlarında tek elemanlı ve MIMO yapıdaki antenlerin tasarımını ve üretimini içermektedir. Öncelikle 28 GHz ve 38 GHz frekanslarının her ikisinde de rezonans elde edilebilen bir oyuk içeren dikdörtgen yama anten tasarımı yapılmıştır. Çift bantta çalışabilen bu anten doğrusal polarizasyona sahiptir. Daha sonra tek elemanlı 28 GHz ve 38 GHz bantları için ayrı ayrı dairesel polarizasyona sahip dairesel yama antenler tasarlanmıştır. Son olarak MIMO yapılarını oluşturabilmek için 4 kollu Wilkinson RF Güç Bölücüsü tasarlanmıştır. Bir önceki aşamada tasarlanan dairesel yamalar kullanılarak 28 GHz ve 38 GHz bantları için 4x4 MIMO anten tasarımları yapılmıştır. Yapılan anten tasarımlarında taban malzemesi olarak 10mil kalınlıklı (0.254 mm) RT/Duroid 6002 malzemesi kullanılmıştır. Anten tasarımlarında benzetim aracı olarak CST Studio Suite programından yararlanılmıştır. Tasarlanan antenler LPKF ve kimyasal aşındırma teknikleri ile iki farklı şekilde ürettirilmiştir. Üretilen antenlerin 2.4 RF Jak Konektör kullanılarak S-parametreleri ve 3-Boyutlu ışınma örüntüleri ölçülmüştür. Ölçüm ve benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 5G mobil antenleri, 28 GHz, 38 GHz, Çift bantlı antenler, MIMO anten, Dizi anten, Dairesel polarizasyonlu yama anten.

ABSTRACT

DUAL BAND MIMO ANTENNA DESIGN FOR 5G MOBILE APPLICATIONS

Ahmet ÖNAL

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

September 2022, 92 pages

This thesis consists of the design and production of single-element and MIMO antennas in 28 GHz - 38 GHz frequency bands for 5G mobile applications. First of all, rectangular patch antenna was designed with a slot. This patch resonates at the both 28 GHz and 38 GHz frequencies. This antenna has linear polarization for both frequencies. Then, the circular patch antennas with circular polarization were designed separately for the single-element 28 GHz and 38 GHz bands. Finally, a 4-Way Wilkinson RF Power Divider was designed to create MIMO structures. 4x4 MIMO antennas for the 28 GHz and 38 GHz bands were designed by using the circular patches designed in the previous stage. 10mil thickness (0.254 mm) RT/Duroid 6002 material was used as the substrate material in the antenna designs. The CST Studio Suite program was used as a simulation tool in antenna designs. The designed antennas were produced in two different ways with LPKF and chemical etching techniques. The S-parameters and 3-Dimensional radiation patterns of the manufactured antennas were measured with using the 2.4 RF Jack Connector. Measurement and simulation results were compared.

Keywords: 5G mobile antennas, 28 GHz, 38 GHz, Dual band antennas, MIMO antenna, Array antenna, Patch antenna with circular polarization.

TEŞEKKÜR

Tüm tez çalışmam boyunca kıymetli görüşleri ile beni yönlendiren, destekleyen, bana daima sabır ve anlayıő ile yaklaşan danışmanım Sayın Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın tüm evrelerinde olduğu gibi bu süreçte de bana olan güvenleri, destekleri ile motivasyon kaynağım olan canım aileme teşekkür ederim.

Tez kapsamındaki üretim ve doğrulama süreçlerindeki katkılarından dolayı değerli çalışma arkadaşlarıma ve manevi destekleriyle yanımda olan tüm dostlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
SÖZLÜK	xv
1. GİRİŞ	16
1.1. Haberleşme Sistemlerinin Tarihçesi.....	16
1.2. 5.Nesil (5G) Haberleşme Teknolojisi.....	17
1.3. Kablosuz Haberleşme Sistemlerinde Kullanılan Anten Konfigürasyonları.....	19
1.4. 5G Teknolojisinde MIMO'nun Yeri	20
1.5. Tezin Amacı	22
2. MİKROŞERİT ANTENLER	23
2.1. Mikroşerit Antenler Giriş.....	23
2.2. Mikroşerit Antenlere ait Temel Parametreler.....	24
2.3. Temel Mikroşerit Anten Yapıları.....	26
2.3.1. Dikdörtgen Yama	27
2.3.2. Dairesel Yama	28
2.4. Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri.....	29
2.4.1. Mikroşerit İletim Hattı Besleme Tekniği	30
2.4.2. Koaksiyel Besleme	30
2.4.3. Topraklı Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu	31
2.4.4. Açıklık Bağlısımlı Besleme.....	32

2.4.5. Yaklaşım Bağlaşımlı Mikroşerit Hat Besleme	32
2.5. Polarizasyon Çeşitleri	33
2.5.1. Doğrusal Polarizasyon	33
2.5.2. Dairesel Polarizasyon	34
2.5.3. Eliptik Polarizasyon	37
2.6. Dizi Antenler.....	37
2.7. Çok Giriş Çok Çıkışlı Antenler (MIMO Antenler)	40
3. 5G İÇİN MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMLARI.....	43
3.1. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Tasarımı	44
3.1.1. 28 GHz Dikdörtgen Yama Anten Tasarımı	44
3.1.1.1. Yama Boyutlarının Anten Geri Dönüş Kaybına Etkisi	46
3.1.1.2. Yama Besleme Hattı Parametrelerinin Geri Dönüş Kaybına Etkisi	48
3.1.2. Çift Bantlı Anten Tasarımına Geçiş.....	51
3.1.2.1. Yama Üzerindeki Oyuk Parametrelerinin Belirlenmesi	52
3.2. 28 GHz Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Tasarımı	59
3.2.1. Yama Boyutları ve Besleme Hattının Geri Dönüş Kaybına Etkisi.....	61
3.2.2. Yama Antenin Örüntü, Polarizasyon ve Yönlülük Benzetimleri	63
3.3. 38 GHz Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Tasarımı	67
3.3.1. Yama Boyutları ve Besleme Hattının Geri Dönüş Kaybına Etkisi.....	69
3.3.2. Yama Antenin Örüntü, Polarizasyon ve Yönlülük Benzetimleri	72
3.4. MIMO Anten Tasarımları	76
3.4.1. Wilkinson RF Güç Bölücü Tasarımı	76
3.4.2. MIMO Yapıda Kullanılacak Bölücü Tasarımı	77
3.4.3. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Benzetimleri	80
3.4.4. 38 GHz 4x4 MIMO Anten Benzetimleri	83
4. ÜRETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI	87

4.1. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Ölçüm Sonuçları.....	89
4.2. 28 GHz Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Ölçüm Sonuçları.....	91
4.3. 38 GHz Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Ölçüm Sonuçları.....	92
4.4. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Ölçüm Sonuçları	94
4.5. 38 GHz 4x4 MIMO Anten Ölçüm Sonuçları	96
4.6. Anten Örüntüleri Ölçüm Örnekleri	98
5. SONUÇ	104
6. KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 5G ile İnternete Erişebilecek Bazı Cihazlar ve 5G Gereksinim-Çözüm Şeması	19
Şekil 2.1. Mikroşerit Anten Örnekleri: (a) Yürüyen Dalga , (b) Yama ve (c) Yarık Anten [8].....	23
Şekil 2.2. (a) Dipol ve (b) Boynuz antene ait yönlülük gösterimleri	25
Şekil 2.3. Üç Boyutlu Anten Örüntü Düzlemi	25
Şekil 2.4. Dikdörtgen Yama Temel Parametreler.....	28
Şekil 2.5. Dairesel Yama Anten Gösterimi	29
Şekil 2.6. Mikroşerit Besleme Konfigürasyonları	30
Şekil 2.7. (a) Yandan ve (b) Üstten Koaksiyel Besleme Gösterimi	31
Şekil 2.8. Eş Düzlemlı Dalga Kılavuzu İletim Hattı Kesiti	32
Şekil 2.9. Açıklık Bağlısımlı Besleme	32
Şekil 2.10. Yaklaşık bağlaşımlı mikroşerit hat besleme.....	33
Şekil 2.11. Polarizasyon Çeşitleri	33
Şekil 2.12. (a) Köşelerden Kesilmiş ve (b) Besleme Noktası Köşegene Yerleştirilmiş Tek Noktadan Beslenen Dairesel Polarizasyon Örnekleri [16].....	35
Şekil 2.13. Çift Besleme Hattı ile Dairesel Polarizasyon Elde Etme Yöntemleri [16].....	35
Şekil 2.14. Senkronize Yamalar ile Oluşturulan Dairesel Polarizasyon Örneği.....	36
Şekil 2.15. Düzlemsel Antenlerde Dairesel Polarizasyon için Besleme Şekillerine ait Bant genişliklerinin Karşılaştırması [17]	37
Şekil 2.16. Dizi faktörü.....	40
Şekil 2.17. MIMO sistem gösterimi.....	41
Şekil 3.1. 28 GHz Dikdörtgen Yama Anten Gösterimi	45
Şekil 3.2. 28 Ghz Dikdörtgen Yama Anten Başlangıç Parametrelerine ait Geri Dönüş Kaybı Benzetim Sonucu.....	46
Şekil 3.3. Yama Genişliğinin (W) Geri Dönüş Kaybına Etkisi.....	47
Şekil 3.4. Yama Boyunun (L) Geri Dönüş Kaybına Etkisi.....	47
Şekil 3.5. Besleme Hattı Boşluğu (G) Parametrik Analizleri	49
Şekil 3.6. Besleme Hattı Genişliği (Wf) Parametrik Analizleri	49
Şekil 3.7. Besleme Hattı Uzunluğu (Lf) Parametrik Analizleri.....	50
Şekil 3.8. Parametrik Analizler Sonucunda Elde Edilen 28 GHz Yama Antene ait Geri Dönüş Kaybı. 51	
Şekil 3.9. 38 Ghz Rezonansı için Gerekli Olan Oyuk Parametreleri	52
Şekil 3.10. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Geri Dönüş Kaybı.....	54
Şekil 3.11. 28 GHz Frekansına ait Polar Koordinatlarda Uzak Alan Sonuçları	55
Şekil 3.12. 38 GHz Frekansına ait Polar Koordinatlarda Uzak Alan Sonuçları	55
Şekil 3.13. 28 GHz Frekansına ait Dikey Doğrusal Polarizasyon Yönlülük Grafiği	56
Şekil 3.14. 38 GHz Frekansına ait Yatay Doğrusal Polarizasyon Yönlülük Grafiği.....	56
Şekil 3.15. 28 GHz Frekansına ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi.....	57

Şekil 3.16. 38 GHz Frekansına ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi.....	57
Şekil 3.17. 28 GHz Frekansına ait Yüzey Akımları Dağılımı.....	58
Şekil 3.18. 38 GHz Frekansına ait Yüzey Akımları Dağılımı.....	58
Şekil 3.19. 28 GHz Dairesel Yama Anten Parametreleri	59
Şekil 3.20. 28 GHz Dairesel Yama Oyuk Noktaları Gösterimi.....	59
Şekil 3.21. 28 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı	61
Şekil 3.22. 28 GHz Dairesel Anten Yarıçapının Geri Dönüş Kaybına Etkisi ($L_f=1.67$ mm sabit)	62
Şekil 3.23. 28 GHz Dairesel Anten Besleme Hattı Uzunluğunun Geri Dönüş Kaybına Etkisi ($r=1.6$ mm sabit).....	63
Şekil 3.24. 28 GHz Dairesel Yama Uzak Alan Yönlülük Grafiği.....	64
Şekil 3.25. Yama Üzerindeki Oyukların Eksenel Orana Etkileri.....	65
Şekil 3.26. 28 GHz Dairesel Yama Eksenel Oran ($\Phi=0$)	65
Şekil 3.27. 28 GHz Sol ve Sağ El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değerleri	66
Şekil 3.28. 28 GHz Sol El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değeri	66
Şekil 3.29. 28 GHz Dairesel Yama Antene ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi.....	67
Şekil 3.30. 28 GHz Frekansına ait Yüzey Akımları Dağılımı.....	67
Şekil 3.31. 38 GHz Dairesel Yama Anten Gösterimi.....	68
Şekil 3.32. 38 GHz Dairesel Yama Geri Dönüş Kaybı Benzetim Sonucu	69
Şekil 3.34. 38 GHz Dairesel Anten Besleme Hattı Uzunluğunun Geri Dönüş Kaybına Etkisi ($r=1.165$ mm sabit).....	71
Şekil 3.35. 38 GHz Dairesel Yama Uzak Alan Yönlülük Benzetim Sonucu.....	72
Şekil 3.36. Yama Üzerindeki Oyukların Eksenel Orana Etkileri.....	73
Şekil 3.37. 38 GHz Dairesel Yama Eksenel Oran ($\Phi=0$)	74
Şekil 3.38. 38 GHz Sol ve Sağ El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değerleri	74
Şekil 3.39. 38 GHz Sol El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değeri	75
Şekil 3.40. 38 GHz Dairesel Yama Antene ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi.....	75
Şekil 3.41. 38 GHz Frekansına ait Yüzey Akımları Dağılımı.....	76
Şekil 3.42. Wilkinson RF Güç Bölücü İletim Hattı ve Mikroşerit Modeli [25]	77
Şekil 3.43. 2 Kollu Geniş Bantlı CPWG Wilkinson RF Güç Bölücü	78
Şekil 3.44. 2 Kollu Wilkinson RF Güç Bölücü Frekans Cevabı.....	79
Şekil 3.45. 2 Kollu Wilkinson RF Güç Bölücü Geri Dönüş Kayıpları	79
Şekil 3.46. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Genel Görünümü	80
Şekil 3.47. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait Geri Dönüş Kaybı Benzetim Sonucu	81
Şekil 3.48. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait Uzak Alan Yönlülük Grafiği.....	81
Şekil 3.49. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait Eksenel Oran ($\Phi=0$) Grafiği.....	82
Şekil 3.50. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait Sol ve Sağ El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değerleri	82
Şekil 3.51. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi	83
Şekil 3.52. 38 GHz 4x4 MIMO Anten Genel Görünümü	84
Şekil 3.53. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait Geri Dönüş Kaybı Benzetim Sonucu	84

Şekil 3.54. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait Uzak Alan Yönlülük Grafiği.....	85
Şekil 3.55. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait Eksenel Oran ($\Phi=0$) Grafiği.....	85
Şekil 3.56. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait Sol ve Sağ El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değerleri	86
Şekil 3.57. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi	86
Şekil 4.1. LPKF Üretim Süreci	87
Şekil 4.2. Kimyasal Aşındırma Yöntemi ile Üretilen Antenler.....	88
Şekil 4.3. SV Microwave Firmasına ait 2.4 MM Jak RF Konektör	88
Şekil 4.4. PNA Ölçüm Düzeneği.....	89
Şekil 4.5. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen Çift Bantlı Antenler	89
Şekil 4.6. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Sonuçları.....	90
Şekil 4.7. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen 28 GHz Tek Yama Antenler	91
Şekil 4.8. 28 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları.....	92
Şekil 4.9. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen 38 GHz Tek Yama Antenler	93
Şekil 4.10. 38 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları.....	94
Şekil 4.11. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen 28 GHz 4x4 MIMO Antenler.....	95
Şekil 4.12. 28 GHz 4x4 MIMO Antenler Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları.....	95
Şekil 4.13. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen 38 GHz 4x4 MIMO Antenler.....	96
Şekil 4.14. 38 GHz 4x4 MIMO Antenler Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları.....	97
Şekil 4.15. Anten Örüntüsü Ölçüm Düzeneği.....	99
Şekil 4.16. 28 GHz Dairesel Yama Örüntü Genlik Ölçümü 1.....	100
Şekil 4.17. 28 GHz Dairesel Yama Örüntü Genlik Ölçümü 2.....	100
Şekil 4.18. 28 GHz Dairesel Yama Örüntü Faz Ölçümü 1.....	101
Şekil 4.20. 28 GHz- 38 GHz Çift Bantlı Yama Antene ait 28 GHz'deki Dikey Polarizasyon Örüntü Genlik Ölçümü.....	102
Şekil 4.21. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Örüntü Genlik Ölçümü	103
Şekil 4.22. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Örüntü Faz Ölçümü	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Geçmişten Günümüze Haberleşme Nesillerine ait Temel Parametreler	17
Çizelge 1.2. Ülkelere Göre Aday Frekans Bantları [6], [7]	18
Çizelge 2.1. Düzlemsel antenlerin avantaj ve dezavantajları [9]	24
Çizelge 2.2. Bessel fonksiyonu türevinin sıfırları [12].....	28
Çizelge 3.1. 28 GHz Dikdörtgen Yama Başlangıç Parametreleri	44
Çizelge 3.2. 28 GHz Dikdörtgen Yama Boyutları Parametrik Analizlere göre Rezonans Frekansları	48
Çizelge 3.3. Besleme Hattı Parametrik Analizlere göre Rezonans Frekansları	50
Çizelge 3.4. 28 GHz Dikdörtgen Yama Anten Parametreleri Nihai Değerleri.....	51
Çizelge 3.5. Optimizasyon sonrası "I" şeklinde oyuk açılmış dikdörtgen yamaya ait parametreler...	53
Çizelge 3.6. 28 GHz Yaması için Tasarım Parametreleri.....	60
Çizelge 3.7. 28 GHz Dairesel Anten Yarıçapı Parametrik Analizlerine göre Rezonans Frekansları (Lf=1.67 mm sabit)	62
Çizelge 3.8. 28 GHz Dairesel Anten Besleme Hattı Uzunluğunun Parametrik Analizlerine göre Rezonans Frekansları (r=1.6 mm sabit).....	63
Çizelge 3.9. 28 GHz Dairesel Anten Oyukların Eksenel Orana Etkisi	64
Çizelge 3.10. 38 GHz Yaması için Tasarım Parametreleri.....	68
Çizelge 3.11. 38 GHz Dairesel Anten Yarıçapı Parametrik Analizlerine göre Rezonans Frekansları (Lf=1.2 mm sabit)	70
Çizelge 3.12. 38 GHz Dairesel Anten Besleme Hattı Uzunluğunun Parametrik Analizlerine göre Rezonans Frekansları (r=1.165 mm sabit).....	71
Çizelge 3.13. 38 GHz Dairesel Anten Oyukların Eksenel Orana Etkisi	73
Çizelge 3.14. 2 Kollu Geniş Bantlı CPWG Wilkinson RF Güç Bölücü Fiziksel Parametreleri	78
Çizelge 4.1. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Ölçüm Benzetim Sonuçları.....	90
Çizelge 4.2. 28 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları.....	92
Çizelge 4.3. 38 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları.....	94
Çizelge 4.4. 28 GHz 4x4 MIMO Antenler Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları	96
Çizelge 4.5. 38 GHz 4x4 MIMO Antenler Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları	97

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

P_{source}	Kaynak Gücü
S_{iso}	Güç Yoğunluğu
θ	Yükseliş Açısı
φ	Yanca Açısı
Γ	Geri Dönüş Yansımaya Katsayısı
Z_{in}	Giriş Empedansı
Z_0	İletim Hattı Karakteristik Empedansı
E	Elektrik Alan Vektörü
H	Manyetik Alan Vektörü
$ E_\theta $	Yükseliş Açısı Yönündeki Elektrik Alan Büyüklüğü
$ E_\varphi $	Yanca Açısı Yönündeki Elektrik Alan Büyüklüğü
W	Yamanın Genişliği
L	Yamanın Boyu
s	Canlı ve Toprak İletim Hatları Arasındaki Mesafe
λ	Dalga Boyu
TM_{10}	Enine Manyetik Alan Modu 10 (Transverse Magnetic Mode 10)
TM_{02}	Enine Manyetik Alan Modu 02 (Transverse Magnetic Mode 02)
TE	Enine Elektrik Alan Modu (Transverse Electric Mode)
h	Taban Malzemesinin Yüksekliği
f_r	Rezonans Frekansı
ϵ_r	Dielektrik Katsayısı
ϵ_{reff}	Etkin Dielektrik Katsayısı
c	Boş Uzaydaki Işık Hızı

L_{eff}	Saçak Alanlardan Oluşan Uzunluk Faktörü
ΔL	Saçak Alan Etkisi ile Oluşan Boy Değişimi
W_f	Besleme Hattı Genişliği
L_f	Besleme Hattı Uzunluğu
G	Besleme Hattı Boşluğu
$Oyuk_L$	Oyuk Uzunluğu
$Oyuk_H$	Oyuk Genişliği
$Oyuk_Hd$	Oyuk Genişliği Dar Bölüm
$Oyuk_S$	Oyuk Yan Alt Parça Uzunluğu
$Oyuk_W$	Oyuk Yan Parça Genişliği
X'_{mn}	n. Dereceden Bessel Fonksiyonunun Türevinin m. Sıfırı
a_{eff}	Dairesel Yamanın Efektif Yarıçapı
a	Dairenin Fiziksel Yarıçapı
(X_f, Y_f)	Besleme Noktası Koordinatları
$R(y = 0)$	Yamanın Köşe Empedansı
k	Faz sabiti
dB	Desibel
dB _i	Desibel Kazanç / Desibel Yönlülük
\hat{r}	Yer Değiştirme Vektörü
N	Dizideki Eleman Sayısı
d	Dizideki Antenler Arası Mesafe

Kısaltmalar

1G	1. Nesil
2G	2. Nesil
3G	3. Nesil
4G	4. Nesil
5G	5. Nesil
FDMA	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
SMS	Kısa Mesaj Servisi (Short Message Service)
MMS	Multimedya Mesaj Servisi (Multimedia Messaging Service)
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
ITU	Uluslararası Haberleşme Topluluğu (International Telecommunication Union)
IMT-2000	Uluslararası Mobil Haberleşme - 2000 (International Mobile Telecommunications - 2000)
IMT-A	Uluslararası Mobil Haberleşme - Gelişmiş (International Mobile Telecommunications - Advanced)
CDMA	Kod Bölmeli Çoklu Erişim Tekniği
OFDMA	Dik Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
LTE	Uzun Vadeli Dönüşüm (Long Term Evolution)
LTE-A	Uzun Vadeli Dönüşüm-Gelişmiş (Long Term Evolution-Advanced)
Kbps	Saniyedeki Kilobit Sayısı (Kilobits per Second)
Mbps	Saniyedeki Megabit Sayısı (Megabits per Second)
Gbps	Saniyedeki Gigabit Sayısı (Gigabits per Second)
SISO	Tek Girişli Tek Çıkışlı
SIMO	Tek Girişli Çok Çıkışlı
MISO	Çok Girişli Tek Çıkışlı

MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
EIRP	Etkin Yönbağımsız Yayın Gücü
BFN	Hüzme Şekillendirme Ağları
RF	Radyo frekans
EO	Eksenel Oran
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
CPWG Ground)	Topraklı Eş Düzlemlı Dalga Kılavuzu (Coplanar Waveguide With
SF	Tek beslemeli
DF	Çift beslemeli
SS	Senkronize Yama Yöntemi
SNR	Sinyal - Gürültü Oranı
DF	Dizi Faktörü
CST	Computer Simulation Technology (CST STUDIO SUITE)

SÖZLÜK

Array	Dizi
Beam Width	Işıma Genişliği
Coaxial Feed	Eşksenel Besleme
Coplanar Waveguide With Ground (CPWG)	Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu
Direct Feed	Doğrudan Besleme
Directivity	Yönlülük
Dual Band	Çift Bantlı
Edge Feed	Kenar Besleme
Fading	Solma
Gain	Kazanç
Impadence Matching	Empedans Uyumlama
Insertion Loss	Araya Girme Kaybı
Inset Feed	İçten Besleme
Isotropic	Yönbağımsız
Narrowband	Dar Bant
Patch	Yama
Return Loss	Geri Dönüş Kaybı
Side Lobe	Yan Hüzme
Slot	Oyuk
Substrate	Alttaş
Travelling Wave Antenna	Yürüyen Dalga Anten
Transmission Line	İletim Hattı
Wavelength	Dalga Boyu
Wideband	Geniş Bant

1. GİRİŞ

1.1. Haberleşme Sistemlerinin Tarihçesi

Son 40 yılda iletişim standartlarında gelişmeler oldukça hızlı olmuştur. Haberleşme teknolojilerinde nesiller birbirleri arasında bant genişliği, veri hızları ve anahtarlama şemaları gibi alanlarda farklılıklar göstererek günümüze kadar ulaşmaktadır.

İlk kullanılan kablosuz mobil haberleşme sistemi 1.Nesil (1G)'dir. 1G hücresel sistemi kullanan ilk haberleşme nesliydi. Temelde analog sistemler üzerine kurulu bu nesil sistem tipine ve hizmetlere bağlı olarak 10 ila 30 kHz arasında değişen bir bant genişliğine sahipti. Veri iletim hızları düşüktü dolayısı ile 1G sadece ses hizmetleri için uygundu. Çoklu erişim tekniği olarak Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA) tekniğini kullanmaktaydı [1]. Tüm sisteme ait frekans kanalları hücreler arasında paylaştırılmakta ve bu paylaşım bir hücrenin komşu hücrelerden farklı frekans kanallarına sahip olması ile kapsama sağlamaktaydı.

Kablosuz iletişim kalitesini önemli ölçüde artıran sistemler 2.Nesil (2G)'deki sayısal iletişim sistemleri olmuştur. Bu sistemler analog teknolojinin yerini almıştır. Veri iletim hızları çeşitli standartlara göre değişmekle birlikte saniyede 64 Kb ile 500 Kb arasında olabilmekteydi. Veri hızının artmasıyla ses iletimi dışında kısa mesaj servisi (SMS), resim mesajı ve çoklu ortam mesajlaşması (MMS) gibi hizmetler de sunulabilmekteydi [2]. Çoklu erişim tekniği olarak ise zamanı ve frekansı birlikte kullanan sistemler FDMA ve Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA) tekniğine sahiptiler.

Artan kullanıcı sayısı ve veri iletim hızı ihtiyacı 3.Nesil (3G)'ye zemin hazırlamıştır. ITU (Uluslararası Haberleşme Topluluğu) tarafından ihtiyaç duyulan bu 3G teknolojilerini tüm dünyada küresel olarak dolaşıma imkân vermesi için aynı çatı altında toplayarak IMT-2000 (Uluslararası Mobil Haberleşme 2000) standartlarını oluşturmuştur [3]. 3G ile veri iletim hızları saniyede 2 Mb seviyelerine kadar ulaşabilmekteydi. Bu durum artık kablosuz internetin kullanımını uygun hale getirmişti. Çoklu erişim tekniği olarak ise Kod Bölmeli Çoklu Erişim Tekniği'ni (CDMA) kullanmaktaydı.

4.Nesil (4G) haberleşme sistemleri ise ilk olarak 2009 yılında Avrupa'da kullanıma sunulmuştur. IMT-A standartlarına göre tanımlanmış 4G sistemleri saniyede 100 Mb'dan 1 Gb'a kadar veri hızlarını sunabilmektedir [4]. IP tabanlı çalışmakta olan 4G sistemleri 5 MHz'den 40 MHz'e kadar bant genişlikleri sunabilmektedir. 4G ile teknolojiye çok

büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Çoklu anten haberleşme teknikleri ilk defa bu nesil ile yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çoklu anten yapısına uygun olan çoklu erişim tekniği olan OFDMA (Dik Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) temel çoklu erişim yapısı olarak bu nesilde karşımıza çıkmaktadır [5]. LTE ve LTE-Advanced halihazırda pratikte kullanılan 4G standartlarıdır. Gezgin internet erişimi, IP telefon hizmeti, oyun servisleri, yüksek tanımlı gezgin televizyon, video konferans, 3 boyutlu televizyon ve bulut bilişim 4G sistemler tarafından sunulan hizmetlere örnek olarak verilebilir.

2020'li yıllarda yaygınlaşması beklenen 5G teknolojisini standartlaştırmak için çalışmalar devam etmektedir. 5G ile çok daha yüksek veri iletim hızları ve çok düşük gecikmeler hedeflenmektedir. Bu sayede nesnelerin interneti olarak adlandırılan çok sayıda cihazın internete erişimi rahat ve kesintisiz olarak sağlanabilecektir. 5G ileriki bölümlerde daha detaylı olarak ele alınacaktır. Çizelge 1.1' de haberleşme nesillerine ait temel parametreler özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Geçmişten Günümüze Haberleşme Nesillerine ait Temel Parametreler

Parametreler	1G	2G	3G	4G	5G
Gelişim	1970-1980	1990-2001	2001-2010	2011-2015	2020'ler
Veri Hızı	2 Kbps	64 -500 Kbps	2 Mbps	1Gbps 'a kadar	10Gbps 'a kadar
Teknoloji	Analog	Sayısal	Sayısal	Sayısal	Sayısal
Frekans Bandı	800-900 MHz	850-1900 MHz	1.6-2.5 GHz	2-8 GHz	3-60 GHz
Çoklu Erişim Tekniği	FDMA	FDMA, TDMA	CDMA	CDMA, OFDM	CDMA, OFDM

1.2. 5.Nesil (5G) Haberleşme Teknolojisi

5G kablosuz iletişim standardı, mevcut 4G mobil iletişim standartlarının (LTE ve LTE-A) bir sonraki aşamasıdır. 5G'nin 1-10 Gbps arasındaki yüksek veri aktarım hızlarının yanı sıra düşük gecikme, düşük güç tüketimi, yüksek spektral verimlilik gibi başlıca avantajları vardır.

5G sistemleri için frekans planlama çalışmaları devam etmekle birlikte aday olarak düşünülen bazı frekans bantları Sub-6 GHz olarak da adlandırılan 3.3-4.1 GHz ve 24-29.5 GHz, 37-41 GHz, 60 Ghz bantlarıdır [6]. Aday bantlar için her bir kümenin altında

alt bantlar bulunmaktadır. Örneğin 24-29.5 GHz kümesi, 24-26.5 GHz ve 27.5-28.5 GHz gibi alt bantlara ayrılabilir ve tasarımlar bu bantlara göre şekillenir.

Çizelge 1.2. Ükelere Göre Aday Frekans Bantları [6], [7]

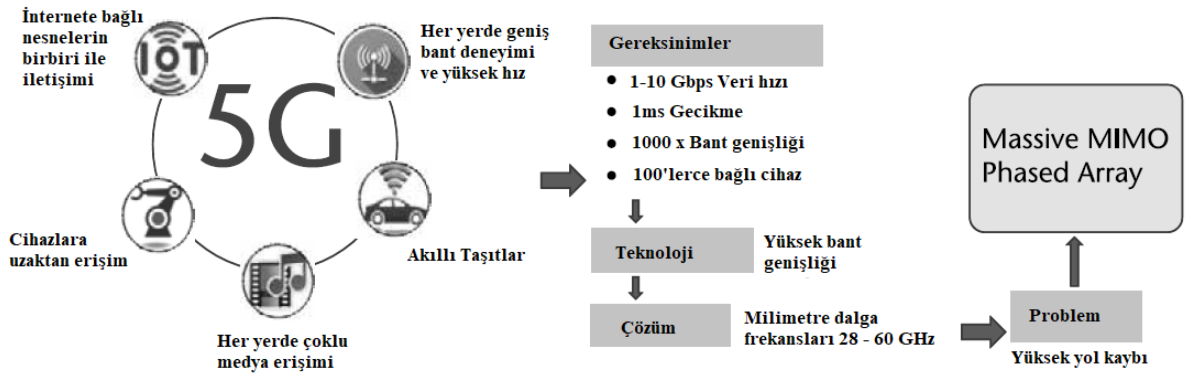
Ülke	Düşük Frekans Bandı	Yüksek Frekans Bandı
ABD	2.5 GHz, 3.7–4.2 GHz, 3.55–3.7 GHz, 5.9–7.1 GHz	24.25–24.45 GHz, 24.75–25.25 GHz, 27.5–28.35 GHz, 38.6–40 GHz, 60–71 GHz
Finlandiya	3.4–3.8 GHz	26.5–27.5 GHz
Fransa	3.46–3.8 GHz	26 GHz
Almanya	3.4–3.8 GHz	26–27.5 GHz
Rusya	3.4–3.8 GHz	26 GHz
İngiltere	3.4–3.6 GHz, 3.6–3.8 GHz	26.5–27.5 GHz
Japonya	3.6–4.2 GHz, 4.4–4.9 GHz	27.5–28.28 GHz, 60–71 GHz
Çin	3.3–3.6 GHz, 4.4–4.5 GHz, 4.8–5 GHz	24.25–27.5 GHz, 37–43.5 GHz
Güney Kore	3.42–3.7 GHz	26.5–29.5 GHz
Avustralya	3.4–3.8 GHz	24–30 GHz
Türkiye	694-790 MHz, 1427-1518 MHz, 2300-2400 MHz, 2500-2690 MHz, 3400-3800 MHz	24.25-27.5 GHz, 40-43.5 GHz ve 66-71 GHz

Veri hızının artması ve gecikmenin çok düşük mertebelere inmesiyle ağlara bağlanması beklenen çok daha fazla cihaz olması öngörülmektedir. Akıllı ev aletleri, akıllı ulaşım araçları, otomasyon sistemleri gibi günlük hayatın içindeki pek çok cihaz internet bağlantısına sorunsuz ve hızlı bir şekilde erişebilecektir. 5G teknolojisinin bazı önemli avantajları şunlardır [6]:

- Daha iyi eğitim sistemi: Dünyanın herhangi bir yerindeki bir öğrenci eğitim sınıfına gerçek zamanlı olarak katılabilecektir.

- Eşzamanlı çoklu hizmetler: Bir kullanıcı başka bir kişiyle konuşurken hava durumunu ve lokasyonunu bilebilir.
- Daha kolay ve ekonomik tıbbi tedavi: Bir doktor dünyanın başka bir yerinde bulunan hastayı tedavi edebilir.
- Kolay izleme ve takip: Devlet kurumları veya araştırma kurumları dünyanın herhangi bir yerini kolaylıkla izleyebilir.
- Daha iyi afet yönetimi: Tsunamiler, depremler gibi olası doğal afetler daha hızlı tespit edilebilir.
- Kesintisiz bağlı ve hassas mobil ağ: Veri indirme hızları 1-10 Gbps arasında çok yüksek seviyeler ulaşacak. Ağ güvenliği ve kararlılığı artacak. 5G ağları, bulut depolamaya erişimi ve kurumsal uygulamalara erişimi daha güvenli hale getirecek.

5G haberleşme sistemleri ile internet arayüzüne kavuşacak bazı cihazlar ve gereksinim-çözüm şeması Şekil 1.1’de verilmiştir [6].



Şekil 1.1. 5G ile İnternete Erişebilecek Bazı Cihazlar ve 5G Gereksinim-Çözüm Şeması

1.3. Kablosuz Haberleşme Sistemlerinde Kullanılan Anten Konfigürasyonları

Kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan giriş çıkış sayısına göre çeşitli anten konfigürasyonları mevcuttur. Bu sistemler;

1. SISO - Tek-Girişli-Tek-Çıkışlı (Single-Input-Single-Output)
2. SIMO - Tek-Girişli-Çok-Çıkışlı (Single-Input-Multiple-Output)
3. MISO - Çok-Girişli-Tek-Çıkışlı (Multiple-Input-Single-Output)
4. MIMO - Çoklu-Giriş-Çoklu-Çıkış (Multiple-Input- Multiple -Output)

- Tek-Girişli-Tek-Çıkışlı Sistemler (SISO)

Özellikle 1 Gbps üzerindeki hızlarda, yüksek bant genişliği ihtiyacı ve yüksek çıkış gücü ihtiyacı doğduğu için haberleşme bu hızlara ulaştığında spektral verimlilikte yetersizlik iletilen gücün ortamda kayıplarından dolayı sönümlenmesi gibi fiziksel sıkıntılar yaşanmaktadır. Bu sistemi kullanan bazı örnekler; Radyo, TV, bluetooth olarak verilebilir.

Bu sistemlerde çoklu yol kaçınılmaz olduğundan sinyalde solma etkisine bağlı zayıflama, veri hızı azalması, hata oranında artma gibi performans kayıpları yaşanır.

- Tek-Girişli-Çok-Çıkışlı Sistemler (SIMO)

Alıcıda uzamsal çeşitleme uygulanır. Tek verici anteni çoklu alıcı anteninden oluşurlar. Solma ve parazit etkilere karşı kullanılabilir. Alıcıdaki performansı sınırlayan işlemler yapılmasını gerektirir. Bu yöntem kanal kapasitesini artırmaz.

- Çok-Girişli-Tek-Çıkışlı Sistemler (MISO)

Birden çok verici antenin bulunup tek bir alıcı anten bulunması durumunu ifade eder. Bu durumda, aynı veriler iki verici anteninden yedekli olarak iletilir. Alıcı daha sonra gerekli verileri almak için kullanabileceği optimum sinyali alabilir.

- Çoklu-Giriş-Çoklu-Çıkış (MIMO)

Alıcıda ve vericide birden çok anten kullanılarak oluşturulur. Kullanılan anten sayısının artması ve işlem yüküne rağmen kanal doğruluğu ve verimi açısından en etkili çözümdür. MIMO sistemler çok yollu yayılımın neden olduğu bozulmayı azaltmak için kullanılır. MIMO sistemler çok yollu yayılmanın dezavantajını avantaja dönüştürerek, ek sinyal yollarını veri taşımak için ek kanallar elde edilebilecek hale dönüştürür. Bu çeşitleme tekniğiyle bilgi birden fazla parçaya ayrılarak farklı yollardan aynı anda alıcıya iletilir. Bu sayede bant genişliği artırılır, haberleşme hızı artar.

1.4. 5G Teknolojisinde MIMO'nun Yeri

Baz istasyonunun hücresel kapasitesini artırmak için üç ana yöntem vardır. Bunlar, yeni frekans spektrumları oluşturmak, baz istasyonu yoğunluğunu artırmak ve frekans spektrumunun verimliliğini artırmaktır. MIMO anten yapısı sayesinde kullanılan frekans spektrumu verimliliği, yeni frekans bantları ile ise spektrum genişliği artırılmaktadır.

Çok giriş çok çıkışlı anten sistemleri 5. Nesil iletişim pazarı tarafından halihazırda üzerine çalışılan bir araştırma alanıdır. Hacimsel olarak küçük olan yayıcılar dar anten hüzmeleri oluşturarak iletişimdeki güvenilirliği artırmaktadır. Milimetre dalga frekanslarındaki iletişim sistemleri diğer frekans spektrumlarına nazaran çok da kullanıcı dostu sayılmazlar. Milimetre dalga frekanslarındaki faz dizili çözümleri artırmak ve 5G için uygulanabilir hale getirmek için bazı zorluklar aşılmalıdır. Bu zorluklar, geniş bant frekans kapsamı, hassas hüzme kontrolü, ağ planlaması ve anten sistemleridir [6]. Çoklu hüzmeli faz dizileri iletişim sistemlerinin bu zorlukları aşabilecek ve milimetre dalga frekans spektrumunun kullanımını daha verimli hale getirebilecek yetkinliğe sahip olduğu görülmektedir.

5G'nin 1-10 Gbps arasındaki yüksek veri aktarım hızlarını karşılayabilmek için milimetre dalga frekans bantları öne çıkmaktadır. Örneğin, 60 GHz frekans bandı kısa menzilde yüksek hızlı veri aktarımı için hedeflenmektedir. Milimetre dalga frekans bantları yüksek bant genişlikleri, frekansın yeniden kullanımına uygunluk, etkin yönbağımsız yayın gücü (EIRP) gibi sebeplerden uygun gözükmesine rağmen yüksek frekans daha çok yol kaybı getireceğinden anten hüzmelerinin oldukça yüksek yönlülüklerle sahip olması gerekmektedir [6]. Bu noktada MIMO anten sistemleri 5G teknolojisi için önemli bir altyapı oluşturmaktadır.

Anten dizi sayıları mobil cihaza göre değişiklik göstermekle birlikte en çok kullanılan dizi tipleri 2x2, 4x4, 8x8 şeklindedir. 5G'de baz istasyonu ve kullanıcı cihazları için farklı özelliklerde MIMO anten tasarımı söz konusu olacaktır. Baz istasyonları daha çok elemandan oluşan "Massive MIMO" yapılara sahip olacaktır [6].

Fazlı dizi anten sistemleri, çalışma ortamına bağlı olarak ışına örüntülerinin istenmeyen yönlerdeki iletimini sınırlandırabilir, istenen yöndeki ışına yönlülüğünü de artırabilir yetkinliğe sahip sistemlerdir. İletişim sistemlerinde bu özellik iletim kalitesine veri kapasitesine önemli ölçüde katkıda bulunur.

Hüzme şekillendirme ağları (BFN), temelde fazlı dizi anten sistemlerine ihtiyaç duyar. BFN'ler, bir antenin ışına elemanlarına iletilen RF enerjisinin fazını ve genliğini hassas bir şekilde kontrol etmek için kullanılan karmaşık elektronik devrelerdir [6]. 5G sisteminde cihazlar kendi alıcı hassasiyetlerine ve gönderecekleri enerjiye göre hüzme şekillerini oluşturmak için akıllı anten yapılarına sahip olacaklardır.

1.5. Tezin Amacı

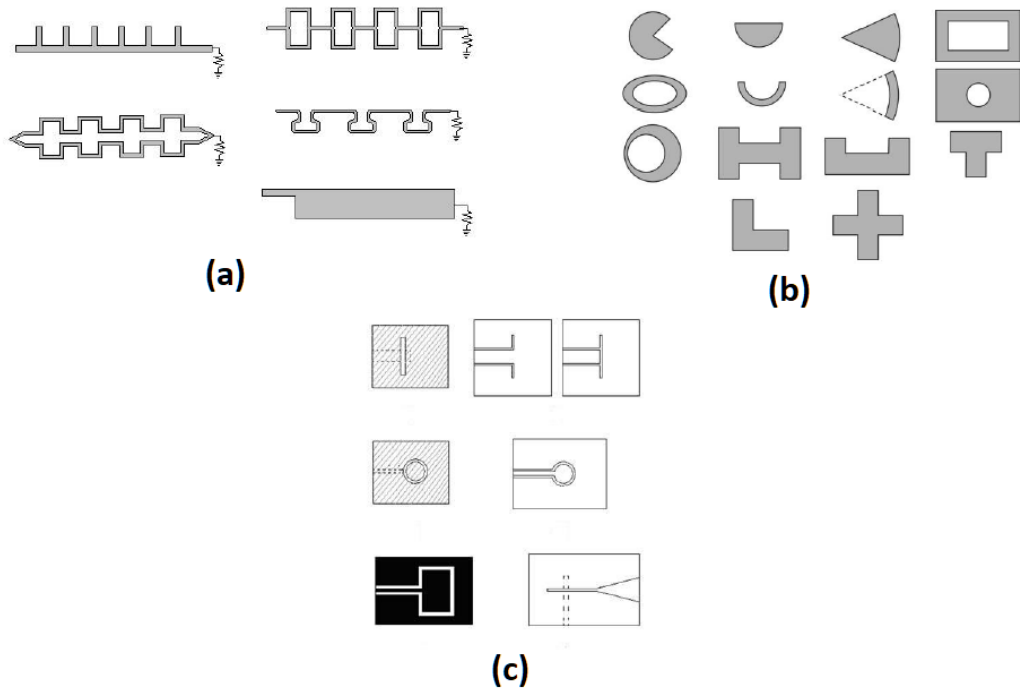
Bu tezde 5G uygulamaları için mobil platformlarda kullanılabilir yama antenler ve MIMO uygulamaları incelenecektir. Günümüzde mobil platformlarda az yer kaplaması ve kolay entegre edilebilirliği sebebi ile düzlemsel antenler tercih edilmektedir. Tasarlanacak antenler de düzlemsel yama antenler olacaktır.

5G aday frekansları içerisinde en çok tercih edilen milimetre dalga bantlarından 28 GHz ve 38 GHz frekans bantları tercih edilmiştir. Antenler tekil yamalar biçiminde tasarlandıktan sonra MIMO yapıları da incelenmiştir. Antenlerin 1 GHz'lik bant genişliği boyunca 10 dB geri dönüş kaybına sahip olmaları hedeflenmiştir. MIMO yapıdaki antenler 4x4 konfigürasyonundaki dizi antenler olarak tasarlanmıştır. MIMO yapıdaki antenleri tek noktadan beslemek için eş düzlemlı dalga kılavuzu yapısında dört kolu bir RF güç bölücü tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan antenler kimyasal aşındırma ve LPKF teknikleri kullanılarak iki farklı şekilde üretilmiştir. Üretilen antenlerin ölçüm sonuçları incelenmiştir.

2. MİKROŞERİT ANTENLER

2.1. Mikroşerit Antenler Giriş

Anten, kablosuz haberleşme sistemlerinin çalışabilmesi için gerekli olan zaruri bir elemandır. Mikroşerit antenler, düz bir yapı üzerinde oluşturuldukları için bunlara düzlemsel antenler de denilebilir. Düzlemsel antenler, dielektrik alt-taşa baskı devre tekniği ile gerçekleştirilir. Genellikle arka yüzeyde bir toprak düzleminden üst yüzeyde ise ışınım yapacak yamadan oluşurlar. Düşük maliyeti, kolay üretimi ve küçük boyutları nedeniyle, düzlemsel antenlerin mobil cihazlara entegre edilmesi kolaydır. Çizelge 2.1'de düzlemsel antenlere ait avantaj ve dezavantajlar tablo halinde verilmiştir. Baskı devre üretimi ile elde edilebilecek düzlemsel anten çeşitleri Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Bunlar; yama antenler, yarık antenler, yürüyen dalga antenleridir (Travelling wave antenna) [8].



Şekil 2.1. Mikroşerit Anten Örnekleri: (a) Yürüyen Dalga , (b) Yama ve (c) Yarık Anten

Çizelge 2.1. Düzlemsel antenlerin avantaj ve dezavantajları [9]

Düzlemsel Antenlerin Avantajları	Düzlemsel Antenlerin Dezavantajları
Düşük üretim maliyeti	Özel teknikler kullanılmadığında dar bantlı olmaları
Kolay üretilebilirlik	Dielektrik ve iletken kayıplarının yüksek olması ve buna bağlı olarak anten verimliliğinin düşmesi
Ürüne göre şekil alabilecek yapıda olması	Sıcaklık ve neme olan hassasiyetleri
Şok ve titreşime dayanıklı olması	
Düzlemsel ve dairesel polarizasyonların uygulanabilmesi	
Boyutlarının küçük olması	

2.2. Mikroşerit Antenlere ait Temel Parametreler

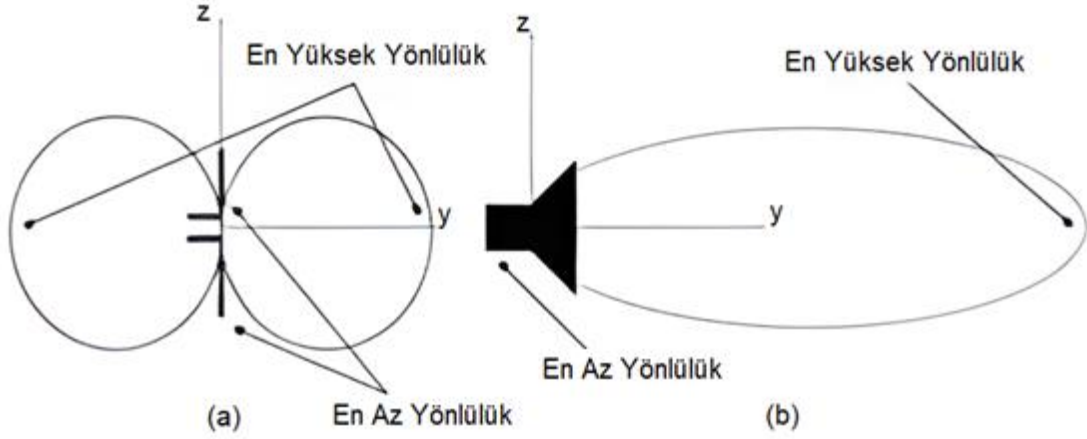
Antenlerin amacı, iletim hattında ilerleyen elektromanyetik dalgaların ışıma yoluyla ortama geçiş yapmasını veya ortamdaki elektromanyetik dalgaları akımın indüklenmesi yoluyla iletim hatlarına aktarmayı sağlamaktır. Işıma sebebi ile oluşan elektromanyetik dalganın elektrik alan (E), manyetik alan (H) vektörleri birbirilerini oluşturarak enerjinin ilgili yönde iletilmesini sağlarlar. Anten temel parametreleri şu şekilde özetlenebilir;

İzotropik Işıma: Noktasal kaynağı ifade eder. Noktasal kaynaktan çıkan bir gücün (P_{kaynak}) R yarı çaplı bir kürenin yüzeyindeki herhangi bir noktadaki güç yoğunluğu (S_{izo}) olarak ifade edilir [10].

$$S_{izo} = \frac{P_{kaynak}}{4\pi R^2} \quad (2.1)$$

Noktasal kaynak gerçek dünyada gerçekleştirilebilir bir şey değildir. İzotropik anten, pratik bir antenin diğer özelliklerini belirlemek için referans olarak kullanılır.

Yönlülük ve Kazanç: Bir yöndeki güç yoğunluğunun yönbağımsız kaynağın güç yoğunluğuna oranına yönlülük denir [10]. Anten üzerinde ilerleyen elektromanyetik dalga iletkenlik sebebiyle ısınarak kayba uğrar bu durumda toplam ışıma gücünün antenin besleme portundaki giriş gücüne oranı verimliliği verir. Verimlilik ile yönlülüğün çarpımı ise toplam kazancı oluşturur. Kazanç ve yönlülüğün birimi dBi'dir.



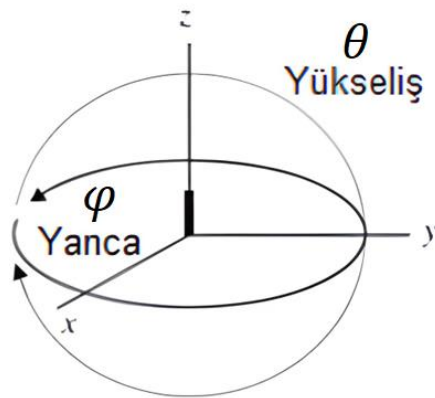
Şekil 2.2. (a) Dipol ve (b) Boynuz antene ait yönlülük gösterimleri

Uzak Alan: Antenden yeterince uzakta elektromanyetik dalgalar düzlem dalga gibi davranır [10]. Uzak alan mesafesi (r_d), anten boyu ve çalışılan dalga boyu ile ilişkilidir. D antenin en büyük boyu olmak üzere [10];

$$r_d = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

olarak verilir. Burada λ çalışılan dalga boyudur.

Üç Boyutlu Anten Işıma Örüntüsü: Antenlerin yayılım örüntülerini göstermek için kutupsal koordinat sistemi kullanılır. Teta (θ) eksenini yükseliş, Phi (φ) eksenini ise yanca olarak isimlendirilir.



Şekil 2.3. Üç Boyutlu Anten Örüntü Düzlemi

Anten empedansı ve geri dönüş yansımaya katsayısı (Γ): Antenin besleme noktasından antene doğru olan giriş empedansı ile besleme devresinin karakteristik empedansı

arasında uygunluk olmalıdır. En düşük yansımaya katsayısı elde edildiği durumda antene maksimum güç iletimi olur. Yansımaya katsayısı hesabı;

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir. Burada Z_{in} antenin giriş empedansı, Z_0 ise besleme hattının karakteristik empedansıdır.

Anten polarizasyonu: Antenin E alan vektörünün zamana bağlı yönelimi polarizasyon olarak adlandırılır [10]. Bu yönelim yönbağımsız anten kazancına göre belirlenen anten kazancını etkiler. Alıcı ve verici antenlerin aynı polarizasyona sahip olmaları polarizasyon kaynaklı kayıp oluşumunu engeller. E alan vektörünün oryantasyonuna göre dikey, yatay, dairesel polarizasyon gibi çeşitleri vardır.

Eksenel oran (EO): Ana elektrik alan vektörünün büyüklüğünün diğer eksenlerdeki elektrik alan vektörü büyüklüğüne oranı olarak tanımlanabilir. Antene ait polarizasyon şeklini belirlemek için kullanılacak bir orandır. Literatüre bakıldığında eksenel oranı 3 dB altındaki değerlere sahip antenler dairesel polarizasyona sahip antenler olarak kabul edilir. EO, denklem 2.4'te verilmiştir [10].

$$EO = \frac{|E_\theta|}{|E_\phi|}, \quad 1 \leq EO \leq \infty \quad (2.4)$$

2.3. Temel Mikroşerit Anten Yapıları

Günümüzde kablosuz haberleşme cihazlarında sıkça kullanılan başlıca düzlemsel mikroşerit antenler; dikdörtgen, kare, daire, halka, üçgen, beşgen gibi geometrik yama şekillere sahiptirler. Bunlar içerisinde dikdörtgen, kare ve daire şekilleri için elde edilmiş empirik denklemler mevcuttur. Bu denklemler sayesinde tam dalga analizlerini yapmadan önce tasarımcıların yamaya ait boyutlarını yaklaşık olarak elde edebilmesi mümkündür. Bu da rastgele rakamlar ile başlamak yerine rezonans frekansı, taban malzemesi kalınlığı, dielektrik sabiti gibi değişkenlere göre elde edilen yaklaşık boyutlar kullanılarak benzetim ortamına geçmeyi kolaylaştırır. Başlangıç parametreleri bilinen yamanın benzetim ortamında empedans uyumlaması, bant genişliği, ışınma örüntüsü gibi gerekli istekleri karşılayabilmek için uygun tam dalga benzetim programları kullanılarak tasarımcı tarafından iteratif benzetimler yapılabilir. Bu benzetimler sonucunda nihai yama parametrelerine kolaylıkla ulaşılabilir.

2.3.1. Dikdörtgen Yama

İletim hattı modeline dayanarak bir yama antenin boyu (L) yaklaşık $\lambda/2$ olacaktır. Yama kabaca, açık ucunda iyi bir yansımaya sahip açık uçlu bir iletim hattıdır. Yamanın ucu açık devre olduğu için bu noktada akım sıfır, merkezinde maksimum ve başlangıcında ise minimumdur. Başlangıç ucundaki gerilim minimum iken açık uçtaki gerilim maksimum değerdedir. Her iki uçta saçak elektrik alanlar oluşur. L yamanın boyu, W yamanın genişliği, h taban malzemesinin yüksekliği, f_r rezonans frekansı, ϵ_r malzemenin dielektirik katsayısı, ϵ_{reff} malzemenin etkin dielektirik katsayısı, c ışık hızı, L_{eff} saçak alanlardan oluşan faktörü de kattığımızda elde edilen etkin anten boyu olmak üzere dikdörtgen ve kare yama antenler için temel parametrelere ait formüller aşağıda verilmiştir. Temel mod TM₁₀ için [11];

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

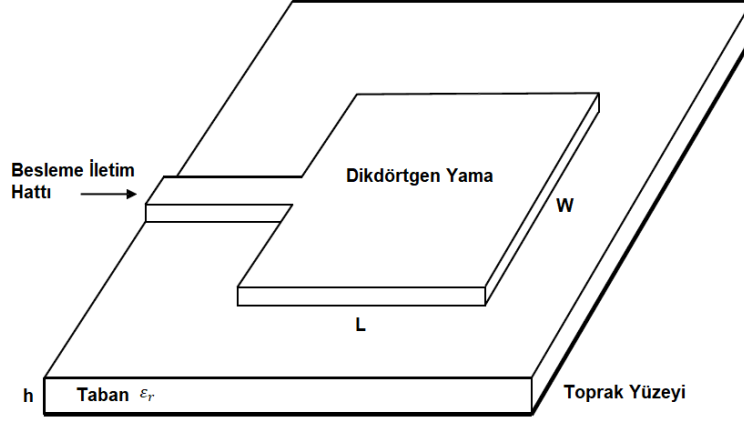
$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+12h/W}} \right) \quad (2.6)$$

$$L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.7)$$

$$W = \frac{c}{2f_r\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} \quad (2.8)$$

$$L_{eff} = L - 2\Delta L \quad (2.9)$$

$$\Delta L = (h)(0.412) \frac{(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad (2.10)$$



Şekil 2.4. Dikdörtgen Yama Temel Parametreler

2.3.2. Dairesel Yama

Bazı durumlarda dairesel yamalar dikdörtgen yamalara göre fiziki boyutlara daha uygun şekilde yerleştirilebilmektedir. Dizi anten tasarımı yaparken birim elemanlar daha düzgün bir yerleşime olanak sağlar. Dairesel yamaları modelleyen uygun bir iletim hattı modeli yoktur. Rezonans frekansı ve bant genişliğini belirlemek için kavite modeli kullanılabilir. Dairesel dalga kılavuzlarının TE modlarına ait kesim frekansları aynı zamanda dairesel yamaların rezonans frekanslarını belirtir. Manyetik duvarları ve TM modları ile yamalar dalga kılavuzlarının eşleniğidir. Şekil 2.5'te verilen dairesel yama antene ait rezonans frekansı;

$$f_{mn} = \frac{x'_{mn}c}{2\pi a_{eff}\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2.11)$$

ile hesaplanacaktır. Burada c ışık hızı, ϵ_r malzemenin dielektrik sabitini belirtirken, a_{eff} dairesel yamanın efektif yarıçapını belirtir ve eşitlik 2.11'de verilmiştir.

X'_{mn} n. dereceden Bessel fonksiyonunun türevinin m. sıfırındır. Bessel fonksiyonunun temel ve bazı yüksek modlar için değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir;

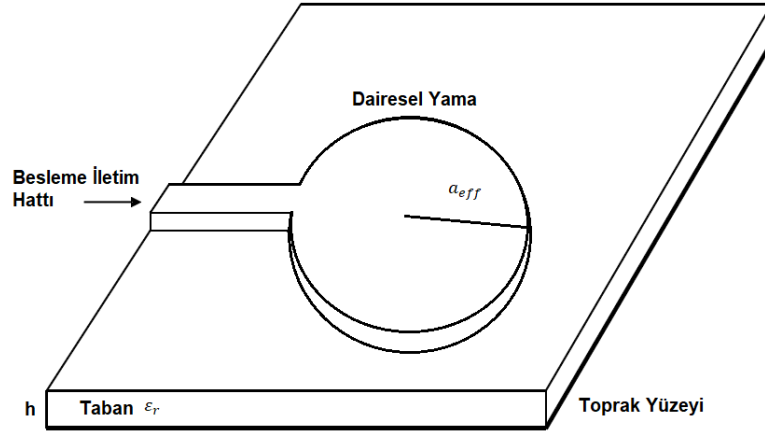
Çizelge 2.2. Bessel fonksiyonu türevinin sıfırları [12]

TM_{11}	$x_{11} = 1.841$
TM_{21}	$x_{21} = 3.054$
TM_{01}	$x_{01} = 3.832$

TM_{31}	$x_{31} = 4.201$
-----------	------------------

$$a_{eff} = a \left[1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left(\ln \left\{ \frac{\pi a}{2h} \right\} + 1.7726 \right) \right]^{1/2}, \quad a/h \gg 1 \quad (2.12)$$

a_{eff} terimi dairesel yamanın efektif yarıçapını belirtir. a fiziksel yarıçap, h ise taban malzemenin yüksekliğidir. a_{eff} ve a birbirine çok yakın değerlerdir. Tasarım aşamasına a_{eff} değeri ile başlanarak optimum yarıçap değeri benzetim sonuçlarına göre elde edilir.



Şekil 2.5. Dairesel Yama Anten Gösterimi

2.4. Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri

Antenlerin besleme noktaları arkalarındaki elektrik devresi ile elektriksel bağlantılarını sağlar. Anten ve elektrik devresi arasında maksimum güç aktarımı sağlayabilmek için empedans uyumlaması gerekir. Besleme tekniği seçimindeki en büyük kriter, uygulama özelinde güç aktarımının en verimli şekilde sağlanabilmesidir. Hatalı besleme tekniği kullanımı istenmeyen ışımlar, ekstra yüzey kayıpları, yan hüzmeye seviyelerinin artması gibi olumsuz etkilere neden olacaktır. Anten besleme tekniklerini doğrudan ve bağımlı beslemeler olarak ikiye ayırabiliriz. Doğrudan besleme teknikleri, besleme iletim hattının ışına yapan yamaya saplanması ile yapılırken bağımlı besleme teknikleri, iletim hattının ışına yapan yamaya elektromanyetik bağışım yolu ile bağlanmasıyla oluşturulur.

Doğrudan besleme teknikleri;

- Mikroşerit İletim Hattı
- Koaksiyel Besleme

- Topraklı Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu (Coplanar Waveguide With Ground-CPWG)

Dolaylı besleme teknikleri;

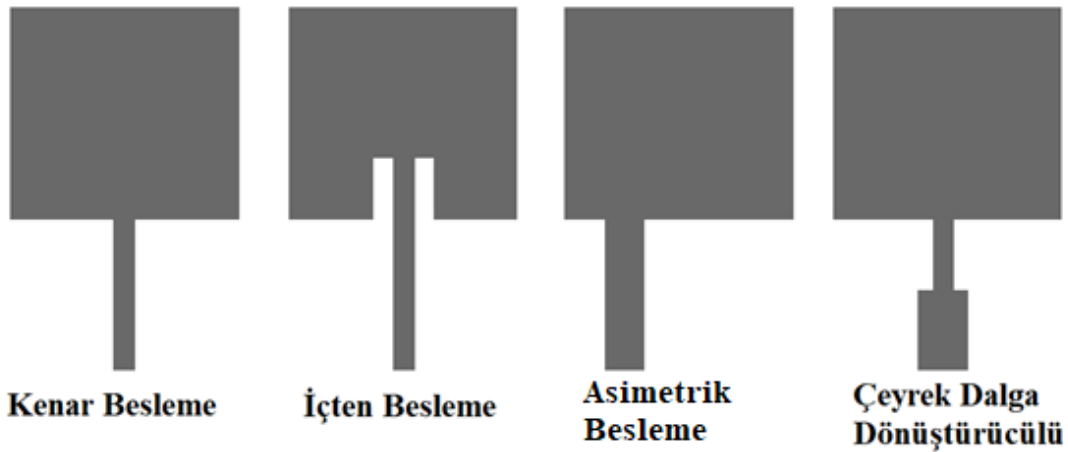
- Açıklık Bağlısımlı Besleme
- Yakınlık Bağlısımlı Mikroşerit Hat Besleme

olarak sıralanabilir.

2.4.1. Mikroşerit İletim Hattı Besleme Tekniği

RF kaynaktan gelen iletken metalik hattın ışına yapan yamaya elektriksel olarak doğrudan bağlanması ile yapılan besleme teknikleridir. Bu besleme tekniğinin en büyük avantajı ışına yaması ile aynı malzeme üzerine işlenebiliyor oluşudur. Besleme hattının genişliği yamaya oranla oldukça küçüktür. Şekil 2.6'da farklı mikroşerit besleme konfigürasyonları görülebilir.

Kenar besleme, iletim hattı kenarının bitimi ile yama kenarının başlangıcının birleşimi şeklindedir. İçten besleme yamadan içeriye belli bir uzunlukta girinti oluşturularak elde edilir ve bu sayede daha kolay bir empedans uyumlamasını mümkün kılar [6]. Tek bir frekans için uyumlama yapılmak isteniyorsa 50 Ohm iletim hattı ile yama arasına çeyrek dalga dönüştürücü eklenerek de besleme gerçekleştirilebilir [13].

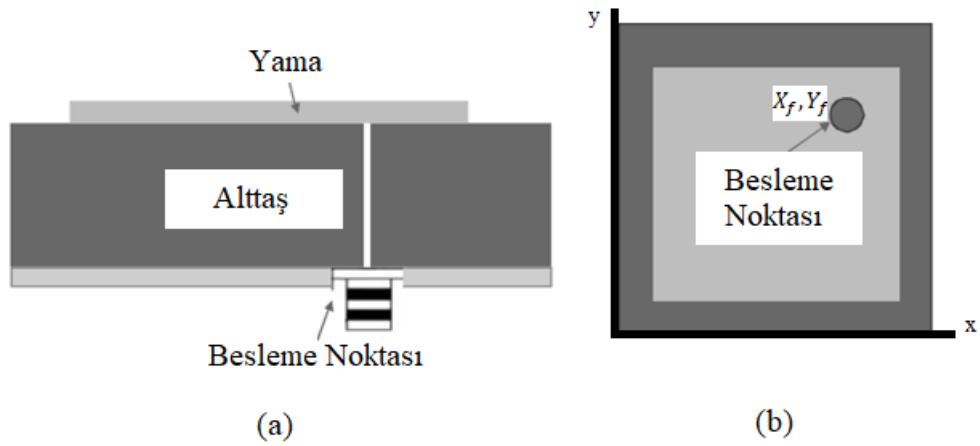


Şekil 2.6. Mikroşerit Besleme Konfigürasyonları

2.4.2. Koaksiyel Besleme

Anten tasarımlarında koaksiyel besleme tekniği oldukça yaygın olarak kullanılır. Koaksiyel hattın iç iletkeni dielektrik boyunca uzanarak yamaya bağlanır. Dış iletken hat

ise toprak yüzeye bağlanır. Koaksiyel besleme yama antene empedans uyumlaması açısından en uygun olan noktadan entegre edilir. Bu besleme şekli taban kalınlığı çok ince olacağından en az ışıma kapasitesine sahip besleme tekniğidir. Böylece yamanın ışıma örüntüsünü de en az düzeyde etkiler [6]. Koaksiyel beslemeler tek bir frekans için besleme noktası belirledikleri için (denklem 2.13 ve 2.14 (X_f, Y_f) besleme noktası) dar bantlı uygulamalarda kullanıma uygundur. Taban kalınlığı arttıkça indüktif etki artacağından yama ile empedans uyumlaması zorlaşır. Tabanın arka tarafından konektörün montajı ile düzlemsellik bozulacağından özellikle dizi antenler için uygun bir besleme tekniği değildir.



Şekil 2.7. (a) Yandan ve (b) Üstten Koaksiyel Besleme Gösterimi

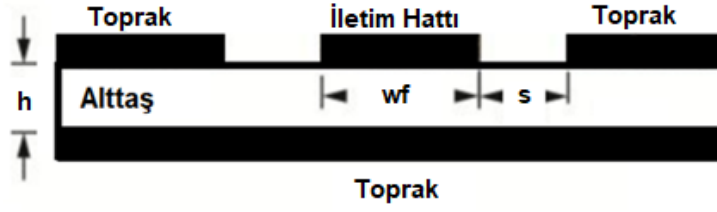
$$X_f = \frac{L}{2} \quad (2.13)$$

$$R(Y_f) = R(y = 0) \cos^2\left(\frac{\pi y_0}{L}\right) \quad (2.14)$$

$R(y = 0)$, yamanın köşe empedansı. L ise yamanın uzunluğudur.

2.4.3. Topraklı Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu

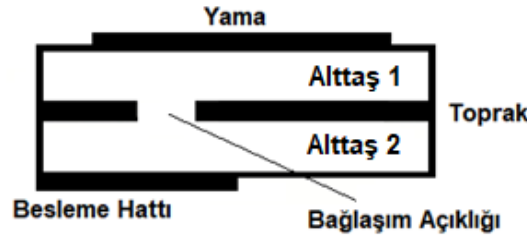
Eş düzlemli dalga kılavuzu iletim hatları ile yama antenler beslenebilir. Bu teknikte besleme yapmanın en büyük avantajları geniş bantlı empedans uyumlamasına izin vermesi ve besleme mekanizmasının ışıma örüntüsüne etkisinin olmamasıdır.



Şekil 2.8. Eş Düzlemlü Dalga Kılavuzu İletim Hattı Kesiti

2.4.4. Açıklık Bağlı Besleme

Düzlemsel antenler için önemli bir besleme tekniği de açıklık bağlantılı beslemedir. Bu teknik çok geniş bantlı empedans uyumlamalarına izin vermesinin yanında besleme yapısı ile ışıma yaması arasında toprak ile bir izolasyon oluşmasını da sağlar. Şekil 2.9.'da görüldüğü üzere üç iletken katmandan (araların dielektrik malzeme ile dolu olduğu) ortadaki katmanın toprak olduğu ve alt katmandaki besleme yapısı ile üst katmandaki yama arasında bu toprak yüzeyde açılan bir açıklık ile elektromanyetik bağlantı oluşturulan yapılardır. Bazı durumlarda [14] olduğu gibi aradaki toprak katman olmadan da tasarlanabilirler. Çok katmanlı bir yapı oldukları için gerçekleştirilmesi diğer düzlemsel yöntemlere göre daha maliyetli ve zordur. Açıklık manyetik bağlantıyı artırmak için yaklaşık olarak yamanın orta noktasına konulur. Açıklığın şekline ve boyutlarına göre ışıma yapan yamanın bant genişliği artırılabilir.

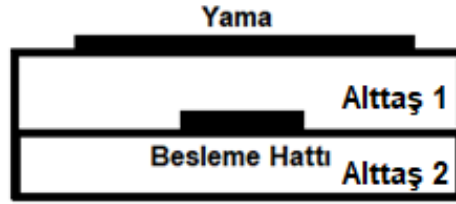


Şekil 2.9. Açıklık Bağlı Besleme

2.4.5. Yaklaşım Bağlı Mikroşerit Hat Besleme

Yaklaşım bağlantılı mikroşerit hat besleme tekniği yine en az üç iletken katmandan oluşan ancak toprak katmanının en altta olduğu ve besleme iletkeni ile yamanın bulunduğu katmanların art arda olacak şekilde dizildiği konfigürasyondur (Şekil 2.10). Besleme iletkeni ucu açık bir mikroşerit hat olarak yamanın altında bir konuma ayarlanır. Ucu açık bu besleme hattı istenmeyen ışımalara neden olur ve anten verimliliğini düşürür. Toprak

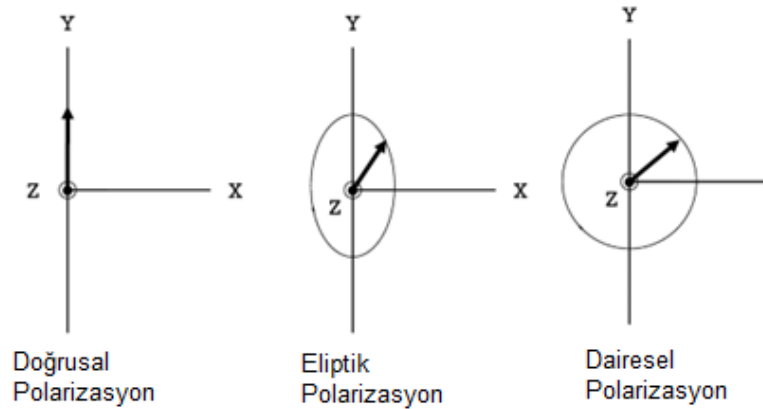
yüzey ile besleme katmanının olduğu yüzey arasındaki taban malzemesi olabildiğince ince bir malzeme olmalıdır.



Şekil 2.10. Yaklaşık bağımsız mikroşerit hat besleme

2.5. Polarizasyon Çeşitleri

Tüm elektromanyetik dalgalar ve ışınlar bir polarizasyona sahiptir. Bir antenin polarizasyonu, elektrik alan bileşeninin yayılım yönüne göre zaman içerisinde izlediği eğrinin şeklidir. Doğrusal, dairesel ve eliptik polarizasyonlar oluşabilir. Bu bölümde doğrusal, dairesel ve eliptik polarizasyonlar anlatılmıştır.



Şekil 2.11. Polarizasyon Çeşitleri

2.5.1. Doğrusal Polarizasyon

Doğrusal polarizasyon, dalga'nın elektrik alan bileşeninin zamanın her anı boyunca yayılım yönüne dik olduğu durumlarda oluşur. Oryantasyona göre yatay veya dikey olarak adlandırılır. Farklı besleme noktaları ile her iki oryantasyonda polarize olabilen tek bir anten tasarlanabilir. Bunlara Çift-Kutup (dual-pole) antenler denir.

Geniş bantlı antenlerde baskın mod doğrusal polarizasyon iken yüksek dereceli modlar farklı polarizasyonlara sahip olabilir [8]. Işıma yapmayan kenarlar boyunca oluşan saçak alanlar ışımadaki E ve H alanlarına katkıda bulunmazlar. Ancak bu saçak alanlar çapraz polarizasyon kaynaklarıdır. Gerçek hayatta antenler hiçbir zaman tam olarak tek yönde

polarize değildirler. Elektrik alan yüzeyine dik olan enerji miktarı çapraz-polarizasyon ifadesi ile belirtilir. Çapraz polarizasyon seviyesi alt tabaka kalınlığı ile artar. Örneğin, baskın mod (TM_{10}) ile uyarılan bir yama antende en çok çapraz polarizasyon katkısını TM_{02} modu verir.

2.5.2. Dairesel Polarizasyon

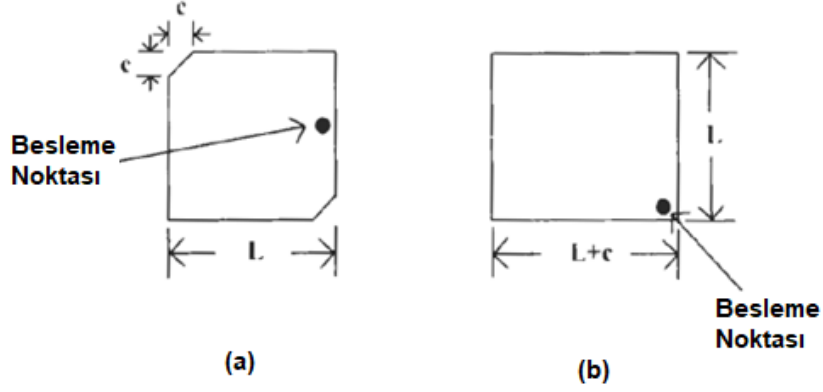
Elektromanyetik dalgaya ait elektrik alan vektörü, dalganın yayılım doğrultusu etrafında zamanın fonksiyonu olan bir daire çiziyorsa bu durumda elektromanyetik dalga dairesel polarizasyona sahiptir. Elektrik alan vektörünün zamana bağlı dönüşü saat yönünde ise sağ-el dairesel polarizasyon, saat yönünün tersinde ise sol-el dairesel polarizasyon olarak adlandırılır.

Dairesel polarizasyonun oluşabilmesi için elektrik alan vektörünün;

- Büyüklükleri aynı olan birbirine dik iki bileşeni olmalı.
- Bu iki bileşen 90° 'nin tek katlarında faz farkına sahip olmalı.

Düzlemsel antenlerde dairesel polarizasyon tek noktadan ve çift noktadan besleme tekniklerinin yanında senkronize alt yamalar kullanarak da oluşturulabilir. Tek noktadan besleme yaklaşımı yama anteninin dairesel polarizasyona sahip olabilmesi için herhangi bir harici devre gerektirmez. Temelde, aynı iki modun birbirlerine dik olarak, aralarında 90° 'lik bir faz farkı ile uyarıldığında gerçekleşir. Tek noktadan besleme ile dairesel polarizasyon elde edebilmek için yama üzerinde bütünlüğü bozup besleme noktasını ise kenarlara yaklaştırmak ya da besleme noktasını şeklin köşegenleri üzerine yerleştirip yamanın bir kenarını bir miktar uzatmak gerekmektedir. Yama bütünlüğünü bozmak için yama kenarlarını kırpmak, bir kenarın diğerine göre uzunluğunu biraz arttırmak, yama üzerinde açıklıklar oluşturmak gibi teknikler kullanılır. Tek noktadan besleme tekniği ile dairesel polarizasyon örnekleri Şekil 2.12'de verilmiştir.

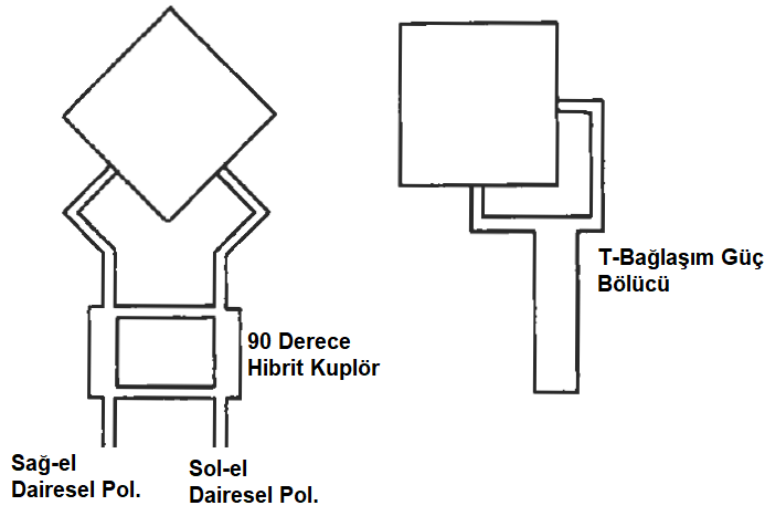
Dikdörtgen şeklindeki bir yamayı koaksiyel yapı ile beslediğimizde dairesel polarizasyon elde etmek için yamayı köşelerden keseriz [15] ya da besleme noktasını köşegenlerden birine yerleştiririz. Yamayı Şekil 2.12'deki gibi kesiğimizde sağ-el dairesel polarizasyon elde ederiz. Tam tersi köşelerden kesilseydi sol-el dairesel polarizasyon elde edecektik. Şekil 2.12'deki köşegene yerleştirdiğimizde sağ-el dairesel polarizasyon elde ederiz. Diğer köşegene yerleştirmiş olsaydık sol-el dairesel polarizasyon elde edecektik.



Şekil 2.12. (a) Köşelerden Kesilmiş ve (b) Besleme Noktası Köşegene Yerleştirilmiş Tek Noktadan Beslenen Dairesel Polarizasyon Örnekleri [16]

Tek noktadan besleme tekniği ile dairesel polarizasyon uygulaması nispeten basit olmasına rağmen bu tasarım yönteminin kusuru dairesel polarizasyon bant genişliği yani 3 dB'den az aksenal oranının oldukça dar olması.

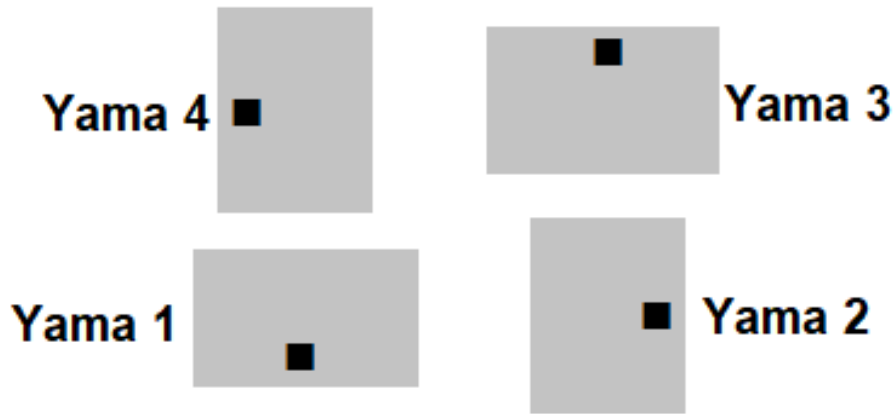
Daha iyi dairesel polarizasyon elde etmenin en kolay ve sık kullanılan bir başka yolu iki farklı besleme noktası kullanmaktır. Bu besleme noktalarından verilen birbirlerine göre dik modların aralarında 90° faz farkına sahip ve aynı genlik seviyesine sahip olması gerekmektedir. 90° hibrit kuplör tek bir kaynak kullanarak çift besleme noktası elde etmek için kullanılabilir (Şekil 2.13). 0 dB aksenal orana sahip kusursuz bir dairesel polarizasyon elde etmek zor olabilir. Besleme hatlarından kaynaklı istenmeyen ışınlar ve aksenal oran bozulmaları gözlenebilir, bunları önlemek için prob ile besleme ve açıklık bağlantılı besleme gibi besleme teknikleri sıklıkla kullanılır.



Şekil 2.13. Çift Besleme Hattı ile Dairesel Polarizasyon Elde Etme Yöntemleri [16]

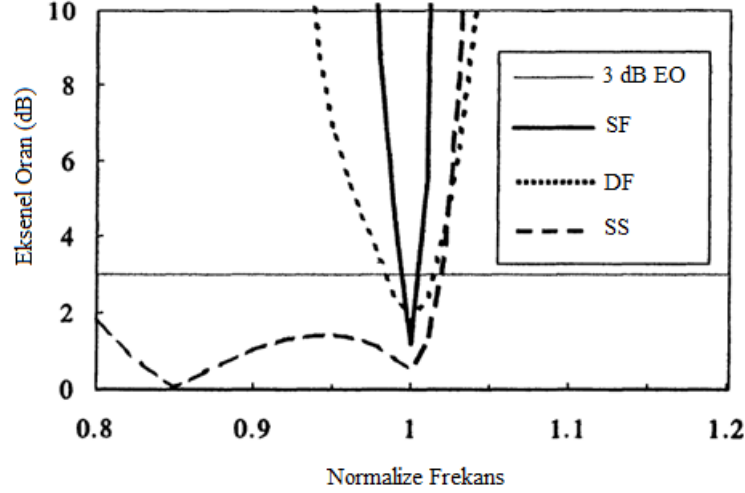
90° hibrit kuplör kullanılarak TM_{01} ve TM_{10} modları elde edilerek bu iki dik mod antene ait birbirine dik kenarlardan uyarılarak dairesel polarizasyon elde edilebilir. 90° hibrit kuplör sayesinde besleme noktalarının genlikleri aynı fazları arasında ise 90° fark oluşacaktır. Sağ-el veya sol-el dairesel polarizasyonun seçimine göre diğer port uygun empedans ile sonlandırılmalıdır. Empedans uyumsuzluğundan kaynaklı yansımalar bu sonlandırılan port üzerinde sönümlenir. Eksenel oran bant genişliği empedans bant genişliği tek beslemeli dairesel polarizasyona göre nispeten daha geniştir. Ancak anten verimliliği dikkate alındığında kuplördeki güç kaybı ile tek beslemeli dairesel polarizasyondaki empedans ve polarizasyon uyumsuzluklarından kaynaklanan güç kaybı benzerdir.

Düşük eksenel oran elde etmenin en doğru yolu senkronize diziler kullanmaktır. Şekil 2.14'de 4 adet her biri bir öncekine göre 90° ar derece döndürülmüş bir anten dizisi vardır. Fiziksel döndürmeye ek olarak her bir anten bir önceki dizi elemanına göre 90° faz kayması ile beslenir. Şekil 2.14'teki eksenel oranına bakıldığında $\pm 45^\circ$ 'de dairesel polarizasyona sahip olduğu görülmektedir. Senkronize alt diziler ile dairesel polarizasyon oluşturmanın en büyük dezavantajı elektriksel boyutların çok büyümesidir [17]. Bu nedenle entegre edilmeleri zordur. Ayrıca dizi elemanları arasındaki bağlaşım dolayısıyla ışına örüntüsünde bozulmalar ve istenmeyen yönlerdeki ışımalar olarak tanımlanan grating loblar oluşmaktadır. Bu sebeplerden dolayı pek tercih edilmezler.



Şekil 2.14. Senkronize Yamalar ile Oluşturulan Dairesel Polarizasyon Örneği

Düzlemsel antenler için dairesel polarizasyon elde etme yöntemleri ve frekans bant genişlikleri arasındaki ilişki Şekil 2.15'de verilmiştir. SF tek beslemeli, DF çift beslemeli, SS ise senkronize yama yöntemi olarak grafikte gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Düzlemsel Antenlerde Dairesel Polarizasyon için Besleme Şekillerine ait Bant genişliklerinin Karşılaştırması [17]

2.5.3. Eliptik Polarizasyon

Elektrik alan vektörünün ucu uzayda zamanla bir eliptik yörünge izliyor ise bu dalgaya eliptik polarize denir. Bu alan vektörü saat yönünde dönüyor ise sağ-el eliptik polarizasyon, saat yönünün tersinde ise sol-el eliptik polarizasyon olarak adlandırılır. Eliptik polarizasyon, elektrik alanın izlediği eliptik yörüngenin majör ve minör eksenlerinin büyüklüklerinin oranları ile de belirtilir. Bir elektromanyetik dalga doğrusal ve dairesel polarize edilmemişse bu durumda eliptik polarize olarak ifade edilir. Eliptik polarizasyon için doğrusal ve dairesel polarizasyonların özel bir durumu denilebilir. Eliptik polarizasyonun oluşabilmesi için;

- Alanın iki dik doğrusal bileşeni olmalıdır
- İki bileşen aynı veya farklı büyüklükte olabilir
- İki bileşen aynı büyüklükte değil ise faz farkları 0° ve 180° 'nin katları olmamalıdır (bu durumda doğrusal polarizasyon oluşur)
- İki bileşen aynı büyüklükte ise faz farkı 90° 'nin tek katları olmamalıdır (bu durumda dairesel polarizasyon oluşur)

2.6. Dizi Antenler

Baskı devre yöntemi ile oluşturulan tek bir yama anten 5-8 dBi mertebelerinde düşük – orta diyebileceğimiz yönlülüklere sahiptir [17]. Bu düzlemsel yapıların diğer anten gerçekleştirme yöntemlerine göre başlıca avantajı taban malzeme üzerine periyodik

dizilimlerinin kolay olmasıdır. Dizinin tüm elemanlarının ve aradaki bağlaşım mekanizmasının aynı taban malzemesi üzerine yerleştirilmesi üretim maliyetlerinin az olmasını sağlamaktadır. Bu nedenlerle çoğu karasal haberleşme sisteminde düzlemsel diziler tercih edilir.

Bir anten dizisinde elemanlar, tek bir anteninkilere göre daha iyi anten kazancı, yönlülük ve sinyal-gürültü oranı (SNR) elde etmek için birleştirilir. Dizideki eleman sayısı arttıkça ışıma genişliği daralır yani yönlülük artar. Tekil antenler istenen yönde ve fazda birleştirildiğinde ve diğer tüm yönlerde birbirini sönümlediklerinde anlamlı bir dizi anten elde edilecektir. Dizi elemanları birbirinden çalışılan dalga boyunun yarısından daha uzağa yerleştirilirler ise ışıma örüntüsünde istenmeyen yönlerde de ışıma örüntüleri oluşacaktır buna grating lobe denmektedir. Dizi elemanlarının maksimum tarama açısı, dizi düzeni ve eleman aralığı ile bu grating lobe'lar kontrol edilebilir.

Dizi tasarımında, antenin genel modelini şekillendirmek için kullanılan kontrol parametreleri bulunmaktadır:

- Dizinin geometrik dizilim konfigürasyonu (doğrusal, dairesel, düzlemsel);
- Dizi anten elemanları arasındaki fiziksel mesafe
- Her elemana ait faz ve genlik bilgisi
- Her anten elemanının ışıma modeli

Dizideki anten elemanları arasında karşılıklı bir bağlaşım vardır. Bir anten diğerlerinden ışıyan gücün bir kısmını alır ve bu gücün bir kısmını da komşu elemanlara dağıtır. Her bir antende oluşan ışıma aynı zamanda komşu elemanlar üzerinde bir akım indükler. Dizinin etkin ışıma örüntüsü tek elemana göre belirlenir. Diziyi besleyen iletim hattı da ışıma örüntüsü ile doğrudan ilişkilidir. Birim elemanları bir dizi haline getirdiğimizde elemanların giriş empedanslarını da değiştirmiş olacağından, dizi şeklindeki yeni anten elemanlarının giriş empedansı ile besleme empedansı arasında uyumlama gerekecektir. Besleme iletim hattındaki yansıma arttığında anten elemanları arasındaki karşılıklı bağlaşım tarama alanında kayba yol açabilir.

Dizi antenlerde ışıma örüntüsü oluşurken her elemandan yayılan elektrik alanlar toplanır. Her bir antenin besleme hattı ile belirlenen genlik ve fazları bize ışıma örüntüsünü şekillendirmek için ekstra serbestlik verir.

Tek bir anten elemanın her iki yönde polarizasyon bileşeni olduğunda uzak alanda elektrik alan aşağıdaki biçimde yazılabilir;

$$\vec{E} = E_{\theta}(\theta, \varphi)\hat{\theta} + E_{\varphi}(\theta, \varphi)\hat{\varphi} \quad (2.15)$$

E_{θ} ve E_{φ} anten üzerindeki herhangi bir noktanın kompleks elektrik alan bileşenleridir. Birim elamanı uzayda r kadar yer değiştirirsek elektrik alan ifadesine e^{jkr} faz farkı eklenecektir. Bu durumda taşınmış antenin elektrik alan ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır;

$$\vec{E} = [E_{\theta}(\theta, \varphi)\hat{\theta} + E_{\varphi}(\theta, \varphi)\hat{\varphi}]e^{jkr} \quad (2.16)$$

Her bir dizi elemanı için aynı işlem uygulanıp elektrik alan ifadeleri toplandığında;

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N [E_{\theta_i}(\theta, \varphi)\hat{\theta} + E_{\varphi_i}(\theta, \varphi)\hat{\varphi}]e^{jkr_i} \quad (2.17)$$

Tüm birim elemanlar aynı örüntüye sahip ise denklem aşağıdaki gibi parçalanabilir;

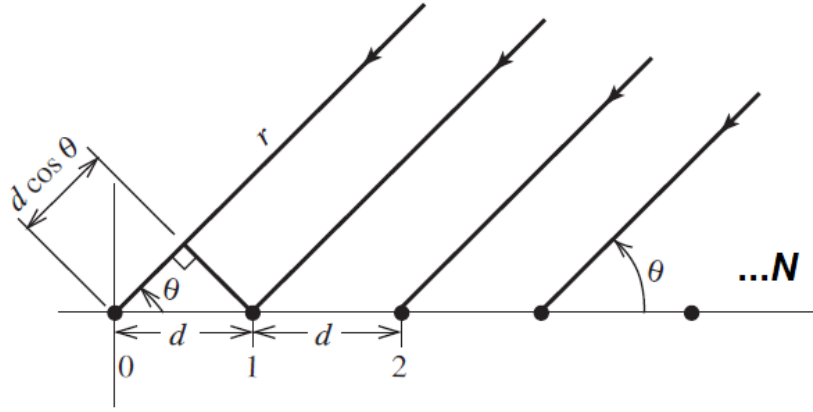
$$\vec{E} = [E_{\theta}(\theta, \varphi)\hat{\theta} + E_{\varphi}(\theta, \varphi)\hat{\varphi}] \sum_{i=1}^N E_i e^{jkr_i} \quad (2.18)$$

E_{θ} ve E_{φ} tek antenin normalize örüntüsünü ifade ederken, E_i ifadesi besleme dağılımı kaynaklı genlik ve faz farklarına göre i 'inci elemanın elektrik alanını ifade eder. Tekil yamanın orijinal modeli, besleme akımının genliklerini ve fazlarını dikkate alan anten dizisi faktörü ile çarpılır. Yani, tek tip bir antenden oluşan dizinin uzak bölge alanı, tek bir elemanın alanı ile dizi faktörünün çarpımına eşittir.

Bu denklemdeki aşağıdaki ifade dizi faktörü (DF) olarak adlandırılır.

$$DF = \sum_{i=1}^N E_i e^{jkr_i} \quad (2.19)$$

$$E_{toplam} = E_{tek\ elaman} \times DF \quad (2.20)$$



Şekil 2.16. Dizi faktörü

Şekil 2.16’da N adet eş noktasal kaynak d kadar mesafe ile dizilmiştir. Bu kaynaklardan r kadar uzaklıktaki noktadaki toplam elektrik alan ifadesinde \hat{r} yerine $d \cos \theta$ yazarsak;

$$\vec{E} = [E_{\theta}(\theta, \varphi)\hat{\theta} + E_{\varphi}(\theta, \varphi)\hat{\varphi}] \sum_{i=1}^N E_i e^{jkd \cos \theta} \quad (2.21)$$

İstenmeyen yönlerdeki ışımalarla kaynaklı grating lobe oluşmaması için d ifadesi aşağıdaki kuralı sağlamalıdır [6];

$$d < \frac{\lambda}{1 + |\sin \theta_{max}|} \quad (2.22)$$

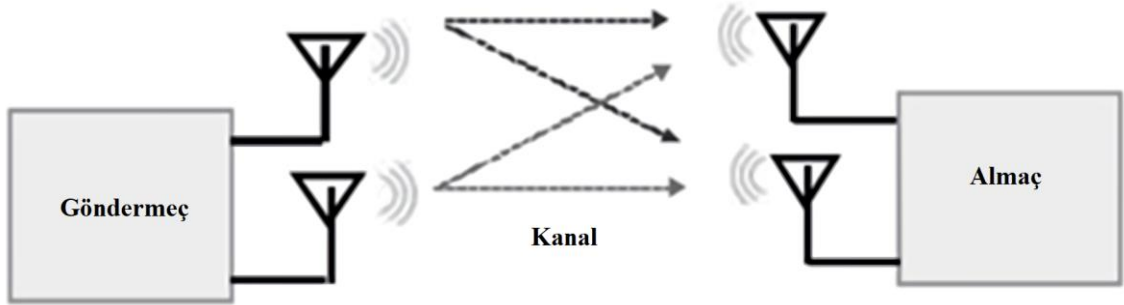
2.7. Çok Giriş Çok Çıkışlı Antenler (MIMO Antenler)

Sistemde birden fazla antenin bulunması farklı yayılma yollarının yani kanalların olması anlamına gelir. Anten konfigürasyonları dışında verilerin nasıl iletildiğine bağlı olarak iki çeşit MIMO yapısı vardır. Birincisi tüm kanallardan aynı verinin gönderildiği çeşitlemedir. Bu yöntem ile sistemin güvenilirliği doğrudan artırılmış olacaktır. İkincisi ise veri parçalarının kanallara dağıtılarak iletildiği uzamsal çeşitlemedir.

- Çeşitleme: Güvenilirliği artırmak için çeşitleme kazancı sağlar.
- Uzamsal Çeşitleme: Sistemin veri hızını iyileştirmek için serbestlik veya çoğullama kazancı sağlar.

Çeşitleme tekniğinde veri bağımsız kanallar üzerinden iletilir. Bağımsız kanallar sayesinde aynı verinin birden çok kopyası her kanal için farklı sönmüleme oranlarına maruz kalacaktır. Her kanaldaki solma oranının farklı olması farklı kopyalardan en az birisinin diğerlerinden daha az solarak alıcıya ulaşması anlamına gelir. Bu da

göndericiden gönderilen verinin alıcıya ulaşması için farklı yolları izleyen sinyallerin farklı solma seviyelerine maruz kalması anlamına gelir. Çeşitleme arttıkça sinyalin alıcıya ulaşma ihtimali artacaktır. Bu da sistemin güvenilirliğini artırmaktadır.



Şekil 2.17. MIMO sistem gösterimi

Çeşitleme teknikleri iletişim sisteminde sönmülemeye karşı alınmış etkili yöntemdir. Çeşitli kanallardan gelen veriler alıcıda sinyal gücü veya sinyal-gürültü oranı (SNR) açısından iyileştirilmiş kaliteye sahip şekilde birleştirilir. Çeşitleme tekniğinin kullanıldığı bir iletişim sisteminde performans kanallar arasındaki korelasyona ve sinyal seviyesi farklarına bağlıdır. Aşağıda dört farklı çeşitleme tekniğinden bahsedilmiştir. Bunlardan uzamsal ve polarizasyon çeşitlemeleri anten sistemleri ile gerçekleştirilir.

- Zaman çeşitleme: Çok yollu ortamın zamana bağımlılığı nedeniyle farklı zamanlarda iletilen sinyaller bağımsız hale gelecektir.
- Frekans çeşitleme: Çok yollu ortamın frekans bağımlılığı nedeniyle farklı frekanslarda iletilen sinyaller bağımsız olacaktır.
- Uzamsal çeşitleme: Farklı konumlardan alınan sinyaller küçük ölçekli sönmüleme nedeniyle korelasyonsuz hale gelebilir.
- Polarizasyon çeşitleme: Yatay/dikey polarizasyon için farklı sönmüleme davranışı nedeniyle farklı polarizasyonlarla alınan sinyaller korelasyonsuz olabilir.

Birçok avantajına rağmen, MIMO anten sistemi, anten elemanları arasında sinyal girişimine neden olan yüksek karşılıklı bağlaşıma sahiptir. Yüksek karşılıklı bağlaşım değeri anten verimliliğini düşürür. Bu etkiyi en aza indirmek için anten elemanları arasında genel olarak $\lambda/2$ veya daha fazla mesafe bırakılmaktadır. Anten elemanları arasındaki mesafe dalga boyuna göre çok az olduğunda çoklu anten çıkışları arasında istenmeyen bir sinyal korelasyonu üretebilir. Yüksek sinyal korelasyonu, spektral verimliliğin kaybıyla

ilişkilidir ve sistem verimini ve güç tüketimini olumsuz etkileyebilir. Anten elemanları arasında izolasyonu artırmak sistem performansını artıracaktır.

3. 5G İÇİN MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMLARI

Bu bölümde daha önceden verilen teorik bilgiler ve literatür taraması sonucunda ortaya çıkan sonuçlardan yararlanarak 28 GHz ve 38 GHz frekans bantlarında 5G mobil uygulamaları için özelleşmiş anten tasarım örnekleri verilecektir. Teorik bilgiler yardımıyla başlangıç fiziki boyutları belirlenen tüm anten tasarım örnekleri daha sonra CST elektromanyetik benzetim yazılımı ortamına aktarılmıştır.

Anten tasarımları yapılırken 5G mobil uygulamaları için aday frekans bantlarından en çok öne çıkan 28 GHz ve 38 GHz merkez frekansları ve çevresi hedef olarak belirlenmiştir. Bu tez kapsamındaki tasarımlarda merkez frekanslar etrafında 1 GHz bant genişlikleri hedeflenmiştir.

Düzlem anten tasarımlarında yeterince bant genişliği elde edebilmek için kalınlığı artırmak veya dielektrik sabiti daha düşük bir taban malzeme kullanma zorunluluğu bulunmaktadır. Ancak ihtiyacımız olan antenlerin mobil platformlarda kullanımı planlandığı için fiziki şartlardan kaynaklı çok kalın bir kart seçmemeliyiz. Literatür incelendiğinde dielektrik taban malzeme seçimi için ROGERS firmasına ait iki malzeme öne çıkmaktadır RT/Duroid 5880 ($\epsilon_r = 2.2$) ve RT/Duroid 6002 ($\epsilon_r = 2.94$) [18]. Kullanılacak taban malzeme, malzemenin kolay işlenebilirliği ve aynı zamanda elimizde mevcut olmasından dolayı birkaç benzetim denemesinden de yararlanarak RT/Duroid 6002 ($\epsilon_r = 2.94$) 10 mil (0.254 mm) olarak belirlenmiştir.

5G uygulamalarında kullanılmak üzere mobil platformlara yönelik tasarlanacak antenler aşağıda verilen temel gereksinimler göz önüne alınarak tasarlanacaktır;

- Frekans: 28 GHz - 38 GHz
- Bant genişliği: 1 GHz
- Anten kazancı: 9-10 dBi
- Polarizasyon: Doğrusal/Dairesel

Bu gereksinimler doğrultusunda ilk önce her iki frekans (28 GHz ve 38 GHz) bandında da çalışabilen tek bir yama anten tasarımı yapılmıştır. Daha sonra 28 GHz ve 38 GHz bantları için ayrı ayrı tekli anten elemanları incelenmiş son olarak bu elemanlar çoğullanarak 4x4 MIMO anten sistemleri elde edilmiştir.

3.1. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Tasarımı

Bu bölümde her iki mm-dalga frekans bandında rezonans yapan oyuk açılmış dikdörtgen mikroşerit yama anten tasarımı ele alınacaktır. [19]'de farklı katmanlarda yamalar oluşturularak ve [20]'de kare yama üzerinde oyuklar açılarak elde edilen 28 GHz – 38 GHz çift bantlı yama anten tasarım örnekleri verilmiştir.

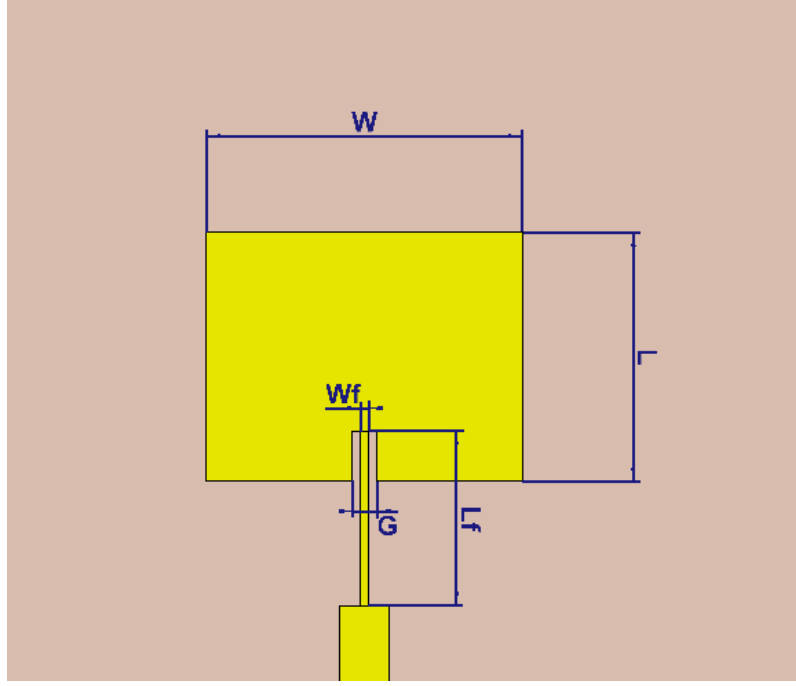
Öncelikle 28 GHz'de rezonans yapan bir dikdörtgen yama elde edilecektir [21]. Sonra bu dikdörtgen yama üzerinde yatay "I" şeklinde bir oyuk açılarak 38 GHz'deki merkez frekans için de bir rezonans elde edilecektir [22]. Her bir frekans noktası için frekans cevabı, ışınma örüntüsü, eksenel oran ve yönlülük gibi anten parametreleri incelenecektir.

3.1.1. 28 GHz Dikdörtgen Yama Anten Tasarımı

28 GHz'e ait dikdörtgen yama başlangıç parametreleri Bölüm 2.3.1'de verilen formüller yardımı ile belirlenip aşağıdaki Çizelge 3.1'de verilmiştir;

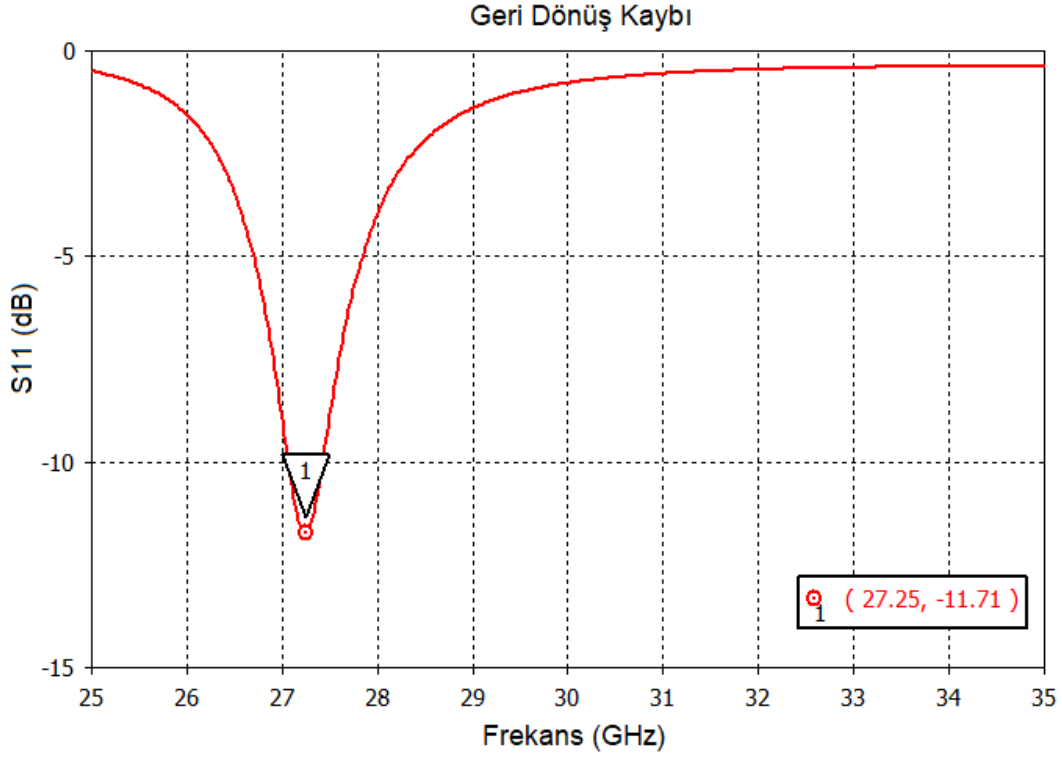
Çizelge 3.1. 28 GHz Dikdörtgen Yama Başlangıç Parametreleri

Parametre	Değer
Taban Malzemesi	RT/Duroid 6002
Dielektrik Katsayısı (ϵ_r)	2.94
Taban Kalınlığı (h)	0.254 mm
Yama Genişliği (W)	3.8 mm
Yama Uzunluğu (L)	3 mm
Besleme Hattı Genişliği (Wf)	0.2 mm
Besleme Hattı Uzunluğu (Lf)	1.5 mm
Besleme Hattı Boşluğu (G)	0.2 mm



Şekil 3.1. 28 GHz Dikdörtgen Yama Anten Gösterimi

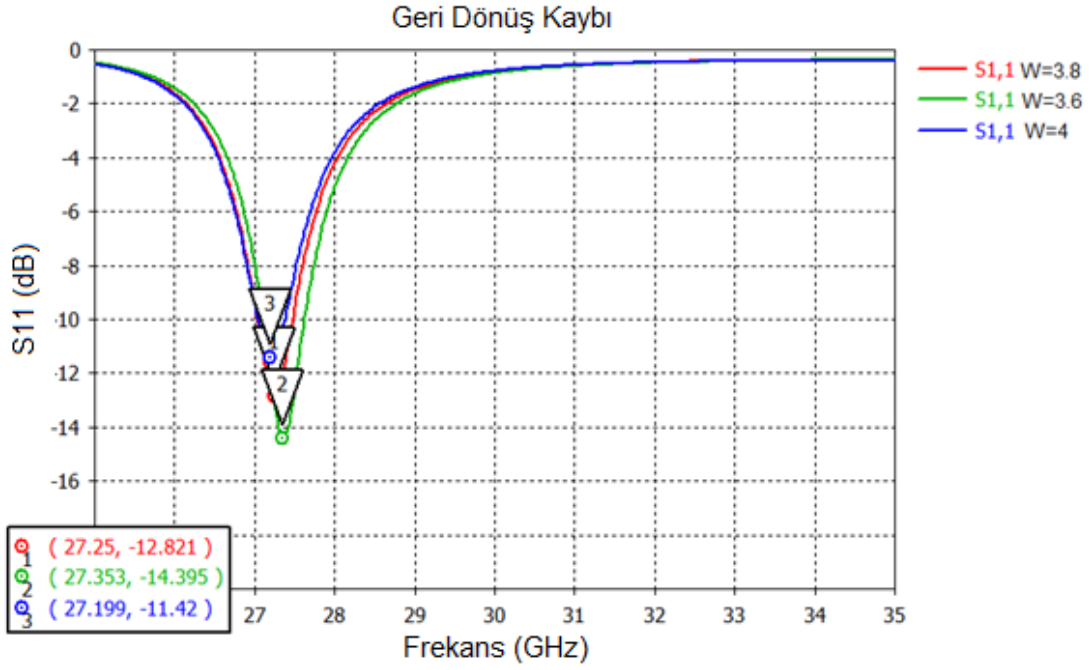
Parametreler Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Belirlenen başlangıç parametreleri ile oluşturulan yama mikroşerit içten besleme tekniği ile beslenmiştir. Başlangıç parametreleri kullanılarak yapılan benzetim sonucunda rezonans frekans 27.25 GHz çıkmıştır. Besleme hattı parametreleri (W_f , L_f ve G) ve yama parametreleri (W , L) ile yapılan parametrik analizlere göre ileriki bölümde nihai anten boyutları elde edilecektir.



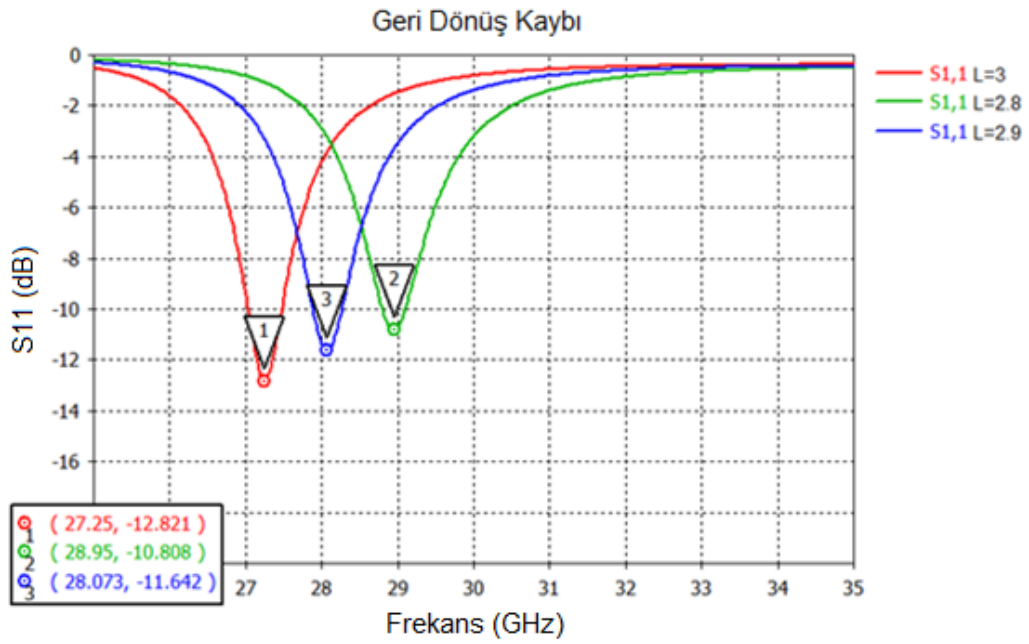
Şekil 3.2. 28 Ghz Dikdörtgen Yama Anten Başlangıç Parametrelerine ait Geri Dönüş Kaybı Benzetim Sonucu

3.1.1.1. Yama Boyutlarının Anten Geri Dönüş Kaybına Etkisi

Yama boyutları, yama genişliği (W) ve yama uzunluğunun (L) anten performansına etkisi bu bölümde incelenecektir. İstenen anten geri dönüş kaybını elde edene kadar yama boyutları, başlangıç parametreleri etrafında ufak değişiklikler yapılır. Benzetim sonuçları karşılaştırılır ve en uygun yama boyutları belirlenerek tasarıma bu parametreler ile devam edilir.



Şekil 3.3. Yama Genişliğinin (W) Geri Dönüş Kaybına Etkisi



Şekil 3.4. Yama Boyunun (L) Geri Dönüş Kaybına Etkisi

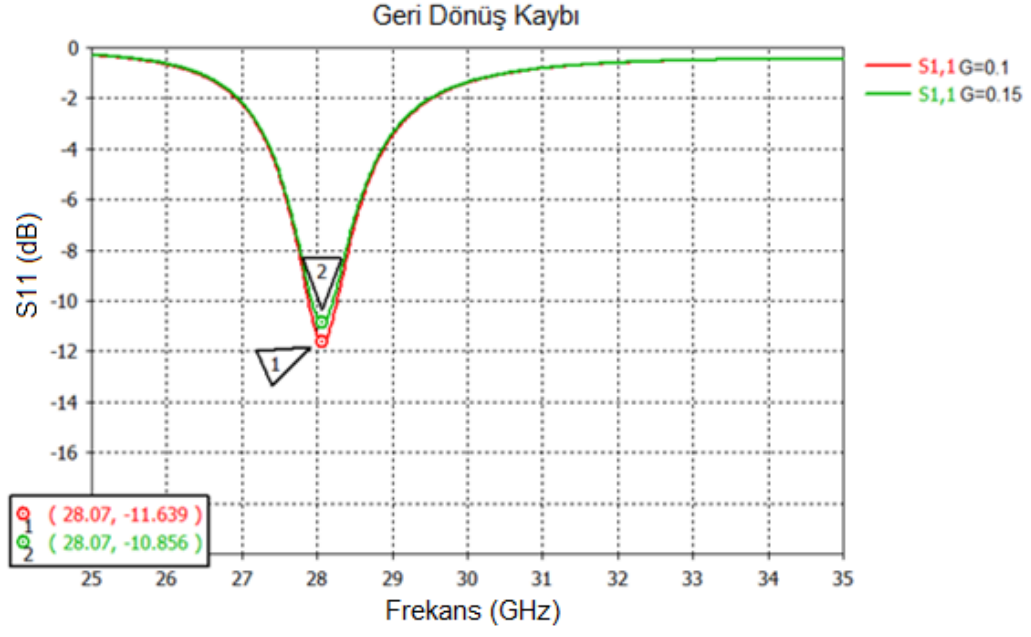
Çizelge 3.2. 28 GHz Dikdörtgen Yama Boyutları Parametrik Analizlere göre Rezonans Frekansları

İterasyon	Yama Genişliği (W) (mm)	Yama Uzunluğu (L) (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)
1	3.8	3	27.25
2	3.6	3	27.19
3	4	3	27.35
4	3.8	2.8	28.95
5	3.8	2.9	28.07

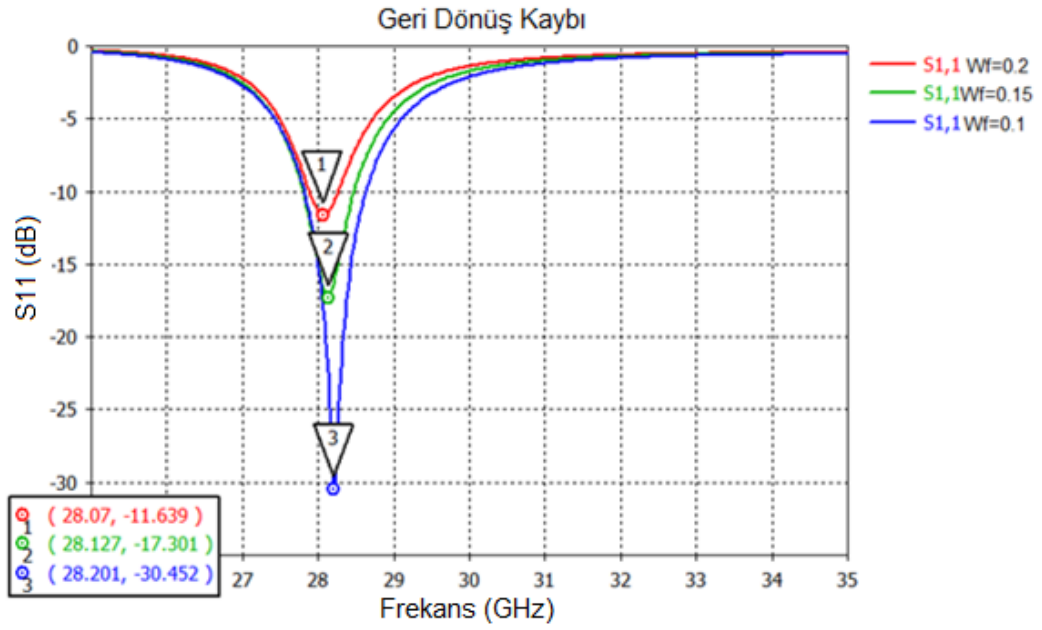
Yama genişliğinin (Şekil 3.3'te) rezonans frekansına etkisinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Şekil 3.4'de yama boyunun uzaması rezonans frekansını düşürücü yönde kaydırırken, yama boyunu kısaltmak rezonans frekansını yükseltici yönde kaydırmaktadır. Bu sebeple yama uzunluğu ile oynayarak merkez frekans 28 GHz'e getirilmiştir. Çizelge 3.2'den görüldüğü üzere 5. iterasyon nihai yama boyutları için en ideal seçim olmuştur.

3.1.1.2. Yama Besleme Hattı Parametrelerinin Geri Dönüş Kaybına Etkisi

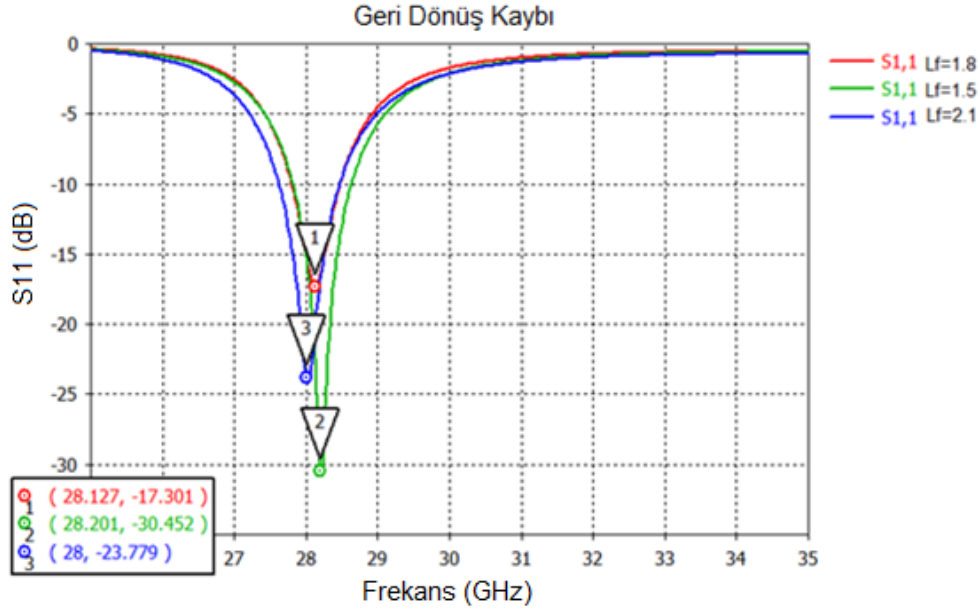
İçten beslemeli mikroşerit hatta ait W_f , L_f ve G parametreleri değiştirilerek en uygun besleme noktası ve besleme hattı parametreleri elde edilecektir.



Şekil 3.5. Besleme Hattı Boşluğu (G) Parametrik Analizleri



Şekil 3.6. Besleme Hattı Genişliği (Wf) Parametrik Analizleri



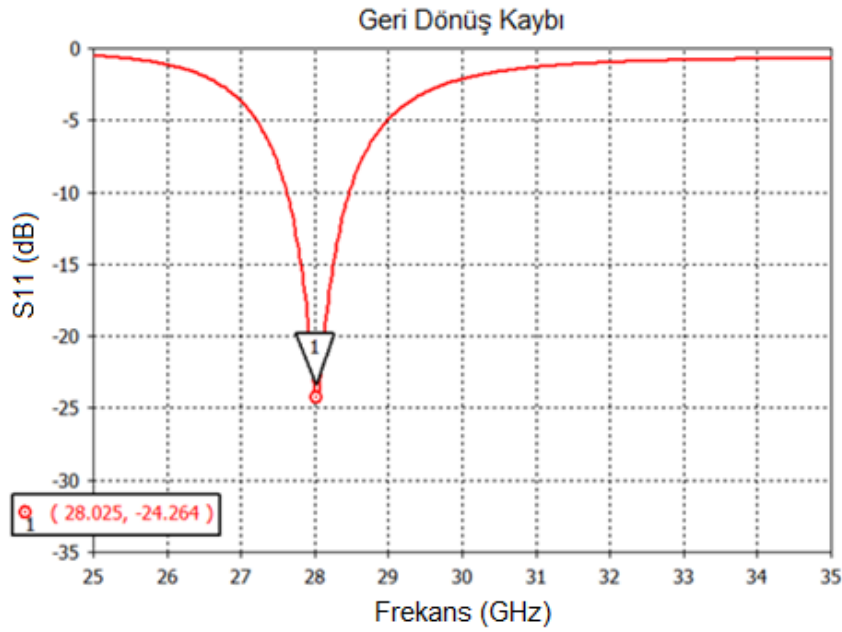
Şekil 3.7. Besleme Hattı Uzunluğu (Lf) Parametrik Analizleri

Çizelge 3.3. Besleme Hattı Parametrik Analizlere göre Rezonans Frekansları

İterasyon	Wf (mm)	Lf (mm)	G (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)
1	0.2	1.5	0.15	28.07
2	0.2	1.5	0.1	28.07
3	0.15	1.5	0.1	28.13
4	0.1	1.5	0.1	28.2
5	0.1	1.8	0.1	28.12
6	0.1	2.1	0.1	28

Benzetim sonuçları Şekil 3.5. incelendiğinde besleme hattı boşluğu (G)'nin etkisi oldukça düşük olmaktadır. Şekil 3.6.'da besleme hattı genişliği ne kadar ince olursa empedans uyumlaması artmakta bu da geri dönüş kaybını iyileştirmektedir. Şekil 3.7.'de besleme hattı uzunluğu (Lf) ise doğrudan rezonans frekansına katkı sunan bir parametredir ve en uygun Wf ve G değerleri belirlendikten sonra 28 GHz rezonans frekansını elde etmek için Lf parametresi birkaç iterasyon sonucunda elde edilmiştir. Son durumda 6. iterasyondaki parametreler kullanılarak elde edilen 28 GHz Dikdörtgen Yama Anten'e ait geri dönüş

kayı Şekil 3.8.'de verilmiştir. Bu antene ait tasarım parametrelerinin nihai değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.8. Parametrik Analizler Sonucunda Elde Edilen 28 GHz Yama Antene ait Geri Dönüş Kaybı

Çizelge 3.4. 28 GHz Dikdörtgen Yama Anten Parametreleri Nihai Değerleri

Parametre	Değer
Yama Genişliği (W)	3.8 mm
Yama Uzunluğu (L)	2.9 mm
Besleme Hattı Genişliği (Wf)	0.1 mm
Besleme Hattı Uzunluğu (Lf)	2.1 mm
Besleme Hattı Boşluğu (G)	0.1 mm

3.1.2. Çift Bantlı Anten Tasarımına Geçiş

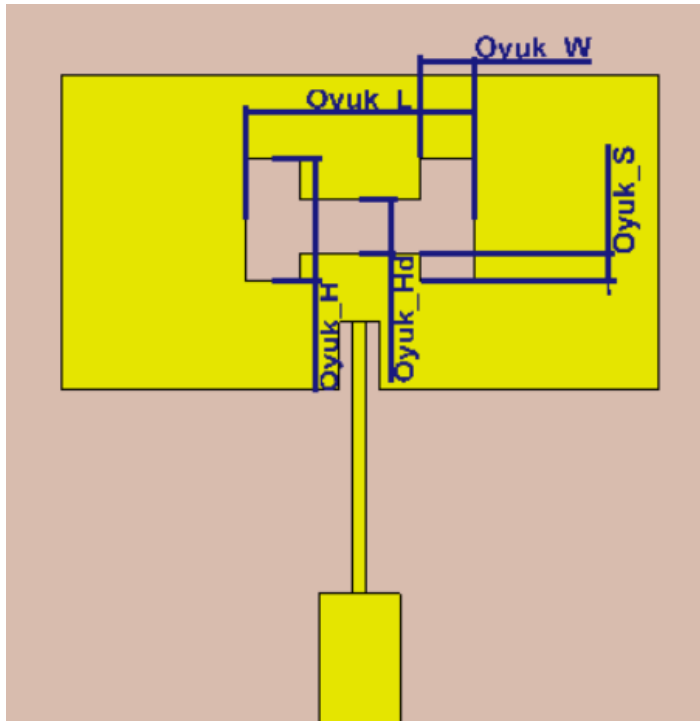
Tek bir yama ile iki farklı frekans bandında rezonans elde etmek için kullanılan en genel yöntemler aşağıda verilmiştir. Bunlar [23];

- Yama üzerindeki bütünlüğu oyuk açarak bozmak.

- Yamaya ek desenler eklemek.
- Birden fazla taban malzemesi kullanarak çok katmanlı bir yapı oluşturarak her katmana farklı frekanslara ait desenler yerleştirip tek bir kaynaktan beslemektir.

3.1.2.1. Yama Üzerindeki Oyuk Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu uygulamada 28 GHz’de rezonans yapan yamanın merkezine ters “I” şeklinde bir oyuk oluşturularak 38 GHz frekansında da bir rezonans elde edilmiştir. Burada açılacak oyuğun şekli için literatürdeki [22]’ dan yararlanılmıştır. Bu oyuğa ait parametrelerin başlangıç değerleri yaklaşık belirlendikten sonra nihai değerler CST uygulaması üzerinde koşulan optimizasyonlar sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 3.9. 38 Ghz Rezonansı için Gerekli Olan Oyuk Parametreleri

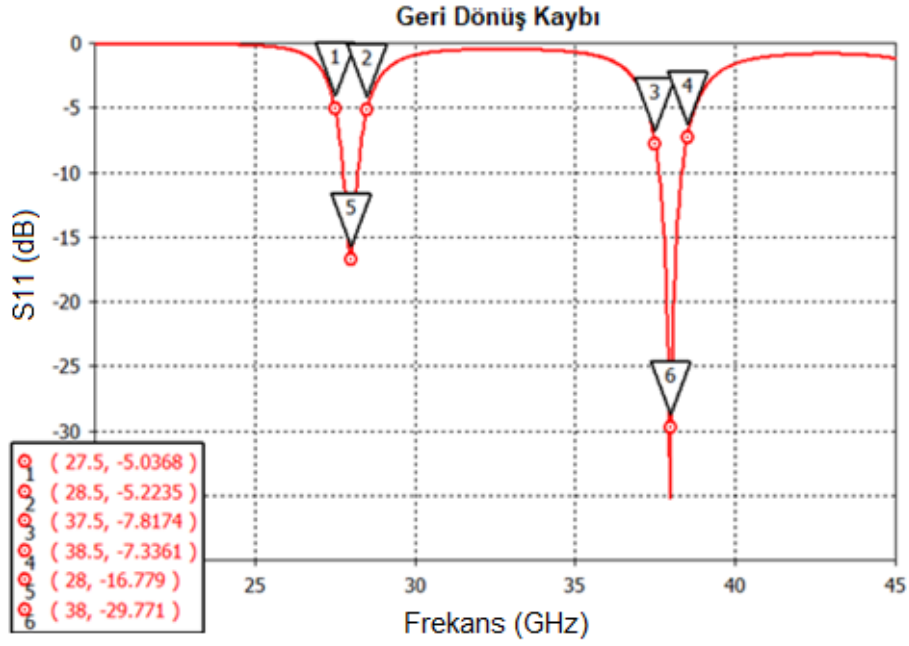
Ters “I” şekli parametrik olarak dikdörtgen yamanın içerisine yerleştirildikten sonra optimizasyonlar sonucunda dikdörtgen yama ve “I” şekline ait boyutsal parametreler aşağıdaki tablodaki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3.5. Optimizasyon sonrası “I” şeklinde oyuk açılmış dikdörtgen yamaya ait parametreler

Parametre	Değer
Yama Genişliği (W)	4.4 mm
Yama Uzunluğu (L)	2.32 mm
Besleme Hattı Genişliği (Wf)	0.1 mm
Besleme Hattı Uzunluğu (Lf)	2 mm
Besleme Hattı Boşluğu (G)	0.3 mm
Oyuk Uzunluğu (Oyuk_L)	1.69 mm
Oyuk Genişliği (Oyuk_H)	0.9 mm
Oyuk Genişliği Dar Bölüm (Oyuk_Hd)	0.4 mm
Oyuk Yan Alt Parça Uzunluğu (Oyuk_S)	0.2 mm
Oyuk Yan Parça Genişliği (Oyuk_W)	0.4 mm

Oyuklu dikdörtgen yamanın 28 GHz - 38 GHz bantlarındaki frekans cevabı Şekil 3.10’da verilmiştir. Merkez frekanslarda 28 GHz’de 15 dB’den 38 GHz’de ise 25 dB’den iyi bir geri dönüş kaybı sağlanmıştır. Her iki bant içinde 855 MHz’lik bant genişliğinde geri dönüş kaybı 10 dB’den iyidir. Anten empedans bant genişliği açısından bu değer yeterlidir.

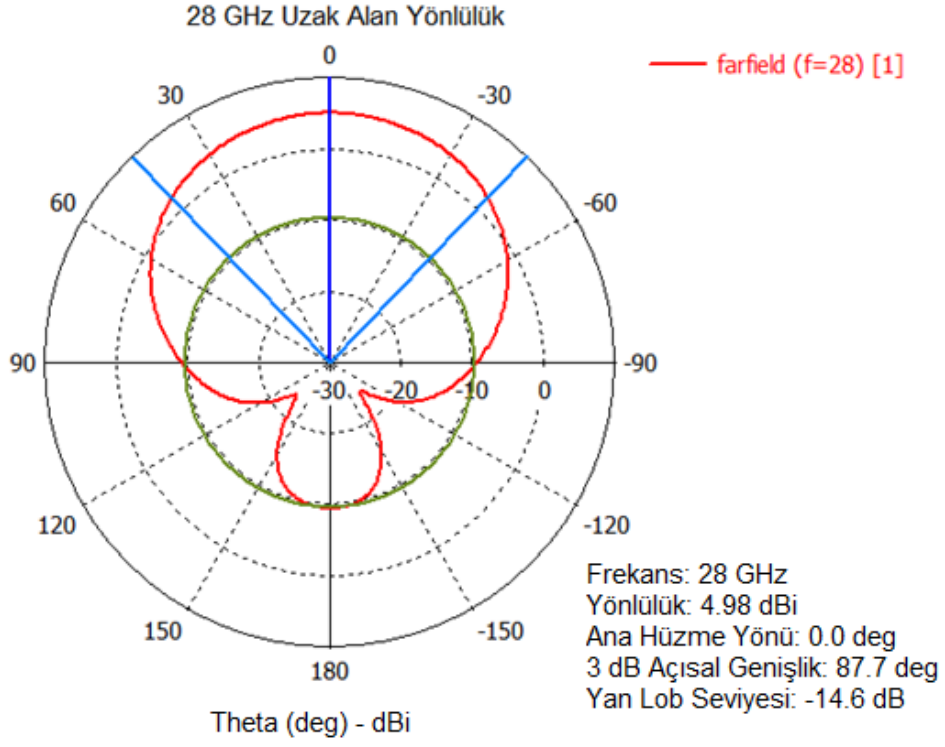
28 GHz - 38 GHz bantları için uzak alan benzetimleri yapılarak antene ait yönlülük, ışıma örüntüsü ve polarizasyon bilgileri elde edilmiştir.



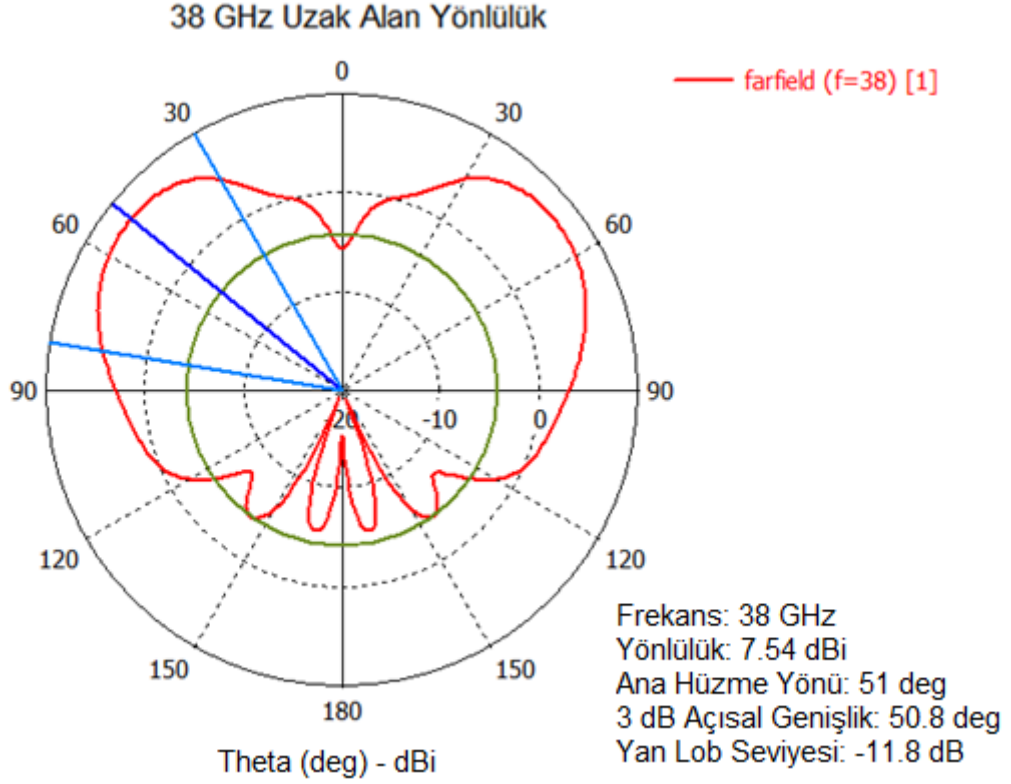
Şekil 3.10. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Geri Dönüş Kaybı

Uzak alan benzetimlerini incelediğimizde 28 GHz merkez frekans için yönlülüğün ana hüzmeye 4.98 dBi mertebelerinde, 38 GHz merkez frekansı için ise ana hüzmeye yönlülüğünün 7.54 dBi seviyelerinde olduğu görülmektedir.

Her iki frekans için uzak alan ışıma örüntülerine ait çıktılar $\varphi = 0^\circ$ düzleminde θ açısına bağlı olarak Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir.

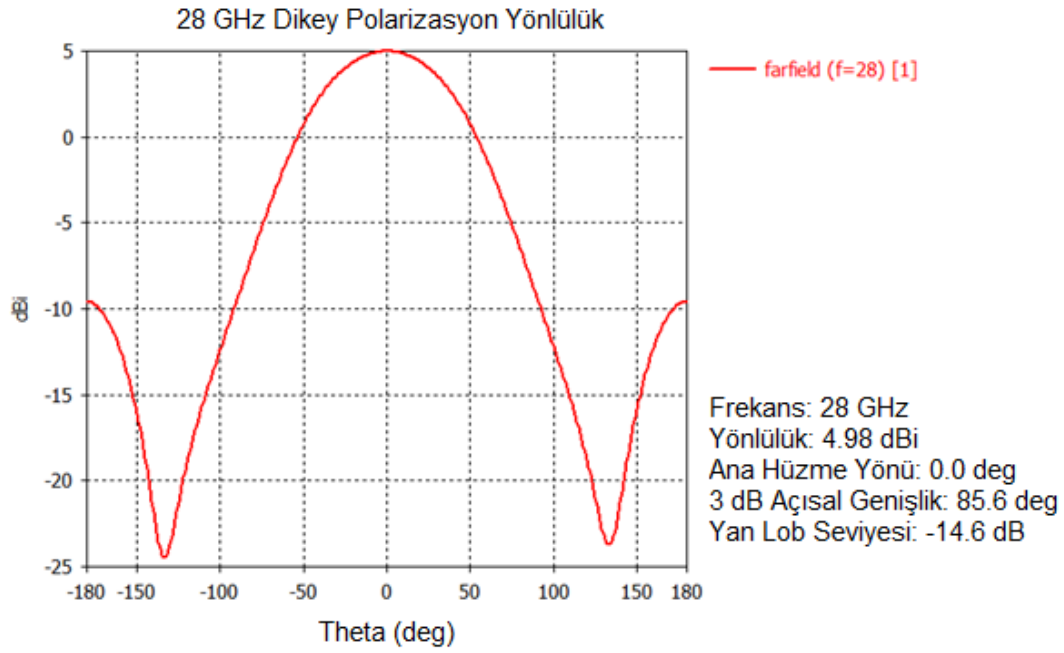


Şekil 3.11. 28 GHz Frekansına ait Polar Koordinatlarda Uzak Alan Sonuçları



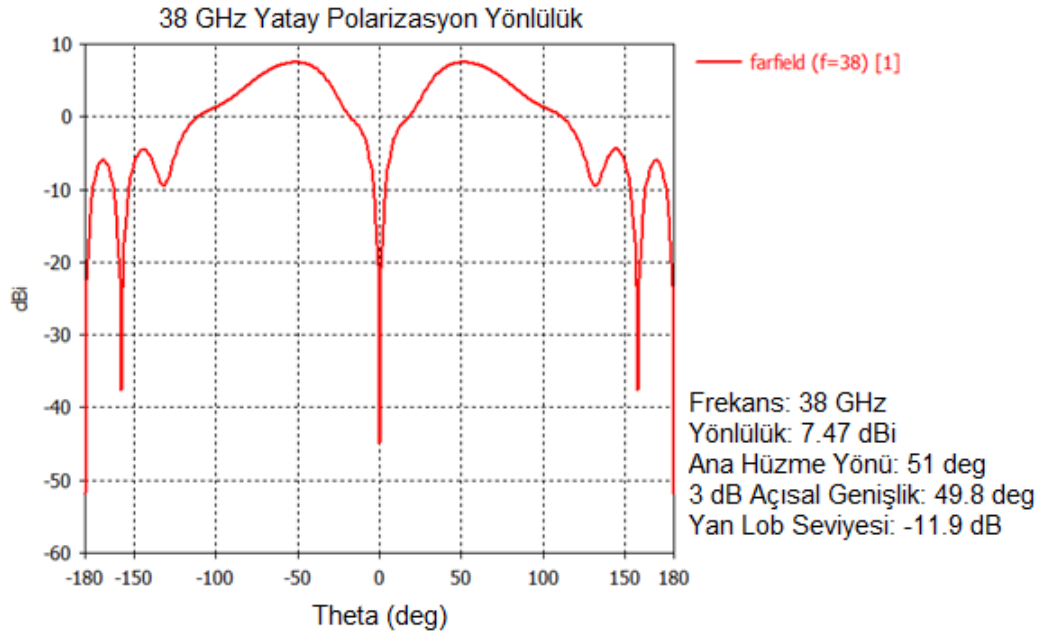
Şekil 3.12. 38 GHz Frekansına ait Polar Koordinatlarda Uzak Alan Sonuçları

Şekil 3.13.'de 28 GHz frekansına ait en yüksek yönlülüğe sahip ana hüzmenin $\theta = 0^\circ$ de dikey doğrusal polarizasyona sahip olduğu görülmektedir.



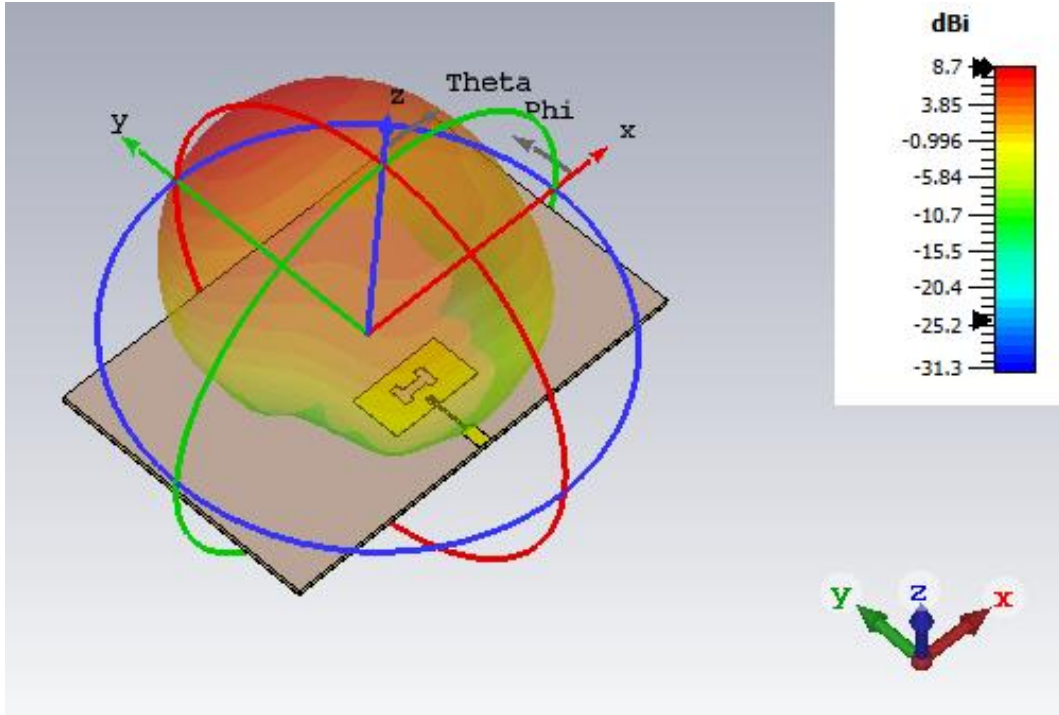
Şekil 3.13. 28 GHz Frekansına ait Dikey Doğrusal Polarizasyon Yönlülük Grafiği

Şekil 3.14.'de 38 GHz merkez frekansı için en yüksek yönlülüğe sahip ana hüzmelerin iki adet ve $\theta = \pm 50^\circ$ de yatay doğrusal polarizasyona sahip olduğu görülmektedir.

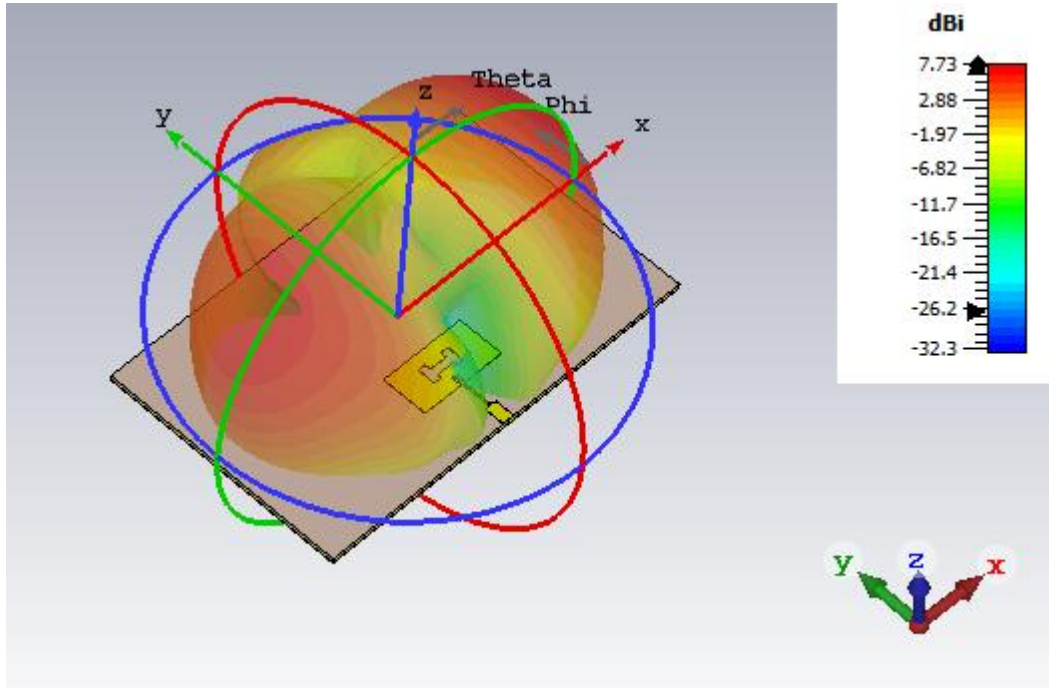


Şekil 3.14. 38 GHz Frekansına ait Yatay Doğrusal Polarizasyon Yönlülük Grafiği

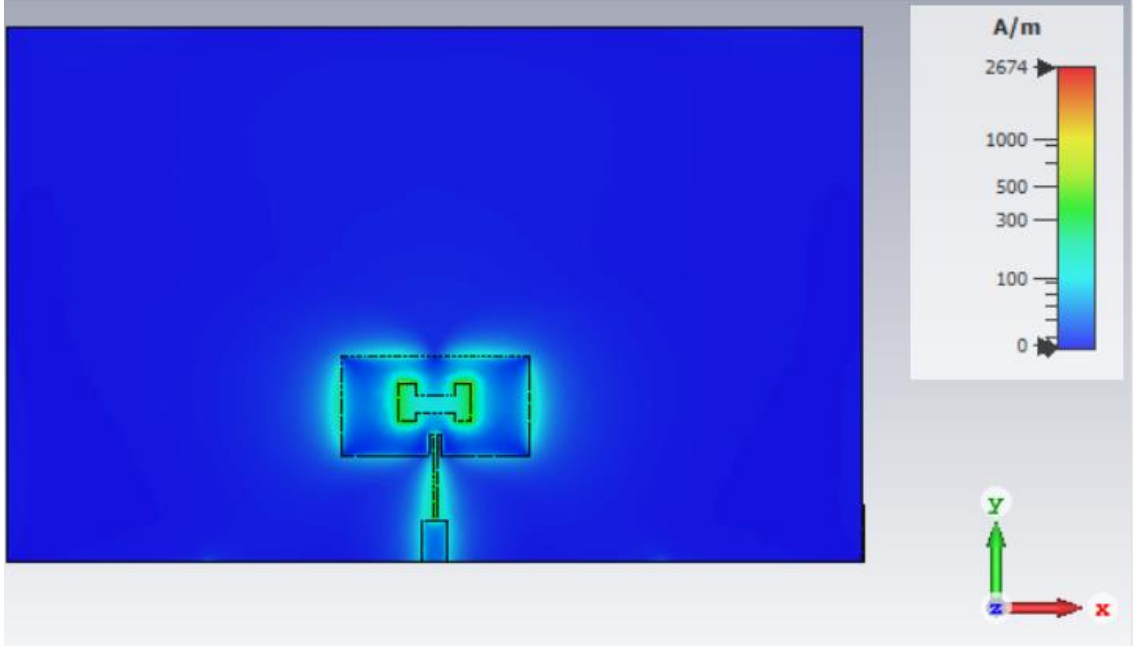
Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da 3-Boyutlu örüntüler üzerinden mutlak yönlülük gösterimleri verilmiştir.



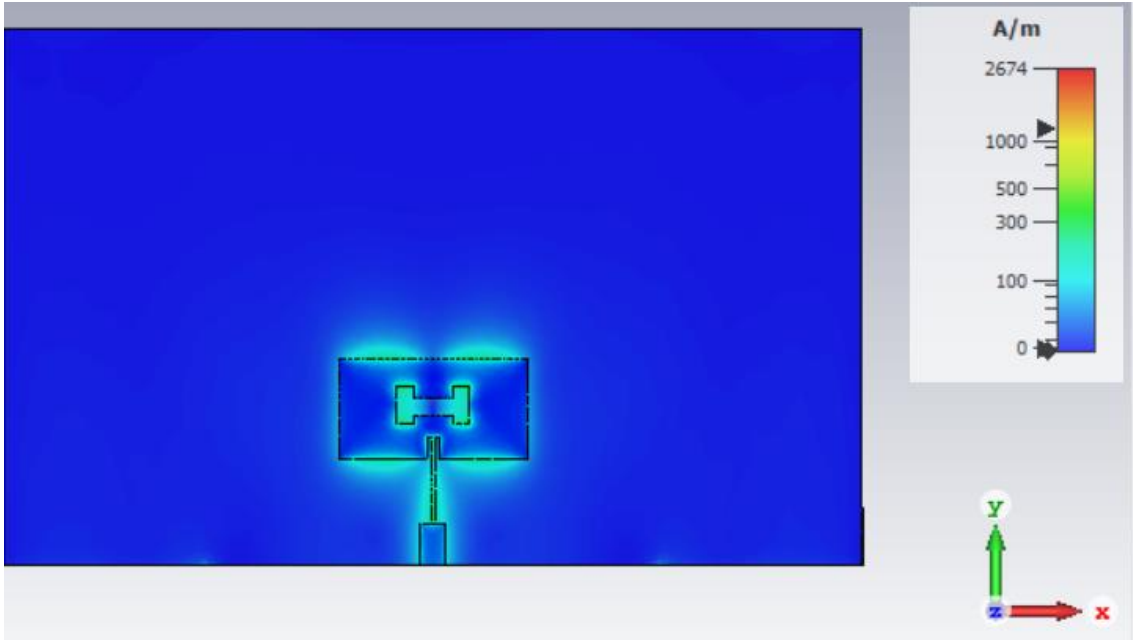
Şekil 3.15. 28 GHz Frekansına ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi



Şekil 3.16. 38 GHz Frekansına ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi



Şekil 3.17. 28 GHz Frekansına ait Yüzey Akımları Dağılımı

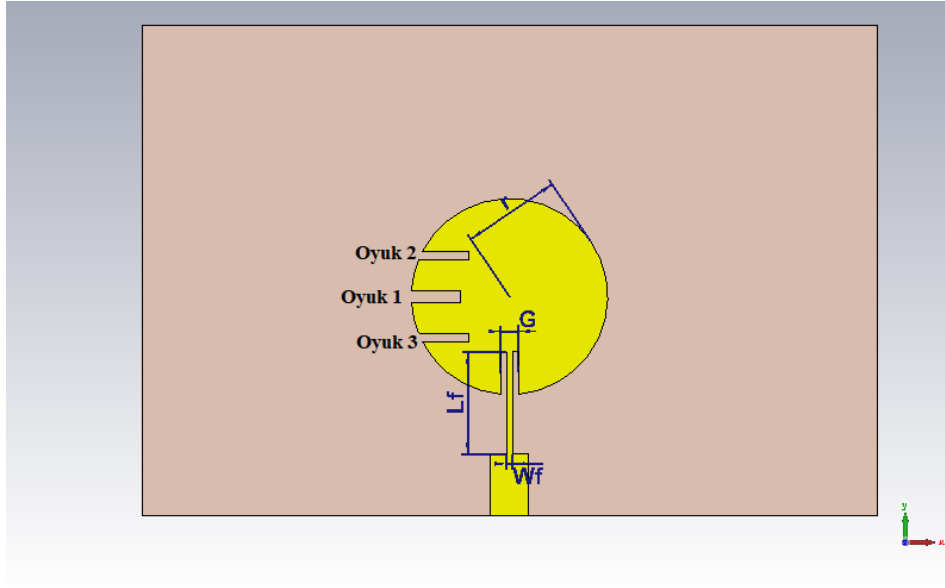


Şekil 3.18. 38 GHz Frekansına ait Yüzey Akımları Dağılımı

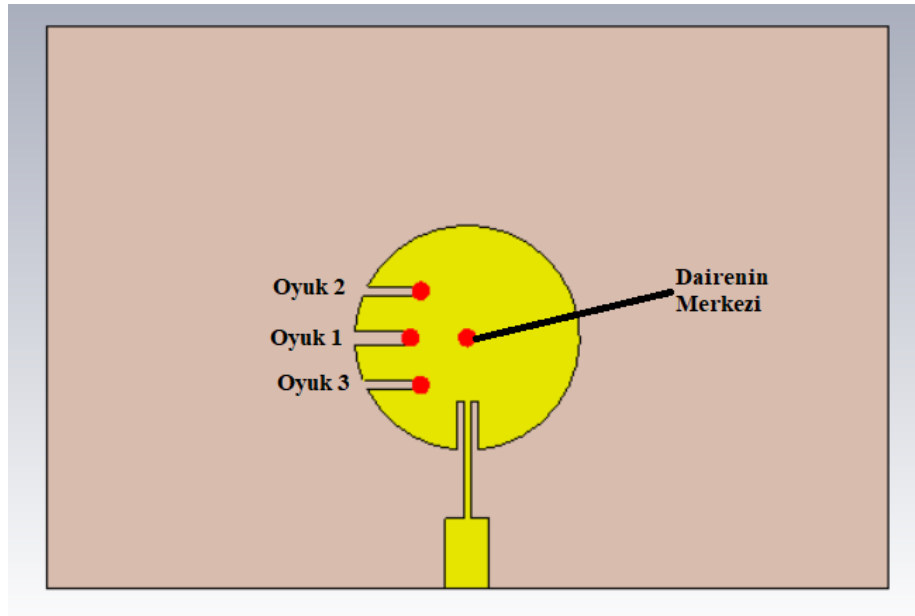
Bu yama antene ait yüzey akımlarının dağılımı Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de verilmiştir. Görülebileceği üzere 28 GHz rezonans frekansı için yamanın x-ekseni doğrultusundaki kenarları ışıma yaparken 38 GHz rezonans frekansı için y-ekseni doğrultusundaki kenarları ışıma yapmaktadır.

3.2. 28 GHz Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Tasarımı

28 Ghz merkez frekansında dairesel şekle sahip bir mikroşerit yama anten tasarımı bu bölümde incelenecektir. Antenin dairesel polarizasyona sahip olması hedeflenmektedir ve mikroşerit besleme tekniği kullanılacaktır.



Şekil 3.19. 28 GHz Dairesel Yama Anten Parametreleri



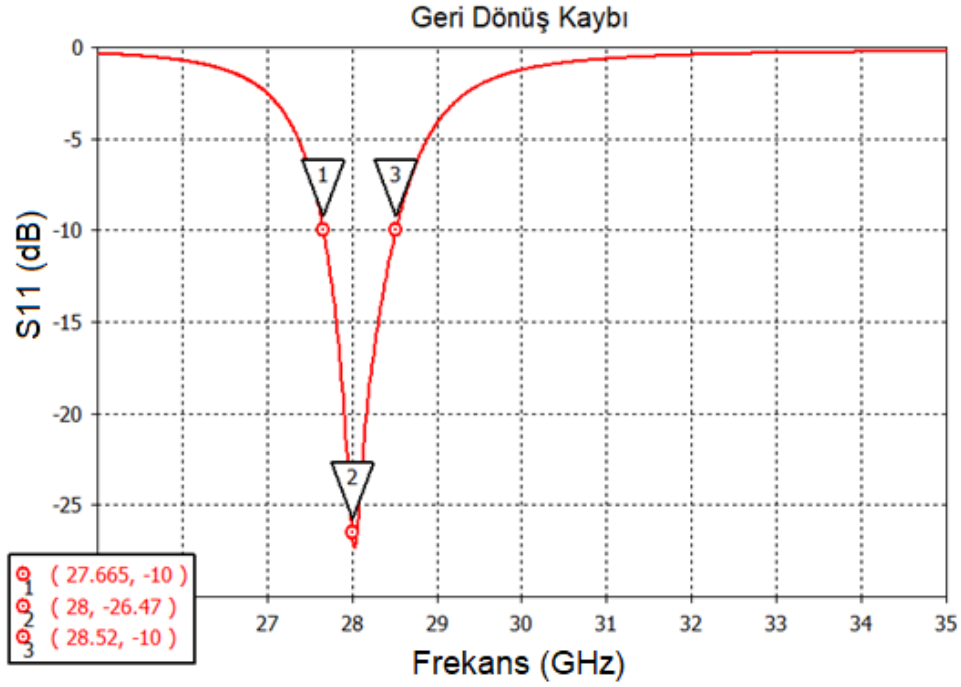
Şekil 3.20. 28 GHz Dairesel Yama Oyuk Noktaları Gösterimi

Şekil 3.19.'te genel görünümü verilen dairesel yama anten için ilk önce Bölüm 2.3.2'deki formüllerden yararlanarak başlangıç anten boyutları belirlenmiştir. Mikroşerit yama antenler doğrusal polarize antenler olduğundan bu antenleri dairesel polarizasyona sahip

hale getirmek için Bölüm 2.5.2’de bahsedilen yöntemlerden yararlanabiliriz. Desenin bütünlüğünü bozma yöntemi kullanarak ana hüzmeye doğrultusunda eksenel oranı 3 dB’nin altına indirmeye çalışalım. İlk olarak Oyuk 1 olarak adlandırdığımız oyuk daire üzerinde oluşturduktan sonra eksenel oran incelenmiştir [24]. Eksenel oranın düştüğü gözlenmiş ve tek oyuk ile eksenel oranın belli bir noktaya kadar indirilebildiği tespit edilmiştir. Bu aşamada dairenin merkezine göre birbirlerinin simetrikleri olacak şekilde Oyuk 2 ve Oyuk 3 desen üzerinde oluşturularak oyuk sayısı artırılmıştır. Bu sayede eksenel oran 3 dB seviyesinden aşağıya indirilebilmiştir. Empedans bant genişliği, merkez frekans ve dairesel polarizasyon şartlarını sağlamak için optimizasyonlar yapılmıştır ve Çizelge 3.6’daki fiziksel parametreler elde edilmiştir.

Çizelge 3.6. 28 GHz Yaması için Tasarım Parametreleri

Parametreler	Değer
Yama Yarıçapı (r)	1.6 mm
Besleme Hattı Genişliği (Wf)	0.1 mm
Besleme Hattı Uzunluğu (Lf)	1.67 mm
Besleme Hattı Boşluğu (G)	0.3 mm
Oyuk 1 Boyutları	0.2 x 0.8 mm
Oyuk 1 Daire Merkezine Göre Koordinatı	-0.8 ; 0
Oyuk 2 Boyutları	0.125 x 0.95 mm
Oyuk 2 Daire Merkezine Göre Koordinatı	-0.66 ; 0.67
Oyuk 3 Boyutları	0.125 x 0.95 mm
Oyuk 3 Daire Merkezine Göre Koordinatı	-0.66 ; -0.67

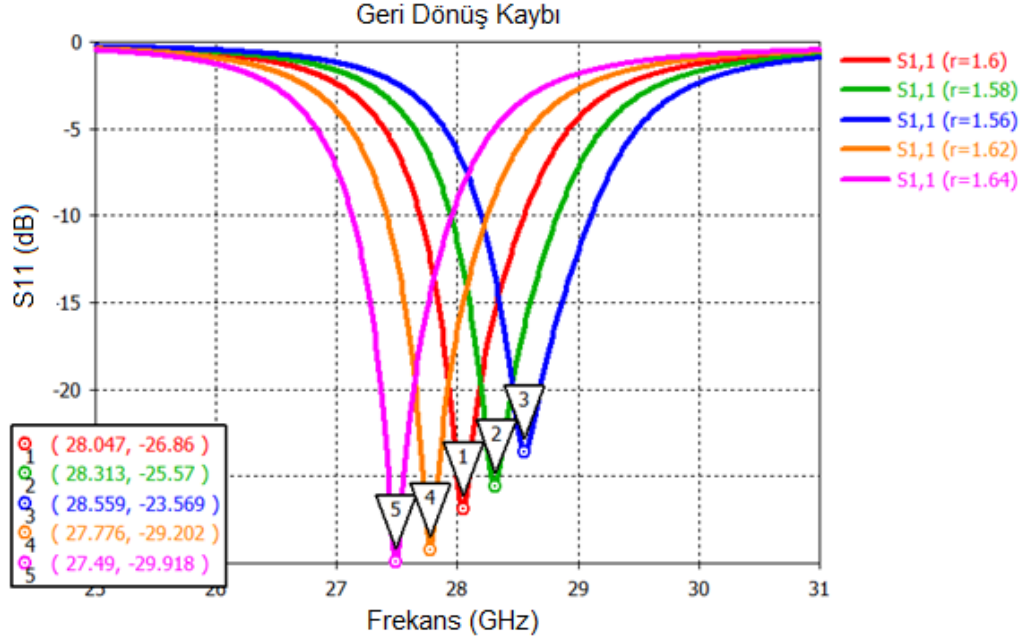


Şekil 3.21. 28 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı

Şekil 3.21.'de dairesel yamaya ait geri dönüş kaybı verilmiştir. 28 GHz etrafında 850 MHz bant genişliğinde geri dönüş kaybı 10 dB'den iyidir. Merkez frekans 28 GHz'de ise geri dönüş kaybı yaklaşık 26.5 dB'dir.

3.2.1. Yama Boyutları ve Besleme Hattının Geri Dönüş Kaybına Etkisi

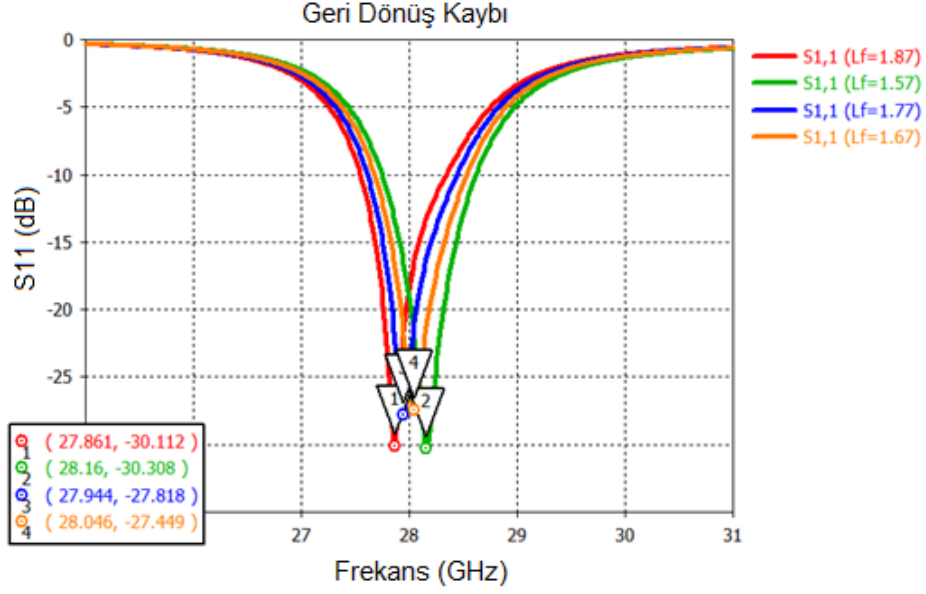
28 GHz'de tasarlanan dairesel yama antene ait yarıçap değerinin ve besleme hattı uzunluğunun geri dönüş kaybına olan etkisi bu bölümde incelenecektir. W_f ve G gibi diğer parametreler fiziki olarak en küçük değerler alındığında en performanslı geri dönüş kayıpları elde edilmektedir. Bu yüzden bu değerler üretim kabiliyetleri açısından üretilebilecek en düşük değerler olarak alınmış ve parametrik analizlere dahil edilmemiştir. Çizelge 3.7.'den görüleceği üzere geri dönüş kaybı sonuçlarına göre yarıçap değerini artırmak frekans düzleminde aşağı yönde bir rezonans frekansına denk gelirken. Yarıçap değerini azaltmak ise yukarı yönde bir rezonans frekansına denk gelmektedir. Bu durumda istenen rezonans frekansına en yakın iterasyon 3'üncü olanıdır yani yarıçap değerinin 1.6 mm olduğu değerdir. Aynı zamanda besleme hattı uzunluğunun (L) artması Çizelge 3.8.'den görüldüğü üzere rezonans frekansını aşağı frekans seviyesine, azalması ise yukarı frekans seviyelerine kaydırmaktadır. Burada en uygun besleme hattı uzunluğu olarak 2. iterasyon 1.67 mm değeri uygun olarak seçilmiştir.



Şekil 3.22. 28 GHz Dairesel Anten Yarıçapının Geri Dönüş Kaybına Etkisi ($L_f=1.67$ mm sabit)

Çizelge 3.7. 28 GHz Dairesel Anten Yarıçapı Parametrik Analizlerine göre Rezonans Frekansları ($L_f=1.67$ mm sabit)

İterasyon	r (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)
1	1.56	28.55
2	1.58	28.31
3	1.6	28.04
4	1.62	27.77
5	1.64	27.49



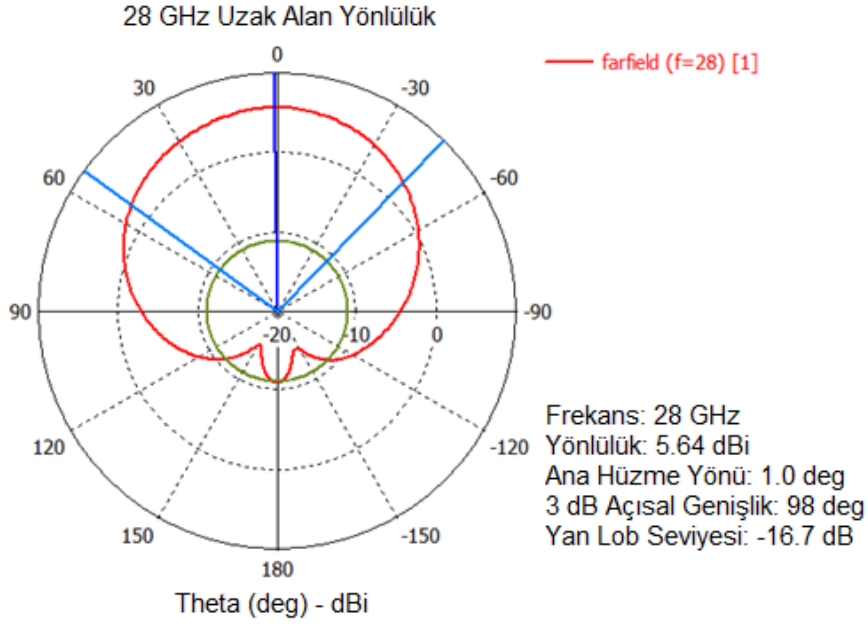
Şekil 3.23. 28 GHz Dairesel Anten Besleme Hattı Uzunluğunun Geri Dönüş Kaybına Etkisi ($r=1.6$ mm sabit)

Çizelge 3.8. 28 GHz Dairesel Anten Besleme Hattı Uzunluğunun Parametrik Analizlerine göre Rezonans Frekansları ($r=1.6$ mm sabit)

İterasyon	Lf (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)
1	1.57	28.16
2	1.67	28.04
3	1.77	27.94
4	1.87	27.86

3.2.2. Yama Antenin Örüntü, Polarizasyon ve Yönlülük Benzetimleri

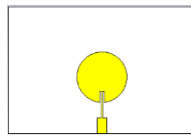
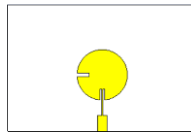
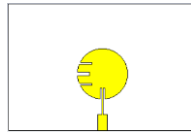
Ana hüzmeye ait anten kazancı 28 GHz merkez frekansında 5.64 dBi olarak elde edilmiştir. $\theta = 1^\circ$ ana hüzmenin yönüdür. Kazancın ana hüzmeye göre 3 dB düştüğü 3 dB açışal bant genişliği 98° olarak elde edilmiştir.

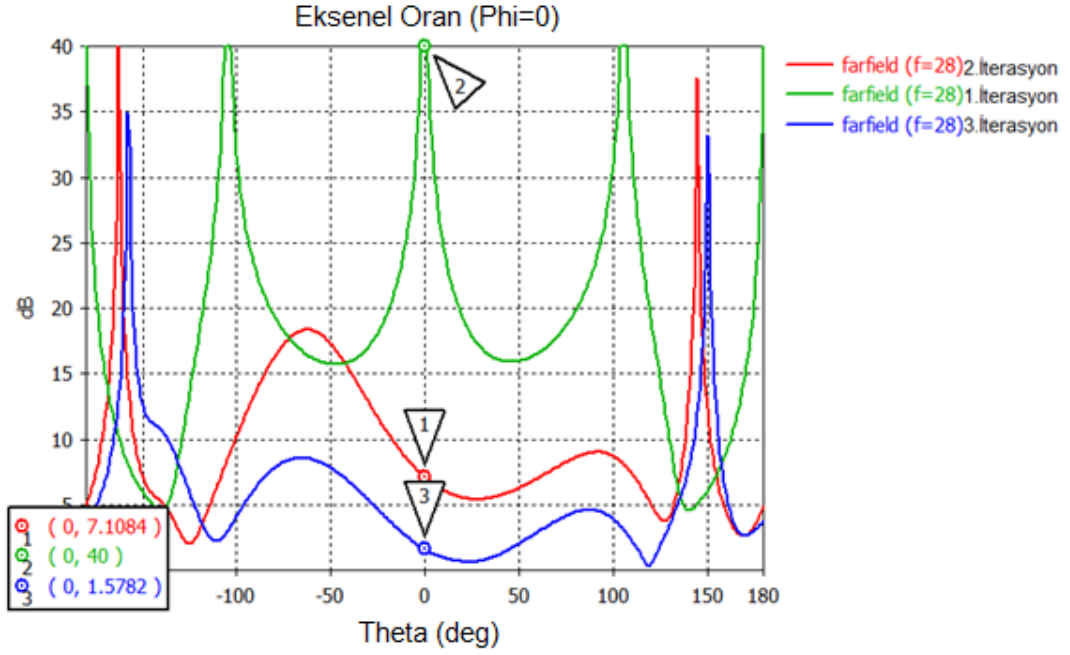


Şekil 3.24. 28 GHz Dairesel Yama Uzak Alan Yönlülük Grafiği

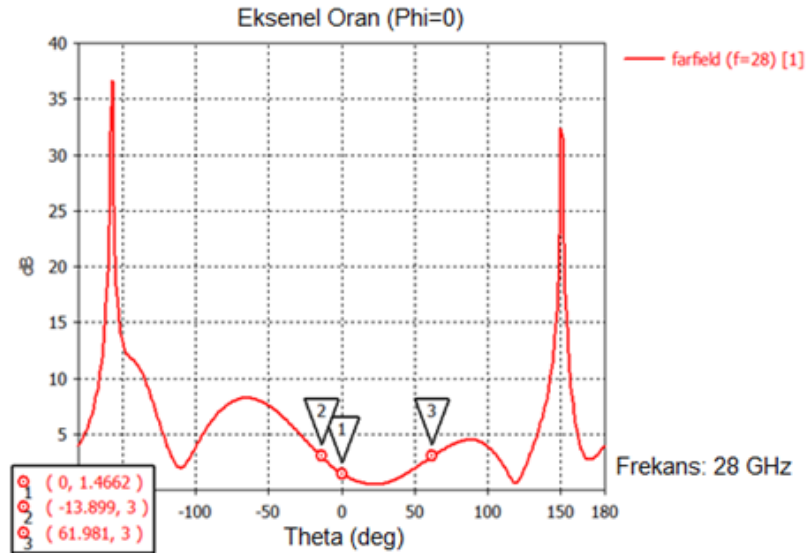
Dairesel polarizasyon elde etmek için açılan oyukların aksel orana etkisi Çizelge 3.9 ve Şekil 3.25’de verilmiştir. 1. Oyuk yerleştirildikten ve benzetimleri yapıldıktan sonra aksel oranın düştüğü ancak halen dairesel polarizasyon elde etmekte yeterli olmadığı görülmüştür. Daha sonra simetrik olarak 2. ve 3. Oyuklar eklenmiştir. Daha sonra yapılan benzetimler ile nihai oyuk parametreleri ve konumları belirlenmiştir. Aksel oran ana hüzme doğrultusunda 3 dB’nin altına indirilmiştir.

Çizelge 3.9. 28 GHz Dairesel Anten Oyukların Aksel Orana Etkisi

İterasyon	Açıklama	Aksel Oran ($\Phi=0$) dB	Anten Yama Şekli
1	Oyuksuz	40	
2	1 Oyuklu	7.1	
3	3 Oyuklu	1.57	

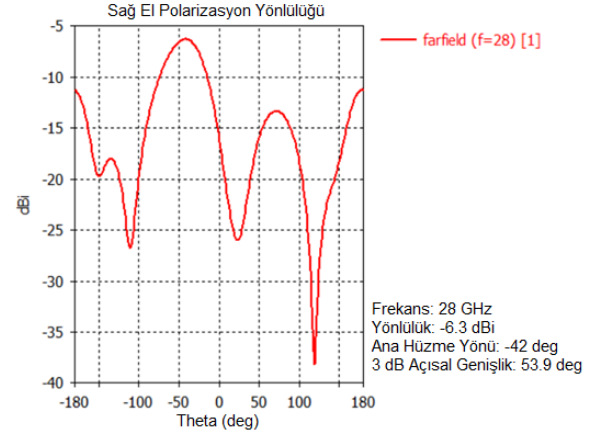
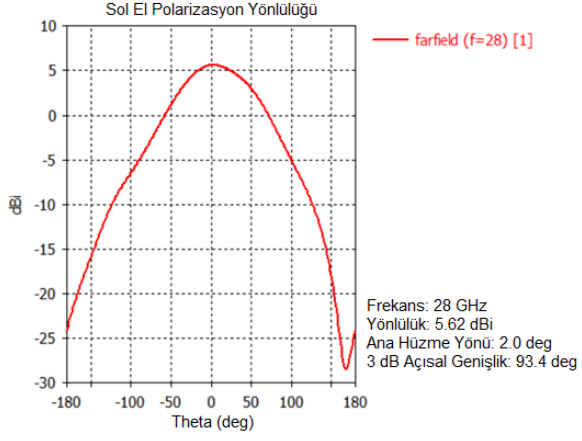


Şekil 3.25. Yama Üzerindeki Oyukların Eksenel Orana Etkileri

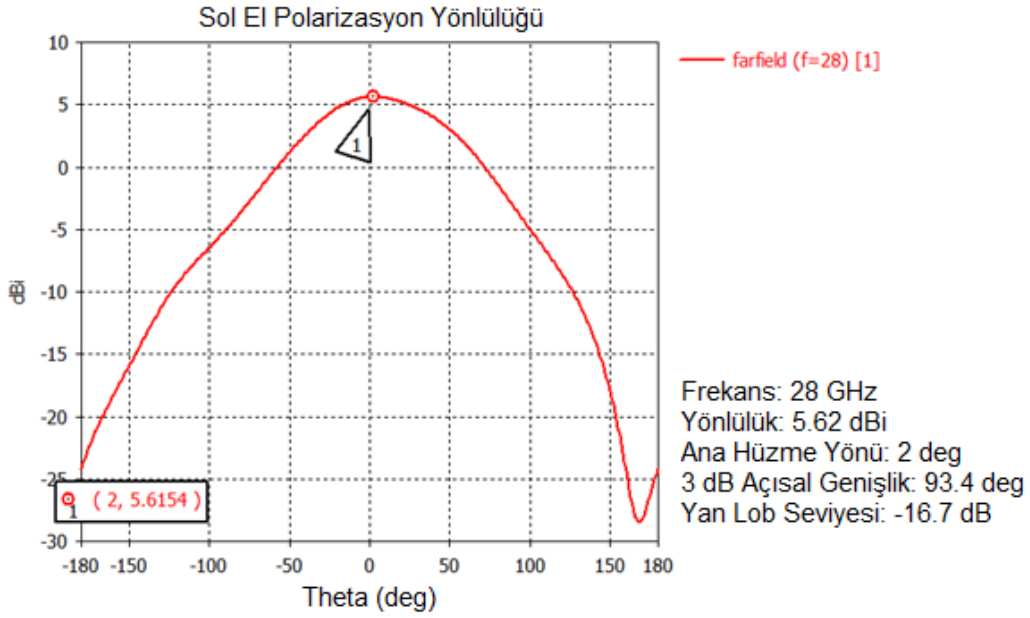


Şekil 3.26. 28 GHz Dairesel Yama Eksenel Oran (Phi=0)

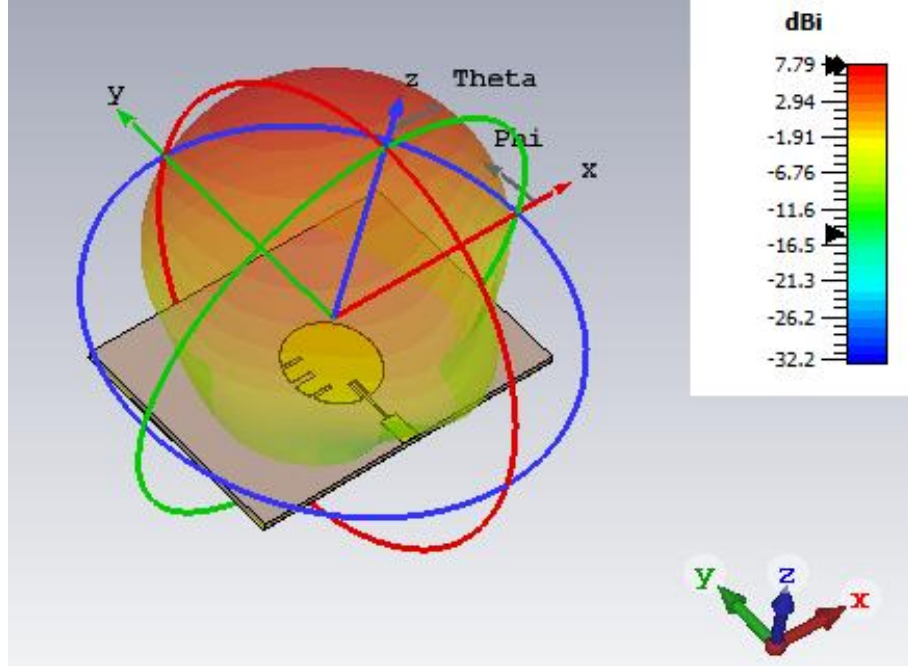
Dairesel polarizasyon bant genişliğini belirten grafik Şekil 3.26’de verilmiştir. 28 GHz’de $\varphi = 0^\circ$ ’a göre θ açısı tarandığında -13 – 61 dereceleri arasında antene ait polarizasyonun dairesel olduğu gözlenmektedir. Sağ ve sol el dairesel polarizasyon yönlülük grafikleri incelendiğinde yamanın sol-el dairesel polarizasyona sahip olduğu görülebilmektedir. Oyuklar desenin sağ tarafına açılmış olsaydı sağ-el dairesel polarizasyon elde edilecekti.



Şekil 3.27. 28 GHz Sol ve Sağ El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değerleri

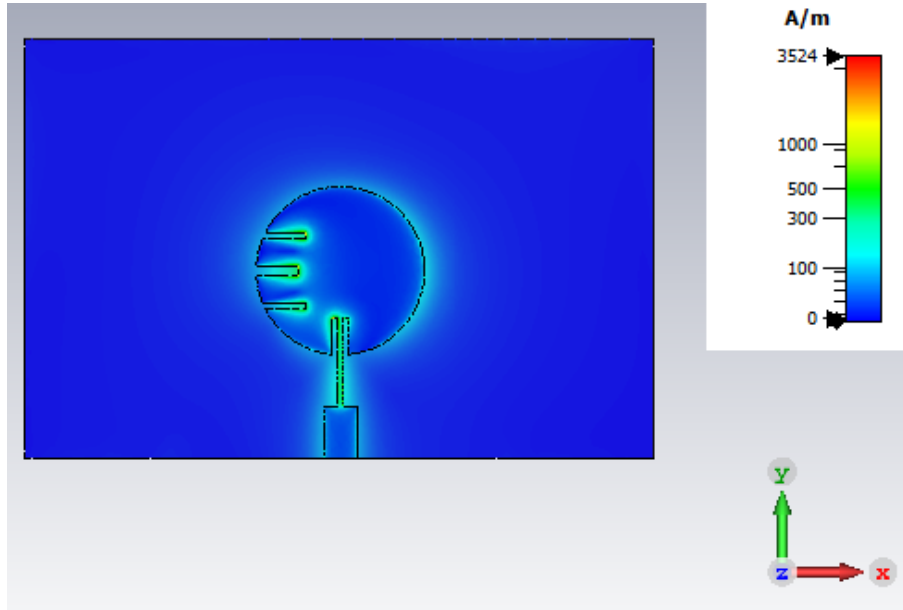


Şekil 3.28. 28 GHz Sol El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değeri



Şekil 3.29. 28 GHz Dairesel Yama Antene ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi

Şekil 3.29’da 3-Boyutlu örüntü üzerinden mutlak yönlülük gösterimi verilen yama antenin yüzey akımları dağılımı ise Şekil 3.30’da verilmiştir.

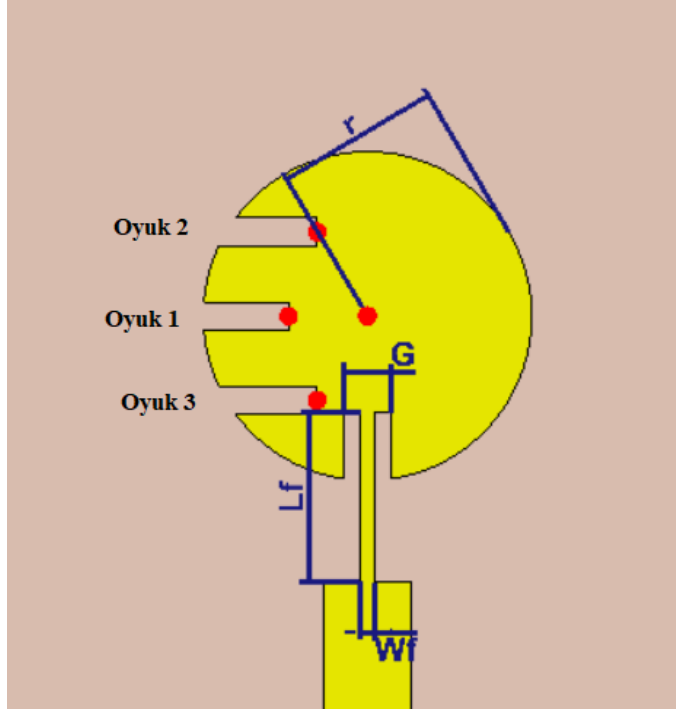


Şekil 3.30. 28 GHz Frekansına ait Yüzey Akımları Dağılımı

3.3. 38 GHz Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Tasarımı

Bölüm 3.2’de yaptığımız 28 GHz dairesel polarize anten tasarımı bu kez 38 GHz merkez frekansı için yapılacaktır. Daha önce incelenen iki anten tasarımı gibi bu yama anten için de aynı taban malzemesi (RT/Duroid 6002 ($\epsilon_r = 2.94$), 10 mil) kullanılacaktır. 38 GHz

merkez frekanslı anten yaklaşık 1 GHz empedans bant genişliğine ve ana hüzmede dairesel polarizasyona sahip olacaktır.



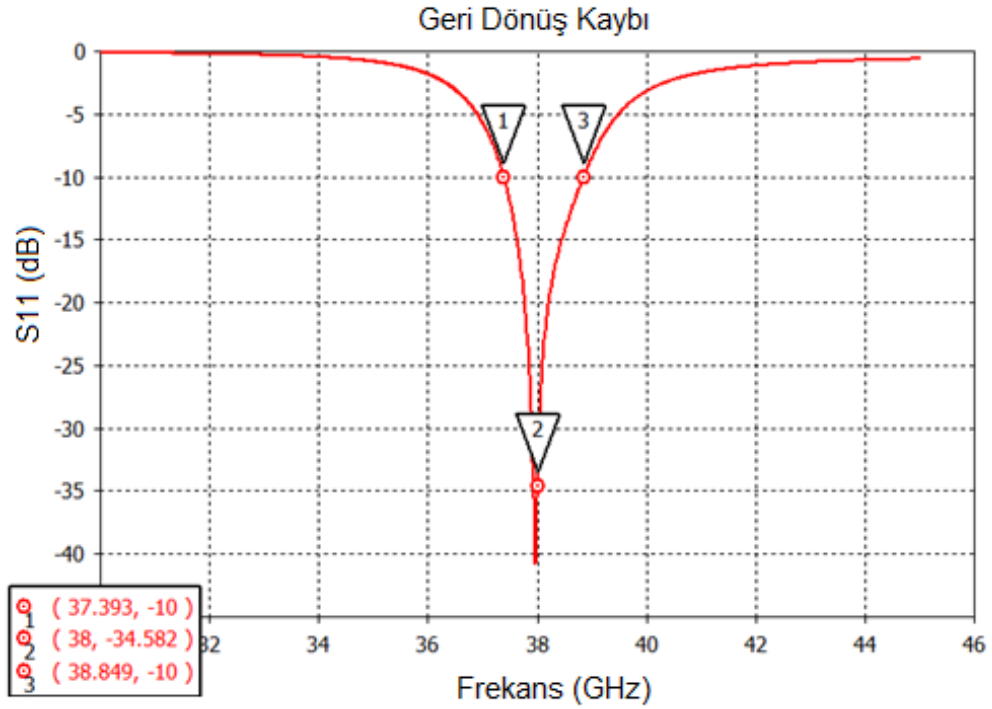
Şekil 3.31. 38 GHz Dairesel Yama Anten Gösterimi

Şekil 3.31’de 38 GHz merkez frekanslı yama için genel görünümü verilen dairesel şekilli antene ait başlangıç boyutları Bölüm 2.3.2’deki formüllerden yararlanarak belirlenmiştir. Mikroşerit yama antenleri doğrusal polarizasyondan dairesel polarizasyona geçirmek için yine Bölüm 2.5.2’de bahsedilen yöntemlerden yararlanabiliriz. Desenin bütünlüğünü bozma yöntemini kullanarak ana hüzme doğrultusunda eksenel oranı 3 dB’nin altına indirmek için üç adet oyuk desen içinde oluşturulmuştur. Bu sayede eksenel oran 3 dB seviyesinden aşağıya indirilebilmiştir. Empedans bant genişliği, merkez frekans ve dairesel polarizasyon şartlarını sağlamak için optimizasyonlar yapılmıştır ve Çizelge 3.10’daki fiziksel parametreler elde edilmiştir.

Çizelge 3.10. 38 GHz Yaması için Tasarım Parametreleri

Parametre	Değer
Yama Yarıçapı (r)	1.165 mm
Besleme Hattı Genişliği (Wf)	0.1 mm
Besleme Hattı Uzunluğu (Lf)	1.2 mm

Besleme Hattı Boşluğu (G)	0.3 mm
Oyuk 1 Boyutları	0.2 x 0.6 mm
Oyuk 1 Daire Merkezine Göre Koordinatı	-0.56 ; 0
Oyuk 2 Boyutları	0.2 x 0.8 mm
Oyuk 2 Daire Merkezine Göre Koordinatı	-0.36 ; 0.6
Oyuk 3 Boyutları	0.2 x 0.8 mm
Oyuk 3 Daire Merkezine Göre Koordinatı	-0.36 ; -0.6



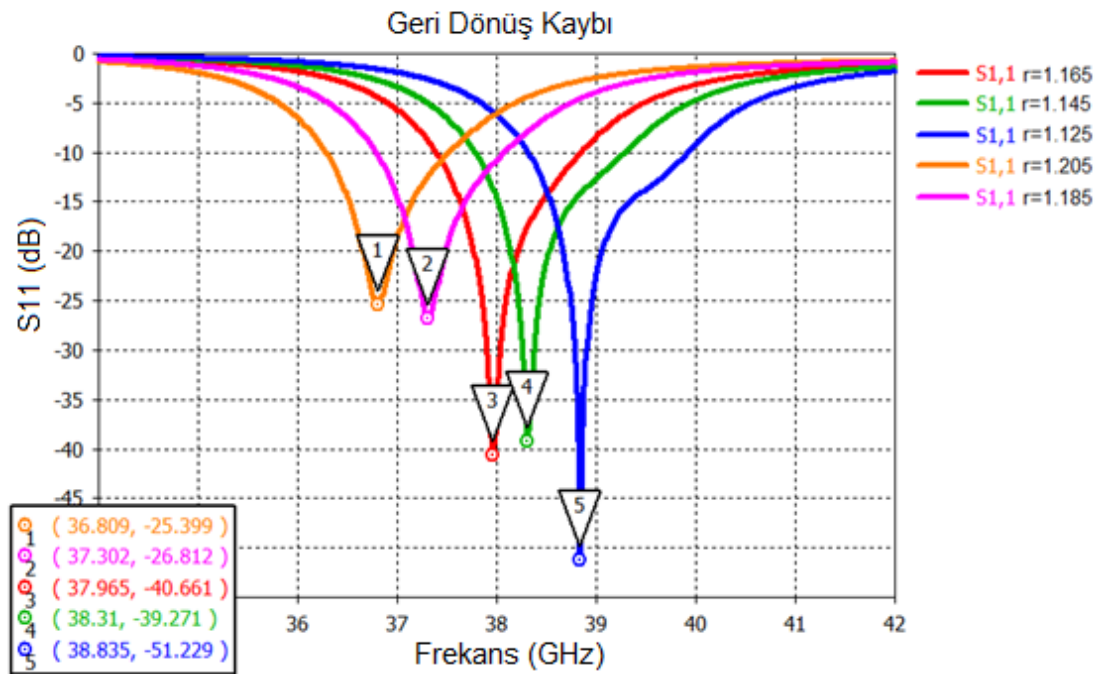
Şekil 3.32. 38 GHz Dairesel Yama Geri Dönüş Kaybı Benzetim Sonucu

Şekil 3.32’de dairesel yamaya ait geri dönüş kaybı verilmiştir. 38 GHz etrafında 1460 MHz bant genişliğinde geri dönüş kaybı 10 dB’den iyidir. Merkez frekans 38 GHz’de ise geri dönüş kaybı yaklaşık 34.5 dB’dir.

3.3.1. Yama Boyutları ve Besleme Hattının Geri Dönüş Kaybına Etkisi

38 GHz’de tasarlanan dairesel yama antene ait yarıçap değerinin ve besleme hattı uzunluğunun geri dönüş kaybına olan etkisi bu bölümde incelenecektir. W_f ve G gibi

diğer parametreler fiziki olarak en küçük değerler alındığında en performanslı geri dönüş kayıpları elde edilmektedir. Bu yüzden bu değerler üretim kabiliyetleri açısından üretilebilecek en düşük değerler olarak alınmış ve parametrik analizlere dahil edilmemiştir. Çizelge 3.11'den de görüleceği üzere geri dönüş kaybı sonuçlarına göre yarıçap değerini artırmak frekans düzleminde aşağı yönde bir rezonans frekansına denk gelirken. Yarıçap değerini azaltmak ise yukarı yönde bir rezonans frekansına denk gelmektedir. Bu durumda istenen rezonans frekansına en yakın iterasyon 3. olandır yani yarıçap değerinin 1.165 mm olduğu değerdir. Aynı zamanda besleme hattı uzunluğunun (L) artması rezonans frekansını aşağı frekans seviyesine, azalması ise yukarı frekans seviyelerine kaydırmaktadır. Burada en uygun besleme hattı uzunluğu olarak 2. iterasyon 1.2 mm değeri uygun olarak seçilmiştir.

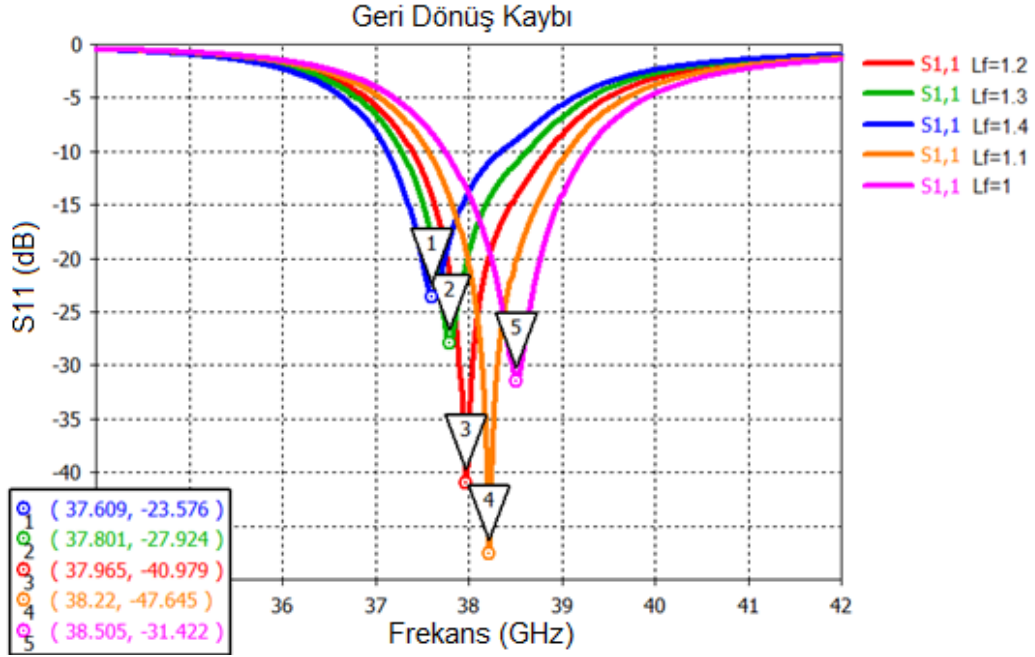


Şekil 3.33. 38 GHz Dairesel Anten Yarıçapının Geri Dönüş Kaybına Etkisi (Lf=1.2 mm sabit)

Çizelge 3.11. 38 GHz Dairesel Anten Yarıçapı Parametrik Analizlerine göre Rezonans Frekansları (Lf=1.2 mm sabit)

İterasyon	r (mm)	Rezonans Frekans (GHz)
1	1.125	38.83
2	1.145	38.31

3	1.165	37.96
4	1.185	37.3
5	1.205	36.8



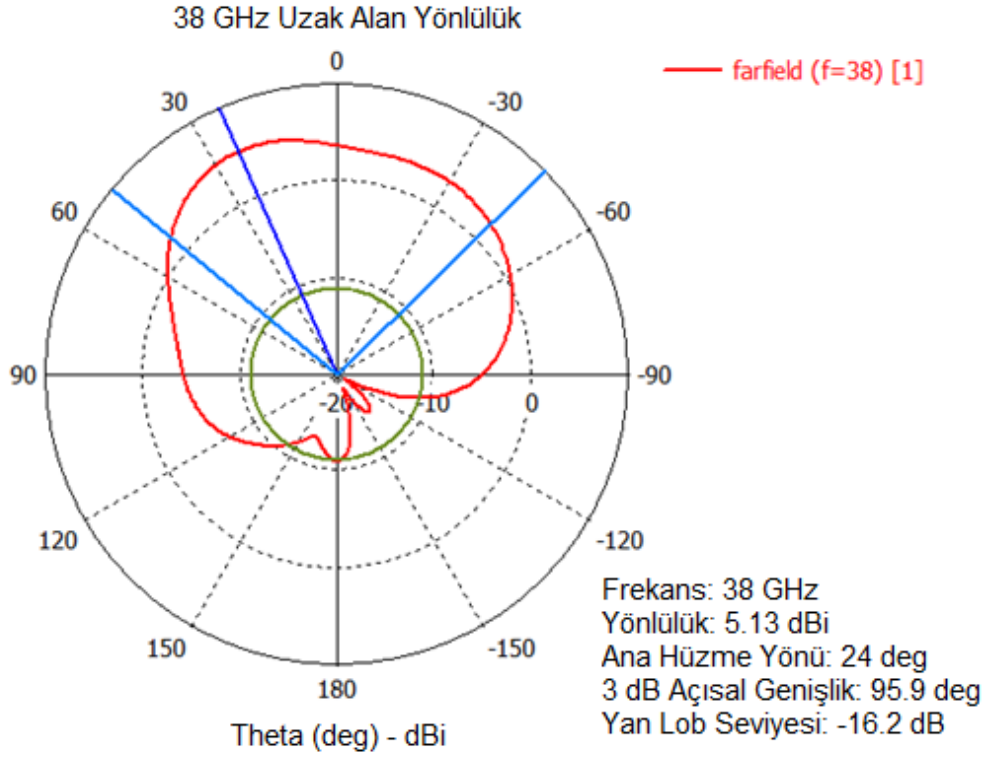
Şekil 3.34. 38 GHz Dairesel Anten Besleme Hattı Uzunluğunun Geri Dönüş Kaybına Etkisi ($r=1.165$ mm sabit)

Çizelge 3.12. 38 GHz Dairesel Anten Besleme Hattı Uzunluğunun Parametrik Analizlerine göre Rezonans Frekansları ($r=1.165$ mm sabit)

İterasyon	Lf (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)
1	1	38.5
2	1.1	38.22
3	1.2	37.96
4	1.3	37.8
5	1.4	37.6

3.3.2. Yama Antenin Örüntü, Polarizasyon ve Yönlülük Benzetimleri

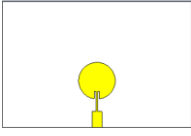
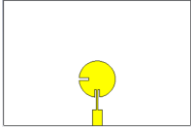
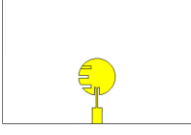
Ana hüzmeye ait anten kazancı 38 GHz merkez frekansında 4.85 dBi olarak elde edilmiştir. $\theta = 24^\circ$ ana hüzmeyi göstermektedir. Kazancın ana hüzmeye göre 3 dB düştüğü 3 dB açısal bant genişliği 95° olarak elde edilmiştir.

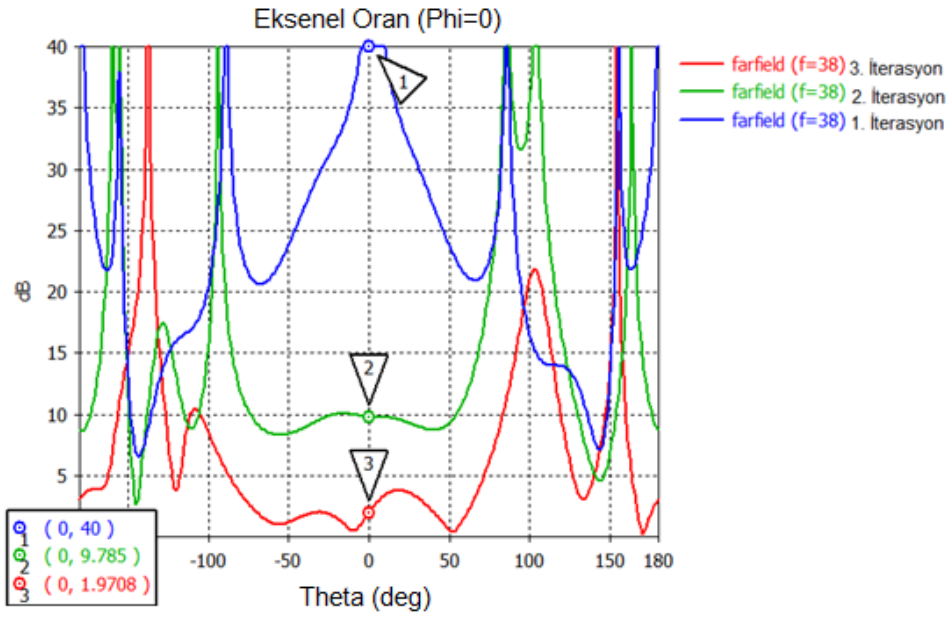


Şekil 3.35. 38 GHz Dairesel Yama Uzak Alan Yönlülük Benzetim Sonucu

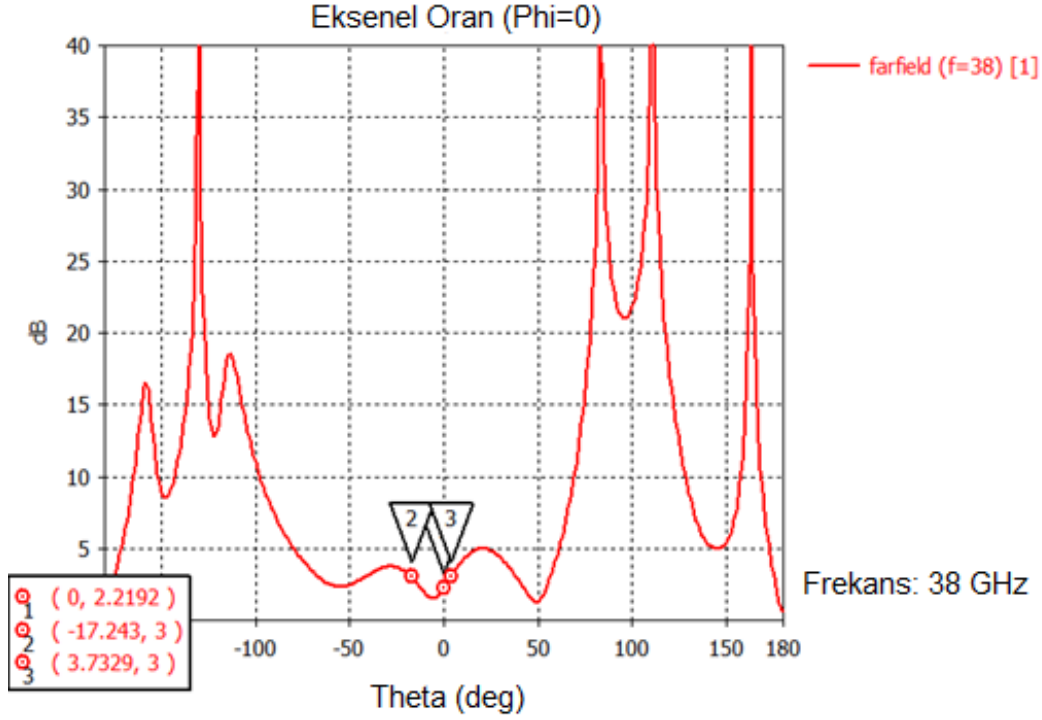
Dairesel polarizasyon elde etmek için açılan oyukların aksel orana etkisi Çizelge 3.13 ve Şekil 3.36'da verilmiştir. 1. Oyuk yerleştirildikten ve benzetimleri yapıldıktan sonra aksel oranın düştüğü ancak halen dairesel polarizasyon elde etmekte yeterli olmadığı görülmüştür. Daha sonra simetrik olarak 2. ve 3. Oyuklar eklenmiştir. Daha sonra yapılan benzetimler ile nihai oyuk parametreleri ve konumları belirlenmiştir. Aksel oran ana hüzmeye doğrultusunda 3 dB'nin altına indirilmiştir.

Çizelge 3.13. 38 GHz Dairesel Anten Oyukların Eksenel Orana Etkisi

İterasyon	Açıklama	Eksenel Oran (Phi=0) dB	Anten Yama Şekli
1	Oyuksuz	40	
2	1 Oyuklu	9.78	
3	3 Oyuklu	1.97	

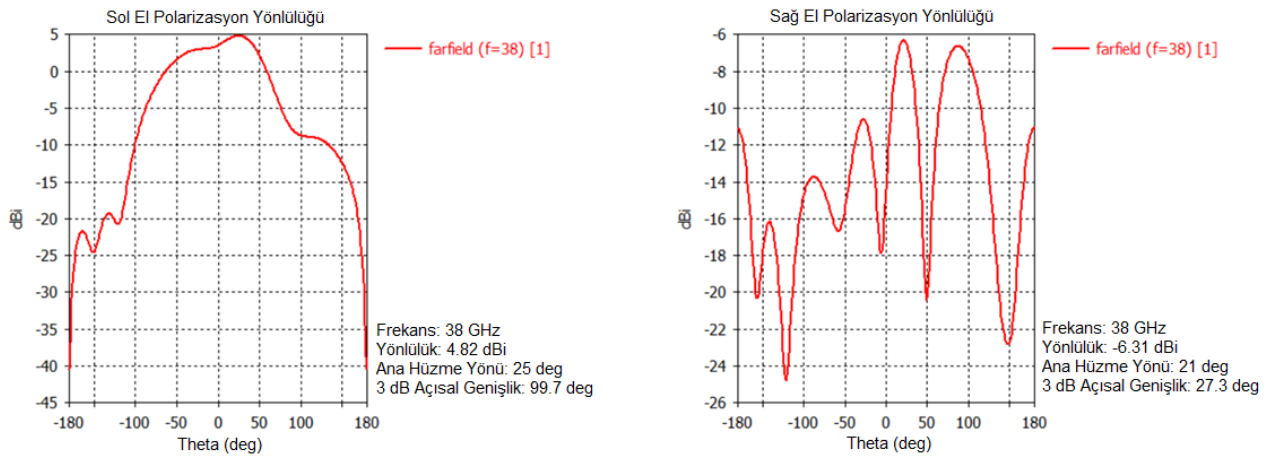


Şekil 3.36. Yama Üzerindeki Oyukların Eksenel Orana Etkileri

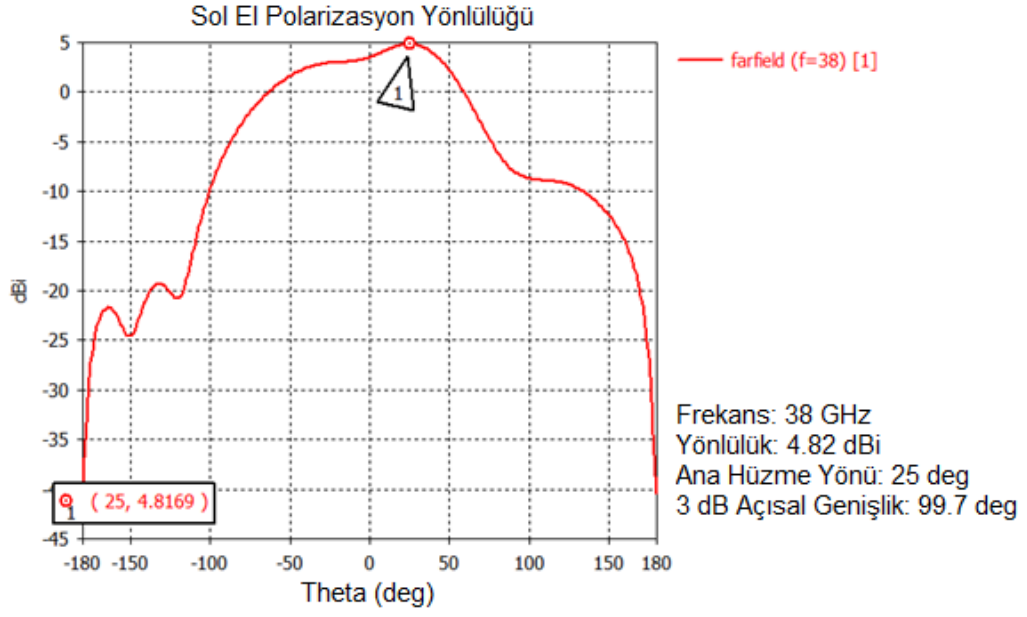


Şekil 3.37. 38 GHz Dairesel Yama Eksenel Oran (Phi=0)

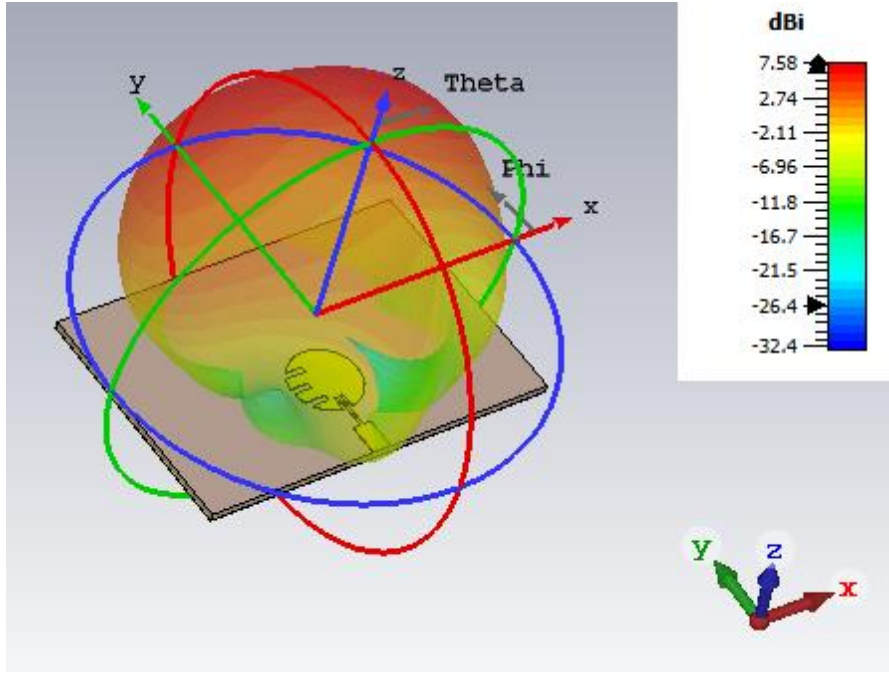
Dairesel polarizasyon bant genişliğini belirten grafik Şekil 3.37’de verilmiştir. 38 GHz’de $\varphi = 24^\circ$ ’a göre θ açısı tarandığında $-17 - 3.7$ dereceleri arasında antene ait polarizasyonun dairesel olduğu gözlenmektedir. Sağ ve sol el dairesel polarizasyon yönlülük grafikleri incelendiğinde yamanın sol-el dairesel polarizasyona sahip olduğu görülebilmektedir. Oyuklar desenin sağ tarafına açılmış olsaydı sağ-el dairesel polarizasyon elde edilecekti.



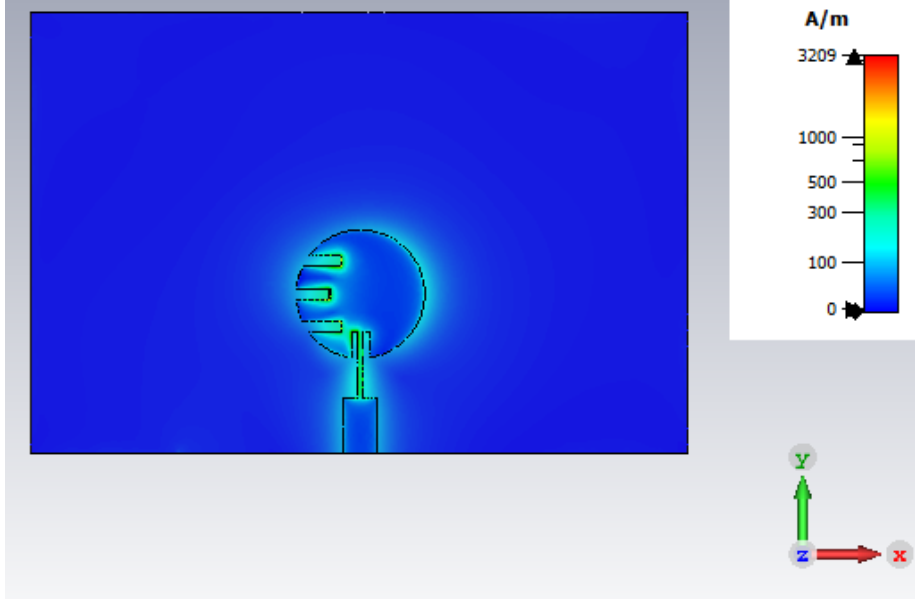
Şekil 3.38. 38 GHz Sol ve Sağ El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değerleri



Şekil 3.39. 38 GHz Sol El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değeri



Şekil 3.40. 38 GHz Dairesel Yama Antene ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi



Şekil 3.41. 38 GHz Frekansına ait Yüzey Akımları Dağılımı

Şekil 3.40’da 3-Boyutlu örüntü üzerinden mutlak yönlülük gösterimi verilen yama antenin yüzey akımları dağılımı ise Şekil 3.41’de verilmiştir.

3.4. MIMO Anten Tasarımları

MIMO yapıları oluşturabilmek için tek besleme noktasından çok sayıda anten elemanı beslenebilir bir yapı oluşturmak gerekmektedir. Bunun için RF bölücü yapısına ihtiyaç vardır. Çoğullanacak anten elemanı sayısı kadar çıkışa sahip bir RF bölücü tasarımı yapılmalıdır. RF bölücü yapılarına birkaç örnek verecek olursak; wilkinson güç bölücü, 90° hibrit kuplör, 180° hibrit kuplör bunlardan bazılarıdır. Bu bölümde MIMO yapılarda kullanılmak üzere bir wilkinson güç bölücüsü tasarlanacaktır.

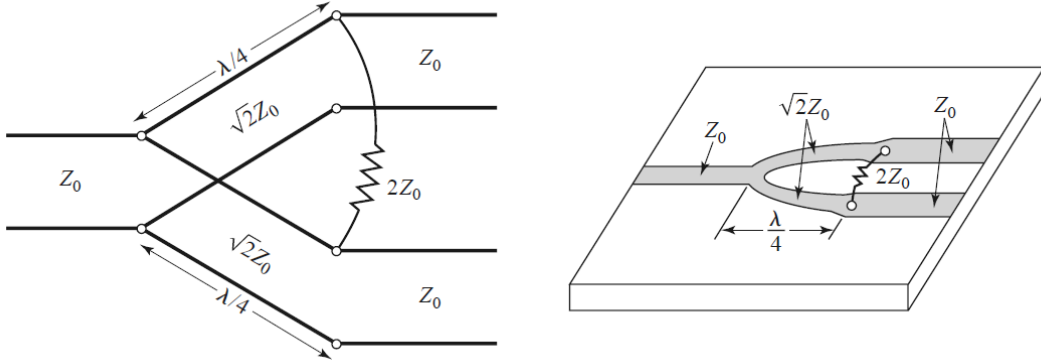
3.4.1. Wilkinson RF Güç Bölücü Tasarımı

T-Bağlantıya sahip RF güç bölücülerde çıkış kapılarının sistem empedansına (50 Ohm) uyumsuzluğu ve kapılar arasında izolasyonun olmaması en büyük handikaplardır. wilkinson RF güç bölücüsü bu eksiklikleri ortadan kaldırarak kapıların sistem empedansına uyumunu ve kapılar arası izolasyonu sağlar.

Şekil 3.42’de iletim hattı ve mikroşerit modeli verilen wilkinson RF güç bölücüsü tasarım kriterleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Z_0 , sistemin karakteristik empedansı ve 50 Ohm’dur.

- $\lambda/4$ çalışma frekansına ait çeyrek dalga boyudur ve T-Bağlantı çıkış kolları bu uzunlukta olmalıdır.
- T-Bağlantı çıkış kollarının karakteristik empedansları ise $\sqrt{2}Z_0$ değerinde olmalıdır.
- Çıkış kolları arasındaki izolasyon direnci $2Z_0$ değerinde olmalıdır.

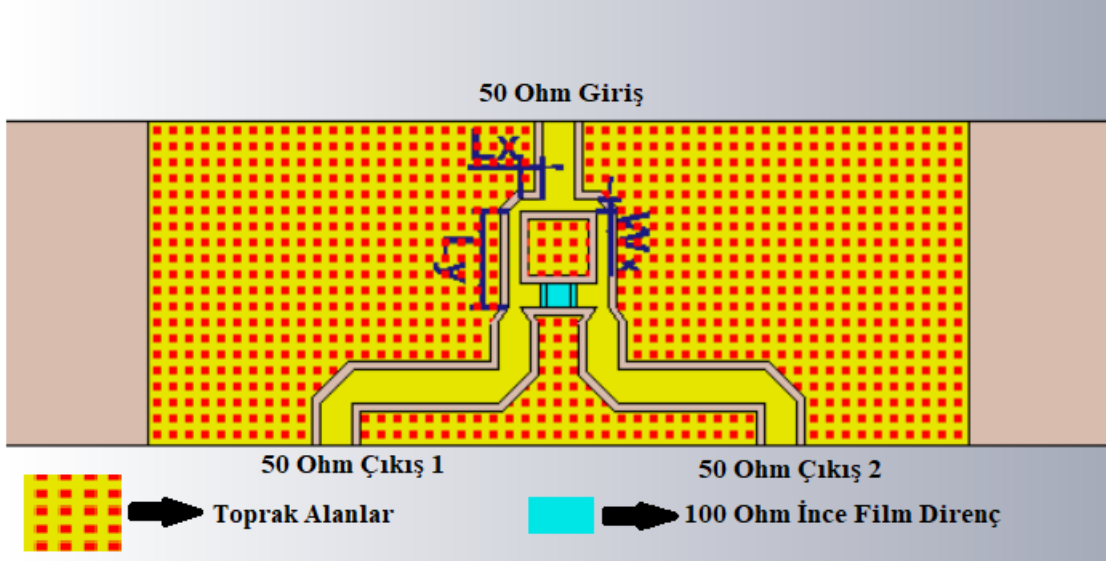


Şekil 3.42. Wilkinson RF Güç Bölücü İletim Hattı ve Mikroşerit Modeli [25]

3.4.2. MIMO Yapıda Kullanılacak Bölücü Tasarımı

Bu bölümde 28 GHz ve 38 GHz frekanslarında çalışan yama antenleri çoğullamak için kullanılacak bir wilkinson RF güç bölücü tasarımı yapılacaktır. Tasarım her iki frekans bölgesinde çalışabilecek şekilde geniş bantlı bir empedans uyumlaması ile tasarlanacaktır. Bölüm 3.4.1.'de verilen tasarım kriterleri doğrultusunda bölücüye ait temel fiziksel parametreler belirlenmiş ve daha sonra geniş bant empedans uyumlaması için optimizasyonlar yapılarak nihai değerleri elde edilmiştir.

Ayrıca bu aşamada bölücü gerçekleştirme yöntemi olarak CPWG iletim hattı şekli tercih edilmiştir. Bu modelde ışınım çok az olduğu için anten ışınım örüntülerine etkisi neredeyse olmayacaktır. Tasarlanan iki kollu geniş bantlı CPWG wilkinson RF güç bölücü'ye ait fiziksel parametreler Çizelge 3.14'te verilmiştir.

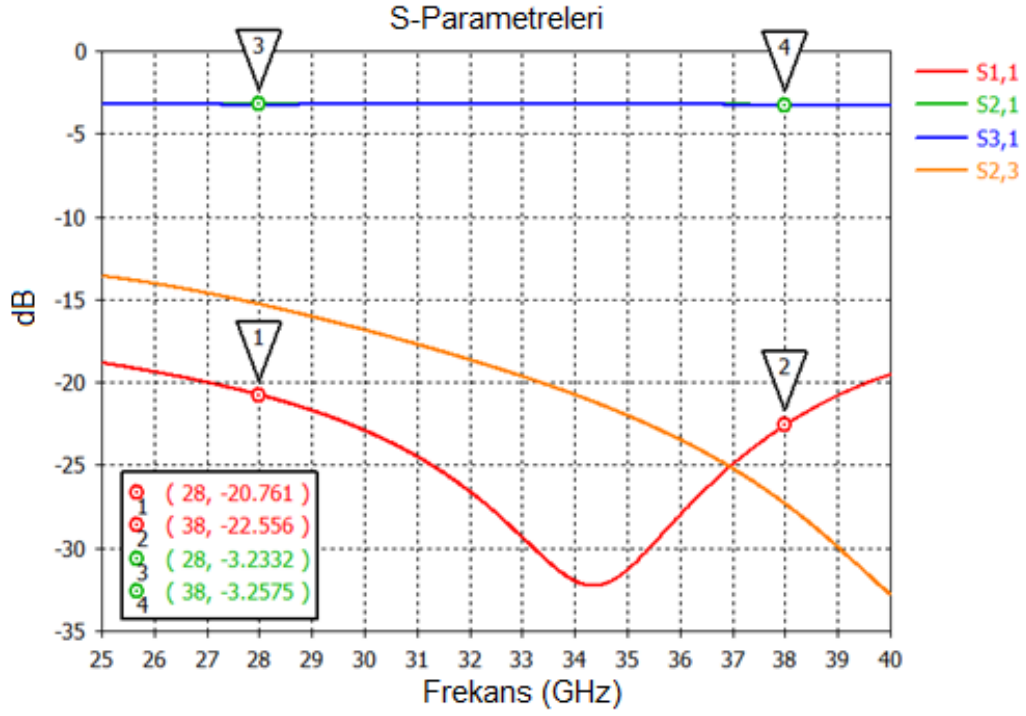


Şekil 3.43. 2 Kollu Geniş Bantlı CPWG Wilkinson RF Güç Bölücü

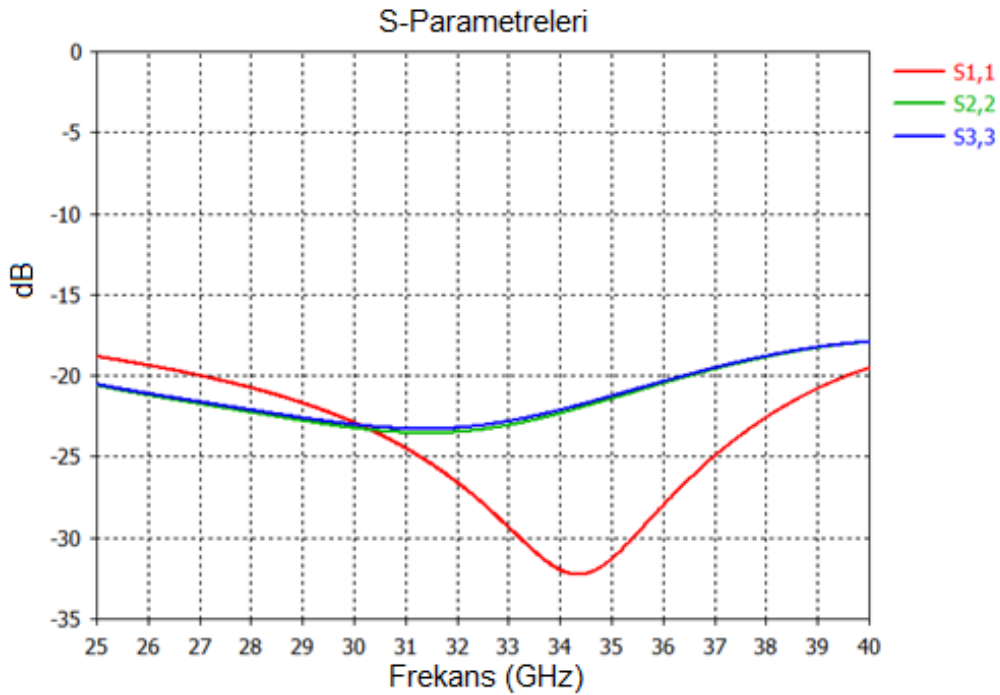
CPWG hatların toprak ve canlı kısımları arasındaki mesafe 0.1 mm'dir.

Çizelge 3.14. 2 Kollu Geniş Bantlı CPWG Wilkinson RF Güç Bölücü Fiziksel Parametreleri

Parametreler	Değer
CPWG 50 Ohm Hat Genişliği	0.42 mm
Çıkış Kolları Hat Genişlikleri (W_x)	0.15 mm
Çıkış Kolları x-Düzleminde Uzunluk (L_x)	0.275 mm
Çıkış Kolları y-Düzleminde Uzunluk (L_y)	1.225 mm
CPWG Toprak-Canlı Hat Arası Boşluk	0.1 mm



Şekil 3.44. 2 Kollu Wilkinson RF Güç Bölücü Frekans Cevabı



Şekil 3.45. 2 Kollu Wilkinson RF Güç Bölücü Geri Dönüş Kayıpları

Nihai parametreler ile yapılan benzetim sonrası elde edilen S-parametrelerini yorumlarsak; Giriş ve çıkış kapıları arasında 3.25 dB araya girme kaybı olduğu, giriş kapısı geri dönüş kaybının her iki frekans bandı için de 20 dB'den iyi olduğu ve çıkış

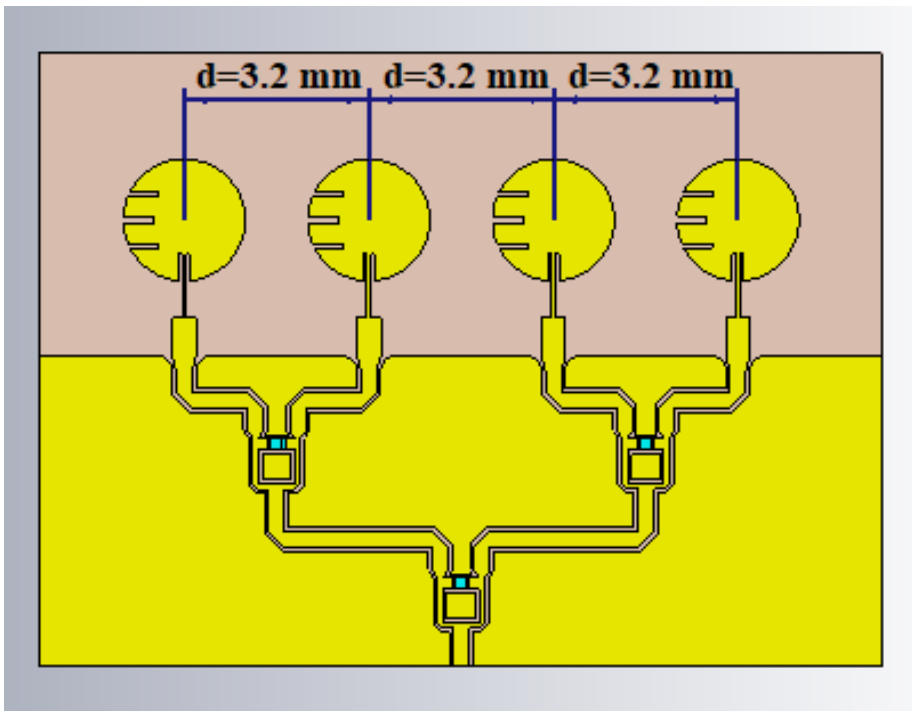
kapıları arasındaki izolasyonun (S2,3) 15 dB'den iyi olduğu Şekil 3.44'da gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 3.45'ye göre çıkış kapıları geri dönüş kayıpları da 18 dB'den iyidir.

5G mobil sistemler için 4x4 MIMO tasarımları yapacağımız için bu bölücü çoklanarak dört çıkışlı hale getirilmiştir, bu durumda 4 kol arasındaki uzaklık 50 Ohm iletim hatlarının boyları ile oynanarak optimize edilmiş, anten ışınma örüntülerinde grating lobe'lar önlenmeye çalışılmıştır.

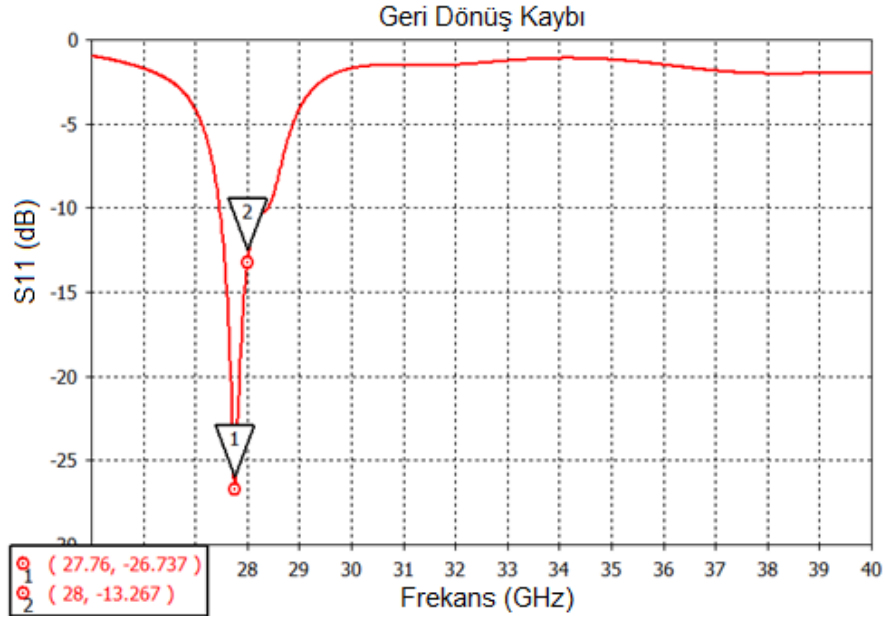
3.4.3. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Benzetimleri

Bir önceki bölümde elde edilen iki kollu bölücünün çıkış kollarına birer adet daha kendisinden eklenerek dört çıkışlı bir bölücü elde edilmiştir. 50 Ohm iletim hatları ile bölücüler arası bağlantı sağlanmıştır. Antenler arası mesafeyi optimize edebilmek için 50 Ohm iletim hatlarının boyları benzetim sonuçlarına göre her bir ardışık anten arası aynı mesafeye sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Anten elemanı olarak daha önce Bölüm 3.2'de tasarlanan 28 GHz dairesel polarizasyonlu yama anten kullanılmıştır.

Bölüm 2.6.'daki (2.4) eşitliği göz önüne alınarak 28 GHz için antenler arası mesafe $d \leq 5.35 \text{ mm}$ olmalıdır. Antenler arası mesafe yönlülük, aksel oran ve grating lobe oluşumu gibi kriterler göz önüne alındığında nihai olarak $d = 3.2 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

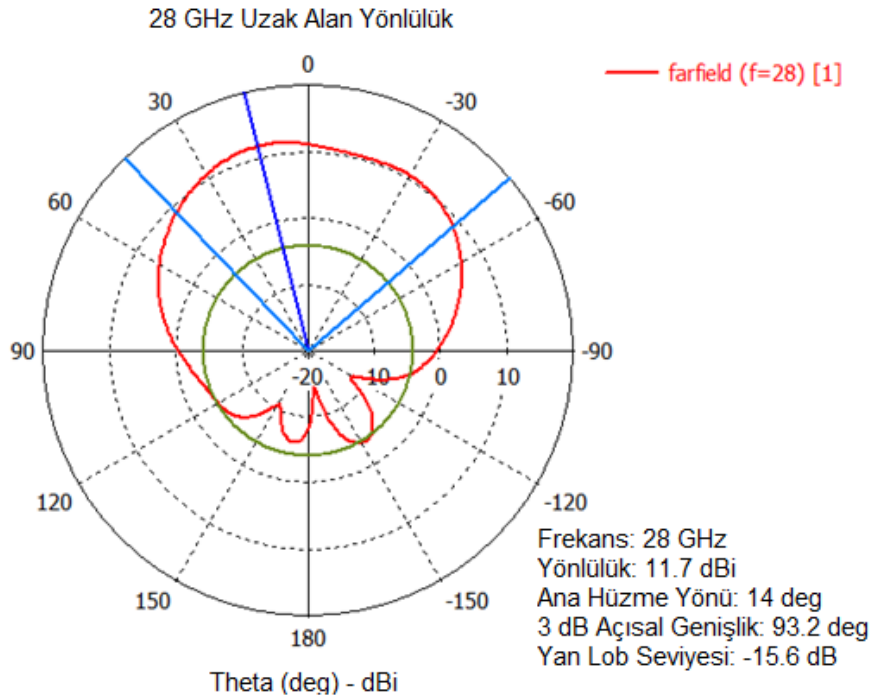


Şekil 3.46. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Genel Görünümü



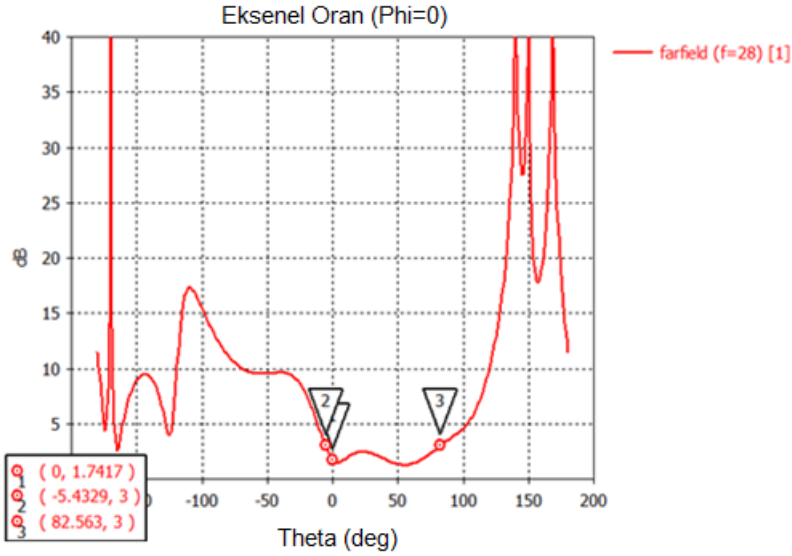
Şekil 3.47. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait Geri Dönüş Kaybı Benzetim Sonucu

28 GHz 4x4 MIMO anten tasarımına ait geri dönüş kaybı benzetim sonucu Şekil 3.47’de verilmiştir. Görülebileceği üzere 28 GHz’deki geri dönüş kaybı 13 dB’den iyidir. Antenlerin dizi haline getirilip 4 kollu bölücü ile birleştirilmelerinin bir etkisi olarak bant merkezi 250 MHz kadar sola kaymıştır. 10 dB bant genişliği ise yaklaşık 800 MHz olarak gözlenmiştir.



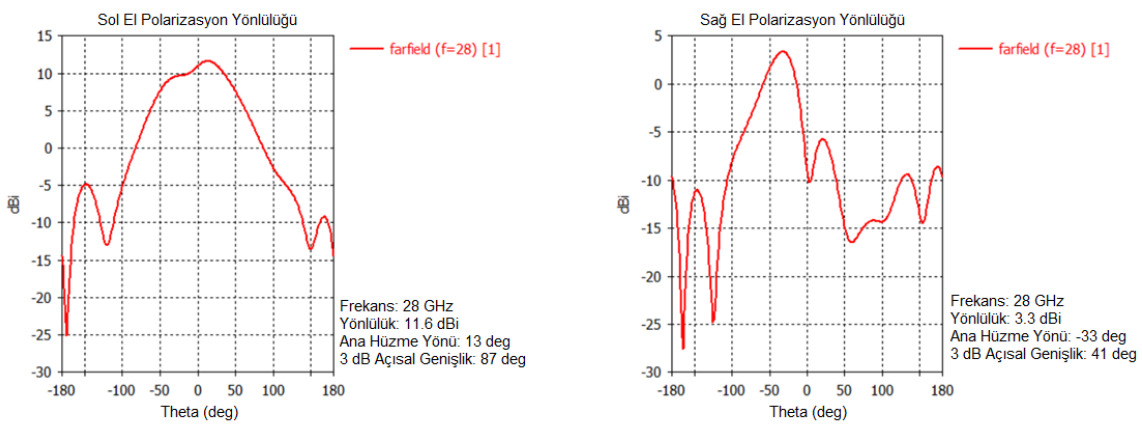
Şekil 3.48. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait Uzak Alan Yönlülük Grafiği

Şekil 3.48’de polar koordinat düzleminde yönlülük grafiği verilmiştir. Ana hüzmeye yaklaşık 14° kaymıştır. Bu kayıklığın sebebi konektör ve 4 kollu bölücü etkilerinin yanı sıra dizideki antenler arası mesafenin geri dönüş kaybı, dairesel polarizasyonun $\theta = 0^\circ$ ’de korunması ve kazancın yüksek tutulabildiği noktalara göre optimize edildikten sonra en uygun nokta elde edilmiştir. Ana hüzmeye yönlülüğü 11.7 dBi olarak görülmüştür.



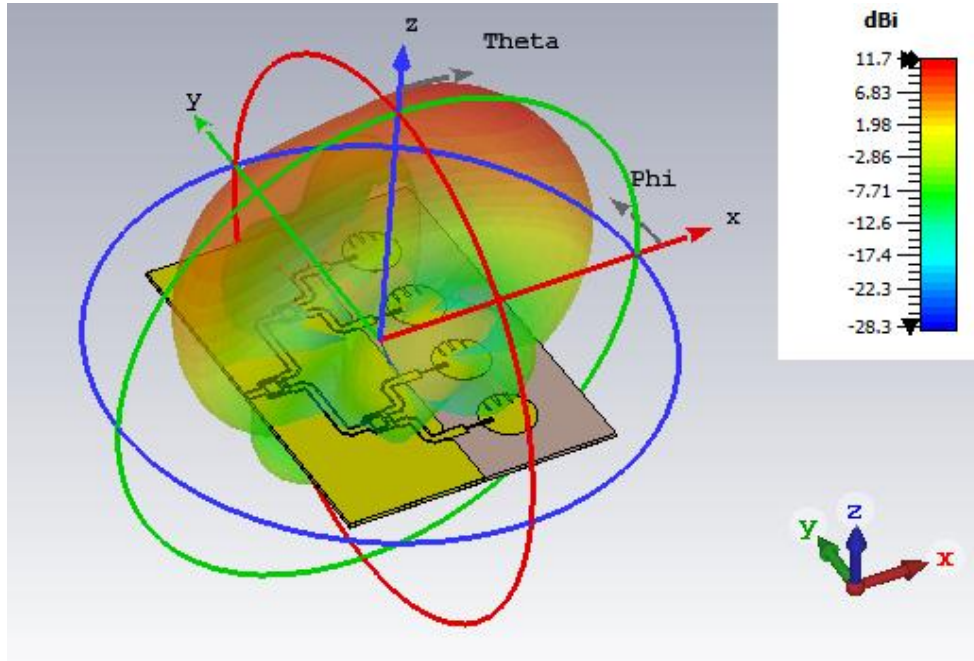
Şekil 3.49. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait Eksenel Oran (Phi=0) Grafiği

$\theta = \pm 180^\circ$ aralığında eksenel orana baktığımızda dairesel polarizasyona ait bant genişliği 87° civarlarında olduğu görülmektedir. Buradaki optimizasyon kriteri $\theta = 0^\circ$ ’de dairesel polarizasyonun korunması üzerine olmuştur.



Şekil 3.50. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait Sol ve Sağ El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değerleri

Sol ve sağ el dairesel polarizasyon yönlülük grafiklerine baktığımızda polarizasyon yönünün sol-el dairesel polarizasyon olduğu ve en yüksek yönlülük değerinin 11.6 dBi olduğu görölmektedir.



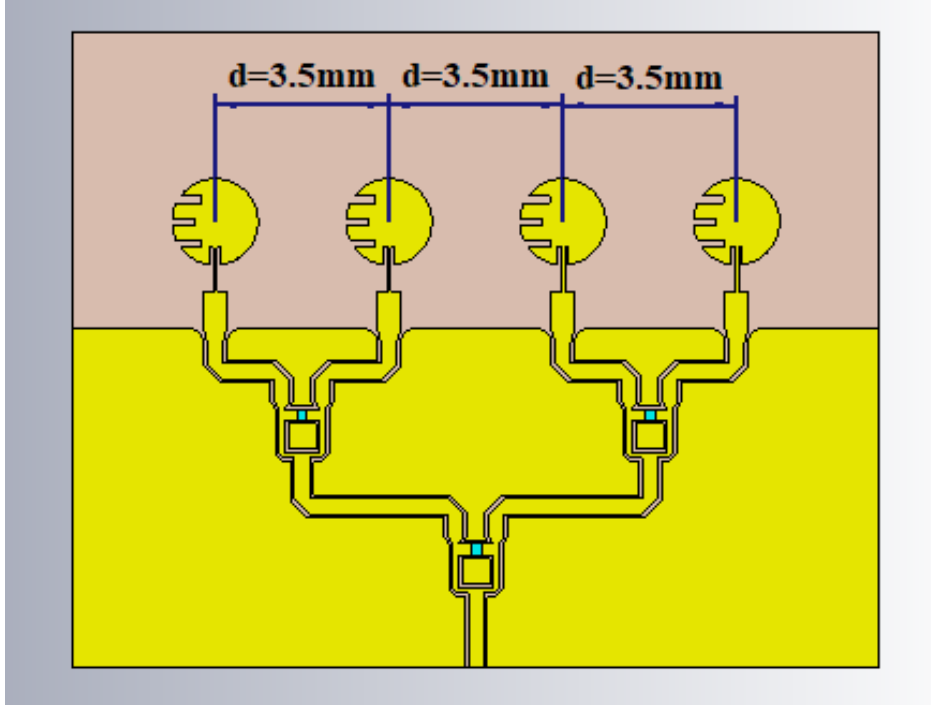
Şekil 3.51. 28 GHz 4x4 MIMO Antene ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi

28 GHz 4x4 MIMO Anten için Şekil 3.51’de 3-Boyutlu örüntü üzerinden mutlak yönlülük gösterimi verilmiştir.

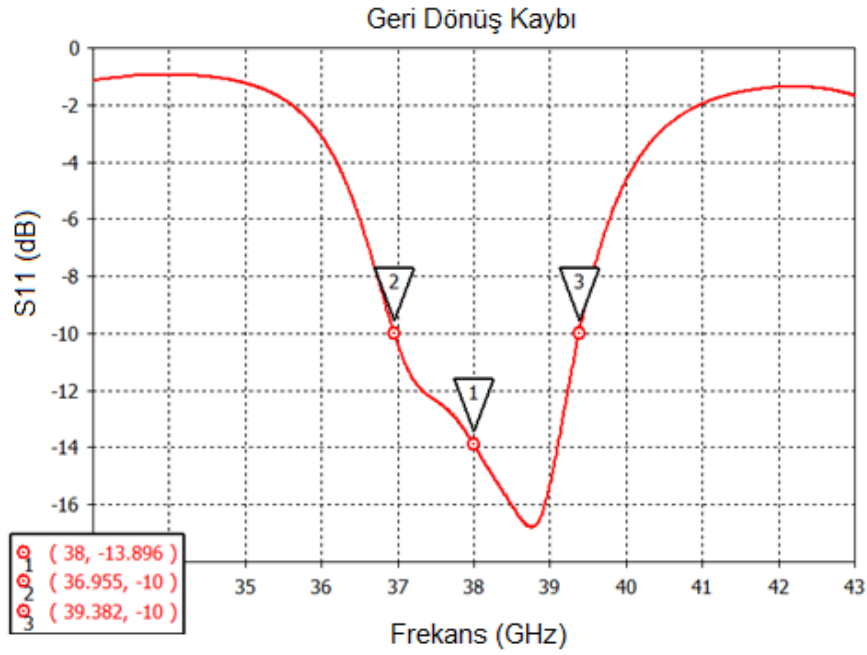
3.4.4. 38 GHz 4x4 MIMO Anten Benzetimleri

28 GHz için yapılan dört kollu bölücü tasarımının benzeri 38 GHz merkez frekanslı anten için de yapılmıştır. 50 Ohm iletim hatları ile bölücüler arası bağlantı sağlanmıştır. Antenler arası mesafeyi optimize edebilmek için 50 Ohm iletim hatlarının boyları benzetim sonuçlarına göre her bir ardışık anten arası aynı mesafeye sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Anten elemanı olarak daha önce Bölüm 3.3’te tasarlanan 38 GHz dairesel polarizasyonlu yama anten kullanılmıştır.

Bölüm 2.6.’daki (2.4) eşitliği göz önüne alınarak 38 GHz için antenler arası mesafe $d \leq 3.94 \text{ mm}$ olmalıdır. Antenler arası mesafe yönlülük, aksenal oran ve grating lobe oluşumu gibi kriterler göz önüne alındığında nihai olarak $d = 3.5 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

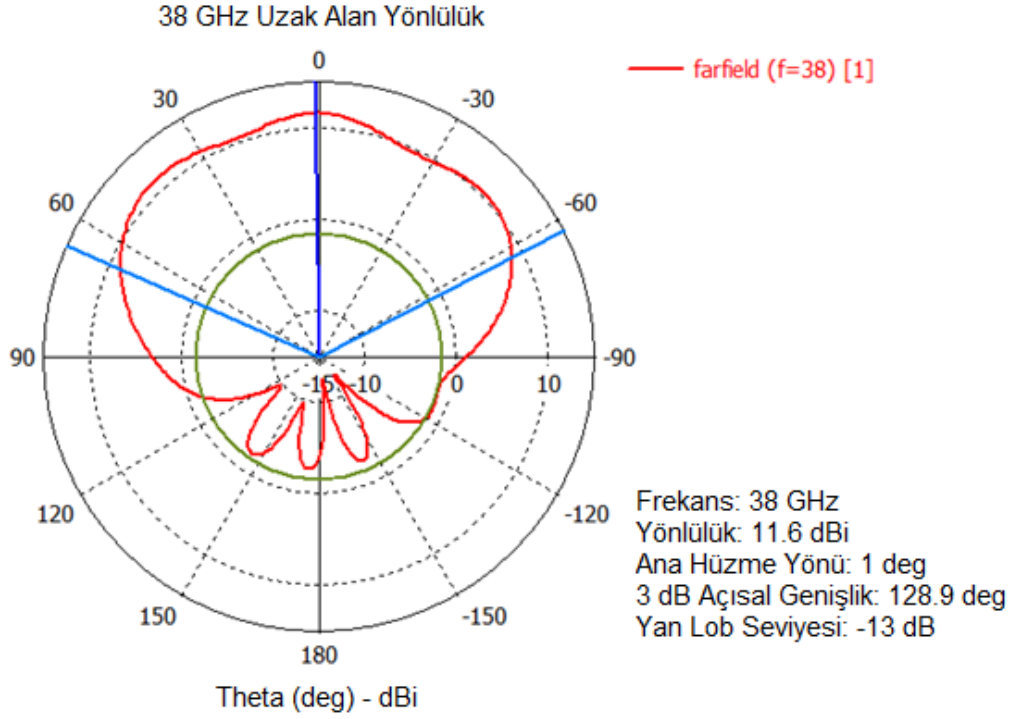


Şekil 3.52. 38 GHz 4x4 MIMO Anten Genel Görünümü



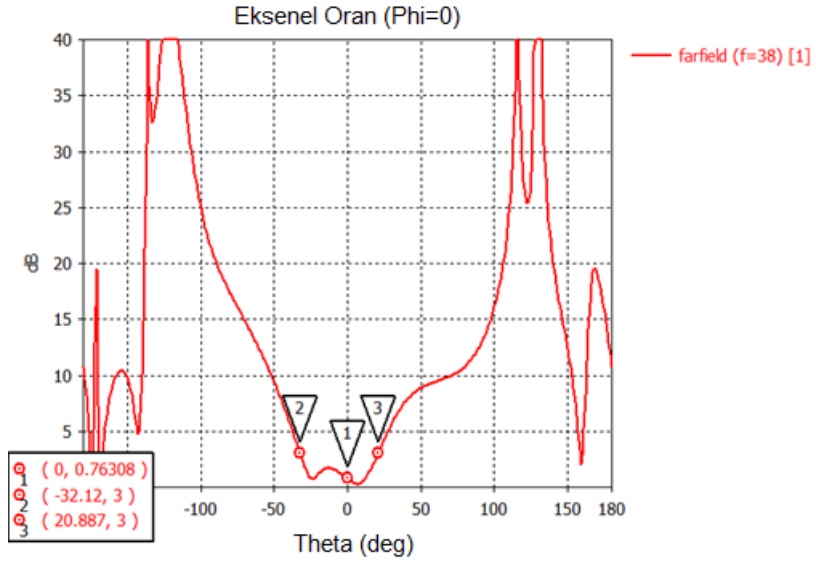
Şekil 3.53. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait Geri Dönüş Kaybı Benzetim Sonucu

38 GHz 4x4 MIMO anten tasarımı benzetim sonuçlarından geri dönüş kaybı incelendiğinde merkez frekansa ait değerin 13.9 dB olduğu görülmektedir. 10 dB bant genişliği ise yaklaşık 2.4 Ghz seviyelerindedir burada tekil anten elemanına göre bant genişliğinin arttığı gözlenmiştir.



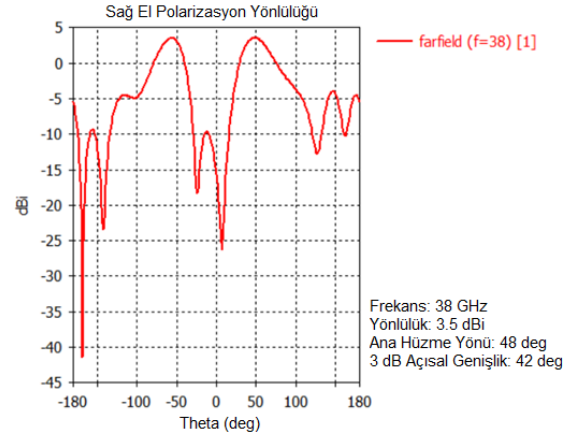
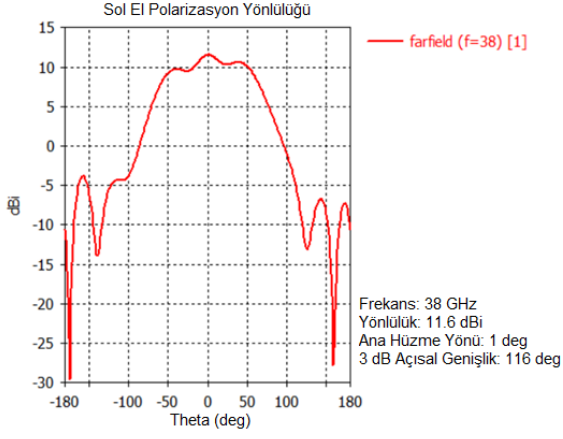
Şekil 3.54. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait Uzak Alan Yönlülük Grafiği

4 elemanlı 38 GHz MIMO anten için yönlülük grafiğine baktığımızda $\theta = 0^\circ$ 'de 11.6 dBi yönlülüğe sahip olduğumuzu görüyoruz. Bu da tekli eleman yönlülüğüne kıyasla yaklaşık 7 dB'lik bir yönlülük artışı sağladığımızı göstermektedir.



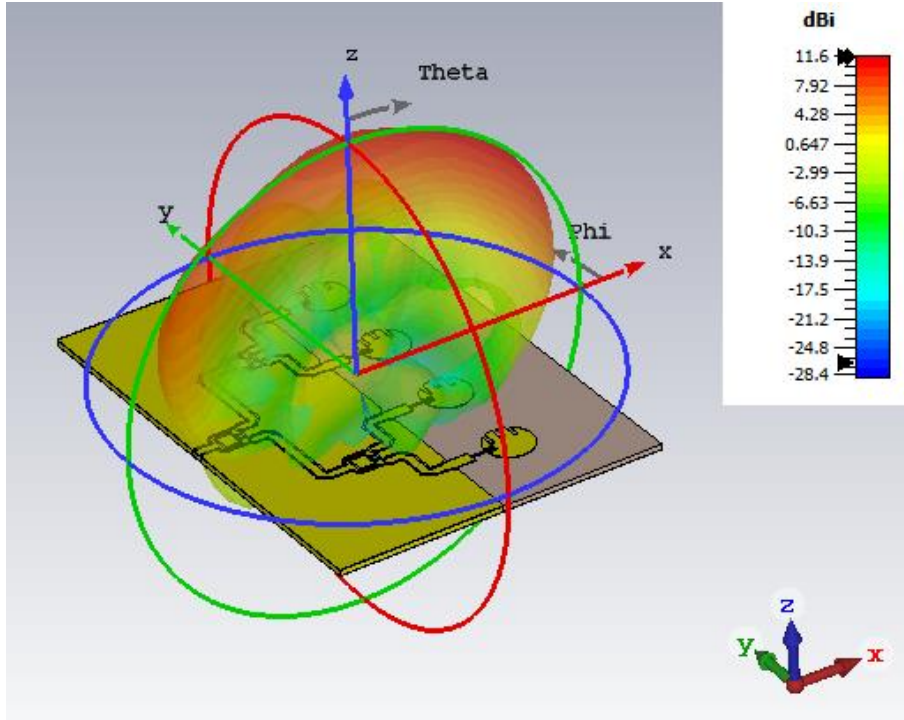
Şekil 3.55. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait Eksenel Oran (Phi=0) Grafiği

4 elemanlı 38 GHz anten dizisine ait eksenel oran grafiği incelendiğinde ise 52° bir dairesel polarizasyon kapsamına sahip olduğumuz gözlenmektedir.



Şekil 3.56. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait Sol ve Sağ El Dairesel Polarizasyon Yönlülük Değerleri

Sol ve sağ el dairesel polarizasyon yönlülük grafiklerinden görebileceğimiz üzere $\theta = 0^\circ$ 'de sol-el dairesel polarizasyona sahip bir dizi anten olduğu görülebilmektedir.



Şekil 3.57. 38 GHz 4x4 MIMO Antene ait 3-Boyutlu Örüntü Gösterimi

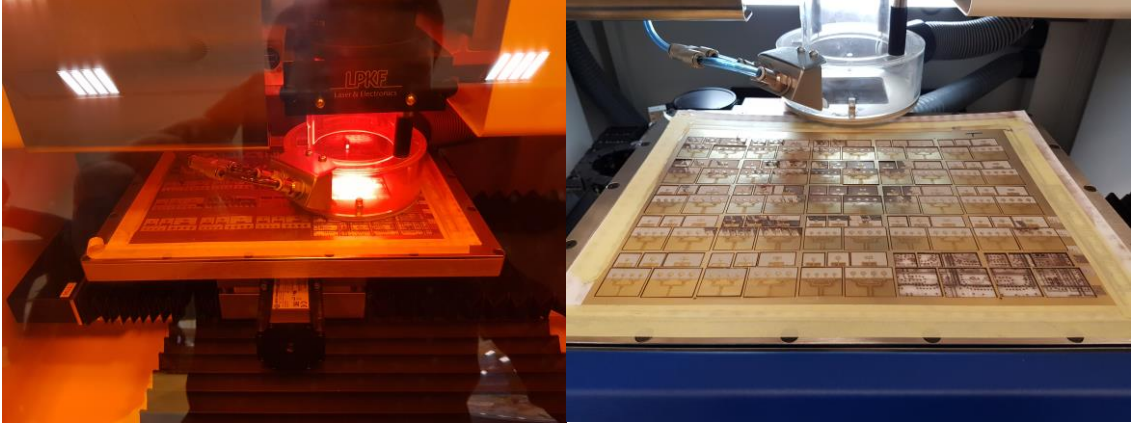
38 GHz 4x4 MIMO Anten için Şekil 3.57'de 3-Boyutlu örüntü üzerinden mutlak yönlülük gösterimi verilmiştir.

4. ÜRETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

5G frekanslarında mobil platformlara uygun olarak tasarlanan yama antenlerin üretim süreci ve geri dönüş kayıplarına ait ölçüm sonuçları bu bölümde incelenecektir.

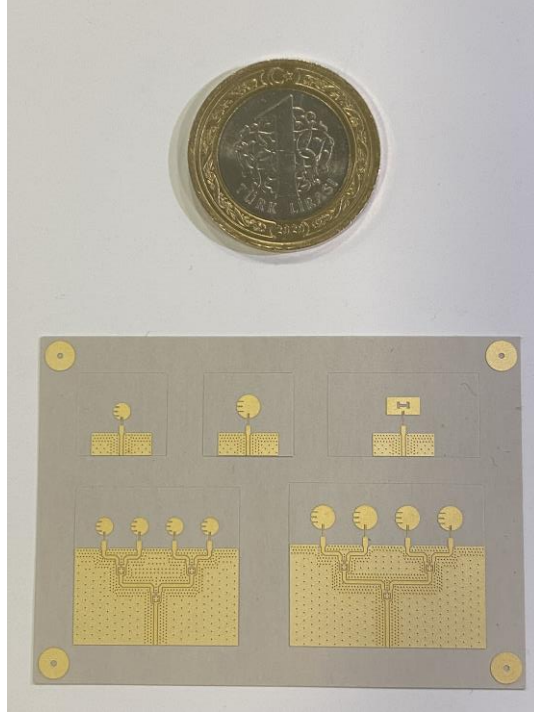
Üretim süreçleri ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi altyapısı kullanılarak iki farklı yöntem ile tamamlanmıştır. Lazerle kazıma tekniği kullanan LPKF cihazı ve kimyasal aşındırma (Litografi) teknikleri ile üretimler gerçekleştirilmiştir. Taban malzemesi olarak tüm anten konfigürasyonları için 10 mil kalınlığa sahip RT/Duroid 6002 kullanılmıştır.

Lazer kazıma öncesi mekanik delgi işlemi ile kartın arka ve ön yüzündeki toprak alanları birbirine bağlayacak delikler açılmıştır. Daha sonra bu deliklerin iletkenlik kazanması için bakır ile delik içi kaplama işlemi uygulanmıştır. Oluşturulan Gerber üretim dosyaları kullanılarak desenler daha önceden delikleri açılmış ve kaplanmış bu kart üzerine işlenmiştir. Lazer kazıma tekniği için LPKF ProtoLaser S4 lazer kazıma makinesi kullanılmıştır.



Şekil 4.1. LPKF Üretim Süreci

Delik açma ve delik içi kaplama yöntemlerinden sonra aynı Gerber üretim dosyaları ile Litografi yani kimyasal aşındırma yöntemi kullanılarak bir parti daha üretilmiştir.



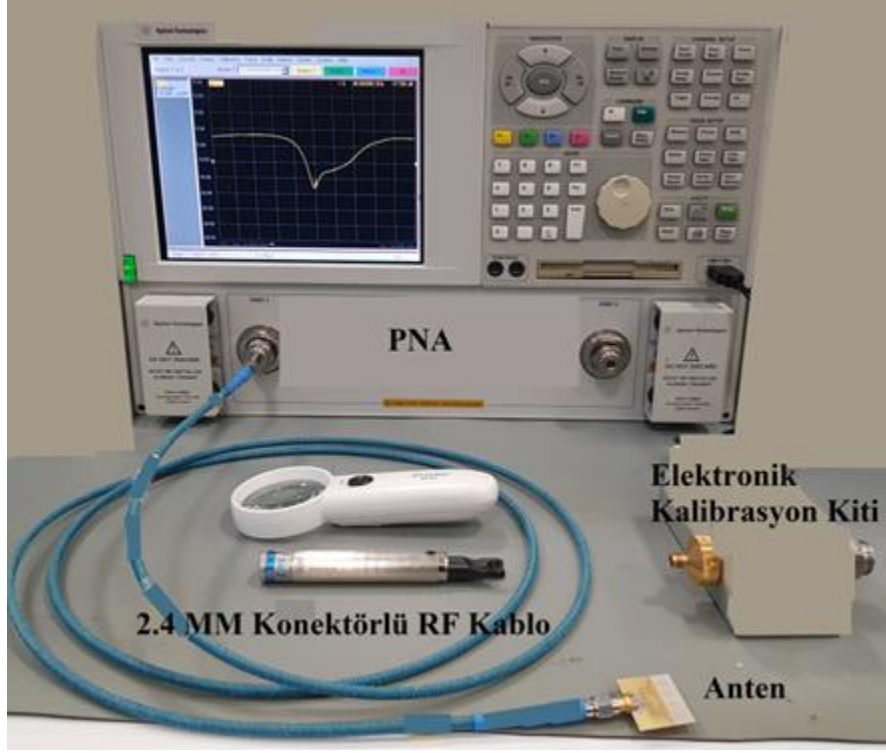
Şekil 4.2. Kimyasal Aşındırma Yöntemi ile Üretilen Antenler

Üretilen antenleri ölçmek için SV Microwave firmasına ait 1621-60008 parça numaralı 2.4 mm Jak tipi bir RF konektörü kullanılmıştır. Bu konektör koaksiyel yapıda baskı devre kartı montajına uygun ve 50 GHz frekansına kadar çalışabilmektedir.



Şekil 4.3. SV Microwave Firmasına ait 2.4 MM Jak RF Konektör

Konektör montajları yapılan antenler Agilent Technologies firmasına ait PNA Network Analizörü ile kurulan Şekil 4.4'teki ölçüm düzeneğinde ölçülmüştür. 25-45 GHz frekans aralığında uygun kalibrasyon ayarları yapıldıktan sonra geri dönüş kaybı (S11) ölçümleri alınmıştır.



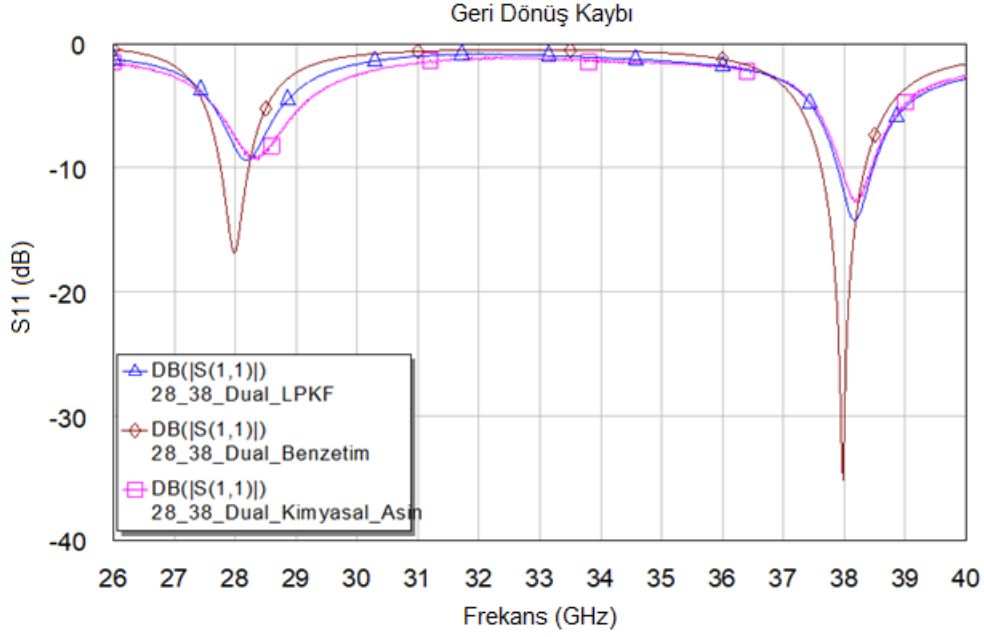
Şekil 4.4. PNA Ölçüm Düzeneği

4.1. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Ölçüm Sonuçları

Her iki frekans bandında da rezonans yapabilen bu yama anten tipine ait üretim ve ölçüm sonuçları bu başlık altında incelenecektir. Şekil 4.5’de LPKF ve kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiş antenlere ait görseller bulunmaktadır.



Şekil 4.5. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen Çift Bantlı Antenler



Şekil 4.6. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm Sonuçları

Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde 28 GHz ve 38 GHz merkez frekanslarının rezonans noktasının bir miktar sağa kaydığı gözlenmektedir. Empedans bant genişliklerinin ise bir miktar arttığı ancak geri dönüş kayıplarının 10 dB'nin üzerindeki değerlere ulaştığı görülmüştür. Her iki üretim tekniği için de frekans kayması ve empedans uyumlama bozuklukları benzerdir. Bu performans kaybının sebebi konektör lehimleme farklılıklarının yüksek frekanslarda oldukça fazla etki etmesinden kaynaklanmaktadır. Çizelge 4.1'de frekans ve karşılık gelen değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. 28 GHz - 38 GHz Çift Bantlı Yama Anten Ölçüm Benzetim Sonuçları

Tanım	Benzetim	LPKF	Kimyasal Aşındırma
Rezonans Frekansları	28 GHz - 38 GHz	28.16 GHz – 38.22 GHz	28.38 GHz – 38.22 GHz
@28 GHz S11 (dB)	-16.8	-8.4	-9.4
@38 GHz S11 (dB)	-35.2	-12.75	-12.8

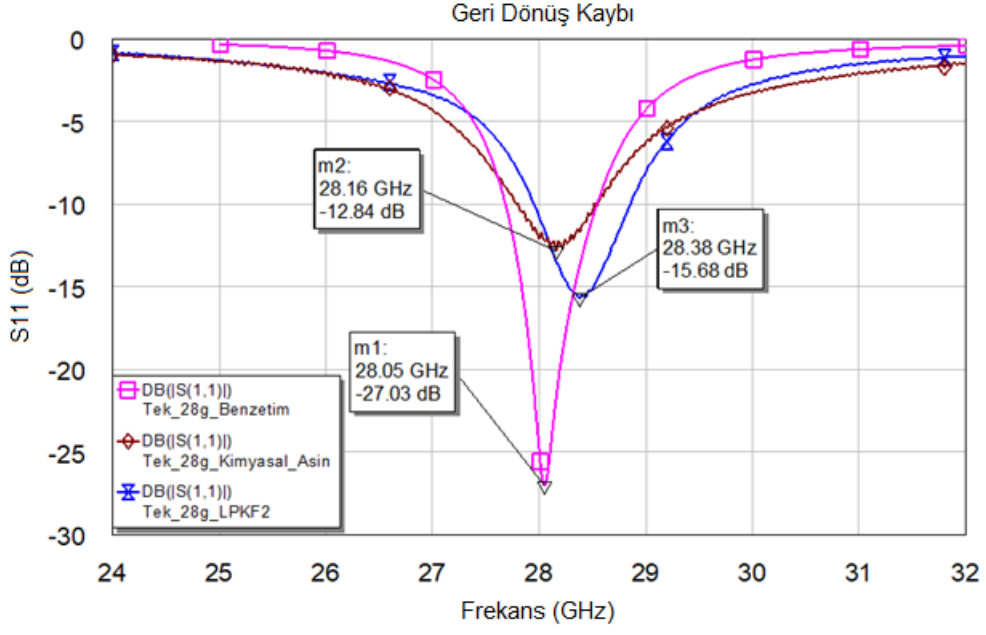
4.2. 28 GHz Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Ölçüm Sonuçları

28 GHz rezonans frekansına sahip tek elemanlı yama antenin geri dönüş kayıplarının ölçümü ve yorumlaması bu bölümde yapılmıştır.



Şekil 4.7. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen 28 GHz Tek Yama Antenler

28 GHz olarak tasarlanan rezonans frekansının üretim sonucunda her iki teknik için de yüksek frekans tarafına kaydığı geri dönüş kaybı ölçümlerinden görülebilmektedir. LPKF ile üretilen antenin rezonans frekansı 28.38 GHz'e, kimyasal aşındırma ile üretilen antenin ise 28.16 GHz'e kaymıştır. LPKF ve kimyasal aşındırma yöntemi için rezonans frekans geri dönüş kayıpları ise sırasıyla -15.68 dB ve -12.84 dB olarak ölçülmüştür. Hedeflenen çalışma frekansı 28 GHz de ise yine sırasıyla 10.84 dB ve 12.09 dB'dir. Bu durumda çalışma frekansımız için hala daha bu antenler kullanılabilir. 10 dB bant genişlikleri ise LPKF üretimi için 700 MHz, kimyasal aşındırma için ise 900 MHz mertebelerindedir. Benzetim sonuçlarında 880 MHz olan bant genişlikleri ile kıyaslandığında ve rezonans frekanslarının kaydığı da düşünüldüğünde makul bir seviyede olduğu kabul edilebilir. Tüm bu ölçüm sonuçları Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.



Şekil 4.8. 28 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Çizelge 4.2. 28 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Tanım	Benzetim	LPKF	Kimyasal Aşındırma
Rezonans Frekansları (GHz)	28.05	28.38	28.16
S11 (dB)	-27	-15.68	-12.84
10 dB Bant Genişliği (MHz)	880	904	716

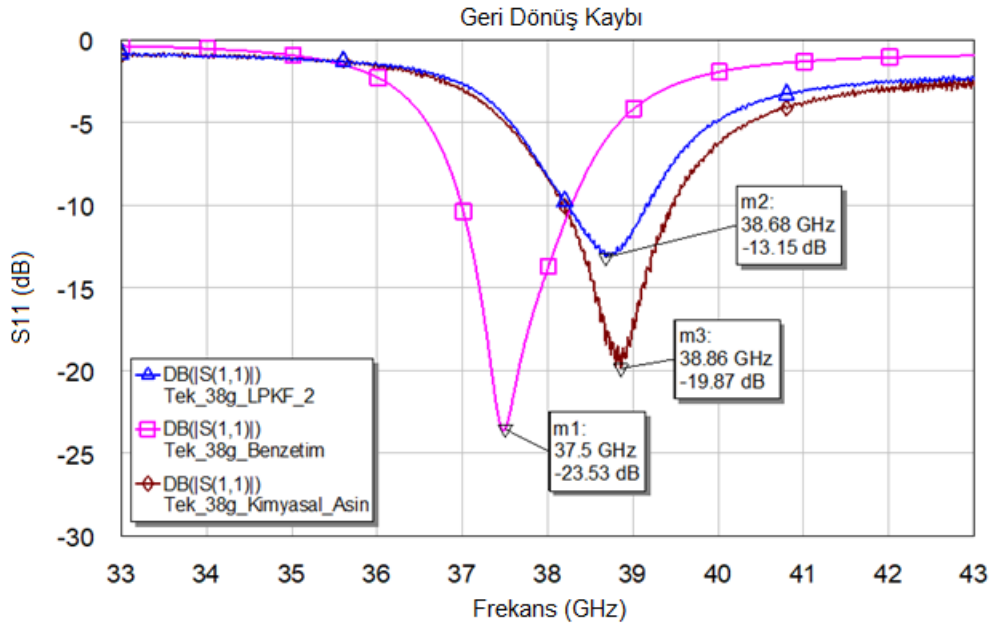
4.3. 38 GHz Dairesel Polarizasyonlu Yama Anten Ölçüm Sonuçları

38 GHz rezonans frekansına sahip tek elemanlı yama antenin geri dönüş kayıplarının ölçümü ve yorumlaması bu bölümde yapılmıştır.



Şekil 4.9. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen 38 GHz Tek Yama Antenler

38 GHz olarak tasarlanan rezonans frekansının üretim sonucunda her iki teknik için de yüksek frekans tarafına kaydığı geri dönüş kaybı ölçümlerinden görülebilmektedir. LPKF ile üretilen antenin rezonans frekansı 38.68 GHz'e, kimyasal aşındırma ile üretilen antenin ise 38.86 GHz'e kaymıştır. LPKF ve kimyasal aşındırma yöntemi için rezonans frekans geri dönüş kayıpları ise sırasıyla -13.15 dB ve -19.87 dB olarak ölçülmüştür. Hedeflenen çalışma frekansı 38 GHz de ise yine sırasıyla 8.3 dB ve 8.4 dB'dir. 10 dB bant genişlikleri ise LPKF üretimi için 940 MHz, kimyasal aşındırma için ise 1260 MHz mertebelerindedir. Benzetim sonuçlarında 1300 MHz olan bant genişlikleri ile kıyaslandığında kimyasal aşındırma tekniğinin daha makul bir bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Ancak her iki antenin de hedeflenen 37.5 - 38.5 GHz bandında kullanımı sınırlı olacaktır. Tüm bu ölçüm sonuçları Çizelge 4.3'de özetlenmiştir.



Şekil 4.10. 38 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Çizelge 4.3. 38 GHz Dairesel Yama Anten Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Tanım	Benzetim	LPKF	Kimyasal Aşındırma
Rezonans Frekansları (GHz)	37.5	38.68	38.86
S11 (dB)	-23.53	-13.15	-19.87
10 dB Bant Genişliği (MHz)	1300	940	1260

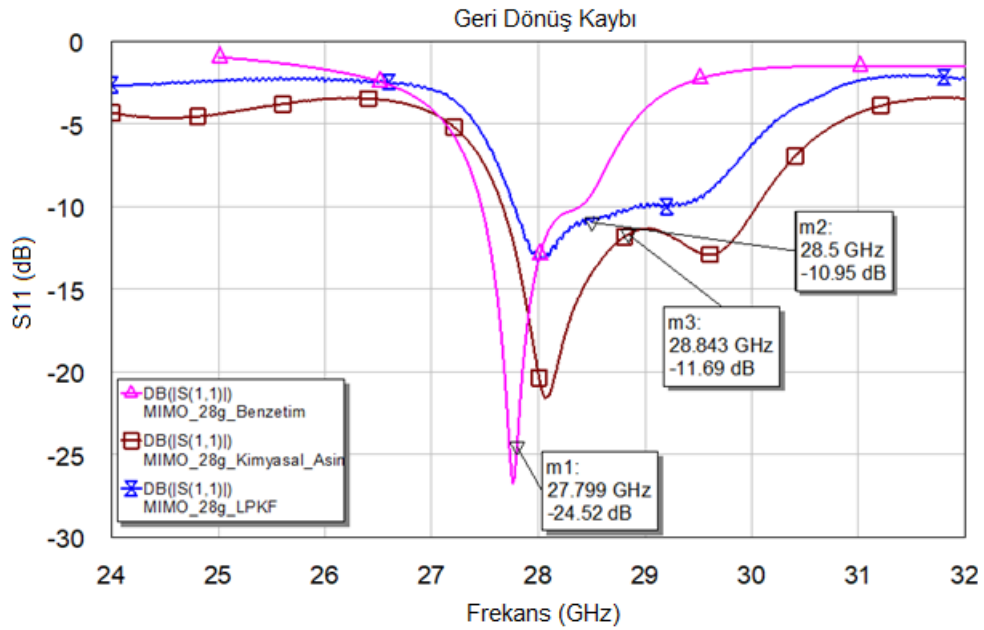
4.4. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Ölçüm Sonuçları

4x4 MIMO tipindeki 28 GHz rezonans frekansına sahip antenin geri dönüş kaybı ölçümleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.11. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen 28 GHz 4x4 MIMO Antenler

Üretilen antenlere ait geri dönüş kayıpları incelendiğinde genel olarak gözükten yüksek frekansa kayma durumu bu antende de gözlenmiştir. Merkez frekans LPKF ve aşındırma yöntemleri için sırasıyla 28.5 GHz ve 28.84 GHz olarak ölçülmüştür. Benzetim ortamında yaklaşık 1050 MHz'lik bir 10 dB bant genişliği değeri görülürken ölçüm sonuçlarında yine sırasıyla 1400 MHz ve 2300 MHz olarak gözlenmiştir. Frekans bandının yüksek olması, üretim toleransları ve konektör lehimleme farklılıkları sebebi, ile bu farklar ortaya çıkmaktadır. Çizelge 4.4'de ölçüm ve benzetim sonuçlarına ait değerler özetlenmiştir.



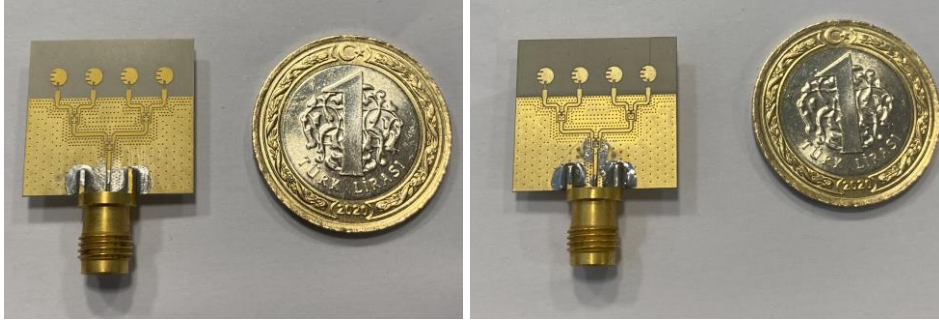
Şekil 4.12. 28 GHz 4x4 MIMO Antenler Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Çizelge 4.4. 28 GHz 4x4 MIMO Antenler Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Tanım	Benzetim	LPKF	Kimyasal Aşındırma
Merkez Frekans (GHz)	27.8	28.5	28.85
S11 (dB)	-24.5	-10.95	-11.69
10 dB Bant Genişliği (MHz)	1050	1400	2300

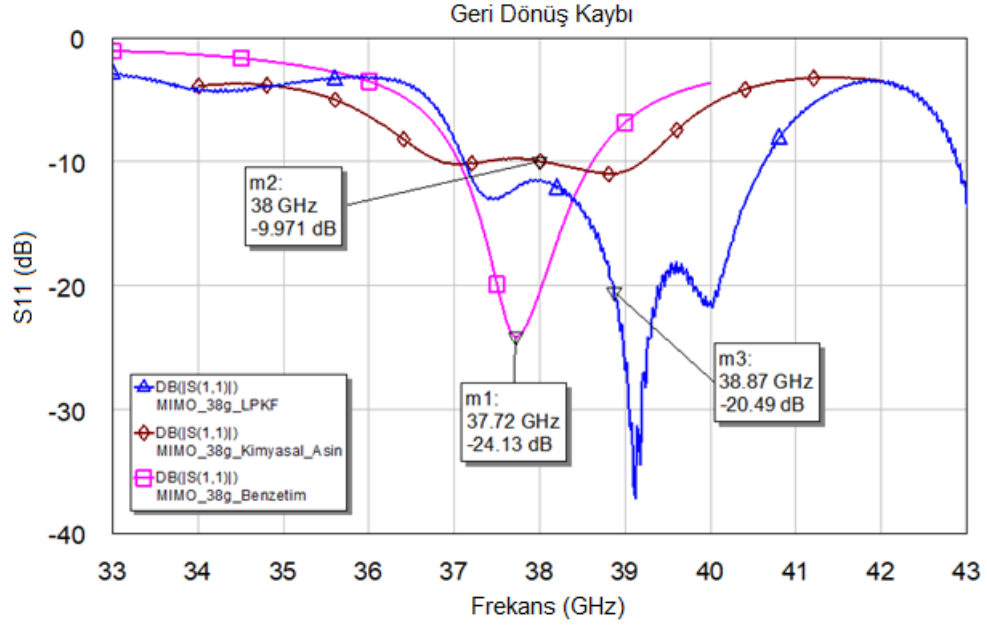
4.5. 38 GHz 4x4 MIMO Anten Ölçüm Sonuçları

4x4 MIMO tipindeki 38 GHz rezonans frekansına sahip antenin geri dönüş kaybı ölçümleri bu bölümde verilmiştir.



Şekil 4.13. Solda Kimyasal Aşındırma, Sağda LPKF ile Üretilen 38 GHz 4x4 MIMO Antenler

Üretilen antenlere ait geri dönüş kayıpları incelendiğinde genel olarak gözüken yüksek frekansa kayma durumu bu antende de gözlenmiştir. Merkez frekans LPKF ve kimyasal aşındırma yöntemleri için sırasıyla 38.68 GHz ve 38.86 GHz olarak ölçülmüştür. Benzetim ortamında yaklaşık 1620 MHz'lik bir 10 dB bant genişliği değeri görülürken ölçüm sonuçlarında yine sırasıyla 3500 MHz ve 2200 MHz olarak gözlenmiştir. Frekans bandının yüksek olması, üretim toleransları ve konektör lehimleme farklılıkları sebebi, ile bu farklar ortaya çıkmaktadır. Çizelge 4.5'de ölçüm ve benzetim sonuçlarına ait değerler özetlenmiştir.



Şekil 4.14. 38 GHz 4x4 MIMO Antenler Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

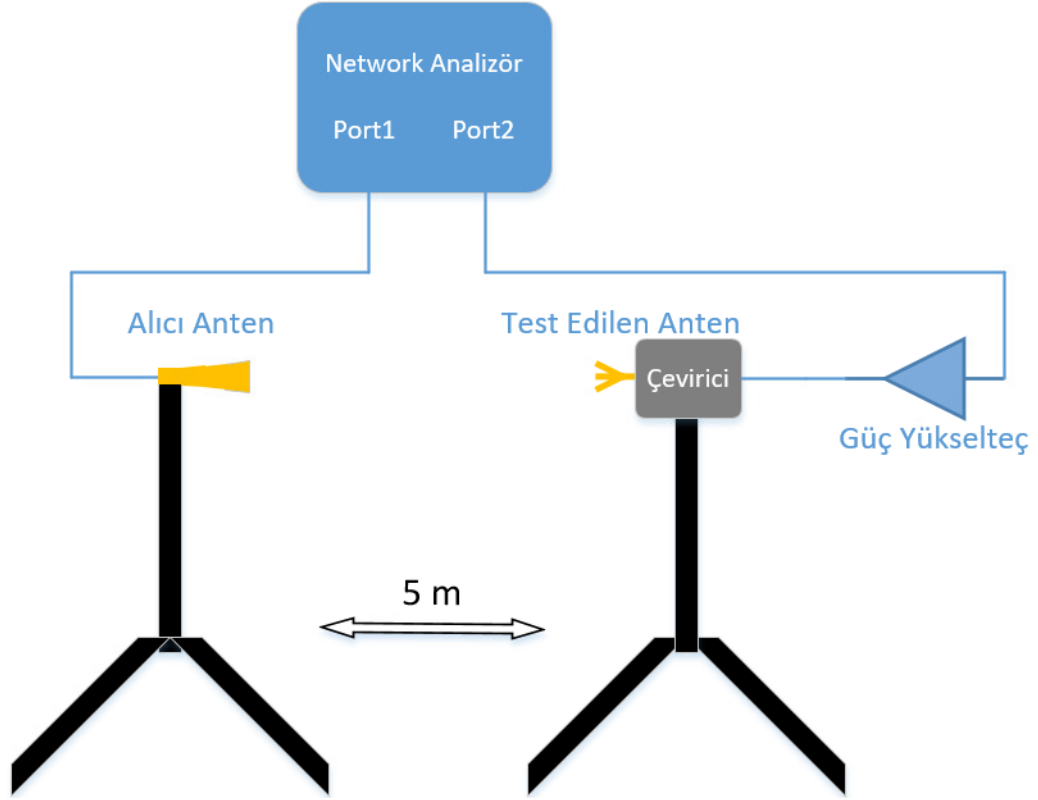
Çizelge 4.5. 38 GHz 4x4 MIMO Antenler Geri Dönüş Kaybı Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Tanım	Benzetim	LPKF	Kimyasal Aşındırma
Merkez Frekans (GHz)	38	38.68	38.86
S11 (dB)	-23.6	-13.15	-19.87
10 dB Bant Genişliği (MHz)	1620	3500	2200

4.6. Anten Örüntüleri Ölçüm Örnekleri

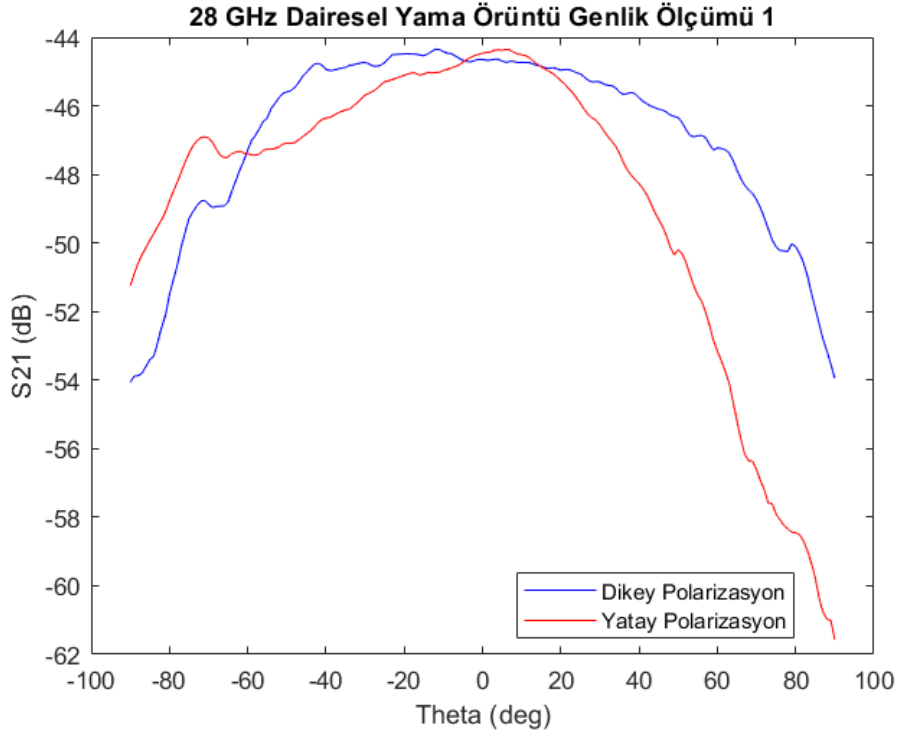
Şekil 4.15’de görülen ölçüm düzeneği anten örüntü ölçümlerinde kullanılmıştır. Ancak Ölçüm düzeneği kabiliyetleri gereği dairesel polarizasyonu doğru bir şekilde ölçebilmek mümkün olmamıştır.

Dairesel polarizasyonu ölçebilmek için yatay ve dikey doğrusal polarizasyonları ölçüp bu ölçüm verilerinden yola çıkarak dairesel polarizasyonun olup olmadığı kontrol edilebilir. Yatay ve dikey doğrusal polarizasyonların alıcı antenin faz merkezi aynı noktada kalacak şekilde 90° döndürülmesi ile ayrı ayrı ölçülmelidir. Yatay ve dikey doğrusal polarizasyonlar için ölçüm düzeneğindeki port 1 ve port 2 arasındaki araya girme kaybı (S21) kaydedilir. Her iki doğrusal polarizasyon verilerinin araya girme kayıplarının genlik seviyeleri aynı olmalı ve fazları arasında 90° bir farkın olması, bize dairesel polarizasyonun oluştuğunu gösterecektir. Ancak çalışılan frekans bantları, örneğin 28 GHz bandı için dalga boyu yaklaşık 1 cm’dir. Alıcı antenin 90° döndürülmesi el ile manuel olarak yapılmaktadır. Bu da her ne kadar hassas bir döndürme yapılsa da dalga boyuna göre kıyaslandığında 1 mm’lik kayma bile fazda 36° hataya yol açmaktadır. Alınan farklı ölçüm setleri karşılaştırıldığında ölçümler arasında tutarlı bir sonuç alınamamıştır. Dairesel polarizasyon ölçümlerinin yapılabilmesi ve antenlere ait örüntülerin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için tamamen otomatik ölçüm düzeneklerine ihtiyaç vardır. Bu da mevcut şartlarda ulaşılabilen bir test düzeneği değildir.

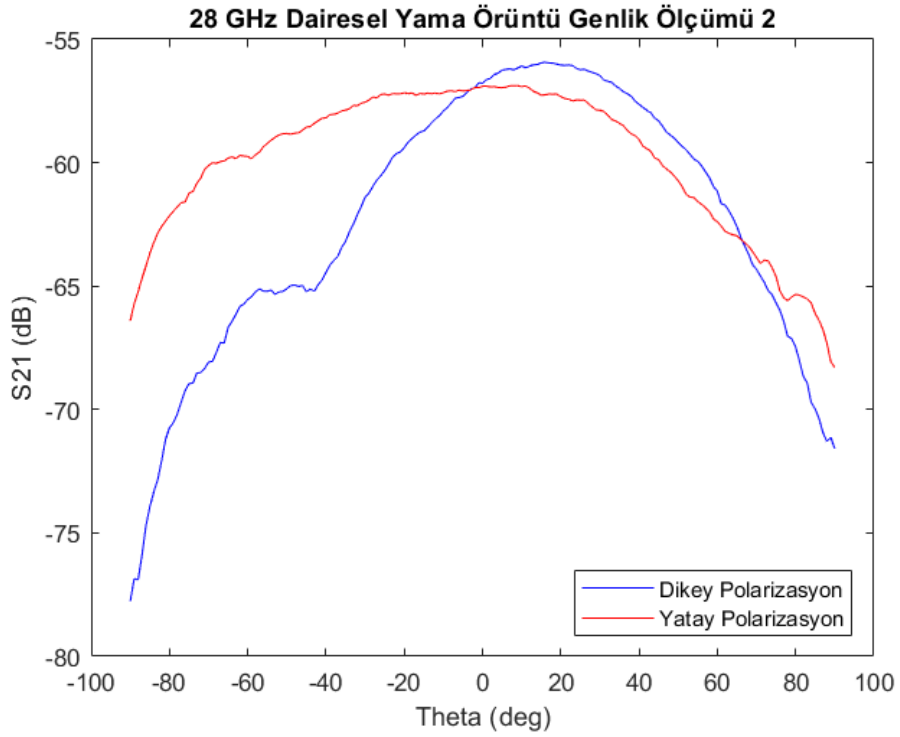


Şekil 4.15. Anten Örüntüsü Ölçüm Düzenegi

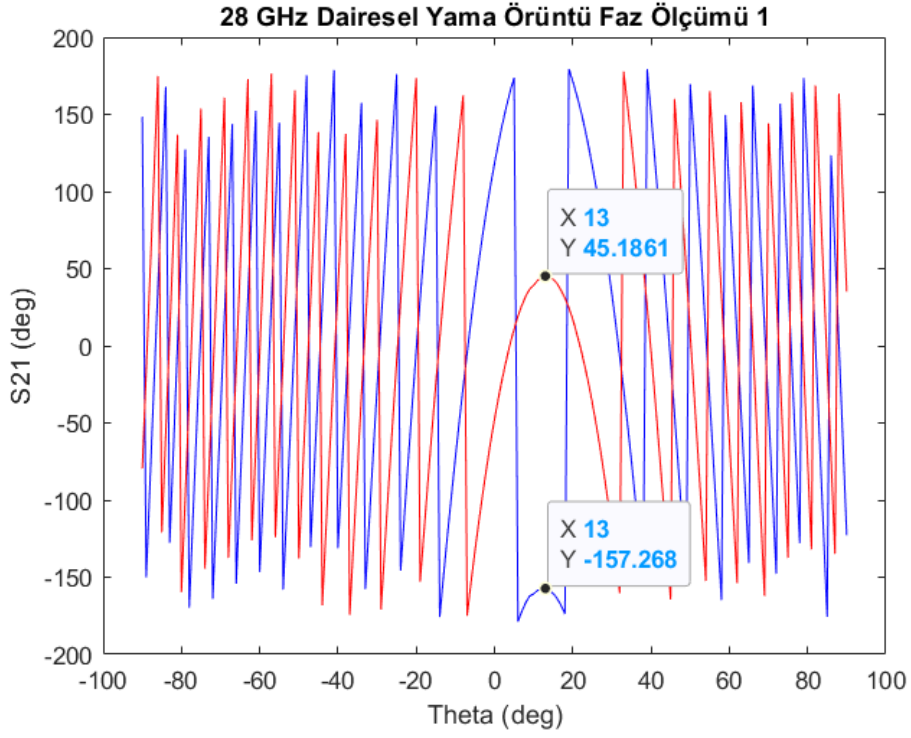
28 GHz dairesel yama antene ait iki farklı örüntü ölçümleri genlikleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de fazları ise Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir. Görüldüğü üzere genlik ve fazlarda her iki ayrı ölçüm sonucunun oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu farka ölçüm düzenegindeki referans antenin dikey ve yatay polarizasyonlar için faz merkezinin konumunun hassas bir şekilde ayarlanamaması sebep olmaktadır. Alınan örüntü ölçümlerindeki araya girme kaybı (S21) ölçüm düzeneginin kontrollü olmamasından dolayı genlik seviyeleri doğru değerleri yansıtmamaktadır.



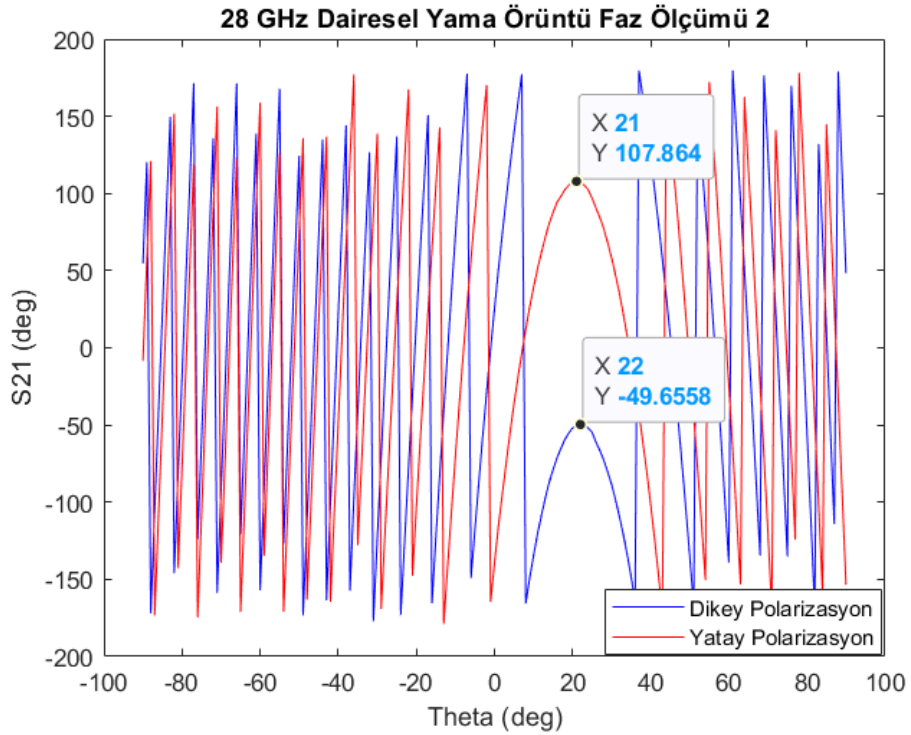
Şekil 4.16. 28 GHz Dairesel Yama Örüntü Genlik Ölçümü 1



Şekil 4.17. 28 GHz Dairesel Yama Örüntü Genlik Ölçümü 2

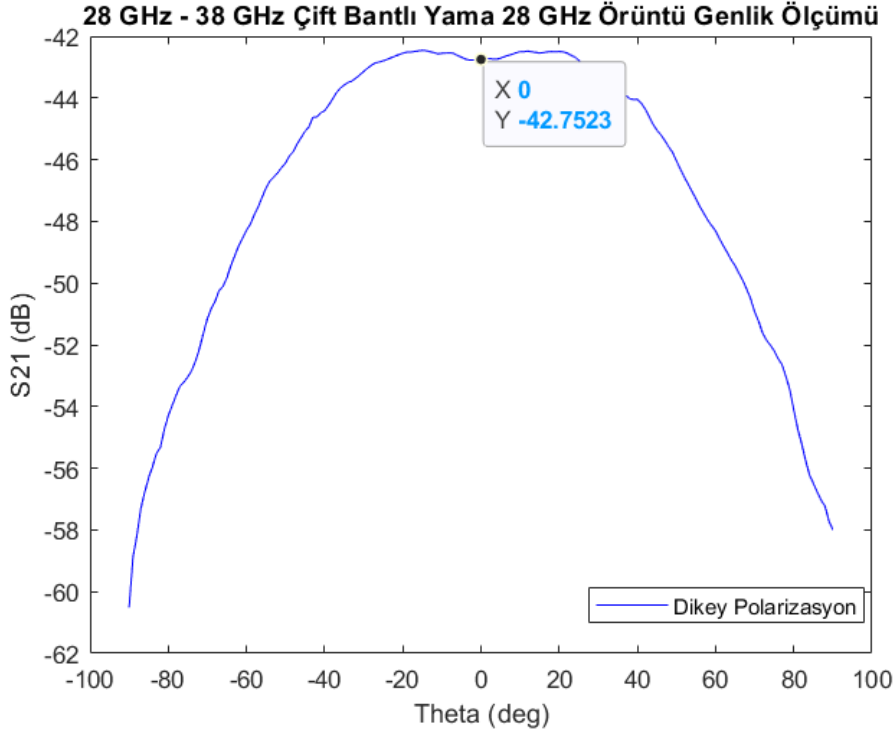


Şekil 4.18. 28 GHz Dairesel Yama Örüntü Faz Ölçümü 1



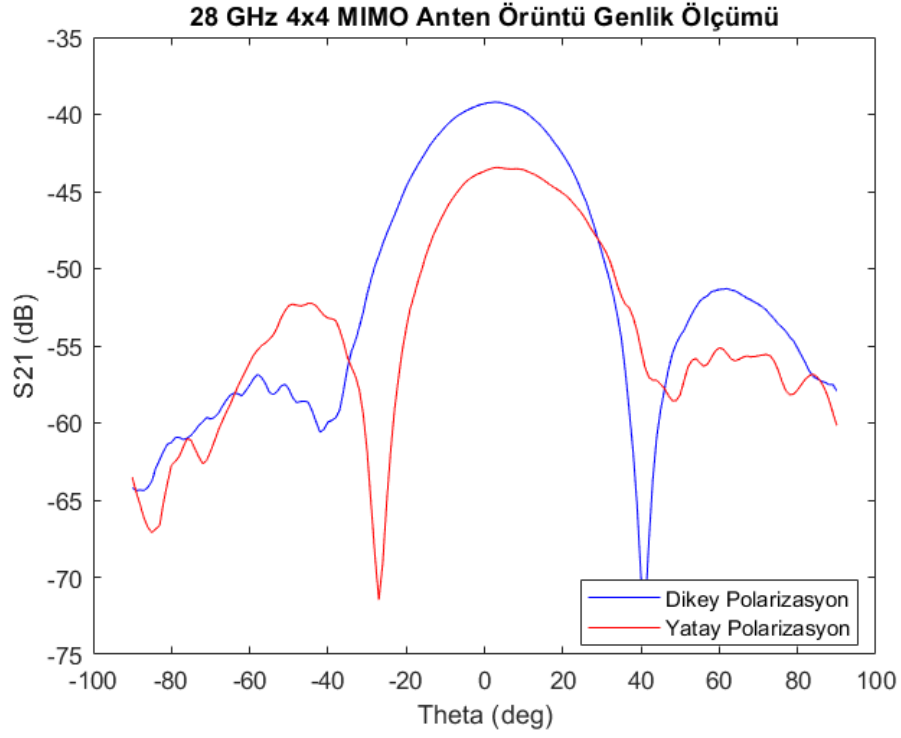
Şekil 4.19. 28 GHz Dairesel Yama Örüntü Faz Ölçümü 2

28 GHz – 38 GHz Çift bantlı Yama anten doğrusal polarizasyona sahip olduğu için dairesel polarizasyondaki zorlukla bu antenin örüntü ölçümünde ortaya çıkmamıştır ve bu antene ait örüntü ölçümü Şekil 4.20’de verilmiştir. Şekil 3.13 ile ölçüm sonucu karşılaştırıldığında 28 GHz’deki dikey polarizasyon örüntülerinin benzerliği görülmektedir. Ölçüm düzeneğinde kullanılan referans antenin çalışma frekansı 38 GHz frekansını kapsamadığından bu merkez frekansına ait ölçümler alınamamıştır.

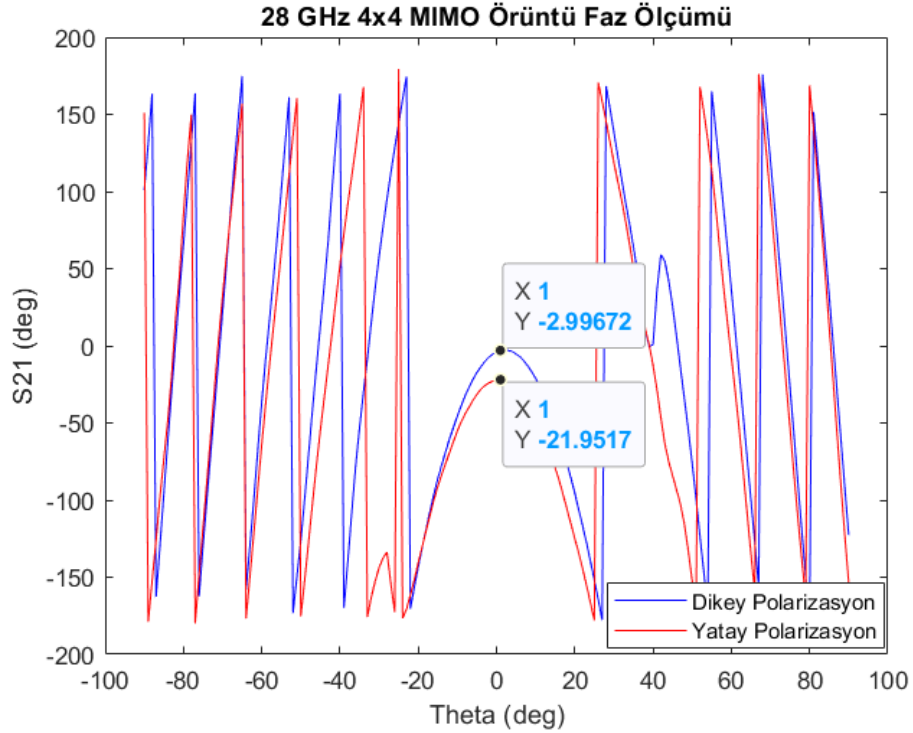


Şekil 4.20. 28 GHz- 38 GHz Çift Bantlı Yama Antene ait 28 GHz’deki Dikey Polarizasyon Örüntü Genlik Ölçümü

28 GHz 4x4 MIMO antene ait genlik ve faz ölçümleri sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir. Ölçüm düzeneğindeki hassas döndürme sorunundan kaynaklı burada da dikey ve yatay polarizasyon genlikleri arasında seviye farkı gözlenmektedir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 ile kıyaslandığında MIMO yapıdan kaynaklanan yönlülük artışı görülebilmektedir.



Şekil 4.21. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Örüntü Genlik Ölçümü



Şekil 4.22. 28 GHz 4x4 MIMO Anten Örüntü Faz Ölçümü

5. SONUÇ

5G teknolojisinde hedeflenen yüksek veri iletim hızları, düşük gecikme değerleri gibi gereksinimleri karşılayabilmek için frekans spektrum verimliliğini artırma ihtiyacı doğmuştur. MIMO anten yapıları ile uzamsal çeşitleme elde ederek bu ihtiyaca çözümler getirilmeye çalışılmaktadır. Bu tez kapsamında 5G mobil uygulamalarına yönelik 28 GHz – 38 GHz çift bantlı yama anten, 28 GHz ve 38 GHz çalışma frekansları için ayrı ayrı tekil ve MIMO yapıda yamalar olmak üzere farklı tasarımlar yapılmış, benzetim ve üretim sonuçları incelenmiştir. Merkez frekanslar etrafında 1 GHz'lik bant genişliğinde 10 dB geri dönüş kaybı hedeflenmiştir. Anten yönlülüklerinin tekil antenler için 5 dBi, MIMO yapılar için ise 10 dBi'dan iyi olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda yapılan tasarımlar ve sonuçları özetlenirse;

- Dikdörtgen yama üzerine oyuk açılarak 28 GHz – 38 GHz çift bantlı yama anten benzetimleri ve parametrik analizleri yapılmıştır. Bu anten her iki merkez frekansında doğrusal polarizasyona sahiptir.
- 28 GHz dairesel yama anten benzetimleri ve parametrik analizleri yapılmıştır. Tekil antene ait polarizasyon sol-el dairesel polarizasyon olarak elde edilmiştir.
- 38 GHz dairesel yama anten benzetimleri ve parametrik analizleri yapılmıştır. Tekil antene ait polarizasyon sol-el dairesel polarizasyon olarak elde edilmiştir.
- MIMO yapıları oluşturmak ve tek noktadan besleyebilmek için 4 kollu RF güç bölücü tasarımı yapılmıştır. RF güç bölücüsü CPWG iletim hattı ile gerçekleştirilmiştir. 28 GHz ve 38 GHz rezonans frekanslarının her ikisinde de çalışabilir şekilde tasarlanmıştır.
- 4 kollu RF güç bölücüsü ve 28 GHz dairesel yama anten kullanılarak 4x4 konfigürasyonuna sahip dizi anten benzetimleri yapılmıştır.
- 4 kollu RF güç bölücüsü ve 38 GHz dairesel yama anten kullanılarak 4x4 konfigürasyonuna sahip dizi anten benzetimleri yapılmıştır.
- Dizi antenlerin yönlülük değerlerinin tekil antenlere göre yaklaşık 6 dB arttığı ve hüzmeye genişliğinin daraldığı benzetim ortamında gözlenmiştir.
- Dizi antenlerinde tekil antenlerin sahip olduğu sol el dairesel polarizasyonu korudukları gözlenmiştir.

Üretim tekniği olarak LPKF ve kimyasal aşındırma teknikleri kullanılmıştır. Karmaşık olmayan tekil anten elemanları için her iki üretim tekniği de yakın sonuçlar vermektedir. Tekil anten elemanları için oluşan farklar üretim toleransları konektör lehimleme etkileri gibi standartlaştırılmayan durumlardan doğmaktadır. MIMO anten yapıları için üretim tekniklerine baktığımızda yapısal karmaşıklık arttığı için üretim teknikleri arasındaki fark ve benzetim sonuçları ile olan farklılaşma artmaktadır. Özellikle yüksek frekans tarafında (38 GHz) bant merkezinin kayması ve bant genişliklerindeki farklılıklar ciddi miktarlardadır. Yine de üretilen antenlerin belirtilen frekans bantları için kullanılabilir düzeyde olduğu ölçüm sonuçları ile gösterilmiştir.

Gelecek uygulamalarda bant merkezlerini üretim yöntemi sonuçları doğrultusunda benzetim ortamında bir miktar kaydırarak rezonans frekanslarının yüksek doğruluk ile elde edilmesi amaçlanabilir. Benzetim ortamındaki konektör modeli geliştirilerek gerçeğe daha yakın sonuçlar alınabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Rappaport, S. Theodore, Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd Edition, New Jersey, 2002.
- [2] AA. Huurdeman, The Worldwide History of Telecommunications. John Wiley & Sons, 2003.
- [3] URL: <https://www.itu.int/osg/spu/imt2000/technology.html>
(Erişim tarihi: 15.03.2022)
- [4] URL: <http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008/en>
(Erişim tarihi: 15.03.2022)
- [5] S. Srikanth, P. Pandian, X. Fernando, Orthogonal Frequency Division Multiple Access in WiMAX and LTE: a Comparison. Communications Magazine, IEEE, Vol.50, pp.153-161, 2012.
- [6] A. Pandey, Practical Microstrip and Printed Antenna Design, Artech House, 2019.
- [7] Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, 5G ve Ötesi Beyaz Kitap.
<https://www.btk.gov.tr/uploads/announcements/5g-ve-otesi-beyaz-kitap/beyaz-kitap-son.pdf> (Erişim tarihi: 27 Ağustos 2022).
- [8] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, A. Ittipiboon, Artech House, 2001.
- [9] R.Bancroft, Microstrip and Printed Antenna Design Second Edition, SciTech Publishing, Inc, 2009.
- [10] C.A. Balanis, Modern Antenna Handbook, John Wiley & Sons, 2008.
- [11] H. Lau, Practical Antenna Design for Wireless Products, Artech House, 2019.
- [12] D. Guha, Y.M.M. Antar, Microstrip and Printed Antennas New Trends, Techniques and Applications, John Wiley & Sons, 2011.
- [13] L.Malviya, A. Parmar, D. Solanki, P. Gupta, P. Malviya, Highly Isolated Inset-Feed 28 Ghz MIMO-Antenna Array For 5G Wireless Application, Third International Conference on Computing and Network Communications, 2020.
- [14] K. Min,S. Park, D. Kim, H. Arai, Microstrip Patch Antenna with Dual Resonance and Dual Polarization, Division of Electrical and Computer Engineering, Yokohama National University.

- [15] P. Ranjan, S. Mishra, Design of Circularly Polarized Rectangular Patch Antenna With Single Cut, Conference on Advances in Communication and Control Systems, 2013.
- [16] R.A. Sainati, CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications, Artech House, 1996.
- [17] R.B. Waterhouse, Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide, Springer Science+Business Media, 2003.
- [18] S. Ferhat, F Arshad, Y. Amin, J. Loo, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences: Wideband Patch Array Antenna Using Superstrate Configuration For Future 5G Applications, 2019.
- [19] N.O. Parchin, M. Shen, G. F. Pedersen, End-Fire Phased Array 5G Antenna Design Using Leaf-Shaped Bow-Tie Elements for 28/38 GHz MIMO Applications, Antennas, Propagation, and Radio Networking (APNet) Section.
- [20] M. E. Shorbagy, R. M. Shubair, M. I. Aihajri , N. K. Mallat, On the Design of Millimetre-Wave Antennas for 5G, IEEE MTT-S International Wireless Symposium, 2021.
- [21] B. Hiçdurmaz, Ö.F. Gümüş, Design and Analysis of 28 GHz Microstrip Patch Antenna For Different Type FR4 Claddings, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, Vol. 24, No. 2, 2019.
- [22] H.M. Marzouk, M.I. Ahmed, A.A. Shaalan, Progress In Electromagnetics Research C: Novel Dual-Band 28/38 GHz MIMO Antennas for 5G Mobile Applications, Vol. 93, 103-117, 2019.
- [23] S.Maci, G. Biffi, IEEE Antennas and Propagation Magazine: Dual Frequency Patch Antenna, January 1998.
- [24] T.Kingsuwannaphong, V.Sittakul, Computers & Electrical Engineering: Compact circularly polarized inset-fed circular microstrip antenna for 5 GHz band, 2017.
- [25] D.M. Pozar, Microwave Engineering Fourth Edition, John Wiley & Sons, 2012.