
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

UZAK MESAFE UYGULAMALARI İÇİN 10 GHZ'DE ÇALIŞABİLEN DİKDÖRTGENSEL MİKROŞERİT DİZİ ANTEN TASARIMI

Ümit DİLBER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2019

Ümit DİLBER tarafından hazırlanan "UZAK MESAFE UYGULAMALARI İÇİN 10 GHZ'DE ÇALIŞABİLEN DİKDÖRTGENSEL MİKROŞERİT DİZİ ANTEN TASARIMI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Nursel AKÇAM
Elekrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Başkan: Doç. Dr. Murat Hüsnü SAZLI
Elekrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Üye: Doç. Dr. Özgür ERTUĞ
Elekrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Tez Savunma Tarihi: 24/05/2019

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

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

Ümit DİLBER

24/05/2019

UZAK MESAFE UYGULAMALARI İÇİN 10 GHZ'DE ÇALIŞABİLEN DİKDÖRTGENSEL MİKROŞERİT DİZİ ANTEN TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ümit DİLBER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Modern çağımızda kablosuz haberleşme gündelik hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. Kablosuz haberleşmenin temel yapı taşı antenlerdir. Antenler farklı tiplerde olup, kullanım amaçlarına göre faklı alanlarda kullanılabilirler. Bu antenlerden biri de mikroşerit yama anten başka bir ifade ile yama antendir. Bu antenler askeri ve ticari bir çok alanda belirli avantajlarından dolayı kullanılabilirler. Yama antenler özellikle uzay araçlarında, uydu ve füze sistemleri için telemetre ve radar uygulamalarında kullanılabilir. Yama antenlerin sahip olduğu dezavantajlarından dolayı uzak mesafe haberleşmelerinde kullanılabilmeleri için birden fazla ve farklı geometrik yapılarda kullanılmaları gerekir. Böylelikle dezavantajları ortadan kaldırılabilir. Bu tez çalışmasında iyi tasarlanmış tek bir yama antenden yola çıkılarak farklı geomerik yapıda birden fazla yama anten tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Ayrıca uzak mesafeler ile haberleşebilecek dizi anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu tezde kullanılan yama anten tipi dikdörtgenseldir. Tasarlanan tüm tek ve dizi yama antenlerin tasarım adımları, anten parametreleri bakımından performansları sunulmuş ve analiz edilmiştir. Tasarlanan antenlerin performansları karşılaştırılmış ve teorik bilgilere uygunluğu incelenmiştir. Tüm antenlerin merkez frekansı X bantta yer alıp 10 GHz'dir. Antenler için kullanılan bağıl geçirgenlik malzeme Rogers RO4232 (tm), bu malzemenin yüksekliği 1 mm ve bağıl geçirgenlik sabiti 3.2'dir. Tüm tasarımlar ve simülasyonlar HFSS 12.1 (Yüksek Frekanslı Yapısal Simülatör) programında tasarlanmış ve elde edilen en iyi antenlerin bu programdan alınan anten parametreleri sonuçları sunulmuştur.

Bilim Kodu	:	90516
Anahtar Kelimeler	:	Yama anten, dizi anten, dikdörtgensel anten, anten tasarımı, HFFS anten tasarımı
Sayfa Adedi	:	113
Danışman	:	Doç. Dr. Nursel AKÇAM

RECTANGULAR MICROSTRIP ARRAY ANTENNA DESIGN AT 10 GHZ FOR LONG DISTANCES APPLICATIONS

(M. Sc. Thesis)

Ümit DİLBER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2019

ABSTRACT

In our modern era, wireless communication has become a part of our daily life. The basic building blocks of wireless communication are antennas. Antennas are of different types and can be used in different areas respect to their intended usage. One of these antennas is the microstrip patch antenna. These antennas can be used in a number of military and commercial areas due to certain advantages. Patch antennas can be used especially in spacecraft, for satellite and missile systems in radar and telemetry applications. Because of the disadvantages of patch antennas, they must be used in multiple and different geometrical structures so that they can be used in long distance communications. Using this method, disadvantages of them can be eliminated. Therefore, using based on well-designed a single patch antenna, antenna array design that is more than one patch antenna in different geometric structure and can communicate with long distance was carried out in this thesis. The patch antenna type used in this thesis is rectangular. The design steps of all single and array patch antennas are presented and analyzed in terms of antenna parameters. The performances of the designed antennas are compared and their suitability to the theoretical knowledge is examined. The operating frequency of all antennas is located in the X band and is 10 GHz. The dielectric material used for the antennas is Rogers RO4232 (tm), the height of this material is 1 mm and the dielectric constant is 3,2. All designs and simulations are designed in the HFSS 12.1 (High Frequency Structural Simulator) program and parameters result of the best desinged antennas are obtained using this program.

Science Code : 90516

Key Words : Patch antenna, array antenna, rectangular antenna, antenna design, HFSS antenna design

Page Number : 113

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Bu çalışmam süresince yapmış olduğu katkılarından ve manevi desteklerinden dolayı danışman hocam Doç. Dr. Nursel AKÇAM'a çok teşekkür ederim. Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen başta annem Emine DİLBER ve babam Yakup DİLBER olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. ANTENLER VE ANTEN PARAMETRELERİ 5

2.1. Giriş 5

2.2. Anten Parametreleri 7

2.2.1. Anten ışıma örüntüsü 8

2.2.2. Anten kazancı 9

2.2.3. Anten yönlülüğü 9

2.2.4. Geri dönüş kaybı 10

2.2.5. Gerilim duran dalga oranı 10

2.2.6. Anten verimliliği 11

2.2.7. Yarım güç hüzme genişliği 12

2.2.8. Bant genişliği 13

3. MİKROŞERİT ANTENLER 15

3.1. Mikroşerit Antenin Karakteristik Yapısı 15

3.2. Mikroşerit Anten Besleme Yöntemleri 17

3.3. Dikdörtgensel Mikroşerit Yama Anten 19

Sayfa

3.4. Mikroşerit Dizi Antenler 20

3.4.1. Mikroşerit dizi antenlerin avantajları 20

3.4.2. Mikroşerit dizi antenlerin ışıma örüntüsü 20

3.4.3. Dizi anten besleme yöntemleri 23

4. MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE SİMÜLASYONU 25

4.1. Tek Yama Anten Tasarımı ve Analizi 26

4.1.1. Tek yama anten tasarımı 26

4.1.2. Tek yama anten simülasyon ve analizi 32

4.2. 2x1 Yama Dizi Anten Tasarımı ve Analizi 51

4.2.1. 2x1 dizi yama anten tasarımı 51

4.2.2. 2x1 dizi yama anten simülasyon ve analizi 54

4.3. 2x2 Yama Dizi Anten Tasarımı ve Analizi 62

4.3.1. 2x2 yama dizi anten tasarımı 63

4.3.2. 2x2 dizi yama anten simülasyon ve analizi 64

4.4. 4x4 Yama Dizi Anten Tasarımı ve Analizi 71

4.4.1. 4x4 dizi yama anten tasarımı 71

4.4.2. 4x4 dizi yama anten simülasyon ve analizi 73

4.5. 8x8 Yama Dizi Anten Tasarımı ve Analizi 80

4.5.1. 8x8 dizi yama anten tasarımı 81

4.5.2. 8x8 dizi yama anten simülasyon ve analizi 85

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 99

KAYNAKLAR 103

EKLER 105

EK-1. Tek yama anten ait simülasyon 11 sonuçları 106

Sayfa

EK-2. 2x1 dizi yama anten ait simülasyon 10 sonuçları 107

EK-3. 2x2 dizi yama anten ait simülasyon 6 sonuçları 108

EK-4. 2x4 dizi yama anten ait simülasyon 8 sonuçları 109

EK-5. Tek noktadan beslemeli 8x8 dizi yama antene ait simülasyon 6 sonuçları 110

EK-6. Farklı noktalardan beslemeli 8x8 dizi yama antene ait simülasyon 3 sonuçları... 111

ÖZGEÇMİŞ 112

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Hesaplanan tek yama anten boyutları 31

Çizelge 4.2. Teorik yama anten üzerinde yapılan değişiklikler 40

Çizelge 4.3. Simülasyon sonuçları 41

Çizelge 4.4. 2x1 dizi yama anten boyutları 53

Çizelge 4.5. 2x1 dizi yama antene ait simülasyon sonuçları 54

Çizelge 4.6. 2x2 dizi yama anten boyutları 64

Çizelge 4.7. 2x2 dizi yama antene ait simülasyon sonuçları 65

Çizelge 4.8. 4x4 dizi yama anten boyutları 72

Çizelge 4.9. 4x4 dizi yama antene ait simülasyon sonuçları 74

Çizelge 4.10. 8x8 dizi yama anten boyutları 83

Çizelge 4.11. 8x8 dizi yama anten boyutları 85

Çizelge 4.12. 8x8 dizi yama anten simülasyon sonuçları 86

Çizelge 4.13. 8x8 dizi yama anten simülasyon sonuçları 92

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Giriş uçlarına sinuzoidal bir gerilim bağlanmış iki telli iletim hattı..... 6

Şekil 2.2. Anten kısmı ve uygulanan sinusoidal gerilimin değişimi 6

Şekil 2.3. Elektrik alan çizgileri..... 6

Şekil 2.4. Zıt yönlü eşit sayıda elektrik alan çizgileri..... 7

Şekil 2.5. Elektrik alan çizgilerinin kapalı eğri oluşturması ve antenden kopması 7

Şekil 2.6. Üç boyutlu koordinatlarda ışıma örüntüsü 8

Şekil 2.7. Anten hüzme açıları..... 12

Şekil 3.1. Mikoşerit yama anten 16

Şekil 3.2. Mikroşerit besleme yöntemi 17

Şekil 3.3. Koaksiyal besleme yöntemi..... 18

Şekil 3.4. Kuplaj açıklık yöntemi 18

Şekil 3.5. Proksimite açıklık yöntemi..... 19

Şekil 3.6. Elektrik alanların saçaklanması 20

Şekil 3.7. Doğrusal dizi..... 21

Şekil 3.8. Dizi anten besleme yöntemleri 23

Şekil 3.9. Konik ve çeyrek dalga boyu dönüşüm yöntemi 24

Şekil 4.1. Tek yama anten şablonu 27

Şekil 4.2. Yama anten fiziksel boyutu 27

Şekil 4.3. TXLINE 2003 arayüzü 30

Şekil 4.4. GaAs seçili 100Ω uzunluk ve genişlik değerleri 31

Şekil 4.5. Teorik tek yama anten 32

Şekil 4.6. Geri dönüş kaybı (S11)-frekans grafiği..... 33

Şekil 4.7. Kazanç-faz grafiği 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. Yönlülük-faz grafiği 35

Şekil 4.9. Işıma örüntüsü-faz grafiği..... 36

Şekil 4.10. Üç boyutlu ışıma örüntüsü..... 38

Şekil 4.11. VSWR-frekans grafiği..... 38

Şekil 4.12. Elde edilen en iyi yama anten şekli 45

Şekil 4.13. S11-frekans grafiği 45

Şekil 4.14. Kazanç-faz grafiği 46

Şekil 4.15. Yönlülük-faz grafiği 47

Şekil 4.16. Işıma örüntüsü-faz grafiği..... 48

Şekil 4.17. Üç boyutlu ışıma örüntüsü..... 49

Şekil 4.18. VSWR-frekans grafiği..... 50

Şekil 4.19. 2x1 dizi yama anten taslağı..... 51

Şekil 4.20. L50 ve W50 değerlerini gösterimi..... 52

Şekil 4.21. En iyi 2x1 dizi yama anten 56

Şekil 4.22. S11-frekans grafiği 57

Şekil 4.23. Kazanç-faz grafiği 58

Şekil 4.24. Yönlülük-faz grafiği 59

Şekil 4.25. Işıma örüntüsü 60

Şekil 4.26. Üç boyutlu ışıma örüntüsü..... 61

Şekil 4.27. VSWR-frekans grafiği..... 62

Şekil 4.28. 2x2 dizi yama anten taslağı..... 63

Şekil 4.29. S11-frekans grafiği 66

Şekil 4.30. Kazanç-faz grafiği 67

Şekil 4.31. Yönlülük-faz grafiği 68

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.32. Işıma örüntüsü 69

Şekil 4.33. Üç boyutlu ışıma örüntüsü 70

Şekil 4.34. VSWR-frekans grafiği 70

Şekil 4.35. 4x4 dizi yama anten taslağı 71

Şekil 4.36. S11-frekans grafiği 75

Şekil 4.37. Kazanç-faz grafiği 76

Şekil 4.38. Yönlülük-faz grafiği 77

Şekil 4.39. Işıma örüntüsü 78

Şekil 4.40. Üç boyutlu ışıma örüntüsü 79

Şekil 4.41. VSWR-frekans grafiği 80

Şekil 4.42. Tek noktadan beslemeli 8x8 dizi yama anten taslağı 82

Şekil 4.43. Farklı noktalardan besleme ile 8x8 dizi yama anten taslağı 84

Şekil 4.44. S11-frekans grafiği 86

Şekil 4.45. Kazanç-faz grafiği 87

Şekil 4.46. Yönlülük-faz grafiği 88

Şekil 4.47. Işıma örüntüsü 89

Şekil 4.48. Üç boyutlu ışıma örüntüsü 90

Şekil 4.49. VSWR-frekans grafiği 91

Şekil 4.50. S11-frekans grafiği 93

Şekil 4.51. Kazanç-faz grafiği 94

Şekil 4.52. Yönlülük-faz grafiği 95

Şekil 4.53. Işıma örüntüsü 96

Şekil 4.54. Üç boyutlu ışıma örüntüsü 97

Şekil 4.55. VSWR-frekans grafiği 98

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
E	Elektrik alan vektörü
H^*	Manyetik alan eşlenik vektörü
S	Poynting vektör
G	Anten kazancı
D	Anten yönlülüğü
IL	Insortion Loss (Anten geri dönüş kaybı)
P_{in}	Giriş gücü
$U(\theta, \varphi)$	Işıma yoğunluğu
U_{max}	Maksimum ışıma yoğunluğunu
U_0	Tüm yönlerde yapılan ortalama ışıma yoğunluğu
θ	Işımanın düşey eksende oluşturduğu açı (Theta)
φ	Işımanın yatay eksende oluşturduğu açı (Phi)
X	Vektörel çarpım
dB	Desibel
GHz	Giga Hertz
W	Watt
m^2	Metrekare
ρ	Yansıma katsayısı
Z_A	Anten empedansı
Z_0	Karakteristik empedansı
e_0	Anten toplam verimliliği
e_r	Anten geri yansıma verimliliği
e_c	Anten iletkenlik verimliliği
e_d	Anten bağıl geçirgenlik verimliliği
e_{cd}	Anten ışıma verimliliği

Simgeler	Açıklamalar
θ_1	Elektrik alan düzlemindeki açı
θ_2	Manyetik alan düzlemindeki açı
λ_0	Dalga boyu
h	Bağıl geçirgenlik malzeme yüksekliği
d	Antenler arası mesafe
θ	Referans nokta ile anten arasındaki açı
β	Antenler arasındaki faz farkı
n	Anten sayısı
Ω	Ohm
f_r	Çalışma frekansı
ε_r	Bağıl geçirgenlik sabiti
ε_0	Malzemenin boşluktaki geçirgenliği
μ_0	Boşluğun geçirgenliği
V_0	Boşluktaki ışık hızı
L	Yama antenin uzunluğu
W	Yama antenin genişliği
L_i	Yama antenin girinti uzunluğu
W_i	Giriş empedans ile boşlukların oluşturduğu genişlik
L_{100}	100Ω besleme empedansının uzunluğu
W_{100}	100Ω besleme empedansının genişliği
W_g	Toprak tabakasının genişliği
L_g	Toprak tabakasının uzunluğu
ε_{reff}	Efektif bağıl geçirgenlik sabiti
L_{eff}	Efektif uzunluk
R_{in}	Giriş empedansı
G_1	Tek yarık kondüktansı
G_{12}	Ortak kondüktanstan gelen kondüktansı
g	Boşluk genişliği
S11	Geri dönüş kaybı
L^1_{100}	100Ω empedans uzunluğu
L^2_{100}	100Ω empedans uzunluğu

Simgeler	Açıklamalar
L^{3}_{100}	100Ω empedans uzunluğu
L^{4}_{100}	100Ω empedans uzunluğu
L^{5}_{100}	100Ω empedans uzunluğu
L^{6}_{100}	100Ω empedans uzunluğu
L^{7}_{100}	100Ω empedans uzunluğu
L^{8}_{100}	100Ω empedans uzunluğu
L^{9}_{100}	100Ω empedans uzunluğu
L_{50}	50Ω empedans uzunluğu
W_{50}	50Ω empedans genişliği
d	Antenler arasındaki boşluk mesafesi
d_1	Tek yama antenler arasında yatay boşluk mesafesi
d_2	Tek yama antenler arasında düşey boşluk mesafesi
log	10 tabanında logaritma

Kısaltmalar	Açıklamalar
DF	Dizi Faktörü
FNBW	First Null Beam Width (Tam Sıfır Hüzme Genişliği)
HPBW	Half Power Beam Width (Yarım Güç Hüzme Genişliği)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio (Gerilim Duran Dalga Oranı)

1. GİRİŞ

Antenler modern dünyanın vazgeçilmezi olan kablosuz haberleşmenin temel taşıdır. Antenler olmadan kablosuz haberleşme düşünülemez. Günümüz dünyasında gelişen teknoloji ile birlikte antenlerin önemi giderek artmaktadır. Bu nedenle farklı ihtiyaçları karşılayacak anten tiplerine ve kaliteli anten parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde çok faklı anten tipleri çok farklı alanlarda, belli amaçlar için kullanılmaktadır. Bu anten tiplerinden biri de yama olarak da adlandırılan mikroşerit antenlerdir [1]. 1970'li yıllarda çok popüler olan yama antenler günümüzde birçok askeri, ticari uygulamalarda kullanılmaktadır [1]. Yüksek performanslı hava ve uzay araçlarında, uydu ve füze sistemleri için radar ve telemetre uygulamalarında bu tip antenler düşük ağırlık, yüksek performans, kolay üretim, düşük maliyet gibi özelliklere sahip olduklarından kullanılabilirler [1-6].

Mikroşerit antenlerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Bunlar düşük kazanç düşük yönlülük, geniş ışıma hüzmesi, düşük verim, zayıf tarama performansı ve dar bant genişliği [1, 7, 8] olarak sıralanabilir. Dizi antenlerin önemli elementlerinden biri olan mikroşerit yama antenler farklı şekillerde ve geometrik dizilimlerde tasarlanarak özellikle uzun mesafeli haberleşme ihtiyacı için birçok uygulamanın gereksinimi olan yüksek kazanç, yüksek yönlülük, yüksek verim, çeşitli ışıma örüntüsü, dar hüzme gibi anten parametrelerine sahip olabilirler [7-9]. Bu bakımdan tek bir yama anten kullanmak yerine dizi yama antenler kullanmak yüksek kalitede haberleşme için daha faydalıdır.

Günümüzde birçok alanda kablosuz yüksek kalitede haberleşme için ihtiyaç duyulan mikroşerit dizi antenler, özellikle uzun mesafe haberleşme için uzay araçlarında, takip radarlarında ve uydu haberleşme sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanarak bu tezin amacını oluşturmaktadır.

Mikroşerit antenler ve mikroşerit dizi antenler ile literatürde yapılan bir çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalara bakıldığında, mikroşerit antenlerin ve bu antenlerin dizi olarak kullanılmalarının amaçları net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmalardan bazılarının konu başlıkları şu şekildedir:

- Radar uygulamaları için dairesel mikroşerit dizi anten tasarımı
- Radar yükseklik ölçer uygulaması için mikroşerit anten tasarımı
- 2.45 GHz'de dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı
- 1x4 yama dizi anten tasarımı
- HFSS kullanarak 13 GHz'de dikdörtgensel yama dizi anten taasarımı
- 2.4 GHz'de kablosuz haberleşme için mikroşerit dizi yama anten tasarımı
- Gsm uygulamaları için faz dizili 4x4 mikroşerit dizi yama anten tasarımı
- X bant uygulamaları için tümleşik besleme yöntemi ile 1x2 mikroşerit dizi anten tasarımı
- Yönlü haberleşme sistemleri için dizi anten tasarımı ve sistemi
- Meteorolojik radarlar için anten sistemleri
- 5G uygulamaları için yama anten tasarımı

Yukarıdaki çalışmalar literatürde karşılaşılan ve bu tez çalışmasının konusuna paralellik gösteren çalışmalardır [5-8, 10, 12, 13, 15, 20-22].

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde anten ile ilgili temel kavramların anlaşılması için anten teorisi hakkında genel bilgiler verilerek anten parametreleri anlatılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde mikroşerit dizi anten yapısı, ışıma örüntüsü ve besleme yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Bu tez çalışmasının dördüncü bölümünde mikroşerit antenler ile oluşturulan tüm tek ve dizi yama antenlerin tasarım adımlarından ve bu tasarımların simülasyon sonuçlarından ayrıntılı bahsedilmiştir. Tasarlanan antenler farklı geometrik yapıdadır. Öncelikle tek bir dikdörtgensel yama anten tasarımı yapılmıştır. En iyi tek yama anten tasarımına ulaşıldıktan sonra, bu anten özelliklerinden yola çıkılarak farklı geometrik yapılarda dizi yama antenler tasarlanmıştır.

Tasarlanan tüm antenlerde kullanılan malzeme Roger RO4232, malzeme kalınlığı 1mm, bağıl geçirgenlik sabiti 3.2, çalışma frekansları 10 GHz olup tüm antenler X bantta çalışmaktadır. Tasarlanan antenler tek yama anten, 2x1, 2x2, 4x4 ve 8x8 dizi yama anten olarak adlandırılmıştır.
Dizi antenler tasarlanırken tümleşik besleme türü olan konik besleme tercih edilmiştir [1]. Bu tercihin sebebi her bir yama antenin genliği yükselteç ya da zayıflatıcı ile kontrol edilebilirken, anten fazlarının da faz kaydırıcı ile kontrol edilebilmesidir [1].

Tek yama anten tasarımları yapılarak bu tasarımlar arasındaki anten parametreleri açısından kıyaslamalar yapılmış olup, en yüksek performanslı tek yama anten seçilmiştir. Aynı yöntem tüm dizi yama anten çeşitleri için uygulanmış ve en iyi performanslı antenler seçilip tezde sonuçları sunulmuştur. Ayrıca seçilen en iyi antenler arasında karşılaştırmalar yapılmış, sonuçların tezde yer alan teorik bilgilere uygunluğu incelenmiş ve sunulmuştur.

Tez çalışmasındaki anten tasarımları için yüksek performanslı bir elektromanyetik alan simülatörü olması, 3 boyutlu modelleme imkanı tanıması, kolay öğrenilebilir bir ara yüze sahip olması ve yüksek doğruluklarda sonuçlar vermesi nedeniyle HFSS 12.1 (Yüksek Frekanslı Yapısal Simülatör) simülasyon programı tercih edilmiştir [10]. Simülasyon programında ulaşılan en iyi sonuçlar teze aktarılmıştır.

Tez çalışmasının son bölümünde tüm tasarım ve simülasyon sonuçlarına ilişkin çıkarımlar, literatüre olan katkılardan ve tez çalışması süresince karşılaşılan zorluklardan bahsedilmiştir.

2. ANTENLER VE ANTEN PARAMETRELERİ

2.1. Giriş

Elektromanyetik dalgalar, hem elektriksel alan ve hem de manyetik alan bileşenlerini içerirler ve bulundukları ortamda yayılarak enerji taşırlar. Antenler elektromanyetik enerjiyi radyo dalgaları formunda iletmek veya almak için kullanılan düzenlerdir. Antenler iletim hatlarının veya dalga klavuzlarının kullanılmasının ekonomik, pratik ve hatta hiç mümkün olmadığı yerlerde (uçak, gemi, uydu haberleşmesi gibi) kullanılır.

Önceki bölümlerde dalga yayılımının (propagasyonun) fiziksel anlamı açıklanmıştır. Maxwell denklemlerinden Faraday Kanunu'nun noktasal biçimdeki ifadesinden zamanla değişen bir manyetik alanın bir elektriksel alan oluşturduğunu gösterir.

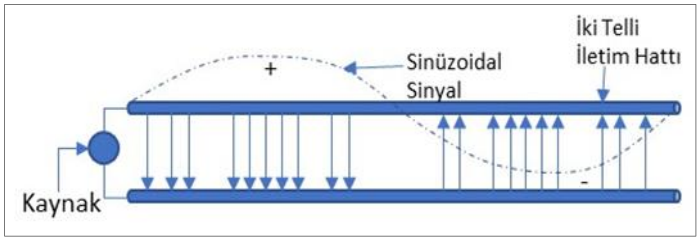
$$\nabla \times \vec{E}(r,t) = -\mu \frac{\partial \vec{H}(r,t)}{\partial t} \tag{2.1}$$

Amper Kanunu'nun noktasal ifadesi de zamanla değişen elektriksel alanın bir manyetik alan oluşturduğunu gösterir.

$$\nabla \times \vec{H}(r,t) = \vec{J}(r,t) + \frac{\partial \vec{E}(r,t)}{\partial t} \tag{2.2}$$

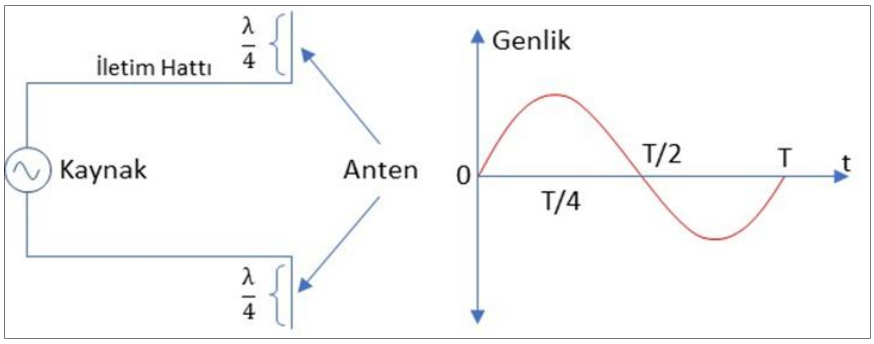
Sonuç olarak zamanla değişen elektrik ve manyetik alanlar birbirlerini üretirler. Bu alanlar bir kaynak, örneğin bir anten tarafından bir kez üretildikten sonra birbirlerini üretmek süretiyle kaynaktan dışarıya doğru yayılırlar.

İki iletkenden oluşan bir iletim hattı gözönüne alındığında, bu hattın antenin beslemesi olarak kullanıldığını düşünelim. Şekil 2.1'deki iletim hattının giriş uçlarına sinüzoidal bir gerilim kaynağı bağlanmış olup, hat boyunca mevcut sinüzoidal gerilimin dağılımına ilişkin elektrik alan çizgileri ve yük dağılımı gösterilmiştir.



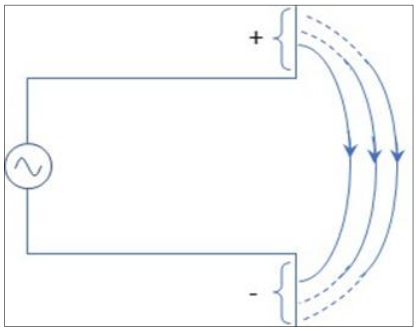
Şekil 2.1. Giriş uçlarına sinüzoidal bir gerilim bağlanmış iki telli iletim hattı

Dikkat edilirse elektrik alan çizgileri her yarım dalgada bir yön değiştirmektedir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi iletim hattının uçları biraz açıldığında, iletim hattı artık bir anten olur.



Şekil 2.2. Anten kısmı ve uygulanan sinusoidal gerilimin değişimi

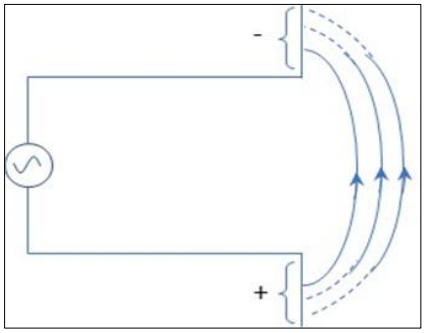
Şekil 2.2'de iletim hattına uygulanan sinyal $t=\frac{T}{4}$ anında maksimum değerine erişir. Bu durumda anten kısmında elektrik alanda maksimum değerine ulaşır (Bkz. Şekil 2.3). $\frac{T}{4}<t<\frac{T}{2}$ zaman aralığında gerilim dalgası iletim hattı boyunca yayılmaya devam eder.



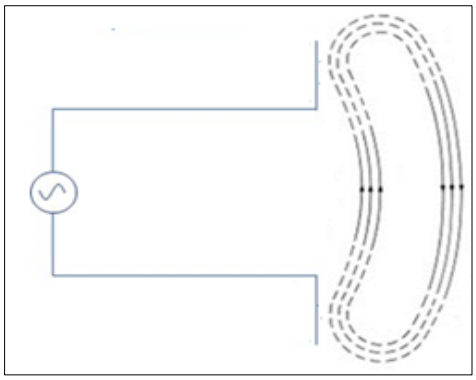
Şekil 2.3. Elektrik alan çizgileri

Bu arada hattın giriş uçlarına uygulanan gerilimde tepe değerinden sıfıra doğru gider. Bu

durum, yani gerilimin azalması, grafiksel olarak zıt yönde ilave bir elektrik alan çizgisi ile temsil edilebilir. Başka bir deyişle anten kısmındaki yük dağılımı zıt polariteli yükler yardımıyla nötralize edilir. $t=\frac{T}{2}$ anında uygulanan gerilim sıfır olur. Bu durumda anten kısmında zıt yönlü eşit sayıda elektrik alan çizgileri oluşur (Bkz. Şekil 2.4). $t=\frac{T}{2}|^{+}$ anında artık elektrik alan çizgileri kapalı eğriler oluşturur ve antenden koparak yayılırlar (Bkz. Şekil 2.5).



Şekil 2.4. Zıt yönlü eşit sayıda elektrik alan çizgileri



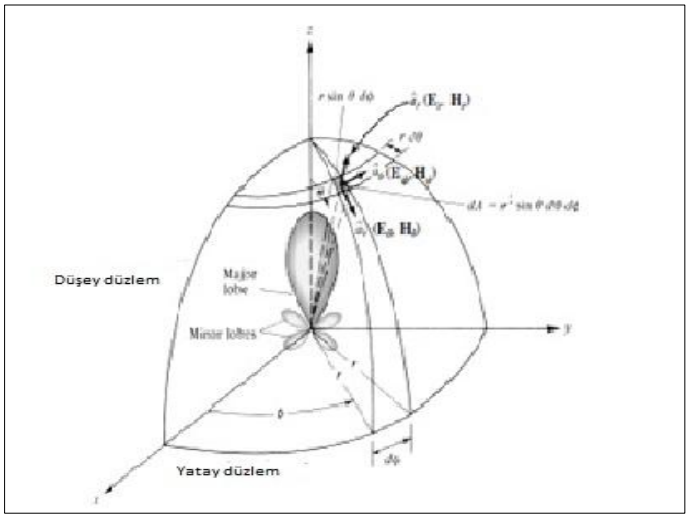
Şekil 2.5. Elektrik alan çizgilerinin kapalı eğri oluşturması ve antenden kopması

2.2. Anten Parametreleri

Anten kalitesini, performansını belirleyebilmek için çeşitli parametrelere ihtiyaç vardır [1]. Bu parametrelerin bazıları anten performansını belirlemek için gerekli iken, bazıları ise gerekli değildir [1].

2.2.1. Anten ışıma örüntüsü

Bir antenin ışıma örüntüsü 3 boyutlu koordinatların bir fonksiyonu olarak ışıma özelliklerinin grafiksel gösterimi ya da matematiksel ifadesi olarak tanımlanır [1]. Bu tez çalışmasında olduğu gibi çoğu durumda ışıma örüntüsü uzak alan bölgeleri için hesaplanır ve uzak alan yaklaşımında düzlemsel koordinatlarda temsil edilirler [1, 11].



Şekil 2.6. Üç boyutlu koordinatlarda ışıma örüntüsü

Şekil 2.6'da 3 boyutlu uzaysal koordinatlarda temsil edilen bir ışıma örüntüsü örneği yer almaktadır [1].

Güç akı yoğunluğu, ışıma şiddeti, alan kuvveti, yönlülük, dalgaların ilerleme yönü ki Poynting vektörü olarak adlandırılır, faz ışıma örüntüsünün barındırdığı özelliklerdir. [1, 11].

Bir antenin ışınladığı güç Poynting vektör ile ifade edilir. Poynting vektör (S), elektrik ve manyetik alan vektörlerinin vektörel çarpımı ile elde edilir [11]. Eş. 2.3'de E elektrik alan vektörü, H^* manyetik alan eşlenik vektörüdür.

$$\vec{S}=\vec{E}\times\vec{H}^* \qquad {}^{W}/_{m^2} \tag{2.3}$$

2.2.2. Anten kazancı

Anten performansını belirleyen faydalı parametrelerden bir diğeri de anten kazancıdır [1]. Anten kazancı, antenin giriş gücünü belirli bir yönde yayabilme kabiliyetidir [1, 11]. Bir başka ifade ile elde edilen ışıma yoğunluğunun giriş gücüne oranıdır. Eşitlik 2.4'te yer almaktadır [1].

$$G= 4\pi \frac{U(\theta,\varphi)}{P_{in}} \tag{2.4}$$

Burada G anten kazancını, P_{in} giriş gücünü, $U(\theta, \varphi)$ ışıma yoğunluğu, θ ışımanın düşey eksende oluşturduğu açıyı ve φ ışımanın yatay eksende oluşturduğu açıyı ifade eder. Burada verilen ifade kayıpsız, her yöne eş ışıma yapan (izotropik anten) ve giriş gücünün elde edilen güce eşit olduğu antenin kazanç ifadesidir ve referans anten kazancı olarak ifade edilir [1]. Tüm anten kazançları bu referans anten kazancına göre ifade edilir. Ayrıca bir antenin kazancı maksimum ışıma yönündeki kazancıdır [1]. Yani her yöne eş ışıma yapamayan antenlerin kazancı, hangi yönde maksimum ışıma yapmış ise o yöndeki kazancına bakılarak belirlenir.

Anten kazancı doğrudan güç yoğunluğu ile ilişkili olduğu için anten performansını belirlemede çok önemli bir parametredir. Bu nedenle bu tez çalışmasında tasarlanan tüm antenlerde anten kazancı belirleyici bir faktör olarak görülmüştür.

2.2.3. Anten yönlülüğü

Bir antenin ışıma yoğunluğunun, tüm yönlerdeki ortalama ışıma yoğunluğuna oranı o antenin yönlülüğünü ifade eder [1]. Tıpkı anten kazancında olduğu gibi referans anten baz alınarak, maksimum yönlülük antenin yönlülüğünü belirler. Anten yönlülüğü Eş. 2.5'te verilmiştir [11].

$$D= \frac{U_{max}}{U_0} \tag{2.5}$$

Eş. 2.5'te D anten yönlülüğünü, U_{max} maksimum ışıma yoğunluğunu, U_0 ise tüm yönlerde

yapılan ortalama ışıma yoğunluğunu ifade eder. Tıpkı anten kazancı gibi anten yönlülüğü de özellikle yönlü antenlerin performansını belirlemek için önemli bir parametredir.

2.2.4. Geri dönüş kaybı

Bir antende yansıyan gücün giden güce oranı o antenin geri dönüş kaybını verir [11]. Bir anten sisteminde iletim hattı ile anten arasındaki maksimum güç aktarımı için iletim hattının karakteristik empedansı antenin empedansına iyi uyumlandırılmalıdır [11]. Eğer empedans uyumlanması yeterli seviyede olmaz ise geri dönüş kaybı artar ki bu anten performansını oldukça düşürür.

$$IL= -10 \log |\rho|^2 \tag{2.6}$$

Eş. 2.6'da IL geri dönüş kaybını, $|\rho|^2$ ifadesi geri yansıyan gücün giden güce oranını ifade eder [11]. ρ ise yansıma katsayısıdır.

Bir antende geriş dönüş kaybının yüksek olması istenen bir durum değildir. Antenin performansını etkileyen önemli parametrelerden biri olan geri dönüş kaybı bu tez çalışmasında tasarlanan tüm antenler için belirleyici faktörlerden biri olmuştur.

2.2.5. Gerilim duran dalga oranı

Bir anten sisteminde anten ışıma yaparken kaynaktan giden ve antenden yansıyan dalgalar olmak üzere iki dalga oluşur [11]. Bu dalgaların maksimum ve minumum gerilim genliklerin durumuna göre duran dalga meydana gelebilir [11]. Bu durumun sebebi ise iletim hattındaki empedans uyumlanmasının iyi olmayışıdır.

$$VSWR= \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \tag{2.7}$$

Eş. 2.7'de VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), gerilim duran dalga oranını ifade eder [11]. Bu oran ρ ile ifade edilen dalga yasıma katsayısının bir fonksiyonudur.

$$\rho = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \tag{2.8}$$

Burada Z_A anten empedansını, Z_0 karakteristik empedansı ifade eder. Eş. 2.8'den de anlaşılacağı üzere iletim hattındaki anten empedansı ve iletim hattının karakteristik empedansı arasındaki ilişki empedans uyumlaması için önemlidir. Dolayısıyla bu uyumlamanın iyi olmaması öncelikle yansıma katsayısını dolayısıyla VSWR değerini etkiler, yani giden ve yansıyan dalgalar birbirini sönümlendirir. Bu durum Eş. 2.6'dan da anlaşılacağı gibi geri dönüş kaybını da olumsuz etkiler. Böylelikle gerilim duran dalga oranı ile geri dönüş kaybı arasındaki yakın ilişki de ortaya konulmuş olur. Bu bakımdan tasarımı yapılan tüm antenlerin VSWR parametresi geri dönüş kaybı açısından önemli bilgiler verir.

2.2.6. Anten verimliliği

Toplam anten verimliliği iletim hattı ve antendeki kayıplar ile değerlendirilmelidir [1]. Yani iletim hattın ile anten arasındaki empedans uyumlamasının hangi seviyede olduğu, anten kısmındaki iletkenlik ve bağıl geçirgenlik verimliliği antenin verimliliğini belirleyen faktörlerdir [1].

$$e_0 = e_r e_c e_d \tag{2.9}$$

Eş. 2.9'da e_0 toplam verimliliğini, e_r geri yansıma verimliliğini, e_c iletkenlik verimliliğini, e_d bağıl geçirgenlik verimliliğini ifade etmektedir [1].

$$e_r = 1 - |\rho|^2 \tag{2.10}$$

Eş. 2.10'da geri yansıma verimliliğinin, geri yansıma katsayısı olan ρ ile olan ilişkisi ifade edilmiştir [1].

$$e_{cd} = e_c e_d \tag{2.11}$$

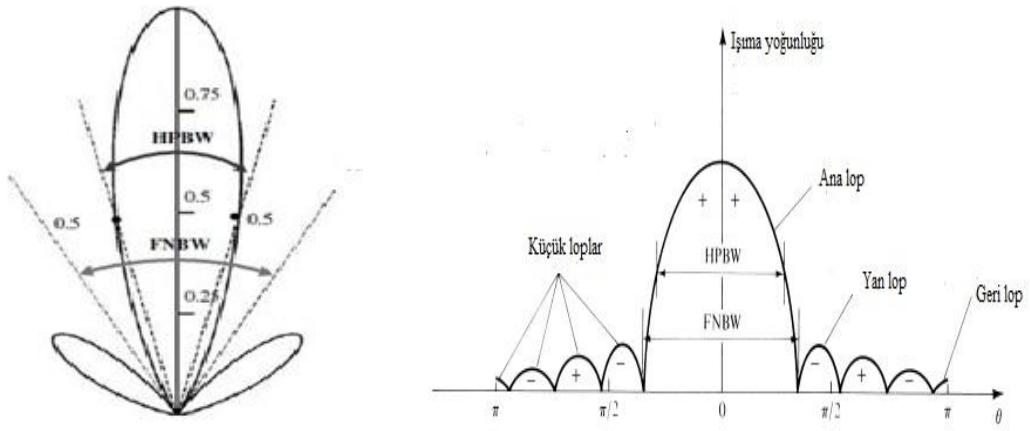
Eş. 2.11'de e_{cd} anten ışıma verimliliği ifade eder [1]. e_c ve e_d değerlerini hesaplamak oldukça zordur ancak deneysel olarak hesaplamak mümkündür [1]. Işıma verimliliğinin

iletkenlik verimliliği ve bağıl geçirgenlik verimliliği ile doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Işıma verimliliği anten kazancı ve yönlülüğü ile ilişki kurmak için kullanılır [1].

Anten verimliliği için kullanılan eşitlikler incelendiğinde anten verimliliğinin iletim hattı, bu hattaki empedans uyumlaması dolayısı ile geri dönüş kaybı, anten kazancı ve yönlülüğü ile yakın ilişkide olduğu görülür.

2.2.7. Yarım güç hüzme genişliği

Yarım güç hüzme genişliği (Half Power Beam Width-HPBW) ışıma örüntüsü ile ilişkili bir parametredir. Elektrik-Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'nün (Institute of Electrical and Electronics Engineering-IEEE) tanımına göre maksimum hüzmeyi içeren yöndeki düzlemde, ışıma yoğunluğunu içeren iki yöndeki doğru arasında kalan açının yarısıdır. Bu da yarım güçteki hüzme açısıdır ve yaygın olarak hüzme açısı olarak kullanılır [1]. Bu tez içerisinde bu tanımdan faydalanılarak tasarlanan tüm antenlerin hüzme açıları belirlenmiştir. Diğer hüzme açısı da ilk sıfır hüzme genişliğidir (First Null Beam Width-FNBW). Yani maksimum ışıma şiddetinin olduğu hüzmedeki ışıma şiddetinin sıfır olduğu noktalar arasında kalan açıdır. Şekil 2.7'de hüzme açıları gösterilmiştir [1].



(a) (b)

Şekil 2.7. Anten hüzme açıları

Hüzme açısı bir antenin çözünürlük kapasitesini belirlemek için kullanılır [1]. Işıma yapan

komşu iki kaynak ya da radar hedeflerini ayırt etmek için önemli bir faktördür [1].

Şekil 2.7 (a) ve (b)'den anlaşılacağı gibi hüzme açısını belirlerken ışıma örüntüsünde maksimum ışıma yoğunluğunun olduğu hüzmedeki açılara bakılır. Bu nedenle hüzme açısı ışıma örüntüsü, ışıma örüntüsünün barındırdığı ışıma yoğunluğu ve ışıma yoğunluğunu etkileyen faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Bu bakımdan ışıma yoğunluğuyla ilişkili olan anten yönlülüğü ve kazancı ile de hüzme açısının ilişkili olduğu anlaşılır.

Hüzme açıları kullanılarak anten yönlülüğü tahmin edilebilir [11].

$$D= \frac{4\pi}{\theta_1\ \theta_2} \tag{2.12}$$

Eş. 2.12'de θ_1 ve θ_2 açıları sırasıyla elektrik alan düzlemindeki ve manyetik alan düzlemindeki açıları ifade eder [11]. Eşitlikten görüleceği üzere hüzme açıları büyüdükçe anten yönlülüğü azalır, küçüldükçe artar. Yönlülüğün azalması, o yöndeki ışıma yoğunluğunun az olduğunun göstergesidir. Işıma yoğunluğunun az olduğu yerde anten kazancı da azalır. Bu bakımdan dar hüzme açısına sahip antenlerde o hüzmedeki ışıma yoğunluğu fazla olacağından yönlülük ve kazanç da fazla olur.

Bu tez çalışmasında tasarlanan antenleri belirleyici diğer bir anten parametresi de hüzme açısı olmuştur. Özellikle uzak mesafe uygulamaları için tasarlanan antenler için dar hüzme açılarına sahip olmaları ışıma yoğunluğunu artıracağından büyük önem taşır.

2.2.8. Bant genişliği

Bir antenin bant genişliği o antenin merkez frekansı etrafındaki performansının sınırlarını belirleyen frekans genişliğidir [1]. Yani bir antenin merkez frekansı etrafındaki ışıma örüntüsünün, hüzme açısının, kazancının, yönlülüğünün, ışıma verimliliğinin kabul edilebilir değerler içerisinde olduğunu gösterir.

Geniş bantlı antenlerde bant genişliği kabul edilebilir frekans aralığında en yüksek ve en düşük frekansların oranını ifade eder [1]. Örneğin: 5:1 bant genişliği en yüksek frekansın en düşük frekanstan 5 kat daha büyük olduğunu gösterir. Öte yandan dar bant genişliğine

sahip antenlerde bant genişliği, merkez frekansı etrafındaki en yüksek ve en düşük frekanslar arasındaki farkın yüzde şeklinde ifadesidir [1]. Örneğin: %10 bant genişliği en yüksek ve en düşük çalışılabilir frekansların farkının, merkez frekansının bant genişliğinin %10'unu ifade etmektedir.

Bu tez çalışmasında merkez frekans 10 GHz seçildiğinden tasarlanan tüm antenlerin 10 GHz etrafında tüm parametrelerinin çalışabilirliği, kalitesi kontrol edilmiş ve sunulmuştur. Özellikle askeri alanda birçok haberleşme uygulamasının olduğu düşünüldüğünde dar bant daha iyi bir sinyal edinimi için istenebilir [1]. Çok büyük bant genişlikleri güvenlik açısından sorun teşkil edebilir. Farklı amaçlar için geniş banta sahip antenler de tercih edilebilir. Çok dar bant genişliği de ışıma edinimi için sorun yaratabileceğinden anten tasarımlarında bu da dikkate alınır.

3. MİKROŞERİT ANTENLER

Mekanik aksamı kısıtlı, yüksek performans gösteren hava araçları, uzay araçları ve uydularda; mobil radyo ve kablosuz haberleşmelerde düşük profilli antenlere ihtiyaç duyulabilir [1, 12-14]. Mikroşerit antenler tüm bu uygulamalarda bu ihtiyacı giderebilir. Çünkü bu antenler düşük profilli, düzlemsel ya da düzlemsel olmayan yüzeyler için uyumlu, basit, ucuz ve kolay üretilebilirdir [5, 10, 13-18]. Ayrıca özel yama şeklinde tasarlanarak çalışma frekansı, ışıma örüntüsü, polarizasyon ve empedans bakımından çok çeşitlilik gösterebilirler [1].

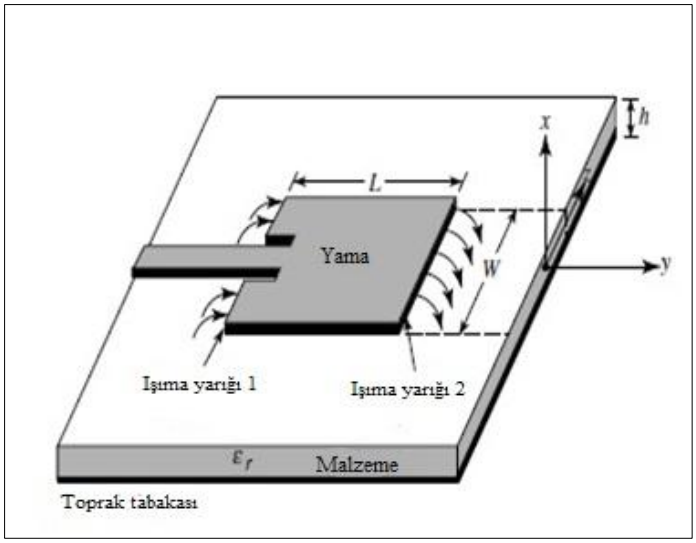
Mikroşerit antenlerin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar; düşük verimlilik, düşük güç, zayıf tarama performansı, düşük kazanç, dar bant genişliğidir [1, 12, 15]. Dezavantajmış gibi görünen dar bant genişliği bazı uygulamalar için özellikle askeri güvenlik sistemlerinde avantaj olabilir [1, 12]. Bant genişliğinin fazla olması istendiğinde bazı yöntemler ile bant genişliği arttırılabilir. Ana kaplama malzemesinin yüksekliği arttırılarak bant genişliği arttırılabilir [1]. Bu durumda yüzey dalgaları meydana gelmez ise antenin verimi de arttırılabilir. Eğer yüzey dalgaları oluşur ise bu ışıma gücü kaybına sebep olur [1]. Yüzey dalgalarının oluşmasının diğer dezavantajları ise anten ışıma örüntüsünün ve polarizasyonun karakteristiğini olumsuz etkilemesidir.

Mikroşerit antenin bu tez çalışmasında özellikle seçilmesinin sebebi yukarıda bahsedilen birçok uygulamada, temel özelliklerinden dolayı kullanılabilmesi ve farklı şekillerde ve geometrik yapılarda kullanıldıklarında istenen anten parametreleri sağlayabilmesidir. Özellikle dizi yama anten olarak kullanıldıklarında tek bir yama anten için dezavantajmış gibi görünen kazanç, yönlülük, verim, hüzme genişliği gibi temel parametrelerin yüksek kalitede olduğu görülür [12, 17].

3.1. Mikroşerit Antenin Karakteristik Yapısı

Yama antenler çok ince olup toprak tabakanın üzerine metalik bir yama yerleştirilerek oluşturulurlar. Bu antenlerin kalınlığı çalışma frekansındaki dalga boyundan çok çok küçük olur [1]. Yama ile toprak tabaka bir bağıl geçirgen malzeme ile ayrılır. Şekil 3.1'de tipik bir mikroşerit yama anten gösterilmiştir [1]. Bu bağıl geçirgen malzemenin kalınlığı

yine çalışma frekansındaki dalga boyundan çok küçük olup, sınırları genellikle $0.003\lambda_0$ ile $0.05\lambda_0$ arasındadır. Bağıl geçirgen malzeme yüksekliği olan h, bu koşul göz önüne alınarak tasarlanır [1, 10]. Dikdörtgensel mikroşerit yama antenlerin uzunluğu L genellikle, $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ sınırları içerisinde yer alır [1, 10, 13].



Şekil 3.1. Mikroşerit yama anten

Mikroşerit anten tasarımı için çok çeşitli malzemeler tercih edilebilir. Bu malzemelerin bağıl geçirgenlik sabiti ε_r genellikle, $2.2 \leq \varepsilon_r \leq 12$ aralığında yer alır [1, 6, 10, 13]. İyi bir anten tasarımı için kalın malzemeler seçilir. Kalın malzemelerin bağıl geçirgenlik sabiti belirtilen aralıkta düşük tarafa yakındır [1]. Bağıl geçirgenlik sabitinin düşük seçilmesinin avantajı antenin verimi ve bant genişliğini arttırmasıdır. Dezavantajı ise ışıma alanlarında kayıplar meydana getirmesidir [1]. İnce malzeme, yüksek bağıl geçirgenlik sabiti ile kullanıldığında istenmeyen ışımaları ve etkileşimleri ortadan kaldırmak mümkündür. Bu durum mikrodalga devre tasarımı için istenen bir durumdur; ancak bu durum daha küçük anten boyutlarını doğurur. Böylelikle daha büyük anten kayıpları, daha düşük verim ve daha dar bant genişliğine sebep olur [1].

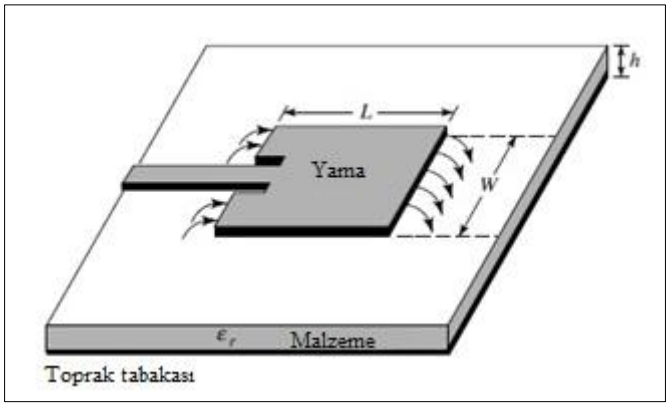
Mikşerit antenler çok farklı şekillerde olabilirler. Dikdörtgensel, dairesel, üçgensel, dipol ve kare şekillerinde tasarlanabilirler.

3.2. Mikroşerit Anten Besleme Yöntemleri

Mikroşerit antenlerin farklı yöntemler ile beslemeleri yapılabilir. Bunlardan yaygın olarak kullanılanları; mikroşerit hat, koaksiyal, kuplaj açıklık, proksimite açıklık besleme yöntemleridir [1].

Mikroşerit besleme yöntemi

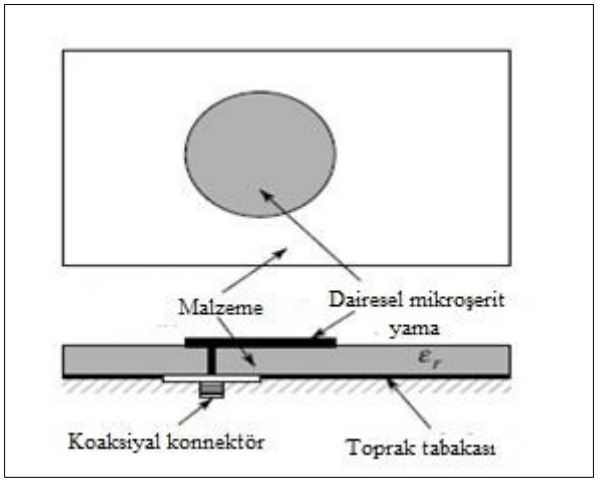
Bu besleme yöntemi, üretim ve modelleme açısından oldukça kolay bir yöntemdir. Ayrıca empedans uyumlaması, girinti pozisyonun ayarlanabilir olmasıyla kolayca kontrol edilebilir. Dezavantajları ise malzemenin kalınlığı arttıkça besleme noktasında istenmeyen ışımaların artması, bant genişliğinin dar olmasıdır [1]. Bant genişliğinin dar olması dezavantajmış gibi görünse de bu tez çalışmasının amacına uygundur. Dar bant genişliği ve kolay modellenebilir olduğundan bu tezde tasarlanan tüm antenlerde bu yöntem tercih edilmiştir. Şekil 3.2'de mikroşerit besleme yöntemi gösterilmiştir [1].



Şekil 3.2. Mikroşerit besleme yöntemi

Koaksiyal besleme yöntemi

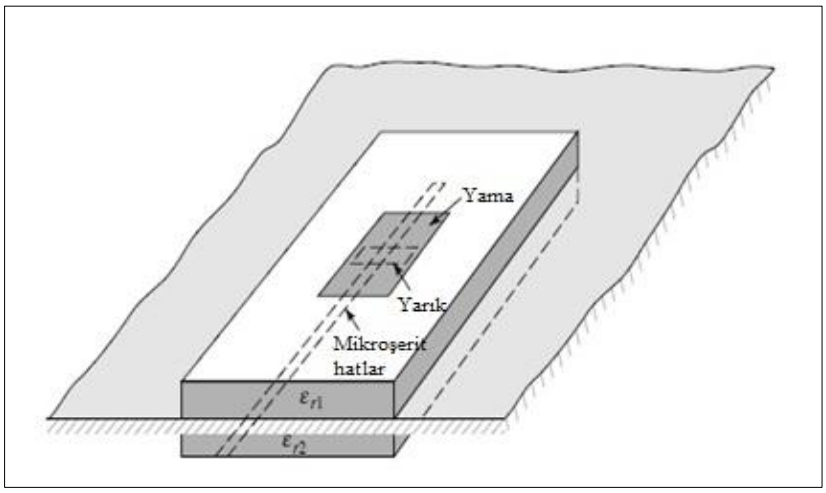
Bu yöntemde yama antene içten bir koaksiyal konnektör bağlı olup, dış konnektör de toprak tabakasına bağlıdır. Bu besleme yönteminde de tıpkı mikroşerit besleme yöntemi gibi kolay üretilebilir ve empedans uyumlaması rahatlıkla yapılabilir. Ayrıca istenmeyen ışımalar bu yöntemde daha az oluşur. Ancak bu yöntemin modellemesi özellikle kalın malzemeler ($h>0.02\ \lambda_0$) için oldukça zordur. Bu nedenle bu tez çalışmasında bu besleme yöntemi tercih edilmemiştir. Şekil 3.3'te koaksiyal besleme yöntemi gösterilmiştir [1].



Şekil 3.3. Koaksiyal besleme yöntemi

Kuplaj açıklı yöntemi

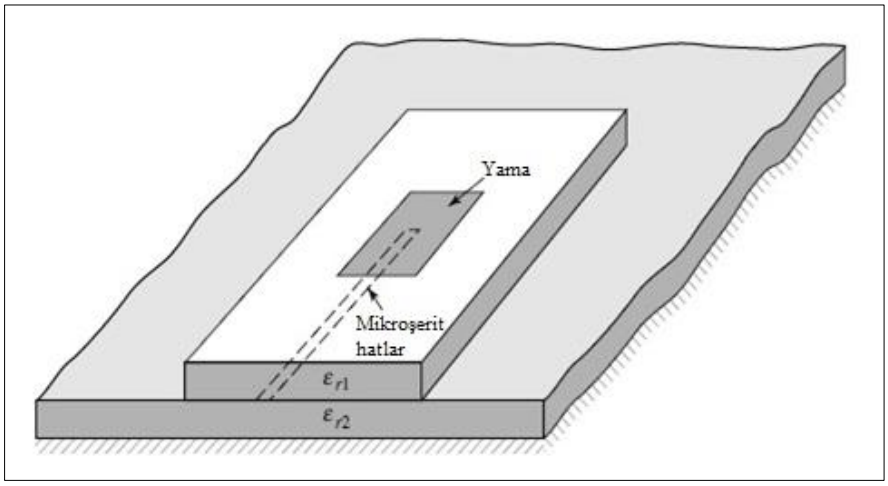
Bu yöntem yaygın olarak kullanılan bu dört yöntem içerisinde üretilmesi en zor yöntemdir [1]. Modellemesi kolay ve istenmeyen ışımalar bu yöntemle ayarlanabilir. İki bağıl geçirgen malzeme ve toprak tabakasından oluşan bu yöntemde, alt tabakada yüksek bağıl geçirgen malzeme, üst tabakada kalın ve yüksek bağıl geçirgen malzeme kullanılır [1]. Bu yöntem üretim açısından zor bir yöntem olduğundan bu tezde tercih edilmemiştir. Ayrıca iki farklı bağıl geçirgenlik malzemenin kullanılıyor olması, malzeme seçimini ve tasarım sonuçlarını etkileyip, fazlaca tasarım ihtiyacı doğuracağından tercih sebebi olmamıştır. Şekil 3.4'te bu yöntem gösterilmiştir [1].



Şekil 3.4. Kuplaj açıklık yöntemi

Proksimite açıklık yöntemi

Bu dört yöntem arasında en büyük bant genişliğine sahip olan bu besleme çeşidi, modellemesi kolay ve istenmeyen ışımaların düşüklüğü bakımından avantajlıdır [1]. Ancak üretimi zordur. Geniş bant aralığı ve üretim zorluğu nedeniyle bu tez çalışmasında tasarımı yapılan antenler için proksimite açıklık yöntemi tercih edilmemiştir (Şekil 3.5).



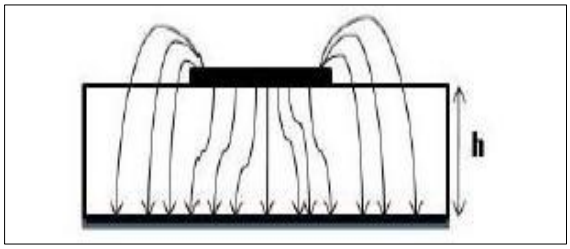
Şekil 3.5. Proksimite açıklık yöntemi

3.3. Dikdörtgensel Mikroşerit Yama Anten

Dikdörtgensel yama anten en yaygın kullanılan mikroşerit anten biçimidir. Özellikle ince bağıl geçirgenliğe sahip malzemeler için tercih edilirler. Genişliği W, yüksekliği h, uzunluğu L ile temsil edilen dikdörtgensel yama antende iki ayrı açıklık bulunur.

Boyutları sınırlı olan bu antenlerde sınır bölgelerinde elektrik alan çizgilerinde saçaklanma etkisi görülür [1]. Bu durum Şekil 3.6'da gösterilmiştir [16]. Bu etki x-y düzleminde L/h oranına ve bağıl geçirgenlik sabitine bağlı olarak değişir. L/h >>1 olması durumunda saçaklanma etkisi azalır; ancak bu da çalışma frekansını etkiler [1]. Aynı durum W/h oranı için de geçerlidir. W/h>>1 ve ε_r>>1 olması durumunda saçaklanma etkisi anten boyutlarının olduğundan daha büyük olmasına sebep olur [1]. Bu durumda elektromanyetik dalgaların bir kısmı malzeme içerisinde hareket ederken, bir kısmı hava içerisinde hareket eder. Bu nedenle boyutlardaki bu fark oluşur. Bu etkiyi göstermek için efektif bağıl geçirgenlik sabiti $\varepsilon_{reff,}$ hesaba katılır. Tüm bu hesaplamalar tezin tasarım

kısmında eşitlikler ile ifade edilmiştir.



Şekil 3.6. Elektrik alanların saçaklanması

3.4. Mikroşerit Dizi Antenler

Mikroşerit antenler tek başlarına kullanıldıkları gibi birden fazla, farklı şekil ve geometrik yapıda kullanılabilirler. Tek mikroşerit bir antenin sağlayamayacağı anten parametreleri performansı dizi mikroşerit antenler kullanılarak sağlanabilir.

3.4.1. Mikroşerit dizi antenlerin avantajları

Özellikle kazanç ve yönlülük bakımından dizi anten tek bir antene göre yüksek performans gösterir [1, 7, 13, 17-20]. Ayrıca dizi antenler yüksek yönlülüklere sahip olduklarından hüzme açıları tek mikroşerit antenlere göre daha dardır. Dizi antenlerde kazancın ve yönlülüğün yüksek olması anten sayısı ile doğrudan ilişkilidir; çünkü artan anten sayısı ile ışıma yoğunluğu artacağından yüksek kazanç ve yönlülük artmış olur. Özellikle uzun mesafe haberleşmeleri için kazanç ve yönlülük parametreleri çok önemli olduğundan dizi antenlerin kullanımı avantaj sağlar [1, 7]. Dizi antenlerinin avantajlarından biri de çok sayıda anten kullanılabildiğinden hüzme açılarının istenildiği gibi ayarlanabilmesidir [21]. Bu da amacına uygun olarak hüzme açısının daraltılıp genişletilebilmesine olanak sağlar [1, 17].

3.4.2. Mikroşerit dizi antenlerin ışıma örüntüsü

Özdeş antenler daha basit ve pratik olduğu için dizi antenlerde tercih edilir [1].

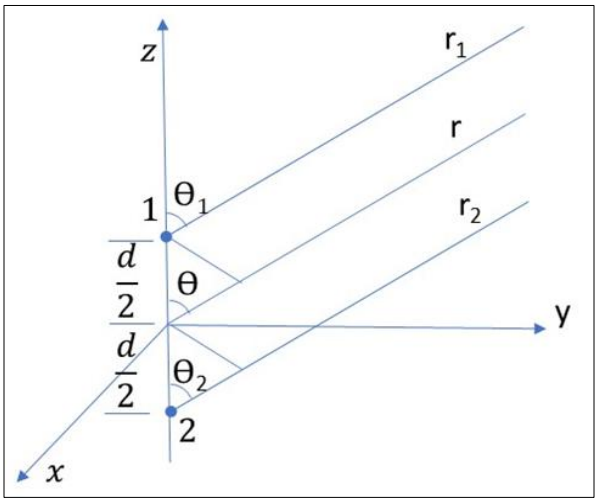
“Dizi antenlerin ışıma örüntüsünü etkileyen faktörler şunlardır;

- Dizi antenlerin geometrik konfigürasyonu

- Her bir anten arası mesafe
- Her bir antenin genliği
- Her bir antenin fazı
- Her bir antenin ışıma örüntüsü" [1].

Dizi faktörü

En basit ve pratik dizi, elemanların bir hat boyunca yerleştirilmesiyle oluşturulur. Anten elemanlarının akımları aynı, fakat fazları farklı olacaktır. Dizinin toplam alanı, her bir elemanın oluşturduğu alanların vektörel toplamlarıyla hesaplanır.



Şekil 3.7. Doğrusal dizi

Şekil 3.7'de gösterildiği gibi iki özdeş dipol anten z ekseni üzerinde birbirinden belirli bir uzaklığa (d) yerleştirilerek en basit dizi elde edilmiştir. Bu iki elemanlı en basit anten dizisi için ışıyan toplam elektrik alan ifadesi

$$\vec{E}_t = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \tag{3.1}$$

eşitliği ile elde edilmiş olur. Her bir dipol antenin uzak alan elektrik alanları toplamı

$$\vec{E}_t = \hat{a}_\theta j \frac{I_o l k}{4\pi} n_0 \left[\frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos\theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 + (\beta/2)]}}{r_2} \cos\theta_2 \right] \tag{3.2}$$

olarak yazılır. Burada β elemalar arası faz uyarımı farkı olup her iki anten için aynıdır. Antenler arası mesafe d, uzak alan r mesafesine kıyasla ihmal edilir büyüklüktedir. Bu nedenle genlik değişimleri için

$$r \cong r_1 \cong r_2 \tag{3.3}$$

alınır. Benzer biçimde

$$\theta \cong \theta_1 \cong \theta_2 \tag{3.4}$$

olur. Ancak faz değişimleri için

$$r \cong r - \frac{d}{2}\cos\theta \tag{3.5}$$

$$r \cong r + \frac{d}{2}\cos\theta \tag{3.6}$$

olup, Eş. 3.2

$$\overset{\rho}{E_t} = \hat{a}_\theta j n_0 \frac{I_o l k}{4\pi r} e^{-jkr} |\cos\theta| \left[e^{j(kd\cos\theta+\beta)/2} + e^{-j(kd\cos\theta+\beta)/2} \right] \tag{3.7}$$

$$\overset{\rho}{E_t} = \hat{a}_\theta j n_0 \frac{I_o l k}{4\pi r} e^{-jkr} |\cos\theta| 2\cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta + \beta)\right] \tag{3.8}$$

olarak elde edilir. Burada

$$DF = 2\cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta+\beta)\right] \tag{3.9}$$

toplam alandaki *Dizi Faktörü'*dür. Toplam alandaki normalize dizi faktörü ise

$$DF_n = \cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta+\beta)\right] \tag{3.10}$$

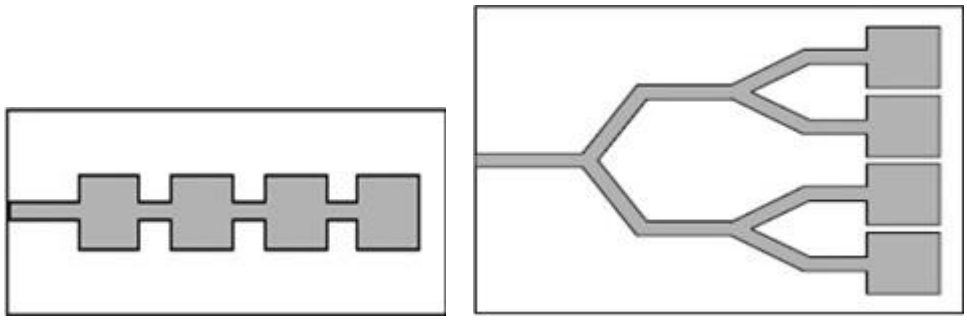
olur. O halde toplam alan, tek bir elamanın referans noktasında oluşturduğu elektrik alan şiddeti ile dizi faktörünün çarpımıdır.

$$E_T = E_{tek\ anten} \times DF \quad (3.11)$$

Yukarıdaki eşitliklerden den görüleceği üzere dizi faktörü dolayısıyla anten ışıma örüntüsü antenler arasındaki mesafe, faz farkı, genlik farklarından etkilenir.

3.4.3. Dizi anten besleme yöntemleri

Dizi antenler tek bir hattan beslenebileceği gibi çoklu hatlardan güç dağıtımı yapılarak da da beslenebilirler. Şekil 3.8 (a)' da tek bir hattan besleme yöntemi olan seri besleme yöntemi, Şekil 3.8 (b)'de çoklu hatlardan besleme yöntemi olan tümleşik besleme yöntemi gösterilmiştir [1].

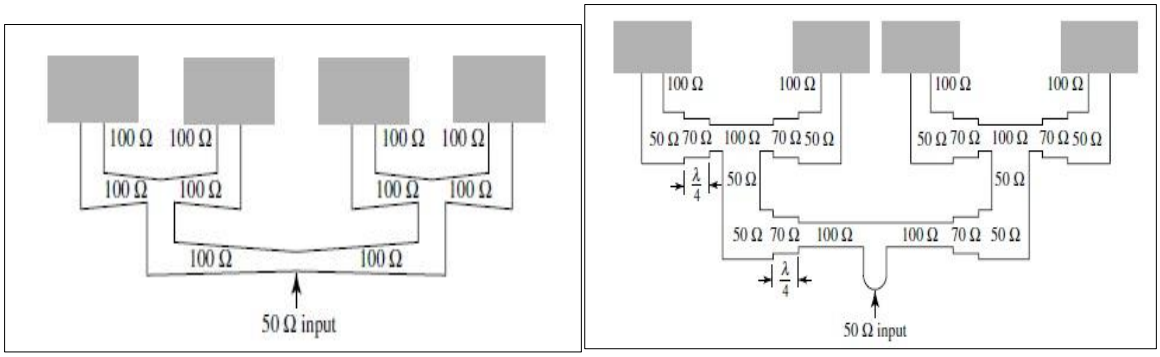


(a) (b)

Şekil 3.8. Dizi anten besleme yöntemleri

Tümleşik besleme yöntemi

Tümleşik besleme yöntemi güç dağıtımını sağlamak için kullanılır. Bu güç dağıtımı konik hatlar ile yama antenler 100Ω'lar ile 50Ω 'luk giriş empedansına eşleneceği gibi, çeyrek dalga boyu dönüşüm yöntemi ile de gerçekleştirilebilir [1].



(a) (b)

Şekil 3.9. Konik ve çeyrek dalga boyu dönüşüm yöntemi

Şekil 3.9 (a) konik hatlar, Şekil 3.9 (b) çeyrek dalga boyu dönüşüm yöntemini göstermektedir.

Tümleşik besleme yöntemlerinin avantajı tasarımcıya her anten için güç dağıtım kontrolünün yapılarak genlik ve faz değerlerinin ayarlanabilmesini sağlamasıdır. Bu avantaj çok hüzmeli, şekillendirilmiş hüzmeli ve faz dizili dizi antenler için ideal bir yöntemdir [1]. Böylelikle her bir anten fazı için, faz kaydırıcı kullanılarak; genliği için ise yükseltici ya da zayıflatıcı kullanılarak kontrolleri gerçekleştirebilir.

Seri besleme yöntemi

Bu yöntem sabit hüzmeli diziler ile sınırlıdır. Ayrıca besleme hattındaki bir olumsuzluk ya da bir antende meydana gelebilecek olumsuzluk diğer tüm antenleri dolayısıyla toplamda tüm dizi anten performansını etkiler.

Bu tezde tümleşik besleme yöntemlerinden konik hatlar yöntemi uygulanmıştır. Ancak hatların birleşme noktaları konik biçimde değil, T biçimindedir. Tasarımı ve modellemesi kolay olduğundan T şekli tercih edilmiştir. Empedans uyumlaması için konik hatlar yöntemindeki empedanslar kullanılmıştır.

4. MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Bu bölümde tek yama anten, 2x1, 2x2, 4x4 ve 8x8 dizi yama antenler HFSS 12.1 simülasyon programı kullanılarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Tek bir yama anten tasarımının hangi adımlarla yapıldığı ve bu antenin boyutlarından yola çıkılarak dizi yama anten tasarımının nasıl şekillendiği anlatılmış ve analiz sonuçları sunulmuştur.

Tek yama ve dizi yama antenler için birden fazla simülasyonlar yapılarak en iyi anten parametrelerini bulmak amaçlanmıştır. Tasarlanan tüm antenlerin analizleri anten kalitesini gösteren önemli parametrelerden kazanç, yönlülük, geri dönüş kaybı, VSWR, ışıma örüntüsü, merkez frekansı, bant genişliği ve hüzme açısı bakımından incelenmiştir.

Tasarlanan tüm antenlerin merkez frekansı X bantta yer alır ve 10 GHz'dir. Bu frekansın seçilme sebebi, X bantın tez çalışmasının giriş kısmında da belirtildiği gibi bir çok askeri ve uzay amaçlı uygulamalarda kullanılıyor olmasıdır. Antenler için kullanılan bağıl geçirgen malzeme Rogers RO4232(tm)'dir. Bu malzemenin bağıl geçirgenlik sabiti 3.2'dir. Bağıl geçirgenlik sabitinin çok küçük seçilmesi saçaklanma etkisine sebep olur [1]. Bu durumda istenmeyen, anten üzerinde anten performansını etkileyen ışımalar meydana gelir. Çok yüksek bağıl geçirgen malzeme seçilmemesinin sebebi de verimi arttırmaktır [1]. Ayrıca düşük bağıl geçirgenlik sabiti seçilmesi büyük bant genişliğine, yüksek bağıl geçirgenlik malzeme sabiti seçilmesi ise çok dar bant genişliğine sebep olur. Tez çalışmasının amacı düşünüldüğünde büyük bant genşlikleri istenmediğinden optimum bağıl geçirgenlik sabiti seçilmiştir. Tüm antenlerin bağıl geçirgenlik malzeme kalınlığı h=1 mm'dir. Çok ince bağıl geçirgenlik malzemeleri kullanıldığında istenmeyen ışımaların etkisi olacağından mikroşerit antenler için kalınlık koşulu dikkate alınmıştır.

Tasarlanan tüm antenler tümleşik besleme yöntemi olan konik besleme yöntemine benzeyen T besleme şekli ile beslenmiştir. Bu besleme yönteminin konik beslemeden farkı birleşim noktalarının T şeklinde olmasıdır.

Bu tez çalışmasında tek ve dizi yama antenler tasarlanırken öncelikle yukarıda da sınırları bellirtilen tek bir yama antenden teorik olarak çıkan anten boyutları ile tasarım yapılmıştır. Daha sonra parametreler analiz edilmiş; anten boyutları değiştirilerek en iyi tek yama anten

tasarlanana kadar anten tasarımına devam edilmiştir. En iyi tek yama anten tasarımı elde edildikten sonra, bu tek yama antenin boyutları kullanılarak birbirleriyle özdeş yama antenlerden yukarıda belirtilen besleme yöntemi ile dizi antenler tasarlanmıştır. Tasarlanan 2x1, 2x2, 4x4 ve 8x8 dizi yama antenlerin de kendi içlerinde performansları değerlendirilmiş ve yine anten boyutları, antenler arası mesafe ve farklı noktalardan besleme yöntemleri ile tezin amacına uygun olarak kablosuz haberleşme için en iyi anten parametreleri elde edilmiştir.

Tasarlanan tüm antenlerin birbirlerine göre teorik destekli kazanç, yönlülük, ışıma örüntüsü, VSWR, hüzme açısı, bant genişliği, geri dönüş kaybı gibi parametreler bakımından karşılaştırılması da bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

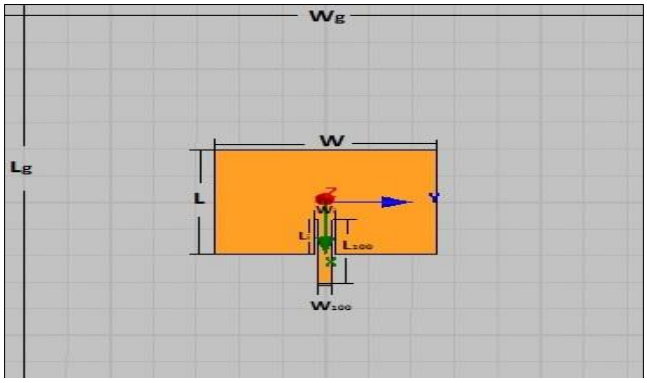
Dizi anten tasarımlarında T şeklindeki yolların fiziksel genişlik ve uzunluklarının belirlenmesinde National Instrument şirketinin ücretsiz hizmeti olan TX 2003 aracının mikroşerit kısmından faydalanılmıştır.

4.1. Tek Yama Anten Tasarımı ve Analizi

Bu bölümde teorik tek yama anten tasarım adımları, teorik olarak elde edilen antene ait parametrelerin performansları, en iyi tek yama anten elde edilinceye kadar anten üzerinde yapılan değişiklikler ve sonuçları incelenmiştir.

4.1.1. Tek yama anten tasarımı

Tek yama anten için tasarlanan anten şablonu Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1'de L yama antenin uzunluğunu, W genişliğini, L_i girinti uzunluğunu, W_i giriş empedans genişliği ile boşlukların oluşturduğu genişliği; L_{100} ve W_{100} sırasıyla 100Ω besleme empedansının uzunluğunu ve genişliğini; W_g ve L_g sırasıyla toprak tabakasının genişliği ve uzunluğunu ifade eder. Bağıl geçirgen malzemenin genişliği ve uzunluğu toprak tabakası ile aynı düşünülmüştür [3].

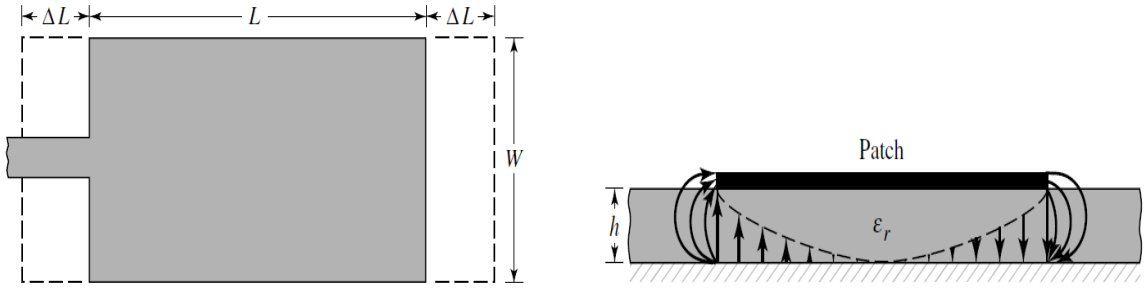


Şekil 4.1. Tek yama anten şablonu

Tasarlanan antenin genişliğini bulmak için

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} = \frac{V_0}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} \tag{4.1}$$

eşitliği kullanılmıştır [1]. Eş. 4.1'de f_r çalışma frekansını, ε_r bağıl geçirgenlik sabitini, ε_0 malzemenin boşluktaki geçirgenliğini, μ_0 boşluğun geçirgenliğini ve V_0 boşluktaki ışık hızını ifade etmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.2. Yama anten fiziksel boyutu

Yama antenlerde saçaklanma etkisinden dolayı fiziksel boyutları elektriksel olarak normalden daha büyük görünür [1]. Bu fark ΔL ile ifade edilir. Bu durum Şekil 4.2 (a)'da üstten görünüş, Şekil 4.2 (b)'de yandan görünüş ile gösterilmiştir. Efektif bağıl geçirgenlik sabiti olan ε_{reff}, boyut farkının oluşmasında hesaba katılır [1,3,7].

$$\varepsilon_{reff}= \frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[1+12\frac{h}{W}\right]^{-1/2} \quad (4.2)$$

Saçaklama etkisinden dolayı oluşan ΔL değeri

$$\frac{\Delta L}{h}=0.412\frac{(\varepsilon_{reff}+0.3)+(\frac{W}{h}+0.264)}{(\varepsilon_{reff}-0.254)+(\frac{W}{h}+0.8)} \quad (4.3)$$

eşitliği ile bulunur. Böylelikle efektif uzunluk olan L_{eff}

$$L_{eff} = L+2\Delta L \quad (4.4)$$

eşitliği ile elde edilir [1,7].

L_i girinti noktası uzunluğunu bulmak için bu noktada meydana gelen kapasitans etkisinden faydalanılır. Bu fiziksel nokta ve onun sebep olduğu kapasitans çalışma frekansını etkiler [22].

$$R_{in}=\frac{1}{2(G_1+G_{12})} \quad (4.5)$$

Eş. 4.5'te R_{in} giriş empedansını, G_1 tek yarık kondüktansını ve G_{12} ise ortak kondüktanstan gelen kondüktansı ifade eder [1, 22]. R_{in} değerinin bulunabilmesi için eşdeğer devre hesaplamalarından gelen aşağıdaki eşitlikler kullanılır [1, 15].

$$G_1=\frac{I_1}{120\pi^2} \quad (4.6)$$

$$I_1=\int_0^{\pi}\left[\frac{\sin(\frac{k_0}{2}W\cos\theta)}{\cos\theta}\right]^2\sin\theta^3 d\theta= -2+\cos(x)+xS_i(x)+\frac{\sin(x)}{x} \quad (4.7)$$

$$x=k_0W \quad (4.8)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi}\int_0^{\pi}\left[\frac{\sin(\frac{k_0}{2}W\cos\theta)}{\cos\theta}\right]^2 J_0(k_0 L\sin\theta)\sin^3\theta d\theta \quad (4.9)$$

R_{in} değeri elde edildikten sonra Eş. 4.10'da y_0 olarak adlandırılan L_i girinti uzunluğu elde edilir [1, 15].

$$Z_0 = R_{in}\cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right) \quad (4.10)$$

W_i giriş empedans genişliği ve iki taraflı boşlukların genişliklikliklerinden oluştuğu için (Bkz. Şekil 4.1) öncelikle boşluk değerinin hesaplanması gerekir. Eş. 4.11 kullanılarak boşluk genişliği hesaplanır.

$$g = \frac{V_0 x 4.65 x 10^{-12}}{\sqrt{2x\varepsilon_{reff}}\ x\ f} \quad (4.11)$$

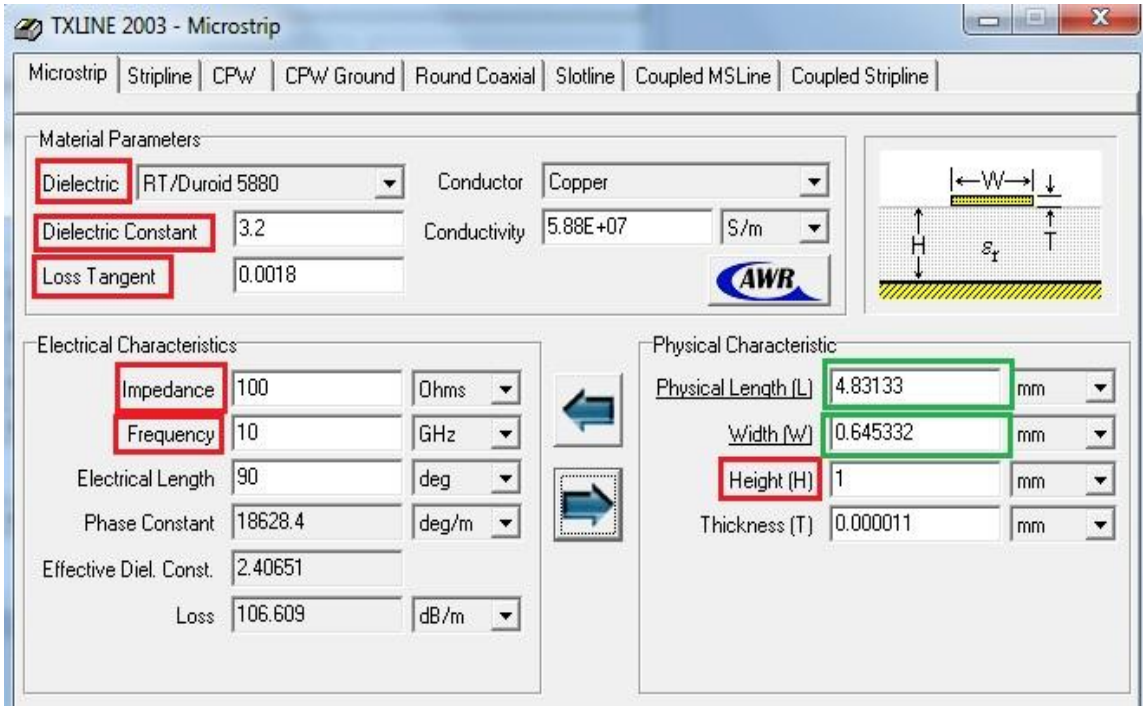
Eş. 4.11'da g, özdeş boşlukların herbirinin genişliğini ifade eder. Böylelikle W_i genişliği, W_{100} değerinin elde edilmesi ile bulunmuş olur.

Toprak tabakanın boyutları olan W_g ve L_g Eş. 4.12 ve Eş. 4.13 kullanılarak elde edilir. Bağıl geçirgen malzemenin kalınlığı h, hariç diğer boyutları toprak tabakasının boyutları ile aynı düşünülmüştür.

$$L_g = 6h + L \quad (4.12)$$

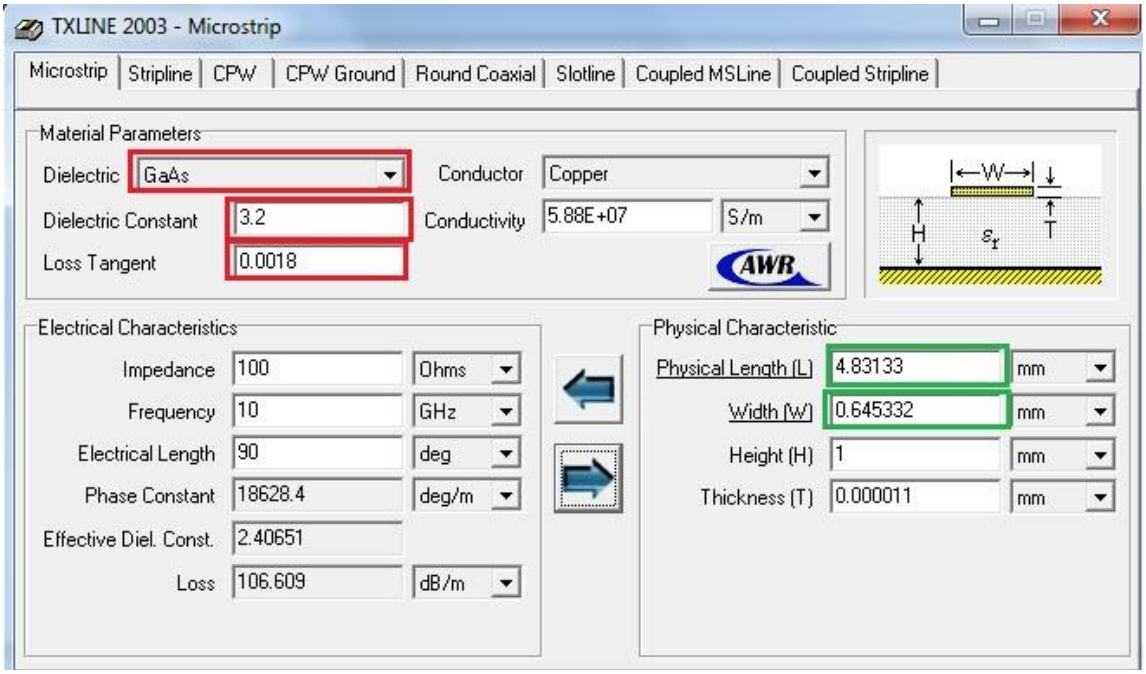
$$W_g = 6h + W \quad (4.13)$$

L_{100} ve W_{100} boyutlarının bulunmasında TXLINE 2003 aracının "microstrip" bölümü kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3'de TXLINE 2003 aracı gösterilmiştir.



Şekil 4.3. TXLINE 2003 arayüzü

Şekil 4.3'te "microstrip" sekmesinin altında "dielectric" kısmında "RT/Duroid 5880" malzemesi seçilir. Bu malzeme Roger malzemesidir. Aslında tek başına bu malzemeyi seçmenin hiçbir anlamı yoktur. Bu durumu kanıtlanması açısından Şekil 4.4'te GaAs malzemesi seçilerek aynı değerler ile aynı "Physical Length (L)" ve "Width (W)" değerlerine ulaşıldığı gösterilmiştir. Burada önemli olan "Dielectric Constant" ve "Loss Tangent" sekmelerindeki değerlerin kullanılan bağıl geçirgen malzemeye ait olmasıdır. Bu tezde bağıl geçirgenlik sabiti 3.2 olup, kayıp tanjant değeri de 0.0018'dir. Kayıp tanjant değeri HFSS 12.1 programında "substrate" bölümünde Rogers RO4232(tm) malzemesi özellikleri içerisinden görülmüştür.



Şekil 4.4. GaAs seçili 100Ω uzunluk ve genişlik değerleri

Şekil 4.4'te kırmızı kutu ile gösterilen bölmeler uygun şekilde doldurulur. Şekil 4.4'te yeşil kutu ile gösterilen kutular yukarıdan aşağıya sırasıyla L_{100} ve W_{100} değerlerini ifade etmektedir. Böylelikle L_{100} ve W_{100} değeri de elde edilmiş olur.

Dizi yama anten tasarımlarında da 100Ω ve 50Ω 'luk tüm uzunluk ve genişlikler yine TXLINE 2003 kullanılarak elde edilmiştir.

Mikroşerit tek yama antenin tüm boyutları elde edilmiştir. Çizelge 4.1'de teorik olarak hesaplanan tek yama antene ait tüm boyutlar gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Hesaplanan tek yama anten boyutları

Anten boyutları	Hesaplanan teorik değerler (mm)
W	10,35
L	7,93
Li	2,72
Wi	0,754
W_{100}	0,65
L_{100}	4,83
Lg	13,93
Wg	16,35
g	0,052

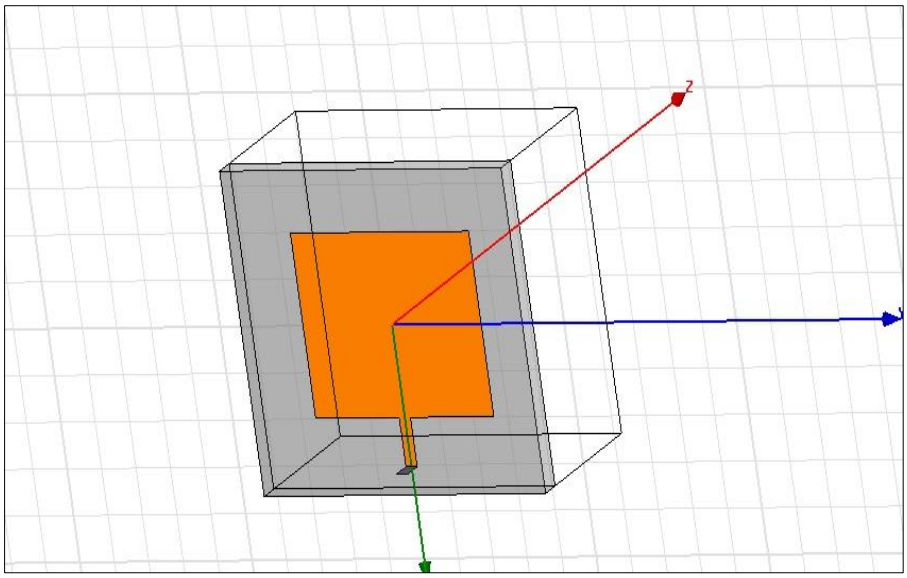
4.1.2 Tek yama anten simülasyon ve analizi

Tezin bu bölümünde tasarlanan tüm tek yama anten boyutları gösterilmiştir. Ayrıca teorik hesaplamalar sonucu elde edilen tek yama antenin (teorik yama anten) ve bu anten boyutlarındaki değişiklerle elde edilen en iyi tek yama antenin simülasyon sonuçları sunulmuştur. Elde edilen teorik ve en iyi tek yama anten sonuçları karşılaştırılmıştır.

En iyi tek yama anten bulunana kadar yama anten üzerinde yapılan tüm değişiklikler yine bu bölüm içerisinde yer almaktadır. Anten boyutlarında yapılan tüm değişikliklerin anten performansına nasıl etki ettiği gözlemlenmiştir.

Teorik yama anten simülasyon sonuçları

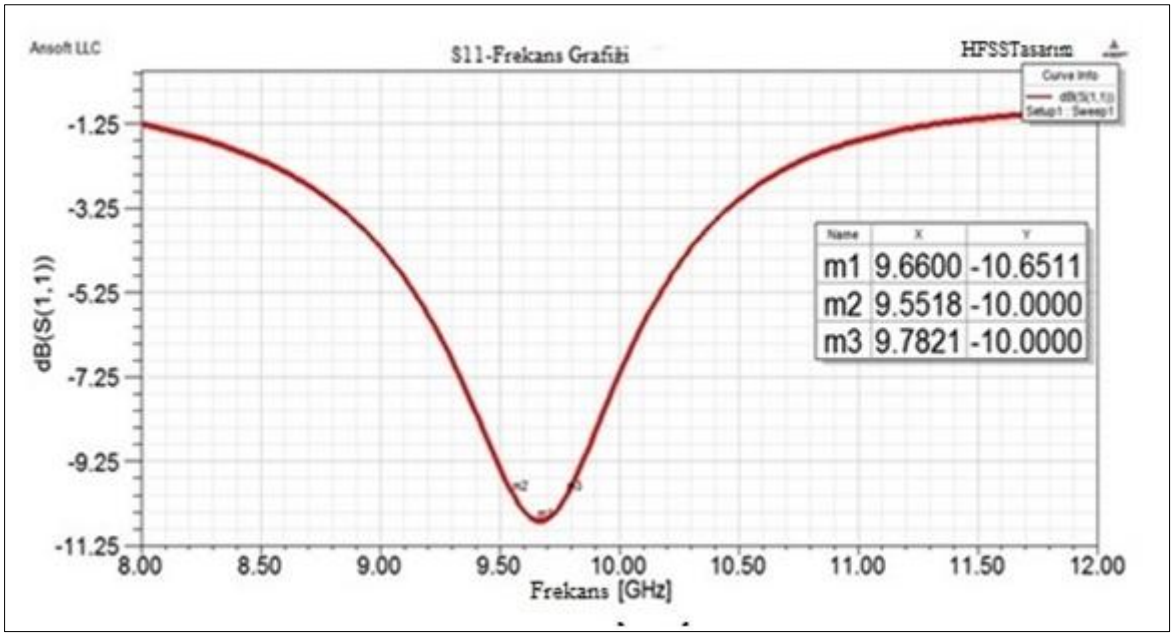
Tek yama anten için tasarlanan anten boyutları (Bkz. Çizelge 4.1) göre L yama antenin uzunluğunu 7,93 mm, W genişliğini 10,35 mm, L_i girinti uzunluğunu 2,72 mm, W_i giriş empedans genişliği ile boşlukların oluşturduğu genişlik 0,754 mm; L_{100} ve W_{100} sırasıyla 100Ω besleme empedansının uzunluğunu 0,65 mm, genişliğini 4,83 mm; W_g ve L_g sırasıyla toprak tabakasının genişliği 16,35 mm, uzunluğunu 13,93 mm olarak elde edilmiştir. Bu koşullar altında elde edilen tek yama anten Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Teorik tek yama anten

Bu tezde simülasyon sonuçları tezin de amacına uygun olarak önemli anten parametreleri olan kazanç, yönlülük, geri dönüş kaybı, ışıma örüntüsü, hüzme açısı genişliği, bant genişliği, VSWR ve ışıma verimliliği bakımından ele alınmıştır.

İlk olarak teorik tasarlanan antenin geri dönüş kaybı ve bant genişliği incelenmiştir.



Şekil 4.6. Geri dönüş kaybı (S11)-frekans grafiği

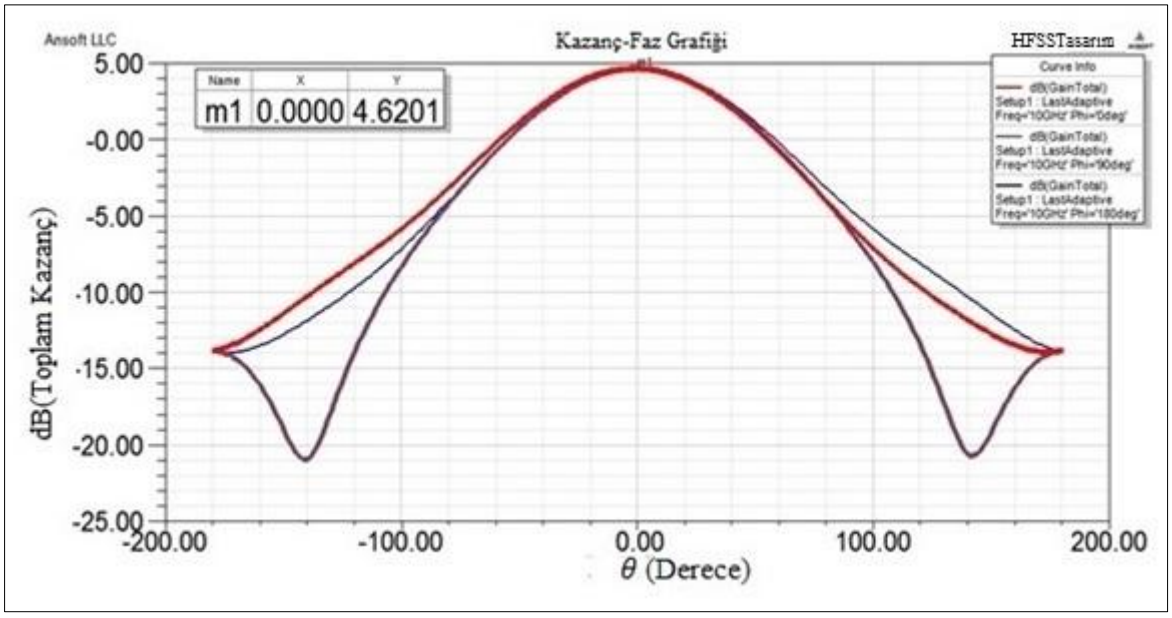
Şekil 4.6'da m1 en düşük S11 değerini, m2 ve m3 en düşük S11 değeri etrafındaki çalışılabilir geri dönüş kaybı ve frekans değerlerini ifade etmektedir. En düşük S11 değeri bir antenin geri dönüş kaybını verir. İyi bir anten tasarımında S11 değeri -10 dB'nin mümkün olduğunca altında olması gerekir [22]. Şekil 4.6'dan anlaşılacağı gibi teorik olarak hesaplanan anten boyutları ile yapılan tasarımda geri dönüş kaybı S11 değeri -10.65 dB bulunmuştur. Bu bakımdan anten performansının düşük olduğu anlaşılmıştır. Başka bir anlamı da antende geri yansımaların çok olduğu anlamına gelmektedir.

Geri dönüş kaybının önceki bölümlerde anlatıldığı gibi empedans uyumlaması ile yakından bir ilişkisi bulunur. Bu bakımdan bu tasarımda empedans uyumlamasının iyi olmadığı söylenebilir. Ayrıca geri dönüş kaybı ile VSWR arasında da yakıdan bir ilişki bulunur. Geri dönüş kaybı yüksek olan antenlerde VSWR değerinin de iyi olması beklenemez.

İyi bir antenin geri dönüş kaybının sınır noktası olan -10 dB'ye karşılık gelen frekans noktaları o antenin bant genişliğini de gösterir. Şekil 4.6'da m1 ilk teorik yama antenin merkez frekans noktası olan 9.66 GHz'i, m2 alt sınır frekans olan 9.5518 GHz'i ve m3 üst sınır frekans noktası olan 9.7821 GHz'i ifade etmektedir. Bu durumda m2 ve m3 arasındaki fark, bant genişliğini verir. Bu teorik antenin bant genişliği 230,3 MHz olduğu görülmüştür. Başka bir ifade ile bant genişliği %2,38'dür. Bant genişliğinin dar olması mikroşerit antenlerin temel özelliklerinden biri olduğu önceki bölümlerde belirtilmiştir. Teorik antenin simülasyonunda bu durum görülmüştür.

Şekil 4.6'ya bakıldığında teorik yama antenin merkez frekansı başka ifade ile çalışma frekansının S11 değerinin en düşük olduğu noktadaki m1 frekans değeri 9.66 GHz'dir. 10 GHz merkez frekansı baz alınarak tasarlanan teorik yama antende bulunan değer 9.66 GHz olduğundan merkez frekansı bakımından başarılı olmadığı görülmüştür.

Şekil 4.7'de kazanç parametresine ait simülasyon sonucu ortaya çıkan değerler verilmiştir.



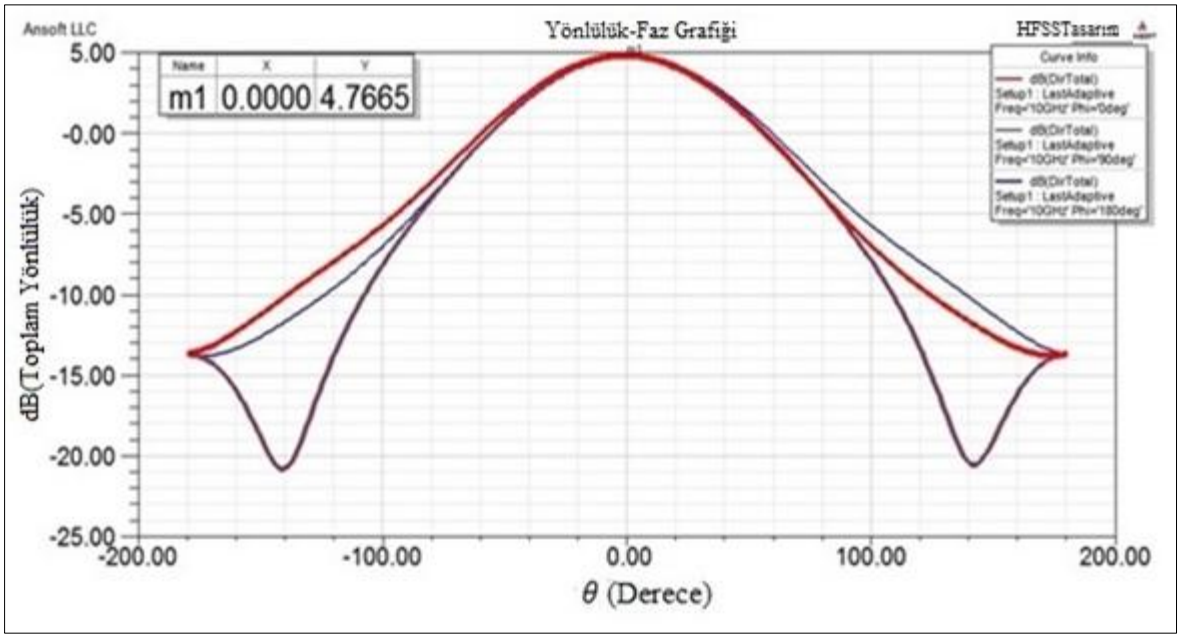
Şekil 4.7. Kazanç-faz grafiği

Şekil 4.7'de düşey eksende teorik yama antenin kazanç değerleri dB cinsinden, yatay eksende yatay düzlemde taradığı açı θ, -180° ile 180° arasındaki değerleri gösterilmiştir. Ayrıca düşey düzlemde yaptığı açı olan φ=0°, φ=90° ve φ=180°'deki anten kazançları da Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi bir antenin kazancı, maksimum ışıma yönündeki kazancıdır. Bu bakımdan Şekil 4.7'ye bakıldığında faz açısı 0° iken, en çok ışıma olduğu anlaşılmıştır ve anten kazancı m1 değerlerinden anlaşılacağı üzere 4.62 dB'dir. Mikroşerit antenlerin tek başlarına kullanıldıklarında anten kazançlarının düşük olduğunu bilinmektedir; ancak bu teorik antende geri dönüş kaybının yüksek olması anten kazancını etkilemiştir. Çünkü anten kazancı güç yoğunluğuyla ile doğrudan ilişkilidir. Bu bakımdan teorik olarak tasarlanan yama antenin kazanç parametresinden beklenen performans alınamamıştır. Birden fazla simulasyon ihtiyacının nedenlerinden biri de budur.

Şekil 4.7'den çıkarılabilecek başka bir sonuç da antenin yatay düzlemde 0° iken maksimum kazanç değerini göstermesidir. Bu bakımdan anten ışımasında herhangi bir faz kayması olmadığı anlaşılmıştır.

Şekil 4.8'de teorik yama antene ait simülasyon sonuçlarında alınan yönlülük değerleri verilmiştir.



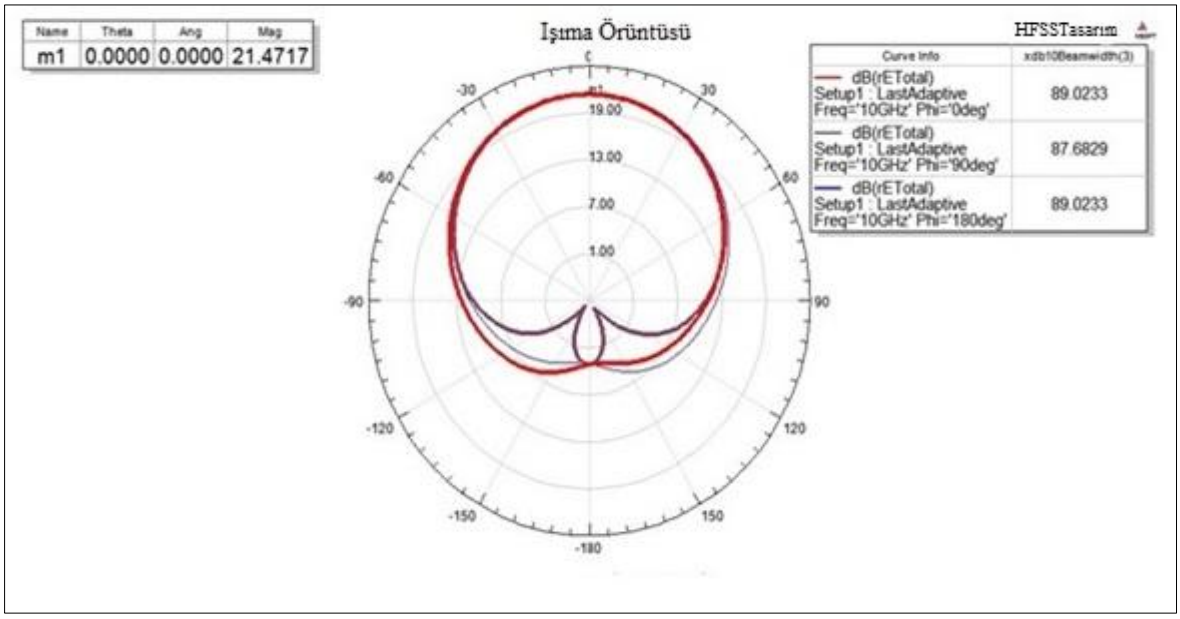
Şekil 4.8. Yönlülük-faz grafiği

Şekil 4.8'de Şekil 4.7'de olduğu gibi yatay ve düşey düzlemdeki tüm açılar aynı şeyi ifade etmektedir. Düşey eksende antenin yönlülük değerleri dB cinsinden verilmiştir.

Tıpkı anten kazancı gibi yönlülük de bir antenin maksimum ışıma yaptığı noktadaki yönlülüğü kabul edilir. Şekil 4.7'de m1 θ=0°'de 4.7665 dB yönlülüğe sahip olduğunu gösterir. Mikroşerit antenlerin dezavantajlarından biri olan düşük yönlülük elde edilen yönlülük değerinden de doğrulanmıştır; ancak S11 değerinin düşük olması maksimum ışıma yoğunluğunu etkileyeceğinden düşük yönlülük sonucunu doğurmuştur. Bu nedenle teorik olarak tasarlanan yama antenin yönlülük performansı yeterli seviyede görülmemiştir ve ek simülasyon ihtiyacı doğurmuştur.

Şekil 4.8'den tıpkı anten kazancında olduğu gibi anten ışmasında faz farkı olmadığı anlaşılmıştır. Bu bakımdan teorik anten boyutlarının anten ışımasında faz farkı yaratmadığı anlaşılmıştır. Bu tez çalışmasında tasarlanmak istenen antenin 0° fazında olması önem arz eder; çünkü faz farkı olması ek faz kaydırıcı gibi ihtiyaçlar doğurur.

Şekil 4.9'da teorik yama antene ait ışıma örüntüsü simülasyon sonucundan alınan değerler gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Işıma örüntüsü-faz grafiği

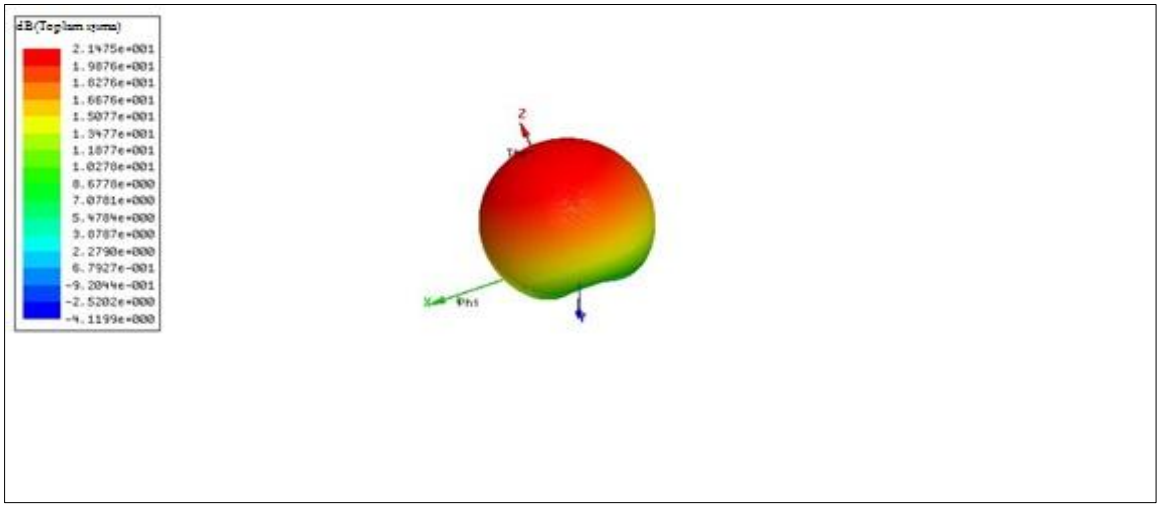
Şekil 4.9'da tüm yatay düzlemi tarayan θ açılarında, düşey düzlemi tarayan φ açılarından φ=0, φ=90° ve φ=180°'de ışıma değerleri gösterilmiştir. Işıma örüntüsünde maksimum ışımanın m1 değerlerinden θ=0°'de olduğu anlaşılmıştır.

Bu durumda antende faz kaymasının olmadığı, bu bakımdan teorik hesaplamaların faz kaymasına sebep olmadığı anlaşılmıştır. Işıma örüntüsü üzerinde görülen değerler dB cinsinden olup maksimum ışıma değerinin genliğinin, m1 değerine bakıldığında 21.47 dB olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 4.9' da sağ üst köşede φ (Phi) açılarının yanında "xdb10Beamwidth(3)" kısmı altında bazı açı değerleri bulunur. Bu değerler φ=0°, için 89.0233°, φ=90° için 87.6829° ve φ=180° için 89.0233°'dir. Bir ışıma örüntüsünde maksimum ışıma yani anten yönlülüğü z ekseninde ise, xz düzleminde tüm θ açıları mevcut iken φ=0°'de antenin yataydaki yarım güç hüzme açısını (HPBW) yani antenin hüzme açısını verir. Bu durum için hüzme açısı φ=0° için 89.0233°'dir. Yataydaki hüzme açısı azimut açısı olarak da adlandırılır. yz düzleminde tüm θ açıları mevcut iken φ=90° 'de antenin düşeydeki HPBW değeri elde edilir. φ=90° için bu değer 87.6829°'dir. Düşeydeki hüzme açısı elavasyon açısı olarak da adlandırılır. Bu durumun daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.10'da antene ait simülasyon sonucu olarak üç boyutlu ışıma örüntüsü verilmiştir. φ=180° iken 89.0233° değeri antenin simetrik olduğunu göstermektedir; φ=0°'deki açı değeri ile aynıdır.

Teorik antenin hüzme açılarına bakıldığında beklenildiği gibi açıların büyük olduğu görülmüştür. Bu durum tipik mikroşerit antenlerin dezavantajlarından biridir. Buradan çıkarılacak diğer bir sonuç da hüzme açıları geniş olan mikroşerit antenlerin daha uzun mesafe haberleşmelerinde kullanılabilabilmeleri için dizi anten olarak kullanılmaları gerektiğidir. Dizi antenlerin bu avantajı sonraki bölümlerde ortaya konulmuştur.

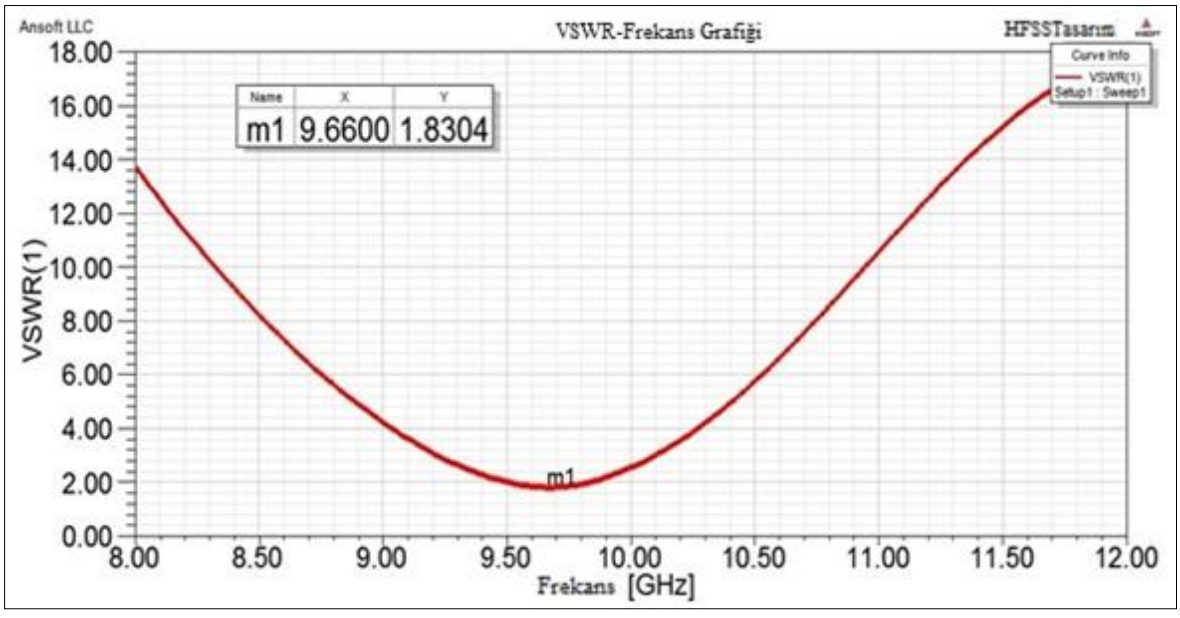
Teorik hesaplamalarla tasarlanan bu antenin kazancı, yönlülüğü düşük; geri dönüş kaybı yüksek olduğundan bu performanların arttırabilmesi için ilave simülasyon ihtiyacı doğurmuştur. Bu simülasyonlarda antenin hüzme açıları tekrar değerlendirilmiştir.



Şekil 4.10. Üç boyutlu ışıma örüntüsü

Şekil 4.10'da üç boyutlu ışıma örüntüsünde soldaki bar şeklindeki sütunda ışıma yoğunluğuna bağlı olarak renklendirilmeler yapılmıştır. Bu yoğunluk gösteriminden ışımanın z ekseni boyunca çok daha yoğun olduğu anlaşılmıştır. Şekil 4.10'den de ışıma şiddetinin yaklaşık olarak 21.47 dB olduğu anlaşılmıştır.

Önemli anten parametrelerinden bir diğeri VSWR, teorik yama anten simülasyon sonucu olarak Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. VSWR-frekans grafiği

VSWR giden ve yansıyan dalgaların maksimum genlikleri oranı olduğundan birimsizdir [11]. Önceki bölümlerden de anlaşılacağı gibi VSWR empedans uyumlamasının önemli bir göstergesidir. Bu teorik antene ait S11 değerinin (Bkz. Şekil 4.6) iyi olmadığı görülmüştür. Bu nedenle VSWR değerinin iyi olmaması beklenmiştir, nitekim Şekil 4.11'de 9.66 GHz'de m1 değerine bakıldığında 1.83 olduğu görülmüştür. VSWR değeri 1 olduğunda antende hiç geri yansıma olmadığı anlamına gelir. Bu değer arttıkça geri yansıyan güç değeri artacağından kayıp artar. İyi bir anten performansı için VSWR değeri 1 ile 2 arasında kabul edilir. VSWR değeri 2'den büyük olduğunda kayıp yaklaşık -9.55 dB'den büyük olur ki iyi bir anten performansında geri dönüş kaybının -10 dB'den küçük olması istenir [22]. Bu bakımdan tasarlanan teorik antenin 10 GHz için VSWR performansının 2'den büyük olduğu Şekil 4.11'de anlaşılmıştır. Bu nedenle iyi bir VSWR performansı yani iyi bir empedans uyumlaması ve düşük geri dönüş kaybı için ilave tasarımlara ihtiyaç duyulmuştur.

Tasarlanan teorik antene ilişkin ışıma verimliliğine bakıldığında HFSS 12.1 programından çıkan sonuç %96.6 olarak görülmüştür. Işıma verilimliği kullanılan malzemenin özellikleriyle ilişkilidir. Bu bakımdan ışıma verimliliğinin yüksek olması uygun malzeme kullanıldığını göstermektedir; ancak toplam anten verimliliği düşünüldüğünde bu antenin performansının iyi olmadığı söylenebilir. Toplam anten verimliliği geri dönüş kaybı ile de ilişkilidir.

Bu bakımdan ışıma verimliliğinin yüksek olması uygun malzeme kullanıldığını gösterir, ancak anten verimliliği düşünüldüğünde bu antenin performansının iyi olmadığı söylenebilir.

Teorik olarak tasarlanan tek yama anten üzerinde daha iyi anten parametreleri elde etmek için anten boyutları üzerinde bazı değişiklikler yapılmış ve sonuçları gözlemlenmiştir. Çizelge 4.2'de yapılan bu değişikler, Çizelge 4.3'te bu değişiklikler sonucunda elde edilen parametre sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Teorik yama anten üzerinde yapılan değişiklikler

Anten Boyutları	W	L	L_i	W_i	W_{100}	L_{100}	Lg	Wg
Teorik yama anten (mm)	10,35	7,93	2,72	0,754	0,65	4,83	13,93	16,35
Sim. 1 (mm)	10,35	7,93	2,65	1,8	0,65	4,83	40	40
Sim. 2 (mm)	10,35	7,93	2,65	2	0,65	4,83	40	40
Sim. 3 (mm)	10	7,5	2,65	2	0,65	4,83	40	40
Sim. 4 (mm)	10	7,5	2,65	1,5	0,65	4,83	40	40
Sim. 5 (mm)	10	7,5	2,65	1,2	0,65	4,83	40	40
Sim. 6 (mm)	10	7,5	2,65	1,2	0,65	4,83	30	30
Sim. 7 (mm)	10,3	7,8	2,65	1,2	0,65	4,83	30	30
Sim. 8 (mm)	10,2	7,75	2,65	1,2	0,65	4,83	30	30
Sim. 9 (mm)	10,2	7,75	2,65	1,3	0,65	4,83	30	30
Sim. 10 (mm)	10,2	7,75	2,65	1	0,65	4,83	30	30
Sim. 11 (mm)	10,2	7,75	2,65	1	0,65	4,83	40	40
Sim. 12 (mm)	10,2	7,75	2,72	1	0,65	4,83	30	30
Sim. 13 (mm)	10,2	7,75	2,75	1	0,65	4,83	30	30
Sim. 14 (mm)	10,2	7,75	2,72	1,1	0,65	4,83	30	30
Sim. 15 (mm)	10,2	7,75	2,72	1	0,65	4,83	30	30

Çizelge 4.3. Simülasyon sonuçları

Simülasyonlar	S11 (dB)	Kazanç (dB)	Yönlülük (dB)	Merkez frekans (GHz)
Teorik yama anten	-10,65	4,62	4,76	9,66
Simülasyon 1	-14,24	6,46	6,48	9,8
Simülasyon 2	-10,77	6,6	6,61	10,2
Simülasyon 3	-15,14	6,59	6,59	10,3
Simülasyon 4	-24,23	6,62	6,56	10,3
Simülasyon 5	-22,93	7,44	7,49	10,3
Simülasyon 6	-22,93	7,44	6,95	10,3
Simülasyon 7	-20,38	7,44	7,49	9,9
Simülasyon 8	-30,22	7,43	7,50	10
Simülasyon 9	-28,2	7,40	7,47	10
Simülasyon 10	-23,50	7,43	7,51	10
Simülasyon 11	-32,07	6,5	6,46	10
Simülasyon 12	-26,50	7,42	7,49	10
Simülasyon 13	-25,68	7,42	7,50	10
Simülasyon 14	-27,17	7,43	7,49	10
Simülasyon 15	-23,17	7,44	7,5	10

Yukarıda verilen Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te tek yama anten boyutları üzerinde yapılan değişiklikler ile elde edilebilecek en iyi parametrelere sahip anten elde edilmeye çalışılmıştır. Simülasyon 1 de L_i , W_i ile bağıl geçirgen malzeme ve toprak tabakasının boyutları olan W_g ve L_g rastlantısal olarak değiştirilmiş ve sonucu teorik antene göre kıyaslanmıştır. Yapılan bu değişiklikle S11 değerinde 3,65 dB kazanç, anten kazancının dB cinsinden yaklaşık %40 arttığı, yönlülüğün yaklaşık dB cinsinden %39 arttığı ve merkez frekansın 9,8 GHz olduğu görülmüştür. Bu değişimde kazanç ve yönlülük bakımından büyük değişiklik görüldüğünden simülasyonlara bu antende tek bir parametre değiştirilerek devam edilmiştir.

Simülasyon 1'e göre simülasyon 2'de yalnızca W_{100} ve simetrik iki boşluktan oluşan W_i değeri düşürülmüştür. Aslında W_{100} değeri sabit alınmış ve boşluklar eş olarak arttırılmıştır. Bu işlem sonucunda kazanç ve yönlülük bakımından çok az değişiklik görülmüş; ancak geri dönüş kaybında 3,47 dB kayıp görülmüş olup, merkez frekans 10,2 GHz olmuştur. Bu işlemdeki tek değişiklik boşlukların eş olarak arttırılması olduğundan, bu değişimin empedans uyumlaması ve merkez frekans üzerinde etkisi olduğu söylenebilir.

Simülasyon 2'de merkez frekans 10,2 GHz olduğundan merkez frekansı değiştirebilmek için simülasyon 3'de yalnızca anten uzunluğu L ve genişliği W azaltılmış ve etkisi gözlemlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında kazanç ve yönlülük bakımından önemsenmeyecek fark oluşurken, S11 değerinde yaklaşık 4.37 dB kazanç sağlanmış, merkez frkans ise 10.3 GHz olmuştur. Bu işlemde anten uzunluğunu ve genişliğini azaltmak geri dönüş kaybında olumlu etki yaratırken, istenen merkez frekans olan 10 GHz'den uzaklaşılmasına sebep olmuştur.

Simülasyon 1'den simülasyon 2' ye geçerken boşlukların arttırılması değişikliğinin geri dönüş kaybına olumsuz etki yarattığı görüldüğünden simülasyon 3'den Simülasyon 4'e geçerken bu boşlukların eş olarak azaltılması denenmiştir. Bu değişiklik ile kazanç ve yönlülükte önemsenmeyecek değişimler görülmüştür. Merkez frekans değişmemiştir. S11 değerinde yaklaşık 9 dB gibi büyük bir kazanç sağlanmıştır. Böylelikle empedans uyumlamasının çok daha iyi hale geldiği görülmüştür.

Simülasyon 4'ten simülasyon 5'e geçerken yine boşlukların eş olarak azaltılması tercih edilmiş ve sonuç gözlemlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında S11 değerinde 1,3 dB kayıp yaşanırken, anten kazancında 0,8 dB, yönlülüğünde ise yaklaşık 1 dB kazanç olduğu görülmüştür. Merkez frekans değişmemiştir. Buradan yalnızca boşlukların eş olarak belli bir noktaya kadar azaltılması daha iyi bir empedans uyumlamasını sağladığından geri dönüş kaybı S11 üzerinde olumlu etki ettiği görülmüştür. Bu durum tipik bir mikroşerit antenin özelliklerinden biri olarak teorik bilgileri desteklemiştir. Ayrıca antenin ışıma yaptığı yüzeyi arttırdığından kazanç ve yönlülük bakımından avantaj sağladığı görülmüştür.

Simülasyon 5'ten simülasyon 6'ya geçilirken yalnızca bağıl geçirgen malzemenin ve toprak tabakasının boyutları olan Lg ve Wg değerleri azaltılarak teorik boyutlara yaklaştırılıp, sonuçları görülmek istenmiştir. Bu değişiklik sonucunda yalnızca antenin yönlülük değerinde bir yaklaşık 0.5 dB bir kayıp görülmüştür.

Simülasyon 3'ten simülasyon 6'ya kadar olan tüm simülasyonlarda merkez frekansının 10,3 GHz olarak kaldığı görülmüş ve antenin W ve L değerleri arttırılarak istenen 10 GHz merkez frekansına ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bu değişiklikteki sonuçlara bakıldığında merkez frekansın 9.9 GHz olduğu ve yönlülüğün 0.54 dB arttığı görülmüştür. Ayrıca uzunluk ve genişlikte yapılan bu küçük değişiklik anten empedansını etkilediği için empedans uyumlamasında da bir değişiklik yaratmıştır. S11 değerinde yaklaşık 2.5 dB bir kayıp olduğu görülmüştür. Buradaki işlemde merkez frekansını büyük ölçüde etkileyen W ve L değerlerinin aralığı bulunmuştur. Bu bakımdan W değerinin 10-10,3 mm aralığında, L değerinin 7,5-7,8 mm aralığında olabileceği sonucu çıkarılmıştır.

Simülasyon 7'den 8'e geçerken merkez frekansın 10 GHz'in bulunabilmesi için yukarıda belirtilen aralıkta W ve L değerleri seçilmiştir. Bu işlem sonucunda merkez frekansın 10 GHz olduğu görülmüştür. Ayrıca yapıln bu değişiklik ile S11 değerinde de yaklaşık 9 dB bir kazanç sağlanmıştır. Yönlülük ve kazanç bakımında önemsenmeyecek değişiklikler görülmüştür. Bu işlemde anten uzunluğunda ve genişliğinde yapılan küçük değişikliklerin merkez frekansı ve empedans uyumlamasını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür.

Simülasyon 9'da simülasyon 8'e göre yalnızca W_i değeri yalnızca değişirilmiştir. W_{100} değeri sabit kaldığından boşlukların değiştirildiği anlaşılır. Bu boşluklar eş olarak arttırılmıştır. Bu işlem simülasyon 1'den simülasyon 2'ye geçerken yapılan işleme çok benzerdir. İkisinde de boşluklar eş olarak arttırılmıştır. Simülasyon 1'den simülasyon 2'ye geçerken S11 ve merkez frekansında belirgin değişiklikler görülmüştür; ancak simülasyon 8'den simülasyon 9'a geçerken benzer işlem olmasına rağmen merkez frekansında değişiklik olmazken, S11 değerinde 2 dB bir kayıp görülmüştür. Buradan da W_i değerinindeki değişiklikler geri dönüş kaybı ile birlikte merkez frekans üzerinde etkili olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Simülasyon 9'da boşlukların arttırılmasının S11 değerinde olumsuz etkisi olduğundan simülasyon 10'da boşluklar eş olarak azaltılmıştır. Simülasyon 10 sonuçlarına bakıldığında yapılan işlemin yalnızca geri dönüş kaybı üzerinde belirgin bir olumsuz etkisi olmuştur.

Simülasyon 11'de simülasyon 10'a göre yalnızca W_g ve L_g değerleri değiştirilmiştir. Arttrılan bu değerlerin S11 değerine olumlu etkisi olurken, kazanç ve yönlülük bakımından kayıplar görülmüştür.

Simülasyon 12 ‘de W_g ve L_g dğerleri 30 mm alınmış, L_i değeri teorik uzunluğa çekilerek sonuçlar gözlemlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında kazanç ve yönlülük bakımından iyileşme görülmüş, S11 değerinde yaklaşık 5.5 dB bir kayıp yaşanmıştır. Merkez frekansında değişiklik olmamıştır.

Simülasyon 13’te simülasyon 12’ye göre L_i değeri arttırılmış ve etkisi gözlemlenmiştir. Bu işlem yalnızca S11 değeri üzerinde küçük, olumsuz etki yaratmıştır.

Simülasyon 14’te yalnızca W_i değeri yine boşlukların eş olarak arttırılması ile değiştirilmiş ve sonuçları gözlemlenmiştir. Yapılan bu değişiklikle S11 değerinde 1,5 dB kazanç sağlanırken, kazanç ve yönlülük bakımından önemsenmeyecek değişiklikler gözlenmiştir. Merkez frekans değişmemiştir.

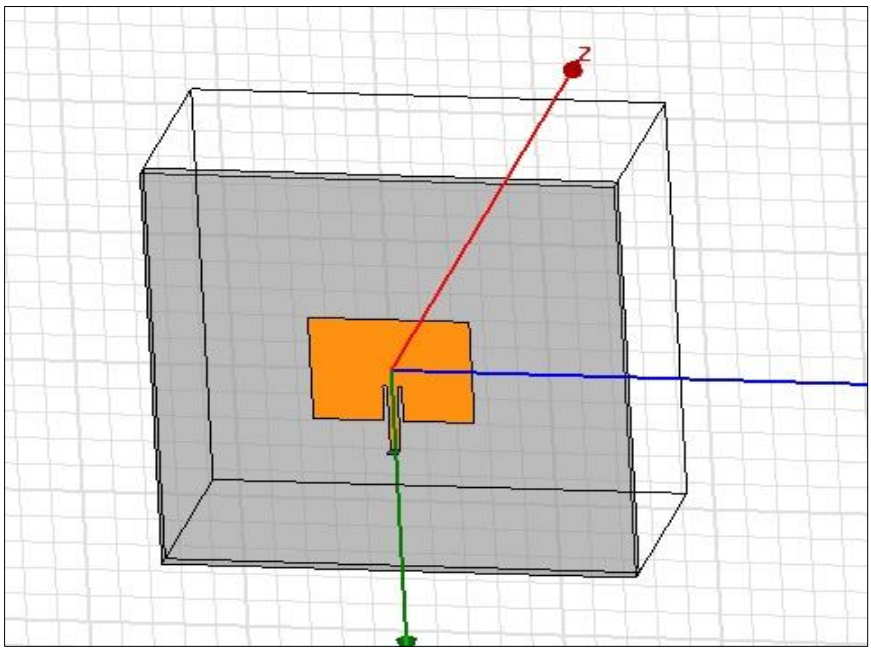
Son simülasyon olarak simülasyon 15’te simülasyon 13’e göre L_i değeri azaltılıp etkisi gözlenmiştir. Bu işlemde S11 değerinde 4 dB kayıp yaşanırken diğer parametrelerde belirgin bir değişiklik yaşanmamıştır.

Yapılan tüm simülasyon çalışmaları en iyi tek yama anten performansını bulmak için yapılmıştır. Bu bakımdan Çizelge 4.3 incelendiğinde elde edilen en iyi yama anten simülasyon 8’de yer alan antendir.

Simülasyonların tamamına bakıldığında mikroşerit antenlerin üzerinde değişiklik yapılabilecek çok fazla değişkenlere sahip oldukları görülmüştür. Bu bakımdan aslında tasarım için çok geniş bir yelpazeye sahip olduklarından simülasyon sayısı arttırılabilir.

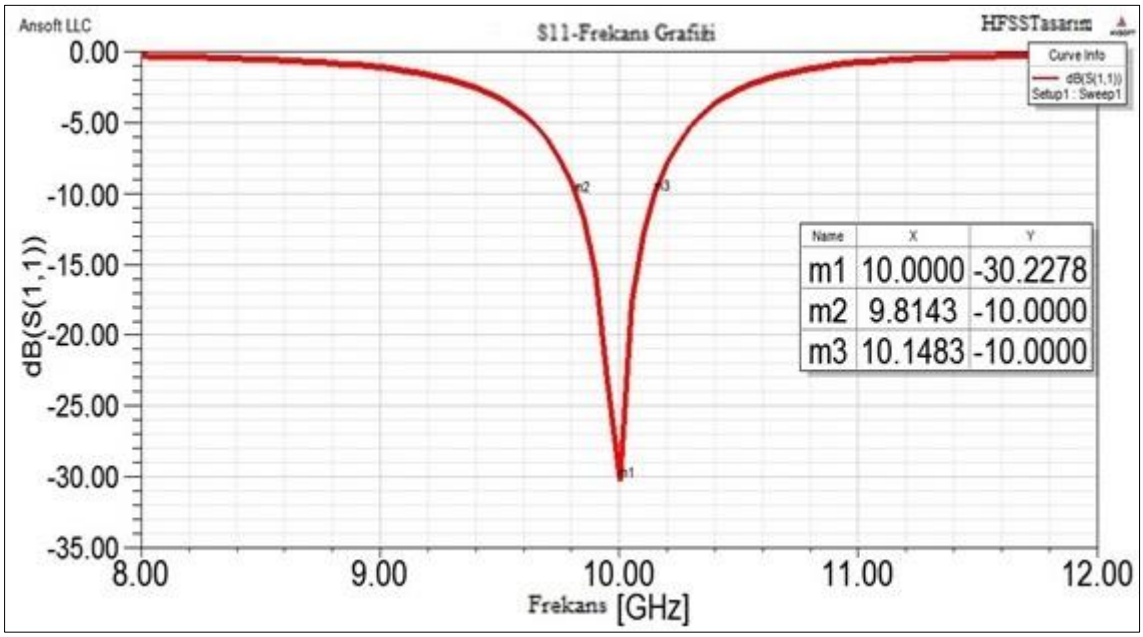
Elde edilen en iyi yama anten simülasyon sonuçları

Simülasyon 8’de elde edilen en iyi yama antene ait kazanç, yönülülük, S11, bant genişliği, ışıma örüntüsü, hüzme açısı ve VSWR gibi parametreler bu bölümde incelenmiştir. Elde edilen en iyi anten Şekil 4.12’te gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Elde edilen en iyi yama anten şekli

Şekil 4.13 ‘te yama antene ait geri dönüş kaybı ve bant genişliği gösterilmiştir.



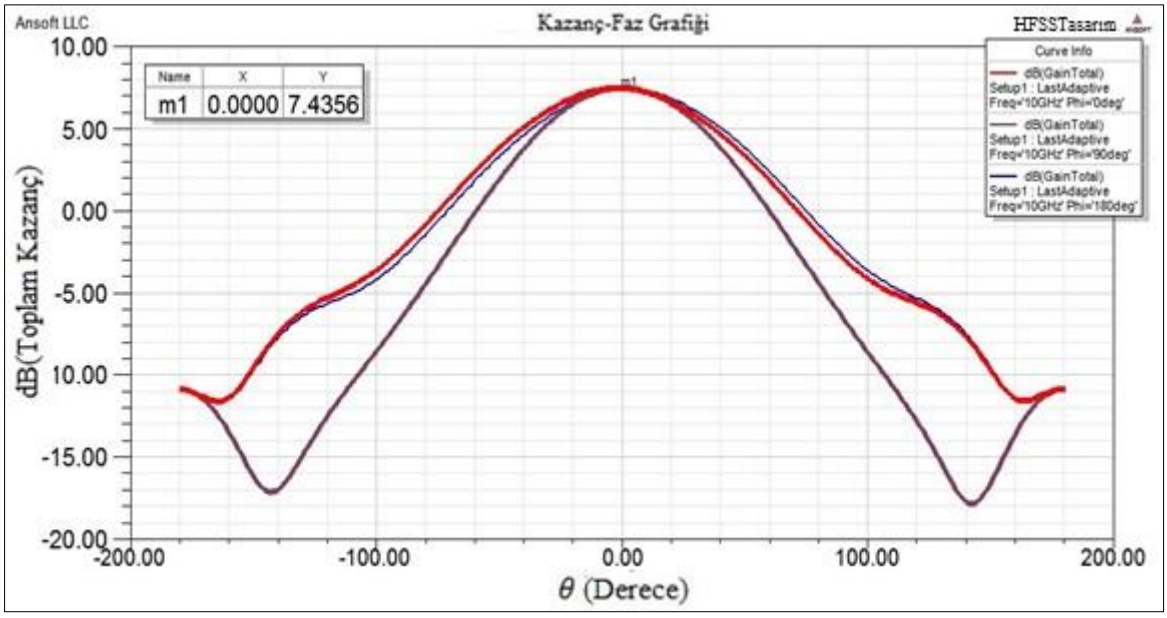
Şekil 4.13. S11-frekans grafiği

Şekil 4.13’te m1 değerlerine bakıldığında elde edilen en iyi antenin merkez frekansı 10 GHz, geri dönüş kaybı S11, -30,22 dB olduğu görülmüştür. Teorik yama antende merkez frekans 9,66 GHz, S11 değeri ise -10,65 dB ‘dir.

Teorik antene kıyasla elde edilen en iyi anten, geri dönüş kaybı ve istenilen merkez frekansı bakımından oldukça iyi sonuçlar vermiştir. S11 değerindeki bu büyük fark empedans uyumlamasının daha iyi yapıldığının ve böylelikle geri yansımaların azaltıldığının göstergesidir. Bu durumun kanıtı olarak VSWR değerinin 1 ile 2 arasında 1 değerine yakın olması beklenir.

Şekil 4.13'te m2 ve m3 değerlerine bakıldığında antenin bant genişliği anlaşılmıştır. Antenin bant genişliği merkez frekansın yaklaşık %3,34'üdür. Teorik yama antende bu değer %2,38'dir. Teorik antene göre elde edilen antenin bant genişliği daha fazladır, ancak bu bant genişliği için dar bant genişliği olduğu söylenebilir. Bu durum tipik mikroşerit antenlerin dar bant genişliğine sahip olduklarını gösterir. Dar bant genişliği bu tezin amacına uygun olduğundan %3,34 bant genişliği uygun görülmüştür.

Şekil 4.14'te elde edilen en iyi antenin kazanç parametresine ait simülasyon sonucu ortaya çıkan değerler verilmiştir.



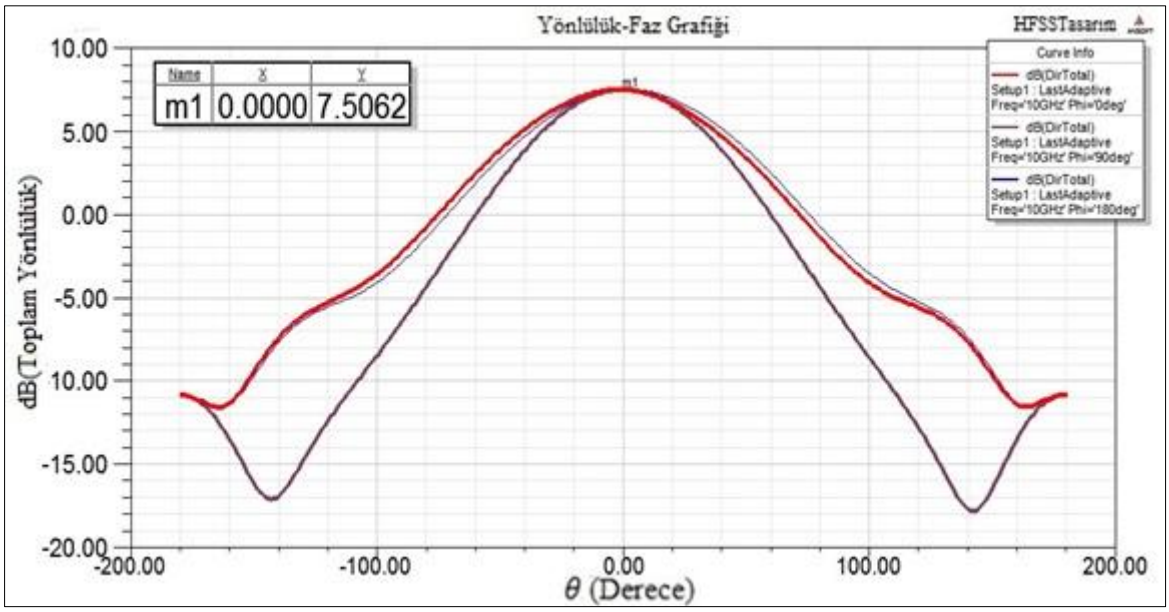
Şekil 4.14. Kazanç-faz grafiği

Şekil 4.14'de φ=0, φ=90° ve φ=180° olduğu noktalarda tüm θ açılarına karşılık gelen kazanç değerleri gösterilmiştir. θ=0° olduğu noktada maksimum kazanç olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 4.14'te m1 değerlerine bakıldığında θ=0°'de anten kazancının 7.43 dB olduğu görülmüştür. Bu değer teorik yama antende 4,62 dB'dir (Bkz Çizelge 4.3). Teorik yama antene göre simülasyonlar sonucu elde edilen en iyi yama antenin kazancı dB cinsinden yaklaşık %60 daha fazladır. Bu bakımdan anten kazancı olarak başarılı bir sonuç elde edilmiştir.

Şekil 4.14'te kazancın maksimum olduğu nokta m1'e bakıldığında θ=0° olması antenin ışımasında faz farkının olmadığını göstermektedir. Bu durum teorik antende de bu şekildedir. Işımadaki faz farkı farklı ihtiyaçlar doğurduğundan bu tezde tercih edilmemiştir. Bu bakımdan değerlendirildiğinde simülasyonlar sonucu elde edilen en iyi antenin performansı başarılı bulunmuştur.

Şekil 4.15'te elde edilen en iyi antenin yönlülük parametresine ait simülasyon sonucu ortaya çıkan değerler verilmiştir.



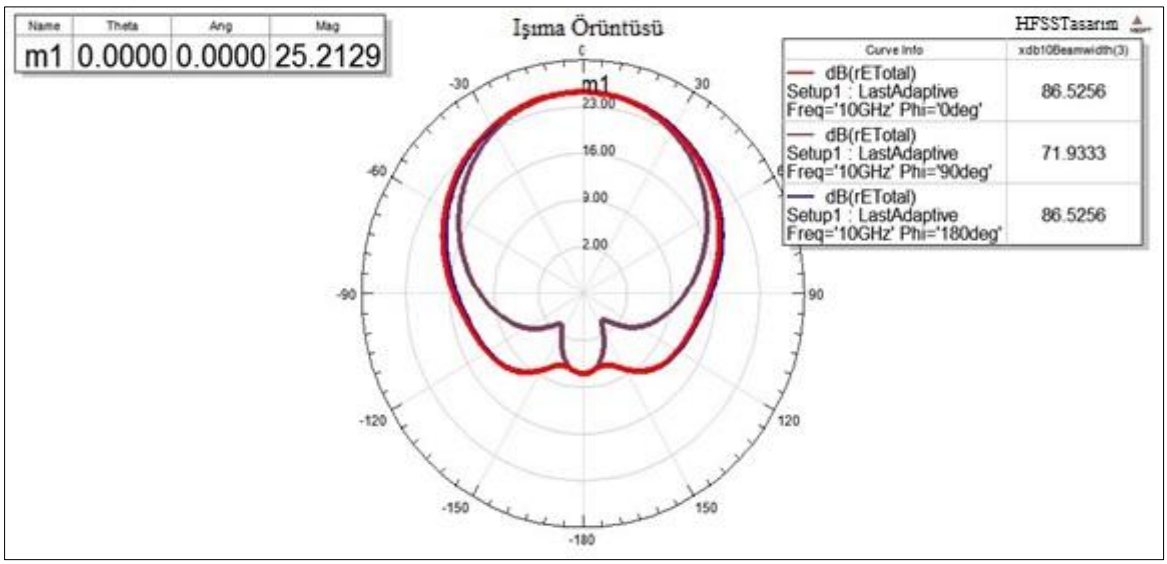
Şekil 4.15. Yönlülük-faz grafiği

Şekil 4.15'te tüm θ açıları için φ=0°, φ=90° ve φ=180° olduğu durumlardaki elde edilen en iyi antene ait yönlülükler faz açılarına göre gösterilmiştir. θ=0° iken anten maksimum yönlülüğe ulaşılmıştır. Şekil 4.15'te m1 ait değerlere bakıldığında anten yönlülüğünün 7.50 dB olduğu anlaşılmıştır.

Teorik olarak tasarlanan yama antende yönlülük 4.76 dB'dir (Bkz. Çizelge 4.3). Teorik yama anten göre elde edilen en iyi antende yönlülük bakımında yaklaşık dB cinsinden %57 kazanç sağlandığı anlaşılmıştır.

Bu bakımdan elde edilen en iyi yama antenin yönlülüğünde başarı elde edilmiştir. Tıpkı anten kazancında (Bkz. Şekil 4.14) olduğu gibi m1 değerlerine bakıldığında maksimum kazancın θ=0° olması anten ışımasında faz farkı olmadığını göstermektedir.

Şekil 4.14 ve 4.15'te tüm θ açılarına ait φ=0°, φ=90° değerlerindeki kazanç ve yönlülük bir anlam taşımaktadır. Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi tüm φ=0°, iken tüm θ açılarında antenin yataydaki deseni elde edilmiş olunur. φ=90° iken tüm θ açılarına ait düşeydeki ışın demeti elde edilir. Buradan yola çıkılarak elde edilen en iyi anten için yataydaki düzlemde ve düşeydeki düzlemde anten kazancı aynı olup, 7,43 dB'dir. Aynı durum bu antene ait yönlülük içinde geçerli olup; anten yönlülüğü 7,50 dB'dir.



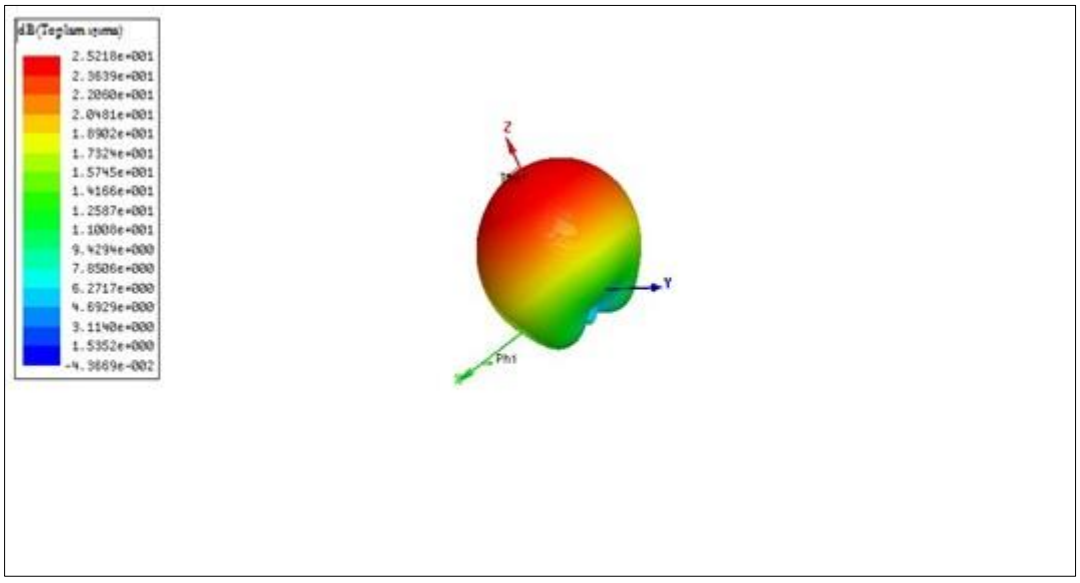
Şekil 4.16. Işıma örüntüsü-faz grafiği

Şekil 4.16'da elde edilen en iyi yama antene ait ışıma örüntüsü faz grafiği gösterilmiştir. Tüm θ açılarına ait φ=0°, φ=90° ve φ=180° açılarındaki genlik değerlerini içeren bu grafikte maksimum genliği θ=0° iken 25.21 dB olduğu görülmüştür. θ=0° iken maksimum genliğin oluşması anten ışımasında faz farkı olmadığının bir başka göstergesidir.

Teoik yama antene göre elde edilen en iyi yama anten genliği daha büyüktür. Teorik yama antenin ışıma genliği 21.47'dir. Bu durum elde edilen yama antenin teorik yama antene göre daha büyük bir ışıma sağladığını göstermiştir.

Şekil 4.16'dan φ=0° iken yatay eksende (xz) hüzme açısının (HPBW) 86,52° olduğu, φ=90° iken düşey eksen (yz) 71,93° olduğu görülmüştür. Teorik antende yataydaki ve düşeydeki açılar sırasıyla 89,02°, 87,68°'dir. Hüzme açıları bakımından iki anten değerlendirildiğinde elde edilen en iyi yama antenin yatayda yaklaşık 2,5°, düşeyde yaklaşık 15,75° daha dar hüzme açılarına sahip olduğu anlaşılmıştır. Dar hüzme uzak mesafeler için gerekli bir anten parametresidir. Bu bakımdan elde edilen en iyi antenin performansı teorik yama antene göre daha iyidir; ancak mikroşerit antenlerin tipik özelliklerinden biri olan geniş hüzme açılarına sahip olmaları elde edilen en iyi yama antende de görülmüştür. Buradan yola çıkarak elde edilen en iyi yama antenin de hüzme açısı geniştir sonucu çıkarılmıştır. Bu durum mikoşerit antenlerin uzak mesafe haberleşmelerinde neden dizi şeklinde kullanıldıklarını açıklayan sebeplerden biridir.

Şekil 4.17'de elde edilen en iyi yama antene ait üç boyutlu ışıma örüntüsü gösterilmiştir.

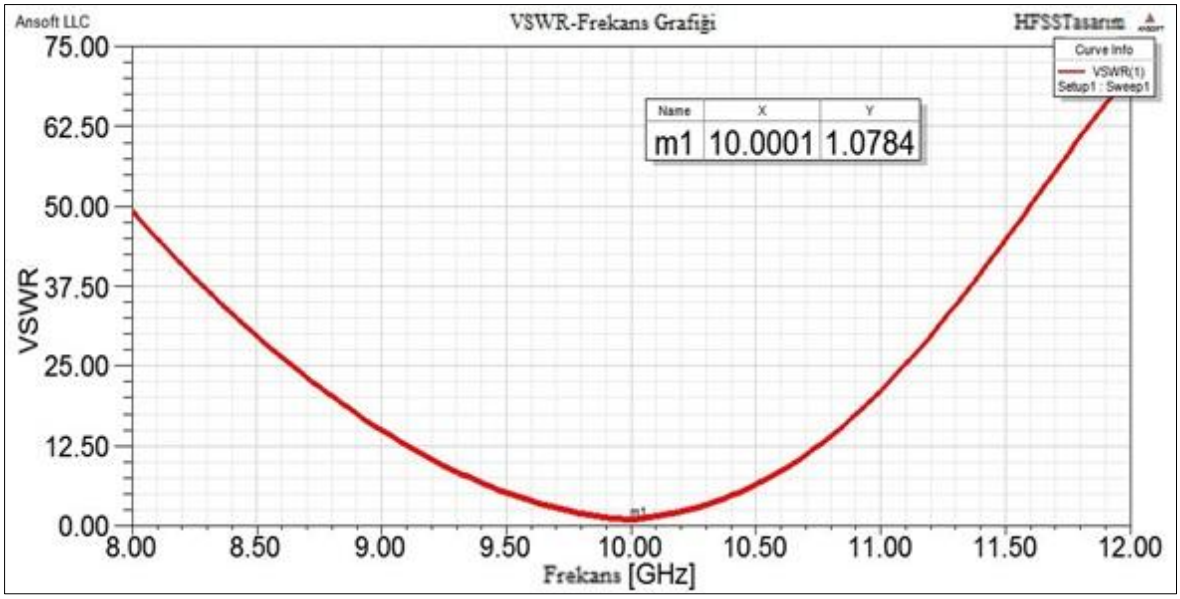


Şekil 4.17. Üç boyutlu ışıma örüntüsü

Şekil 4.17'e bakıldığında kırmızı renk ışımanın yoğun olduğunu yerleri göstermektedir. Bu nedenle ışıma z ekseninde olduğu anlaşılmıştır.

Kazanç, yönlülük ve ışıma genliklikleri kırmızı bölgelerde diğer bölgelere göre daha büyüktür. Şekil 4.17'den ışıma genliğinin 25,21 dB olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 4.18'de elde edilen en iyi antene ait VSWR frekans grafiği verilmiştir.



Şekil 4.18. VSWR-frekans grafiği

Şekil 4.18'de m1 değerlerine bakıldığında 10 GHz'de VSWR değeri 1.07'dır. İyi bir antenin VSWR değeri 1 ile 2 arasındadır. VSWR değeri 1 olduğunda geri yansıma olmaz. Bu bakımdan VSWR değeri 1'e ne kadar yakın ise o antende geri yansıma o kadar azdır ve empedans uyumlaması iyidir. Teorik yama antende 10 GHz'de VSWR değeri 2'den büyük olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 4.11). Elde edilen en iyi antenin VSWR performansı teorik yama antene göre çok daha iyidir.

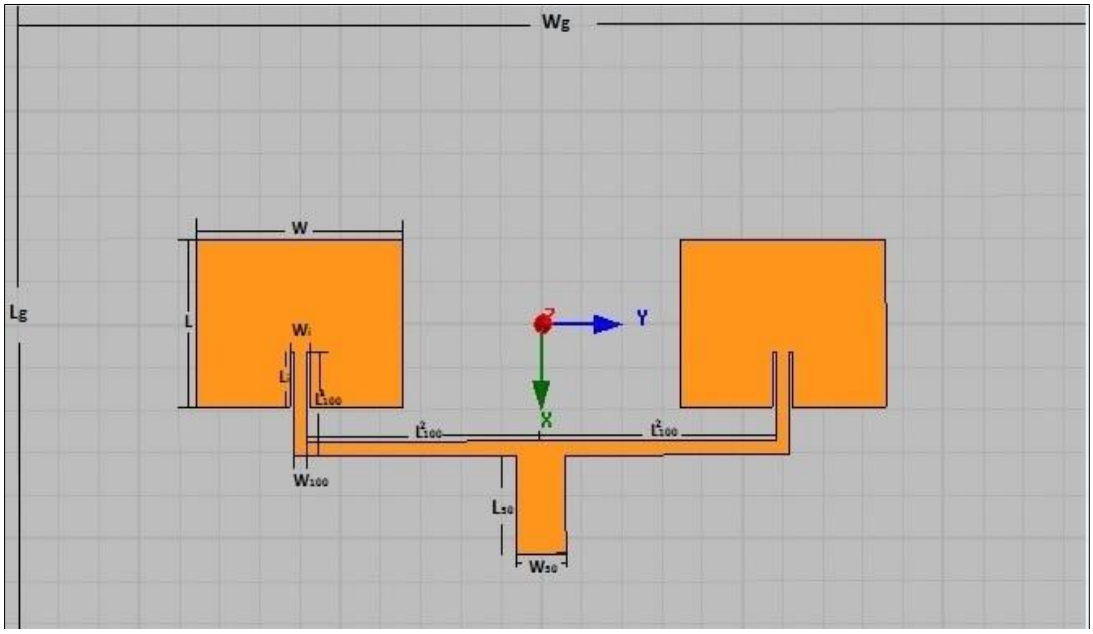
VSWR ile S11 arasındaki ilişki önceki bölümlerde anlatılmıştır. S11 değeri düştükçe VSWR değeri düşmekte, arttıkça VSWR değeri artmaktadır. Bu durum teorik yama antende ve elde edilen en iyi yama antende S11 ve VSWR değerlerine bakılarak görülmüştür. İyi bir antende S11 değerinin mümkün olduğunca -10 dB'nin altında çalışabiliyor olması, VSWR değerinin de çalışılabilir merkez frekanslarda 1 ile 2 arasında 1'e yakın olması istenmiştir. Bu bakımdan değerlendirildiğinde elde edilen en iyi yama anten teorik yama antene göre çok daha başarılı bulunmuştur.

4.2. 2x1 Yama Dizi Anten Tasarımı ve Analizi

Elde edilen en iyi tek yama anten boyutlarından yola çıkılarak en iyi 2x1 dizi yama anten elde edilmeye çalışılmış, dizi anten üzerinde yapılan değişiklikler sunulmuş ve sonuçları elde edilen en iyi tek yama anten ile karşılaştırılmıştır.

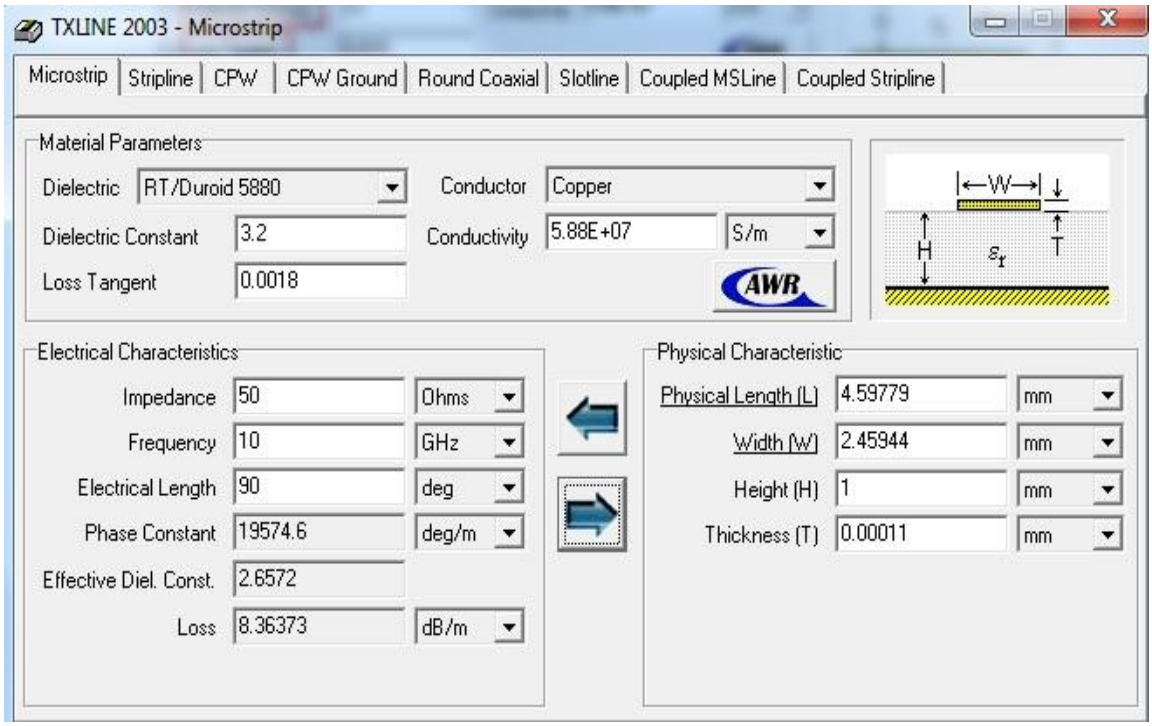
4.2.1. 2x1 dizi yama anten tasarımı

2x1 dizi yama anten tasarımı Şekil 4.19'de gösterilmiştir. Şekil 4.19'da tek bir yama anten için L uzunluğu, W genişliği, L_i girinti uzunluğu, W_i giriş empedans genişliği ile boşlukların oluşturduğu genişliği; L^1_{100} tek yama anten içerisine girinti yapan 100Ω empedansın için uzunluğu, W_{100} tüm 100Ω empedanslar için genişliği; L^2_{100} besleme ile yama antenler arasındaki iki taraflı 100Ω empedanslar için uzunluğu; L_{50} ve W_{50} besleme empedansı için 50Ω ait sırasıyla uzunluk ve genişliği; W_g ve L_g sırasıyla toprak tabakasının genişliği ve uzunluğunu ifade etmektedir. Bağıl geçirgenlik malzemenin genişliği ve uzunluğu tüm anten tasarımlarında olduğu gibi bu tasarımda da toprak tabaka ile aynı düşünülmüştür [3]. Ayrıca antenler arasındaki boşluk mesafesi olan d, her bir simülasyon için belirtilmiştir.



Şekil 4.19. 2x1 dizi yama anten taslağı

Şekil 4.19'da elde edilen en iyi anten boyutlarından faklı olarak L^2_{100}, L_{50} ve W_{50} boyutları yer almaktadır. Bu boyutlar belirlenirken TXLINE 2003 aracından faydalanılmıştır. Yalnız L^2_{100} uzunluğu belirlenirken antenler arası mesafe göz önünde bulundurulmuştur. Tüm 100Ω empedanslara ait genişlik değeri W_{100} 'dür. Bu bilgiler ışığında diğer boyutlardan faklı olarak L_{50} ve W_{50} boyutlarının TXLINE 2003 aracındaki hesaplanmış değerleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. L_{50} ve W_{50} değerlerini gösterimi

2x1 dizi yama anten için kullanılan tüm boyutlar Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Başlangıç boyutları için elde edilen en iyi tek yama antenin boyutlarına yakın antenler tercih edilmiştir. Bunun sebebi elde edilen en iyi tek yama antenin kazanç, yönlülük, geri dönüş kaybı gibi parametrelerde iyi performans göstermesi ve 10 GHz'de çalışıyor olmasıdır. Boyutlarda yapılan bu değişikliklerin sonuçları gözlemlenmiş ve en iyi 2x1 dizi yama anten elde edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan simülasyonlarda kazanç, yönlülük, geri dönüş kaybı, HPBW ve VSWR gibi önemli parametreler değerlendirilerek en iyi 2x1 dizi yama anten seçilmiş ve bu parametrelerin sonuçları sonraki bölümde sunulmuştur.

Çizelge 4.4. 2x1 dizi yama anten boyutları

2x1 dizi anten boyutları	W	L	L_i	W_i	L^1_{100}	W_{100}	L^2_{100}	L_{50}	W_{50}	Lg	Wg	d
Sim. 1 (mm)	10,2	7,7	2,65	1,3	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	35	50	13,75
Sim. 2 (mm)	10,3	7,85	2,65	1,3	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	35	50	13,75
Sim. 3 (mm)	10,25	7,8	2,65	1,3	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	35	50	13,75
Sim. 4 (mm)	10,25	7,8	2,65	1,3	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	50	50	13,75
Sim. 5 (mm)	10,25	7,8	2,65	1,3	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	45	13,75
Sim. 6 (mm)	10,25	7,8	2,65	1	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	55	13,75
Sim. 7 (mm)	10,25	7,8	2,65	1	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	35	45	13,75
Sim. 8 (mm)	10,25	7,8	2,65	0,8	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	45	13,75
Sim. 9 (mm)	10,2	7,8	2,65	0,9	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	45	13,75
Sim. 10 (mm)	10,2	7,8	2,65	0,92	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	55	13,75
Sim. 11 (mm)	10,2	7,8	2,65	0,92	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	65	16,5
Sim. 12 (mm)	10,2	7,8	2,65	0,8	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	65	16,5
Sim. 13 (mm)	10,2	7,8	2,65	0,92	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	65	15
Sim. 14 (mm)	10,2	7,8	2,65	0,92	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	35	55	15
Sim. 15 (mm)	10,2	7,8	2,65	0,92	4,83	0,65	11,675	4,6	2,45	30	55	15

Çizelge 4.4'te gerçekleştirilen 15 simülasyona ait 2x1 dizi yama anten boyutları verilmiştir. Burada boyutların değiştirilmesindeki amaç 10 GHz'de en iyi 2x1 dizi yama anten performasını elde etmektir. Bir sonraki bölümde Çizelge 4.5'te tüm simülasyonlara ait sonuçlar verilmiştir.

4.2.2. 2x1 dizi yama anten simülasyon ve analizi

Bu bölümde 2x1 dizi yama anten için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları 4 ana parametre etrafında değerlendirilmiştir. Seçilen en iyi 2x1 dizi yama antene ait önemli tüm parametreler ayrıntılı incelenmiş ve elde edilen en iyi tek yama anten ile kıyaslanmıştır. Çizelge 4.5'te 2x1 dizi yama antene ait simülasyon sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.5. 2x1 dizi yama antene ait simülasyon sonuçları

Simülasyonlar	S11 (dB)	Kazanç (dB)	Yönlülük (dB)	Merkez frekans (GHz)
Simülasyon 1	-15,54	9,49	8,43	10,1
Simülasyon 2	-18,2	9,18	9,26	9,9
Simülasyon 3	-16,2	9,31	9,39	10
Simülasyon 4	-23,36	8,73	8,97	9,2
Simülasyon 5	-16,56	9,68	9,75	10
Simülasyon 6	-33,35	9,84	9,78	10
Simülasyon 7	-26,32	10,13	10,17	10
Simülasyon 8	-18,42	9,92	9,98	10
Simülasyon 9	-27,02	9,81	9,9	10
Simülasyon 10	-32	10,13	10,22	10
Simülasyon 11	-25,14	10,30	10,38	10
Simülasyon 12	-21,68	10,50	10,44	10
Simülasyon 13	-36,02	10,35	10,41	10
Simülasyon 14	-30,28	9,92	10,02	10
Simülasyon 15	-32,74	9,61	9,68	10

Çizelge 4.5'de tüm simülasyonlar için antene ait parametreler inclendiğinde elde edilen en iyi yama anten boyutlarına yakın boyutlar ile simülasyonlara başlamanın önemi görülmüştür. Böylelikle ilk simülasyon çalışmasında istenilen sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiş ve bunun üzerinden değişikliklere devam edilmiştir. Simülasyon 5'te istenilen çalışma frekansı yakalanmıştır. Tıpkı tek yama antende yapılan boyutlardaki değişiklikler gibi 2x1 dizi yama anten içinde benzer değişiklikler yapılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta 100Ω (W_{100}) ve 50Ω (W_{50}) empdansların TXLINE 2003 aracında hesaplanan fiziksel genişlik değerlerinde değişiklik yapılmamasıdır; çünkü empedansların fiziksel genişliklerinde yapılan değişiklikler empedans uyumlamasını önemli ölçüde etkilemektedir.

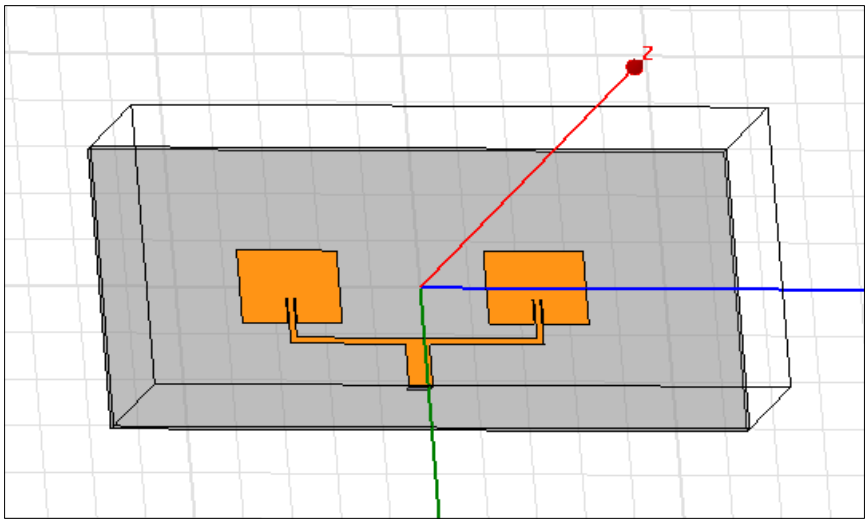
Tek yama anten tasarımından farklı olarak 2x1 dizi yama anten tasarımında antenler arası boşluk mesafe parametresi de yer almaktadır. Boşluk mesafesi bir tam dalga boyundan küçük olduğunda ($d< \lambda$) ana sinyal etrafında oluşacak yan sinyal seviyesi azalmaktadır [1]. Ayrıca yarım dalga boyundan küçük olması durumunda ($d< \lambda/2$) ise ışıma örüntüsünde tek bir ana sinyal meydana gelir ve yine yan sinyallerin seviyesi azaltılmış olur [1]. Tasarlanan tüm antenler 10 GHz'de çalıştırılmak istendiği için dalga boyu λ, 30 mm'dir. Bu bilgilerle d mesafeleri seçilmiş ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu durum tüm dizi yama anten tasarımlarında geçerlidir.

2x1 dizi yama anten tasarımı için L, W, L_i, W_i, L_g, W_g gibi bir çok parametre değiştirilerek tasarım boyutları çıkarılabilir ve simülasyonlar yapılabilir; ancak bu uzun zaman harcanmasını gerektiren bir çalışmadır. Bu bakımdan bu tezde sınırlı sayıda gerçekleştirilen bu simülasyonların sayısı arttırılarak daha iyi dizi yama anten sonuçları elde edilebilir. Bu durum bu tezde tasarlanan tüm dizi yama antenler için geçerlidir.

Çizelge 4.5'e bakıldığında simülasyon 5 ve sonrasındaki tüm simülasyonlarda merkez frekansın 10 GHz olduğu görülmüştür. Buradaki antenler içinde kazanç ve yönlülük bakımından en iyi performansın simülasyon 12'de olduğu görülmüştür. Simülasyon 12'deki kazanç ve yönlülük değerlerin en yakın değerler simülasyon 13'te görülmüştür. İki simülasyon sonuçları arasındaki belirgin fark geri dönüş kaybında görülmüştür. Simülasyon 12'de S11 değeri -21,68 dB iken, simülasyon 13'te bu değer -36,02 dB'dir.

Geri dönüş kaybı bakımından simülasyon 13 simülasyon 12'ye göre çok daha iyi performans göstermiştir; kazanç ve yönlülük değerlerine bakıldığında ise sırasıyla 0,15 dB ve 0.03 dB gibi farklar olduğu görülmüştür.

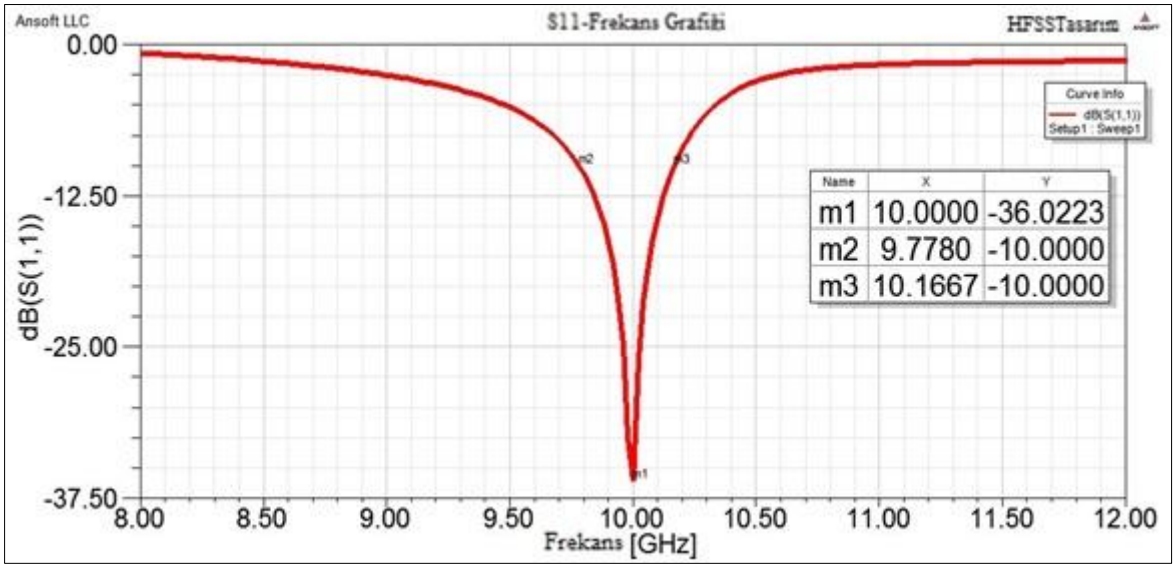
Simülasyon 12 ile simülasyon 13 arasında kazanç ve yönlülük değerleri bakımından çok küçük farkların olması ve S11 değerinde simülasyon 13'ün simülasyon 12'ye göre dB cinsinden yaklaşık %66 daha iyi performans gösterdiği için elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten olarak simülasyon 13'te tasarlanan anten düşünülmüştür. Şekil 3.21'de elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten gösterilmiştir.



Şekil 4.21. En iyi 2x1 dizi yama anten

Simülasyon 13'e ait kazanç, yönlülük, S11, VSWR, hüzme açısı, ışıma örüntüsü gibi parametre sonuçları bu bölümde analiz edilmiş ve sunulmuştur. Ayrıca elde edilen en iyi tek yama anten ile elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten parametre sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.22'te 2x1 dizi yama antene ait geri dönüş kaybı frekans grafiği verilmiştir.



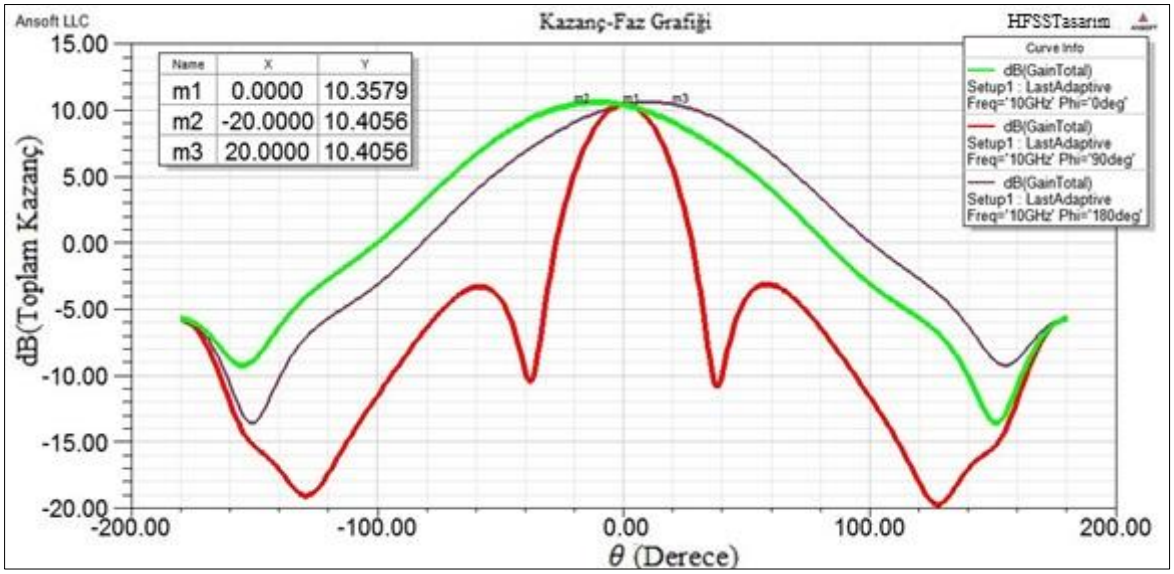
Şekil 4.22. S11-frekans grafiği

Şekil 4.22'te m1 değerlerine bakıldığında 2x1 dizi yama antenin merkez frekansının 10 GHz, S11 değerinin -36,02 dB olduğu görülmüştür.

Elde edilen en iyi tek yama antende S11 değeri -30,22 dB'dir. Geri dönüş sinyali bakımından 2x1 dizi yama anten performansı elde edilen en iyi tek yama antene göre daha iyidir. Buradan 2x1 dizi yama antende empedans uyumlaması elde edilen en iyi tek yama antene göre daha iyidir denebilir. Ayrıca VSWR parametresi bakımından 2x1 dizi yama antenin elde edilen en iyi yama antene göre daha iyi performans vermesi beklenmiştir. Bu parametre incelendiğinde ayrıntılı anlatılacaktır.

Şekil 4.22'te m2 ve m3 değerlerine bakıldığında çalışılabilir frekansların 9,7780 GHz ile 10,1667 GHz olduğu görülmüştür. Buradan 2x1 dizi yama antenin bant genişliğinin %3,88 olduğu hesaplanmıştır. Elde edilen en iyi tek yama antenin bant genişliği %3,34'dır. İki bant genişliği kıyaslandığında elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antenin bant genişliği daha fazladır. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antenin bant genişliği dar bant genişliği olarak değerlendirilmiştir [1].

Şekil 4.23'te elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antenin kazanç parametresine ait simülasyon sonucu ortaya çıkan değerler verilmiştir.



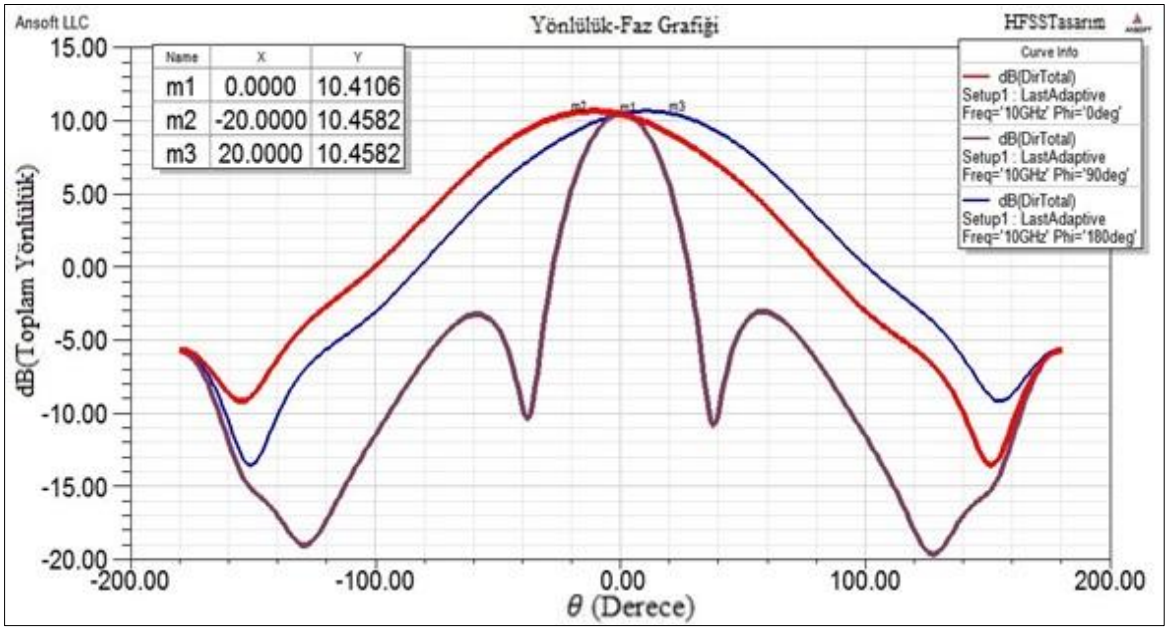
Şekil 4.23. Kazanç-faz grafiği

Şekil 4.23'te faz açılarına bağlı olarak kazanç değerleri gösterilmiştir. m2 değerlerinden anlaşılacağı üzere θ=20° iken φ=20°'de yani yatay düzlemde maksimum kazanç elde edilmiştir.

Bu değer yaklaşık 10,40 dB'dir. m1 değerlerinden anlaşılacağı üzere θ=0° ve φ=0° durumunda kazanç 10,35 dB'dir. Buradan çıkarılacak sonuç 2x1 dizi yama antende yatay düzlem için 20°'lik bir faz kayması olduğudur; ancak kazanç değerlerine bakıldığında fark yaklaşık 0.05 dB kadardır. Bu fark oldukça küçük olduğundan faz farkı görmezden gelinmiştir. θ=0°ve φ=90° iken yani düşey düzlemde m1 değerlerinden anlaşılacağı üzere anten kazancı 10,35 dB'dir. Düşey düzlemde faz farkı görülmemiştir. Elde edilen en iyi tek yama antende yatay ve düşey düzlemlerde faz farkı görülmemiştir. Bu bakımdan elde edilen en iyi yama anten faz farkı performansı 2x1 dizi yama antene göre daha iyi olduğu söylenebilir.

Elde edilen en iyi dizi ve tek yama antenler kazanç yönünden karşılaştırıldığında yaklaşık 3 dB'lik fark olduğu görülmüştür. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten iki tane özdeş yama antenden oluştuğundan anten boyutu en iyi yama antenin yaklaşık 2 katıdır. Bu durum hesaplandığında 10log2 = 3 olduğundan 3 dB'lik farkın temel sebebi anlaşılmıştır.

Şekil 4.24'te elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antenin yönlülük parametresine ait simülasyon sonucu ortaya çıkan değerler verilmiştir.



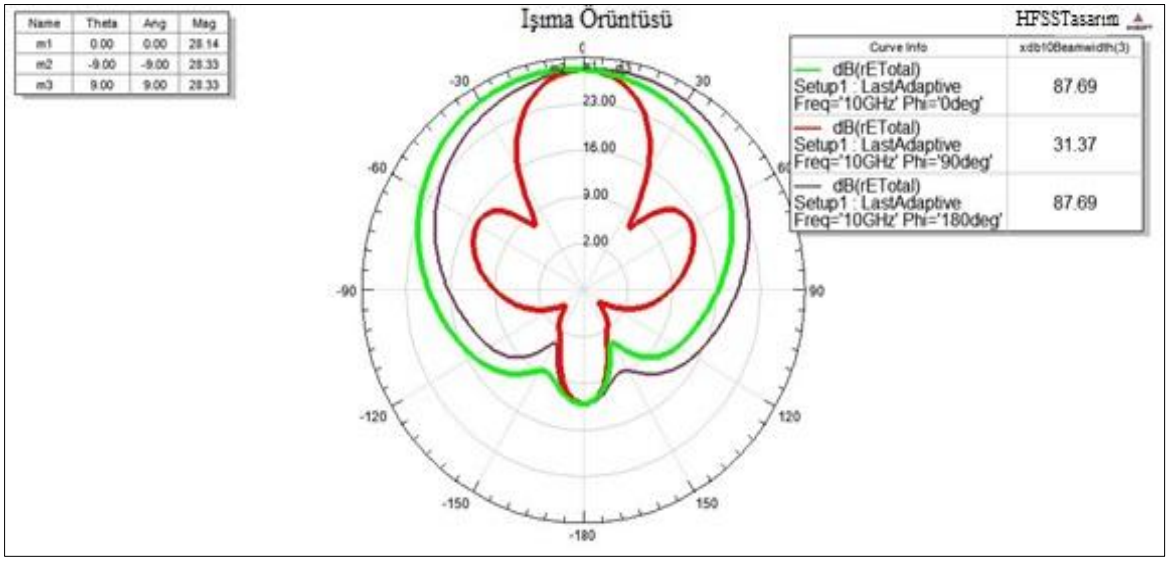
Şekil 4.24. Yönlülük-frekans grafiği

Şekil 4.24'te tüm θ açıları için φ=0°, φ=90° ve φ=180°'de elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antene ait yönlülük değerleri verilmiştir.

Bu değerlere bakıldığında yatay düzlemde yani θ=20° için φ=0°, iken anten yönlülüğü m2 değerlerinden anlaşılacağı üzere 10,45 dB'dir. Burada 20°'lik bir faz farkı olduğu bir kez daha anlaşılmıştır. θ=0° ve φ=0° iken anten yönlülüğü 10,41 dB 'dir. Bu iki değer arasında 0.04 dB fark bulunduğundan bu dizi yama antendeki faz farkı görmezden gelinmiştir; başka bir ifade ile faz farkını ortadan kaldırmaya gerek yoktur. Düşey düzlemde yani θ=0° ve φ=90° iken anten kazancı m1 değerlerinden anlaşılacağı üzere 10,41 dB'dir.

Elde edilen en iyi tek yama antende yatay ve düşey düzlemlerde faz farkı yoktur. Bu bakımdan elde edilen en iyi 2x1 dizi yma antene göre elde edilen en iyi tek yama anten daha başarılıdır. Kazanç değerlerine bakıldığında tek yama antende 7,50 dB, 2x1 dizi yama antende 10,41 olduğunu görülmüştür. Bu bakımdan 2x1 dizi yama anten, elde edilen tek yama antene göre daha başarılıdır. Bu durumun temel sebebi tıpkı kazançta olduğu gibi dizi antende özdeş 2 yama anten kullanılmasıdır.

Şekil 4.25'te elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antenin ışıma örüntüsüne ait simülasyon sonucu ortaya çıkan değerler verilmiştir.



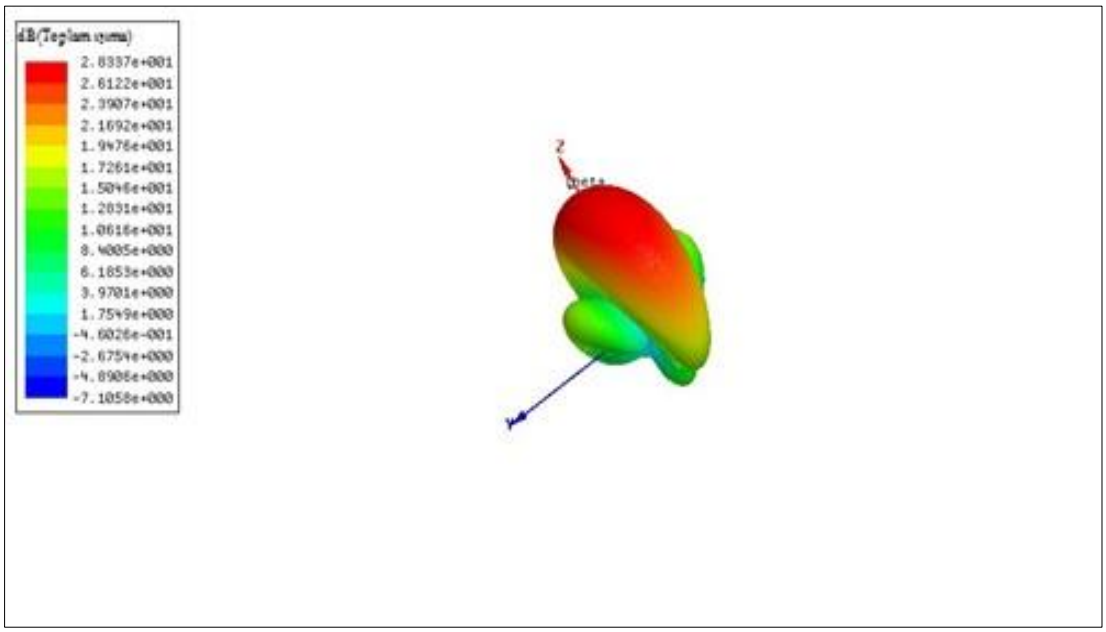
Şekil 4.25. Işıma örüntüsü

Şekil 4.25'ten anlaşılacağı üzere yatay düzlemde 20°'lik faz farkı bulunmaktadır; ancak θ=0° ve θ=9° iken ışıma şiddeti genlikleri farkı m1 ve m2 ya da m3 değerlerinden anlaşılacağı üzere yaklaşık 0,2 dB'dir. Bu nedenle tasarlanan bu antende faz farkının bir önemi yoktur. Düşey düzlemde faz farkı görülmemiştir.

Elde edilen en iyi tek yama anten ile bu dizi anteni yatay ve düşey düzlem θ=0° iken karşılaştırıldığında genlik değerlerinde kazanç ve yönlülük değerlerinde olduğu gibi 3 dB'lik fark görülmüştür. Bu farkın da temel sebebi 2x1 dizi yama antenin tek yama antenin boyutunun 2 katı olmasıdır.

Şekil 4.25'te elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antende yatay ve düşey düzlemde hüzme açılarına bakıldığında yatayda 87.69°, düşeyde 31,37° hüzme açıları görülmüştür. Elde edilen en iyi tek yama antende yatay düzlemdeki hüzme açısı 86,52°, düşey düzlemde 71,93° 'dir. Yatay düzlemde edilen en iyi tek yama antenin 2x1 dizi antene göre daha dar bir hüzmeye sahip olduğu görülmüştür. Bu bakımdan tek yama anten daha başarılıdır. Düşey düzlemde 2x1 dizi yama anten 31,37° hüzmeye sahip iken, tek yama anten 71,93° hüzmeye sahiptir. Bu bakımdan düşey düzlemde 2x1 dizi yama anten daha başarılı bulunmuştur. Mikroşerit antenlerin hüzme açıları geniş olduğundan dizi yama antenlerde kullanılan yama anten sayısı arttıkça hüzme açıları düşer. Bu sebeple dizi yama antenlerde dar hüzme açıları elde etmek için daha fazla yama anten kullanılır.

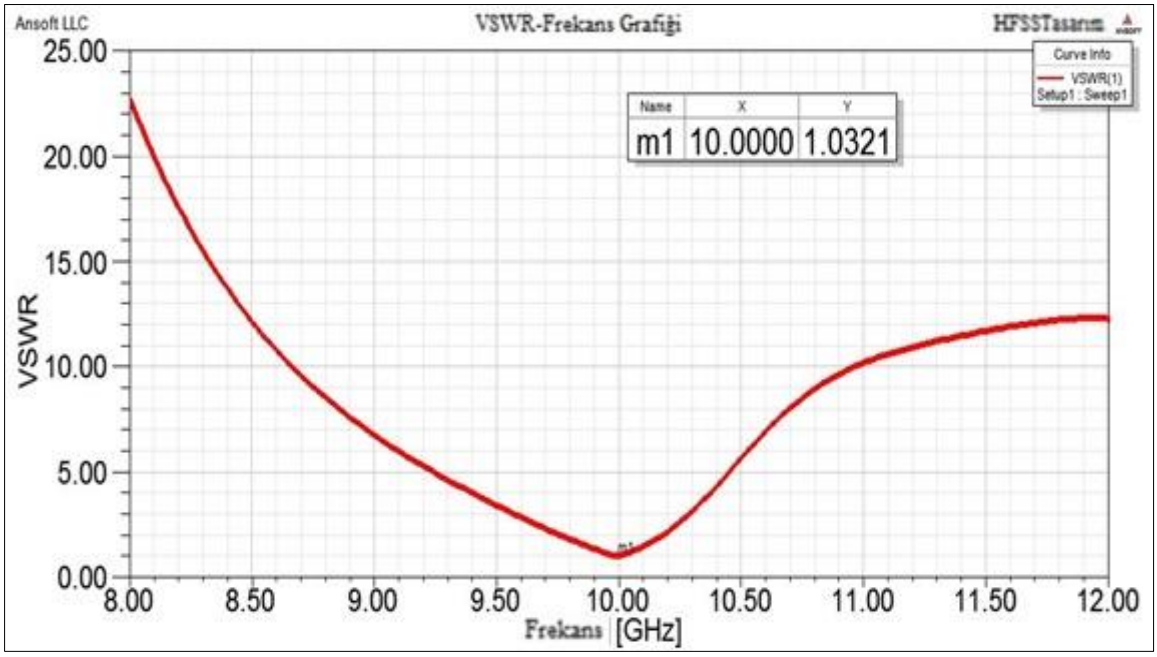
Şekil 4.26’da elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antenin ışıma örüntüsünün üç boyutlu simülasyon gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Üç boyutlu ışıma örüntüsü

Şekil 4.26’de ışımanın z ekseninde olduğu anlaşılmıştır. Maksimum ışıma genliği yaklaşık 28,3 dB olduğu görülmüştür. Bunun sebebi 9°’de tüm yönlere göre maksimum ışımanın olmasıdır.
Buradan faz farkının olduğu doğrulanmıştır. θ=0° ve θ=9° ışıma genliklerinin farkının 0.2 dB olduğu ve bu faz farkının göz ardı edilebileceği daha önce de belirtilmiştir.

Şekil 4.27’da elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antenin VSWR parametresine ait simülasyon sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4.27. VSWR-frekans grafiği

Şekil 4.27'de m1 değerlerinden anlaşıldığı gibi 10 GHz'de VSWR değerinin 1,03 olduğu anlaşılmıştır. Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi iyi bir antenin VSWR değeri 1 ile 2 değerleri arasında olması istenir. VSWR değeri 1'e yaklaştıkça anten performansı artar. Bu bakımdan elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antende oldukça iyi bir performans elde edilmiştir. Böylelik empedans uyumlamasının bu antende iyi yapıldığı anlaşılmıştır.

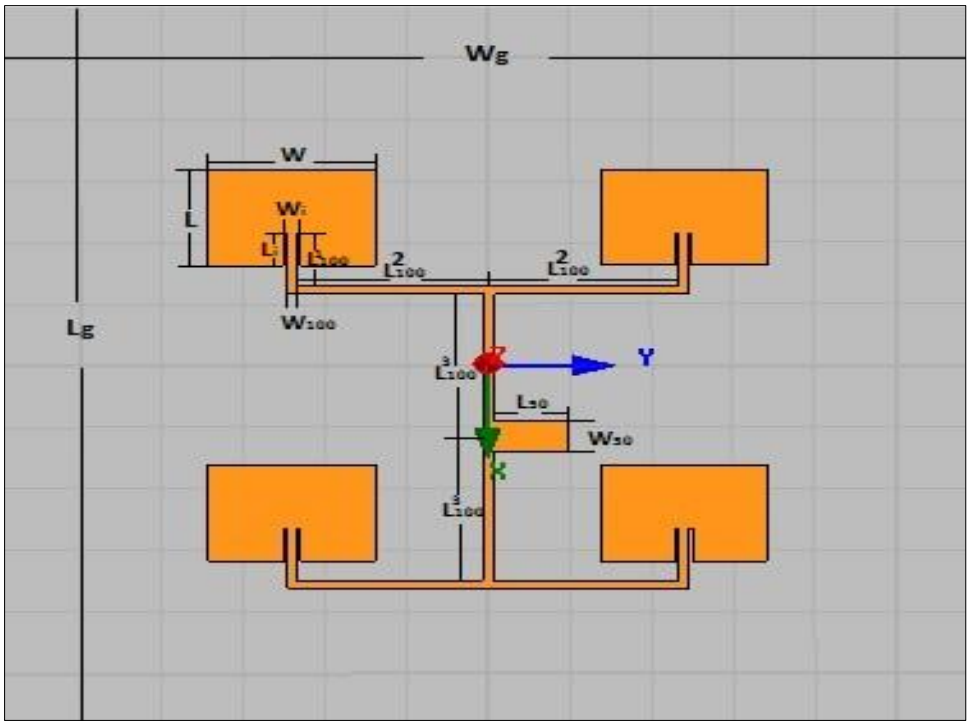
Elde edilen en iyi tek yama antende VSWR değeri yaklaşık 1,07'dır. Bu değer bir anten için oldukça iyi bir VSWR değeridir. Elde edilen en iyi 2x1 dizi antenin VSWR performansı tek yama antene göre daha iyidir; ancak iki anten de oldukça iyi VSWR değerlerine sahiptir.

4.3. 2x2 Yama Dizi Anten Tasarımı ve Analizi

Elde edilen en iyi tek yama anten ve en iyi 2x1 dizi yama anten boyutlarından yola çıkılarak en iyi 2x2 dizi yama anten elde edilmeye çalışılmış, dizi anten üzerinde yapılan değişiklikler sunulmuş ve sonuçları 2x1 dizi yama anten ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1. 2x2 yama dizi anten tasarımı

2x2 dizi yama anten için tasarlanan anten taslağı aşağıda Şekil 3.29'da gösterilmiştir. Şekil 4.28'den de anlaşılacağı gibi bu antenin 2x1 dizi anten boyutlarından farkı L^3_{100} boyutlarının olmasıdır. 2x1 dizi yama antende L^2_{100} yatay eksendeki antenler arası boşluk mesafesi göz önünde bulundurularak belirlenirken, 2x2 dizi yama antende L^3_{100} boyutları düşey eksende antenler arasındaki boşluk mesafesi düşünülerek belirlenmiştir. Yama antenler arasında düşey ve yatay eksendeki boşluk mesafeleri her simülasyon için verilmiştir.



Şekil 4.28. 2x2 dizi yama anten taslağı

İyi bir tasarım ile dizi yama antenlerde kullanılan yama anten sayısı arttıkça anten kazancı yönlülüğü artar, hüzme açısı küçülür. Uzak mesafe haberleşmeleri için yüksek kazanç, yüksek yönlülük, dar hüzme açısı önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin yanında iyi bir anten performansı için S11, VSWR, merkez frekansı gibi parametreler de olmazsa olmazlardandır. Burada da 2x2 dizi yama anten tasarımları ile kazanç, yönlülük, hüzme açısı gibi parametre değişimleri gözlemlenmiştir. Bunların yanında diğer önemli parametreler de incelenmiştir.

2x2 dizi yama anten için anten boyutları ve bu boyutlardaki yapılan değişiklikler Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. 2x2 dizi yama anten boyutları

2x2 anten boyutları	Sim.1 (mm)	Sim.2 (mm)	Sim.3 (mm)	Sim.4 (mm)	Sim.5 (mm)	Sim.6 (mm)	Sim.7 (mm)	Sim.8 (mm)	Sim.9 (mm)	Sim.10 (mm)
W	10,25	10,25	10,25	10,25	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15
L	7,8	7,8	7,8	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
L_i	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
W_i	1	1	1	1,1	1,1	0,92	0,92	0,92	0,97	1,4
L^1_{100}	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
W_{100}	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
L^2_{100}	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
L^3_{100}	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
L_{50}	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
W_{50}	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
W_g	80	70	80	80	80	70	80	50	50	50
L_g	80	70	45	45	45	45	55	65	65	65
d_1	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
d_2	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45

Çizelge 4.6'da d_1 yatay eksende yama antenler antenler arasındaki boşluk mesafesini, d_2 ise düşey eksendeki boşluk mesafesini ifade etmektedir. L^2_{100} ve L^3_{100} boyutları sırasıyla d_1 ve d_2 boşluk mesafleri göz önüne alınarak ortaya çıkan değerlerdir. Bu değerlerin dışında Çizelge 4.6'da gösterilen tüm boyutlar önceki bölümlerde anlatılmıştır. 2x2 dizi yama anten üzerinde yapılan tüm değişiklikler sonucu ortaya çıkan simülasyon sonuçları bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

4.3.2. 2x2 dizi yama anten simülasyon ve analizi

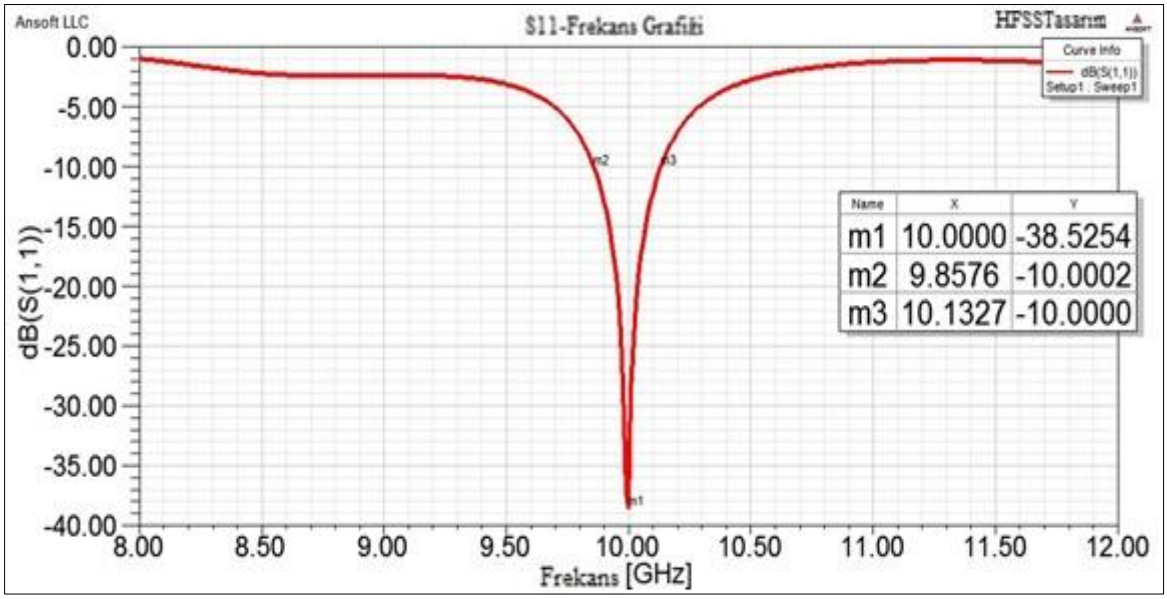
Bu bölümde Çizelge 4.6'da gösterilen boyutlarda 2x2 dizi yama anten simülasyon sonuçları incelenmiştir. Tüm 2x2 dizi yama antenler öncelikle kazanç, S11, yönlülük ve

merkez frekans parametreleri etrafında değerlendirilmiştir. Bu bakımdan tüm simülasyon sonuçları Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Bu simülasyonlardan en iyi parametrelere sahip 2x2 dizi yama anten seçilmiş ve analizi tıpkı önceki bölümlerde tasarlanan antenlerde olduğu gibi önemli anten parametreleri bakımından incelenmiştir. Ayrıca elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.7. 2x2 dizi yama antene ait simülasyon sonuçları

Simülasyonlar	S11 (dB)	Kazanç (dB)	Yönlülük (dB)	Merkez frekans (GHz)
Simülasyon 1	-16,48	11,60	11,62	10
Simülasyon 2	-15,84	11,93	11,99	10,1
Simülasyon 3	-16,76	13,36	13,49	10,1
Simülasyon 4	-16,56	13,06	13,2	9,9
Simülasyon 5	-16,20	13,09	13,22	10
Simülasyon 6	-45,51	13,21	13,34	10
Simülasyon 7	-36,30	13,38	13,48	10
Simülasyon 8	-38,52	13,43	13,55	10
Simülasyon 9	-18,03	13,03	13,14	9,9
Simülasyon 10	-14,35	13,14	13,27	9,9

Çizelge 4.7'de simülasyon sonuçları incelendiğinde simülasyon 6, simülasyon 7 ve simülasyon 8'de kazanç, yönlülük, S11 ve merkez frekans bakımından diğer simülasyonlara göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu üç simülasyonda S11 değeri bakımından oldukça yeterli ve iyi performans göstermiştir. Ayrıca üç antenin de merkez frekansı 10 GHz'dir. En iyi 2x2 dizi yama anten için kazanç ve yönlülük parametrelerine bakılarak karar verilmiş ve simülasyon 8'deki anten tercih edilmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur. Simülasyon 8'e ait geri dönüş kaybı frekans grafiği Şekil 4.29'da verilmiştir.

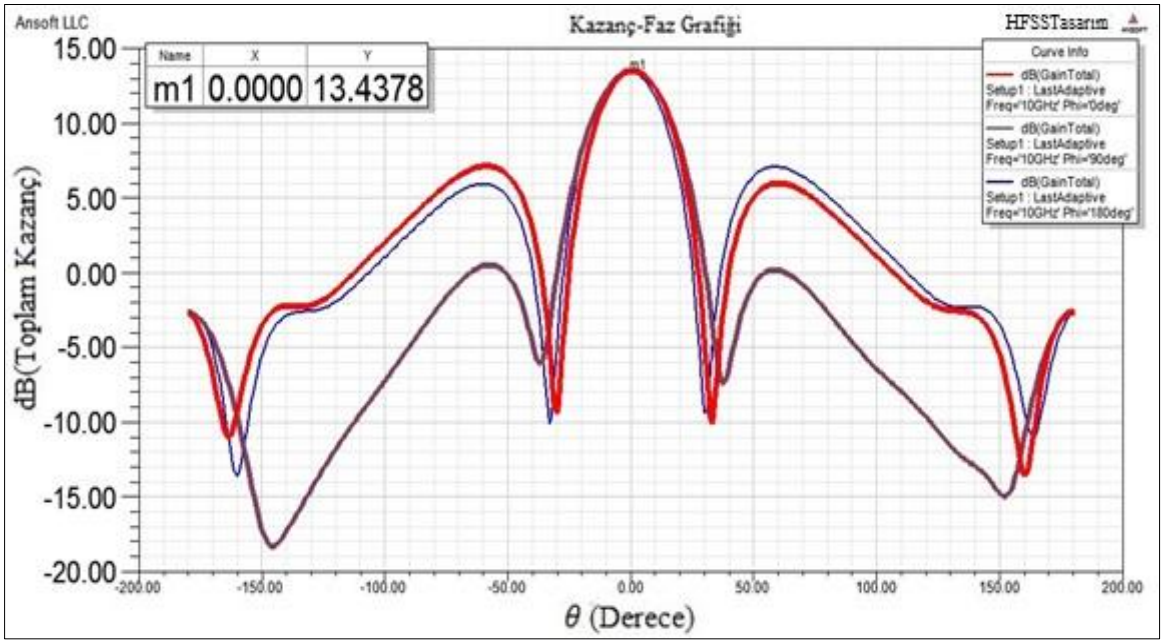


Şekil 4.29. S11-frekans grafiği

Şekil 4.29'da m1 değerlerine bakıldığında 2x2 dizi yama antenin merkez frekansının 10 GHz, geri dönüş kaybının -38,52 dB olduğu görülmüştür. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antende S11 değeri -36,02 dB'dir (Bkz. Şekil 4.22). Bu iki anten S11 değerleri yönünden değerlendirildiğinde iki anteninde performansının iyi olduğu, elde edilen en iyi 2x2 dizi antenin 2x1 dizi antene göre 2 dB daha iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır. Buradan bu iki antenin VSWR değerlerinde de benzer bir performans göstereceği anlaşılır.

Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antenin bant genişliği Şekil 4.29'da m2 ve m3 değerlerinden hesaplanmıştır. Bu antenin bant genişliği yaklaşık %2,75'dür. Bu değer bu antenin dar bir bant genişliğine sahip olduğunu göstermektedir [1]. Elde edilen en iyi dizi 2x1 yama antenin bant genişliği %3,88'dir. Bu iki anten karşılaştırıldığında 2x2 dizi yama antenin daha dar bant genişliğine sahip olduğu görülmüştür. Mikoşerit antenlerin tipik özelliklerinden olan dar bant genişliği, elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende de görülmüştür. Dar bant genişliği bu tezde tasarlanan antenlerde olması gereken özelliklerdendir.

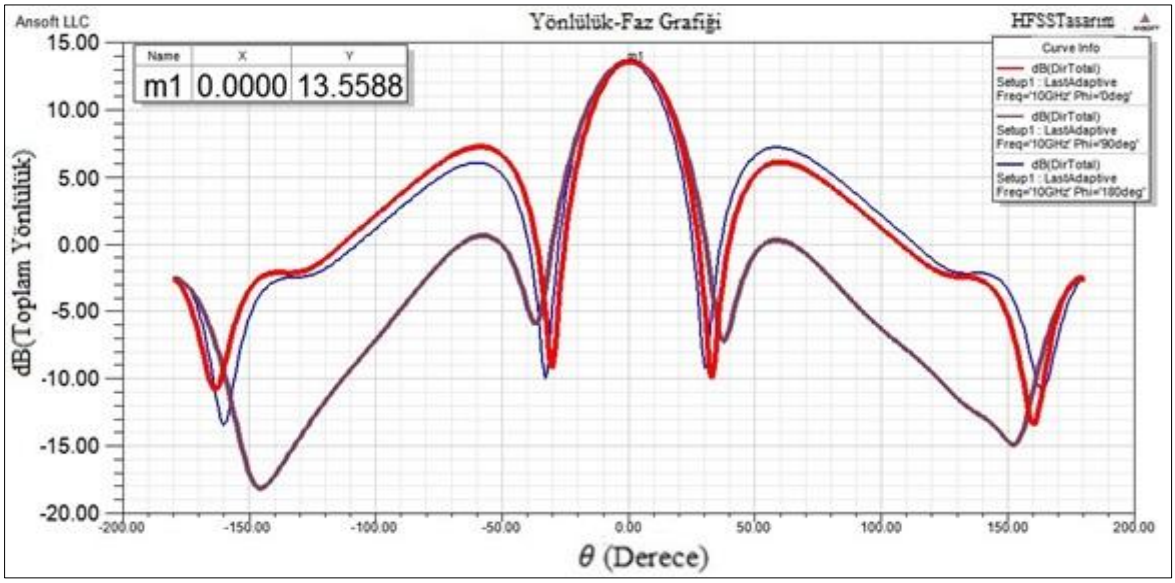
Şekil 4.30'da elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antene ait kazanç-faz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.30. Kazanç-faz grafiği

Şekil 4.30'a bakıldığında m1 değerlerinden antenin merkez frekansının 10 GHz, kazancının 13,43 dB olduğu görülmüştür. θ=0° ve φ=0°, φ=90° ve φ=180° iken kazancın yine 13,43 dB olduğu anlaşılmıştır. Buradan anten ışımasının ana hüzmesinin 0° fazında olduğu, dolayısıyla yatay ve düşey eksende faz farkı olmadığı anlaşılmıştır. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antenin anten kazancı 10,35 dB olarak belirlenmiş, yatay düzlemde 20°'lik faz görülmüştür. Bu faz farkı 2x1 dizi yama anten için kazançta bir fark yaratmamıştır. Sonuç olarak kazançlar karşılaştırıldığında kazançta 2x2 dizi yama anten 2x1 dizi yama anten göre yaklaşık 3 dB daha kazançlı olduğu görülmüştür. Faz farkı bakımdan da 2x2 dizi yama anten istenildiği gibi yatayda ve düşeyde θ=0°'de maksimum kazanç sağlarken, 2x1 dizi antende maksimum kazanç θ=20°'de olduğu görülmüştür.

Şekil 4.31'de elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antene ait yönlülük-faz sonuçları verilmiştir.

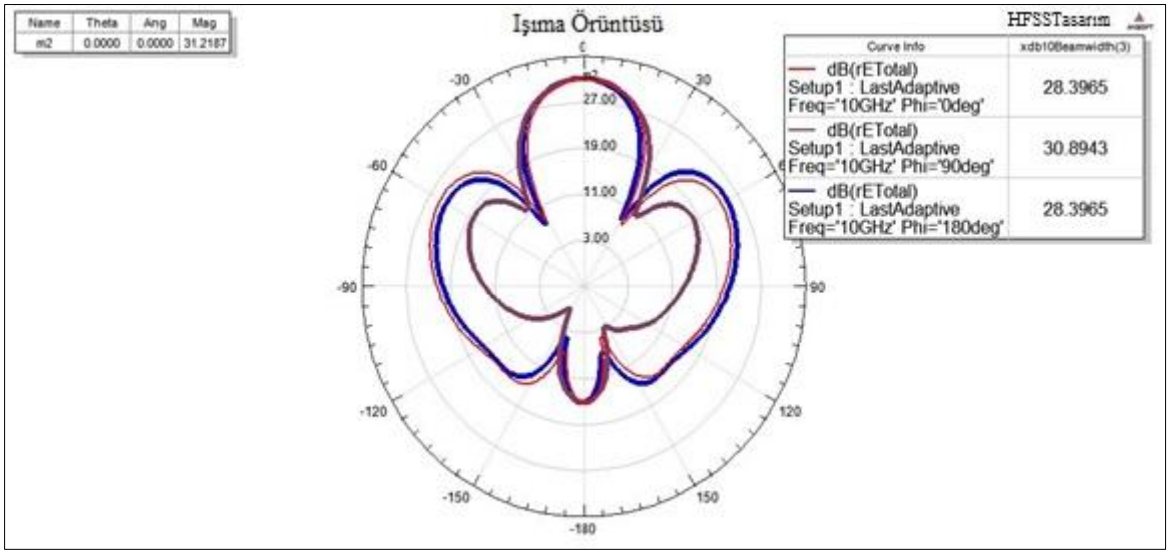


Şekil 4.31. Yönlülük-faz grafiği

Şekil 4.31'de maksimum yönlülüğün m1 değerlerinden anlaşılacağı gibi φ=0°, φ=90° ve φ=180°'de θ=0° iken 13,55 dB olduğu görülmüştür. Buradan yatay ve düşey düzlemde faz farkı olmadığı anlaşılmıştır. Şekil 4.31'de merkez frekansın 10 GHz olduğu bir başka sonuçtur. Elde edilen 2x1 dizi yama antende yatay düzlemde θ=0° ve φ=0°, φ=90° iken yönlülük 10,41 olarak belirlenmiştir. Bu iki antenin yönlülük olarak kıyasladığımızda 2x2 dizi yama antenin yaklaşık 3 dB'lik büyük bir yönlülüğe sahip olduğu anlaşılmıştır.

Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten ile elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende kazanç ve yönlülük bakımdan beklenildiği gibi farkların oluştuğu söylenebilir. Her iki parametrede de 3 dB'lik bir fark görülmüştür. Bu fark kullanılan yama anten sayısı dolayısıyla ışıma yoğunluğu ve ortalama ışıma yoğunluğu ile ilişkilidir. İyi tasarlanmış dizi yama antende yama anten sayısı arttıkça kazanç ve yönlülük artar. Bu bakımdan uzak mesafe uygulamalarında istenen yüksek kazanç ve yönlülük için dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttırılır.

Şekil 4.32'de elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antene ait ışıma örüntüsü sonuçları verilmiştir.

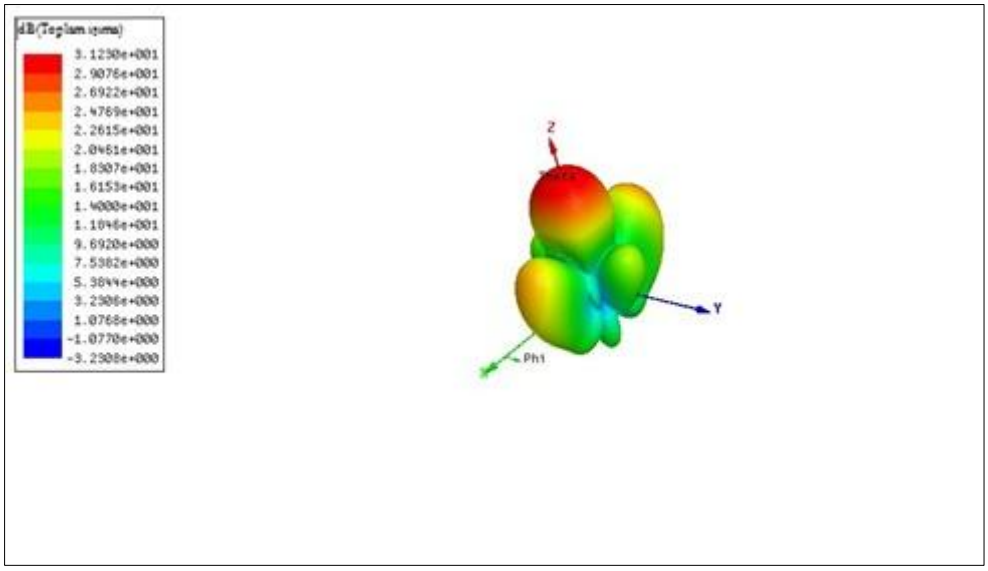


Şekil 4.32. Işıma örüntüsü

Şekil 4.32'de θ=0° ve φ=0°, φ=90° ve φ=180° iken ışıma genliği m1 değerlerinden anlaşılacağı gibi yaklaşık 31.2 dB'dir. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antende bu değer 21,1 dB olarak görülmüştür. Işıma şiddeti bakımından 3 dB'lik fark olduğu görülmüştür. Bu fark anten sayısıyla doğrudan ilişkilidir. Buradan iyi tasarlanmış dizi antenlerde anten sayısı arttıkça ışıma şiddetinin arttığı söylenebilir. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'den de anlaşıldığı gibi Şekil 4.32'de anten ışımasında faz farkı görülmemiştir. Maksimum ışıma yatay ve düşey düzlemde θ=0° iken gerçekleşmiştir.

Şekil 4.32'den yataydaki hüzme açısının 28,39°, düşeyde 30,89° olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten için yataydaki hüzme açısı 87.69°, düşeyde 31,37°'dir (Bkz. Şekil 4.25). Bu iki antene ait hüzme açıları kıyaslandığında 2x2 dizi yama antenin özellikle yatay düzlemde 2x1 dizi yama antene göre daha dar, düşey düzlemde ise yaklaşık aynı hüzme açılarına sahip olduğu anlaşılmıştır.

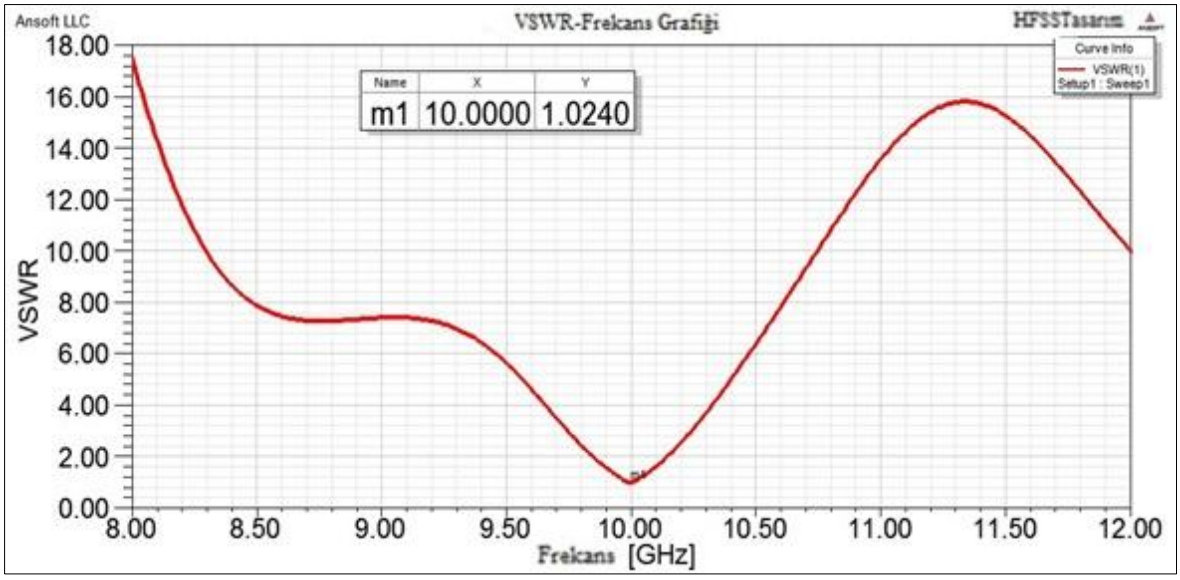
Şekil 4.33'te elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antene ait üç boyutlu ışıma örüntüsü sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.33. Üç boyutlu ışıma örüntüsü

Şekil 4.33'te maksimum ışıma şiddeti genliğinin yaklaşık 31.2 dB, ışımanın yoğunlukla z ekseninde olduğu görülmüştür. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antende maksimum ışıma genliği θ=0° iken 28,14 dB ve z eksenindedir. Şekil 4.33 ile 2x1 dizi yama anten ve 2x2 dizi yama anten ışıma şiddetlerinin farkı doğrulanmıştır.

Şekil 4.34'de elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antene ait VSWR frekans sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.34. VSWR-frekans grafiği

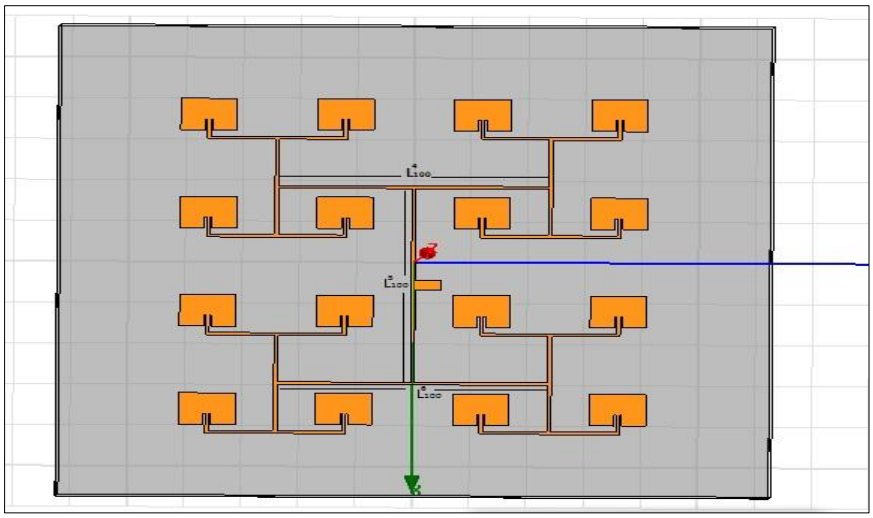
Şekil 4.34'te m1 değerlerinden anlaşıldığı gibi 10 GHz'de VSWR değerinin 1,02 olduğu görülmüştür. Elde edilen 2x2 dizi yama antene ait VSWR değeri 1,02 bu bakımdan performansı oldukça iyidir. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antende VSWR değeri 1,03'dür. Bu iki anten VSWR değerleri bakımından karşılaştırıldığında aralarında çok küçük bir fark olduğu görülmüştür. Sonuç olarak elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antenin VSWR performansı, 2x1 dizi yama antene göre daha iyidir.

4.4. 4x4 Yama Dizi Anten Tasarımı ve Analizi

Bu bölümde tıpkı tek yama, 2x1 ve 2x2 dizi yama anten tasarımında kullanılan malzeme özellikleri ile 10 GHz'de tasarlanan 4x4 dizi yama antenlerin boyutları ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar elde edilen en iyi 2x2 dizi yama anten sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

4.4.1. 4x4 dizi yama anten tasarımı

Şekil 4.35'te 4x4 dizi yama anten taslağı gösterilmiştir. Bu taslakta diğer dizi anten tasarımlarında olduğu gibi empedans uyumlaması için tümleşik besleme yöntemlerinde konik yöntem tercih edilmiştir.



Şekil 4.35. 4x4 dizi yama anten taslağı

Tezin ilk bölümlerinde bahsedilen konik besleme yöntemide kaynak beslemesine kadar tüm empedanslar 100Ω'dur. Kaynak beslemesi 50Ω'luk empedans ile yapılır.

Oluşturulan bu taslağın 2x2 dizi yama anten taslağından boyutsal olarak farkı L^4_{100} , L^5_{100}, L^6_{100} boyutlar olup, Şekil 4.35'te bu boyutlar gösterilmiştir. L^4_{100} , L^5_{100}, L^6_{100} boyutları yatay ve düşey eksende, yama antenler arasındaki özdeş boşluk mesafeleri düşünülerek hesaplanmıştır. Her bir tek yama anten arasında yataydaki boşluk mesafesi d_1, düşeydeki boşluk mesafesi d_2 'dir. Bunların dışında kalan boyutlar tek yama anten tasarımında elde edilen boyutlardan yola çıkarak belirlenmiş ve elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten için boyutlar üzerinde değişiklikler yapılmıştır.

Çizelge 4.8'de tasarlanan 4x4 dizi yama antenler ile yapılan her bir simülasyona ait tüm anten boyutları gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. 4x4 dizi yama anten boyutları

4x4 anten boyutları	Sim. 1 (mm)	Sim. 2 (mm)	Sim. 3 (mm)	Sim. 4 (mm)	Sim. 5 (mm)	Sim. 6 (mm)	Sim. 7 (mm)
W	10,1	10,1	10	10,2	10,2	9,9	9,9
L	7,9	7,9	7,5	7,8	7,8	7,7	7,7
L_i	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
W_i	1	1,2	1,5	1,5	1,2	1,2	1,3
L^1_{100}	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
W_{100}	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
L^2_{100}	12,22	12,22	11,675	11,675	11,675	11,675	11,675
L^3_{100}	11,9	11,9	11,35	11,35	11,35	11,35	11,35
L^4_{100}	49,55	49,55	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35
L^5_{100}	49,55	49,55	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35
L^6_{100}	49,55	49,55	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35
L_{50}	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
W_{50}	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
W_g	120	120	120	120	120	130	130
L_g	120	120	120	120	120	130	130
d_1	15	15	14	13,8	13,8	14,1	14,1
d_2	17,2	17,2	16,5	16,2	16,2	16,3	16,3

Çizelge 4.8. (devam) 4x4 dizi yama anten boyutları

Sim. 8 (mm)	Sim. 9 (mm)	Sim. 10 (mm)	Sim. 11 (mm)	Sim. 12 (mm)	Sim. 13 (mm)	Sim. 14 (mm)
9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	7,64
7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	10
2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,57
1,3	1,25	1,35	1,9	1,85	1,8	1,8
4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
11,675	11,675	11,675	11,675	11,675	11,675	11,675
11,35	11,35	11,35	11,35	11,35	11,35	11,675
47,35	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35
47,35	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35
47,35	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35	47,35
4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
120	120	115	115	115	115	120
120	120	125	125	125	125	120
14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14
16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,36

Çizelge 4.8'de elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten için 14 simülasyon yapıldığı görülmüştür. Yapılan tüm simülasyonların amacı yüksek kazanç ve yönlülük; düşük geri dönüş kaybı, iyi bir empedans uyumlaması, dar hüzme açısı gibi uzay uygulamalarında kullanılabilecek dizi anten oluşturmaktır. Bu bakımdan en iyi anten seçiminde bu parametreler tıpkı diğer en iyi dizi ve tek yama anten seçiminde olduğu gibi önemli parametreler olmuştur.

4.4.2. 4x4 dizi yama anten simülasyon ve analizi

Bu bölümde Çizelge 4.8'de gösterilen boyutlarda 4x4 dizi yama antenin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Tüm 4x4 dizi yama antenler kazanç, S11, yönlülük ve merkez frekans parametreleri etrafında değerlendirilmiştir. Bu bakımdan tüm simülasyon sonuçları Çizelge 4.9'de gösterilmiştir. Bu simülasyonlardan en iyi parametrelere sahip 4x4 dizi yama anten seçilmiş ve analizi tıpkı önceki bölümlerde tasarlanan antenlerde olduğu gibi önemli anten parametreleri bakımından incelenmiştir. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten elde edilen en iyi 2x2 dizi yama anten ile karşılaştırılmıştır.

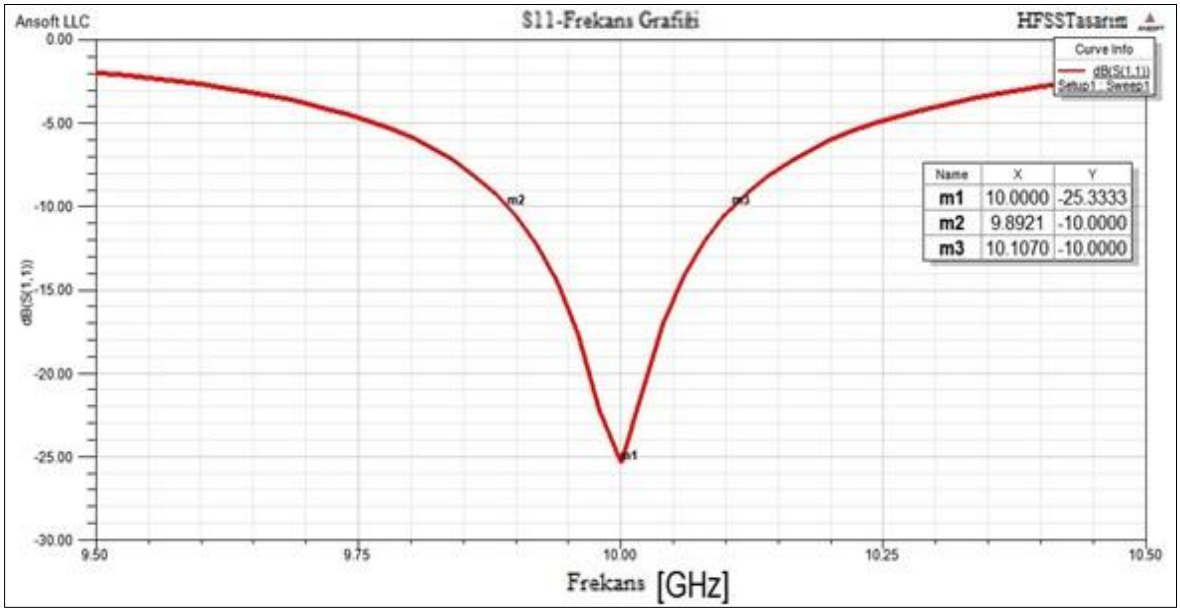
Çizelge 4.9. 4x4 dizi yama antene ait simülasyon sonuçları

Simülasyonlar	S11 (dB)	Kazanç (dB)	Yönlülük (dB)	Merkez frekans (GHz)
Simülasyon 1	-11,72	19,32	19,52	9,8
Simülasyon 2	-15,30	18,46	18,95	9,7
Simülasyon 3	-16,85	19,41	19,55	10,2
Simülasyon 4	-20,59	19,31	19,51	9,8
Simülasyon 5	-19,62	20,1	20,8	9,9
Simülasyon 6	-16,84	19,60	19,66	10
Simülasyon 7	-18,97	19,80	19,84	10
Simülasyon 8	-27,15	19,81	19,89	10
Simülasyon 9	-17,26	20,14	20,17	10
Simülsayon 10	-25,33	20,21	20,28	10
Simülasyon 11	-26,51	19,76	19,83	10
Simülasyon 12	-23,18	19,68	19,72	10
Simülasyon 13	-34,82	19,73	19,73	10
Simülsayon 14	-30,99	19,76	19,81	10

Çizelge 4.9'da 4x4 dizi yama anten boyutlarında yapılan değişiklikler sonucunda her bir simülasyona ait S11, kazanç, yönlülük ve merkez frekans değerleri verilmiştir. Bu dört ana parametre etrafında en iyi 4x4 dizi yama anten seçimi yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında simülasyon 6 ve sonrasındaki tüm antenler kullanılabilir ölçülerde olduğu görülmüştür. Bunların içinden simülasyon 10 en iyi 4x4 dizi yama anten olarak seçilmiştir. Bunun sebebi en yüksek kazanç ve yönlülük değerlerine sahip olmasıdır. Geri dönüş kayıplarına bakıldığında en iyi performansın simülasyon 13'de olduğu görülmüştür; ancak bu simülasyonuna ait kazanç değeri ile simülasyon 10'daki kazanç değeri arasında 0.5 dB'lik fark bulunmaktadır. Bu fark göz ardı edilemeyeceğinden simülasyon 13 elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten olarak belirlenmiştir.

Simülasyon 10'a ait anten parametrelerin sonuçları sunulmuş ve incelenmiştir. Bu sonuçlar elde edilen en iyi 2x2 dizi yama anten ile kıyaslanmıştır.

Şekil 4.36'da simülasyon 10'ait geri dönüş kaybı frekans değerleri gösterilmiştir.

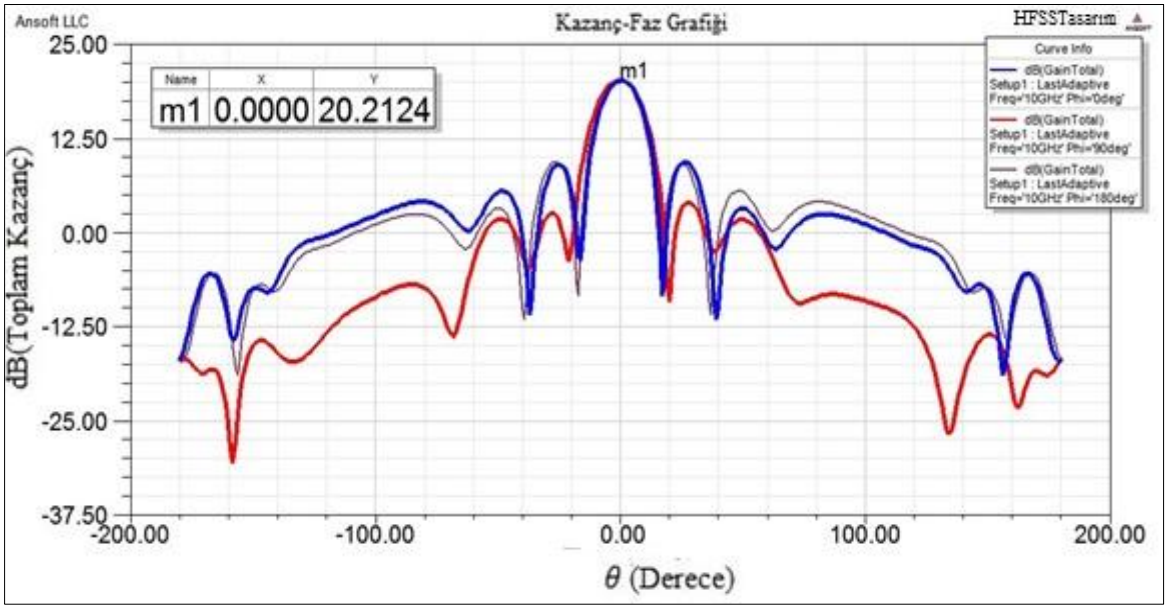


Şekil 4.36. S11-frekans grafiği

Şekil 4.36'da m1 değerlerine bakıldığında antene ait merkez frekansın 10 GHz, geri dönüş kaybının -25,33 dB olduğu görülmüştür. Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende S11 değeri 38,52 dB'dir. Bu iki anten S11 değerleri bakımından karşılaştırıldığında 2x2 dizi antenin performansının çok daha iyi olduğu görülmüştür. Buradan bir dizi yama antende yama anten sayısı arttıkça geri yansıyan sinyallerin arttığı anlaşılmıştır. Bu durumun başka bir anlamı da çok sayılı yama antene sahip dizi antenlerde empedans uyumlaması az sayılı yama anten içeren dizi yama antenlere göre daha zordur. Bu durumu ortadan kaldırmak için faklı besleme yöntemleri, farklı anten boyutları kullanılabilir. Bu araştırılmaya açık bir konudur.

Şekil 4.36'da m2 ve m3'e ait değerlere bakılarak antene ait bant genişliği hesaplanmıştır. Merkez frekansı 10 GHz olan anten, 9.89 ile 10.107 GHz arasında çalışabilmektedir. Buradan anten bant genişliği merkez frekans etrafında %2,17 'dir. Başka bir ifade ile anten 230 MHz'lik bir bant genişliğine sahiptir. Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende bant genişliği %2,75, 2x1 dizi yama antende ise %3,88'dir. Buradan dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça bant genişliğinin daraldığı görülmüştür.

Şekil 4.27'de elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antene ait bir başka anten parametresi kazanç, frekans değerlerine bağlı olarak gösterilmiştir.

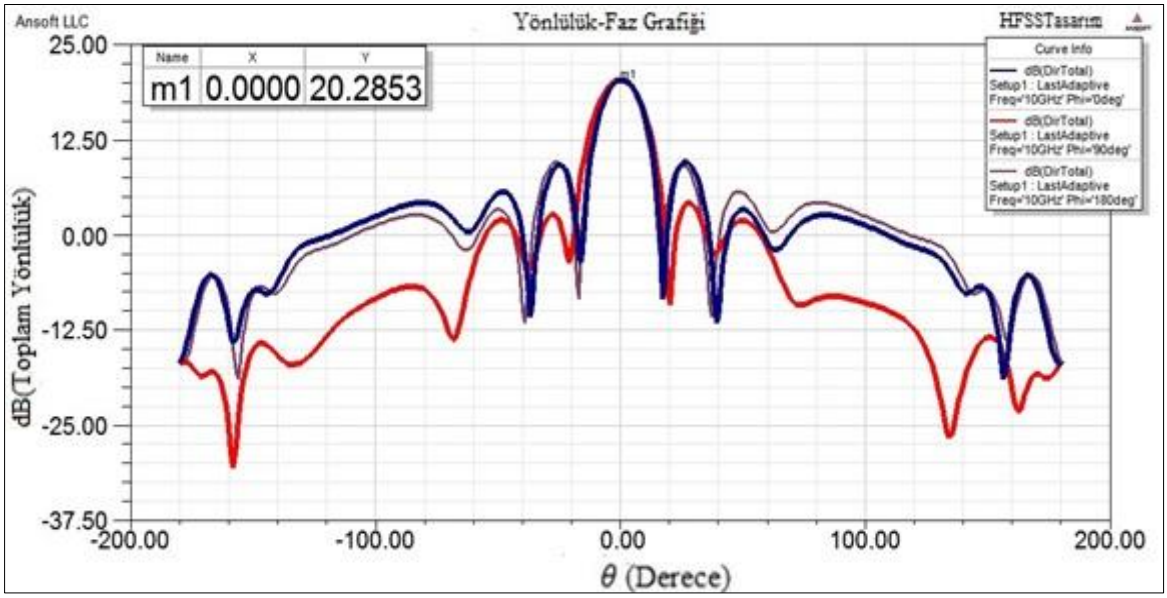


Şekil 4.37. Kazanç-faz grafiği

Şekil 4.37'de tüm θ açılarına ait φ=0°, φ=90° ve φ=180°'de iken kazanç frekans değerleri gösterilmiştir. Yatay düzlemde yani θ=0° ve φ=0° iken kazancın maksimum ve 20,21 dB olduğu görülmüştür. Düşey düzlem olan θ=0° ve φ=90° iken de maksimum kazanç 20,21 dB'dir. Buradan anten ışımasında faz kayması olmadığı anlaşılmıştır. Göz ardı edilemeyecek faz kaymalarında harici faz kaydırıcılara ihtiyaç olacağından bu tez de faz farkı istenmemektedir.

Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende faz farkı görülmemiştir. Yatay düzlemde ve düşey düzlemde kazanç 13.43 dB'dir (Bkz. Şekil 4.30). Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten ile 2x2 dizi yama anten kazanç yönünden karşılaştırıldığında 6,78 dB'lik fark olduğu anlaşılmıştır. Bu farkın sebeplerinden biri 4x4 dizi yama antendeki yama anten sayısı 2x2 dizi yama antenin 4 katıdır. Teorik olarak hesaplandığında, 10log4=6 dB olduğundan bu fark anlaşılabilmektedir; ancak bu durum yalnızca yama anten sayısı ile açıklanamaz; S11, VSWR gibi parametrelerin de uygun olması gerekir.

Şekil 4.38'de elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antene ait yönlülük frekans değerleri gösterilmiştir.



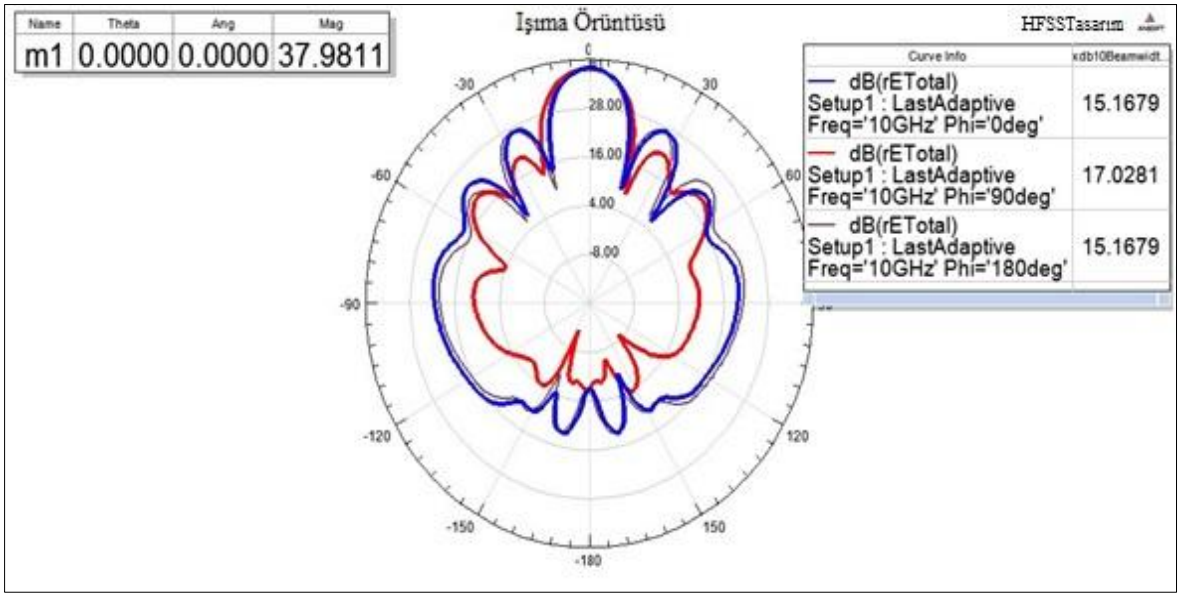
Şekil 4.38. Yönlülük-faz grafiği

Şekl 4.38'de elde edilen en iyi tüm θ açılarına ait φ=0°, φ=90° ve φ=180°'de iken yönlülük frekans değerleri gösterilmiştir. Bu değerlere bakıldığında θ=0° iken φ=0°'da yani yatay eksende ve φ=90° iken düşey eksende yönlülük aynı olup 20,28 dB'dir. φ=180° fazı ise φ=0° fazının tam simetriğidir. Şekil 4.38'e bakıldığında θ=0 ve φ=180° iken yönlülüğün 20,28 olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlar ile anten ışımasında faz farkı olmadığı bir kez daha görülmüştür.

Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antenin yönlülüğü 13,55'dir. Bu değer elde edilen 4x4 dizi yama anten yönlülüğü ile karşılaştırıldığında 6,73 dB daha azdır. Tıpkı anten kazancında olduğu gibi dizi antendeki yama antenlerin sayısının artması bu farkın temel ağırlıklı sebeplerindendir.

Beklenildiği gibi iyi tasarlanmış dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça kazanç ve yönlülük değerleri artmıştır. Bu durum 2x1, 2x2 ve 4x4 dizi yama anten simülasyonlarının tamamında görülmüştür.

Şekil 4.39'da elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antene ait ışıma örüntüsü sonuçları gösterilmiştir.

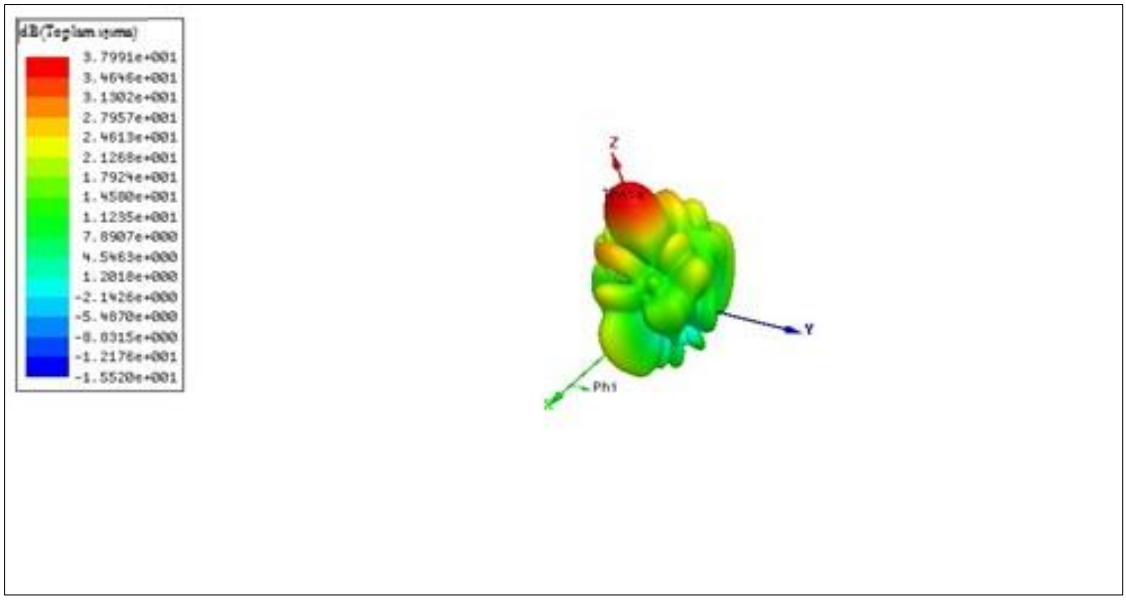


Şekil 4.39. Işıma örüntüsü

Şekil 4.39'da tüm θ açılarına ait φ=0°, φ=90° ve φ=180°'de ışıma desenleri gösterilmiştir. Gösterilen tüm desenler içinde maksimum ışıma genliği 37,9 dB'dir. Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende bu değer yaklaşık 31,2 dB'dir (Bkz. Şekil 4.32). Buradan elde edilen 4x4 dizi yama anten ışımasının 2x2 dizi yama antene göre yaklaşık 6,7 dB daha büyük olduğu anlaşılmıştır. Bu farkın oluşmasında 4x4 dizi yama antendeki yama anten sayısının 2x2 dizi yama antendeki yama anten sayısının 4 katı olması önemli bir etkendir. Beklenildiği gibi dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça ışıma şiddeti artmıştır.

Şekil 4.39'da elde edilen 4x4 dizi yama antenin hüzme açılarına bakıldığında yatayda 15,16°, düşeyde yaklaşık 17,02° olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende yataydaki hüzme açısı 28,39°, düşeydeki hüzme açısı ise 30,89°'dir (Bkz. Şekil 4.32). Hüzme açıları bakımından elde edilen 4x4 dizi yama anten elde edilen en iyi 2x2 dizi yama anten göre yatayda ve düşeyde daha dar hüzmelere sahiptir. Buradan iyi tasarlanmış dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça kazanç ve yönlülük artarken, hüzme açılarının küçüldüğü anlaşılmış ve teorik bilgi ile uyuştuğu görülmüştür [7]. Bu durum elde edilen en iyi dizi tek yama antenin, 2x1, 2x2 ve 4x4 dizi yama antenlerin hüzme açılarına bakılarak anlaşılmıştır.

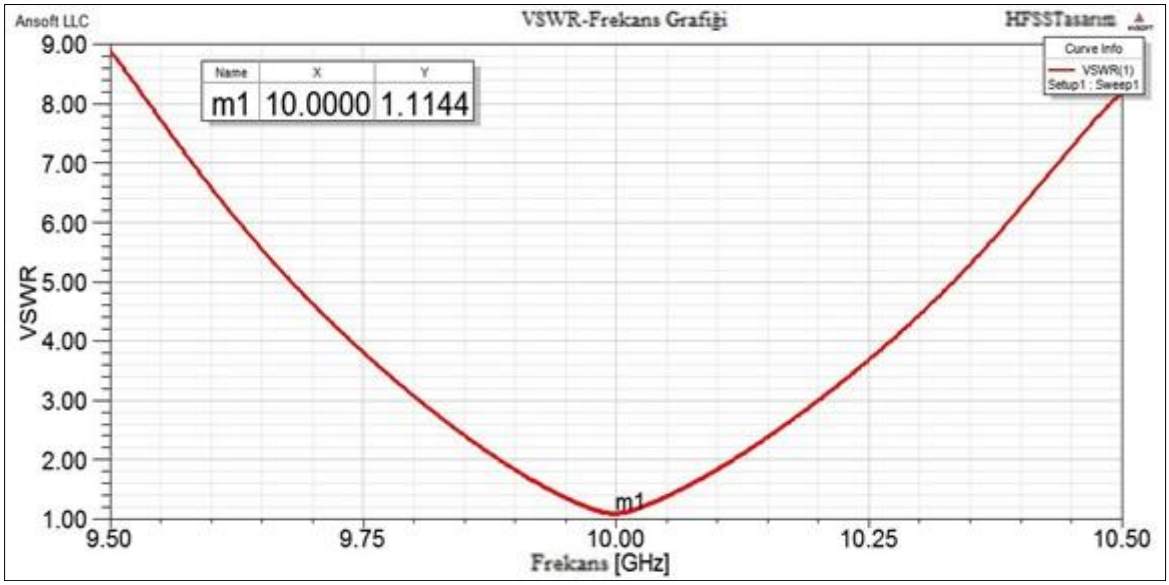
Şekil 4.40'ta elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antene ait üç boyutlu ışıma örüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Üç boyutlu ışıma örüntüsü

Şekil 4.40'ta elde edilen en iyi yama 4x4 antende ışıma z eksenindedir. Üç boyutlu görsel aynı zamanda ana hüzme etrafındaki yan hüzmelerin ışıma şiddetlerini de göstermektedir. Kırmızı renk ışımanın yoğun olduğu bölgeleri göstermekte, açık maviden koyu maviye doğru olan renkler ışımanın az olduğu bölgeleri temsil etmektedir. Şekil 4.39'daki maksimum ışıma genliği 37,9 dB Şekil 4.40'ta doğrulanmıştır. Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende maksimum ışıma genliği 31,2 dB'dir (Bkz. Şekil 4.33). Bu bakımdan iki anten karşılaştırıldığında anten sayısı fazla olduğu için beklenildiği gibi 4x4 dizi yama anten performansı 6,7 dB daha iyidir.

Şekil 4.41'de elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antenin VSWR değerine ait sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 4.41. VSWR-frekans grafiği

Şekil 4.41'de m1 değerlerinden, elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antenin merkez frekansının 10 GHz olduğu başka bir ifade ile 10 GHz'de geri yansımaların en az olduğu ve VSWR değerinin 1,11 olduğu anlaşılmıştır. Bu bilgiler ışığında elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antenin VSWR değeri ideal sınırlar içerisinde yer almaktadır ve 1 değerine yakındır. Bu bakımdan iyi tasarlanmış bir antendir.

Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama antende VSWR değeri 1,02'dir (Bkz. Şekil 4.34). Bu değer 4x4 dizi yama antene ait VSWR değeri ile karşılaştırıldığında, 2x2 dizi yama antende geri yansımaların daha az olduğu anlaşılmıştır. Bu bakımdan elde edilen 2x2 dizi yama anten 4x4 dizi yama antene göre daha iyi performans göstermiştir.

4.5. 8x8 Yama Dizi Anten Tasarımı ve Analizi

Dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça kazanç, yönlülük gibi parametrelerin arttığı, hüzme açısının daraldığı 2x1, 2x2 ve 4x4 dizi yama anten simülasyon sonuçlarına bakılarak doğrulanmıştır. Bu bölümde daha yüksek kazanç, yönlülük ve dar hüzme elde etmek için anten sayısı 4x4 dizi yama antenin 4 katı olan 8x8 dizi yama anten tasarımları yapılmış ve sonuçları sunulmuştur. 8x8 dizi yama anten tasarımında kullanılan tüm malzeme özellikleri yama ve diğer tüm dizi yama anten tasarımlarında kullanılan malzeme

özellikleriyle aynıdır. Böylelikle elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten 4x4 dizi yama anten ile karşılaştırılmıştır.

8x8 dizi yama anten tasarımlarında besleme yöntemi olarak diğer dizi yama anten tasarımlarında kullanılan besleme yöntemi kullanılmıştır. Ek olarak 8x8 dizi yama antende besleme noktası faklı noktalardan alınarak anten performansı incelenmiştir. Bu durum simülasyon ve analiz bölümünde ayrıntılı anlatılmıştır.

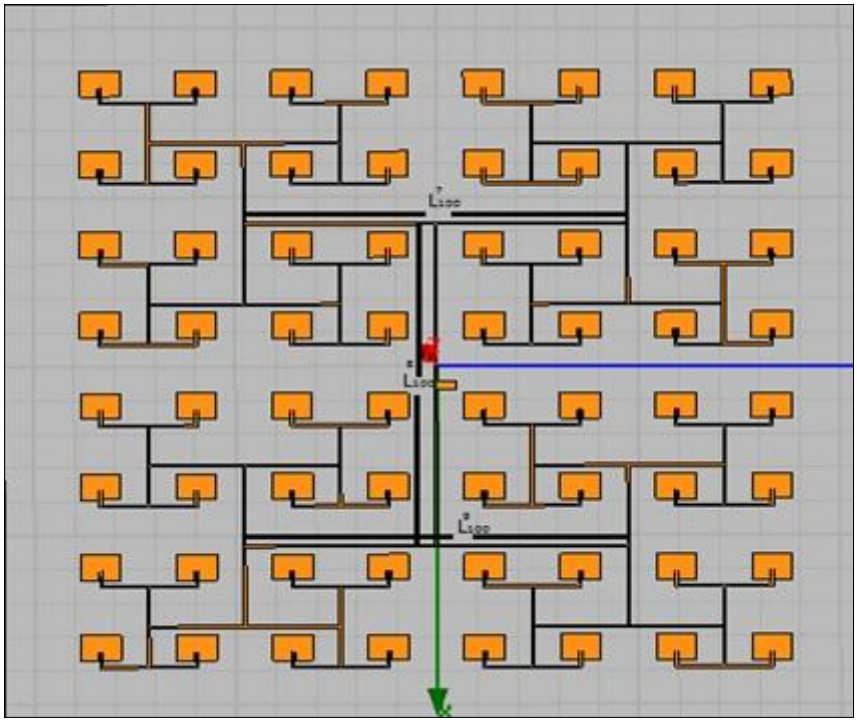
4.5.1. 8x8 dizi yama anten tasarımı

8x8 dizi yama anten tasarımları öncelikli olarak diğer dizi yama antelerinde olduğu gibi aynı besleme yöntemi ile tek bir noktadan besleme yapılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir; ancak kazanç ve yönlülükte teorik olarak beklenen performansın altında değerler oluşması, S11 değerinin düşük olması gibi sebeplerden besleme noktasının tek bir nokta değil farklı konfigürasyonlarda farklı noktalardan yapılarak sonuçlarının görülmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu sebeple bu bölümde 8x8 dizi yama antenler tek noktadan ve faklı noktalardan besleme başlıkları altında incelenmiştir.

Tek noktadan besleme

Tıpkı diğer dizi yama anten tasarımlarında olduğu gibi 8x8 dizi yama antende de tümleşik besleme yöntemi olan T şeklinde konik besleme ile tek noktadan besleme yapılarak sonuçları gözlemlenmiştir.

8x8 dizi yama antene ait tek noktadan beslemeli anten taslağı Şekil 4.42’de gösterilmiştir.



Şekil 4.42. Tek noktadan beslemeli 8x8 dizi yama anten taslağı

Oluşturulan bu taslağın 4x4 dizi yama anten taslağından boyutsal olarak farkı L^7_{100} , L^8_{100}, L^9_{100} boyutlar olup, Şekil 4.42'de bu boyutlar gösterilmiştir. L^7_{100} , L^8_{100}, L^9_{100} boyutları yatay ve düşey eksende yama antenle arasındaki özdeş boşluk mesafeleri düşünülerek hesaplanmıştır. Her bir tek yama anten arasında yataydaki boşluk mesafesi d_1, düşeydeki boşluk mesafesi d_2 'dir. Bunların dışında kalan boyutlar tek yama anten tasarımında elde edilen boyutlardan yola çıkarak belirlenmiş ve tek besleme noktasından elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten için boyutlar üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten için simülasyon sonuçları sonraki bölümlerde anlatılmıştır.

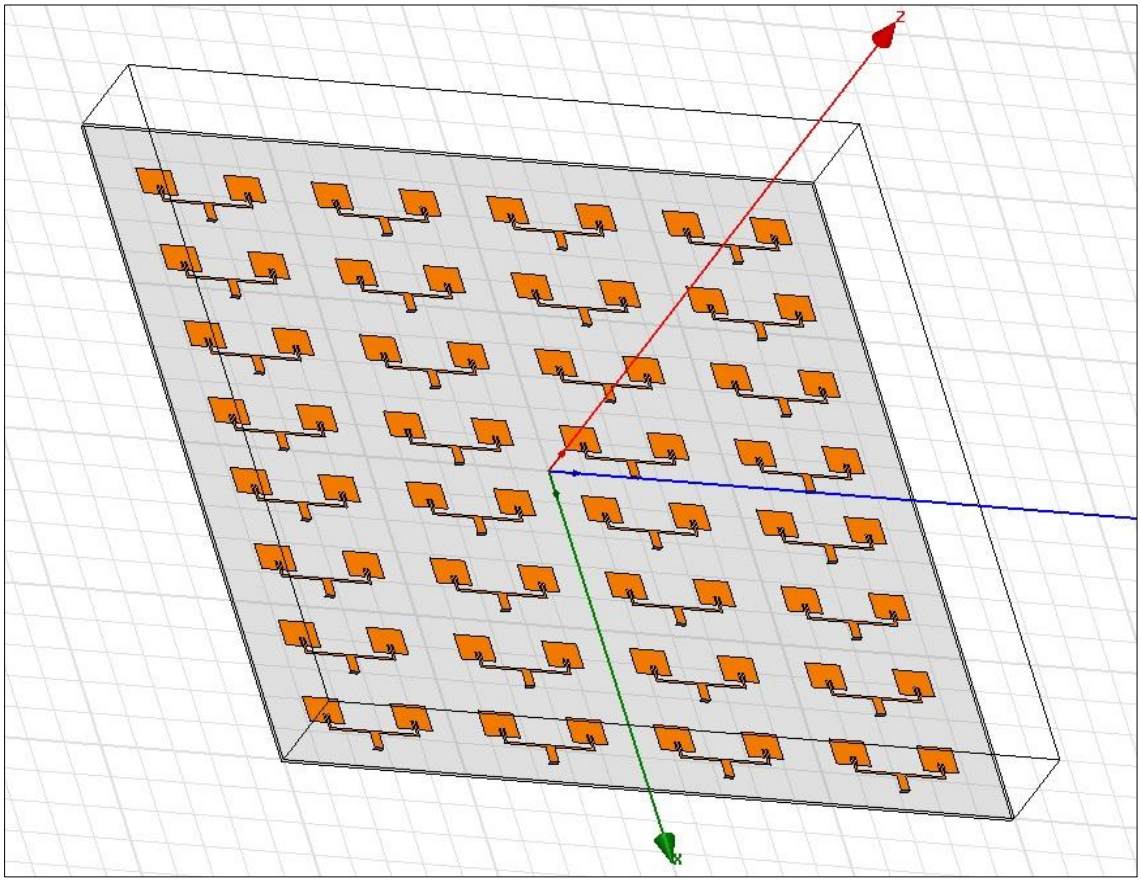
Çizelge 4.10'da tek noktadan beslemeli 8x8 dizi yama antene ait her bir simülasyon için anten boyutları gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. 8x8 dizi yama anten boyutları

8x8 anten boyutları	Sim. 1 (mm)	Sim. 2 (mm)	Sim. 3 (mm)	Sim. 4 (mm)	Sim. 5 (mm)	Sim. 6 (mm)	Sim. 7 (mm)	Sim. 8 (mm)	Sim. 9 (mm)	Sim. 10 (mm)	Sim. 11 (mm)
W	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	10,25	10
L	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64	7,64
L_i	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
W_i	1,7	1,5	1,3	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	0,9
L^1_{100}	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
W_{100}	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
L^2_{100}	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55
L^3_{100}	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55	10,55
L^4_{100}	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85
L^5_{100}	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85
L^6_{100}	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85	42,85
L^7_{100}	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35
L^8_{100}	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35
L^9_{100}	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35	86,35
L_{50}	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
W_{50}	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,65	2,72	2,67	2,65	2,65	2,65
W_g	185	185	185	175	175	175	175	185	185	185	185
L_g	205	205	205	180	175	175	175	205	205	205	205
d_1	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25
d_2	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11	14.11

Farklı noktalardan besleme

Tek noktadan besleme yapılarak bir önceki bölümde oluşturulan dizi yama antenlerden özellikle kazanç ve yönlülük bakımından beklenen performanslar alınamadığından besleme noktaları arttırılarak anten performansları incelenmiştir. Farklı besleme noktalarından gerçekleştirilen 8x8 dizi yama anten taslağı Şekil 4.43'te gösterilmiştir.



Şekil 4.43. Farklı noktalardan besleme ile 8x8 dizi yama anten taslağı

Şekil 4.43'teki 8x8 dizi yama anten taslağına bakıldığında 2x1 dizi yama antenler şeklinde bir taslak oluşturulmuştur. Oluşturulan her bir 2x1 dizi yama anten kendi içinde beslenmiştir. Bu yöntem farklı konfigürasyonlarda da denenebilir. Yani 2x1 yerine 2x2, 1x4, 4x4 dizi yama antenler seçilerek beslemeler bu dizi antenler üzerinden yapılabilir. Bu durum da ayrıca incelenmesi gereken bir konudur.

Çizelge 4.11. 8x8 dizi yama anten boyutları

2x1 dizi anten boyutları	Sim. 1 (mm)	Sim. 2 (mm)	Sim. 3 (mm)	Sim. 4 (mm)	Sim. 5 (mm)	Sim. 6 (mm)
W	10,2	9,2	9,2	9,8	9,5	9,5
L	7,64	7,64	7,64	7,6	7,75	7,75
Li	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Wi	1,1	1	1,2	0,9	1,3	1,5
L^1_{100}	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
W_{100}	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
L^2_{100}	9,72	10,225	10,225	7,13	11,675	11,675
L_{50}	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
W_{50}	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
Lg	175	205	205	150	200	200
Wg	175	185	185	135	200	200
d_1	9,9	10,9	10,9	5,11	14,5	14,5
d_2	12,37	12,37	12,37	9,8	14,375	14,375

Çizelge 4.11'de aynı taslak üzerinde faklı boyutlarda kullanılan her bir simülasyona ait 8x8 dizi yama anten boyutlarının değerleri verilmiştir. 2x1 dizi yama anten (Bkz. Şekil 4.19) tasarımındaki boyutlara ek olarak d_2 boyutu yer almaktadır.

4.5.2. 8x8 dizi yama anten simülasyon ve analizi

Bu bölümde tek ve farklı noktalardan yapılan beslemeler ile 8x8 dizi yama anten simülasyon sonuçları sunulmuş ve analiz edilmiştir. Her iki besleme durumlarında elde edilen 8x8 dizi yama anten parametre sonuçları kendi aralarında ve elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten parametre sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tek noktadan besleme simülasyon sonuçları ve analizi

Çizelge 4.10'da gösterilen boyutlarda 8x8 dizi yama antenin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Tıpkı diğer dizi yama antenlerde olduğu gibi tüm 8x8 dizi yama antenler kazanç, S11, yönlülük ve merkez frekans parametreleri bakımından değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm simülasyon sonuçları Çizelge 4.12'de gösterilmiştir. Bu simülasyonlardan en iyi parametrelere sahip 8x8 dizi yama anten

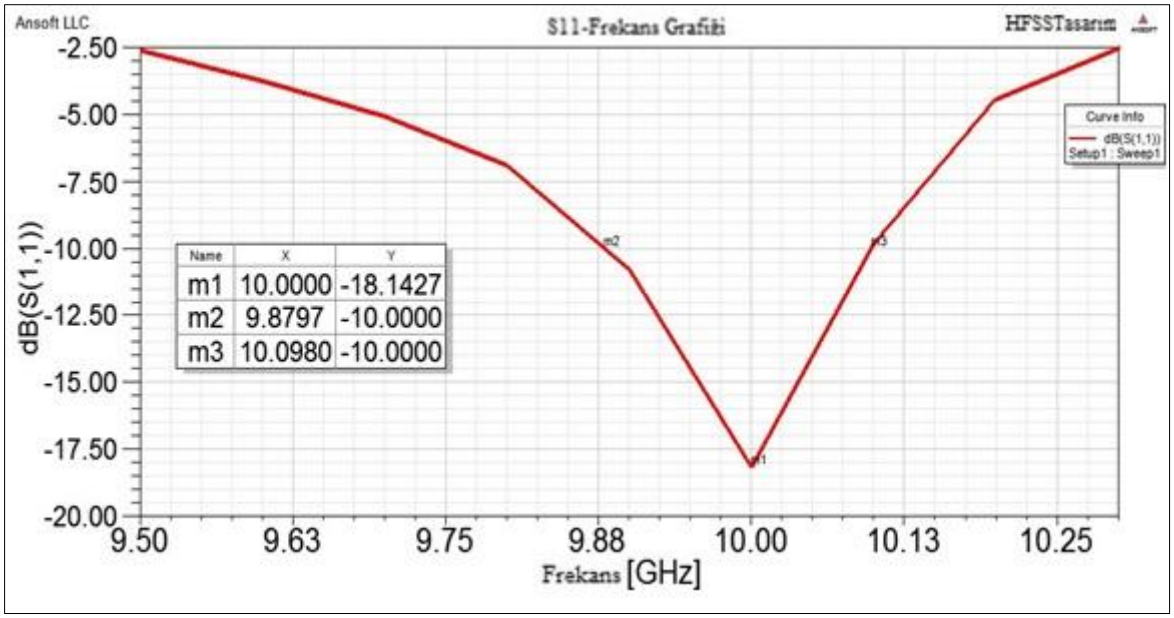
seçilmiş ve analizi önemli anten parametreleri bakımından incelenmiştir. Elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.12. 8x8 dizi yama anten simülasyon sonuçları

Simülasyonlar	S11 (dB)	Kazanç (dB)	Yönlülük (dB)	Merkez frekans (GHz)
Simülasyon 1	-10,10	21,37	21,71	9,9
Simülasyon 2	-14,35	22,92	23,16	10
Simülasyon 3	-13,41	22,59	22,88	10,1
Simülasyon 4	-16,48	22,91	23,21	10,1
Simülasyon 5	-15,12	22,38	22,68	10
Simülasyon 6	-17,08	22,27	22,54	10
Simülasyon 7	-14,10	21,53	21,88	10
Simülasyon 8	-18,14	22,57	22,83	10
Simülasyon 9	-13,54	24,18	24,58	10,2
Simülsayon 10	-15,53	22,8	23,07	10,1
Simülasyon 11	-12,58	23,96	24,73	10,2

Çizelge 4.12'de simülasyon sonuçları incelendiğinde merkez frekansı 10 GHz olan en iyi 8x8 dizi yama anten simülasyon 8'deki antendir. Bu antene ait önemli görülen tüm parametre sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

Şekil 4.44'te simülasyon 8'e ait S11-frekans grafiği verilmiştir.

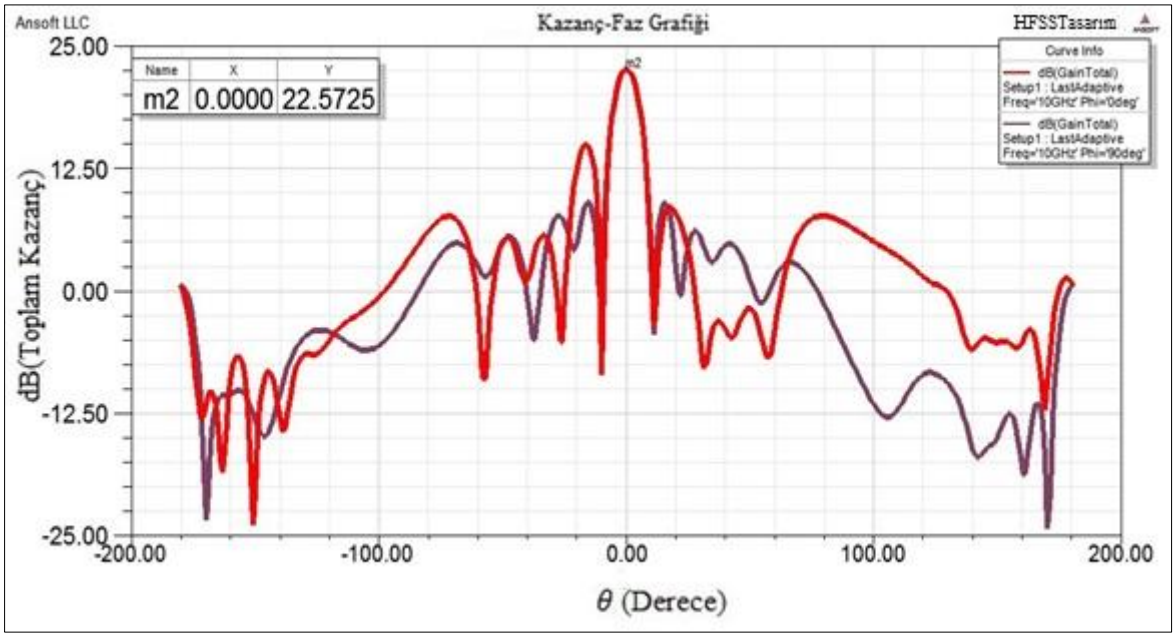


Şekil 4.44. S11-frekans grafiği

Şekil 4.44'te m1 değerlerine bakıldığında antene ait merkez frekansın 10 GHz, geri dönüş kaybının -18,1 dB olduğu görülmüştür. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antende S11 değeri -25,3 dB'dir (Bkz. Şekil 4.36). Bu iki anten S11 değerleri bakımından karşılaştırıldığında 4x4 dizi antende geri yansımaların daha az ve empedans uyumlamasının daha iyi yapıldığı anlaşılmıştır. Buradan dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça geri yansımaların arttığı ve empedans uyumlamasının daha da zorlaştığı anlaşılmıştır. Bu durum bu tez çalışmasındaki simülasyonlar neticesinde varılan bir sonuçtur. Farklı besleme yöntemleri kullanıldığında bu durumun değişimi gözlemlenmelidir.

Şekil 4.44'te m2 ve m3'e ait değerlere bakılarak antene ait bant genişliği hesaplanmıştır. Merkez frekansı 10 GHz olan anten, yaklaşık 9.88 ile 10.09 GHz arasında çalışabilmektedir. Buradan anten bant genişliği merkez frekans etrafında %2,1 olarak hesaplanmıştır. Başka bir ifade anten ile 210 MHz'lik bir bant genişliğine sahiptir. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antende bant enişliği %2,17 , 2x2 yama antende %2,75, 2x1 dizi antende ise %3,88 'dir. Dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça bant genişliğinin daraldığı tekrardan doğrulanmıştır.

Şekil 4.45'te tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait kazanç-frekans değerleri gösterilmiştir.

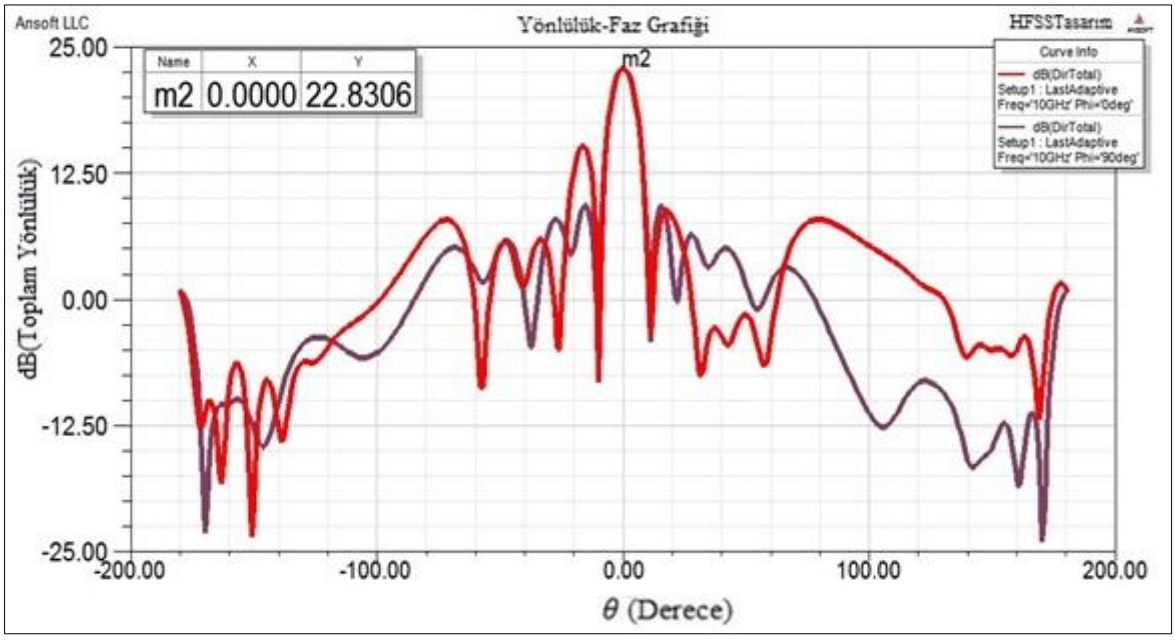


Şekil 4.45. Kazanç-faz grafiği

Şekil 4.45'te m1 değerlerinden θ=0° iken φ=0°, φ=90°'deki kazançlar aynı olup, 22.57 dB'dir. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antenin kazancı 20,21 dB'dir (Bkz. Şekil 4.37). İki anten kazanç yönünden karşılaştırıldığında arada 2,36 dB fark bulunmaktadır. 8x8 dizi yama antendeki yama anten sayısı 4x4'dekinin 4 katı olduğundan iyi bir tasarımda farkın 6 dB civarlarında olması beklenir. Bu nedenle tek noktadan beslemeli elde edilen 8x8 dizi yama antenin 4x4 dizi yama antene göre kazancının fazla olması kriter olmayıp aradaki fark incelenmelidir. Bu durumun doğurduğu başka bir sonuç da dizi yama antenlerin tek bir noktadan değil, farklı bölmeler halinde farklı noktalardan beslendiğinde performansının incelenmesi gerektiğidir.

Dizi yama antenlerde anten sayısı arttıkça iyi bir tasarım için çok sayıda simülasyona ve farklı besleme yöntemlerine ihtiyaç duyulabilir; çünkü anten sayısı arttıkça geri yansıyan sinyallerin artması bir çok parametreyi etkiler. Böylelikle anten tasarımı karmaşık hale gelir.

Şekil 4.46'da tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait yönlülük frekans değerleri gösterilmiştir.



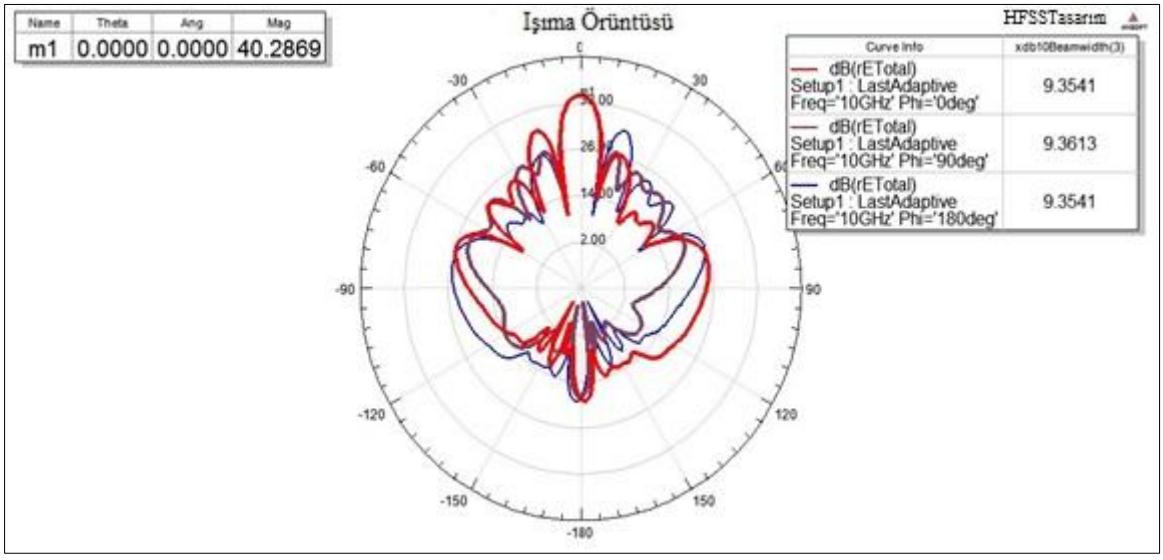
Şekil 4.46. Yönlülük-faz grafiği

Şekil 4.46'da maksimum yönlülüğün φ=0°, φ=90° için θ=0° olduğunda meydana geldiği anlaşılmıştır.

Buradan anten ışımasında faz farkı meydana gelmediği de anlaşılmıştır. m1 değerlerinden anten yönlülüğünün 22,83 dB olduğu anlaşılmıştır.

Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antenin yönlülüğü yaklaşık 20,28 dB'dir (Bkz. Şekil 4.38). Tıpkı bu iki antenin anten kazançlarındaki farkında olduğu gibi yönlülük farklarında da 2 dB civarlarında fark görülmüştür; ancak bu farkın anten kazancında olduğu gibi 6 dB civarlarında olması beklenir. Dizi yama antende anten sayıları arttıkça geri yansımaların artmasından dolayı ışıma yoğunluğu da olumsuz etkilendiğinden yönlülük parametresi de olumsuz etkilenmiştir. Dizi yama antende yama anten sayısı arttıkça tasarımın karmaşık hale geldiği yönlülük parametresinden de doğrulanmıştır.

Şekil 4.47'de elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait ışıma örüntüsü sonuçları gösterilmiştir.

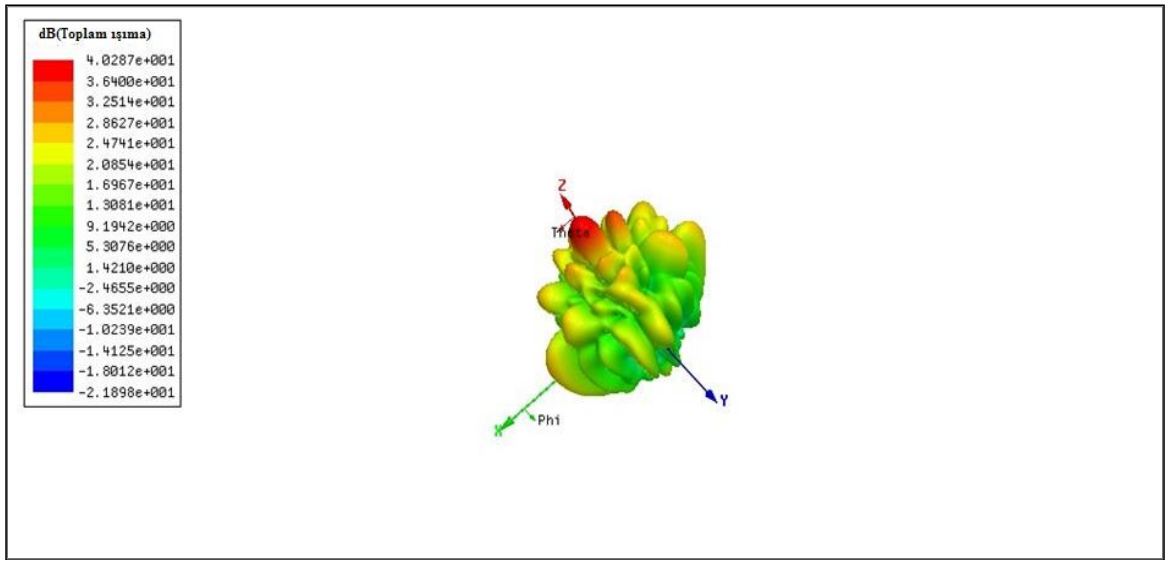


Şekil 4.47. Işıma örüntüsü

Şekil 4.47'de tüm θ açılarına ait φ=0°, φ=90° ve φ=180°'de ışıma desenleri gösterilmiştir. Gösterilen tüm örüntüde maksimum ışıma genliği yaklaşık 40,2 dB'dir. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antende bu değer yakalaşık 37,9 dB'dir (Bkz. Şekil 4.39). Elde edilen 8x8 dizi yama anten ışımasının 4x4 dizi yama antene göre yaklaşık 2,3 dB daha büyük olduğu anlaşılmıştır. Tıpkı bu iki anten arasındaki kazanç ve yönlülük değerlerindeki farka benzer bir fark maksimum ışıma genliğinde de görülmüştür.

Şekil 4.47'da elde edilen 8x8 dizi yama antenin hüzme açılarına bakıldığında yatayda 9,35°, düşeyde 9,36° olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antende yatayda 15,16°, düşeyde yaklaşık 17,02° hüzme açıları bulunur (Bkz. Şekil 4.39). Hüzme açıları bakımından elde edilen 8x8 dizi yama anten elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten göre yatayda neredeyse 6°, düşeyde ise yaklaşık 8° daha dar hüzmelere sahiptir. Buradan iyi tasarlanmış dizi yama antenlerde yama anten sayısı hüzme açılarının küçüldüğü tekrar görülmüş ve teorik bilgi ile uyuştuğu anlaşılmıştır [7].

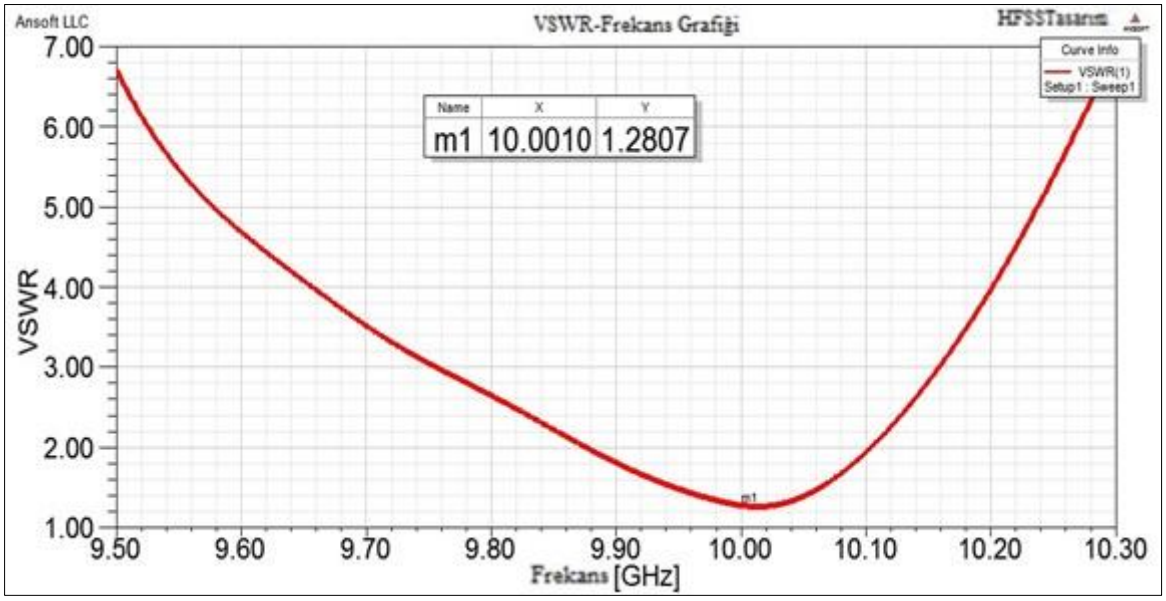
Şekil 4.48'de elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait üç boyutlu ışıma deseni gösterilmiştir.



Şekil 4.48. Üç boyutlu ışıma örüntüsü

Şekil 4.48'de elde edile en iyi 8x8 dizi yama ait maksimum ışıma şiddeti genliği yaklaşık 40,2 dB'dir. Işıma şiddetinin yoğunluk olarak en fazla z ekseninde olduğu Şekil 4.48'den anlaşılmıştır. Şekil 4.47'daki maksimum ışıma genliği bu üç boyutlu grafikle de doğrulanmıştır.

Şekil 4.49'da elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antenin VSWR değerine ait sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 4.49. VSWR- frekans grafiği

Şekil 4.49'da m1 değerlerinden, elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antenin merkez frekansının 10 GHz, VSWR değerinin 1,28 olduğu anlaşılmıştır. Önceki bölümlerde yapılan analizlerde de belirtildiği gibi ideal bir antenin VSWR değeri 1 ile 2 arasında yer alır. VSWR değeri 1'e ne kadar yakın ise geri yansımalardan kaynaklı kayıplar o kadar az olur. Bu bakımdan elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antenin VSWR değeri idealdir. Elde edilen en iyi 4x4, 2x2 ve 2x1 dizi yama antenlerin VSWR değerleri sırasıyla 1,11, 1,02 ve 1,03'dir. Buradan dizi yama antelerde yama anten sayısı arttıkça geri yansıyan sinyallerin arttığı ve empedans eşlemenin güçleştiği tekrar doğrulanmıştır. VSWR ile S11 parametreleri arasında doğru orantılı bir ilişki bulunduğundan tüm dizi antenlerin S11 değerlerine bakılarak da bu durum anlaşılır.

Yapılan analizler sonucunda dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça önemli anten parametrelerinden kazanç, yönlülük, S11 ve VSWR değerleri beklenilen düzeyde olmayabilir. Bu nedenle anten boyutlarında daha fazla değişiklikler ya da farklı besleme yöntemleri ile çok sayıda simülasyon çalışmasına ihtiyaç duyulabilir. Simülasyon çalışmalarında bir 8x8 dizi yama anten simülasyonunun sonuçlarını almak oldukça zaman almaktadır; ayrıca 16 Gb RAM ve 2.5 GHz işlemci hızına sahip bilgisayarlardan düşük özellikli bilgisayarlarda simülasyon tamamlanamamaktadır. Bu sebeplerle bu tez çalışmasında tüm 8x8 dizi yama anten simülsayonları sınırlı kalmıştır.

Farklı noktalardan besleme simülasyon sonuçları ve analizi

Çizelge 4.11'de gösterilen boyutlarda 8x8 dizi yama antenin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonları gerçekleştirilen tüm 8x8 dizi yama antenler kazanç, S11, yönlülük ve merkez frekans parametreleri bakımından incelenmiştir. Gerçekleştirilen tüm simülasyon sonuçları Çizelge 4.13'te gösterilmiştir. Bu simülasyonlardan en iyi parametrelere sahip 8x8 dizi yama anten seçilmiş ve analizi önemli anten parametreleri bakımından incelenmiştir. Elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 ve 4x4 dizi yama anten ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.13. 8x8 dizi yama anten simülasyon sonuçları

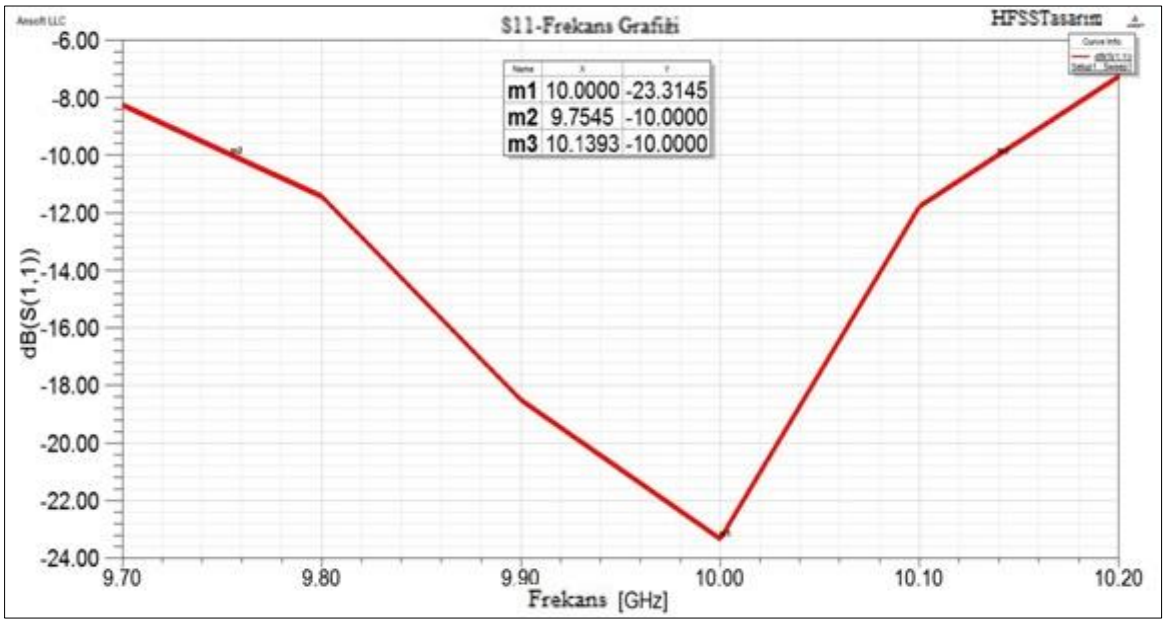
Simülasyonlar	S11 (dB)	Kazanç (dB)	Yönlülük (dB)	Merkez frekans (GHz)
Simülasyon 1	-45,53	25,38	25,10	9,9
Simülasyon 2	-15,27	25,35	25,08	10
Simülasyon 3	-31,72	25,23	24,97	10
Simülasyon 4	-19,90	23,90	23,66	10
Simülasyon 5	-23,31	26,76	26,62	10
Simülasyon 6	-20,23	26,74	26,72	9,9

Çizelge 4.13'te simülasyonlar incelendiğinde parametreler bakımından en iyi anten simülasyon 5'te yer alan antendir. Bu antene ait tüm önemli parametrelerin ayrıntıları bu bölümde sunulmuştur.

Şekil 4.50'de farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait S11-frekans grafiği gösterilmiştir. Şekil 4.50'den elde edilen en iyi antenin merkez frekansının 10 GHz, S11 değerinin -23,31 dB olduğu anlaşılmıştır. Tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antende S11 değeri -18,14 dB'dir (Bkz. Şekil 4.44). Bu bakımdan farklı noktalardan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama anten, tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene göre daha iyi performans göstermiştir. Elde edilen en iyi dizi yama antende S11 değeri -25.33 dB'dir (Bkz. Şekil 4.36).

Farklı noktalardan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama antenin S11 performansı, tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antetene göre daha düşüktür.

Ek olarak Çizelge 4.13 incelendiğinde simülasyon 1'de S11 değeri -45,53 dB olup merkez frekansın 9.9 GHz olduğu görülmüştür; ancak Çizelge 4.12'de elde edilen en iyi S11 değeri -18,14'tür. Buradan dizi antenlerde farklı noktalardan besleme yapılarak S11 değerinde daha iyi performans alınabildiği anlaşılmıştır. Bunun temel sebebi farklı noktalardan besleme yapıldığında birbirinden bağımsız dizi antenlerin kendi içinde empedans eşlemelerinin daha kolay olmasıdır. Bu durumun en büyük avantajları antende geri dönüş kayıplarının azaltılması ve daha az simülsayonla daha hızlı, daha iyi parametre sonuçlarına ulaşılmasıdır.

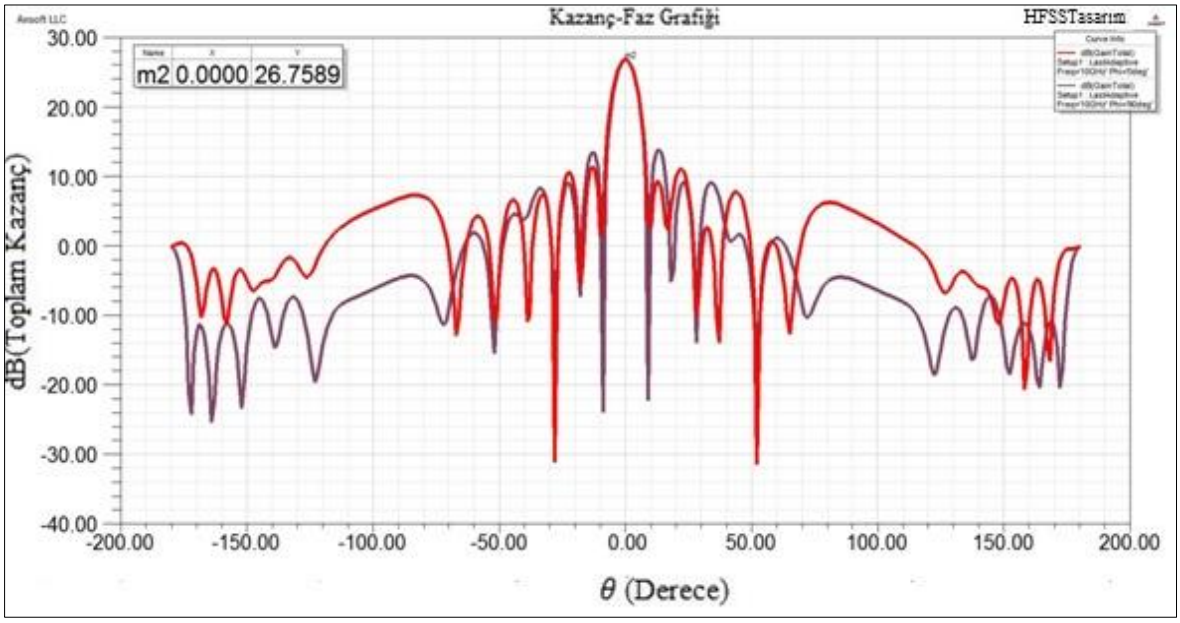


Şekil 4.50. S11-frekans grafiği

Şekil 4.50'de m2 ve m3 değerlerine bakıldığından anten çalışma frekans aralığının 9,75 GHz ile yaklaşık 10.14 GHz arasında olduğu görülmüştür. Buradan antenin bant genişliği %3,84 olarak hesaplanmıştır. Tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antende bant genişiliği %2,1, 4x4 dizi yama antende bant enişliği %2,17 , 2x2 yama antende %2,75, 2x1 dizi antende ise %3,88 'dir. Burada beklenenin aksine dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça antenin bant genişliği azalması gerekirken bant genişliği artmıştır.

Bant genişliğinini etkileyen faktörlerin yalnızca yama anten sayısı değil, antenler arası yataydaki ve düşeydeki mesafe, anten boyutları gibi faktörlerin de etkili olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 4.51'de farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait kazanç faz grafiği gösterilmiştir.



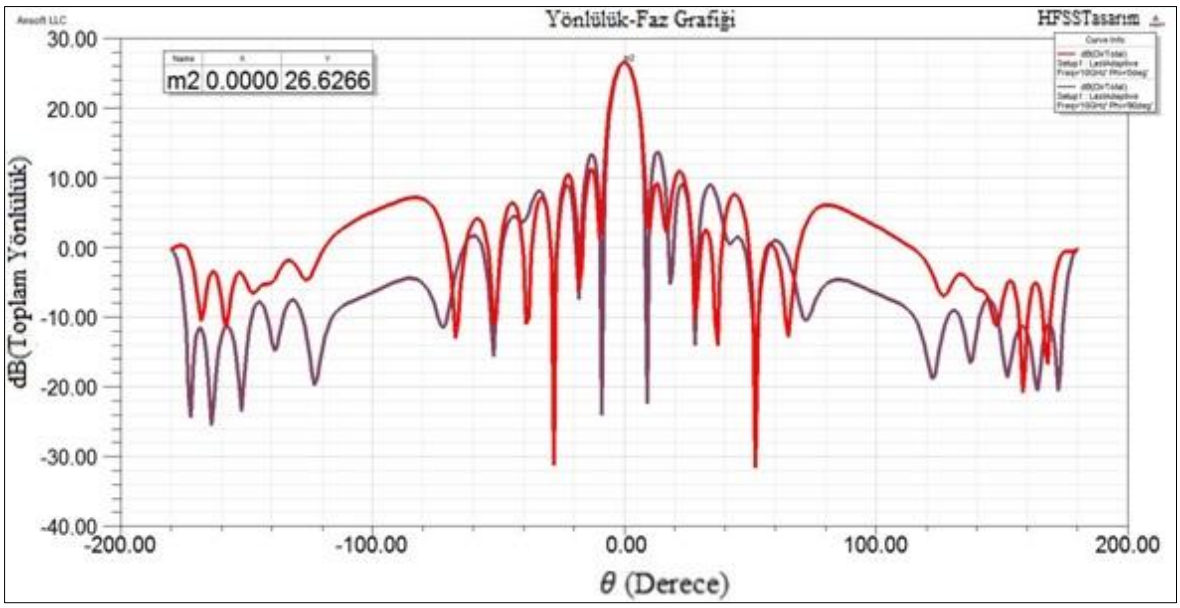
Şekil 4.51. Kazanç-faz grafiği

Şekil 3.51'de m1 değerlerinden θ=0° iken φ=0°, φ=90°'de kazançlar aynı olup, yaklaşık 26,75 dB'dir. Tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antenin kazancı 22,57 dB'dir (Bkz. Şekil 4.45). Tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antende anten kazancı 20,21 dB'dir (Bkz Şekil 4.37). Teorik veriler ışığında 4x4 dizi yama anten ile 8x8 dizi yama anten arasında anten sayısından dolayı yaklaşık 6 dB'lik bir fark beklenir. Tek noktadan besleme ile 8x8 dizi yama antende elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antene göre yaklaşık 2,3 dB gibi pozitif bir fark görünürken, farklı noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antende bu pozitif fark yaklaşık 6,5 dB'dir.

Kazanç bakımından farklı noktadan besleme yöntemi ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten, tek noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene göre daha iyi performans göstermiştir.

Teorik olarak da farklı noktalardan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama anten tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene göre daha uygun bir antendir.

Şekil 4.52'de farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait yönlülük faz grafiği gösterilmiştir.

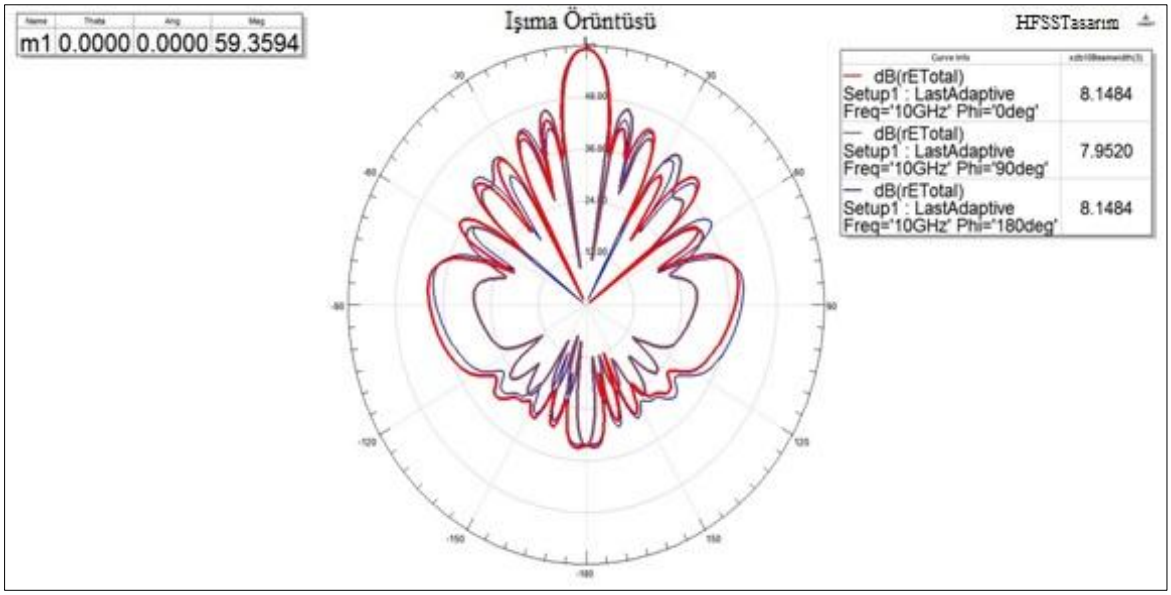


Şekil 4.52. Yönlülük-faz grafiği

Şekil 4.52'de maksimum yönlülüğün φ=0°, φ=90° için θ=0° iken 26,62 dB olduğu anlaşılmıştır. Buradan anten ışımasında bir faz farkı meydana gelmediği anlaşılmıştır. Tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antende yönlülük 22,83 dB'dir (Bkz. Şekil 4.46). Bu iki anten karşılaştırıldığında farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene göre yaklaşık 3.8 dB'lik daha iyi bir performans göstermiştir. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antenin yönlülüğüne bakıldığında yaklaşık 20.28 dB (Bkz. Şekil 4.38) olduğu görülmüştür. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten ile farklı noktadan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama anten arasında yaklaşık 6,3 dB gibi bir fark bulunmuştur. Bu fark beklenen bir farktır.

Yönlülük bakımından değerlendirildiğinde farklı noktadan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama antenin performansı aynı sayıda ve yakın boyutlar ile tasarlanan tek noktadan besleme ile oluşturulan 8x8 dizi yama antene göre çok daha iyidir.

Şekil 4.53'te farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait ışıma örüntüsü sonuçları gösterilmiştir.

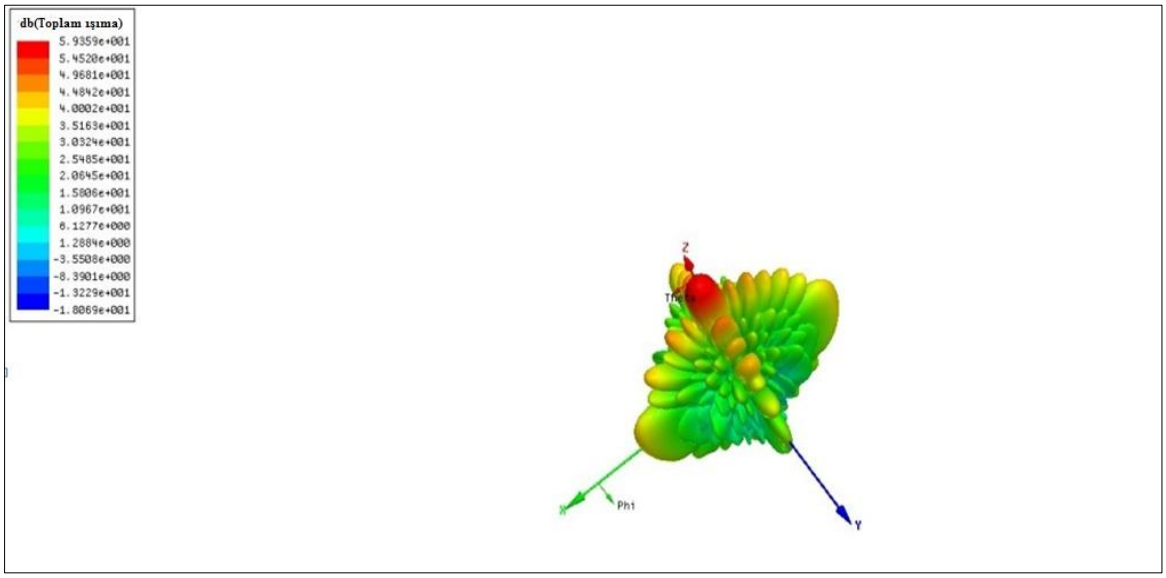


Şekil 4.53. Işıma örüntüsü

Şekil 4.53'te tüm θ açılarına ait φ=0°, φ=90° ve φ=180°'de ışıma desenleri ve noktalardaki hüzme açıları gösterilmiştir. Gösterilen tüm örüntüde maksimum ışıma genliği yaklaşık yaklaşık 59,3 dB'dir. Bu değer tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antende yaklaşık 40,2 dB'dir (Bkz. Şekil 4.47). Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antende ise bu değer yaklaşık 37,9 dB'dir (Bkz. Şekil 4.39). Elde edilen en iyi bu üç anten karşılaştırıldığında farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antenin performasının, faklı noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene göre yaklaşık 19 dB, 4x4 dizi yama antene göre ise yaklaşık 21 dB daha iyi olduğu görülmüştür. Buradan iyi tasarlanmış faklı noktadan besleme yöntemi ile ışıma şiddetinin artabileceği anlaşılmıştır. Dolayısıyla bu durum anten kazancını ve yönlülüğünü olumlu etkilemiştir.

Şekil 4.53'te faklı noktalardan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama antenin hüzme açılarına bakıldığında yatayda 8,14°, düşeyde 7,95° olduğu anlaşılmıştır. Tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 ve 4x4 dizi yama antende sırasıyla yatayda 9,35° ve 15,16°, düşeyde 9,36° ve 17,02° hüzme açıları bulunmaktadır. Hüzme açıları bakımından faklı noktadan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama anten bu tez içerisinde yer alan diğer tüm antenlere göre çok daha dar hüzme açılarına sahiptir.
İyi bir tasarımla bir dizi ama antende yama anten sayısı arttıkça farklı noktadan besleme ile oldukça dar hüzmelere sahip, uzun mesafe haberleşmeler için kullanılabilecek dizi yama antenler oluşturulabileceği simülasyonlarla anlaşılmıştır.

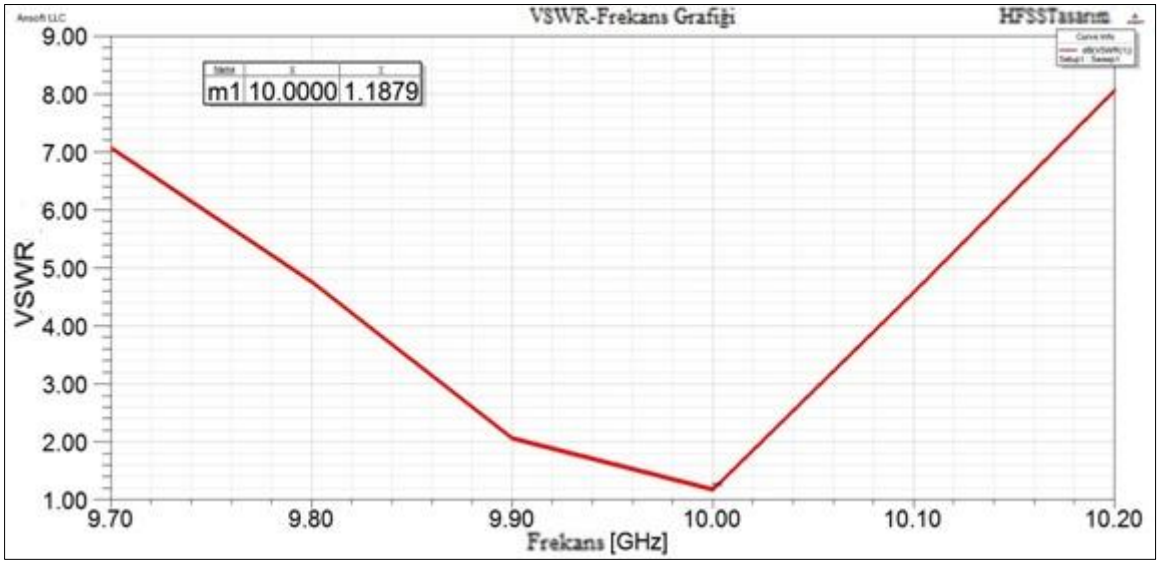
Şekil 4.54'te farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait üç boyutlu ışıma örüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.54. Üç boyutlu ışıma örüntüsü

Şekil 4.54'te faklı noktadan besleme ile elde edile en iyi 8x8 dizi yama ait maksimum ışıma şiddeti genliği yaklaşık 59,3 dB olduğu anlaşılmıştır. Işıma şiddetinin yoğunluk olarak en fazla z ekseninde olduğu görülmüştür. Buradan Şekil 4.53'te verilen ışıma örüntüsündeki değerler bir kez daha Şekil 4.54'deki değerler ile doğrulanmıştır.

Şekil 4.55'te farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene ait VSWR-frekans grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.55. VSWR-frekans grafiği

Şekil 4.55'te m1 değerlerinden, faklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antenin merkez frekansın 10 GHz, VSWR değerinin yaklaşık 1,18 olduğu anlaşılmıştır. Bir antenin ideal VSWR değer aralığı düşünüldüğünde bu antenin ideale sınırlar içesinde oldukça iyi bir VSWR değerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antenin VSWR değeri 1,28 'dir (Bkz. Şekil 4.49). VSWR değeri bakımından faklı noktalarda besleme ile oluşturulan en iyi 8x8 dizi yama antenin performansı, tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene göre daha iyidir. Buradan farklı noktadan besleme ile oluşturulan 8x8 dizi ama antende empedans uyumlamasının daha başarılı olduğu anlaşılmıştır. Ek olarak, elde edilen en iyi 4x4, 2x2 ve 2x1 dizi yama antenlerin VSWR değerleri sırasıyla 1,11, 1,02 ve 1,03'dir. Buradan dizi yama antelerde yama anten sayısı arttıkça geri yansıyan sinyallerin arttığı ve empedans eşlemenin güçleştiği tekrardan doğrulanmıştır.

Bu tez çalışması içerisinde tasarlanan tüm antenlerin boyutları ve buna bağlı temel parametreleri sunulmuştur. Elde edilen en iyi antenlerin parametre sonuçları ayrıntılı olarak incelenmiştir ve birbirleri arasında karşılaştırılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında mikroşerit anten ve mikroşerit dizi anten tasarımları yapılarak simülasyon sonuçları değerlendirilmiş ve sunulmuştur. Öncelikle anten teorisi, anten parametreleri genel olarak anlatılmış; mikroşerit dizi antenlerden kısaca bahsedilerek mikroşerit tek ve dizi anten tasarımları yapılmıştır.

Dizi yama anten tasarımı için tek yama anten tasarımından faydalanılmıştır. Tek yama anten tasarımı yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir. Teorik olarak yama anten tasarımının tüm adımları anlatılmış, elde edilen tek yama antene ait tüm boyutlar sunulmuştur. Elde edilen teorik yama anten tipik bir yama anten özelliği göstermiş olup, düşük kazanç ve yönlülük, geniş hüzme açısı, dar bant genişliğine sahiptir; ayrıca geri dönüş kaybı S11 değerinin de -10 dB'ye yakın olduğu görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı tek yama anten boyutlarında değişiklik yapılarak daha iyi anten parametrelerine sahip tek yama anten için ek simülasyonların ihtiyacı doğmuştur. Elde edilen en iyi tek yama anten için 15 simülasyon gerçekleştirilmiş ve sonuçları teorik yama antene ait sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırılma yapıldığında elde edilen en iyi tek yama antenin teorik yama antene göre özellikle kazanç, yönlülük, geri dönüş kaybı ve VSWR parametreleri bakımından çok daha iyi performansa sahip olduğu, hüzme açıları bakımından performanslarının yakın olduğu ve bant genişliği bakımından teorik yama antenin bant genişliğinin daha dar olduğu görülmüştür. Buradan teorik olarak hesaplanan yama anten boyutları ile yapılan tasarımların beklenen performansları gösteremeyebileceği, daha iyi tek yama anten performansı için ek simülsayonlara ihtiyaç olabileceği anlaşılmıştır. Tek yama anten simülasyonlarından çıkarılabilecek başka bir sonuç tek yama antenin eni ve boyunda yapılan oldukça küçük değişikliklerin antenin merkez frekansını değiştirdiği ve geri dönüş kaybını etkilediğidir. Tek yama anten boyutlarından girinti uzunluğu ve anten içerisinde yer alan boşluklarda yapılan değişikliklerin anten geri dönüş kabını etkilediği görülmüştür. Antenin bağıl geçirgen malzeme ve toprak tabakası boyutlarında yapılan değişikliklerin anten ışımasını etkilediğinden anten geri dönüş kaybını da etkilemiştir. Teorik olarak ortaya koyulan VSWR ve S11 parametreleri arasındaki yakın ilişki gerçekleştirilen simülasyonlar ile ortaya konulmuştur.

Elde edilen en iyi tek yama anten boyutlarına yakın boyutlar kullanılarak 2x1 dizi yama anten simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur. 2x1 dizi yama anten için

15 simülasyon gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda tek yama anten simülasyonlarında olduğu gibi anten, bağıl geçirgen malzeme ve toprak tabakası boyutlarındaki değişikliklerin anten performansına etkileri görülmüştür. Elde edilen 2x1 dizi yama anten elde edilen en iyi tek yama anten ile karşılaştırıldığında, elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten kazanç, yönlülük, geri dönüş kaybı, VSWR ve hüzme genişliği bakımından daha iyi performans göstermiştir. Bant genişliklerine bakıldığında 2x1 dizi yama anten daha büyük bant genişliğine sahiptir. İyi tasarlanmış dizi yama antenlerde yama anten sayısı arttıkça anten kazancının ve yönlülüğünün artmasının, ışıma şiddetinin artmasının ve hüzme açısınının küçülmesinin teorik bilgilerle örtüştüğü simülasyon sonuçları ile ortaya konulmuştur. Geri dönüş kaybı antenin empedans uyumlaması ile ilgili bir durum olduğundan dizi yama antenlerde anten sayısı arttıkça geri dönüş kaybının kesin olarak azalacağı ya da artacağı gibi bir sonuç çıkarılamaz; ancak dizi yama antenlerde anten sayısı arttıkça empedans uyumlamasının daha zor olduğu söylenebilir. Bu nedenle iyi bir empedans uyumlaması için daha fazla simülasyon ihtiyacı gerekmektedir. Elde edilen en iyi 2x1 dizi yama antende empedans uyumlaması daha iyi olduğundan S11 değeri elde edilen tek yama antene göre daha iyidir.

2x2 dizi yama anten tasarımı için 10 adet simülasyon gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur. 2x2 dizi yama anten, bağıl geçirgen mazleme ve toprak tabakası boyutları üzerinde yapılan her bir değişikliğin simülasyon sonuçlarına etkileri görülmüştür. Elde edilen en iyi 2x2 dizi yama anten, elde edilen en iyi 2x1 dizi yama anten ile karşılaştırıldığında, elde edilen en iyi 2x2 dizi yama anten geri dönüş kaybında 2 dB, bant genişliğinde daha dar, kazançta, ışıma şiddetinde ve yönlülükte yaklaşık 3 dB daha iyi performas göstermiştir; hüzme genişliği bakımından yatayda yaklaşık 70°'lik daha dar bir hüzmeye, düşeyde ise neredeyse aynı hüzmeye sahiptir.

4x4 dizi yama anten tasarımında 14 simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlara bakıldığında antene ait tüm boyutlardaki, aynı boyutlara sahip bağıl geçirgen malzeme ve toprak tabakasının boyutlarındaki değişikliklerin anten performansına etkisi görülmüştür. Elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten, elde edilen en iyi dizi 2x2 yama anten ile kıyaslandığında 4x4 dizi yama anten 2x2 dizi yama antene göre kazançta yaklaşık 6,78dB, yönlülükte 6,73 dB daha iyi performans gösterirken, geri dönüş kaybında 2x2 dizi yama anten daha iyi performans göstermiştir. Hüzme açıları karşılaştırıldığında elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antenin yatayda ve düşeyde yaklaşık olarak 2x2 dizi yama antenin yarısı

kadar hüzme açılarına sahip olduğu görülmüştür. Bant genişliği bakımından 4x4 dizi yama anten daha dar bir banta sahiptir. Simülasyonlardan iyi tasarlanmış dizi yama antenlerde kazanç ve yönlülük değerlerinin yama anten sayısı arttıkça kesin olarak arttığı, hüzme açılarının azaldığı bir kez daha doğrulanmıştır.

2x2, 4x4 dizi yama anten tasarımlarında olduğu gibi 8x8 dizi yama anten tasarımlarında besleme noktası tek noktadan yapılarak 8x8 dizi yama anten simülasyonlarına başlanmıştır. Tek noktadan besleme ile gerçekleştirilen 8x8 dizi yama anten simülasyonları, elde edilen en iyi 4x4 dizi yama anten parametreleri ile karşılaştırıldığında beklenen performanslar alınamamıştır. Tek noktadan besleme ile 11 adet 8x8 dizi yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten, elde edilen en iyi 4x4 dizi yama antenle kıyaslandığında tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten kazanç, yönlülük ve ışıma şiddeti bakımından yaklaşık 2 dB'lik daha iyi performans göstermiştir; ancak 8x8 dizi yama antendeki yama anten sayısı 4x4 dizi yama anten sayısının 4 katı olduğundan bu fark yeterli görülmemiştir. Bu iki antenin geri dönüş kayıpları karşılaştırıldığında 4x4 dizi yama antenin daha iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır. Buradan tek noktadan besleme ile yüksek sayıda dizi yama anten içeren dizi antenlerde empedans uyumlamasının zorlaştığı bir kez daha ortaya konulmuştur. Bu sebeplerden dolayı 8x8 dizi yama anten tasarımında farklı bir yol izlenmiş ve ayrı ayrı 2x1 dizi yama anten şeklinde besleme yapılarak anten parametreleri performansları incelenmiştir. Farklı noktalardan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten, tek noktadan besleme ile elde edilen en iyi 4x4 ve 8x8 dizi yama antenle kıyaslandığında faklı noktadan besleme ile elde edilen en iyi anten 8x8 dizi anten kazanç parametresinde tek noktadan besleme ile elde edilen 4x4 dizi yama antene göre 6,5 dB, 8x8 dizi yama anten göre 4,2 dB daha iyi performans göstermiştir. Aynı kıyaslama yönlülük parametresi bakımından yapılmış ve farklı noktadan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama antenin tek noktadan besleme ile elde edilen 4x4 ve 8x8 dizi yama antene göre sırasıyla 6,3 dB ve 3,8 dB daha iyi performans göstermiştir. Bu üç anten arasında geri dönüş kaybı parametresi incelendiğinde en iyi performans 4x4 dizi yama antene aittir; ancak üç anten ait tüm simülasyonlar incelendiğinde farklı noktalardan besleme ile yapılan 8x8 dizi yama antende diğer iki antene göre daha düşük geri dönüş kaybıplarına ulaşılabileceği görülmüştür. Bu üç anten arasında hüzme açıları en dar olan farklı noktalardan besleme ile elde edilen 8x8 dizi yama anten olmuştur. Özellikle uzak mesafe haberleşmeleri için önemli parametrelerden biri olan dar hüzme açısı farklı noktalardan besleme yöntemi ile elde

edilmiştir. Üç anten arasında bant genişliği bakımından en dar bant genişliği 4x4 dizi yama antende elde edilmiştir. Farklı noktadan besleme ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama anten, tek noktadan besleme yöntemi ile elde edilen en iyi 8x8 dizi yama antene göre daha büyük bir bant genişliğine sahiptir. Bu üç dizi anten de dar bant genişliği kriterini sağlamıştır.

Farklı noktalardan besleme ile yapılan 8x8 dizi yama anten tasarımlarında antenler arası mesafelerin daha çeşitli olabileceği görülmüştür. Oysa tek noktadan besleme ile yapılan dizi yama anten tasarımlarında antenler arası mesafe besleme noktasında yer alan 50 Ω empedansının genişliği ve uzunluğundan dolayı sınırlı kalmıştır. Bu sebepten farklı noktalardan besleme çok çeşitli dizi yama anten tasarımlarına imkan sağlamaktadır.

Bu tezde farklı noktalardan besleme yalnızca 8x8 dizi yama anten tasarımında kullanılmıştır; ancak 2x2 ve 4x4 dizi yama anten tasarımları için de kullanılıp, antenlerin performansları görülebilir.

Dizi yama anten tasarımında dizi antenlerdeki yama anten sayısı arttıkça tasarım ve simülasyon süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle 8x8 dizi yama anten simülasyonları 4x4, 2x2 ve 2x1 dizi yama antenlere göre çok daha uzun sürmektedir. Bu bakımdan karşılaşılan en büyük zorluk 8x8 dizi yama anten tasarımlarında anten boyutlarında yapılan bir değişikliğin simülasyon süresini arttırmasıdır. Simülasyonların sonuçlarının hızlı alınabilmesi için yüksek işlemcilere sahip bilgisayarlara ihtiyaç vardır.

Bu tezde tasarlanan tüm antenler 1mm kalınlığında, bağıl geçirgenlik sabiti 3.2 olan Rogers RO4232(tm) malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Teorik bilgiler ışığında tek yama anten tasarımından yola çıkılarak uzak mesafe haberleşme uygulamalarında kullanılabilecek, merkez frekansı 10 GHz olan dizi yama anten tasarımları yapılmış ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Elde edilen en iyi tek ve dizi yama antenlere ait anten parametre sonuçları ayrıntılı olarak incelenmiş ve sunulmuştur. Tüm simülasyonlar HFSS 12.1 programında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design* (Third Edition*)*. New Jersey: A. John Wiley & Sons Inc., 1, 27, 44, 65, 66, 70, 283-286, 297-300, 811-816, 823-825, 866.

2. Johnson, R. C. (1993). *Antenna Engineering Handbook* (Third Edition). New York: McGraw-Hill Inc., 4, 197.

3. Jasim, S. E., Jusoh, M. A., Mazwir, M. H. and Mahmud, S. N. S. (2015, December). Finding Best Feeding Point Location of Patch Antenna Using HFSS. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(23), 17444,17445.

4. Lee, M. (2011). Signal Modeling and Analysis of Planar Phased-Array FMCW Radar With Antenna Switching. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10(1), 179.

5. Flashy, M. A. and Shanthi, A. V. (2014). *Microstrip circular array antenna for radar applications*. International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014), 1.

6. Ramadevi, K., Prasad, A. M. and Rani, A. J. (2012, October). Design of A Pentagon Microstrip Antenna for Radar Altimeter Application. *International Journal of Web & Sematic Technology (IJWEST)*, 3(4), 32.

7. Gupta, S. and Kumar, D. (2016). 1:4 Microstrip Compact Patch Antenna Array. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 6(3), 248.

8. Midasala V. and Siddaiah, P. (2014). *Rectangular Patch Antenna array design at 13GHz frequency using HFSS*. 2014 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, 978.

9. Mailloux, R. J. (2005). *Phased Array Antenna Handbook* (Second Edition). Boston: Artech House Inc, 1.

10. Bhongale, S. R. (2015). Desing of Coaxial Feeding Rectangular Microstrip Patch Antenna at 2.45 Ghz. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 3(8), 7245, 7246.

11. Milligan, T. A. (2005). *Modern Antenna Design* (Second Edition). New Jersey: A. John Wiley & Sons Inc., 2, 3, 11, 17.

12. Babu, R. S. and Sampath, P. (2012). Design of 4x4 Rectangular Microstrip Phased Array Antenna for Gsm Application. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 1(4), 403.

13. Sandeep, B. S. and Kashyap, S. S. (2012). Design and Simulation of Microstrip Patch Array Antenna for Wireless Communications at 2.4 GHz. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(11), 1.

14. Midasala, V. and Siddaiah, P. (2016). *Microstrip Patch Antenna Array Design to Improve Better Gains*. International Conference on Computer Modeling and Security (CMS 2016), 401.

15. Rawat, D. S., Singh, G. and Singh, R. P. (2014, June). Design of a Corporate fed 1x2 Microstrip Array Antenna for X Band Applications. *International Journal of Computer Applications*, 95(5), 17.

16. Sinha, S. and Begam, A. (2012). Design of Probe Feed Microstrip Patch Antenna in S-Band. *International Journal of Electronics and Communications Engineering*, 5(4), 417.

17. Madhav, B. T. P., Bhavani, K. V. L., Pisipati V. G. K. M., Teja, V. R., Rajkamal, K. and Kumar, K. V. V. (2011). Dual Polarized 16X16 MSPA Antenna Using FR4 Epoxy. *International of Journal Advanced Networking and Applications*, 3(3), 1199.

18. Saroha, N. and Goyat, M. (2015). Design & Simulation of Rectangular & Circular Patch Antenna with EGB Substrates. *International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM)*, 3(7), 3407.

19. Ravi, N. and Sundarrajan, V. (2014). Design and Implementation of Phased Array Antenna using Advanced Design System. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 3(11), 8446.

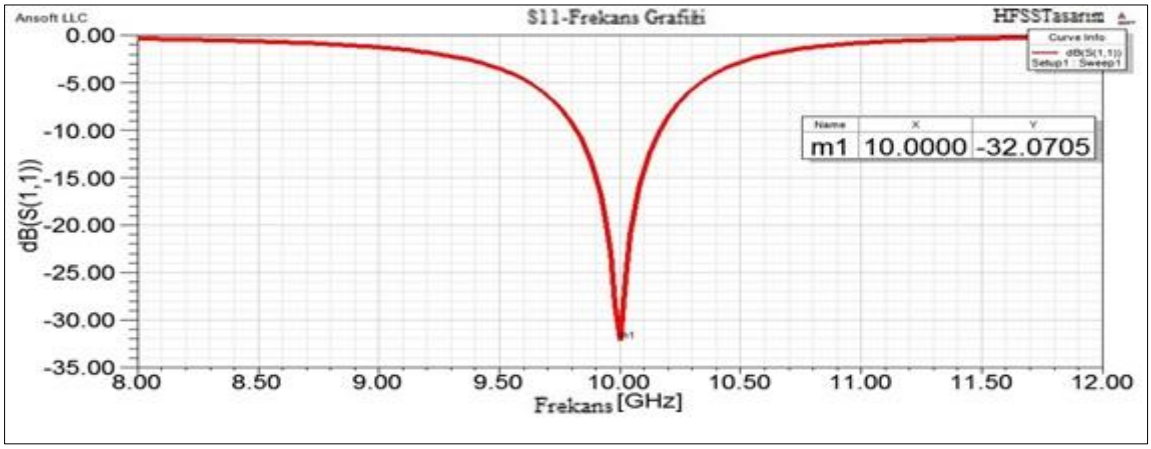
20. Huang, G. C., Iskander, M. F., Hoque, M., Goodall, S. R. and Bocskor, T. (2015). Antenna Array Design and System for Directional Networking. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14(1), 1141.

21. Knyazev, S. and Shabunin, S. (2006). *Antenna Systems for the Meteorological Radar Design*. Proceeding of the 3rd Europen Radar Conference, 206.

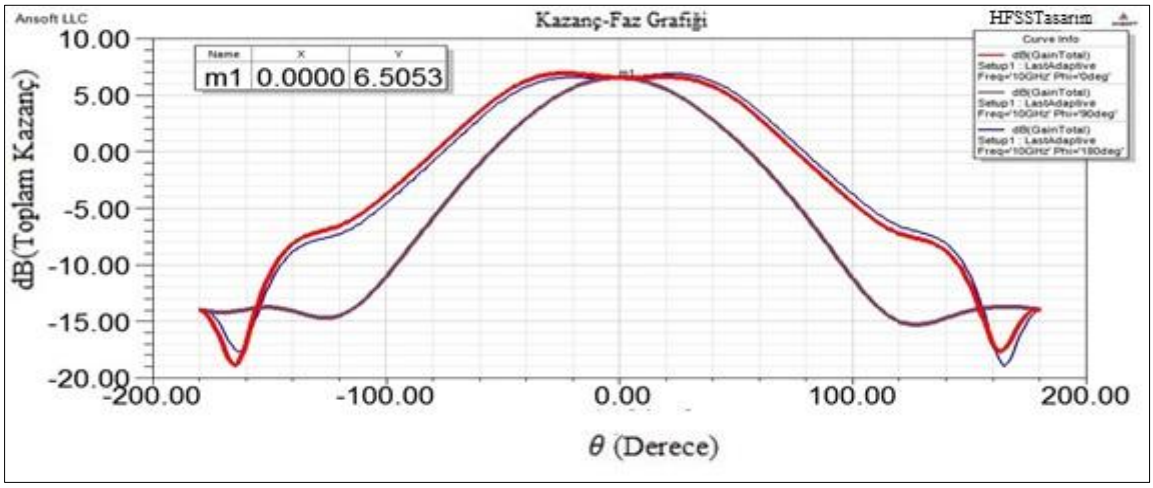
22. Yıldıran, O. (2017). *Designing a Patch Antenna for 5G Communication System. Master of Science Thesis*. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Çankaya University, Ankara, 6-10.

EKLER

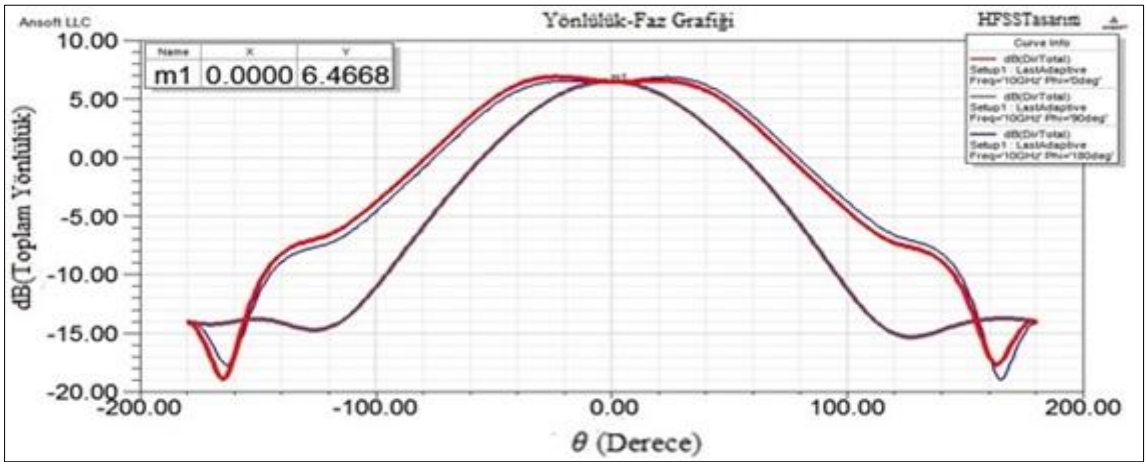
EK-1. Tek yama anten ait simülasyon 11 sonuçları



Şekil 1.1. S11-frekans grafiği

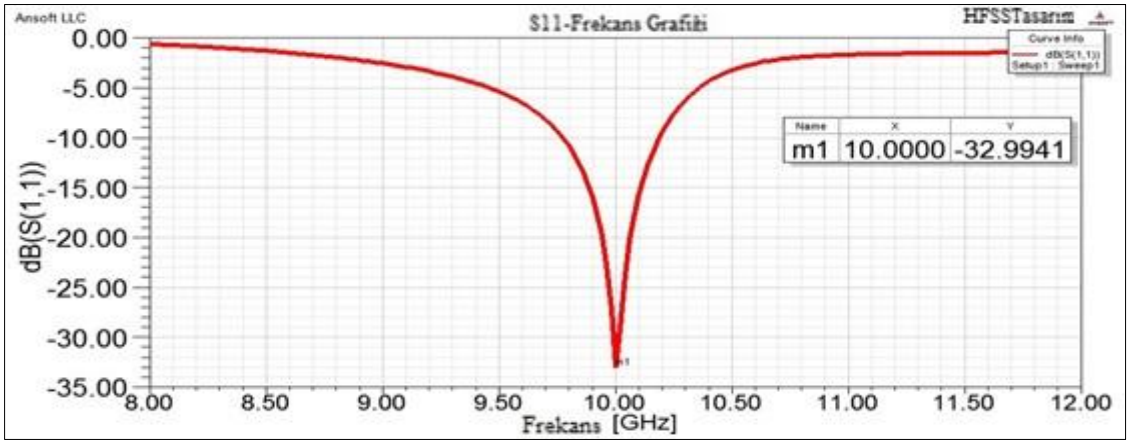


Şekil 1.2. Kazanç-faz grafiği

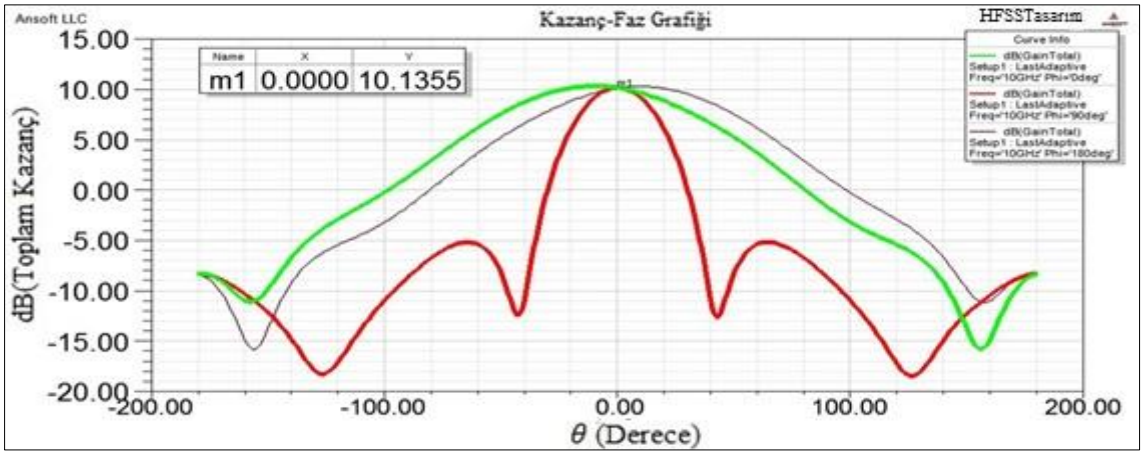


Şekil 1.3. Yönlülük-faz grafiği

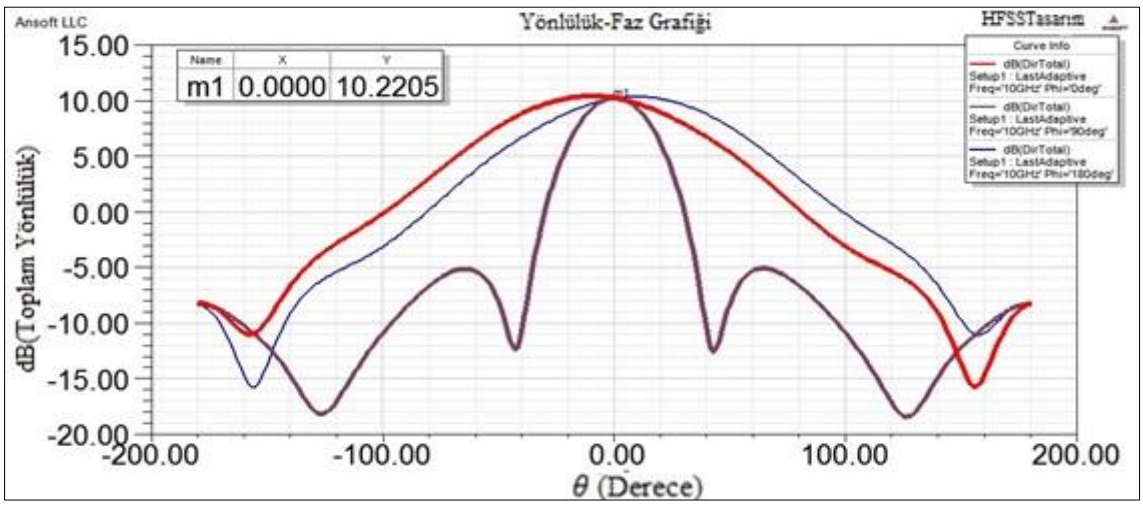
EK-2. 2x1 dizi yama anten ait simülasyon 10 sonuçları



Şekil 2.1. S11-frekans grafiği

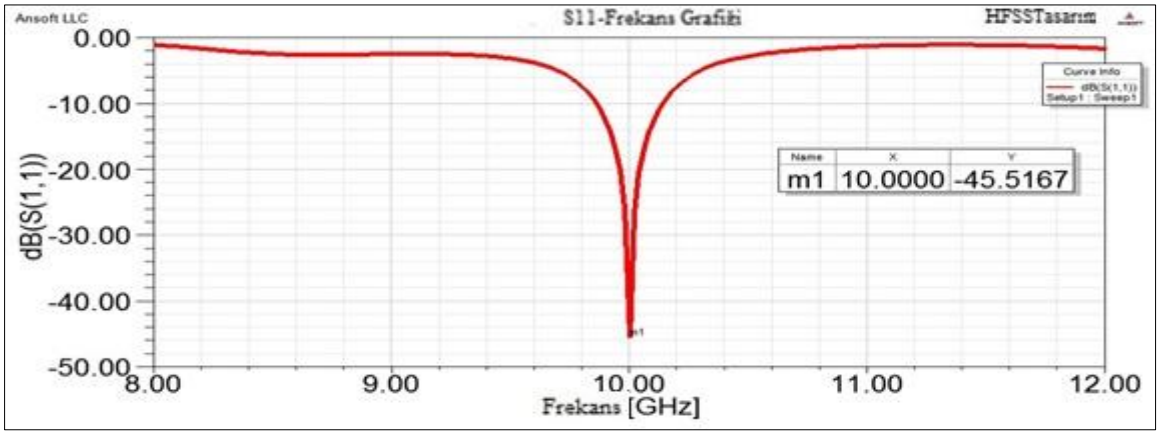


Şekil 2.2. Kazanç-faz grafiği

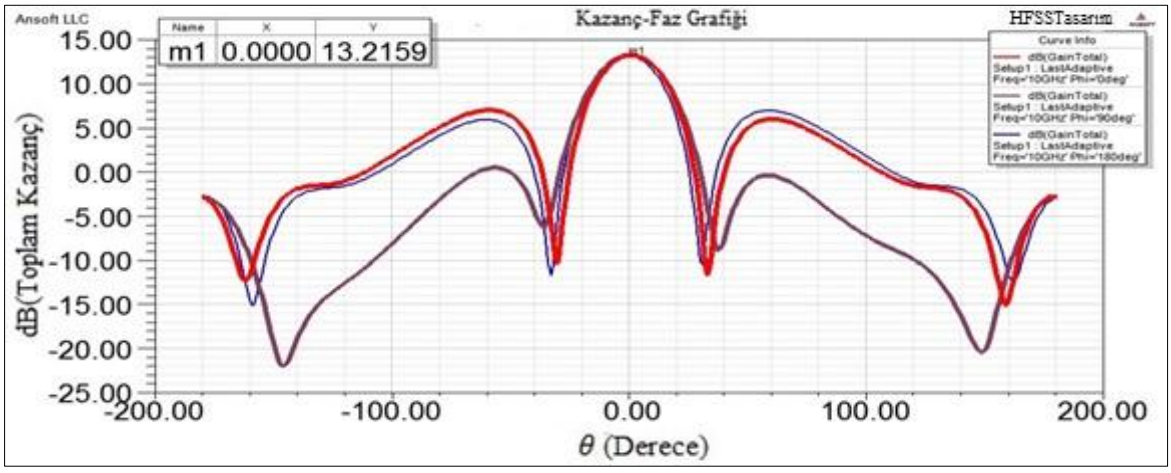


Şekil 2.3. Yönlülük-faz grafiği

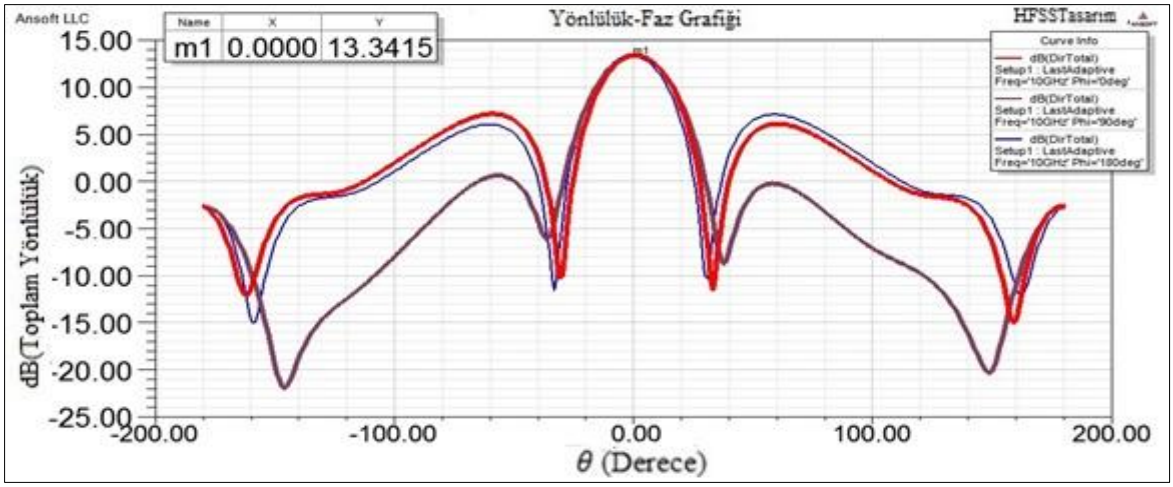
EK-3. 2x2 dizi yama anten ait simülasyon 6 sonuçları



Şekil 3.1. S11-frekans grafiği

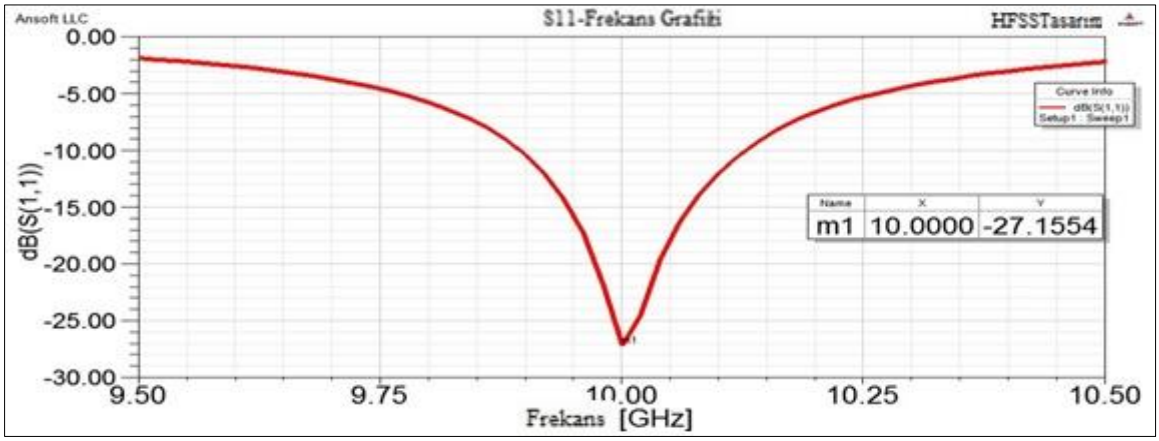


Şekil 3.2. Kazanç-faz grafiği

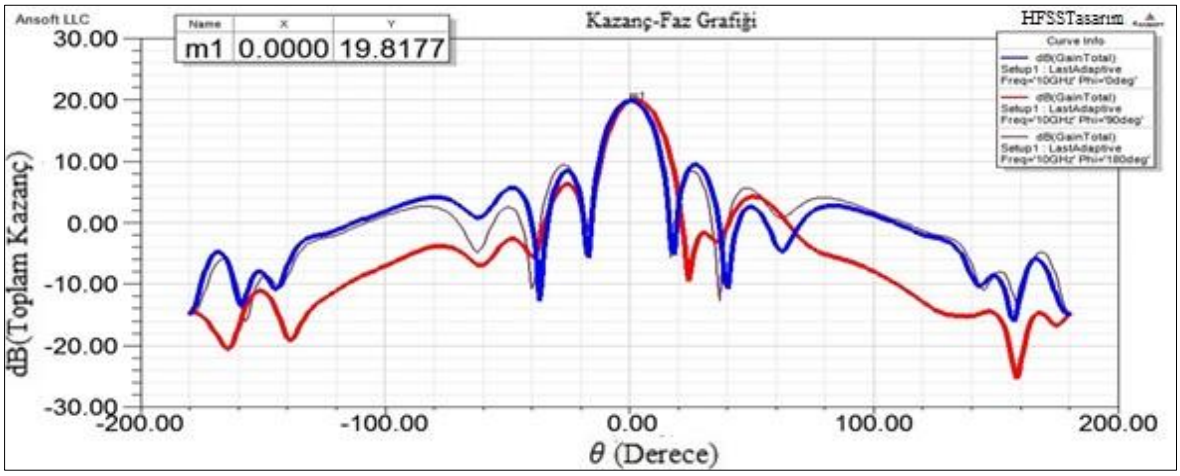


Şekil 3.3. Yönlülük-faz grafiği

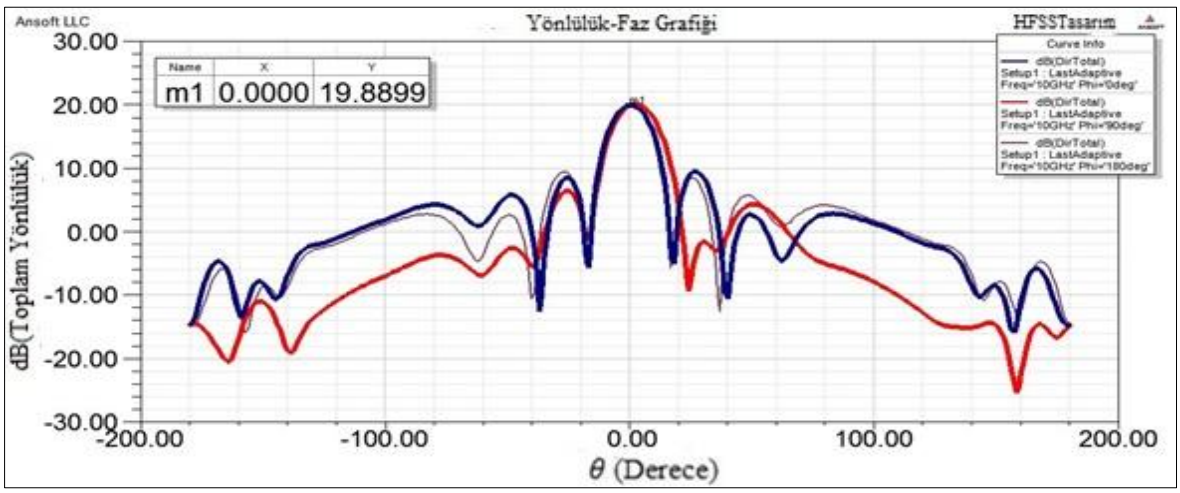
EK-4. 4x4 dizi yama anten ait simülasyon 8 sonuçları



Şekil 4.1. S11-kazanç grafiği

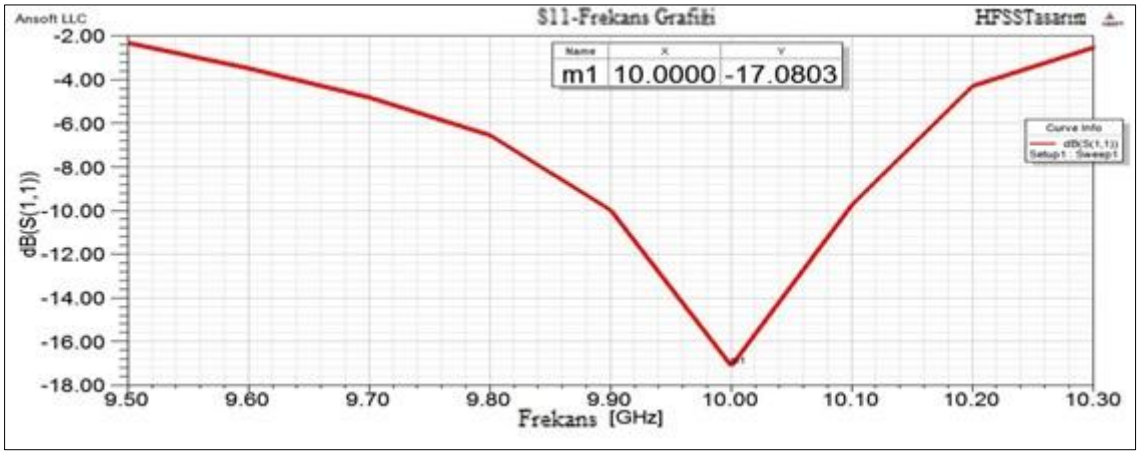


Şekil 4.2. Kazanç-faz grafiği

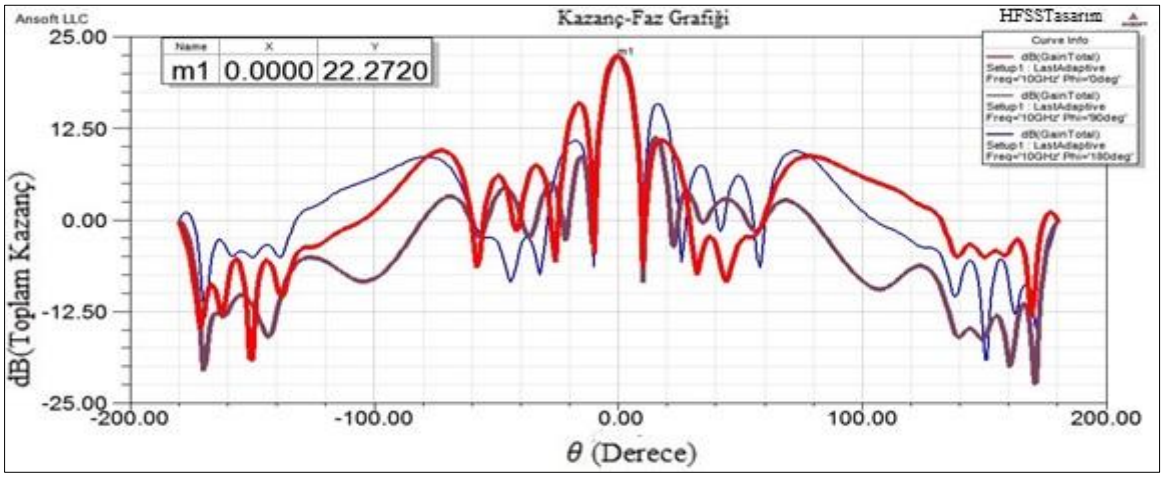


Şekil 4.3. Yönlülük-faz grafiği

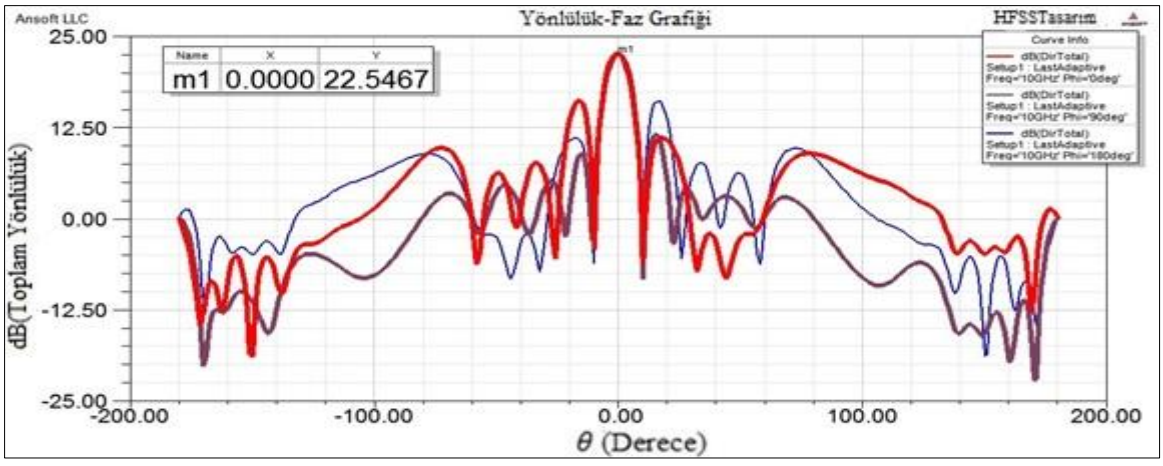
EK-5. Tek noktadan beslemeli 8x8 dizi yama anten ait simülasyon 6 sonuçları



Şekil 5.1. S11-frekans grafiği

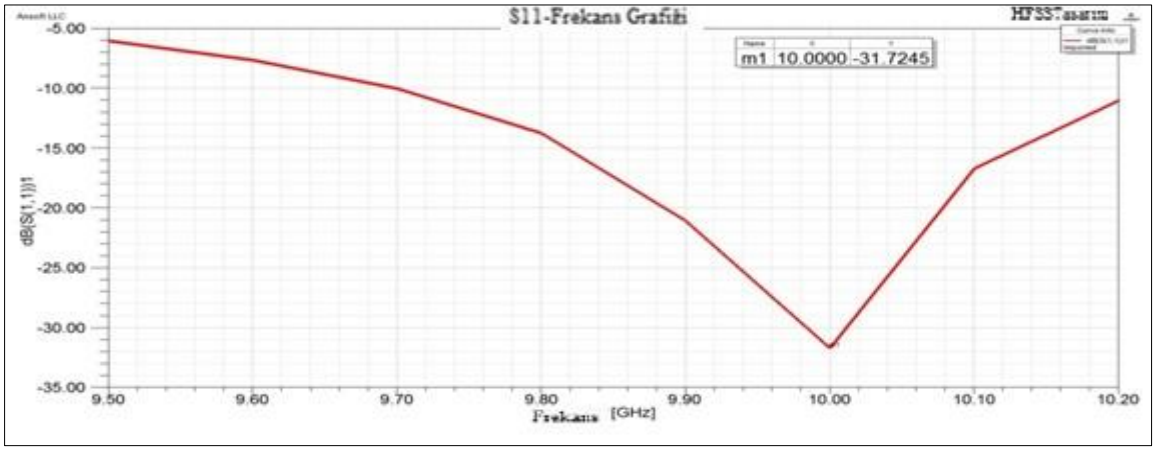


Şekil 5.2. Kazanç-faz grafiği

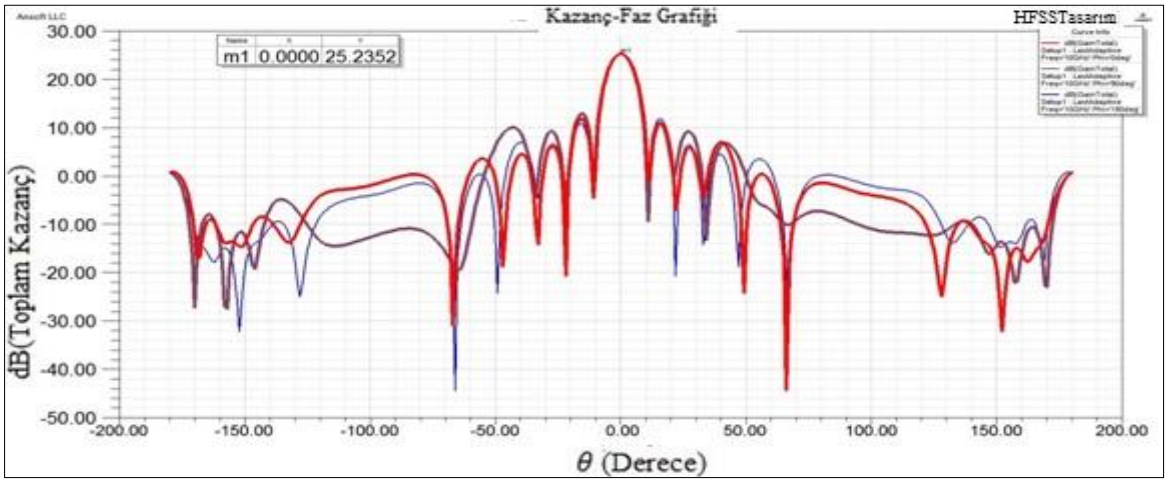


Şekil 5.3. Yönlülük-faz grafiği

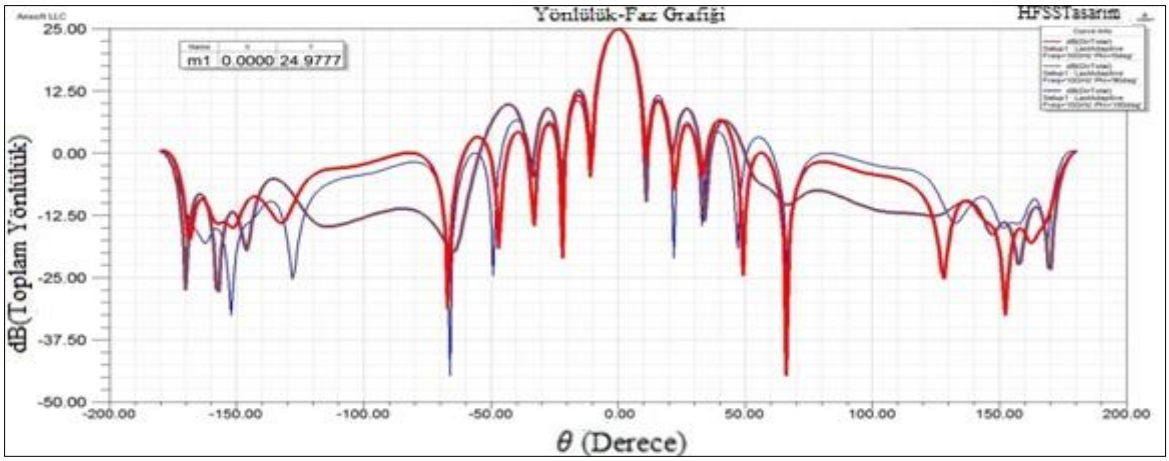
EK-6. Farklı noktalardan beslemeli 8x8 dizi yama anten ait simülasyon 3 sonuçları



Şekil 6.1. S11-frekans grafiği



Şekil 6.2. Kazanç-faz grafiği



Şekil 6.3. Yönlülük-faz grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : DİLBER, Ümit

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 03.01.1991, Trabzon

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0539 273 16 00

e-mail : umitdlbr@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Müh.	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Müh.	2014
Lise	Kanuni Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Roketsan A.Ş.	Test Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Işımalar

Dilber, Ü. and Nursel, A. (2018). *Rectangular Patch Array Antenna Design at 10 GHz for Wireless Communication.* International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018), 1518-1525.

Hobiler

Yüzme, futbol ve satranç

DİZİN

A

anten · 1, 63

B

bant genişliği · 9, 71, 95
besleme yöntemi · 13
boşluk mesafesi · 78

Ç

çalışma frekansı · 15, 24

D

bağıl geçirgenlik sabiti · 12, 21
dizi anten · 19
Dizi anten · 1
dizi faktörü · 17
dizi yama anten · 11, 51, 74
Dizi yama anten · 28
duran dalga · 6

E

efektif bağıl geçirgenlik sabiti · 15
efektif uzunluk · 25
elektrik alan · 4
empedans · 49
empedans uyumlaması · 8

F

farklı noktalardan besleme · 89
faz farkı · 56, 72
faz kaydırıcı · 19
faz kayması · 34

G

geri dönüş kaybı · 6, 30, 95
geri yansıma katsayısı · 7

H

HFSS · 2, 21
hüzme · 46, 60
Hüzme açısı · 8
hüzme genişliği · 95

K

kazanç · 5, 16, 39, 41, 43, 52, 70, 95

M

maksimum ışıma · 66, 92
maksimum ışıma şiddeti · 86
manyetik alan · 4
merkez frekans · 61, 83
Mikroşerit · 10

P

parametre · 3
phi · 43, 44, 55, 74, 84, 85, 91

R

ışıma örüntüsü · 33, 46, 53, 93
ışıma yoğunluğu · 5
Rogers RO4232 · 41

S

simülasyon · 29, 40, 52, 77, 81, 96

T

tek yama anten · 30, 69
θ · 43, 55, 74, 84, 85, 91
toprak tabakası · 23
tümleşik besleme yöntem · 17
TXLINE 2003 · 27

V

VSWR · 7, 43, 47, 54, 62, 76, 87, 95

Y

yama anten · 1, 56
yama anten sayısı · 86
yönlülük · 5, 33, 39, 41, 52, 64, 70, 85, 91, 95



GAZİ GELECEKTİR..