

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ELEKTROMANYETİK BENZETİMLER YOLUYLA
ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU İÇİN GRAFİK
KULLANICI ARAYÜZLÜ BİR YAZILIM
GELİŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Tezi Hazırlayan
Murat Can SERKUŞ**

**Danışman
Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI**

**Şubat 2021
KAYSERİ**

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ELEKTROMANYETİK BENZETİMLER YOLUYLA
ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU İÇİN GRAFİK
KULLANICI ARAYÜZLÜ BİR YAZILIM
GELİŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Tezi Hazırlayan
Murat Can SERKUŞ**

**Danışman
Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI**

**Şubat 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Murat Can Serkuş

İmza

YÖNERGEYE UYGUNLUK

Elektromanyetik Benzetimler Yoluyla Anten Tasarımı ve Optimizasyonu İçin Grafik Kullanıcı Arayüzü Bir Yazılım Geliştirilmesi adlı Yüksek Lisans Tezi, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Murat Can SERKUŞ
İmza

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI
İmza



.....ABD Başkanı

Adı Soyadı

KABUL VE ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI danışmanlığında Murat Can SERKUŞ tarafından hazırlanan “Elektromanyetik Benzetimler Yoluyla Anten Tasarımı ve Optimizasyonu İçin Grafik Kullanıcı Arayüzü Bir Yazılım Geliştirilmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

... / ... / ...

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞÇIHABEŞ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

... / ... / ...

.....
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Bu tezi yazmamda yardımcı olan ve üstümde çok emeği olan tez danışmanım Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI'ya ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim (Kayseri, .././20..).

Murat Can SERKUŞ



ELEKTROMANYETİK BENZETİMLER YOLUYLA ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU İÇİN GRAFİK KULLANICI ARAYÜZLÜ BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

Murat Can Serkuş

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2021

Danışman: Prof. Dr. Serhan Yamaçlı

ÖZET

Pratik çalışmalar göstermektedir ki ilgili denklemler kullanılarak anten tasarımı yapıldığında, antenin merkez frekansı, hedeflenen merkez frekanstan hafif miktarda farklı olabilmektedir. Bu problem, antenin merkez frekansına etki eden fiziksel parametrelerde küçük ölçülerde ayarlamalar yaparak çözülmektedir. Diğer bir deyişle manuel olarak bir boyut ayarlaması yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Python programlama dilinde yazılan grafik kullanıcı arayüzlü bir yazılım ile bu süreç otomatik hale getirilmiştir. Geliştirilen yazılım, girilen anten parametrelerine göre bir tasarım yapmakta, daha sonra ise bir döngü içerisinde elektromanyetik benzetimleri tekrarlayarak hedeflenen merkez frekansı sağlamak için anten boyutlarının en uygun değerlerini hesaplamaktadır. Anten boyutlarının optimizasyonu için adım adım optimizasyon algoritması, tahmin optimizasyon algoritması ve hızlı tahmin optimizasyon algoritması olmak üzere üç farklı algoritma kullanılmıştır. Adım adım optimizasyon algoritması, ilgili parametreyi ileri ve geri taşıyarak sonuca ulaşırken, tahmin ve hızlı tahmin optimizasyon algoritması makine öğrenmesi algoritmalarını kullanmaktadır. Elektromanyetik benzetimler için ise sayısal bir yöntem olan, zaman tanım bölgesinde sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen elektromanyetik benzetim motoru ayrıca anten tasarımından bağımsız şekilde girilen herhangi bir üç boyutlu elektromanyetik problemi çözecek şekilde müstakil bir program haline de getirilerek literatüre ikinci bir katkı sunulması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: Zaman tanım bölgesinde sonlu farklar metodu, grafik kullanıcı arayüzlü program, elektromanyetik benzetim, anten tasarımı, optimizasyon, makine öğrenmesi.

DEVELOPMENT OF A GRAPHIC USER INTERFACE SOFTWARE FOR ANTENNA DESIGN AND OPTIMIZATION VIA ELECTROMAGNETIC SIMULATIONS

Murat Can Serkuş

Nuh Naci Yazgan University, Institute of Sciences

Master of Science Thesis, February 2021

Supervisor: Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

ABSTRACT

Practical studies show that, when an antenna is designed using the relevant design equations, the obtained center frequency may be slightly different than the aimed center frequency. This problem is solved by making small changes in the physical parameters that affect the center frequency of the antenna. In other words, a size adjustment is made manually. Within the scope of this study, this process was automated with a graphical user interface software written in Python programming language. The software makes a design according to the entered antenna parameters, then optimizes the values of the antenna dimensions by repeating electromagnetic simulation of the antenna in a loop. Three different algorithms are used for the optimization of antenna sizes: step-by-step optimization algorithm, prediction optimization algorithm and fast prediction optimization algorithm. The step-by-step optimization algorithm reaches the result by moving the relevant parameter back and forth, while the prediction and fast prediction optimization types use machine learning algorithms. The finite difference time domain method, which is a numerical method, is used for performing electromagnetic simulations. The electromagnetic simulation engine is also packed as graphical user interface software as a second contribution to the literature.

Keywords: Finite difference time domain method, graphical user interface, electromagnetic simulation, antenna design, optimization, machine learning.

İÇİNDEKİLER

ELEKTROMANYETİK BENZETİMLER YOLUYLA ANTEN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU İÇİN GRAFİK KULLANICI ARAYÜZLÜ BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI.....	iii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii

1. BÖLÜM: GİRİŞ

1.1. Antenler Hakkında Genel Bilgiler	1
1.2. Elektromanyetik Benzetim Yöntemleri	3
1.3. Bu Çalışmanın Amaçları.....	3

2. BÖLÜM: LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Zaman Tanım Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi.....	5
2.1.1. Kararlılık.....	9
2.1.2. Sınır şartları.....	9
2.2. Pratikte Çok Kullanılan Anten Türleri	9
2.3. Doğrusal Regresyon	10

3. BÖLÜM: YÖNTEM

3.1.	Kullanılan Anten Tasarım Denklemleri	12
3.1.1.	Kenar Beslemeli Dikdörtgensel Yama Anten	12
3.1.2.	Kenar Beslemeli Dairesel Yama Anten	13
3.1.3.	Kenar Beslemeli Kare Yama Anten.....	14
3.1.4.	Ek Beslemeli Dikdörtgensel Yama Anten ve Kare Yama Anten.	14
3.1.5.	Mikroşerit Dizi Antenler.....	15
3.1.6.	Baskılı Katlanmış Dipol Anten.....	16
3.1.7.	Piramit Biçimli Horn Anten	17
3.2.	Zaman Tanım Bölgesinde Sonlu Farklar Yönteminin Python Programlama Dilinde Gerçekleştirilmesi.....	18
3.3.	Kullanılan Anten Optimizasyon Yöntemleri.....	19
3.3.1.	Adım Adım Anten Optimizasyon Algoritması	19
3.3.2.	Tahmin Anten Optimizasyon Algoritması	19
3.3.3.	Hızlı Tahmin Anten Optimizasyon Algoritması	19

4. BÖLÜM: YAZILIM ARAYÜZÜ

4.1.	Genel Bilgiler.....	22
4.2.	Geliştirilen Üç Boyutlu Elektromanyetik Benzetim Programı: NF3DSIM...	23
4.2.1.	Çeyrek Dalga Dönüştürücü Devresinin Benzetimin Yapılması ..	33
4.2.2.	Mikroşerit Kenar Beslemeli Dikdörtgensel Yama Anteninin Benzetimin Yapılması.....	38
4.3.	Geliştirilen Anten Tasarım ve Optimizasyon Programı: ANTDESVS.....	44
4.3.1.	Mikroşerit Kenar Beslemeli Dikdörtgensel Yama Anteninin Tasarım ve Benzetiminin Yapılması	50
4.3.2.	Mikroşerit Kenar Beslemeli Dairesel Yama Anteninin Tasarım ve Benzetiminin Yapılması	53
4.3.3.	Mikroşerit Ek Beslemeli Kare Yama Anteninin Tasarım ve Benzetiminin Yapılması	56

5. BÖLÜM: ANTEN TASARIM VE OPTİMİZASYON ÖRNEKLERİ

5.1. Piramit Biçimli Horn Anten Tasarımı ve Optimizasyonu	60
5.1.1. Antenin Adım Adım Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	63
5.1.2. Antenin Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	71
5.1.3. Antenin Hızlı Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	75
5.2. Ek Beslemeli Dikdörtgensel Yama Mikroşerit Anten Tasarımı ve Optimizasyonu	85
5.2.1. Antenin Adım Adım Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	88
5.2.2. Antenin Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	95
5.2.3. Antenin Hızlı Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	98
5.3. 1x2 Ortak Beslemeli Dikdörtgensel Yama Dizi Anten Tasarımı ve Optimizasyonu	106
5.3.1. Antenin Adım Adım Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	108
5.3.2. Antenin Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	116
5.3.3. Antenin Hızlı Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	119
5.4. Baskılı Katlanmış Dipol Anten Tasarımı ve Optimizasyonu.....	127
5.4.1. Antenin Adım Adım Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	129
5.4.2. Antenin Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	136
5.4.3. Antenin Hızlı Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu.....	139

6. BÖLÜM: SONUÇLAR

6.1. Sonuçlar ve Tartışma	148
6.2. Gelecek Çalışmalar	152
KAYNAKÇA.....	153
ÖZGEÇMİŞ	158



KISALTMALAR

Δ : Nabla operatörü

$\vec{E}$: Elektrik alan vektörü

$\vec{H}$: Manyetik alan vektörü

ε : Dielektrik sabiti

GHz: Giga Hertz

Db: Desibel

mm: Milimetre

s: Saniye

ns: Nano saniye

ZTBSF: Zaman tanım bölgesinde sonlu farklar

PEC: Mükemmel elektrik iletkeni

CPML: Evrişimli mükemmel uyumlu katman

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları.....	51
Tablo 4.2. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları.....	54
Tablo 5.1. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları.....	61
Tablo 5.2. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerler.....	84
Tablo 5.3. Adım adım optimizasyonu önceki ve sonraki değerler	84
Tablo 5.4. Tahmin optimizasyonu önceki ve sonraki değerler.....	84
Tablo 5.5. Hızlı tahmin optimizasyonu önceki ve sonraki değerler.	85
Tablo 5.6. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre hedef merkez frekansları ve optimizasyondan önceki ve sonraki frekansları.....	85
Tablo 5.7. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları.....	86
Tablo 5.8. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerler.....	105
Tablo 5.9. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre hedef merkez frekansları ve optimizasyondan önceki ve sonraki frekansları.....	106
Tablo 5.10. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları.....	107
Tablo 5.11. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerler.....	126
Tablo 5.12. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre hedef merkez frekansları ve optimizasyondan önceki ve sonraki frekansları.....	127
Tablo 5.13. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları.....	128
Tablo 5.14. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerler.....	146
Tablo 5.15. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre hedef merkez frekansları ve optimizasyondan önceki ve sonraki frekansları.....	147

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Mikroşerit anten.....	1
Şekil 1.2. Dizi anten.....	2
Şekil 1.3. Dipol Anten	2
Şekil 1.4. Horn anten	2
Şekil 2.1. Yee hücresi [1].....	6
Şekil 2.2. Doğrusal regresyon.....	10
Şekil 3.1. Mikroşerit dikdörtgen yama anten [24]	13
Şekil 3.2. Kenar beslemeli dairesel yama anten [24].....	14
Şekil 3.3. Kenar beslemeli kare yama anten [43]	14
Şekil 3.4. Ek beslemeli dikdörtgensel yama anten [24].....	15
Şekil 3.5. Mikroşerit dizi anten [24]	16
Şekil 3.6. Baskılı katlanmış dipol anten [24].....	16
Şekil 3.7. Piramit biçimli horn anten [24]	17
Şekil 3.8. Yazılımda uygulanan ZTBSF yöntemi işaret akış diyagramı	18
Şekil 3.9. Adım adım anten optimizasyonu için işaret-akış diyagramı	20
Şekil 3.10. Tahmin anten optimizasyonu işaret-akış diyagramı	21
Şekil 3.11. Hızlı tahmin anten optimizasyonu işaret-akış diyagramı	21
Şekil 4.1. Geliştirilen NF3DSIM arayüzünün genel görünümü	24
Şekil 4.2. “Dosya” sekmesi.....	24
Şekil 4.3. “Ekle” sekmesi	25
Şekil 4.4. Dikdörtgen ekleme penceresi	25
Şekil 4.5. Küre ekleme penceresi.....	25
Şekil 4.6. Silindir ekleme penceresi.....	26
Şekil 4.7. Halka ekleme penceresi	26
Şekil 4.8. Kesik piramit ekleme penceresi.....	27
Şekil 4.9. Materyal ekleme penceresi	27
Şekil 4.10. Direnç ekleme penceresi.....	28
Şekil 4.11. Kondansatör ekleme penceresi	28
Şekil 4.12. Diyot ekleme penceresi	29
Şekil 4.13. Bobin ekleme penceresi.....	29
Şekil 4.14. Elektriksel port ekleme penceresi.....	30

Şekil 4.15. Gerilim kaynağı ekleme penceresi	30
Şekil 4.16. Benzetim sekmesi	31
Şekil 4.17. Birimler penceresi.....	31
Şekil 4.18. Benzetim parametreleri penceresi	31
Şekil 4.19. Çizim frekans aralığı penceresi	32
Şekil 4.20. Sınır koşulları penceresi	32
Şekil 4.21. Çeyrek dalga dönüştürücü devresi.....	33
Şekil 4.22. Alttaş materyali.....	33
Şekil 4.23 (a) Alttaş nesnesi ve (b) 1.8mm genişliğe sahip mikroşerit yol	34
Şekil 4.24. (a) 1mm genişliğe sahip mikroşerit yol ve (b) 0.4mm genişlikli mikroşerit yol	34
Şekil 4.25. 50 ohm iç dirence sahip gerilim kaynağı.....	35
Şekil 4.26. 100 ohm'luk direnç.....	35
Şekil 4.27. 50 ohm empedansa sahip port	35
Şekil 4.28. 100 ohm empedansa sahip port	36
Şekil 4.29. Yapı için benzetim parametreleri penceresi	36
Şekil 4.30. Yapı için çizim frekans aralıkları	36
Şekil 4.31. Yapı için sınır koşulları	37
Şekil 4.32. Yapının programdaki görünümü	37
Şekil 4.33. Çeyrek dalga dönüştürücü S_{21} karakteristikleri	38
Şekil 4.34. 5.8GHz mikroşerit kenar beslemeli dikdörtgensel yama anten.....	38
Şekil 4.35. Alttaş materyali.....	39
Şekil 4.36. (a) Alttaş nesnesi ve (b) PEC toprak plakası	39
Şekil 4.37. (a) Yama nesnesi ve (b) 2.5654mm genişliğindeki mikroşerit yol.....	39
Şekil 4.38. 0.1284mm genişliğindeki mikroşerit yol.....	40
Şekil 4.39. 50 ohm iç dirence sahip gerilim kaynağı.....	40
Şekil 4.40. 50 ohm empedansa sahip port	41
Şekil 4.41. Anten için benzetim parametreleri penceresi	41
Şekil 4.42. Anten için S_{11} çizim frekans aralıkları.....	41
Şekil 4.43. Anten için sınır koşulları	42
Şekil 4.44. Yapının programdaki görünümü	42
Şekil 4.45. Antenin S_{11} karakteristikleri	43
Şekil 4.46. Geliştirilen yazılım ışıma karakteristiği	43
Şekil 4.47. Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği	44

Şekil 4.48. Grafik kullanıcı arayüzünün genel görünümü ve “Dizi antenler” sekmesi ..	45
Şekil 4.49. “Mikroşerit Antenler” sekmesi	45
Şekil 4.50. “Dipol Antenler” sekmesi	46
Şekil 4.51. “Horn Antenler” sekmesi	46
Şekil 4.52. Anten kaydet penceresi	46
Şekil 4.53. (a) Anten tasarım penceresinde üç boyutlu görünüş sekmesi ve (b) anten tasarım penceresinde çizim sekmesi	47
Şekil 4.54. Optimizasyon penceresi	48
Şekil 4.55. (a) Optimizasyon parametreleri optimizasyon adım penceresi ve (b) optimizasyon parametleri optimizasyon çarpanı penceresi	49
Şekil 4.56. Optimizasyonu başlatma ekranı	49
Şekil 4.57. Geliştirilen yazılım ile tasarlanan mikroşerit kenar beslemeli dikdörtgensel yama anten	50
Şekil 4.58. Antenin benzetim parametreleri	51
Şekil 4.59. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları	51
Şekil 4.60. Antenin S_{11} karakteristikleri	52
Şekil 4.61. Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği	52
Şekil 4.62. Geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği	53
Şekil 4.63. Geliştirilen yazılım ile tasarlanan mikroşerit kenar beslemeli dairesel yama anten	54
Şekil 4.64. Antenin benzetim parametreleri	54
Şekil 4.65. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları	55
Şekil 4.66. Antenin S_{11} karakteristikleri	55
Şekil 4.67. Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği	56
Şekil 4.68. Geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği	56
Şekil 4.69. Geliştirilen yazılım ile çizilen mikroşerit ek beslemeli kare yama anten	57
Şekil 4.70. Antenin benzetim parametreleri	57
Şekil 4.71. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları	58
Şekil 4.72. Antenin S_{11} karakteristikleri	58
Şekil 4.73. Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği	59
Şekil 4.74. Geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği	59
Şekil 5.1. Piramit biçimli horn anten tasarım penceresi	61
Şekil 5.2. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları	62
Şekil 5.3. Anten benzetim parametreleri	62

Şekil 5.4. Anten optimizasyon parametreleri.....	63
Şekil 5.5. Zaman tanım bölgesinde örneklenmiş gerilim penceresi	64
Şekil 5.6. Zaman tanım bölgesi örneklenmiş akım grafiği	64
Şekil 5.7. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafiği	65
Şekil 5.8. Frekans tanım bölgesi örneklenmiş akım genlik ve faz grafiği.....	65
Şekil 5.9. Frekans tanım bölgesi gerilim kaynağı genlik ve faz grafiği	66
Şekil 5.10. S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri	66
Şekil 5.11. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği	67
Şekil 5.12. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	67
Şekil 5.13. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	68
Şekil 5.14. Birinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği.....	68
Şekil 5.15. İkinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	69
Şekil 5.16. Üçüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	69
Şekil 5.17. Dördüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği.....	70
Şekil 5.18. Beşinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği.....	70
Şekil 5.19. Adım adım optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi ..	71
Şekil 5.20. Adım adım optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü	71
Şekil 5.21. İlk benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri	72
Şekil 5.22. İlk örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	73
Şekil 5.23. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	73
Şekil 5.24. Üçüncü örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	74
Şekil 5.25. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği.....	74
Şekil 5.26. Tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi.....	75
Şekil 5.27. Tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü.....	75
Şekil 5.28. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği.....	76
Şekil 5.29. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği	76
Şekil 5.30. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafiği.....	77
Şekil 5.31. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafiği.....	77
Şekil 5.32. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafiği	78
Şekil 5.33. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği	78
Şekil 5.34. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği.	79
Şekil 5.35. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği.	79

Şekil 5.36. İlk benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri	80
Şekil 5.37. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği	81
Şekil 5.38. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği	81
Şekil 5.39. Üçüncü örnek olan S_{11} parametresi grafiği	82
Şekil 5.40. Tahmin edilen değer ile elde edilen S_{11} parametresi grafiği	82
Şekil 5.41. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi.	83
Şekil 5.42. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü	83
Şekil 5.43. Ek beslemeli mikroşerit dikdörtgen yama antenin anten tasarım penceresi.	86
Şekil 5.44. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları	87
Şekil 5.45. Anten için girilen benzetim parametreleri	87
Şekil 5.46. Anten için girilen optimizasyon parametreleri	88
Şekil 5.47. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği	88
Şekil 5.48. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği	89
Şekil 5.49. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri ...	89
Şekil 5.50. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri	90
Şekil 5.51. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri	90
Şekil 5.52. S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri	91
Şekil 5.53. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği	91
Şekil 5.54. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	92
Şekil 5.55. YZ düzlemine ışıma karakteristiği	92
Şekil 5.56. Birinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	93
Şekil 5.57. İkinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	93
Şekil 5.58. Üçüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	94
Şekil 5.59. Dördüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	94
Şekil 5.60. Adım adım optimizasyon algoritması yapılan optimizasyon penceresi	94
Şekil 5.61. Adım adım optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü	95
Şekil 5.62. İlk örnek olan S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri	96
Şekil 5.63. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği	96
Şekil 5.64. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği	97
Şekil 5.65. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği	97
Şekil 5.66. Tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi	98

Şekil 5.67. Tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü.....	98
Şekil 5.68. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği.....	99
Şekil 5.69. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği	99
Şekil 5.70. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri .	100
Şekil 5.71. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri.....	100
Şekil 5.72. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri	101
Şekil 5.73. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği	101
Şekil 5.74. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	102
Şekil 5.75. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	102
Şekil 5.76. Hesaplanan değer ile elde edilen S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri .	103
Şekil 5.77. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	103
Şekil 5.78. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	104
Şekil 5.79. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği.....	104
Şekil 5.80. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi	104
Şekil 5.81. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü.....	105
Şekil 5.82. 1x2 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi antenin tasarım penceresi....	106
Şekil 5.83. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları.....	107
Şekil 5.84. Anten için girilen benzetim parametreleri	108
Şekil 5.85. Anten için girilen optimizasyon parametreleri	108
Şekil 5.86. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği.....	109
Şekil 5.87. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği	109
Şekil 5.88. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri .	110
Şekil 5.89. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri.....	110
Şekil 5.90. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri	111
Şekil 5.91. S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri	111
Şekil 5.92. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği	112
Şekil 5.93. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	112
Şekil 5.94. YZ düzlemine ışıma karakteristiği	113
Şekil 5.95. Birinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği.....	113
Şekil 5.96. İkinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	114
Şekil 5.97. Üçüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	114

Şekil 5.98. Dördüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği.....	115
Şekil 5.99. Adım adım optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi.	115
Şekil 5.100. Adım adım optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü	116
Şekil 5.101. İlk örnek olan S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri.....	116
Şekil 5.102. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	117
Şekil 5.103. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	117
Şekil 5.104. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği.....	118
Şekil 5.105. Tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi	118
Şekil 5.106. Tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü.....	119
Şekil 5.107. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği.....	119
Şekil 5.108. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği	120
Şekil 5.109. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri	120
Şekil 5.110. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri...	121
Şekil 5.111. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri.	121
Şekil 5.112. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği	122
Şekil 5.113. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	122
Şekil 5.114. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	123
Şekil 5.115. Hesaplanan değer ile elde edilen S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri	123
Şekil 5.116. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	124
Şekil 5.117. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	124
Şekil 5.118. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği.....	125
Şekil 5.119. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi	125
Şekil 5.120. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü	126
Şekil 5.121. Baskılı katlanmış dipol anten tasarım penceresi.....	127
Şekil 5.122. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları.....	128
Şekil 5.123. Anten için girilen benzetim parametreleri	128
Şekil 5.124. Anten için girilen optimizasyon parametreleri	129
Şekil 5.125. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği.....	129

Şekil 5.126. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği	130
Şekil 5.127. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri.	130
Şekil 5.128. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri...	131
Şekil 5.129. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri	131
Şekil 5.130. S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri	132
Şekil 5.131. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği	132
Şekil 5.132. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	133
Şekil 5.133. YZ düzlemine ışıma karakteristiği	133
Şekil 5.134. Birinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği.....	134
Şekil 5.135. İkinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	134
Şekil 5.136. Üçüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği	135
Şekil 5.137. Dördüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği.....	135
Şekil 5.138. Adım adım optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi	136
Şekil 5.139. Adım adım optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü.	136
Şekil 5.140. İlk örnek olan S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri.....	137
Şekil 5.141. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	137
Şekil 5.142. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	138
Şekil 5.143. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği.	138
Şekil 5.144. Tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi	139
Şekil 5.145. Tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü.	139
Şekil 5.146. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği.....	140
Şekil 5.147. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği.	140
Şekil 5.148. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri	141
Şekil 5.149. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri...	141
Şekil 5.150. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri	142
Şekil 5.151. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği	142
Şekil 5.152. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	143
Şekil 5.153. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği	143
Şekil 5.154. Hesaplanan değer ile elde edilen S_{11} parametresi için genlik ve faz	

grafikleri.....	144
Şekil 5.155. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	144
Şekil 5.156. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği.....	145
Şekil 5.157. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği.	145
Şekil 5.158. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi	145
Şekil 5.159. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü.....	146



1. BÖLÜM

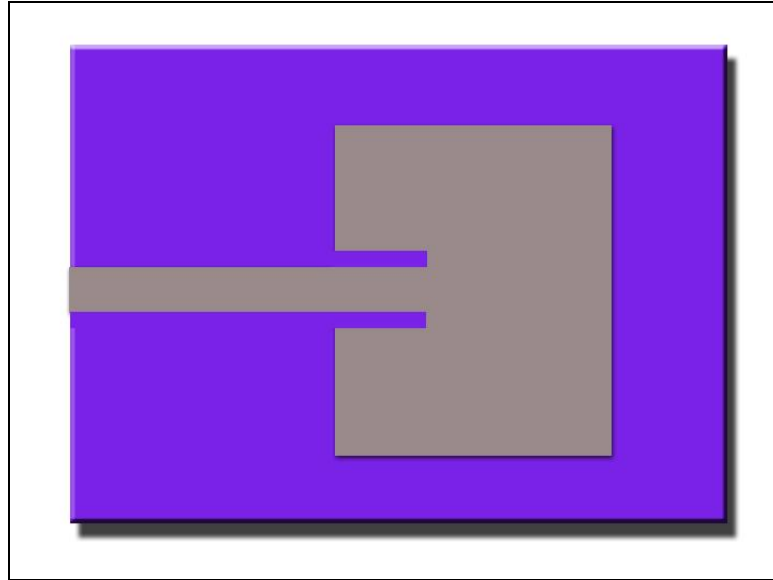
GİRİŞ

1.1. Antenler Hakkında Genel Bilgiler

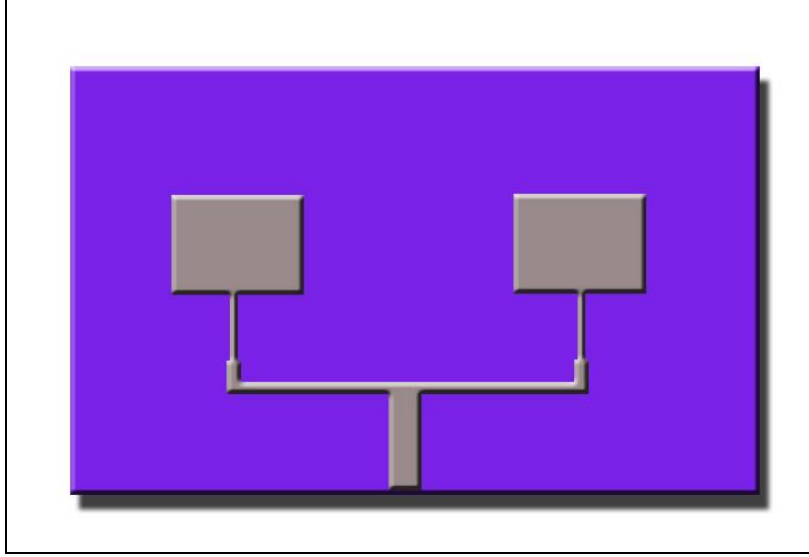
Antenler, elektromanyetik dalgaları göndermek veya almak için kullanılan elemanlardır. Antenler alıcı veya verici olarak kullanıldığı gibi hem alıcı hem de verici olarak da kullanılabilir. Mobil iletişim için küresel sistem (GSM), küresel konumlama sistemi (GPS), Bluetooth, kablosuz bağlantı alanı (Wi-Fi) gibi birçok kablosuz haberleşme türlerinde antenler kullanılmaktadır.

Kullanım alanının yaygın olması ve temel bir eleman olması nedeniyle antenlerin birçok çeşidi bulunmaktadır. Anten çeşitlerine örnek olarak dipol anten, monopul anten, mikroşerit anten, horn anten ve sarmal anten verilebilir.

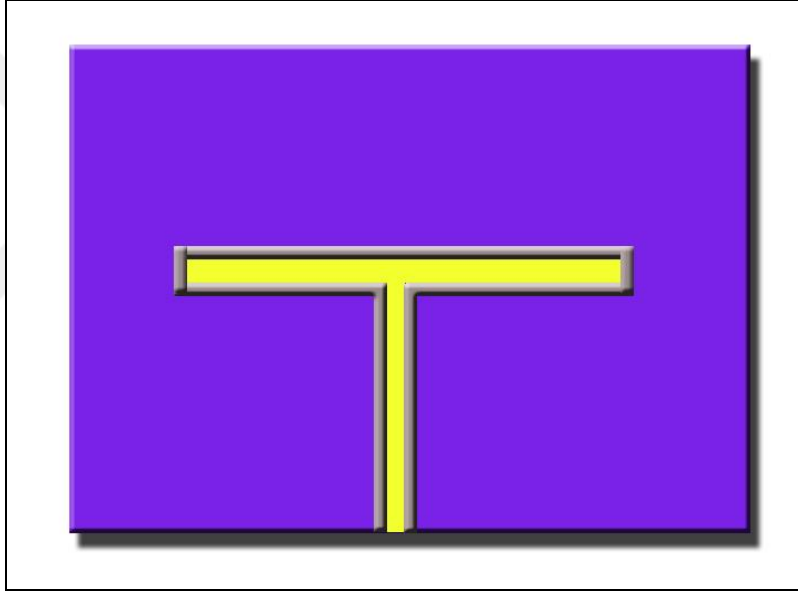
Örnek olarak, Şekil 1.1’de mikroşerit anten, Şekil 1.2’de dizi anten, Şekil 1.3’te dipol anten ve Şekil 1.4’te de horn anten gösterilmiştir.



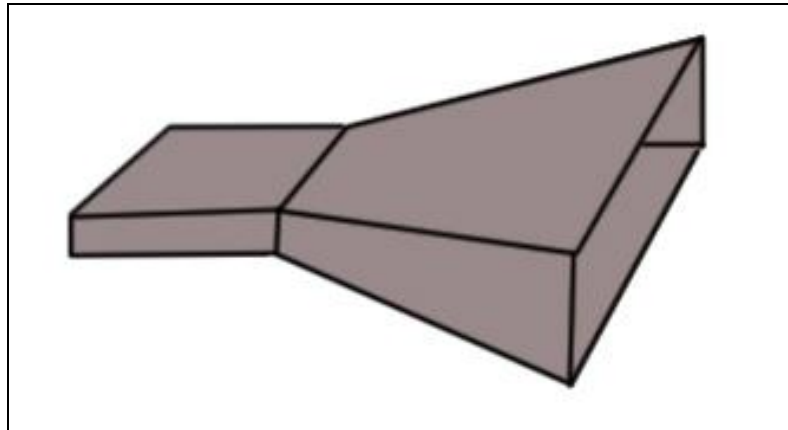
Şekil 1.1. Mikroşerit anten



Şekil 1.2. Dizi anten



Şekil 1.3. Dipol Anten



Şekil 1.4. Horn anten

Anten tasarımında önemli olan bazı parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelere örnek olarak yansıma katsayısı, bandgenişliği, ışıma karakteristiği, giriş empedansı, yönlülüğü, kazancı ve polarizasyonu verilebilir. Bandgenişliği, antenin merkez frekansı çevresinde olan iletim aralığını; ışıma karakteristiği, yönlere göre ışıma yoğunluğunu; yönlülük ise bir yöndeki ışımanın yoğunluk derecesini ifade etmektedir.

1.2. Elektromanyetik Benzetim Yöntemleri

Elektromanyetik benzetim için çeşitli sayısal metotlar kullanılmaktadır. Bu sayısal yöntemlere örnek olarak zaman tanım bölgesinde sonlu farklar metodu (ZTBSF) [1], sonlu elemanlar yöntemi [2], iletim hattı matrisi yöntemi [3] ve moment yöntemi [4] verilebilir.

Sonlu elemanlar yöntemi, herhangi bir problem geometrisini sonlu elemanlara ayıran ve kısmi differansiyel eşitlikleri olarak ifade ederek yaklaşık bir çözüme ulaşan sayısal bir yöntemdir [5]. B. Johns tarafından 1971 yılında geliştirilmiş iletim hattı matrisi yönteminde problem geometrisi hücrelere bölünmekte ve zaman tanım bölgesinde akım ve gerilim eşitlikleri elde edilmektedir [3,6].

ZTBSF metodu problem uzayını hücrelere bölerek, zaman tanım bölgesinde alan bileşenlerini iteratif olarak elde eden bir yöntemdir. Kane S. Yee, Maxwell eşitliklerinden sonlu fark eşitliklerini türetmiş ve iteratif çözümü elde etmiştir [1]. Yönteme ismini 1980 yılında Alan Taflove vermiştir [7]. ZTBSF metoduna olan ilgi zaman geçtikçe artmaktadır. Bunun sebebi ise metodun şu özelliklere sahip olmasıdır: i) zaman tanım bölgesinde çalıştığı için genişband cevap elde edilebilmesi [8], ii) yazılımda görece olarak kolay gerçekleştirilmesi, iii) grafik işlem üniteleri (GPU) ile hızlandırma sağlanabilmesidir. Bu çalışmada elektromanyetik benzetim aşaması için ZTBSF metodu uygulanmıştır.

1.3. Bu Çalışmanın Amaçları

Anten tasarımı için literatürde bulunan ilgili denklemler kullanılmaktadır. Fakat antenin tasarımı yapıldıktan sonra, bilgisayar ortamında yapılan elektromanyetik benzetimler sonucunda elde edilen merkez frekansının tam olarak istenilen merkez frekansında olmayabileceği görülmektedir. Bu nedenle antenin istenilen merkez frekansına getirilmesi için merkez frekansa etki eden fiziksel parametrelerinde küçük ölçülerde oynamalar yapılarak sonuç elde edilmektedir. Bu çalışmada, bu işlemi

otomatik hale getiren bir anten tasarım yazılımı geliştirilmiştir. Python programlama dili ile Tkinter arayüz kütüphanesi kullanılarak geliştirilen bu yazılımda, istenilen merkez frekansının elde edilmesi için geliştirilen optimizasyon algoritmaları olan adım adım optimizasyon algoritması, tahmin optimizasyon algoritması ve hızlı tahmin optimizasyon algoritması kullanılmaktadır. Ayrıca geliştirilen müstakil bir programda ise herhangi bir üç boyutlu yapının benzetimini yapan ikinci bir program ile literatüre ikinci bir katkı sunulması hedeflenmiştir.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde geliştirilen bu iki yazılımı test etmek amacıyla çeşitli yapıların benzetimi geliştirilen yazılımda ve ZTBSF yöntemini temel alan ticari bir benzetim programında yapılmış, sonuçları karşılaştırılmış ve benzer oldukları gösterilmiştir. Ayrıca geliştirilen yazılımla çeşitli anten tipleri tasarlanarak anten optimizasyonu otomatik olarak yapılmıştır. Geliştirilen yazılımla yapılan tasarımlar sonucunda antenlerin merkez frekansının hedef merkez frekanslarına yaklaştığı gösterilmiştir.

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Zaman Tanım Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi

Zaman tanım bölgesinde sonlu farklar yönteminin temeli üç adet skaler elektrik alan ve üç adet manyetik alan eşitliğinden oluşmaktadır. Bu eşitlikler 2.1-2.6'da verilmiştir [9].

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_x} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma_x^e E_x - J_{ix} \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_y} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma_y^e E_y - J_{iy} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_z} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma_z^e E_z - J_{iz} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_x} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma_x^m H_x - M_{ix} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_y} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \sigma_y^m H_y - M_{iy} \right) \quad (2.5)$$

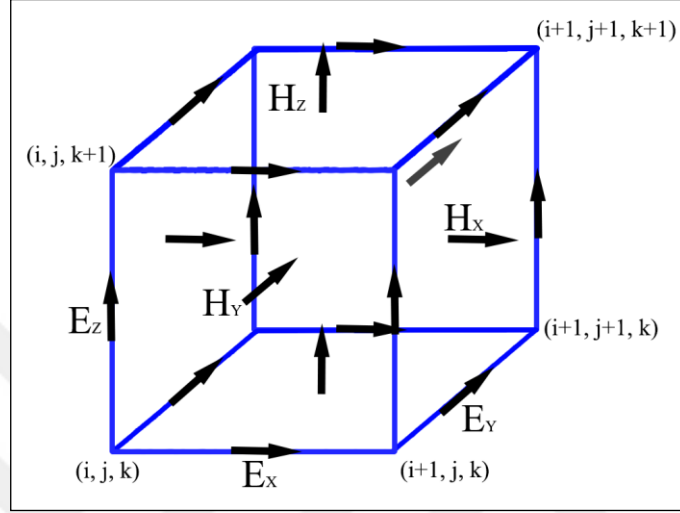
$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu_z} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \sigma_z^m H_z - M_{iz} \right) \quad (2.6)$$

Skaler elektrik alan ve manyetik alan eşitlikleri, Eşitlik 2.7 ve Eşitlik 2.8'de verilen diferansiyel formdaki Maxwell eşitliklerinin kartezyen koordinat sistemi için yazılması ile elde edilmektedir [9].

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma^e \vec{E} + \vec{J}_i \quad (2.7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \sigma^m \vec{H} - \vec{M}_i \quad (2.8)$$

Anten tasarım yazılımında anteni içeren problem geometrisi ve elektromanyetik benzetim bölümünde girilen yapıyı içeren problem geometrisi, kullanıcının boyutlarını belirlediği Yee hücrelerine bölünmektedir. Tipik bir Yee hücresi Şekil 2.1’de gösterilmiştir [9]. Şekilde bir Yee hücresinin elektrik alan ve manyetik alan vektörleri gösterilmektedir [1].



Şekil 2.1. Yee hücresi [1]

Hücrelerdeki elektrik alan eşitlikleri ve manyetik alan eşitlikleri 2.9-2.14’deki gibi elde edilmektedir [9].

$$E_x(i, j, k) \rightarrow ((i - 0.5)\Delta x, (j - 1)\Delta y, (k - 1)\Delta z) \quad (2.9)$$

$$E_y(i, j, k) \rightarrow ((i - 1)\Delta x, (j - 0.5)\Delta y, (k - 1)\Delta z) \quad (2.10)$$

$$E_z(i, j, k) \rightarrow ((i - 1)\Delta x, (j - 1)\Delta y, (k - 0.5)\Delta z) \quad (2.11)$$

$$H_x(i, j, k) \rightarrow ((i - 1)\Delta x, (j - 0.5)\Delta y, (k - 0.5)\Delta z) \quad (2.12)$$

$$H_y(i, j, k) \rightarrow ((i - 0.5)\Delta x, (j - 1)\Delta y, (k - 0.5)\Delta z) \quad (2.13)$$

$$H_z(i, j, k) \rightarrow ((i - 0.5)\Delta x, (j - 0.5)\Delta y, (k - 1)\Delta z) \quad (2.14)$$

Merkezi fark formülü Eşitlik 2.15’te verilmiştir [9]. Merkezi fark formülü zamana bağlı yazılıp, 2.1-2.6’daki elektrik alan ve manyetik alan eşitliklerinde yerine yazıldığı zaman, 2.16-2.21’de verilen ve iterasyonda kullanılacak olan elektrik alan ve manyetik alan eşitlikleri elde edilmektedir [9].

$$f'(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned}
E_x^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_x(i, j, k) - \Delta t \sigma_x^e(i, j, k)}{2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^e(i, j, k)} \times E_x^n(i, j, k) + \\
&\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^e(i, j, k))\Delta y} \times \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k) \right) - \\
&\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^e(i, j, k))\Delta z} \times \left(H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k-1) \right) - \\
&\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^e(i, j, k)} \times J_{ix}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_y(i, j, k) - \Delta t \sigma_y^e(i, j, k)}{2\varepsilon_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^e(i, j, k)} \times E_y^n(i, j, k) + \\
&\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^e(i, j, k))\Delta z} \times \left(H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k-1) \right) - \\
&\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^e(i, j, k))\Delta x} \times \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j, k) \right) - \\
&\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^e(i, j, k)} \times J_{iy}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_z(i, j, k) - \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)}{2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)} \times E_z^n(i, j, k) + \\
&\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k))\Delta x} \times \left(H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j, k) \right) - \\
&\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k))\Delta y} \times \left(H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k) \right) - \\
&\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)} \times J_{iz}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) &= \frac{2\mu_x(i, j, k) - \Delta t \sigma_x^m(i, j, k)}{2\mu_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^m(i, j, k)} \times H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) + \\
&\frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^m(i, j, k))\Delta z} \times (E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)) - \\
&\frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^m(i, j, k))\Delta y} \times (E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)) - \\
&\frac{2\Delta t}{2\mu_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^m(i, j, k)} \times M_{ix}^n(i, j, k)
\end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) &= \frac{2\mu_y(i, j, k) - \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)}{2\mu_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)} \times H_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) + \\
&\frac{2\Delta t}{(2\mu_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)) \Delta x} \times (E_z^n(i+1, j, k) - E_z^n(i, j, k)) - \\
&\frac{2\Delta t}{(2\mu_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)) \Delta z} \times (E_x^n(i, j, k+1) - E_x^n(i, j, k)) - \\
&\frac{2\Delta t}{2\mu_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)} \times M_{iy}^n(i, j, k)
\end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) &= \frac{2\mu_z(i, j, k) - \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)}{2\mu_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)} \times H_z^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) + \\
&\frac{2\Delta t}{(2\mu_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^m(i, j, k)) \Delta y} \times (E_x^n(i, j+1, k) - E_x^n(i, j, k)) - \\
&\frac{2\Delta t}{(2\mu_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^m(i, j, k)) \Delta x} \times (E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)) - \\
&\frac{2\Delta t}{2\mu_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^m(i, j, k)} \times M_{iz}^n(i, j, k)
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Bu denklemler kullanılarak, bir zaman döngüsü içinde güncellenen elektrik alan ve manyetik alan değerleri elde edilerek elektromanyetik benzetim gerçekleştirilmektedir.

Zaman tanım bölgesinde sonlu farklar yöntemini temel alan birçok ticari yazılım ve çalışma bulunmaktadır. Elektromanyetik benzetim yapan ticari yazılımlara örnek olarak XFDTD [10], Synopsys [11], Lumerical [12] ve OmniSim [13] verilebilir. XFDTD, Synopsys, Lumerical programları ZTBSF yöntemini kullanırken, OmniSim ZTBSF yönteminin yanı sıra sınırlı elemanlar yöntemini de içermektedir.

Ticari olmayan bir kütüphane olan Meep modülü de, ZTBSF yöntemini kullanmaktadır [14]. Açık kaynak olmasının yanı sıra Python, C++ ve Scheme dillerinde yazılmıştır. Houle ve Sullivan kütüphaneleri ise ZTBSF yöntemi ile bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu elektromanyetik benzetim yapabilmektedir [15].

Zhang, Fang, Mei ve Liu mikroşerit yapılar için ZTBSF yöntemi uygulamış [16], Tirkas ve Balanis horn antenler için ZTBSF yöntemi uygulamış [17], Başaran, ZTBSF yöntemi ile FORTRAN programa dili kullanarak Mikroşerit hatlı devrelerin analizini yapmış [18]; Erol iki boyutlu mikroşerit hatların ZTBSF yöntemi ile analizini

gerçekleştirmiş [19]; Kurt, ZTBSF yöntemi ile iki boyutlu yer radarı modellemiş [20]; İnce ise ZTBSF yöntemi ile insan kafası modelinde elektromagnetik etkileri çalışmıştır [21].

2.1.1. Kararlılık

ZTBSF algoritması, zaman ve uzayın farklı noktalarında örnekler aldığından Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) şartı [22] ile sağlanan kararlılık oldukça önemli olmaktadır [9]. Bu şart Eşitlik 2.22’de verilmiştir. Bu şart kübik ızgara ve tek boyut için yazılırsa, Eşitlik 2.23’teki eşitlik elde edilebilmektedir [9].

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2.22)$$

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} \quad (2.23)$$

2.1.2. Sınır şartları

ZTBSF uzayının sınırı, çalışılan yapıya göre açık bölge veya kapalı bölge sınır ihtiyacı doğurabilmektedir. Kapalı bölge için mükemmel elektrik iletkeni (Perfect Electric Conductor - PEC) kullanmak yeterli olmakta fakat açık bölge için emici sınır koşulu (Absorbing Boundary Conditions - ABC) gerekmektedir.

Yazılımda sınır şartı olarak PEC ve evrişimli mükemmel uyumlu katman (Convolutional Perfectly Matched Layer - CPML) kullanılmıştır. PEC sınır şartında uzayın tüm yüzleri, mükemmel elektrik iletkeni ile kaplanmış olmaktadır. CPML sınır şartında ise problem yüzeyi emici katman ile çevrelenmektedir. CPML tekniği, PML tekniğinin yüksek hafıza gereksinimi ve dalgaları emme konusunda yetersiz kalması nedeniyle J. Roden ve S. Gedney tarafından geliştirilmiştir [23].

2.2. Pratikte Çok Kullanılan Anten Türleri

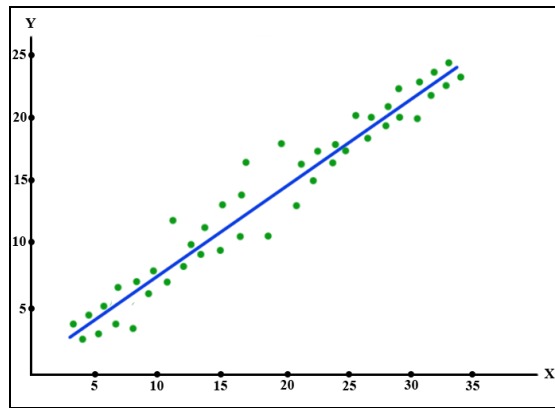
Bu çalışmada pratikte çok kullanılan anten tipleri altı grupta incelenmiştir. Bunlar mikroşerit antenler, horn antenlerin dahil olduğu açıklık antenler, dizi antenler, reflektör antenler, tel antenler ve lens antenlerdir [24]. Geliştirilen anten tasarım yazılımında en çok kullanılan anten tipleri olan mikroşerit anten, dizi anten, dipol anten ve horn anten tiplerine ait 18 adet anten bulunmaktadır. Bunlar: i) kenar beslemeli dikdörtgensel yama anten, ii) kenar beslemeli kare yama anten, iii) kenar beslemeli

daireysel yama anten, iv) ek beslemeli kare yama anten, v) ek beslemeli dikdörtgensel yama anten, vi) 1x2 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi anten, vii) 1x2 ortak beslemeli kare yama dizi anten, viii) 1x2 ortak beslemeli daireysel yama dizi anten, ix) 1x4 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi anten, x) 1x4 ortak beslemeli daireysel yama dizi anten, xi) 1x4 ortak beslemeli kare yama dizi anten, xii) 1x8 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi anten, xiii) 1x8 ortak beslemeli kare yama dizi anten, xiv) 1x8 ortak beslemeli daireysel yama dizi anten, xv) 1x4 ek beslemeli dikdörtgensel yama dizi anten, xvi) 1x4 ek beslemeli kare yama dizi anten, xvii) piramit biçimli horn anten ve xviii) baskılı katlanmış dipol anten olmaktadır.

Mikroşerit anten kavramı, 1953 yılında G. Deschamps ve W. Sichak'ın çalışmaları ile ortaya çıkmıştır [25]. Bu çalışmadan sonra mikroşerit yama antenin günümüzde bilinen şekli Byron [26], Munson [27,28] ve Howell [29,30] ın çalışmaları ile oluşmuştur [31]. İlk dizi anten ise 1901 yılında G. Marconi tarafından kablosuz haberleşme deneyi için inşa edilmiştir [32]. 1897 yılında ilk horn antenlerinden birini Jagadish Chandra Bose yapmıştır [33-34]. 1938 yılında ise modern horn anten birbirlerinden bağımsız, G.C Soutworth ve Wilmer Barrow tarafından yapılmıştır [35-38].

2.3. Doğrusal Regresyon

Doğrusal regresyon Şekil 2.2'de görüldüğü gibi giriş ve buna bağımlı çıkış verisine uygun bir doğrusal model çıkarmak için kullanılmaktadır. Bu model ile yeni giriş verileri ile elde edilecek çıkış verisi tahmin edilmektedir. Veri miktarının artması ile tahminin isabetliliği de artmaktadır.



Şekil 2.2. Doğrusal regresyon

Geliştirilen anten tasarım ve optimizasyon yazılımında, optimizasyon aşamasında bir dizi elektromanyetik benzetim yapıp, giriş verisi olarak antenin merkez frekansına etki eden fiziksel parametreleri, çıkış verisi olarak da antenin elektromanyetik benzetimleri sonucu elde edilen merkez frekansı kullanıldıktan sonra oluşturulan doğrusal modele göre tahmin işlemi yapılmaktadır. Tahmin optimizasyon algoritması ve hızlı tahmin optimizasyon algoritması sonuca ulaşmak için, bir makine öğrenmesi kütüphanesi olan Sklearn [39] kütüphanesinden yararlanmaktadır.



3. BÖLÜM

YÖNTEM

3.1. Kullanılan Anten Tasarım Denklemleri

Geliştirilen anten tasarım yazılımında girilen anten parametrelerine göre tasarım yapılmaktadır. Antenlerin tasarımı için literatürde bulunan anten tasarım denklemlerinden yararlanılmıştır.

3.1.1. Kenar Beslemeli Dikdörtgensel Yama Anten

Bir mikroşerit dikdörtgen yama antenin tasarımı için, kullanıcıdan birtakım parametreler istenmektedir. Bu parametreler hedef merkez frekansı, bağıl dielektrik sabiti, alttaş kalınlığı ve antenin giriş direncidir.

Efektif dielektrik sabiti (ϵ_{reff}) Eşitlik 3.1’de verilen eşitlik ile [40], yamanın genişliği Eşitlik 3.2’de verilen eşitlik ile [41], yamanın efektif uzunluğu ise Eşitlik 3.3’te verilen eşitlik ile [24], yamanın uzunluğu Eşitlik 3.4’te verilen eşitlik ile [24], ΔL Eşitlik 3.5’te [42] verilen eşitlik ile elde edilebilmektedir. Bu uzunluklar anten üzerinde Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.

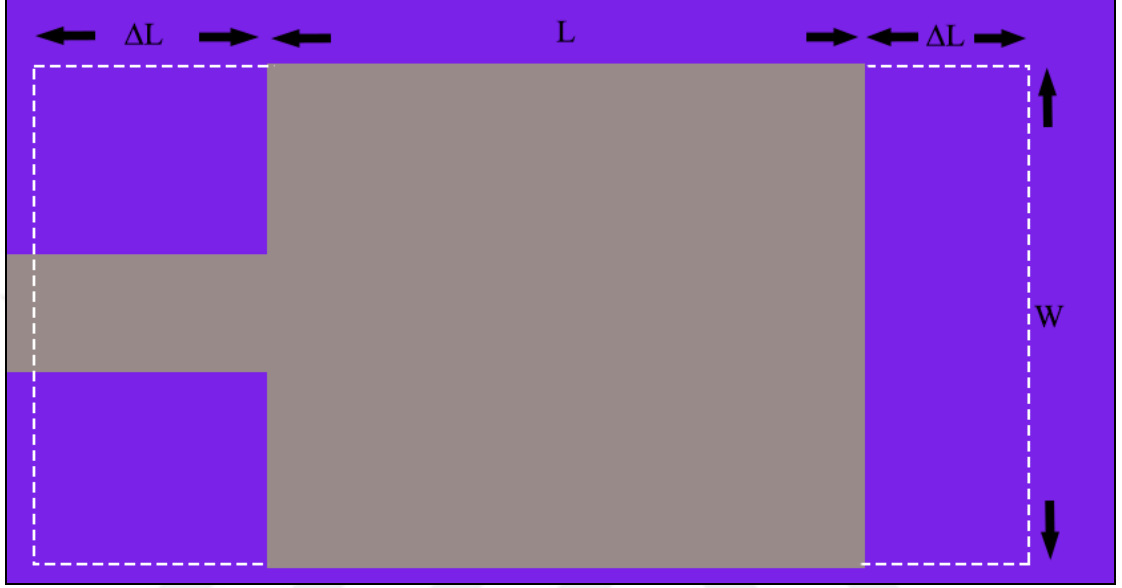
$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$W = \frac{1}{2 f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.2)$$

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (3.3)$$

$$L = \frac{1}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.5)$$



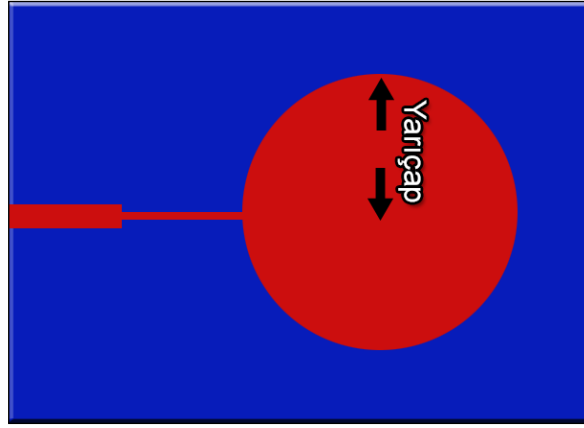
Şekil 3.1. Mikroşerit dikdörtgen yama anten [24]

3.1.2. Kenar Beslemeli Dairesel Yama Anten

Mikroşerit kenar beslemeli dairesel yama antenin tasarımı için hedef merkez frekansı, giriş direnci, bağıl dielektrik sabiti ve alttaş kalınlığı kullanılmaktadır. Yamanın yarıçapı Eşitlik 3.6'da verilen eşitlikle ve denklemde geçen F sabiti Eşitlik 3.7'de verilen eşitlikle elde edilmektedir [24]. Uzunluk anten üzerinde Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

$$r = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (3.6)$$

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.7)$$

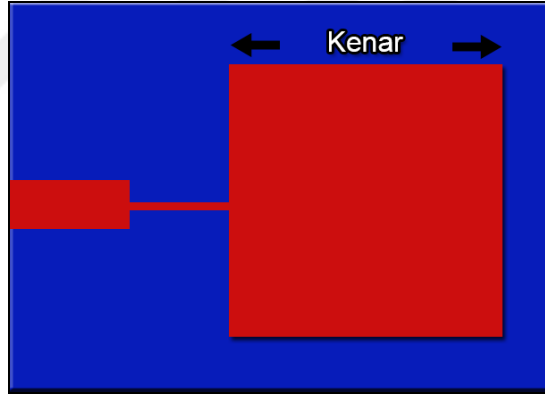


Şekil 3.2. Kenar beslemeli dairesel yama anten [24]

3.1.3. Kenar Beslemeli Kare Yama Anten

Kenar beslemeli kare yama anten için kare yamanın bir kenarı Eşitlik 3.8’de verilen eşitlikle elde edilmektedir [43]. Uzunluk anten üzerinde Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

$$L = W = 0.49 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.8)$$



Şekil 3.3. Kenar beslemeli kare yama anten [43].

3.1.4. Ek Beslemeli Dikdörtgensel Yama Anten ve Kare Yama Anten

Ek besleme dikdörtgensel yama antenin genişliği Eşitlik 3.2’den [41], uzunluğu Eşitlik 3.4’ten [24], ek besleme kare yama antenin bir kenarı ise Eşitlik 3.8’den elde edilmektedir [43].

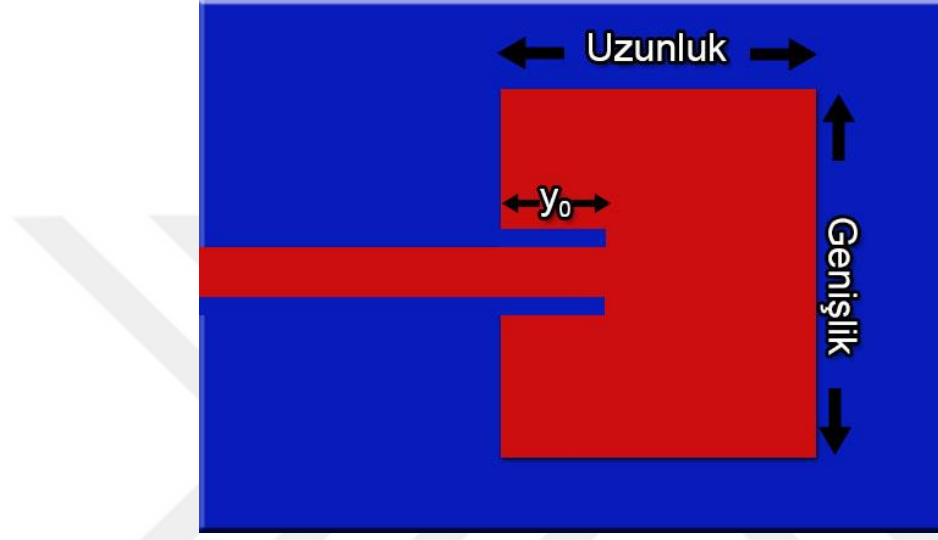
Ek besleme uzunluğu için iletkenlik Eşitlik 3.9’dan elde edilmektedir [24]. Eşitlikte bulunan I_1 Eşitlik 3.10’dan ve X sabiti Eşitlik 3.11’den elde edilmektedir [24]. Giriş direnci eşitliği Eşitlik 3.12’de verilmekte ve y_0 olan ek besleme uzunluğu da bu eşitlikle elde edilebilmektedir [44-45]. Şekil 3.4’te ek beslemeli dikdörtgensel yama anten ve uzunlukları gösterilmiştir.

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (3.9)$$

$$I_1 = -2 + \cos(X) + XS_i(X) + \frac{\sin(X)}{X} \quad (3.10)$$

$$X = k_0 W \quad (3.11)$$

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) = R_{in}(y = 0) \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (3.12)$$



Şekil 3.4. Ek beslemeli dikdörtgensel yama anten [24]

3.1.5. Mikroşerit Dizi Antenler

Yazılımda mikroşerit dizi anten olarak ortak beslemeli dikdörtgensel yama anten, ortak beslemeli kare yama dizi anten, ortak beslemeli dairesel yama dizi anten, ek beslemeli dikdörtgensel yama dizi anten ve ek beslemeli kare yama dizi anten bulunmaktadır. Ek besleme uzunluğu için Eşitlik 3.12’de verilen eşitlik [44,45], dikdörtgensel yama genişliği için Eşitlik 3.2’de verilen eşitlik [41], uzunluğu için Eşitlik 3.4’te verilen eşitlik [24], kare yamanın bir kenarı için Eşitlik 3.8 eşitlik [43], dairesel yama yarıçapı için Eşitlik 3.6’da verilen eşitlik kullanılmaktadır [24].

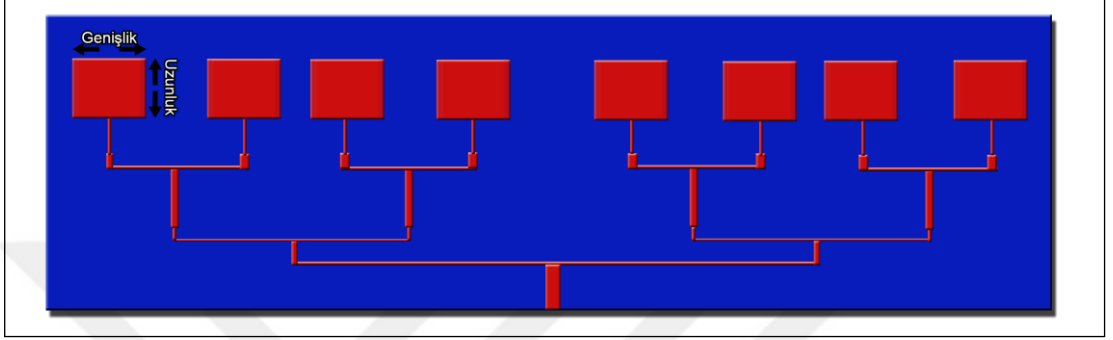
Dizi antenlerin yol genişlikleri için Eşitlik 3.13’te verilen A katsayısı ve Eşitlik 3.14’te verilen B katsayısı hesaplanmaktadır [41]. Eğer $A > 1.52$ ise Eşitlik 3.15, $A \leq 1.52$ ise Eşitlik 3.17 denkleminde yol genişlikleri elde edilmektedir [41]. Şekil 3.5’te mikroşerit dizi anten gösterilmiştir.

$$A = \frac{Z_0}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right\}^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.13)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.14)$$

$$\frac{W}{h} = \frac{8\exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (3.15)$$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (3.16)$$



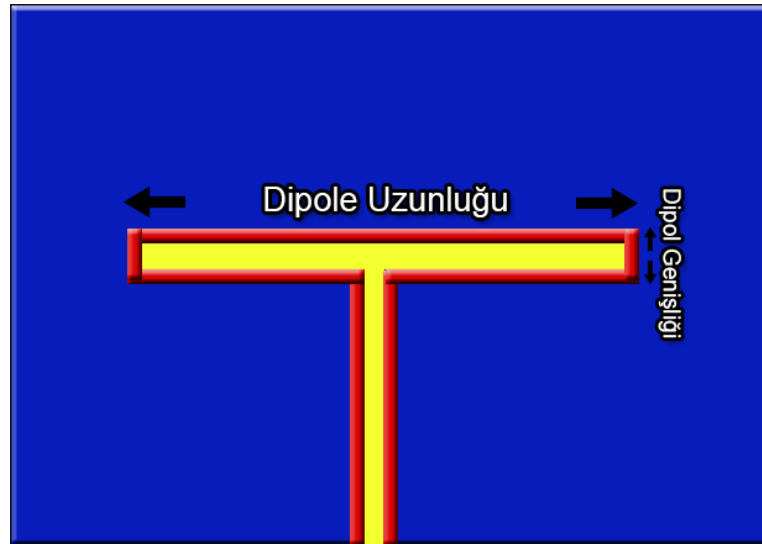
Şekil 3.5. Mikroşerit dizi anten [24]

3.1.6. Baskılı Katlanmış Dipol Anten

Baskılı katlanmış dipol anten ve uzunlukları Şekil 3.6’da verilmiştir. Şekilde verilen dipol uzunluğu Eşitlik 3.17’de, dipol genişliği ise Eşitlik 3.18’de verilmiştir [24].

$$L_D = \frac{\lambda}{2} \quad (3.17)$$

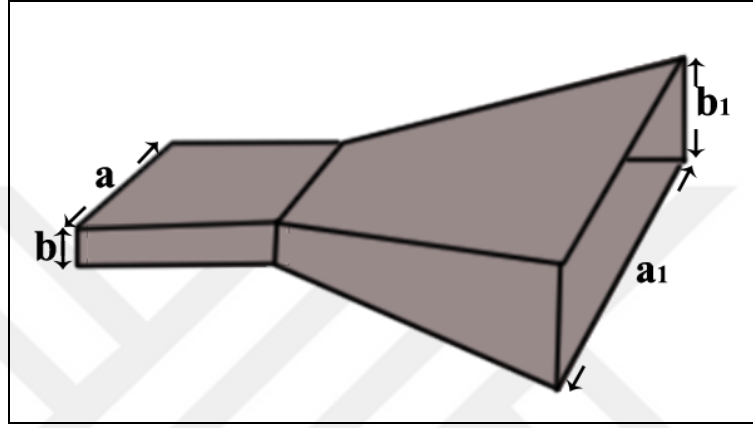
$$W_D = \lambda * 0.05 \quad (3.18)$$



Şekil 3.6. Baskılı katlanmış dipol anten [24]

3.1.7. Piramit Biçimli Horn Anten

Piramit biçimli horn antene ait uzunluklar Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Horn anten tasarımı yapılırken ilk olarak Eşitlik 3.19’da verilen χ sabiti hesaplanmakta daha sonra Eşitlik 3.20’de verilen eşitlik ile iterasyon yapılarak ideal χ sabiti elde edilmektedir [24]. Ayrıca ρ_e uzunluğu Eşitlik 3.21’de, ρ_h uzunluğu Eşitlik 3.22’de, a_1 uzunluğu Eşitlik 3.23’de, b_1 uzunluğu Eşitlik 3.24’te, p_e uzunluğu Eşitlik 3.25’te, p_h uzunluğu Eşitlik 3.26’da verilmiştir [24].



Şekil 3.7. Piramit biçimli horn anten [24]

$$\chi(\text{başlangıç}) = \chi_1 = \frac{G_0}{2\pi\sqrt{2\pi}} \quad (3.19)$$

$$\left(\sqrt{2\chi} - \frac{b}{\lambda}\right)^2 (2\chi - 1) = \left(\frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{\chi}} - \frac{a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{G_0^2}{6\pi^3} \frac{1}{\chi} - 1\right) \quad (3.20)$$

$$\rho_e = \chi\lambda \quad (3.21)$$

$$\rho_h = \frac{G_0^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{\chi}\right) \lambda \quad (3.22)$$

$$a_1 = \frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi\chi}} \lambda \quad (3.23)$$

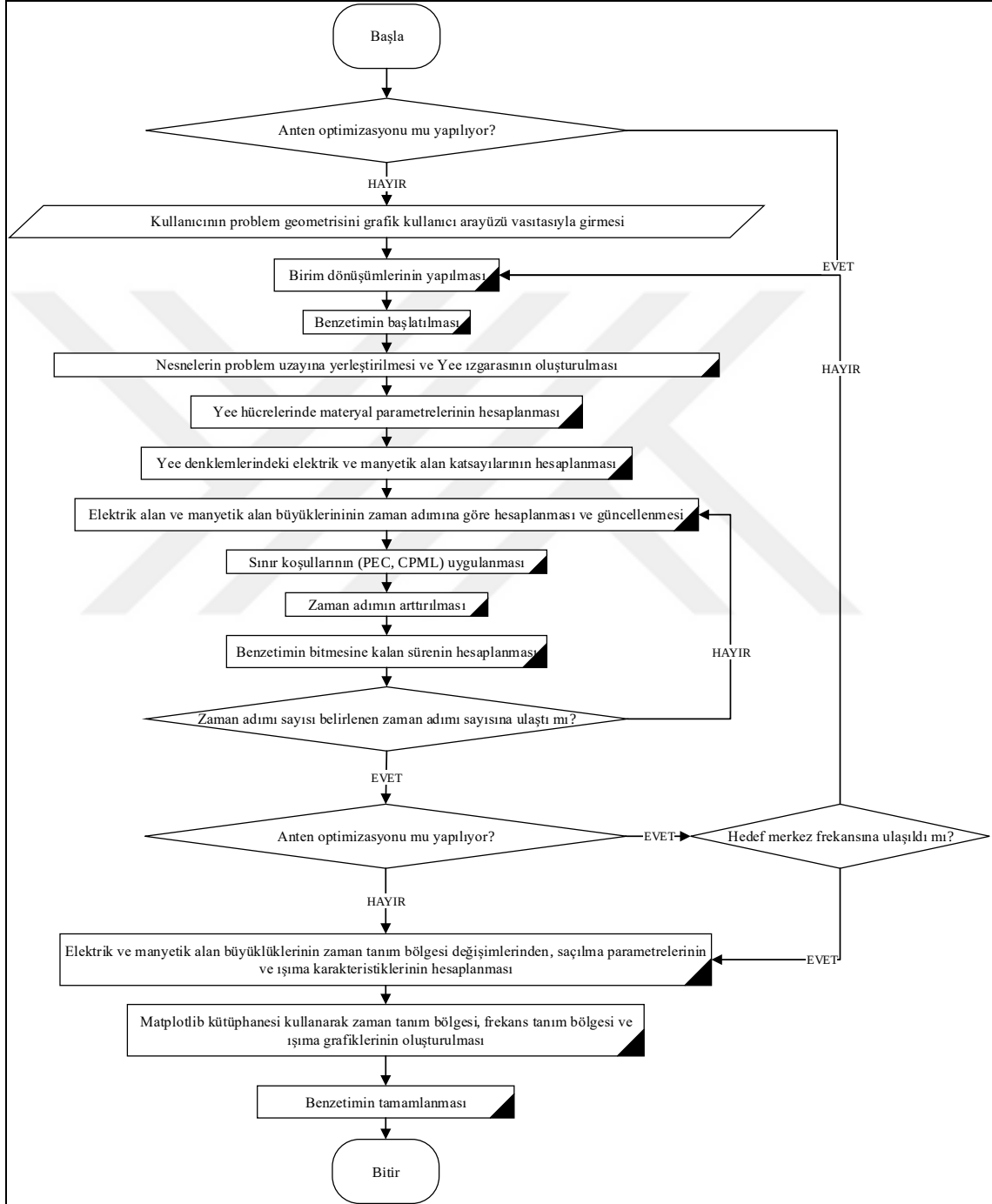
$$b_1 = \sqrt{2\chi} \lambda \quad (3.24)$$

$$p_e = (b_1 - b) \left[\left(\frac{\rho_e}{b_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

$$p_h = (a_1 - a) \left[\left(\frac{\rho_h}{a_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (3.26)$$

3.2. Zaman Tanım Bölgesinde Sonlu Farklar Yönteminin Python Programlama Dilinde Gerçekleştirilmesi

Hem müstakil benzetim programında hem de anten tasarım programının benzetim kısmında ZTBSF yöntemi kullanılmaktadır. Yöntemin yazılımda uygulanma adımları Şekil 3.8'deki işaret-akış diyagramında verilmiştir.



Şekil 3.8. Geliştirilen yazılımlarda uygulanan ZTBSF yöntemi işaret akış diyagramı

3.3. Kullanılan Anten Optimizasyon Yöntemleri

Tasarlanılan antenin merkez frekansının hedef merkez frekansına getirilmesi için anten optimizasyonu işlemi yapılmaktadır. Bu çalışmada adım adım, tahmin ve hızlı tahmin olmak üzere üç tip anten optimizasyonu yöntemi geliştirilmiştir. Zaman tanım bölgesindeki sonlu farklar yöntemi bu hassas ayarlama bölümünde elektromanyetik benzetim için kullanılmaktadır.

Hesaplanan değerler ile yapılan ilk elektromanyetik benzetim sonrası kullanıcıya zaman tanım bölgesi grafikleri, frekans tanım bölgesi grafikleri, saçılma parametresi grafikleri ve ışıma karakteristiği, her bir optimizasyon adımından sonra ise yeni oluşan saçılma parametresi grafiği kullanıcıya gösterilmektedir.

3.3.1. Adım Adım Anten Optimizasyon Algoritması

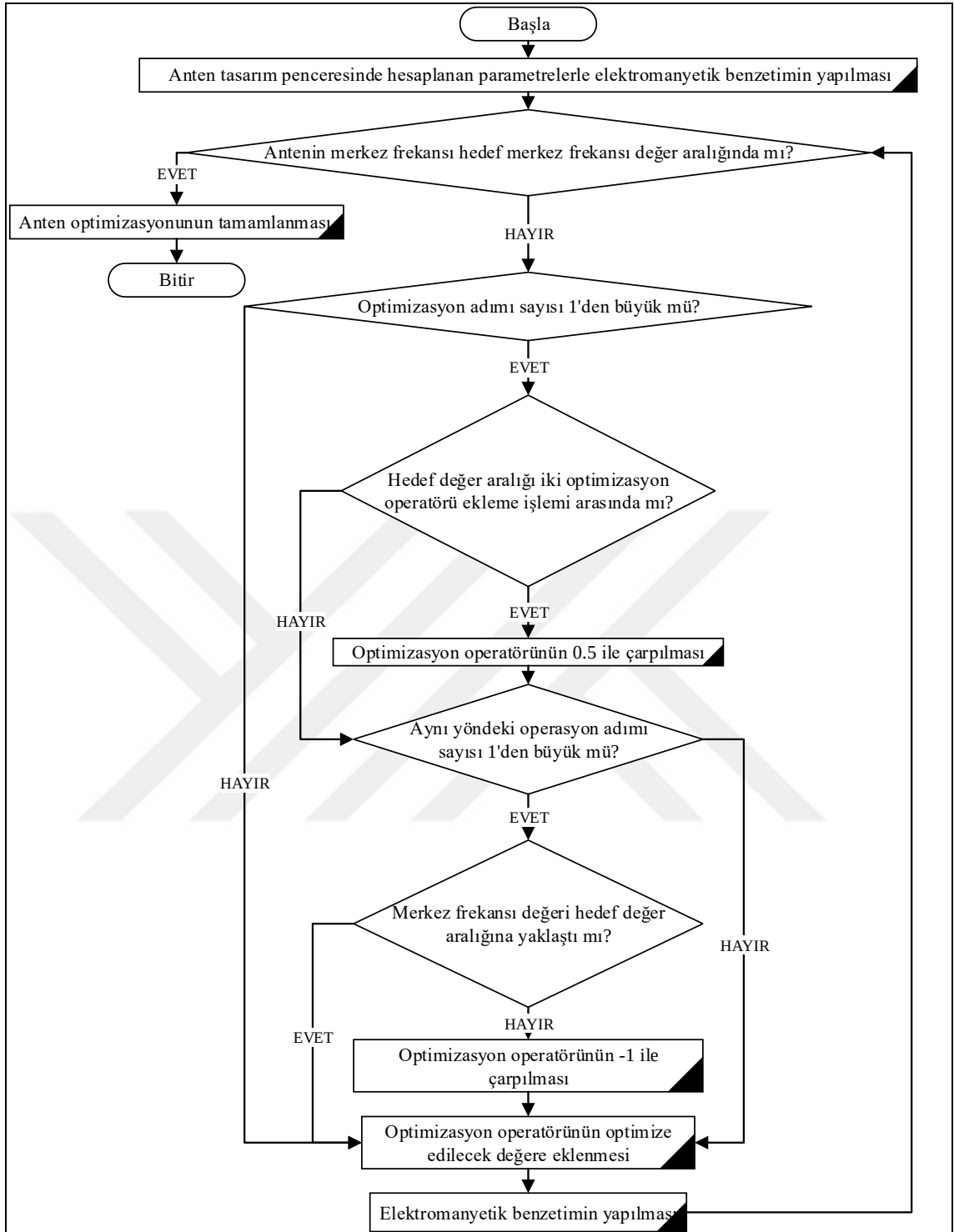
Adım adım optimizasyon algoritması fiziksel parametreye ileri-geri adımları uygulayarak hedef merkez frekansını elde eden algoritmadır. Adım adım anten optimizasyonunda Şekil 3.9’da verilen işaret-akış diyagramında verilen adımlar uygulanmıştır.

3.3.2. Tahmin Anten Optimizasyon Algoritması

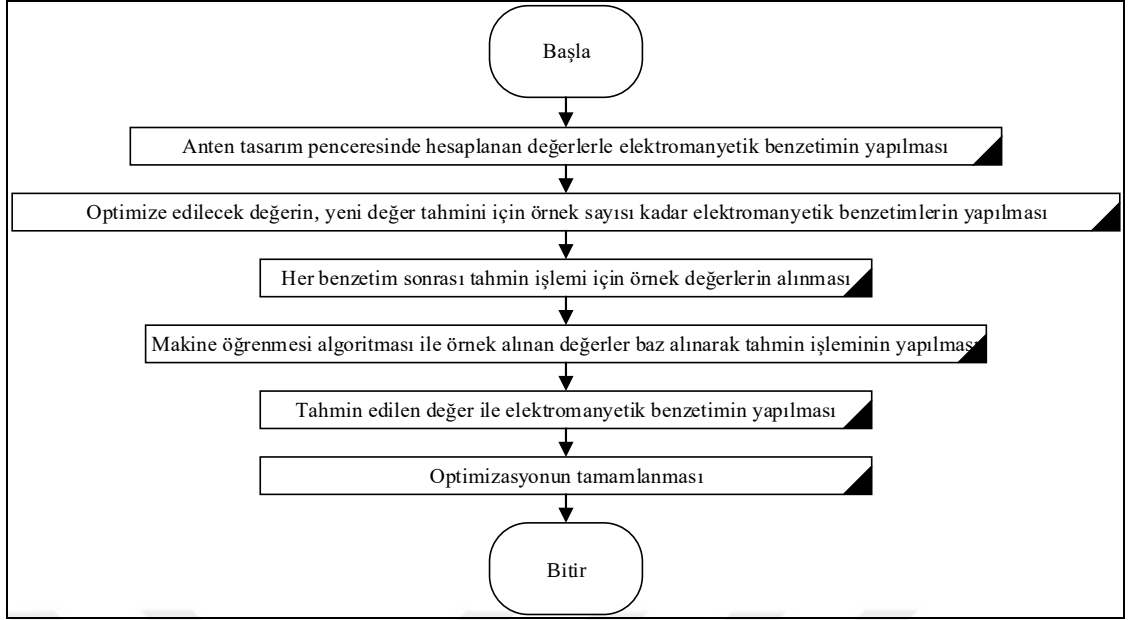
Anten tasarımı yapıldıktan sonra anten optimizasyonu için tahmin optimizasyon algoritması seçildiğinde tahmin optimizasyonu başlamaktadır. Tahmin anten optimizasyonunda Şekil 3.10’daki işaret-akış diyagramında verilen adımlar uygulanmıştır. Tahmin anten optimizasyonu Python’da olan SKlearn kütüphanesinden doğrusal regresyon kullanarak sonuca ulaşmaktadır [39].

3.3.3. Hızlı Tahmin Anten Optimizasyon Algoritması

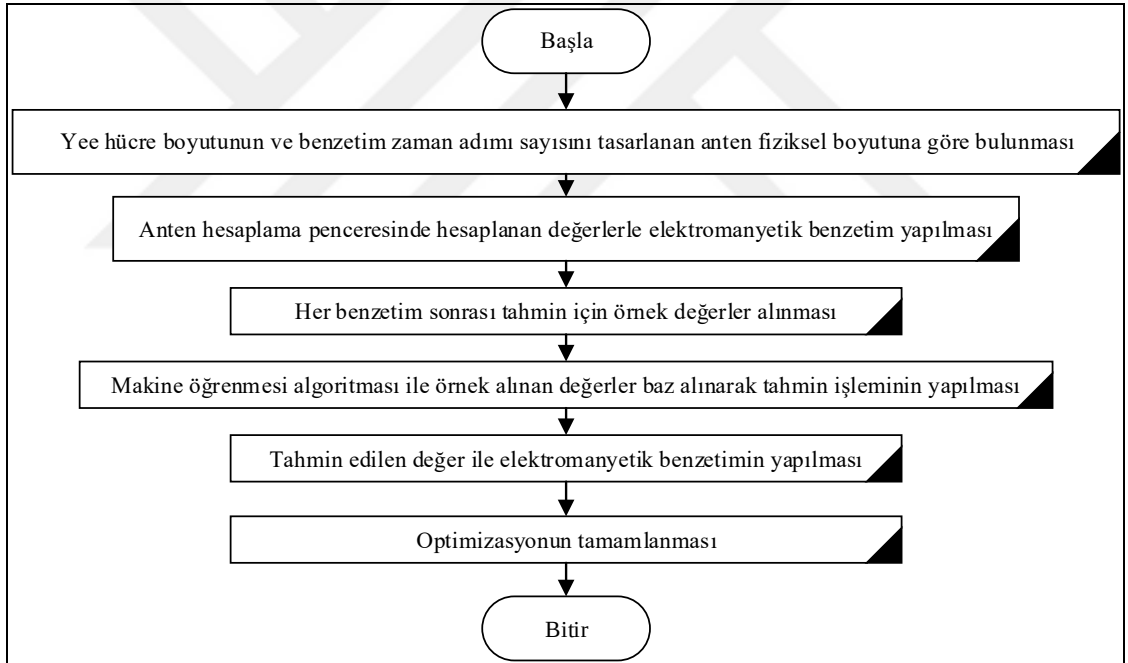
Anten tasarımı yapıldıktan sonra anten optimizasyonu işlemi için hızlı tahmin optimizasyon algoritması seçildiğinde hızlı tahmin optimizasyonu başlamaktadır. Hızlı tahmin anten optimizasyonunda Şekil 3.11’de ki işaret-akış diyagramında verilen adımlar uygulanmıştır. Hızlı tahmin anten optimizasyonu da tıpkı tahmin anten optimizasyonu gibi SKlearn kütüphanesinden doğrusal regresyon kullanarak sonuca ulaşmaktadır [39].



Şekil 3.9. Adım adım anten optimizasyonu için işaret-akış diyagramı



Şekil 3.10. Tahmin anten optimizasyonu işaret-akış diyagramı



Şekil 3.11. Hızlı tahmin anten optimizasyonu işaret-akış diyagramı

4. BÖLÜM

GELİŞTİRİLEN YAZILIMLAR

4.1. Genel Bilgiler

Bu çalışmada Python programlama dilinde iki adet yazılım geliştirilmiştir. İlk olarak rastgele geometrilerin üç boyutlu elektromanyetik benzetimleri için ZTBSF yöntemini kullanan bir elektromanyetik benzerim motoru ve bu motoru kullanan grafik kullanıcı arayüzlü bir elektromanyetik benzetim yazılımı gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik benzetim motoru MATLAB ortamında Elsherbeni ve Demir'in zaman bölgesinde sonlu farklar çözümü temel alınarak [9], Python programlama dilinde baştan yazılmıştır. Yazılan ZTBSF yönteminde dikdörtgen prizması ve küre geometrilerine ek olarak, silindir, halka ve kesik piramit geometrileri eklenmiştir. Geliştirilen bu yazılıma N Finite 3D Simulation (NF3DSIM) adı verilmiştir. İkinci yazılım olarak ise, çeşitli anten türlerinin tasarımı ve optimizasyonu için ZTBSF motorunu ve SKLearn yöntemlerini kullanan bir anten tasarım ve optimizasyon yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılıma ise Antenna Design Via Simulation (ANTDESVS) adı verilmiştir.

Python açık kaynaklı ve nesne tabanlı üst seviye bir programlama dilidir. Python programlama dilinin masaüstü arayüz tasarımı, web sitesi tasarımı, uygulama tasarımı, yapay zeka uygulamaları, makine öğrenmesi uygulamaları ve görüntü işleme gibi birçok uygulama alanı bulunmaktadır.

NF3DSIM ve ANTDESVS programlarında grafik kullanıcı arayüzü Python programa dilinin içerisinde bulunan Tkinter arayüz kütüphanesi kullanarak yazılmıştır. Tkinter ile boyutları ve özellikleri kullanıcı tarafından belirlenmiş pencereler oluşturulabilmektedir. Ayrıca oluşturulmuş pencereye iki boyutlu veya üç boyutlu çizimler, veri girişi yapılabilen kutular, açılır menüler ve butonlar gibi çeşitli nesneler yerleştirilerek kullanıcı arayüzü oluşturulabilmektedir.

Geliştirilen yazılım ana pencere ve birçok diyalog pencerelerinden oluşmaktadır. Yazılımın tasarımında kullanım kolaylığı amaçlanmıştır. Ana pencerede fare ile yapılacak olan işlem seçimin yanında, klavye kısayollarını da kullanarak kolayca işlemler yapılabilir.

Elektromanyetik problem geometrisinin anlık olarak üç boyutlu çizimi için PyOpenGL kütüphanesi kullanılmıştır [46]. PyOpenGL kütüphanesi OpenGL tabanlı bir kütüphane olup iki boyutlu çizimler, üç boyutlu çizimler, gölgelendirmeler, ışıklandırmalar ve animasyonlar yapılabilir. PyOpengl ile Tkinter arasındaki bağlantı PyOpenGLTk kütüphanesi ile yapılmıştır [47]. Üç boyutlu çizimin bulunduğu sahne problem geometrisi oluşturma esnasında ve sonrasında güncel olarak kalmaktadır. Sahne üzerinde fare ile çizime uzaklaştırma, yakınlaştırma, döndürme ve sürüklenme işlemleri uygulanabilir.

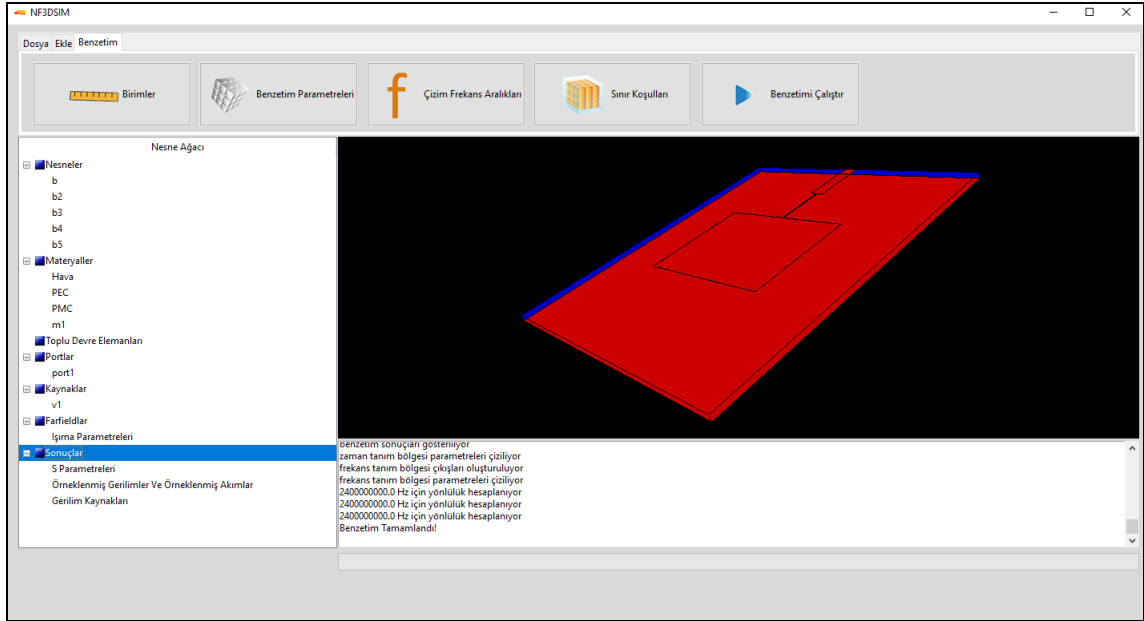
ZTBSF metodunda dizi oluşturma ve oluşturulan dizi ile yapılan sayısal işlemler için Python'daki bilimsel hesaplama kütüphanesi olan Numpy kütüphanesi kullanılmaktadır [48]. Ayrıca bu kütüphanenin sağladığı veri yapıları ile anten taslağı kaydetme, anten taslağı açma, proje taslağı kaydetme ve proje taslağı açma işlemleri de yapılmaktadır.

Elektromanyetik benzetim sonucunda çizdirilen zaman tanım bölgesi grafikleri olan örneklenmiş gerilim grafiği, örneklenmiş akım grafiği, frekans tanım bölgesi grafikleri olan örneklenmiş gerilim grafiği, örneklenmiş akım grafiği, gerilim kaynağı grafiği ve ışıma karakteristiği grafikleri Python'daki bir çizim kütüphanesi olan Matplotlib yardımıyla oluşturulmaktadır [49]. Ayrıca saçılma parametreleri grafikleri de yine bu kütüphane yardımı ile oluşturulmaktadır. Grafiklerde resim olarak kaydetme, uzaklaştırma, yakınlaştırma ve taşıma işlemleri de yapılabilir. Anten tasarımında kullanılan eşitlikler, bir hesaplama kütüphanesi olan Scipy [50] ile gerçekleştirilmiştir.

4.2. Geliştirilen Üç Boyutlu Elektromanyetik Benzetim Programı: NF3DSIM

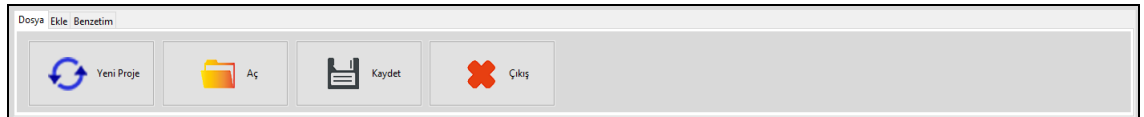
Bu çalışmada ilk olarak rastgele yapıların elektromanyetik benzetimlerini yapan bir yazılım olan NF3DSIM geliştirilmiştir. NF3DSIM ile kullanıcı nesne, materyal, toplu devre elemanı, elektriksel port ve gerilim kaynağı ekleyerek problem geometrisini oluşturmada ve oluşturulan geometrinin elektromanyetik benzetimini yapabilir. Ayrıca benzetim sonuçlarına da arayüz ile ulaşılabilir.

Bu çalışmada, sonraki aşamada anten tasarım ve optimizasyon yazılımı olan ANTDESVS geliştirilmiş ve NF3DSIM yazılımı ile bütünleştirilmiştir. Anten tasarım ve optimizasyon yazılımında, tasarlanan antenin yapısı NF3DSIM arayüzüne aktarılabilmektedir. Aktarılan anten üzerinde değişiklikler yapılabilen ve antenin elektromanyetik benzetimi yapılabilir. NF3DSIM arayüzünün genel görünümü Şekil 4.1’de verilmiştir.



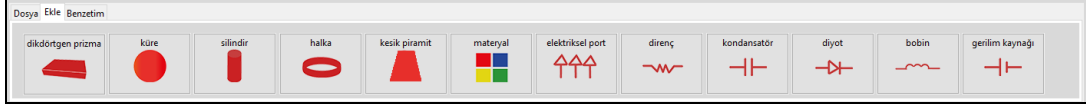
Şekil 4.1. Geliştirilen NF3DSIM yazılımının arayüzünün genel görünümü

NF3DSIM arayüzü dosya işlemleri, nesne ekleme işlemleri ve benzetim işlemlerini içeren sekme bölümleri, eklenen nesnelere, materyallere, toplu devre elemanlarına, elektriksel portlara, kaynaklara ve sonuçlara ulaşan nesne ağacı bölümü, problem geometresini içeren üç boyutlu sahne bölümü ve benzetim bilgisi içeren bilgi bölümü olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır. Yeni bir proje açma, bir proje açma, kaydetme işlemlerinin bulunduğu sekme Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. “Dosya” sekmesi

Ekle sekmesi ile sekmede bulunan dikdörtgen prizma, küre, silindir, halka, kesik piramit, fiziksel materyal, elektriksel port, direnç, kondansatör, diyot, bobin ve gerilim kaynağı ekleme butonları vasıtasıyla problem geometrisi oluşturulmaktadır. Şekil 4.3’te “Ekle” sekmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. "Ekle" sekmesi

Geometri ekleme pencereleri olan dikdörtgen ekleme penceresi Şekil 4.4'te, küre ekleme penceresi Şekil 4.5'te, silindir ekleme penceresi Şekil 4.6'da ve halka ekleme penceresi Şekil 4.7'de, kesik piramit ekleme penceresi Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu pencerelerde nesnenin kartezyen koordinat sistemindeki konumu, materyal tipi, nesne ağacında gözükecek ismi ve gerekli olan parametreleri girilmektedir. Geometri ekleme işlemleri ile üç boyutlu sahne güncel kalmaktadır.

Şekil 4.4. Dikdörtgen ekleme penceresi

Şekil 4.5. Küre ekleme penceresi

Bir Silindir Ekle

Silindir İsmi:

Merkez x: mm

Merkez y: mm

Merkez z: mm

Yarıçap: mm

Yükseklik: mm

Yön: p:pozitif

Malzeme Tipi:

TAMAM İptal

Şekil 4.6. Silindir ekleme penceresi

Bir Halka Ekle

Halka İsmi:

Merkez x: mm

Merkez y: mm

Merkez z: mm

İç Çap: mm

Dış Çap: mm

Yön:

Malzeme Tipi:

TAMAM İptal

Şekil 4.7. Halka ekleme penceresi

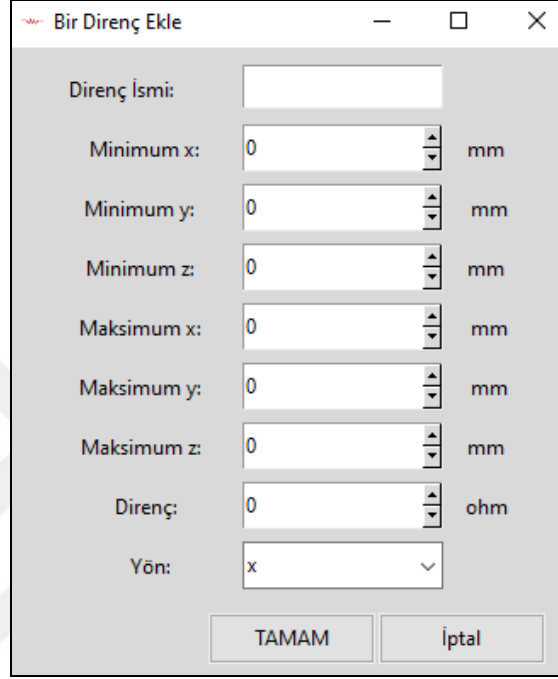
Şekil 4.8. Kesik piramit ekleme penceresi

Yeni eklenecek olan fiziksel materyalin parametreleri olan bağıl dielektrik sabiti, bağıl manyetik geçirgenlik, elektrik ve manyetik iletkenlikleri, nesne ağacında listelenecek olan ismi ve çizimde yer alacağı rengi girilen materyal ekleme penceresi Şekil 4.9’da verilmiştir.

Şekil 4.9. Materyal ekleme penceresi

Direnç ekleme penceresi Şekil 4.10’da, kondansatör ekleme penceresi Şekil 4.11’de, diyot ekleme penceresi Şekil 4.12’de ve bobin ekleme penceresi Şekil 4.13’te verilmiştir. Direnç ekleme penceresinde direncin kartezyen koordinat sistemindeki konumu, direnç değeri ve yönü, kondansatör ekleme penceresinde kondansatörün

kartezyen koordinat sistemindeki konumu, kapasitans değeri ve yönü girilmektedir. Diyot ekleme penceresinde diyotun kartezyen koordinat sistemindeki konumu ve yönü ve bobin ekleme penceresinde bobinin kartezyen koordinat sistemindeki konumu, indüktans değeri ve yönü girilmektedir. Toplu devre elemanı ekleme işlemlerinden sonra, devre elemanlarına girilen isim ile nesne ağacında “Toplu devre elemanları” bölümünde sıralanmaktadır.



Bir Direnç Ekle

Direnç İsmi:

Minimum x: mm

Minimum y: mm

Minimum z: mm

Maksimum x: mm

Maksimum y: mm

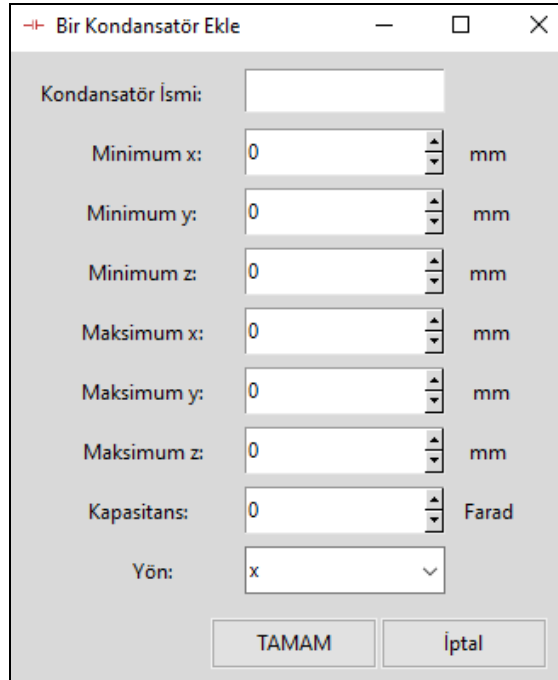
Maksimum z: mm

Direnç: ohm

Yön:

TAMAM İptal

Şekil 4.10. Direnç ekleme penceresi



Bir Kondansatör Ekle

Kondansatör İsmi:

Minimum x: mm

Minimum y: mm

Minimum z: mm

Maksimum x: mm

Maksimum y: mm

Maksimum z: mm

Kapasitans: Farad

Yön:

TAMAM İptal

Şekil 4.11. Kondansatör ekleme penceresi

Bir Diyot Ekle

Diyot İsmi:

Minimum x: mm

Minimum y: mm

Minimum z: mm

Maksimum x: mm

Maksimum y: mm

Maksimum z: mm

Yön: p: pozitif
n: negatif

TAMAM **İptal**

Şekil 4.12. Diyot ekleme penceresi

Bir Bobin Ekle

Bobin İsmi:

Minimum x: mm

Minimum y: mm

Minimum z: mm

Maksimum x: mm

Maksimum y: mm

Maksimum z: mm

İndüktans: Henry

Yön:

TAMAM **İptal**

Şekil 4.13. Bobin ekleme penceresi

Elektriksel port ekleme penceresi Şekil 4.14’te verilmiştir. Pencerede elektriksel portun örneklenmiş akımının ve örneklenmiş geriliminin kartezyen koordinat sistemindeki yeri, yönü, port isimi, port empedansı ve kaynak port olup olmadığı girilmektedir. Elektriksel port ekleme işleminden sonra porta verilen isim ile nesne ağacında “Portlar” bölümünde sıralanmaktadır.

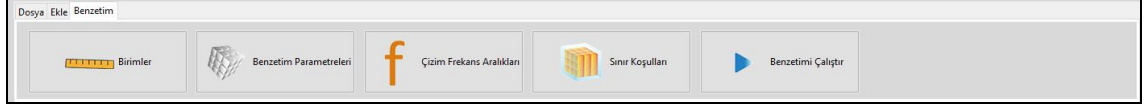
Şekil 4.14. Elektriksel port ekleme penceresi

Gerilim kaynağı ekleme penceresi Şekil 4.15’te verilmiştir. Pencerede gerilim kaynağının kartezyen koordinat sistemindeki konumu, ismi, iç direnç değeri, genliği, dalga formu tipi ve yönü girilmektedir. Gerilim kaynağı ekleme işleminden sonra kaynağa verilen isim ile nesne ağacında “Kaynaklar” bölümünde sıralanmaktadır.

Şekil 4.15. Gerilim kaynağı ekleme penceresi

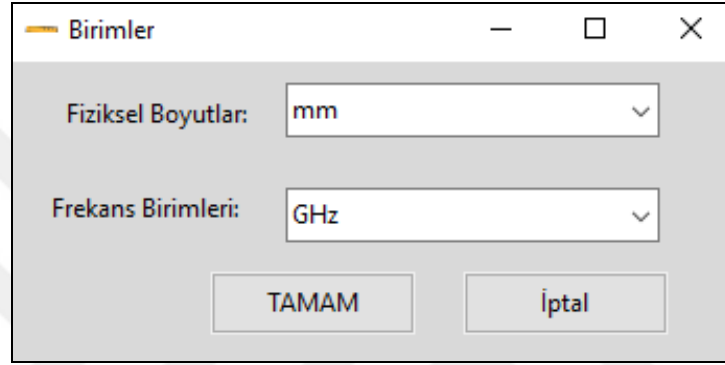
Benzetim sekmesi Şekil 4.16’da verilmiştir. Elektromanyetik benzetim için

gerekli parametreler bu sekme aracılığıyla girilmektedir. Sekmede “Birimler”, “Benzetim parametreleri”, “Çizim frekans aralıkları”, “Sınır koşulları” ve “Benzetimi çalıştır” butonları bulunmaktadır.



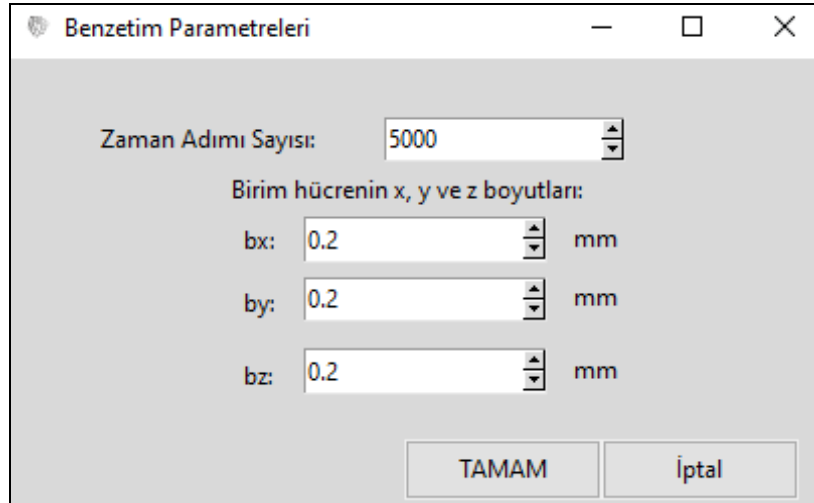
Şekil 4.16. Benzetim sekmesi

“Birimler” penceresi Şekil 4.17’de verilmiştir. Bu pencerede fiziksel boyutların birimi ve frekans birimleri girilebilmektedir.



Şekil 4.17. Birimler penceresi

“Benzetim parametreleri” penceresi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Bu pencerede elektromanyetik benzetimin zaman adım sayısı, kartezyen koordinat sistemine ait yönlere yönelik Yee hücre boyutları girilmektedir.



Şekil 4.18. Benzetim parametreleri penceresi

“Çizim frekans aralığı” butonu ile Şekil 4.19’da gösterilen “Çizim frekans aralığı” penceresi açılmaktadır. Bu pencerede elektromanyetik benzetim sonucu oluşan grafiklerin alt, üst ve adım frekans değerleri girilmektedir.

Şekil 4.19. Çizim frekans aralığı penceresi

Sınır şartları penceresi Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Pencerede kartezyen koordinat sistemindeki yönler için sınır ile tasarım arasındaki hücre sayısı, hücre cinsinden kalınlık değeri ve dış sınırdaki hücre sayısı girilmektedir. Yazılımda PEC ve CPML sınır şartları kullanılabilir.

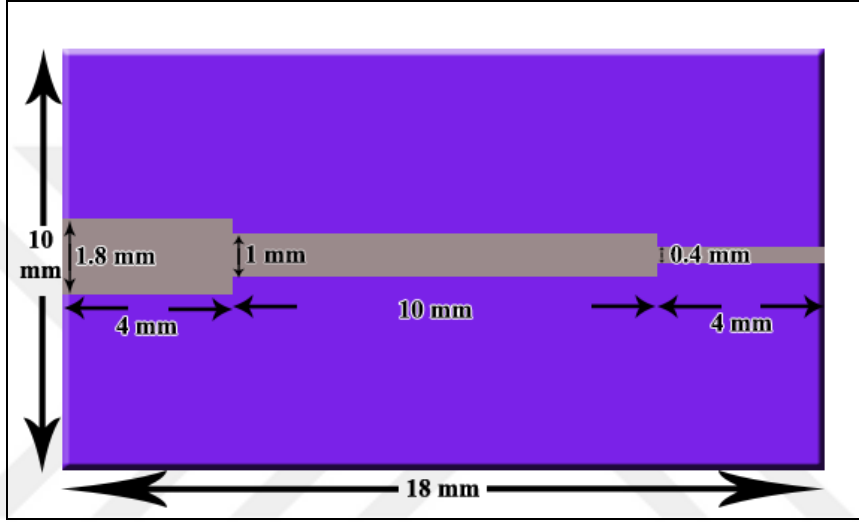
Şekil 4.20. Sınır koşulları penceresi

Elektromanyetik benzetim sırasında, benzetimin hangi adımda olduğu, bitmesine

kalan süre gibi benzetime ait bilgiler veren bir kaydırılabilir metin kutusu ve benzetimin durumunu gösteren süreç barı bilgi bölümünde bulunmaktadır.

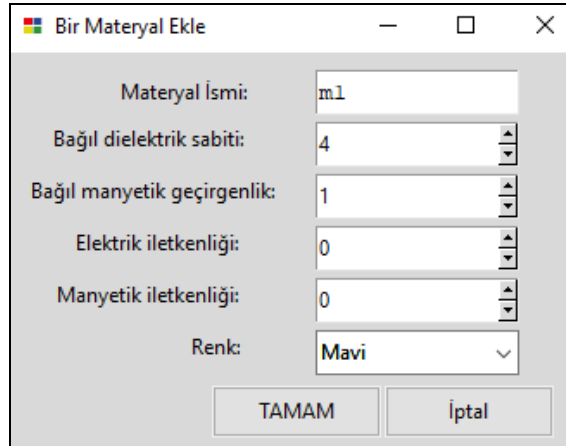
4.2.1. Çeyrek Dalga Dönüştürücü Devresinin Benzetimin Yapılması

Elektromanyetik benzetim programını test etmek amacıyla Şekil 4.21’de tasarımı verilen ve bağıl dielektrik sabiti 4, alttaş kalınlığı 1 mm olan, 4 GHz için çeyrek dalga dönüştürücü [9] devresinin benzetimi NF3DSIM programında ve ticari bir benzetim programında yapılmıştır.



Şekil 4.21. Çeyrek dalga dönüştürücü devresi

İlk olarak Şekil 4.22’de gösterilen bağıl dielektrik sabiti 4, bağıl geçirgenliği 1 olan materyal eklenmektedir. Daha sonra Şekil 4.21’de gösterilen tasarım boyutlarına dayanarak Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te gösterilen dikdörtgen prizmalar eklenerek problem geometrisi oluşturulmaktadır.



Şekil 4.22. Alttaş materyali

Bir Dikdörtgen Prizma Ekle

Dikdörtgen Prizma İsmi: n1

Minimum x: 0 mm

Minimum y: 0 mm

Minimum z: 0 mm

Maksimum x: 10 mm

Maksimum y: 18 mm

Maksimum z: 1 mm

Malzeme Tipi: m1

TAMAM İptal

(a)

Bir Dikdörtgen Prizma Ekle

Dikdörtgen Prizma İsmi: n2

Minimum x: 4 mm

Minimum y: 0 mm

Minimum z: 1 mm

Maksimum x: 5.8 mm

Maksimum y: 4 mm

Maksimum z: 1 mm

Malzeme Tipi: PEC

TAMAM İptal

(b)

Şekil 4.23. (a) Altaş nesnesi ve (b) 1.8mm genişliğe sahip mikroşerit yol

Bir Dikdörtgen Prizma Ekle

Dikdörtgen Prizma İsmi: n3

Minimum x: 4.4 mm

Minimum y: 4 mm

Minimum z: 1 mm

Maksimum x: 5.4 mm

Maksimum y: 14 mm

Maksimum z: 1 mm

Malzeme Tipi: PEC

TAMAM İptal

(a)

Bir Dikdörtgen Prizma Ekle

Dikdörtgen Prizma İsmi: n4

Minimum x: 4.8 mm

Minimum y: 14 mm

Minimum z: 1 mm

Maksimum x: 5.2 mm

Maksimum y: 18 mm

Maksimum z: 1 mm

Malzeme Tipi: PEC

TAMAM İptal

(b)

Şekil 4.24. (a) 1mm genişliğe sahip mikroşerit yol ve (b) 0.4mm genişlikli mikroşerit yol

Daha sonra gerilim kaynağı için Şekil 4.25'te gösterilen 50 ohm iç dirence sahip gerilim kaynağı, direnç olarak Şekil 4.26'da gösterilen 100 ohm'luk direnç, Şekil 4.27'de gösterilen 50 ohm empendansa sahip port 1 ve Şekil 4.28'de gösterilen 100 ohm empendansa sahip port 2 eklenmektedir.

Bir Gerilim Kaynağı Ekle

Gerilim Kaynağı İsmi: g1c

minimum x: 4 mm

minimum y: 0 mm

minimum z: 0 mm

maksimum x: 5.8 mm

maksimum y: 0.4 mm

maksimum z: 1 mm

Direnç: 50 Ohm

Genlik: 1 Volt

Dalga Formu Tipi: gauss

Yön: zp

TAMAM İptal

Şekil 4.25. 50 ohm iç dirence sahip gerilim kaynağı

Bir Direnç Ekle

Direnç İsmi: z1

Minimum x: 4.8 mm

Minimum y: 17.6 mm

Minimum z: 0 mm

Maksimum x: 5.2 mm

Maksimum y: 18 mm

Maksimum z: 1 mm

Direnç: 100 ohm

Yön: z

TAMAM İptal

Şekil 4.26. 100 ohm'luk direnç

Bir Elektriksel Port Ekle

Elektriksel Port İsmi: port1

Örneklenmiş Gerilim:

Minimum x: 4 mm

Minimum y: 0 mm

Minimum z: 0 mm

Maksimum x: 5.8 mm

Maksimum y: 0.4 mm

Maksimum z: 1 mm

Yön: zp

p:pozitif n:negatif

Örneklenmiş Akım:

Minimum x: 4 mm

Minimum y: 0 mm

Minimum z: 0.4 mm

Maksimum x: 5.8 mm

Maksimum y: 0.4 mm

Maksimum z: 0.6 mm

Yön: zp

p:pozitif n:negatif

Port Empedansı: 50 ohm

Kaynak Port: Evet

TAMAM İptal

Şekil 4.27. 50 ohm empedansa sahip port

Bir Elektriksel Port Ekle

Elektriksel Port İsmi: port2

Örneklenmiş Gerilim

Minimum x: 4.8 mm
Minimum y: 17.6 mm
Minimum z: 0 mm
Maksimum x: 5.2 mm
Maksimum y: 18 mm
Maksimum z: 1 mm
Yön: zp
p:pozitif n:negatif

Örneklenmiş Akım

Minimum x: 4.8 mm
Minimum y: 17.6 mm
Minimum z: 0.4 mm
Maksimum x: 5.2 mm
Maksimum y: 18 mm
Maksimum z: 0.6 mm
Yön: zp
p:pozitif n:negatif

Port Empedansı: 100 ohm Kaynak Port: Hayır

TAMAM İptal

Şekil 4.28. 100 ohm empedansa sahip port

Benzetim için zaman adımı sayısı ve Yee hücre boyutları Şekil 4.29'da gösterilen benzetim parametreleri penceresinde, frekans aralıkları Şekil 4.30'da gösterilen çizim frekans aralıkları penceresinde ve sınır şartları Şekil 4.31'da gösterilen sınır koşulları penceresinde girilmiştir.

Benzetim Parametreleri

Zaman Adımı Sayısı: 5000

Birim hücrenin x, y ve z boyutları:

bx: 0.5 mm
by: 0.2 mm
bz: 0.5 mm

TAMAM İptal

Şekil 4.29. Yapı için benzetim parametreleri penceresi

Çizim Frekans Aralıkları

Çiz:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıç: 0.0190049 GHz
Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 7.0 GHz

Hesapla:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıç: 0.0190049 GHz
Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 14.0 GHz
Frekans Tanım Bölgesi Adımı: 0.0190049 GHz
Tanımla: 4.0 GHz
çoklu değerler için virgül kullanın.

TAMAM İptal

Şekil 4.30. Yapı için çizim frekans aralıkları

Sınır Koşulları

Hava Boşluğu: Objeler ve sınır arasındaki hücre sayısı.

Kalınlık: Hücre Kalınlığı (hücre)

PEC: Perfect electrical conductor-Mükemmel elektrik iletkeni

CPML: Convolutional perfectly matched layer-Evrişimli mükemmel uyumlu katman

x negatif (CPML)

Hava boşluğu: 8

Kalınlık: 5

x pozitif (CPML)

Hava boşluğu: 8

Kalınlık: 5

y negatif (CPML)

Hava boşluğu: 8

Kalınlık: 5

y pozitif (CPML)

Hava boşluğu: 8

Kalınlık: 5

z negatif (PEC)

Hava boşluğu: 0

Thickness: 5

z pozitif (CPML)

Hava boşluğu: 8

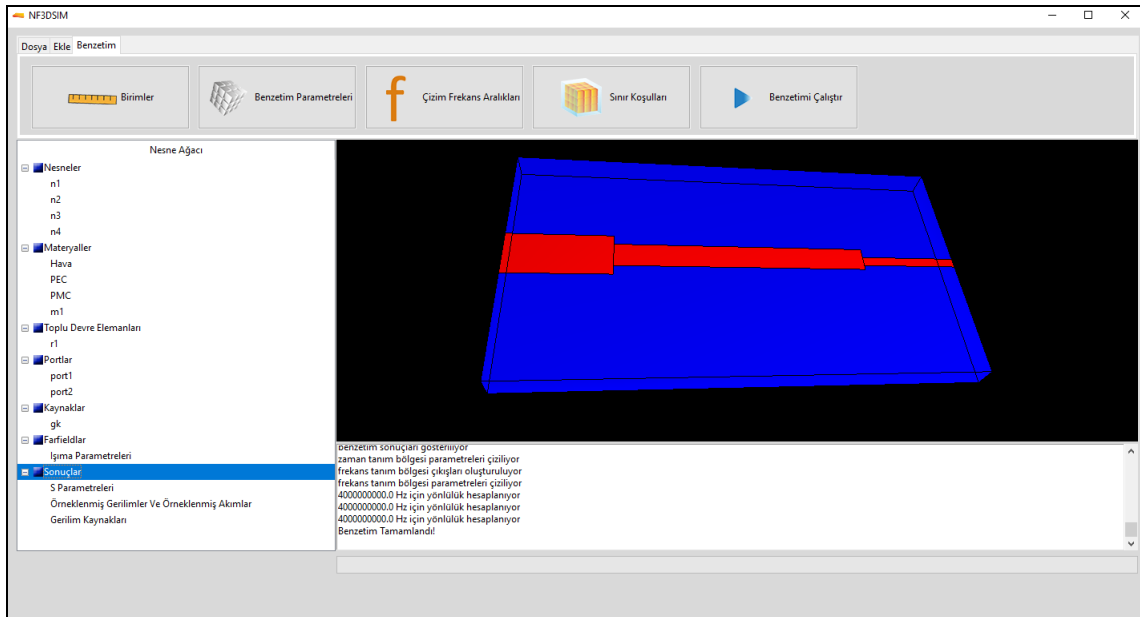
Kalınlık: 5

Dış sınırdaki hücre sayısı : 13

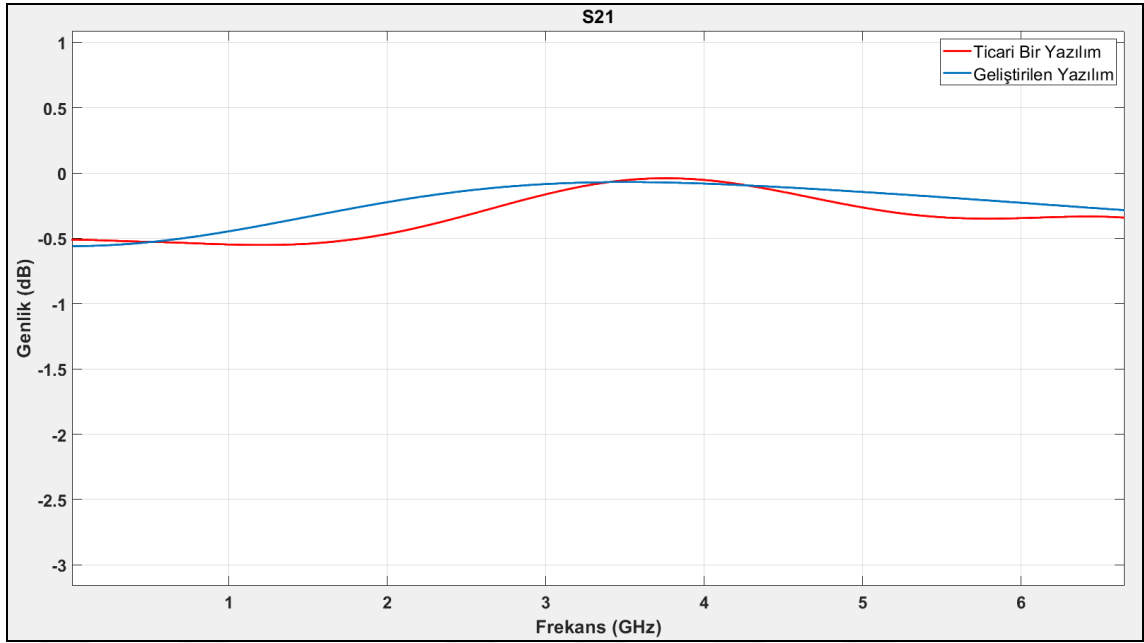
TAMAM İptal

Şekil 4.31. Yapı için sınır koşulları

Daha sonraki aşamada benzetim başlatılmaktadır. Yapının programdaki görüntüsü Şekil 4.32’de, geliştirilen programdaki ve ticari bir benzetim programındaki benzetim S_{21} karakteristikleri Şekil 4.33’te verilmiştir.



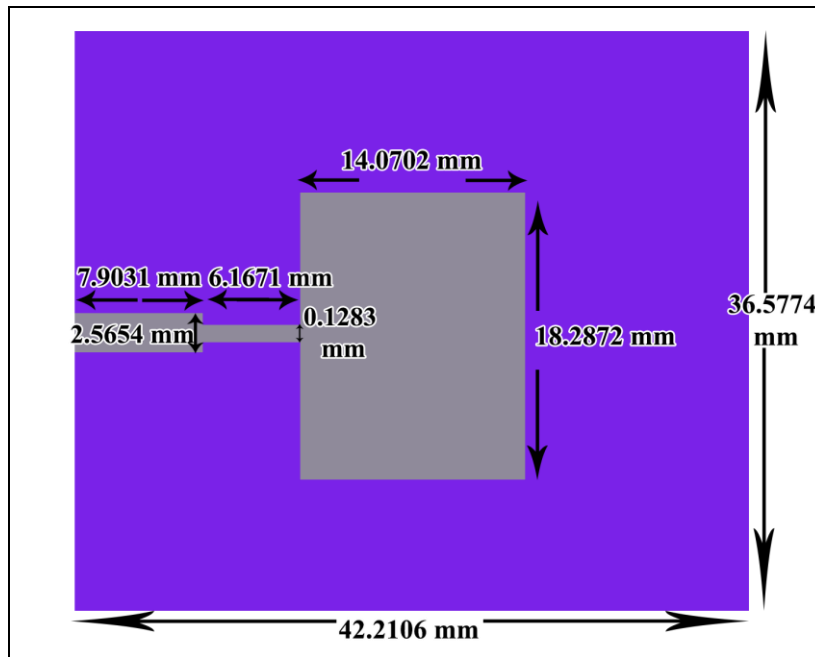
Şekil 4.32. Yapının programdaki görünümü



Şekil 4.33. Çeyrek dalga dönüştürücü S_{21} karakteristikleri

4.2.2. Mikroşerit Kenar Beslemeli Dikdörtgensel Yama Antenin Benzetimin Yapılması

Merkez frekansı 5.8 GHz, bağıl dielektrik sabiti 3 ve alttaş kalınlığı 1.8 mm olan mikroşerit kenar beslemeli bir dikdörtgensel yama anten Şekil 4.34’te verilmiştir.



Şekil 4.34. 5.8GHz mikroşerit kenar beslemeli dikdörtgensel yama anten

Antenin tasarımı için Şekil 4.35’te gösterilen bağıl dielektrik sabiti 3, bağıl geçirgenliği 1 olan materyal, Şekil 4.34’te gösterilen tasarım boyutlarına dayanarak

Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de gösterilen dikdörtgen prizmalar eklenerek problem geometrisi oluşturulmaktadır.

Şekil 4.35. Alttaş materyali

(a)

(b)

Şekil 4.36. (a) Alttaş nesnesi ve (b) PEC toprak plakası

(a)

(b)

Şekil 4.37. (a) Yama nesnesi ve (b) 2.5654 mm genişliğindeki mikroşerit yol

Bir Dikdörtgen Prizma Ekle

Dikdörtgen Prizma İsmi: b4

Minimum x: -0.1283 mm

Minimum y: 7.0351 mm

Minimum z: 1.8 mm

Maksimum x: 0.1283 mm

Maksimum y: 13.2022 mm

Maksimum z: 1.8124 mm

Malzeme Tipi: PEC

TAMAM İptal

Şekil 4.38. 0.1284 mm genişliğindeki mikroşerit yol

Gerilim kaynağı için Şekil 4.39’da gösterilen 50 ohm iç dirence sahip gerilim kaynağı ve Şekil 4.40’da gösterilen 50 ohm empendansa sahip port eklenmektedir.

Bir Gerilim Kaynağı Ekle

Gerilim Kaynağı İsmi: v1

minimum x: -1.2827 mm

minimum y: 21.1053 mm

minimum z: 0 mm

maksimum x: 1.2827 mm

maksimum y: 21.1053 mm

maksimum z: 1.8 mm

Direnç: 70 Ohm

Genlik: 1 Volt

Dalga Formu Tipi: gauss

Yön: zp

TAMAM İptal

Şekil 4.39. 50 ohm iç dirence sahip gerilim kaynağı

Şekil 4.40. 50 ohm empedansa sahip port

Yapılacak benzetime ait zaman adımı sayısı ve Yee hücre boyutları Şekil 4.41’de gösterilen benzetim parametreleri penceresinde, S_{11} çizim frekans aralıkları Şekil 4.42’de gösterilen çizim frekans aralıkları penceresinde ve sınır şartları Şekil 4.43’te gösterilen sınır koşulları penceresinde girilmiştir.

Şekil 4.41. Anten için benzetim parametreleri penceresi

Şekil 4.42. Anten için S_{11} çizim frekans aralıkları

Sınır Koşulları

Hava Boşluğu: Objeler ve sınır arasındaki hücre sayısı.

Kalınlık: Hücre Kalınlığı (hücre)

PEC: Perfect electrical conductor-Mükemmel elektrik iletkeni

CPML: Convolnutional perfectly matched layer-Evrişimli mükemmel uyumlu katman

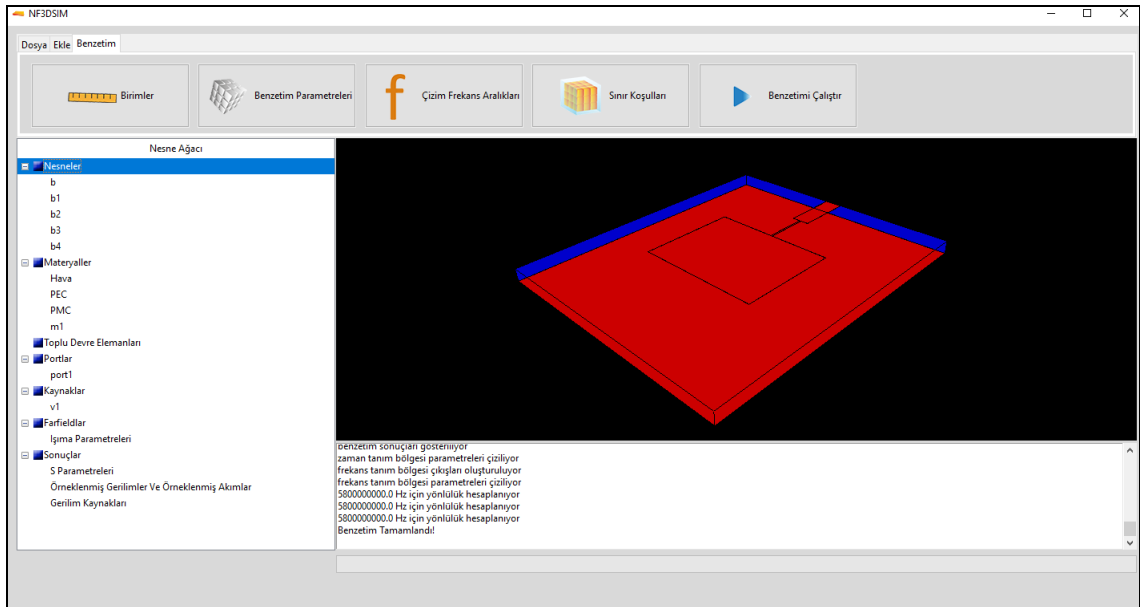
x negatif (CPML) Hava boşluğu: 8 Kalınlık: 5	x pozitif (CPML) Hava boşluğu: 8 Kalınlık: 5
y negatif (CPML) Hava boşluğu: 8 Kalınlık: 5	y pozitif (CPML) Hava boşluğu: 8 Kalınlık: 5
z negatif (PEC) Hava boşluğu: 0 Thickness: 5	z pozitif (CPML) Hava boşluğu: 8 Kalınlık: 5

Dış sınırdaki hücre sayısı : 13

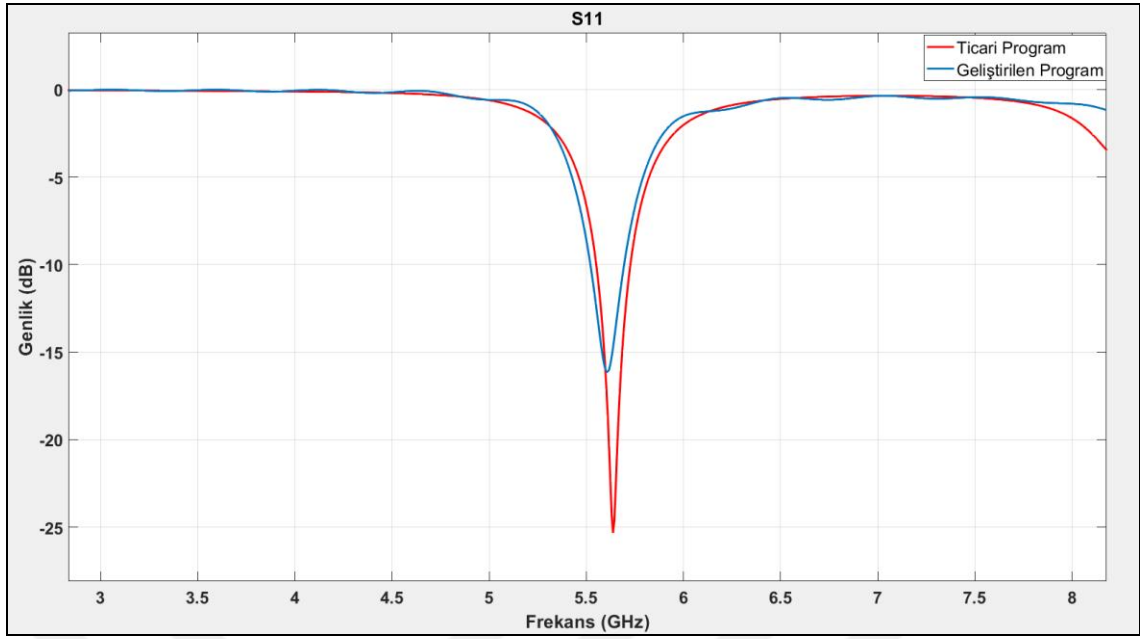
TAMAM İptal

Şekil 4.43. Anten için sınır koşulları

Bir sonraki aşamada elektromanyetik benzetim başlatılmaktadır. Antenin programdaki görüntüsü Şekil 4.44'te, geliştirilen programdaki ve ticari bir benzetim programındaki benzetim S_{11} karakteristikleri Şekil 4.45'te verilmiştir.

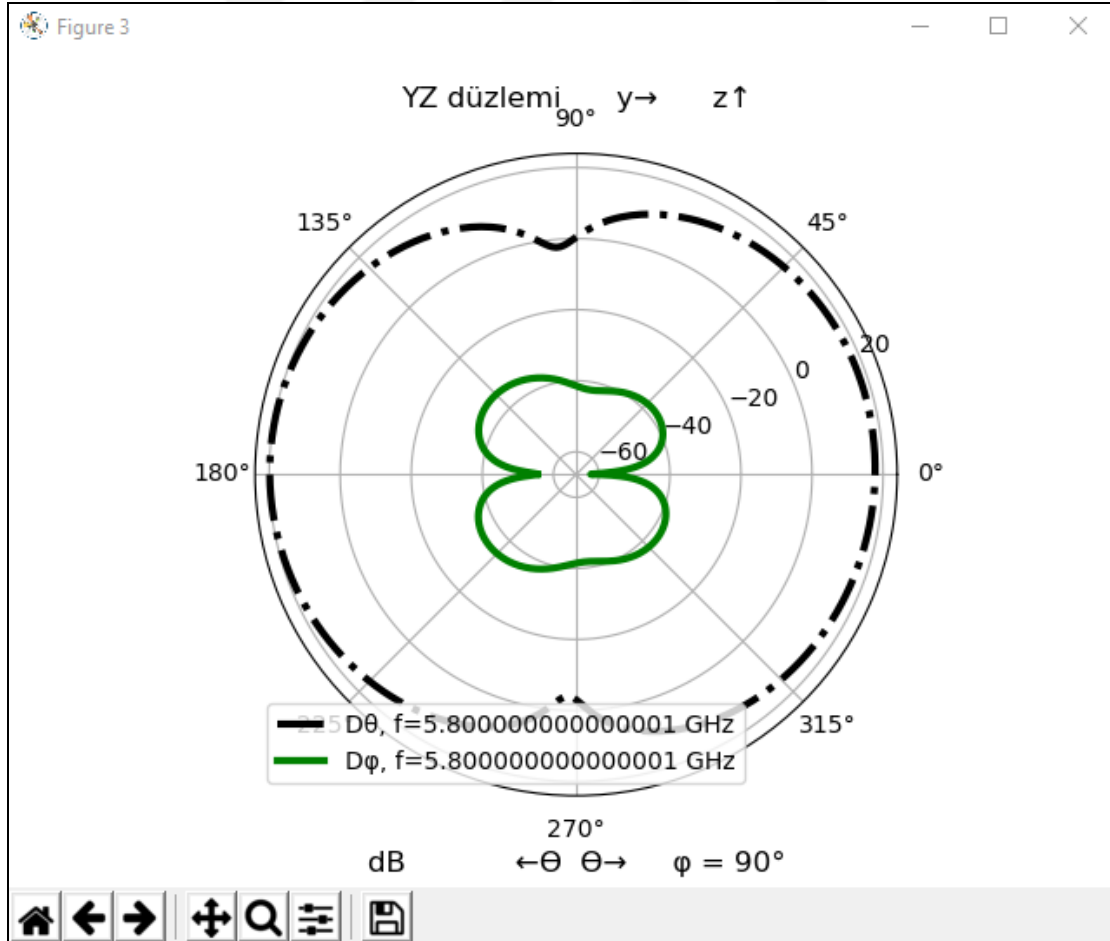


Şekil 4.44. Yapının programdaki görünümü

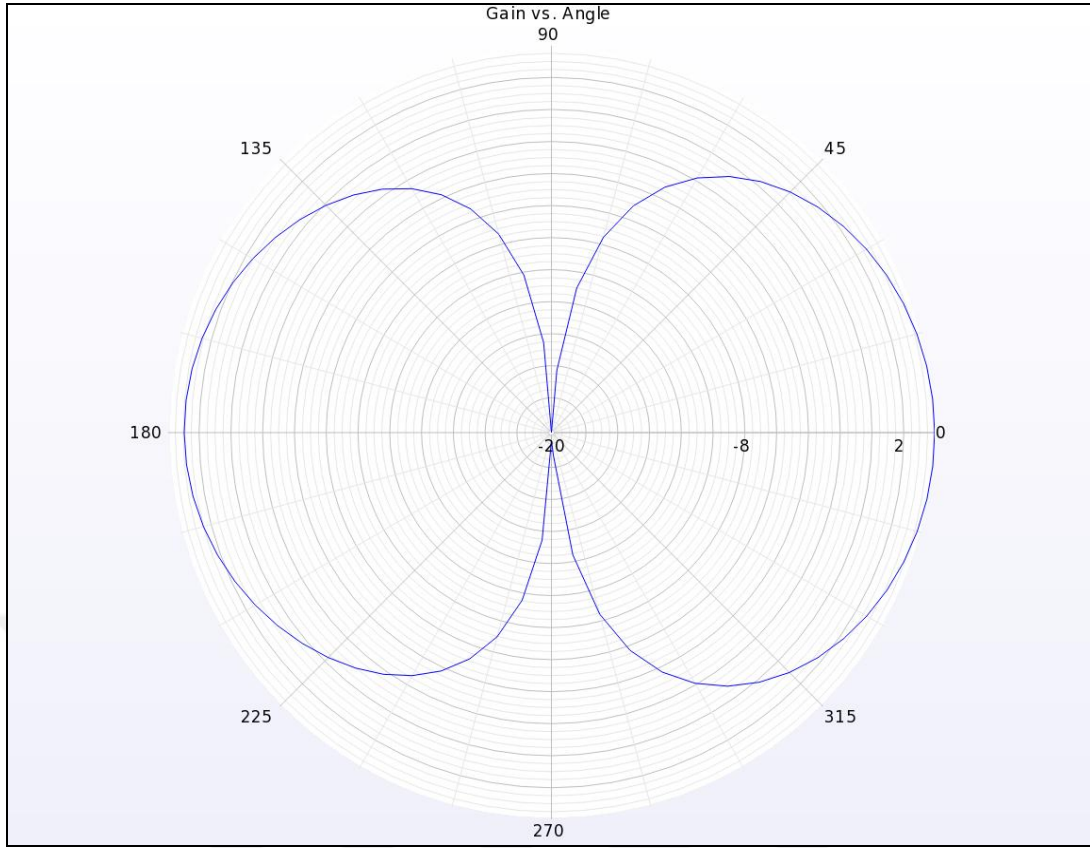


Şekil 4.45. Antenin S_{11} karakteristikleri

Geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği Şekil 4.46'da ve ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.46. Geliştirilen yazılım ışıma karakteristiği



Şekil 4.47. Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği

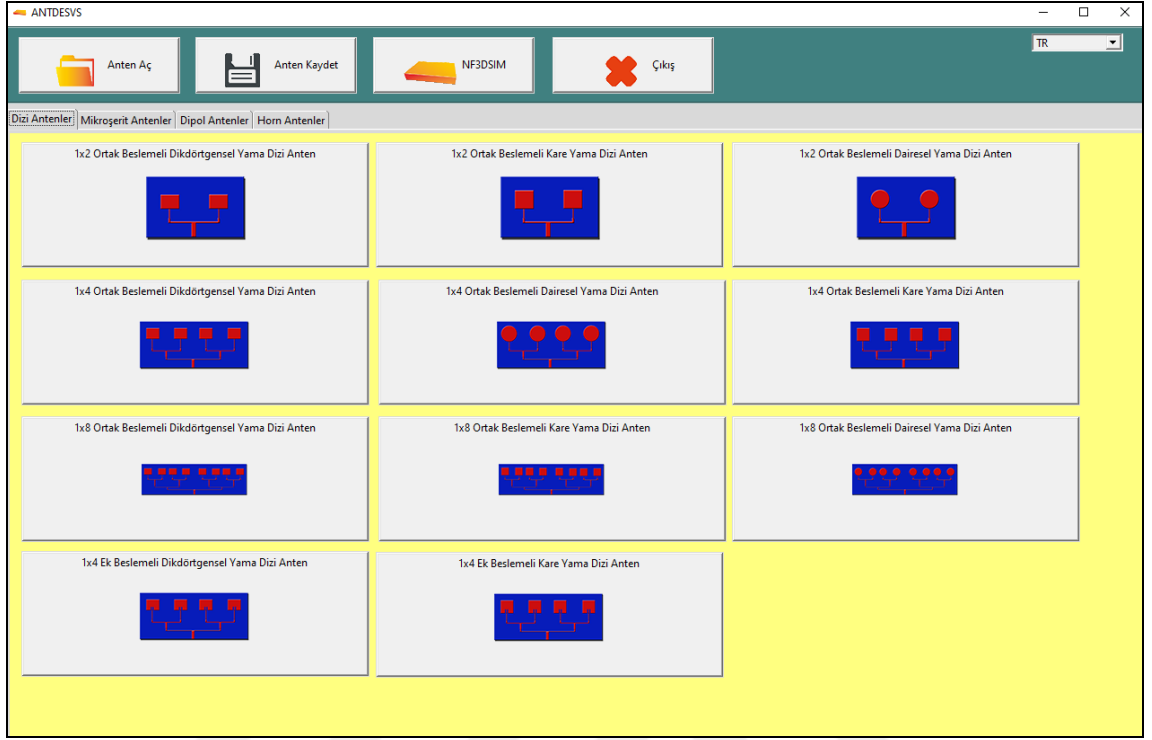
4.3. Geliştirilen Anten Tasarım ve Optimizasyon Programı: ANTDESVS

Geliştirilen bu yazılımda anten tasarım ve optimizasyonu için oluşturulan arayüz ile kullanıcı anten şablonu seçebilmekte, antenin tasarımı ve optimizasyonu yapabilmektedir. Ayrıca tasarlanılan anten NF3DSIM arayüzüne aktarılabilmekte ve üzerinde değişiklik yapılabilir. Kullanıcı arayüzünün genel görünümü ve “Dizi antenler” sekmesi Şekil 4.48’de gösterilmiştir.

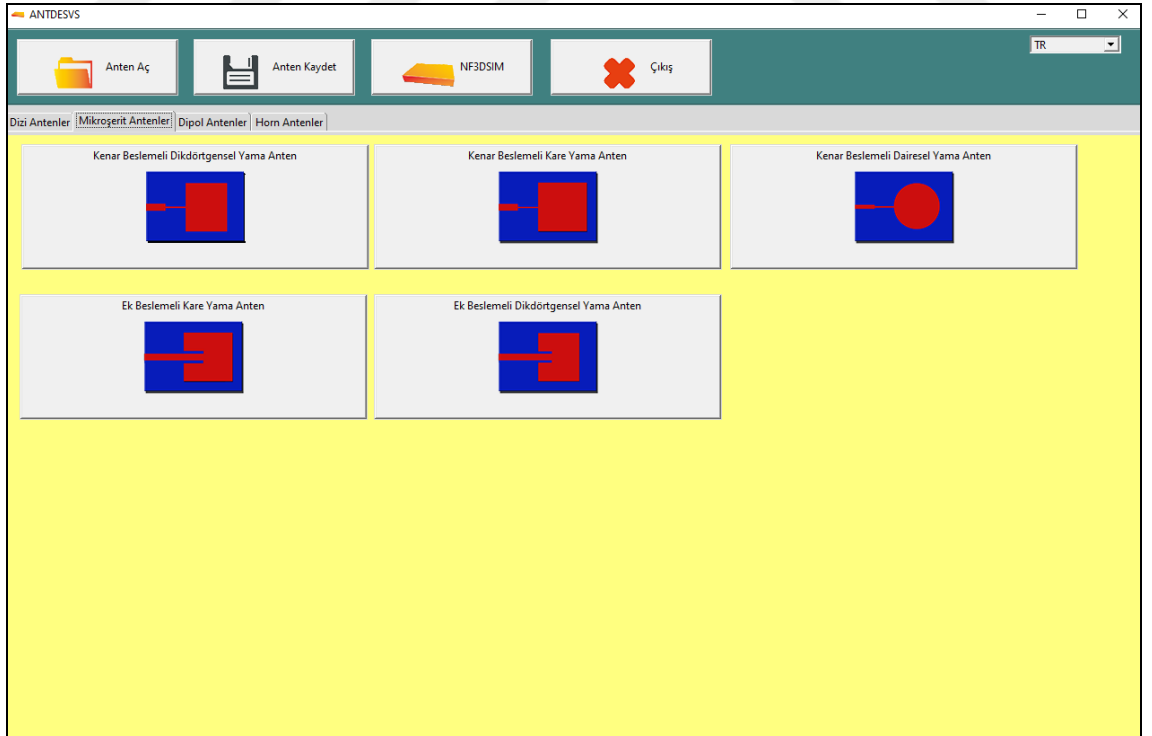
Arayüzün üst kısmında genel dosya işlemlerinin yapıldığı bölüm ve gösterim dilinin seçildiği bölüm (Türkçe veya İngilizce) bulunmaktadır. Pencerenin altında ise anten tipleri arasında geçiş yapmaya yarayan anten tipleri sekmesi ve bu sekmelerde seçilen anten tipine ait antenler bulunmaktadır. Yazılımda anten tipi olarak dizi anten, mikroşerit anten, dipol anten ve horn anten bulunmaktadır. “Mikroşerit antenler” sekmesi Şekil 4.49’da, “Dipol antenler” sekmesi Şekil 4.50’de ve “Horn antenler” sekmesi Şekil 4.51’de gösterilmiştir.

Genel dosya işlemleri bölümünde “Anten aç”, “Anten kaydet”, NF3DSIM ve “Çıkış” butonları bulunmaktadır. “Anten Kaydet” penceresi Şekil 4.52’de gösterilmiştir.

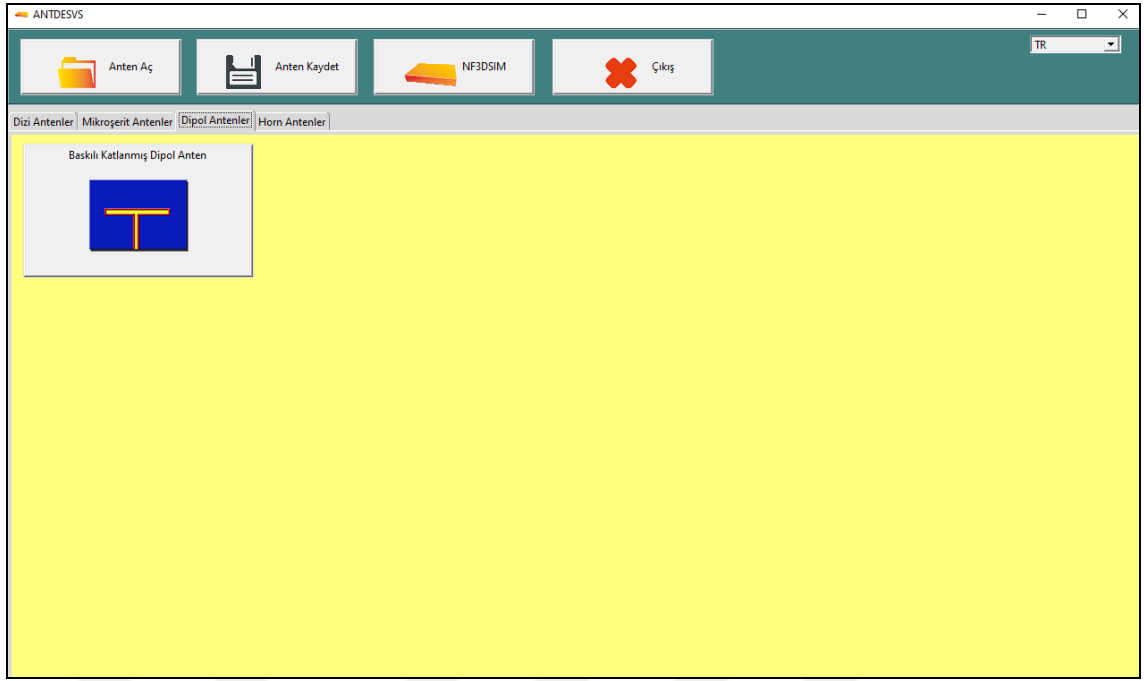
Bu pencerede kullanıcının tasarladığı antenler bulunmakta ve seçilen antenin tasarım dosyası kaydedilmektedir.



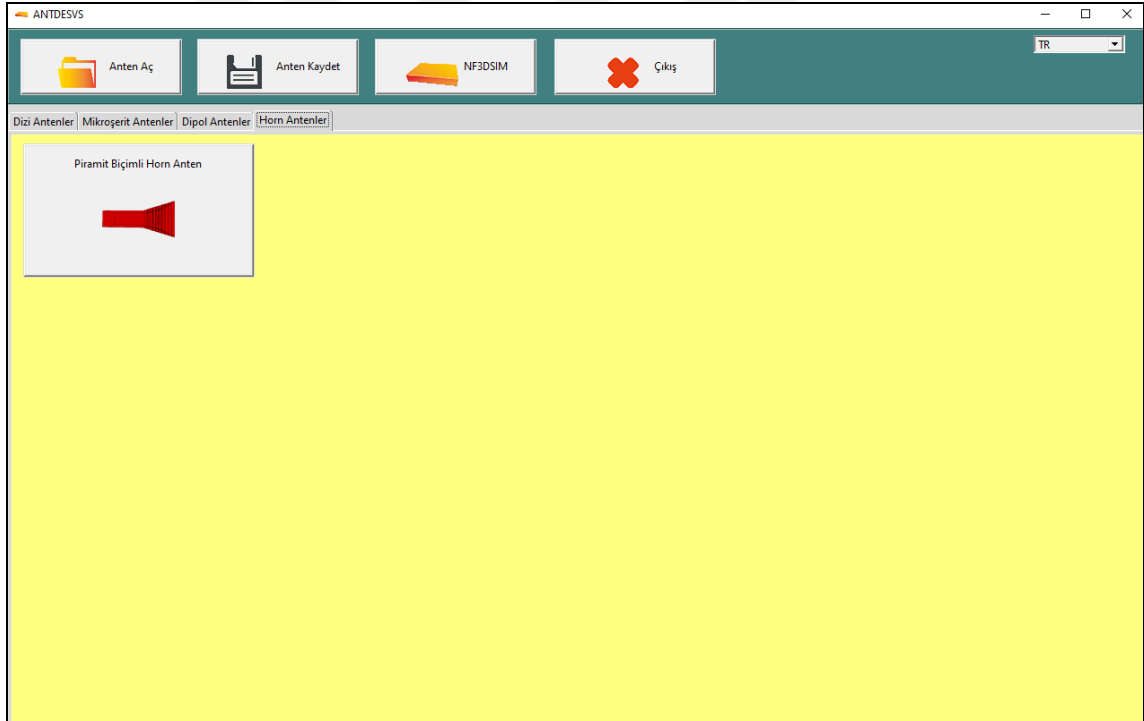
Şekil 4.48. Grafik kullanıcı arayüzünün genel görünümü ve “Dizi antenler” sekmesi



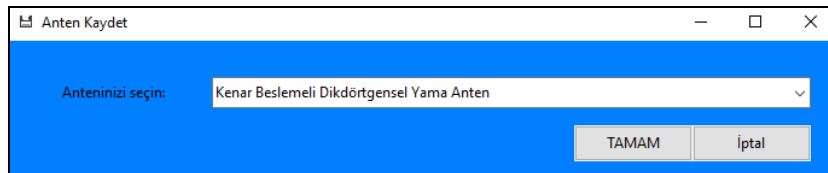
Şekil 4.49. “Mikroşerit Antenler” sekmesi



Şekil 4.50. “Dipol Antenler” sekmesi

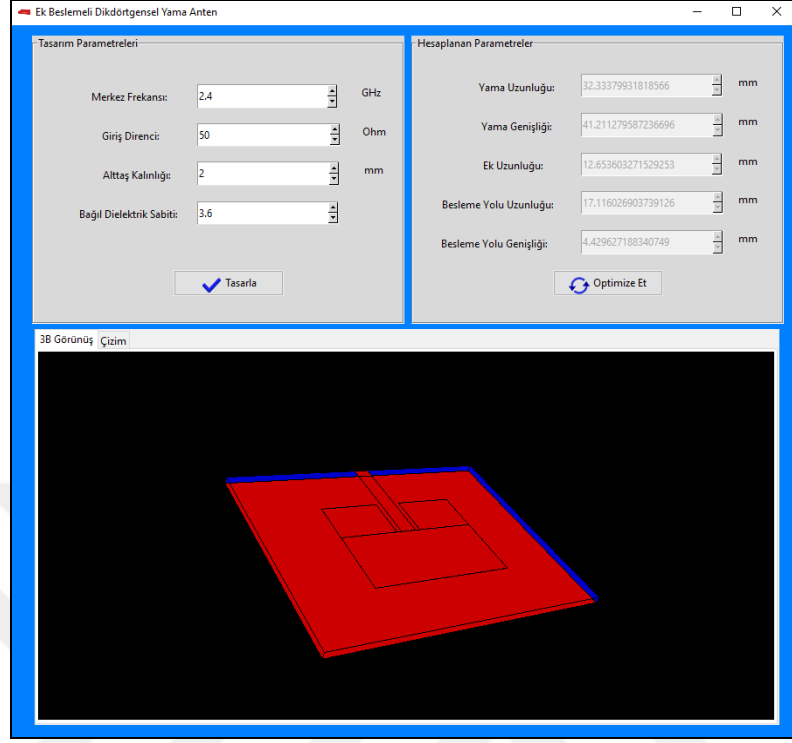


Şekil 4.51. “Horn Antenler” sekmesi

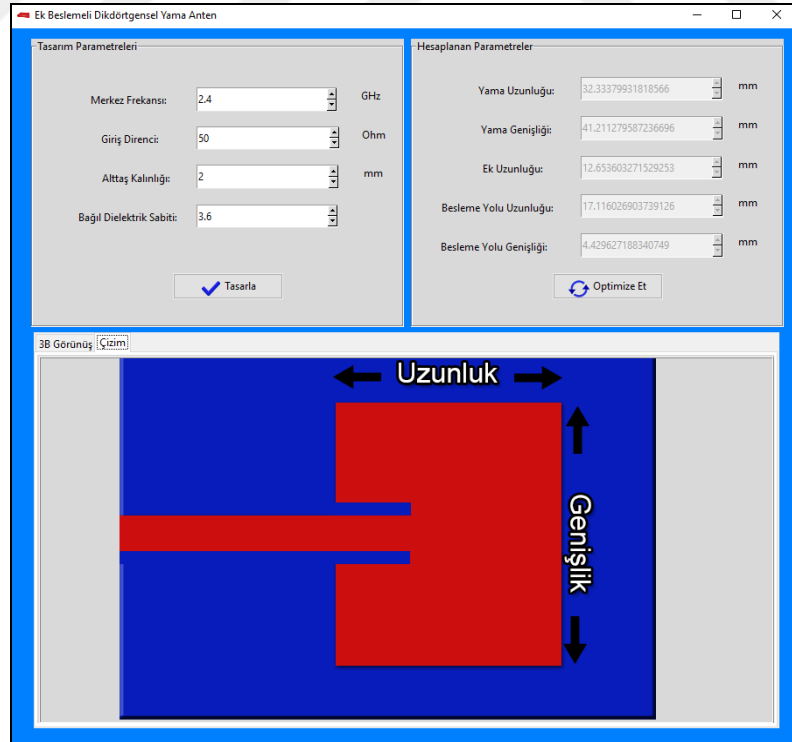


Şekil 4.52. Anten kaydet penceresi

Anten butonlarına basıldığında anten tasarım penceresi açılmaktadır. Anten tasarım penceresi Şekil 4.53'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

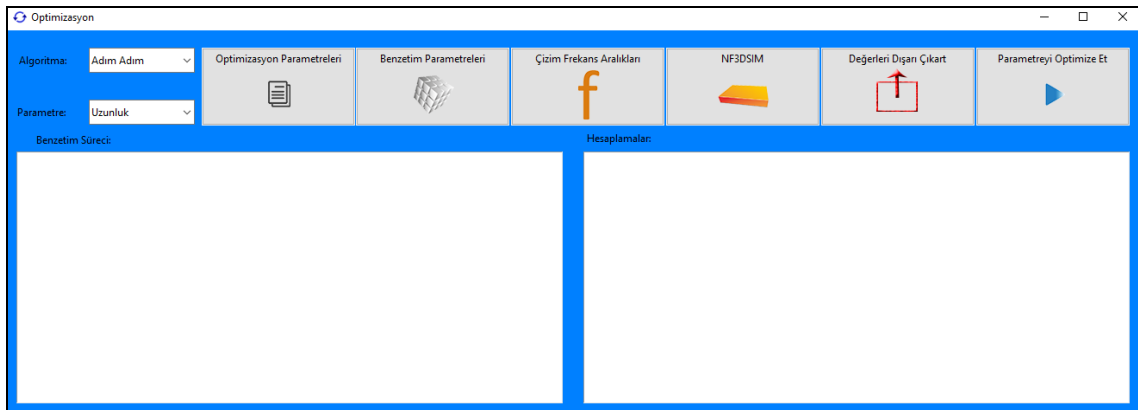
Şekil 4.53. (a) Anten tasarım penceresinde üç boyutlu görünüş sekmesi ve (b) anten tasarım penceresinde çizim sekmesi

Anten tasarım penceresinde antenin tasarım parametreleri girilebilmekte ve anten tasarımı yapılabilmektedir. Bu pencere antenin tasarım parametrelerinin girildiği tasarım parametreleri, tasarlanılan antenin parametrelerin bulunduğu hesaplanan parametreler ve antenin üç boyutlu görünüşü ile çiziminin bulunduğu anten görünümü bölümlerinden oluşmaktadır. Üç boyutlu çizim üzerinde büyütme, küçültme, sürüklenme ve döndürme işlemleri yapılabilmektedir. Tasarlanan antenin üç boyutlu çizimi hesaplanan parametrelere göre güncellenmektedir.

“Optimize et” butonuna basıldığı zaman açılan Optimizasyon penceresi Şekil 4.54’te gösterilmiştir. Bu pencerede fiziksel parametrenin optimizasyon işlemi yapılmaktadır. Optimizasyon penceresi dosya bölümü, simülasyon süreci bölümü ve hesaplamalar bölümü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

Dosya bölümünde kullanıcının optimizasyon algoritmasını seçebileceği açılır menü, antene göre değişen optimize edilecek parametrenin gösterildiği kısım, “Optimizasyon parametreleri”, “Benzetim parametreleri”, “Çizim frekans aralıkları”, NF3DSIM, “Değerleri çıkart” ve “Parametreyi optimize et” butonları bulunmaktadır.

Elektromanyetik benzetimin hangi benzetim adımıyla bulunduğu, benzetim sürecince yapılan işlem, benzetim bitimine kalan süre, toplam benzetim süresi ve toplam optimizasyon süresi benzetim süreci kısmına yazılmaktadır. Hesaplamalar kısmına ise optimizasyon süreci, optimize edilen anten parametresinin veya parametrelerinin güncel değerleri yazılmaktadır.



Şekil 4.54. Optimizasyon penceresi

“Optimizasyon parametreleri” butonuna basıldığı zaman açılan Optimizasyon parametreleri penceresi Şekil 4.55’te gösterilmiştir. Optimizasyon parametreleri penceresinde adım adım optimizasyon algoritmasının adım büyüklüğü, hedef merkez frekansına artı ve eksi uzaklık olan tolerans girilebilmektedir.

Ayrıca makine öğrenmesi algoritmasını kullanan tahmin optimizasyon algoritması ve hızlı tahmin optimizasyon algoritması için girilecek olan örnek sayısı ve örnekler arası uzaklık girilmektedir. Anten tipine göre optimizasyon adımı veya optimizasyon çarpanı operatörü kullanılabilir.

(a)

(b)

Şekil 4.55. (a) Optimizasyon parametreleri optimizasyon adım penceresi ve (b) optimizasyon parametreleri optimizasyon çarpanı penceresi

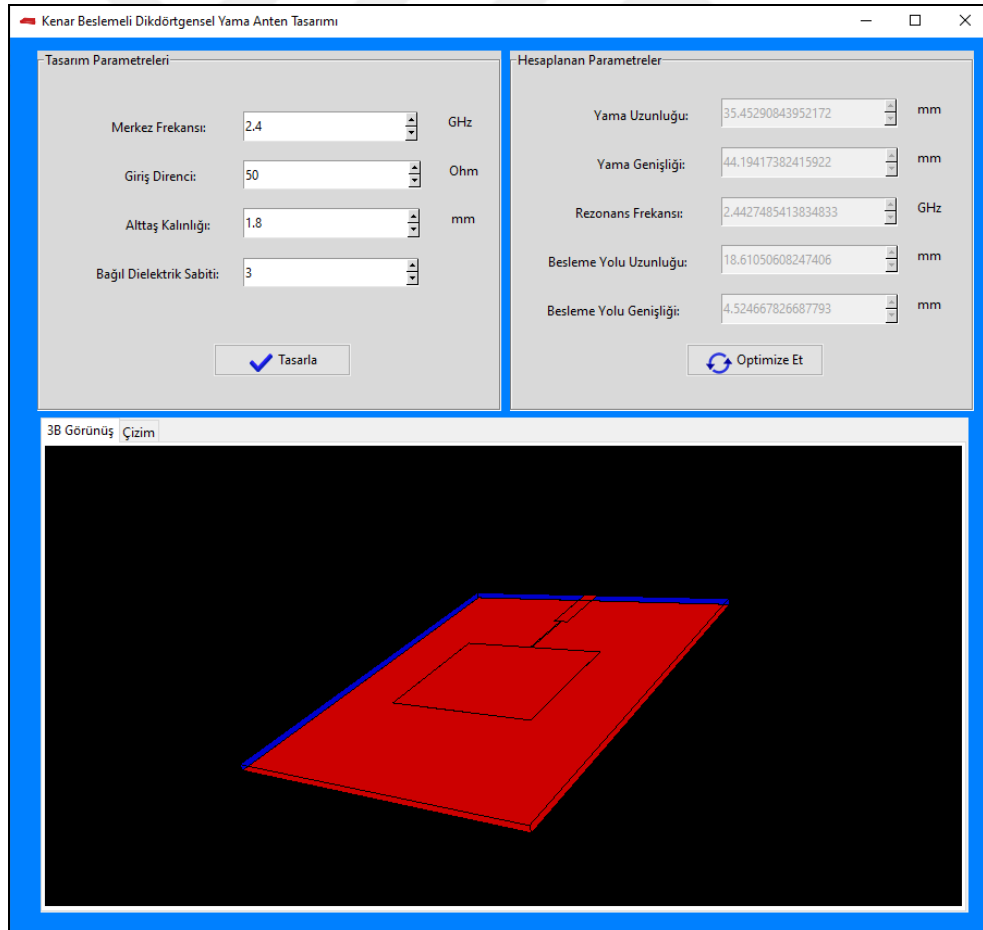
“Değerleri çıkart” butonu ile anten tasarım penceresinde hesaplanan parametreler ile optimizasyon penceresinde hesaplamalar bölümüne yazılan optimizasyon değerleri “.txt” formatında kaydedilmektedir. “Parametreyi Optimize Et” butonu ile Şekil 4.56’da gösterilen “Optimizasyonu Başlat” penceresi açılmaktadır. Bu pencerede seçilen optimizasyonun algoritması, parametreleri ve benzetim parametreleri gösterilmekte, optimizasyonun başlangıcı yapılabilmektedir.

Şekil 4.56. Optimizasyonu başlatma ekranı

Geliştirilen anten tasarımı ve optimizasyon yazılımı olan ANTDESVS'nin benzetim kısmı sonuçlarının doğrulanması amacıyla, izleyen alt bölümlerde çeşitli anten benzetimleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar, ticari bir benzetim yazılımından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4.3.1. Mikroşerit Kenar Beslemeli Dikdörtgensel Yama Anten Tasarım ve Benzetiminin Yapılması

Geliştirilen yazılıma ait Şekil 4.49'da gösterilen mikroşerit antenler sekmesinde “Kenar Beslemeli Dikdörtgensel Yama Anten” isimli anten seçilerek Şekil 4.57'de gösterilen antene ait tasarım penceresinde antenin tasarımı yapılabilmektedir. Bu örnekte merkez frekansı 2.4 GHz, giriş empedansı 50 ohm, alttaş kalınlığı 1.8 mm ve alttaş bağıl dielektrik sabiti 3 olan kenar beslemeli dikdörtgensel bir yama anten tasarlanmıştır. Tablo 4.1'de ise ANTDESVS yazılımında ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları verilmiştir.



Şekil 4.57. Geliştirilen yazılım ile tasarlanan mikroşerit kenar beslemeli dikdörtgensel yama anten

Tablo 4.1. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları

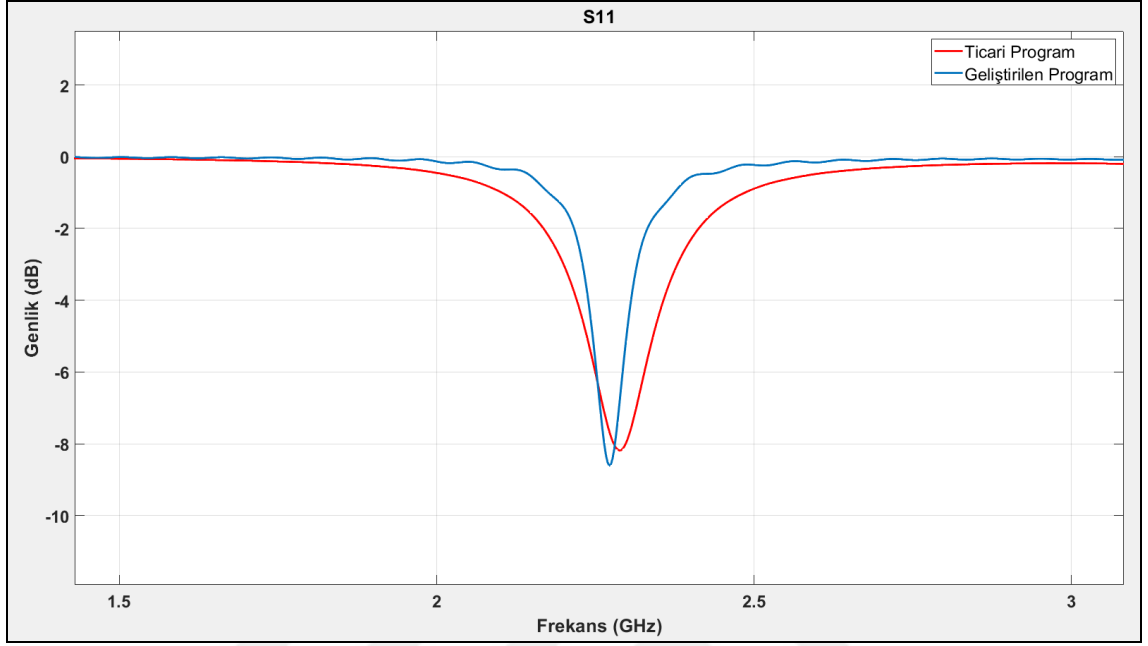
Uzunluk tipi	ANTDESVS programındaki anten uzunlukları	Ticari bir anten tasarım programındaki anten uzunlukları
Yama uzunluğu	35.45 mm	34.88 mm
Yama genişliği	44.19 mm	44.16 mm
Besleme yolu uzunluğu	18.61 mm	20.09 mm
Besleme yolu genişliği	4.524 mm	4.525 mm

Benzetim için Şekil 4.58’de gösterilen benzetim parametreleri ve Şekil 4.59’da gösterilen S_{11} çizim frekans aralıkları girilmiştir.

Şekil 4.58. Anten benzetim parametreleri

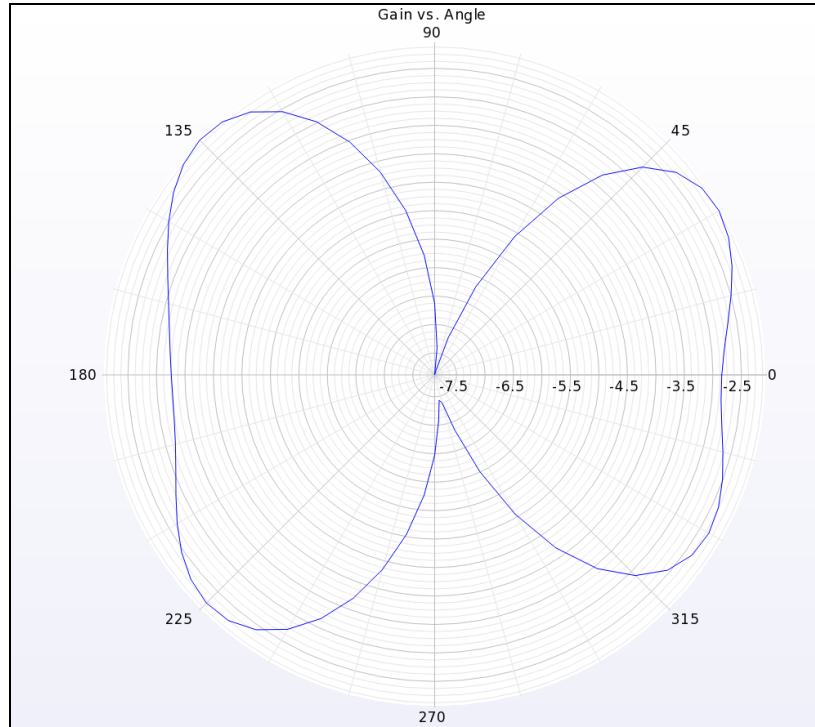
Şekil 4.59. Anten S_{11} çizim frekans aralıkları

ZTBSF yöntemini kullanan ticari bir benzetim programında elde edilen S_{11} parametresi grafiği ve geliştirilen yazılımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği Şekil 4.60'da verilmiştir.

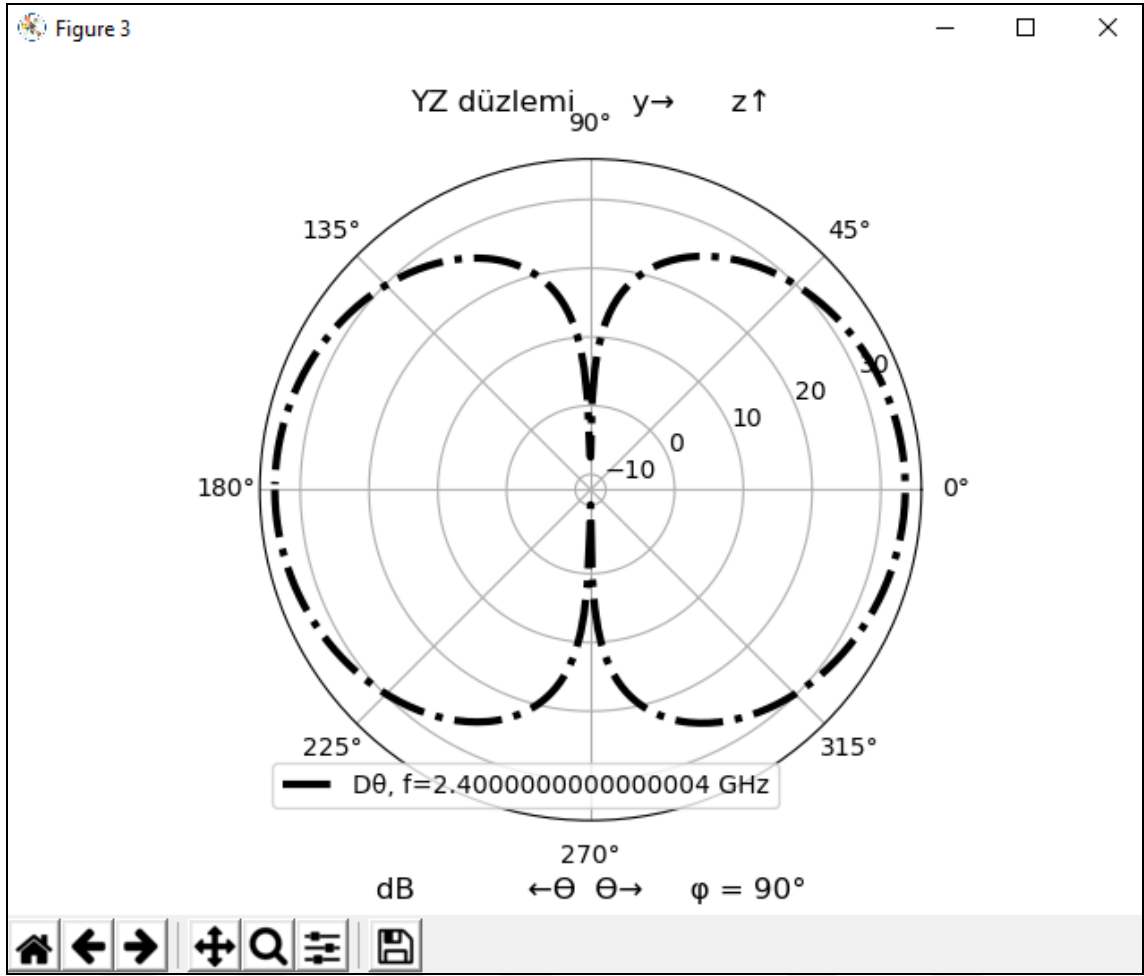


Şekil 4.60. Antenin S_{11} karakteristikleri

Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği Şekil 4.61'de ve geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği Şekil 4.62'de gösterilmiştir.



Şekil 4.61. Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği

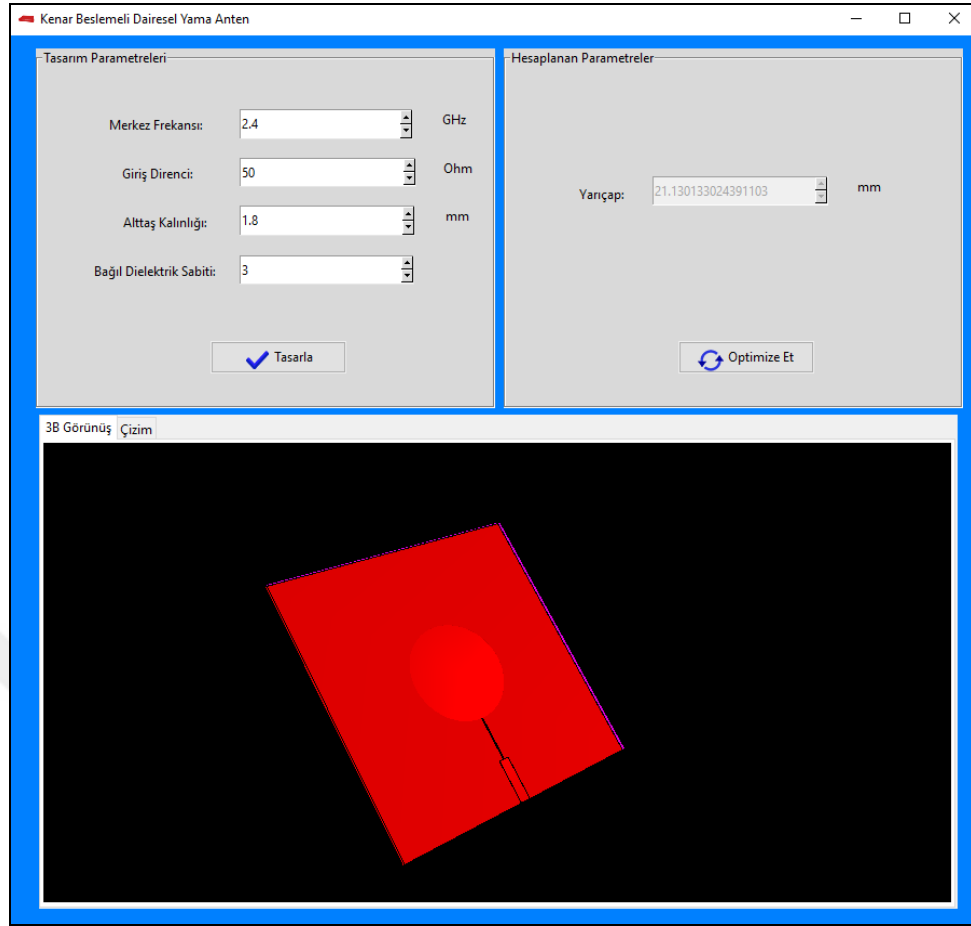


Şekil 4.62. Geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği

4.3.2. Mikroşerit Kenar Beslemeli Dairesel Yama Antenin Tasarım ve Benzetiminin Yapılması

Giriş direnci 50 ohm, alttaş kalınlığı 1.8mm, bağıl dielektrik sabiti 3, merkez frekansı 2.4 GHz olan kenar beslemeli dairesel yama mikroşerit anten geliştirilen yazılımda ve ticari bir benzetim programında çizilmiş ve benzetimi yapılmıştır. Tasarlanan mikroşerit kenar beslemeli dairesel yamaya ait yama yarıçapı 21.1301 mm'dir.

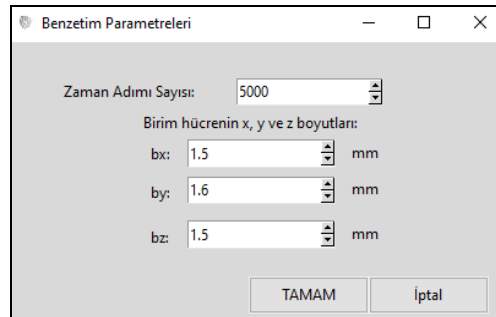
Geliştirilen yazılımda tasarlanan yapı Şekil 4.63'te, ANTDESVS yazılımında ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları Tablo 4.2'de, antenin benzetimi için girilen benzetim parametreleri Şekil 4.64'te ve S_{11} çizim frekans aralıkları Şekil 4.65'te verilmiştir.



Şekil 4.63. Geliştirilen yazılım ile tasarlanan mikroşerit kenar beslemeli dairesel yama anten

Tablo 4.2. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları

Uzunluk tipi	ANTDESVS programındaki anten uzunlukları	Ticari bir anten tasarım programındaki anten uzunlukları
Yama yarıçapı	21.1301 mm	20.875 mm



Şekil 4.64. Antenin benzetim parametreleri

Çizim Frekans Aralıkları

Çiz:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıcı: 1.7999999999999999 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 3 GHz

Hesapla:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıcı: 0.00265818 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 14.0 GHz

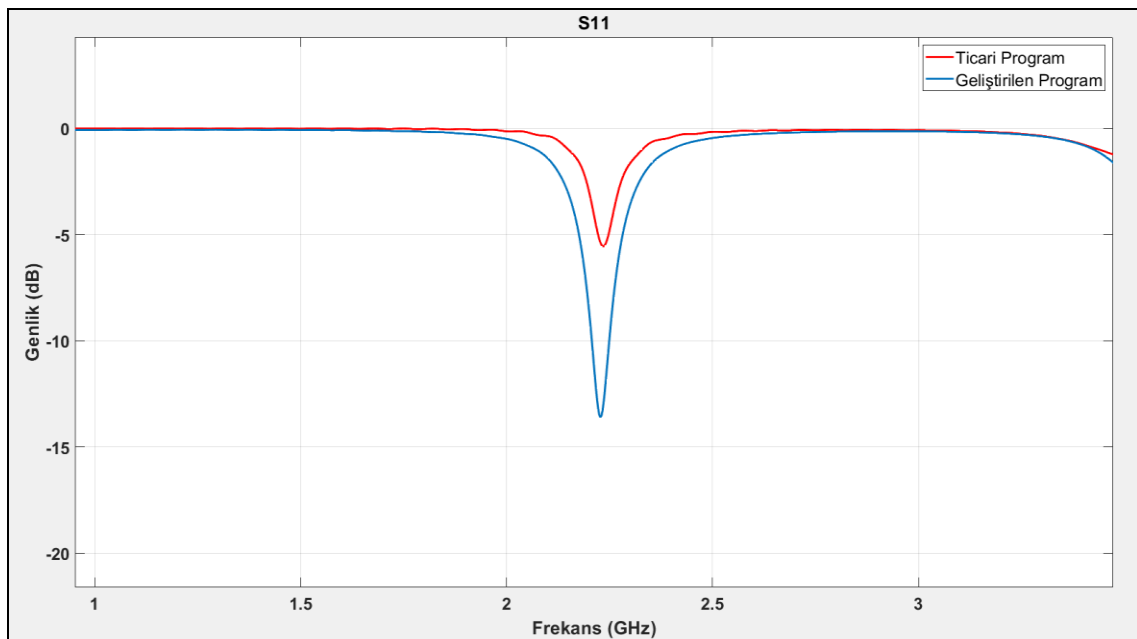
Frekans Tanım Bölgesi Adımı: 0.00265818 GHz

Tanımla: 2.4 GHz

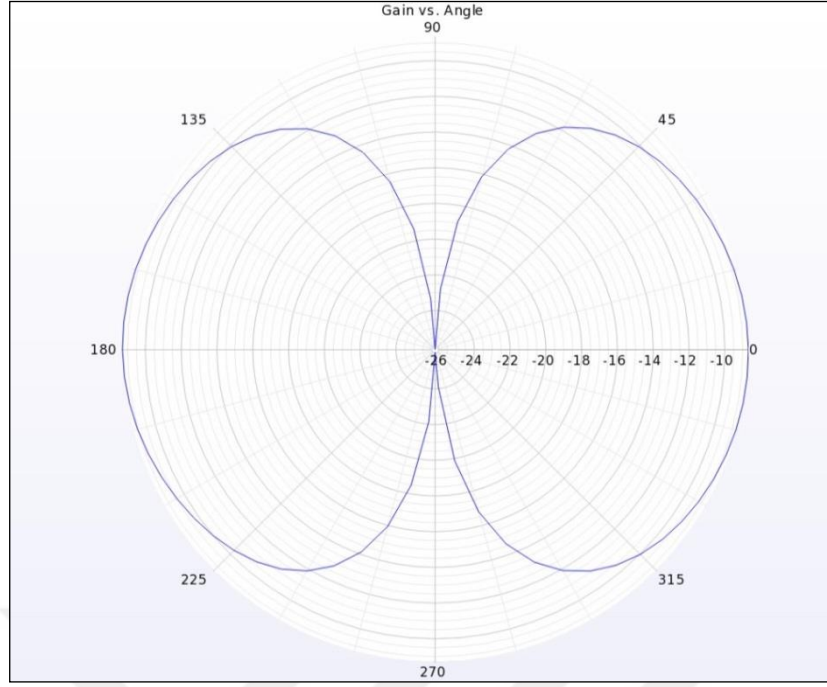
çoklu değerler için virgül kullanın.

TAMAM İptal

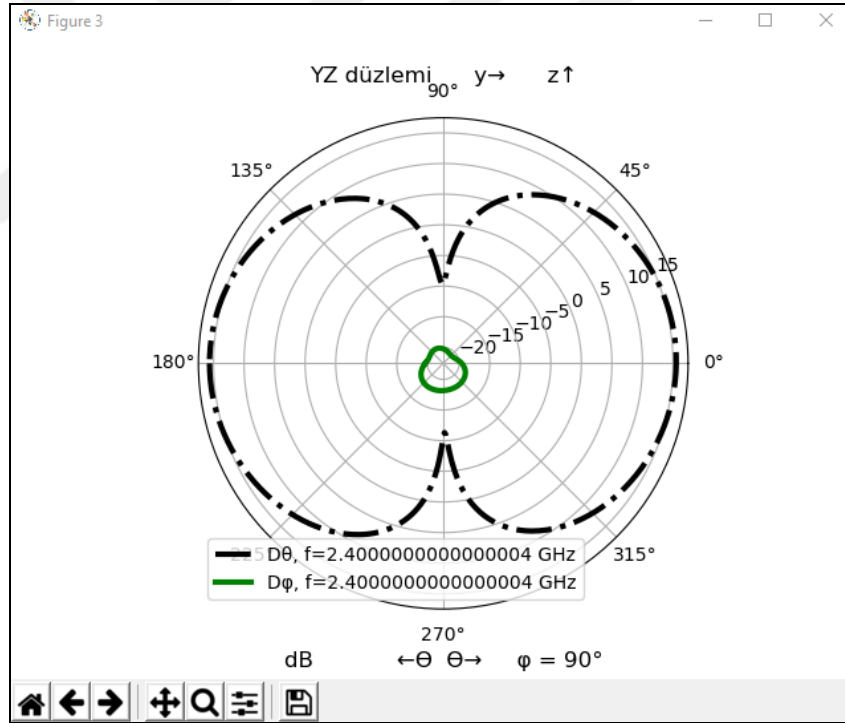
ZTBSF yöntemini kullanan ticari bir benzetim programında elde edilen S_{11} parametresi grafiği ve geliştirilen yazılımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği Şekil 4.66’da verilmiştir.



Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği Şekil 4.67’de ve geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği Şekil 4.68’de gösterilmiştir.



Şekil 4.67. Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği

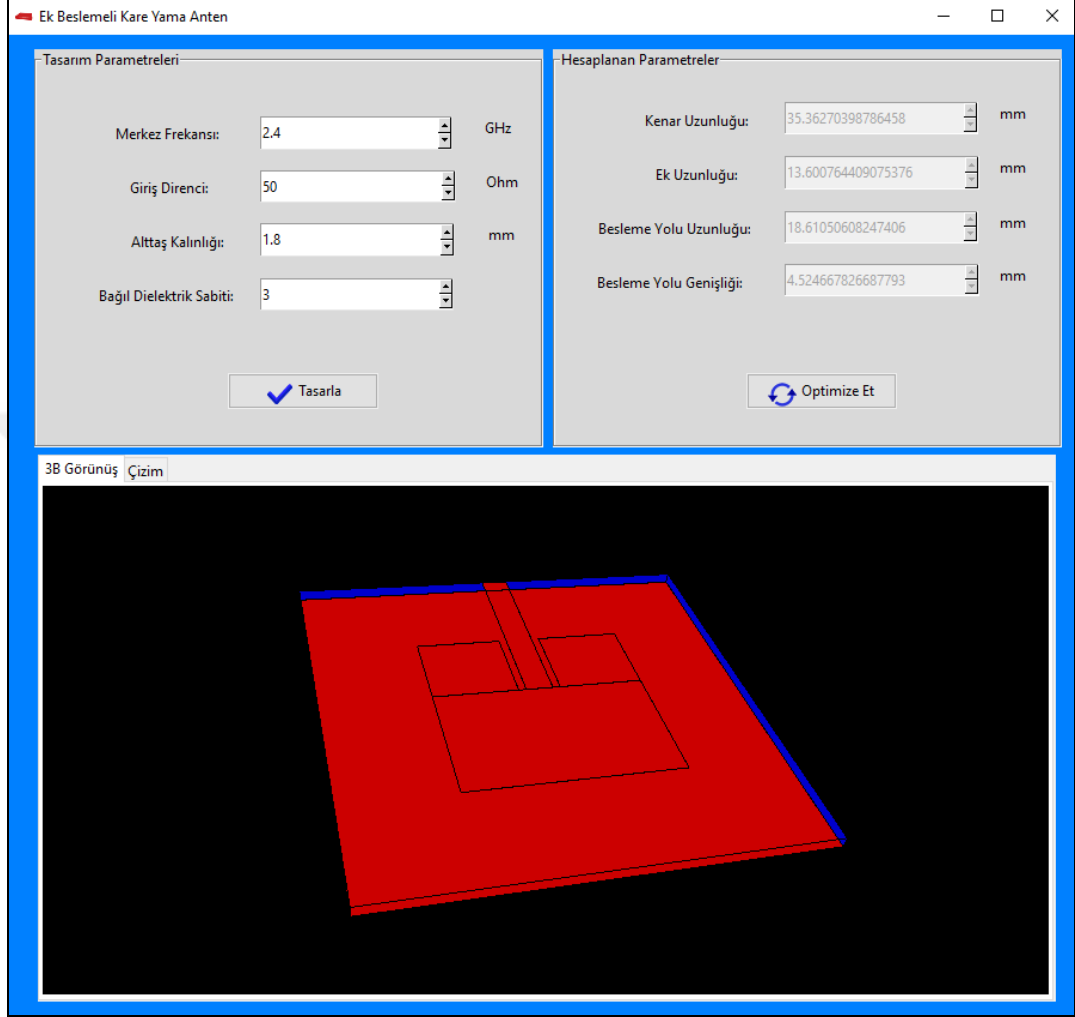


Şekil 4.68. Geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği

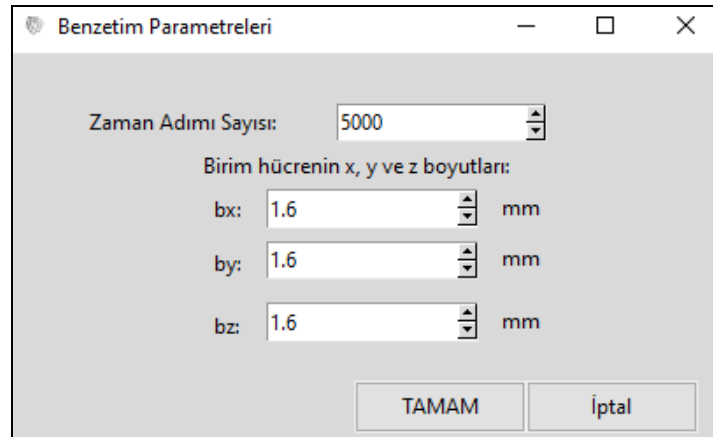
4.3.3. Mikroşerit Ek Beslemeli Kare Yama Antenin Tasarım ve Benzetiminin Yapılması

Merkez frekansı 2.4 GHz, alttaş kalınlığı 1.8mm, bağlı dielektrik sabiti 3, giriş direnci 50 ohm, yama kenarı 35.3627 mm olan ek beslemeli kare yama mikroşerit anten, ticari bir benzetim programında ve geliştirilen yazılımda benzetimi yapılmıştır.

Geliştirilen yazılımda tasarlanan anten Şekil 4.69’da verilmiştir. Tasarlanan antenin benzetimi için Şekil 4.70’de gösterilen benzetim parametreleri ve Şekil 4.71’de gösterilen S_{11} çizim frekans aralıkları girilmiştir.



Şekil 4.69. Geliştirilen yazılım ile çizilen mikroşerit ek beslemeli kare yama anten



Şekil 4.70. Antenin benzetim parametreleri

Çizim Frekans Aralıkları

Çiz:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıç: 1.7999999999999999 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 3 GHz

Hesapla:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıç: 0.00256943 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 14.0 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Adım: 0.00256943 GHz

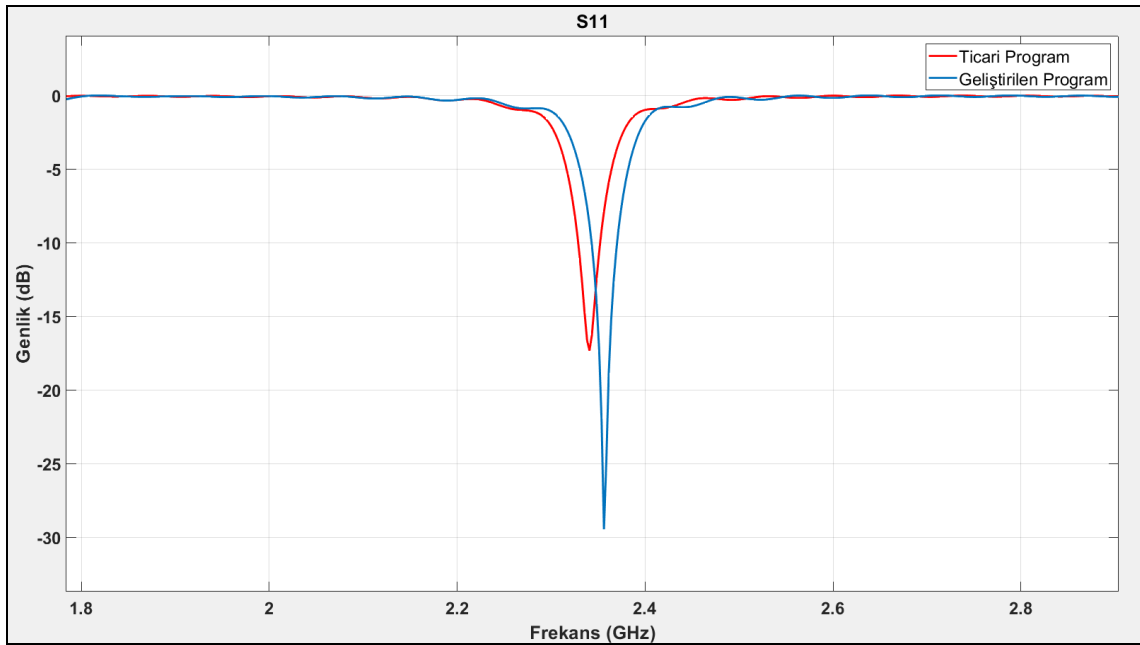
Tanımla: 2.4 GHz

çoklu değerler için virgül kullanın.

TAMAM İptal

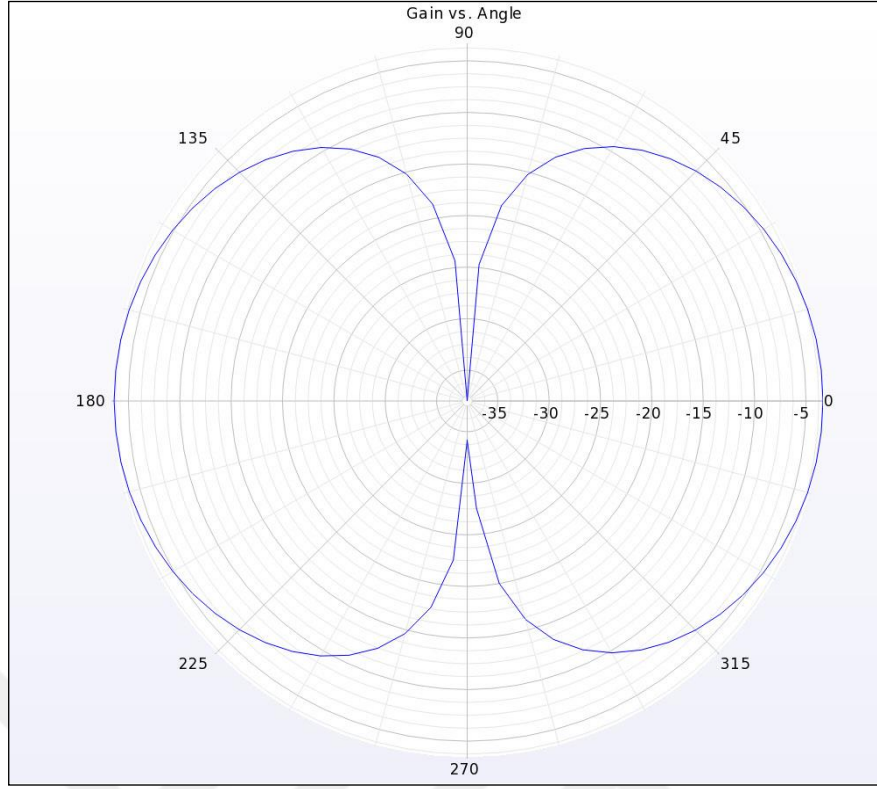
Şekil 4.71. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları

ZTBSF yöntemini kullanan ticari bir benzetim programda elde edilen S_{11} parametresi grafiği ve geliştirilen yazılımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği Şekil 4.72’de verilmiştir.

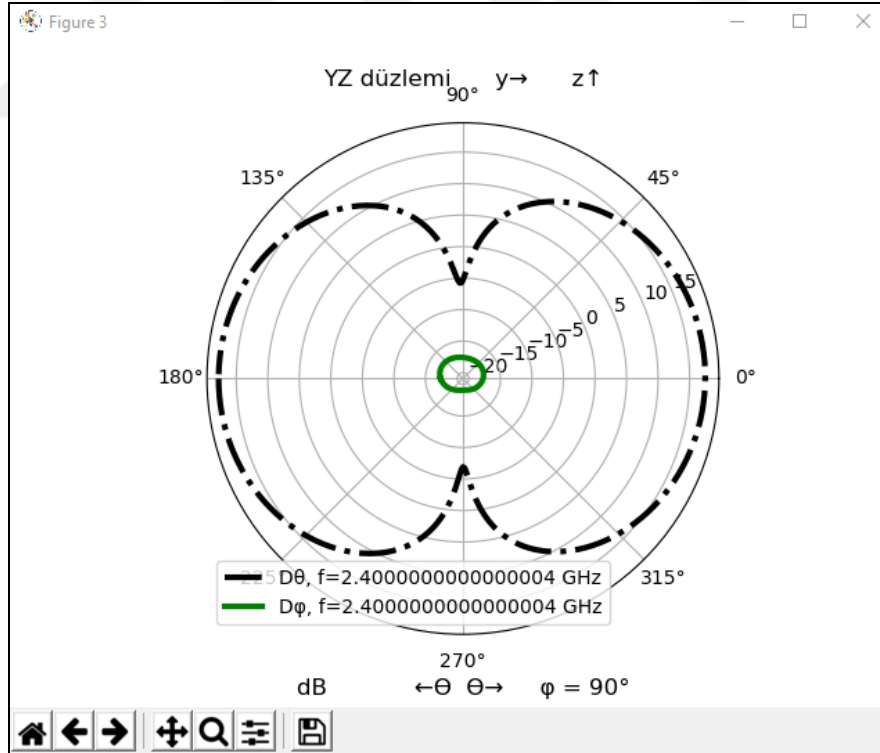


Şekil 4.72. Antenin S_{11} karakteristikleri

Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği Şekil 4.73’te ve geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği Şekil 4.74’te gösterilmiştir.



Şekil 4.73. Ticari programda elde edilen ışıma karakteristiği



Şekil 4.74. Geliştirilen yazılımda elde edilen ışıma karakteristiği

5. BÖLÜM

ANTEN TASARIM VE OPTİMİZASYON ÖRNEKLERİ

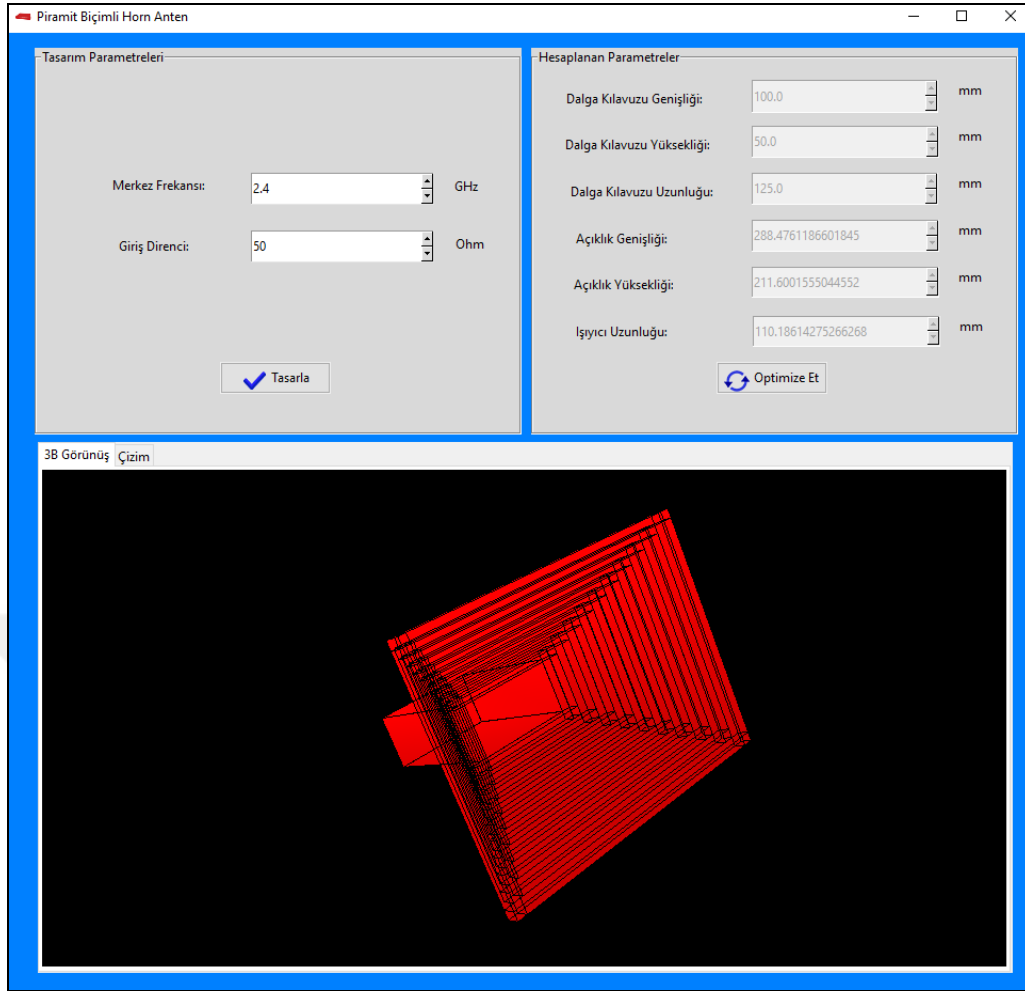
Geliştirilen anten tasarım ve optimizasyonu yazılımını test etmek amacıyla piramit biçimli horn anten, ek beslemeli dikdörtgensel yama mikroşerit anten, 1x2 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi anten ve baskılı katlanmış dipol anten tasarımları ve optimizasyonları yapılmıştır.

5.1. Piramit Biçimli Horn Anten Tasarımı ve Optimizasyonu

Anten tasarım penceresinde antenin merkez frekansı 2.4 GHz ve 50 ohm giriş direnci girilmiştir. Antenin tasarım penceresi Şekil 5.1’de verilmiştir. Antenin dalga kılavuzu genişliği 100 mm, dalga kılavuzu yüksekliği 50 mm, dalga kılavuzu uzunluğu 125 mm, açık genişliği 288.4761 mm, açık yüksekliği 211.6001 mm ve ışıyıcı uzunluğu 110.1861 mm olarak hesaplanmıştır. Tablo 5.1’de ise ANTDESVS yazılımında ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları verilmiştir.

Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları Şekil 5.2’de verilmiştir. Çizim için frekans tanım bölgesi başlangıç ve bitiş değerleri merkez frekansına göre otomatik olarak hesaplanmaktadır.

Anten benzetim parametleri ise Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Adım adım ve tahmin optimizasyonu için kullanılan benzetim zaman adımı sayısı 2000, Yee hücre boyutları ise 1.65 mm olarak girilmiştir. Hızlı tahmin optimizasyonu için zaman adımı ve hücre boyutları, anten boyutuna göre hesaplanmaktadır.



Şekil 5.1. Piramit biçimli horn anten tasarım penceresi

Tablo 5.1. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları

Uzunluk tipi	ANTDESVS programındaki anten uzunlukları	Ticari anten tasarım programındaki anten uzunlukları
Dalga kılavuzu genişliği	100 mm	98.06 mm
Dalga kılavuzu yüksekliği	50 mm	49.03 mm
Dalga kılavuzu uzunluğu	125 mm	124.9 mm
Açık genişliği	288.4761 mm	288.5 mm
Açık yüksekliği	211.6001 mm	211.3 mm
Işıyıcı uzunluğu	110.1861 mm	111.1 mm

Çizim Frekans Aralıkları

Çiz:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıç: 1.9 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 2.9 GHz

Hesapla:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıç: 0.02 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 14.0 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Adım: 0.02 GHz

Tanımla: 2.4 GHz

çoklu değerler için virgül kullanın.

TAMAM İptal

Şekil 5.2. Anten S_{11} çizim frekans aralıkları

Benzetim Parametreleri

Zaman Adımı Sayısı: 2000

Birim hücrenin x, y ve z boyutları:

bx: 1.65 mm

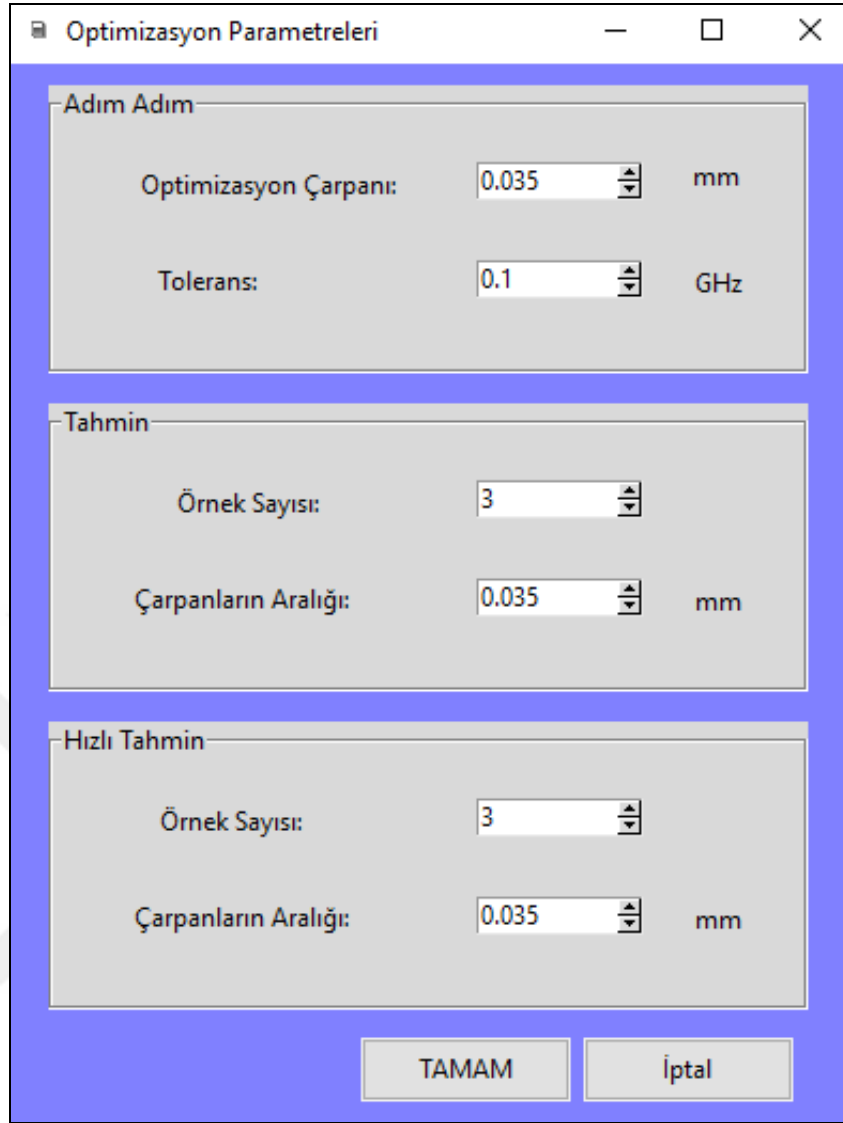
by: 1.65 mm

bz: 1.65 mm

TAMAM İptal

Şekil 5.3. Anten benzetim parametreleri

Anten için optimizasyon parametreleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Adım adım optimizasyonu için adımların arasını belirleyen optimizasyon çarpanı 0.035 mm, tolerans aralığı 0.1 GHz girilmiştir. Tahmin ve hızlı tahmin optimizasyon algoritması için ise alınan örnek sayısı 3, çarpanların aralığı 0.035 mm girilmiştir.



Optimizasyon Parametreleri

Adım Adım

Optimizasyon Çarpanı: 0.035 mm

Tolerans: 0.1 GHz

Tahmin

Örnek Sayısı: 3

Çarpanların Aralığı: 0.035 mm

Hızlı Tahmin

Örnek Sayısı: 3

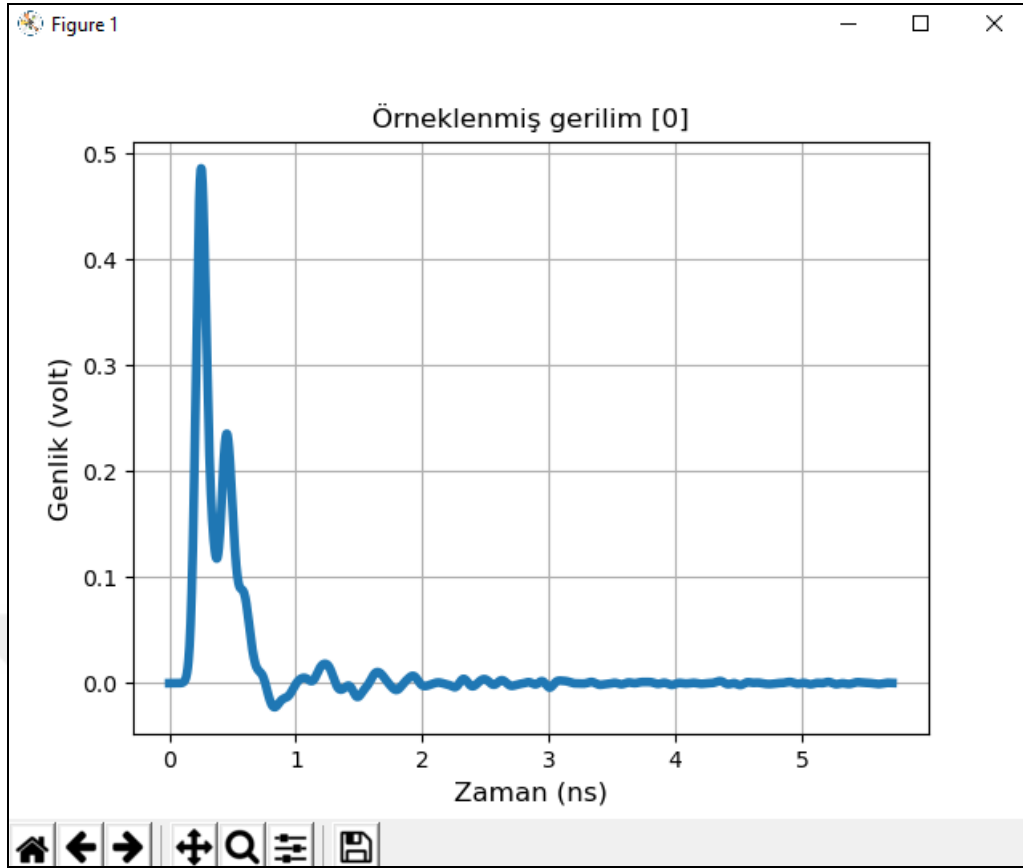
Çarpanların Aralığı: 0.035 mm

TAMAM İptal

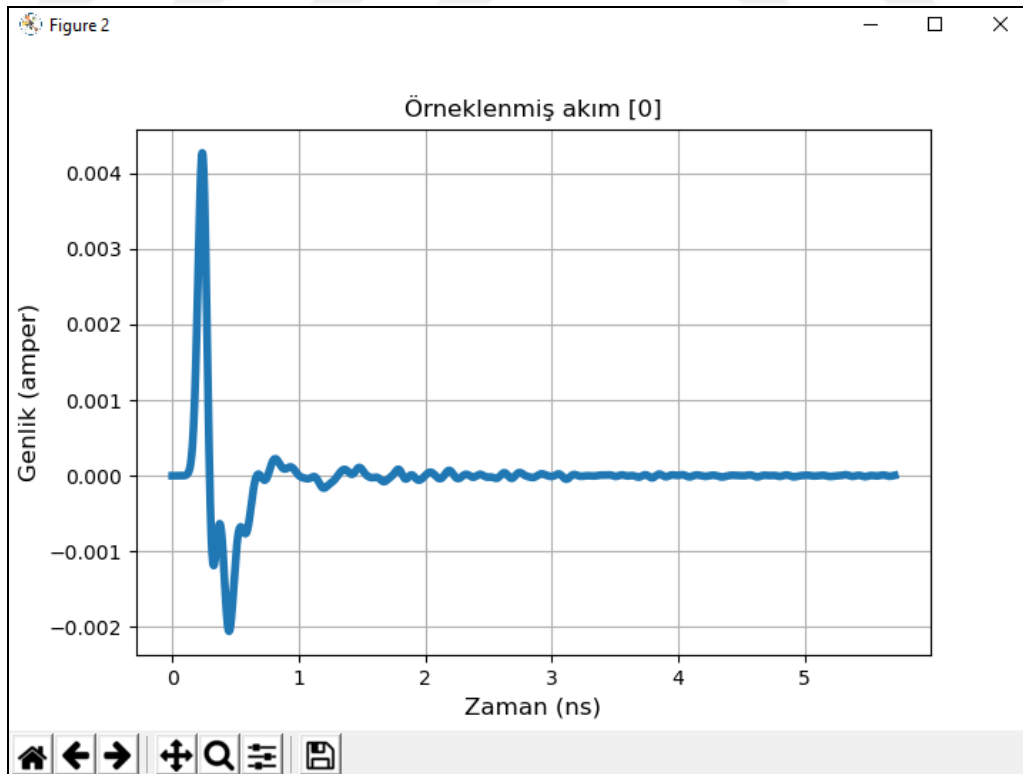
Şekil 5.4. Anten optimizasyon parametreleri

5.1.1. Antenin Adım Adım Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

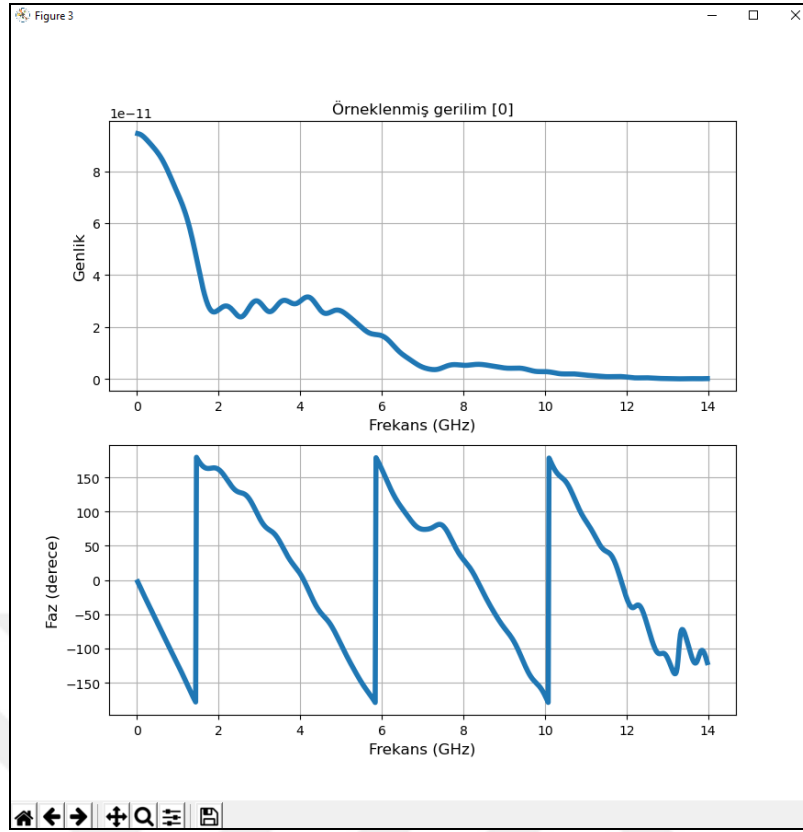
İlk olarak antenin optimizasyonu için adım adım optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi anten tasarım penceresinde hesaplanan parametreleri kullanarak ilk benzetim işlemine başlamaktadır. Benzetim işlemi tamamlandığı zaman, zaman tanım bölgesi ve frekans tanım bölgesine ait grafikler kullanıcıya gösterilmektedir. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği Şekil 5.5'te, zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği Şekil 5.6'da, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafiği Şekil 5.7'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafiği Şekil 5.8'de, frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı grafiği Şekil 5.9'da verilmiştir.



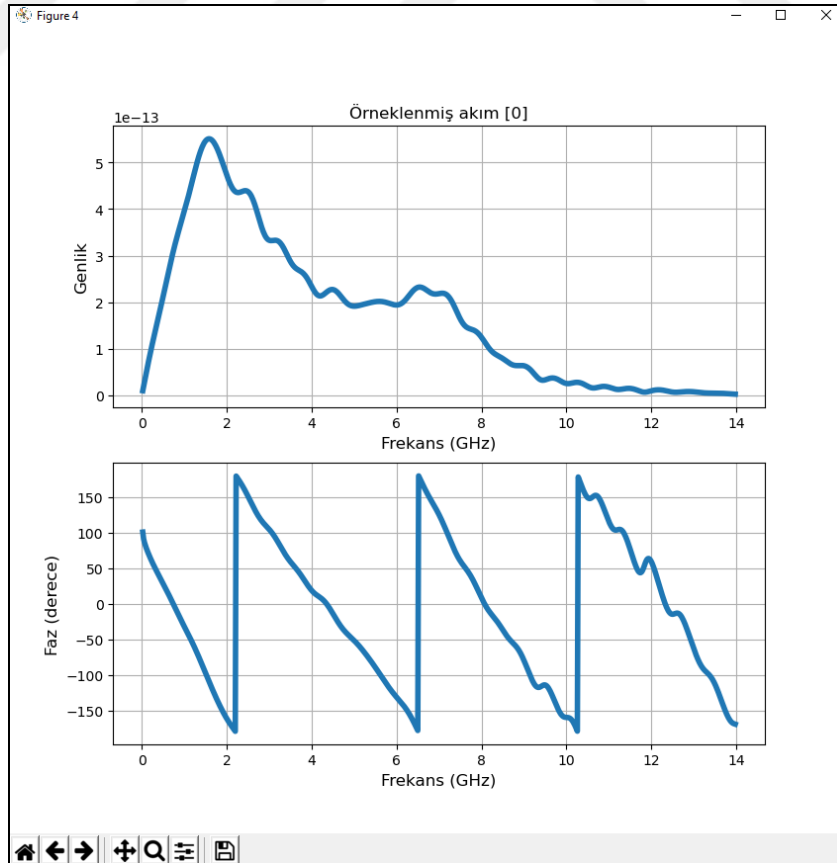
Şekil 5.5. Zaman tanım bölgesinde örnekleme gerilim penceresi



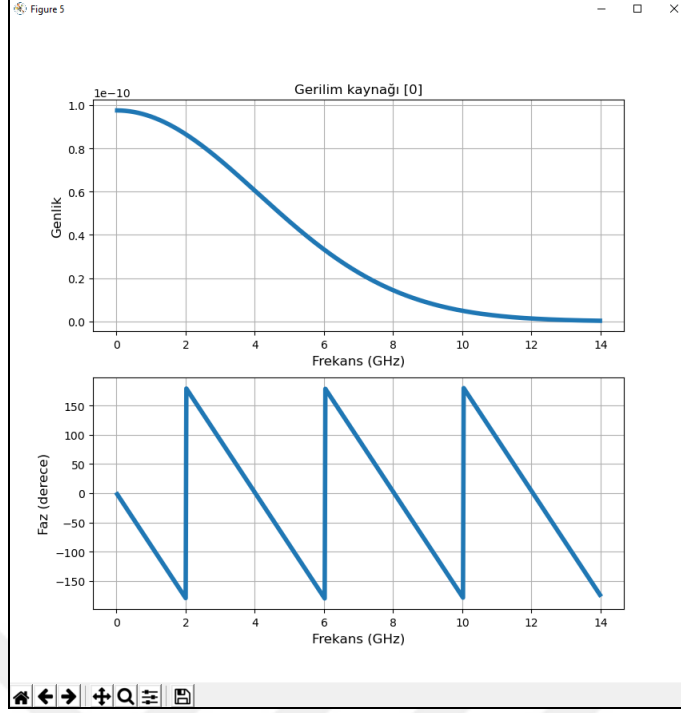
Şekil 5.6. Zaman tanım bölgesi örnekleme akım grafiği



Şekil 5.7. Frekans tanım bölgesindeki örnekleme gerilim genlik ve faz grafiği

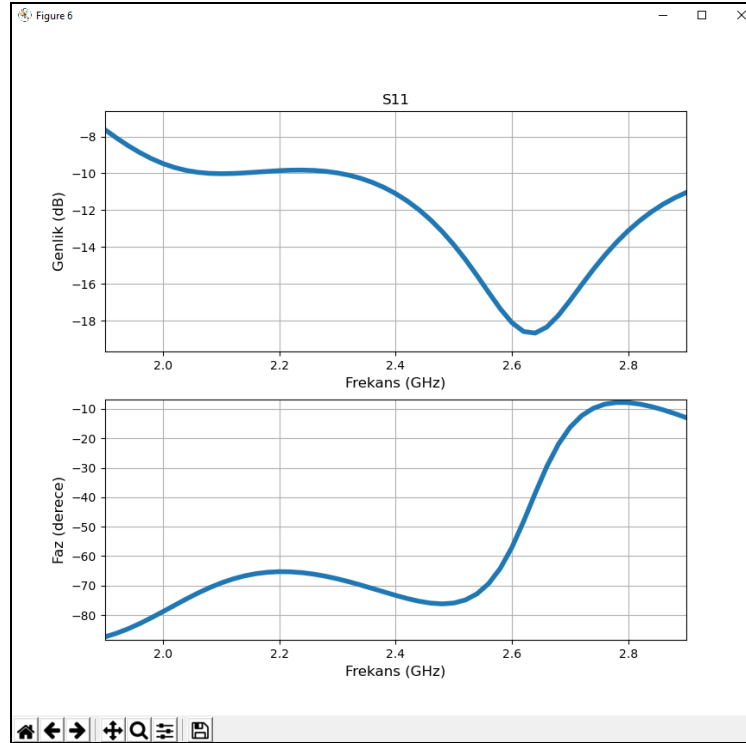


Şekil 5.8. Frekans tanım bölgesi örnekleme akım genlik ve faz grafiği

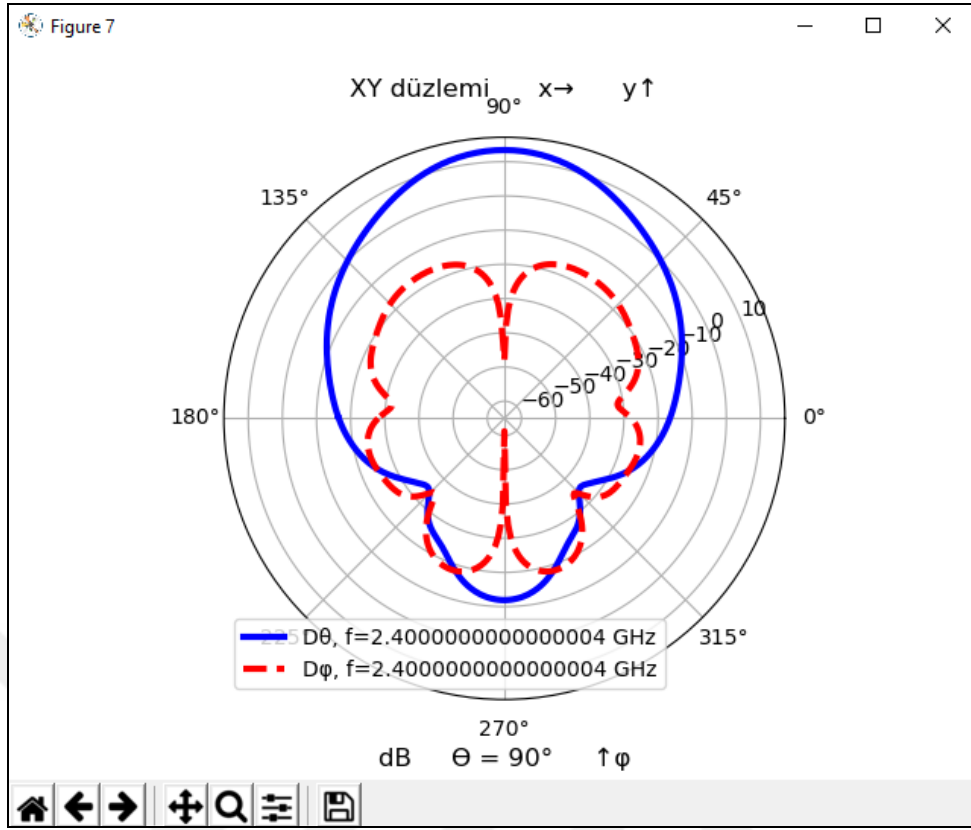


Şekil 5.9. Frekans tanım bölgesi gerilim kaynağı genlik ve faz grafiği

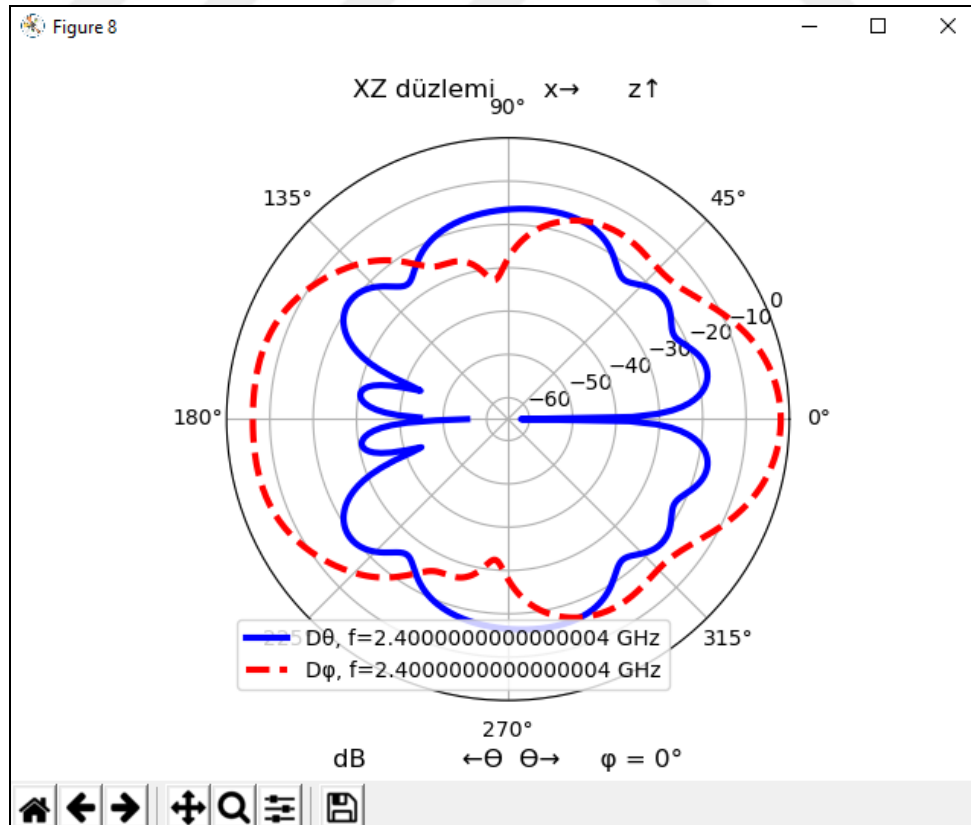
S_{11} parametresinin genlik ve faz grafikleri Şekil 5.10'da, XY düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.11'de, XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.12'de ve YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



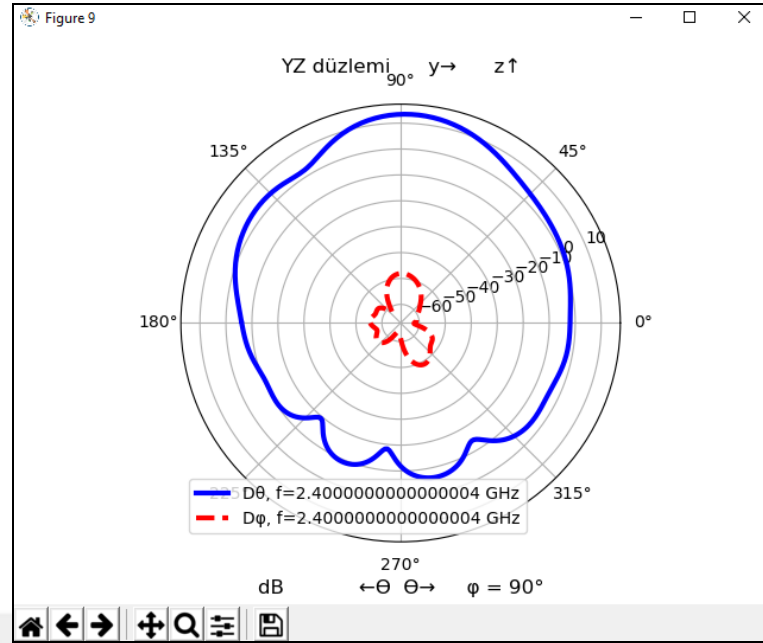
Şekil 5.10. S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



Şekil 5.11. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği

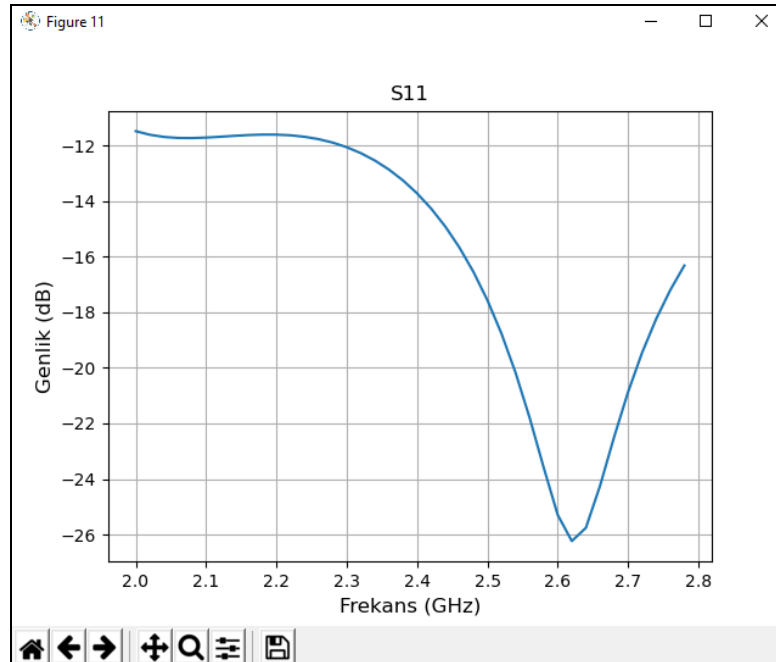


Şekil 5.12. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

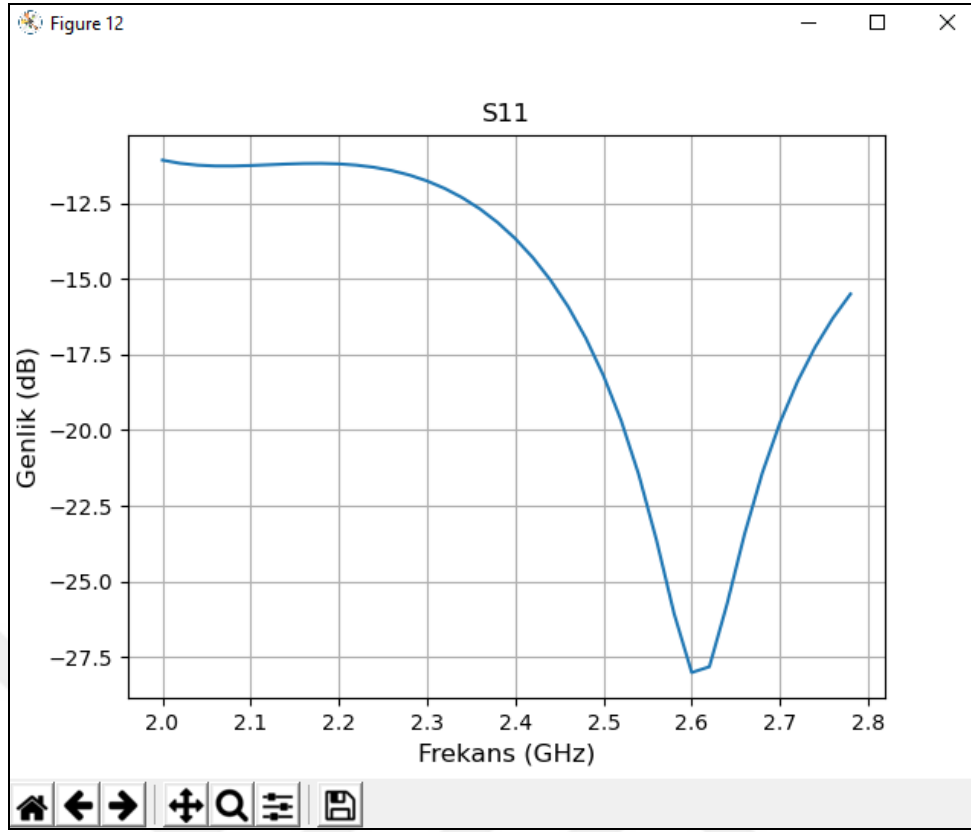


Şekil 5.13. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

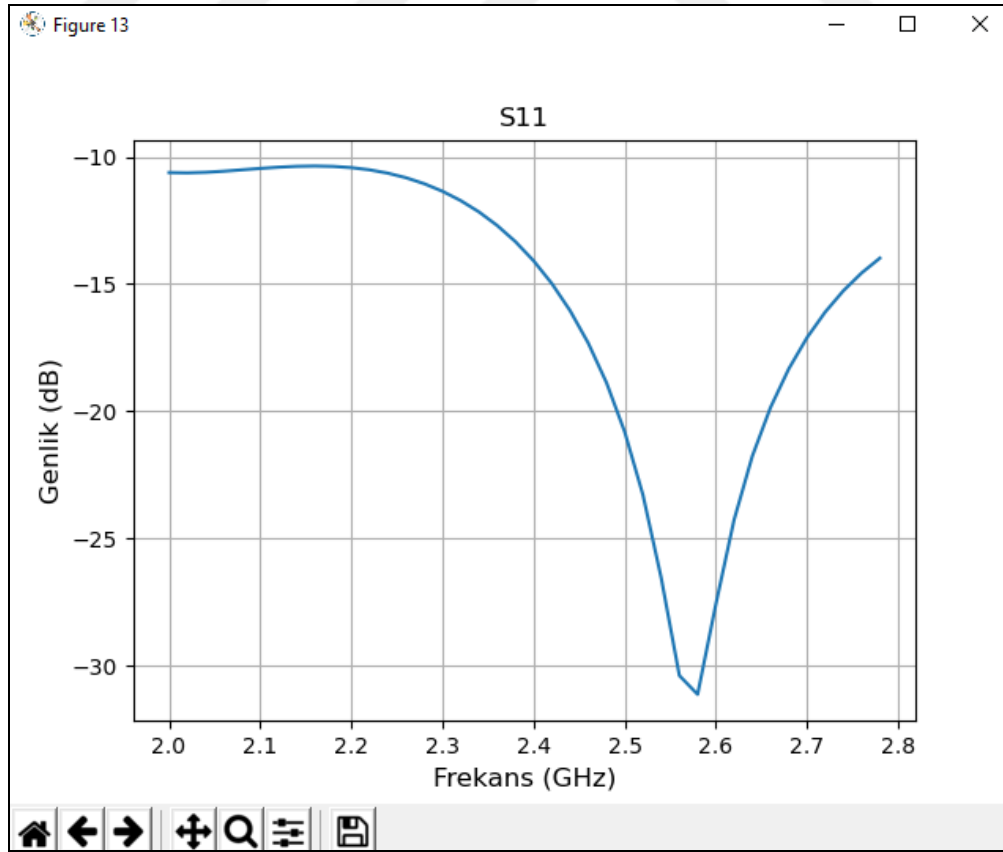
Hesaplanan değerler ile benzetim işleminden sonra, adım adım optimizasyon algoritması optimizasyonu 6 adımda tamamlamıştır. Birinci adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.14'te, ikinci adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.15'te, üçüncü adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.16'da, dördüncü adım için S_{11} parametre grafiği Şekil 5.17'de ve son adım olan beşinci adım S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



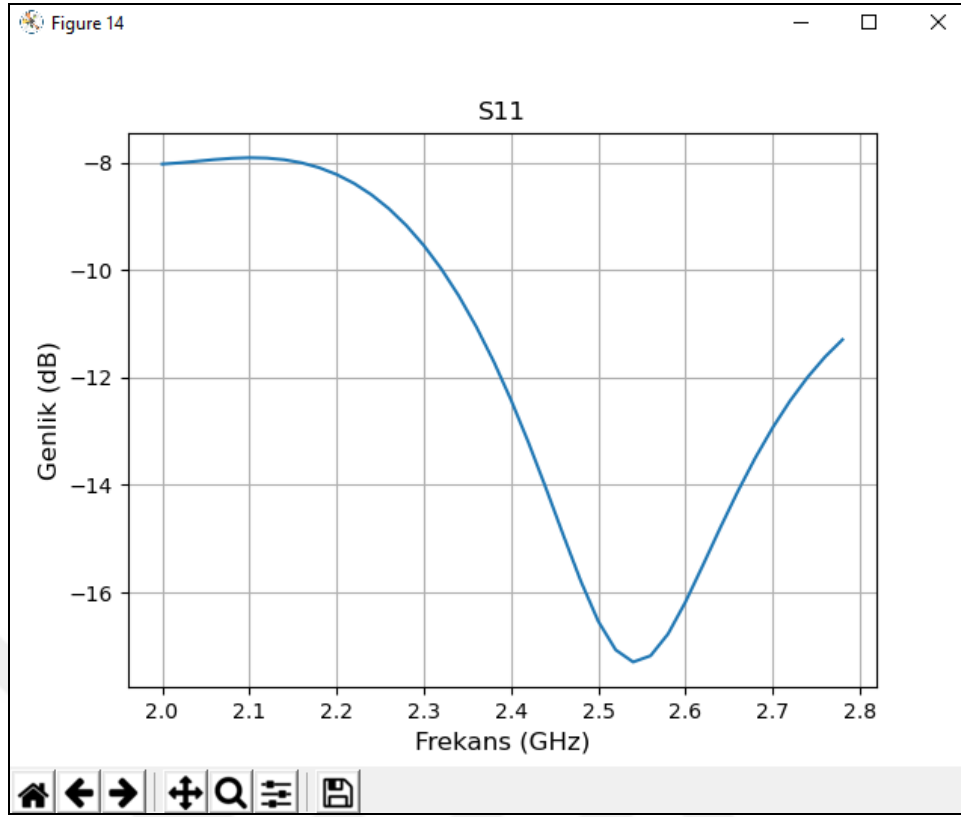
Şekil 5.14. Birinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği



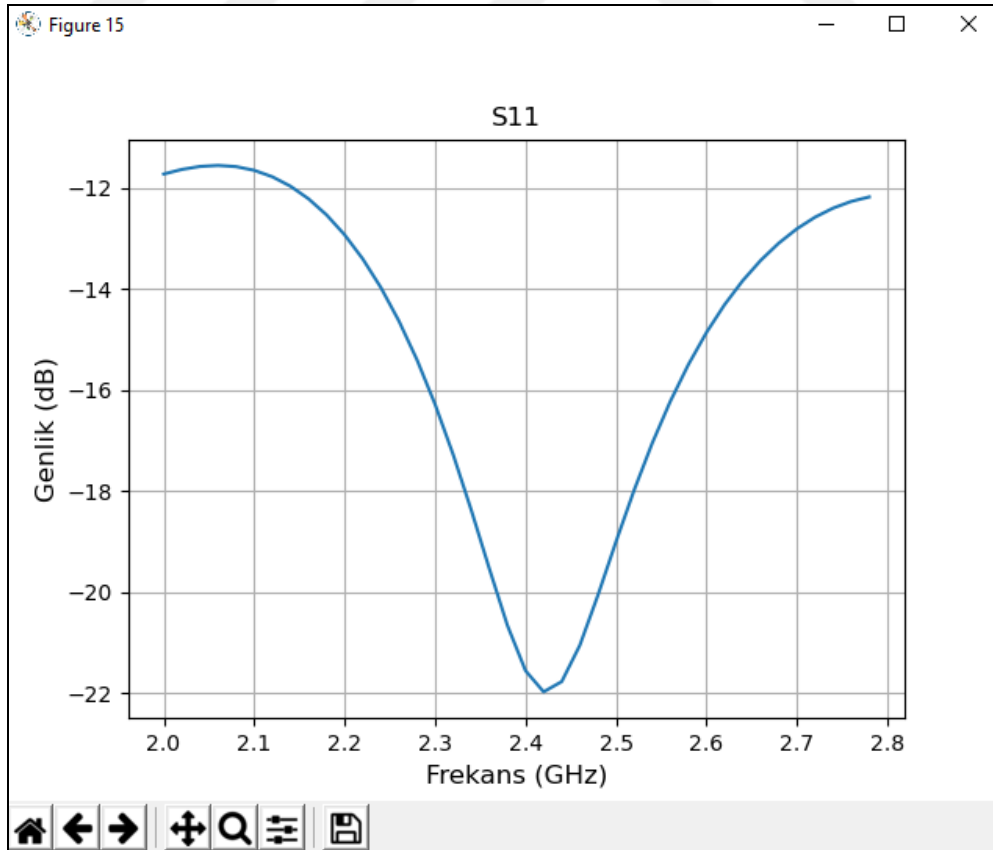
Şekil 5.15. İkinci adımda elde edilen S₁₁ parametresi grafiği



Şekil 5.16. Üçüncü adımda elde edilen S₁₁ parametresi grafiği

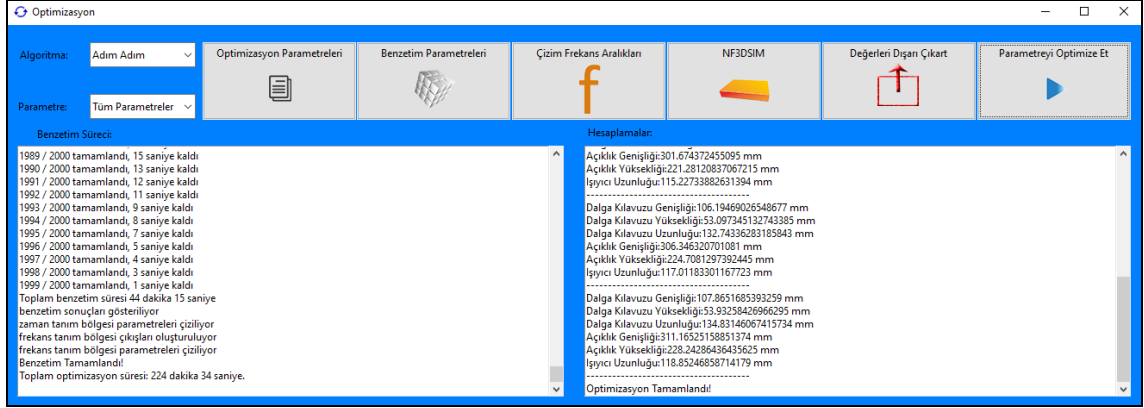


Şekil 5.17. Dördüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği



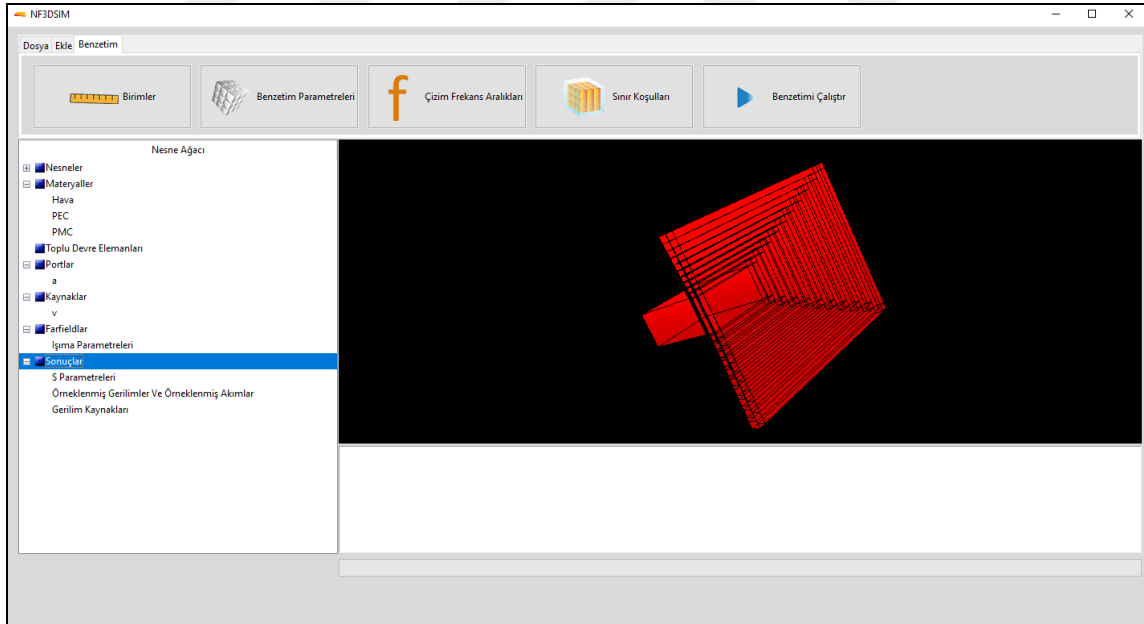
Şekil 5.18. Beşinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği

Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.19’da verilmiştir.



Şekil 5.19. Adım adım optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi

Optimizasyondan sonra oluşan antenin son hali optimizasyon penceresindeki NF3DSIM butonuna basıldıktan sonra görülebilmektedir. Anten NF3DSIM programına otomatik olarak aktarılmaktadır. Şekil 5.20’de optimizasyonu yapılan antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü verilmiştir.



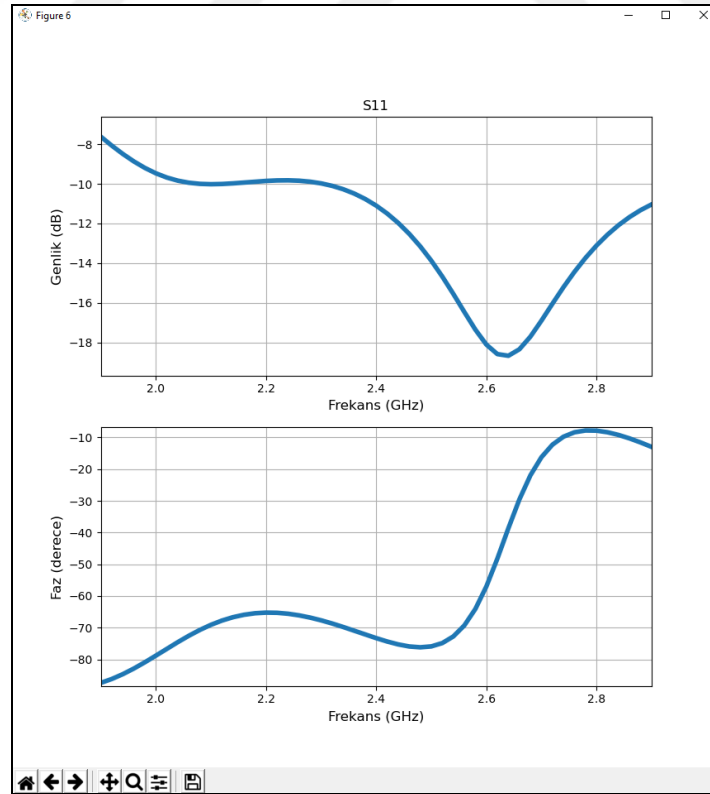
Şekil 5.20. Adım adım optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

5.1.2. Antenin Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

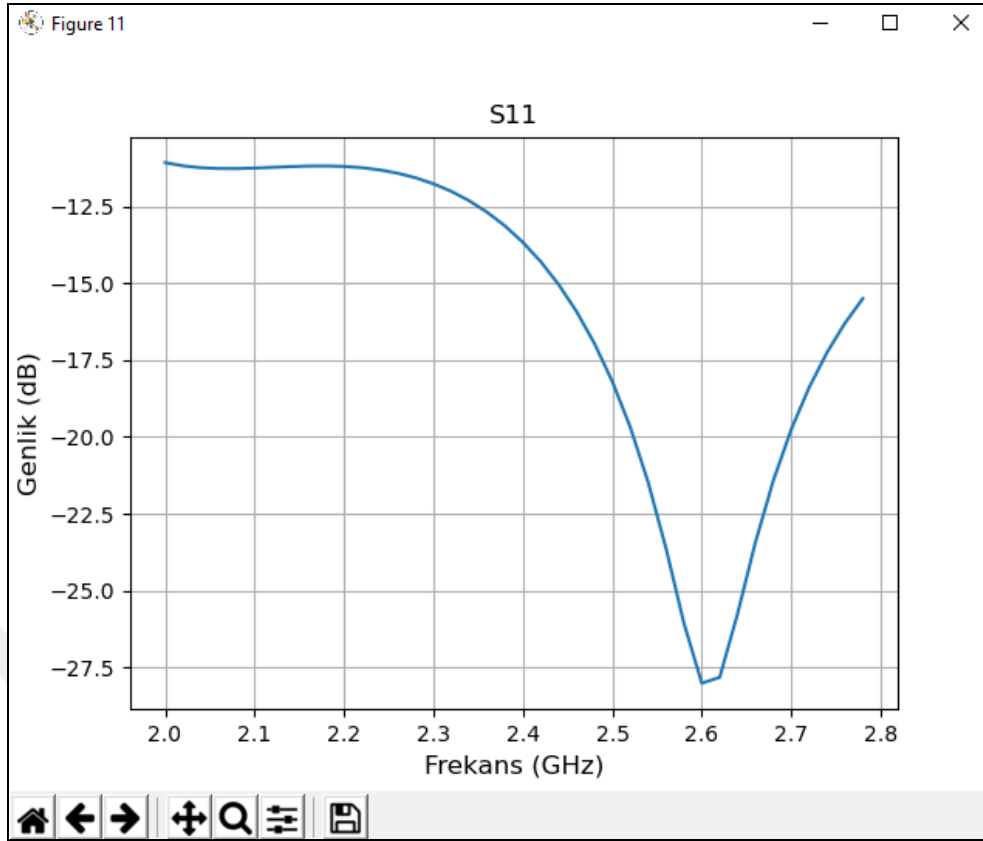
Test edilen anten için optimizasyon penceresinde, optimizasyon algoritması olarak tahmin optimizasyonu seçilmiştir. Tahmin optimizasyon algoritmasında tahmin

işlemi için örnek değerler gerekmektedir. İlk örnek anten tasarım penceresinde hesaplanan parametreler kullanarak yapılan benzetim ile elde edilmektedir. Bu benzetim bittiğinde, zaman tanım bölgesi ve frekans tanım bölgesi ait grafikleri kullanıcıya gösterilmektedir. Zaman adımı sayısı ve Yee hücre boyutları adım adım optimizasyon algoritması ile aynı olduğu ve ilk benzetimi anten tasarım penceresinde hesaplanan parametrelerle yaptığı için, ilk benzetim grafikleri adım adım optimizasyon algoritması ile aynı olmaktadır.

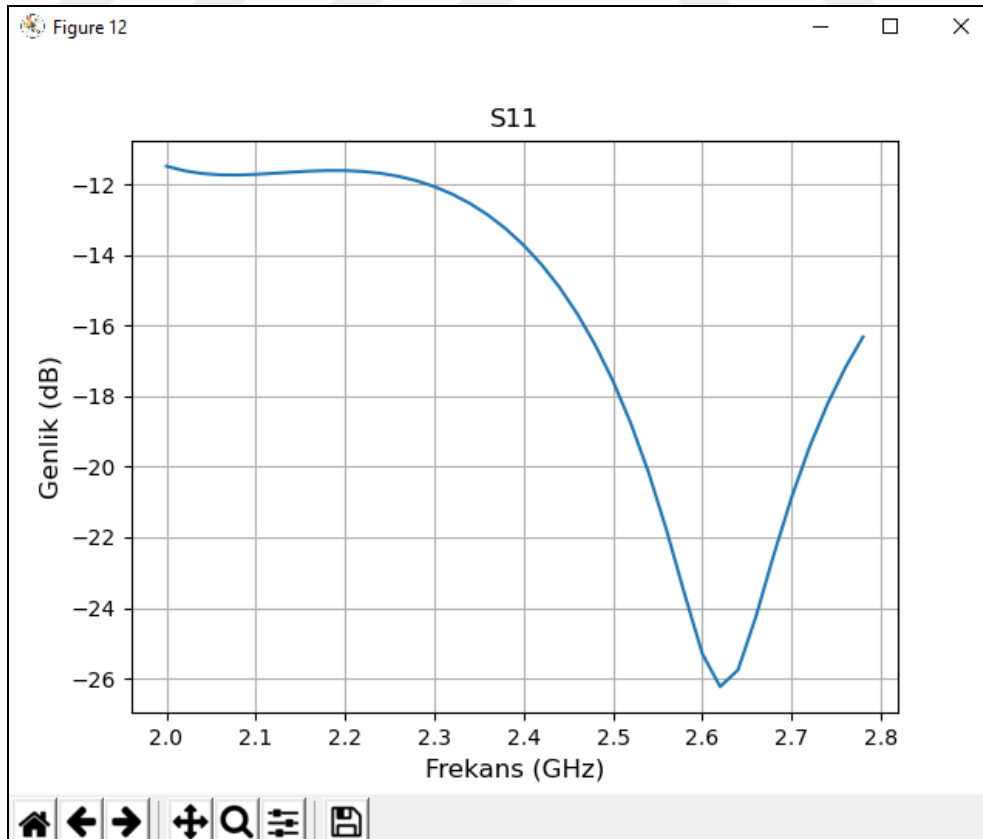
Benzetim yapıp ilk örnek alındıktan sonra, optimizasyon parametreleri penceresinde girilen tahmin simülasyonu örnek sayısı kadar benzetim yapıp, diğer örnekler alınmaktadır. Bu anten için örnek sayısı 3 girilmiştir. Örnekler alındıktan sonra Sklearn kütüphanesi ile örnekler baz alınarak tahmin değeri elde edilmekte ve bu değerle son benzetim yapılmaktadır. Hesaplanan değer ile yapılan, ilk benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri Şekil 5.21’de, ilk örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.22’de, ikinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.23’te, üçüncü örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.24’te, tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.25’te gösterilmiştir.



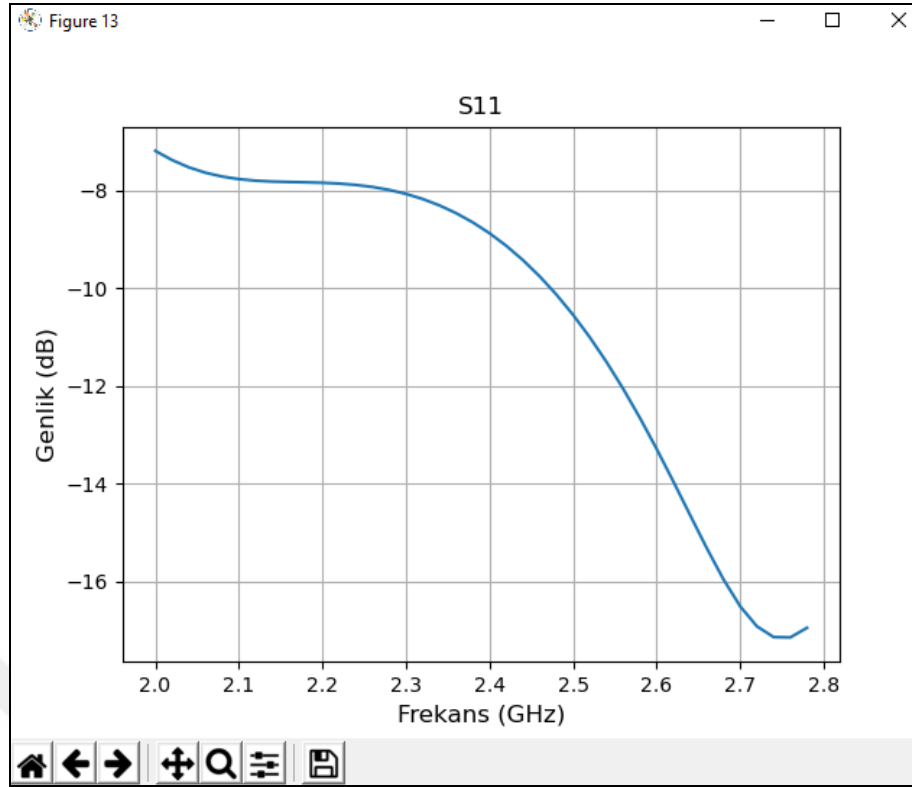
Şekil 5.21. İlk benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



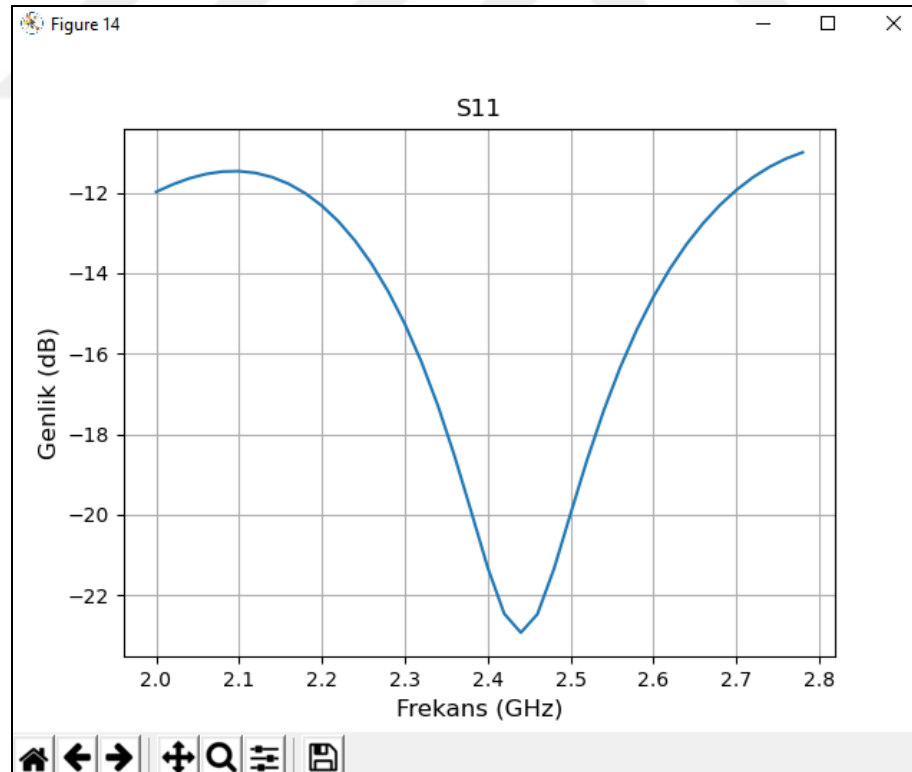
Şekil 5.22. İlk örnek olan S₁₁ parametresi grafiği



Şekil 5.23. İkinci örnek olan S₁₁ parametresi grafiği

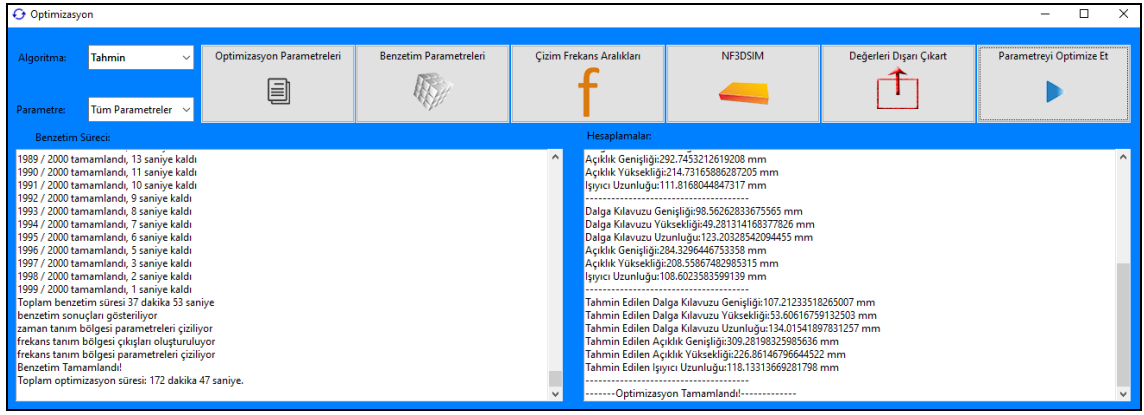


Şekil 5.24. Üçüncü örnek olan S₁₁ parametresi grafiği



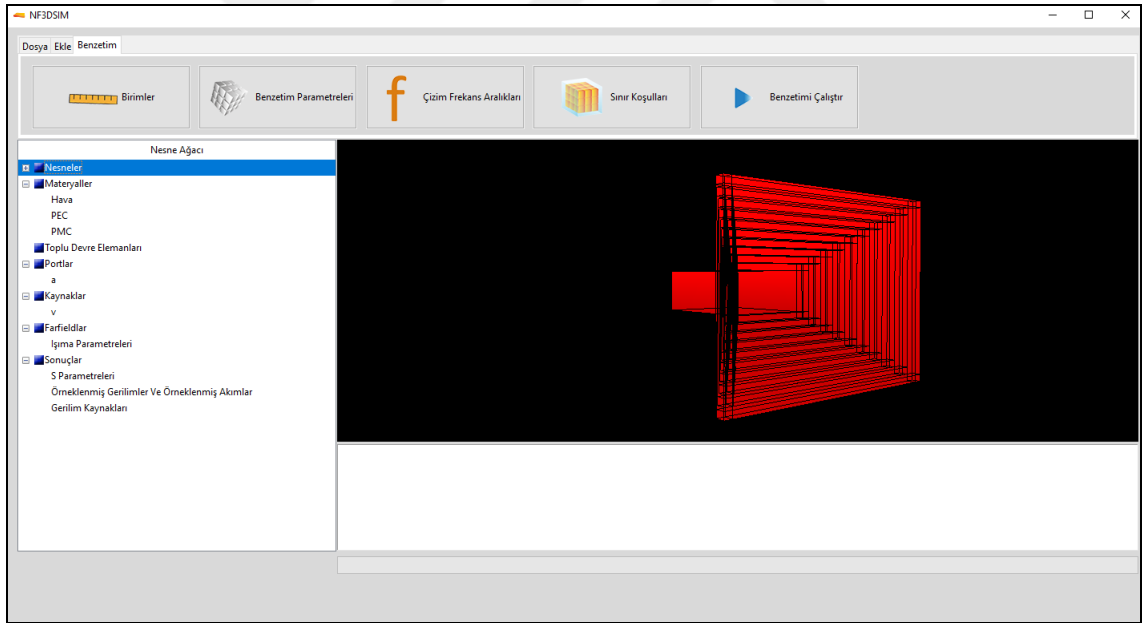
Şekil 5.25. Tahmin edilen değer için S₁₁ parametresi grafiği

Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.26'da verilmiştir.



Şekil 5.26. Tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi

Optimizasyondan sonra antenin son hali optimizasyon penceresindeki NF3DSIM butonuna basıldıktan sonra görülebilmektedir. Antenin tasarımı NF3DSIM programına otomatik olarak aktarılmaktadır. Şekil 5.27’de optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü verilmiştir. Üzerinde istenilen değişiklik yapılabilmektedir.

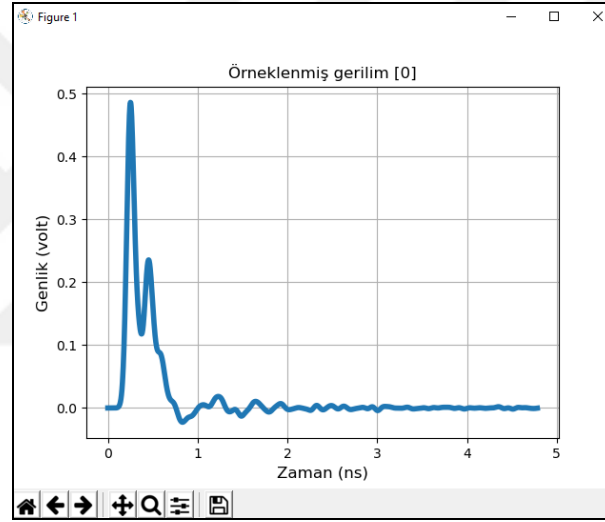


Şekil 5.27. Tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

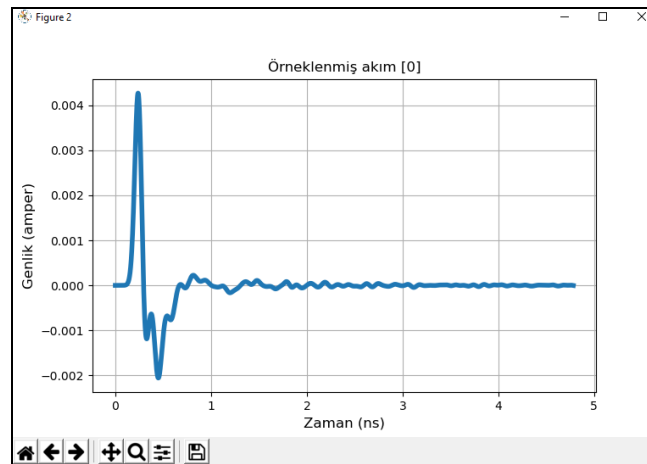
5.1.3. Antenin Hızlı Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

Test edilen anten için optimizasyon penceresinde hızlı tahmin optimizasyonu seçilmiştir. Hızlı tahmin optimizasyon algoritmasında Yee hücre boyutu ve zaman adımı sayısı antenin boyutuna göre hesaplanmaktadır. Ayrıca optimizasyonda tahmin işlemi

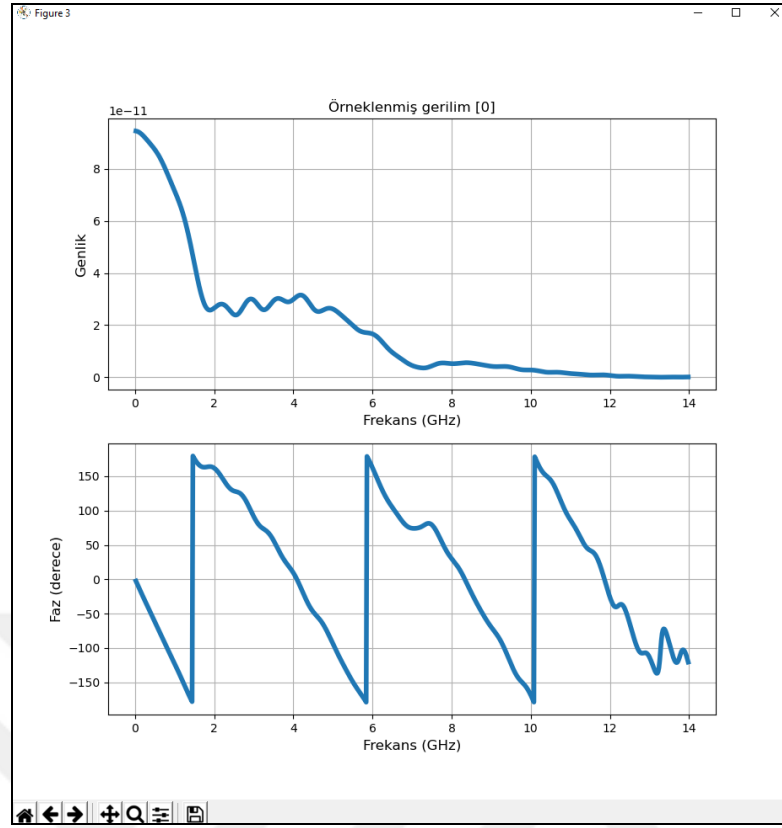
için örnek değerler gerekmektedir. Hızlı tahmin algoritmasının makine öğrenmesi algoritması ile tahmin yapması, zaman adımını ve Yee hücre boyutunu hesaplaması sayesinde hızlı tahmin algoritması diğer optimizasyon algoritmalarına göre daha hızlı olmaktadır. İlk örnek anten tasarım penceresinde hesaplanan parametreler kullanarak yapılan benzetim ile elde edilmektedir, benzetim sonuçlandığında zaman tanım bölgesi ve frekans tanım bölgesine ait grafikler kullanıcıya gösterilmektedir. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği Şekil 5.28'de, zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği Şekil 5.29'da, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafiği Şekil 5.30'da, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafiği Şekil 5.31'de, frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafiği Şekil 5.32'de verilmiştir.



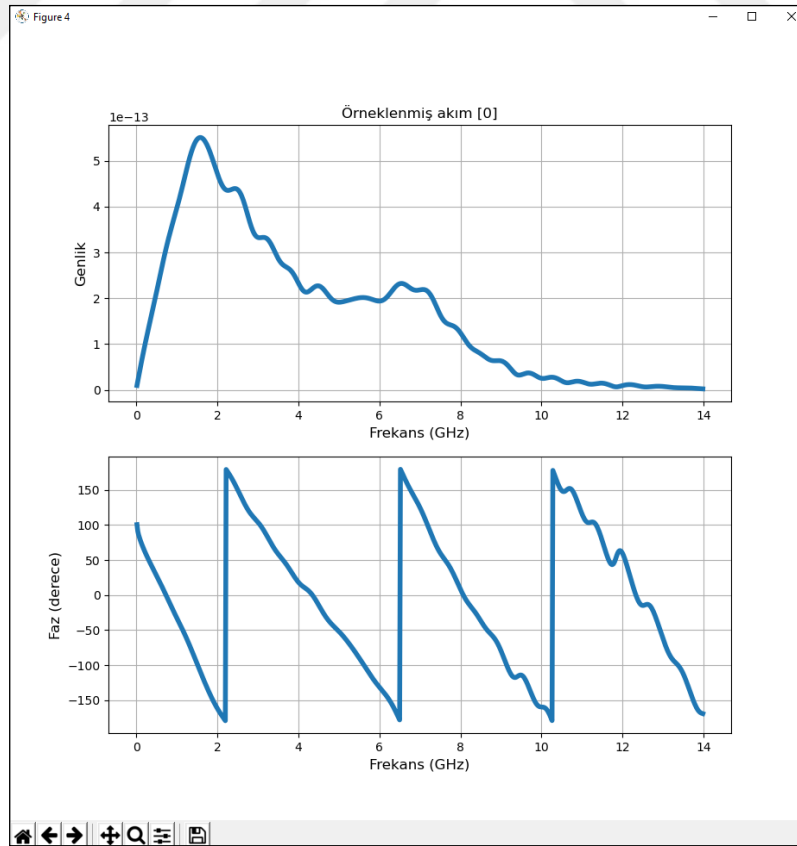
Şekil 5.28. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği



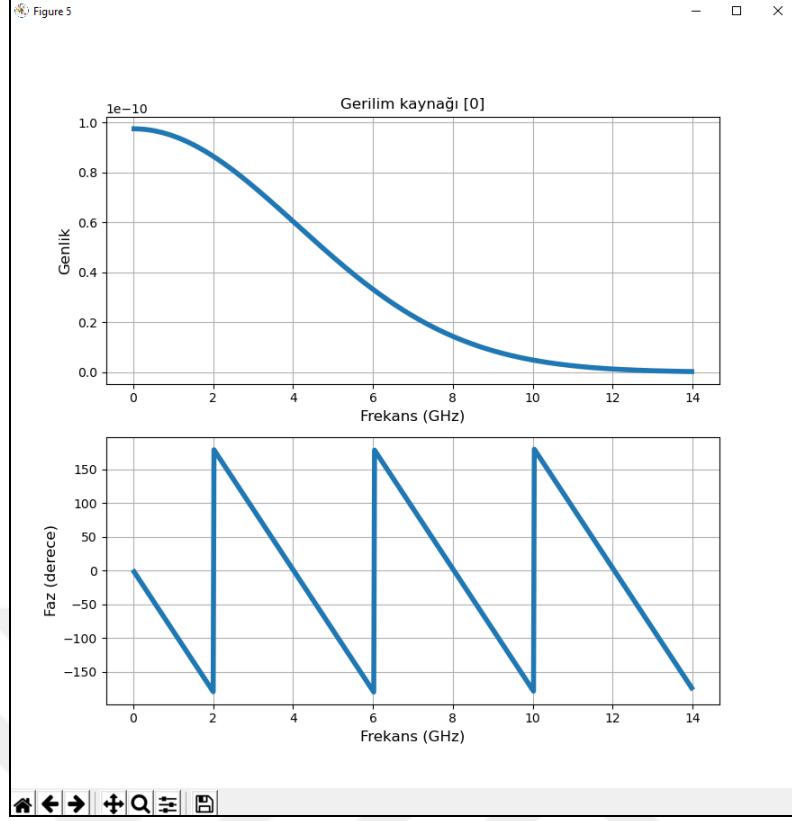
Şekil 5.29. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği



Şekil 5.30. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafiği

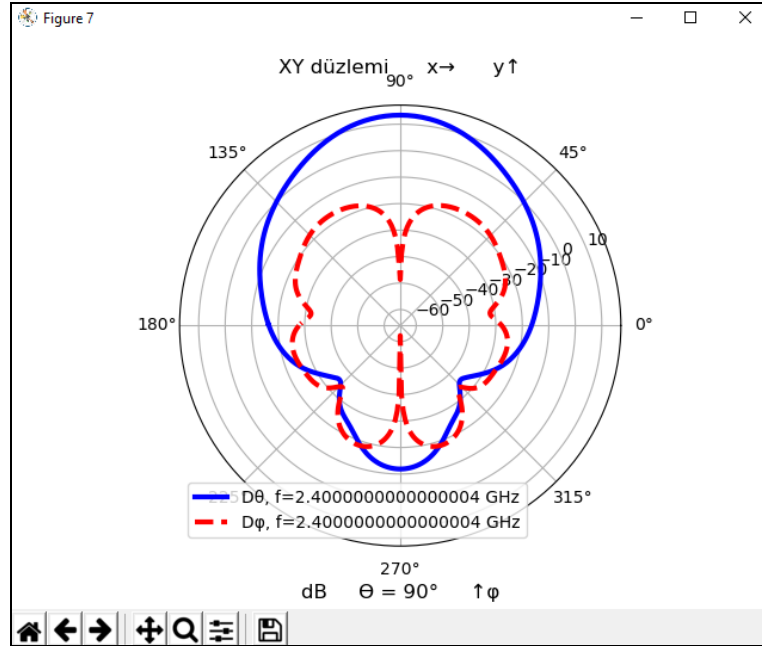


Şekil 5.31. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafiği

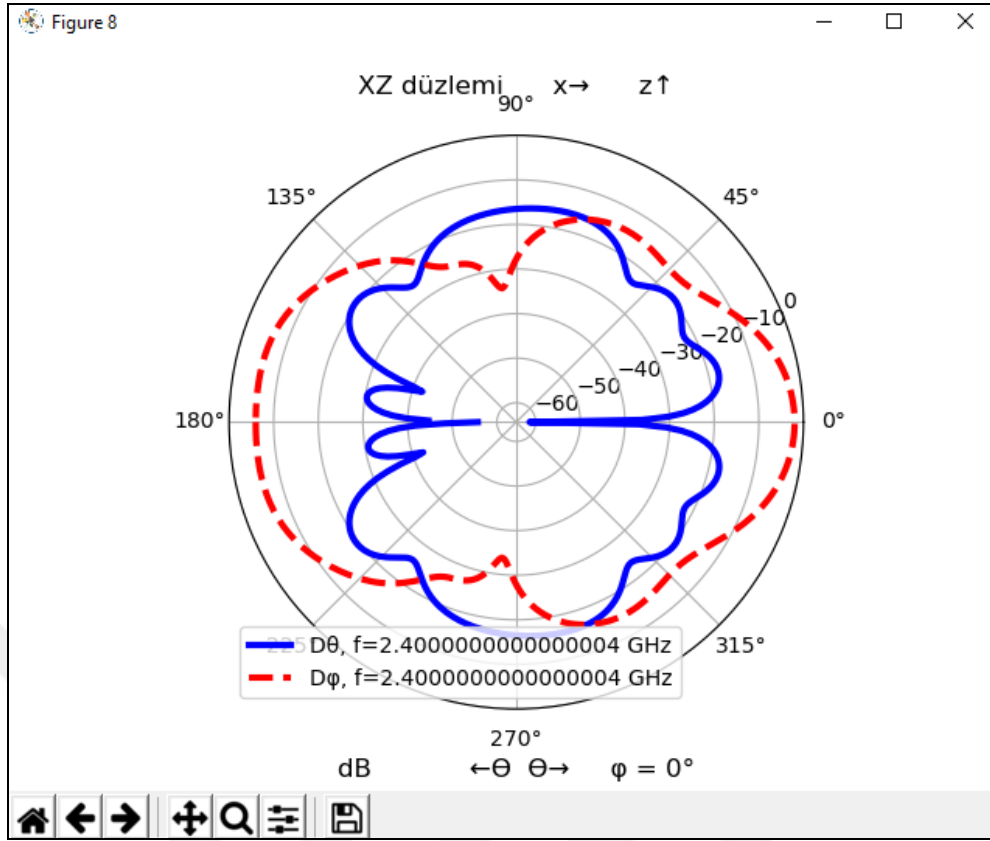


Şekil 5.32. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafiği

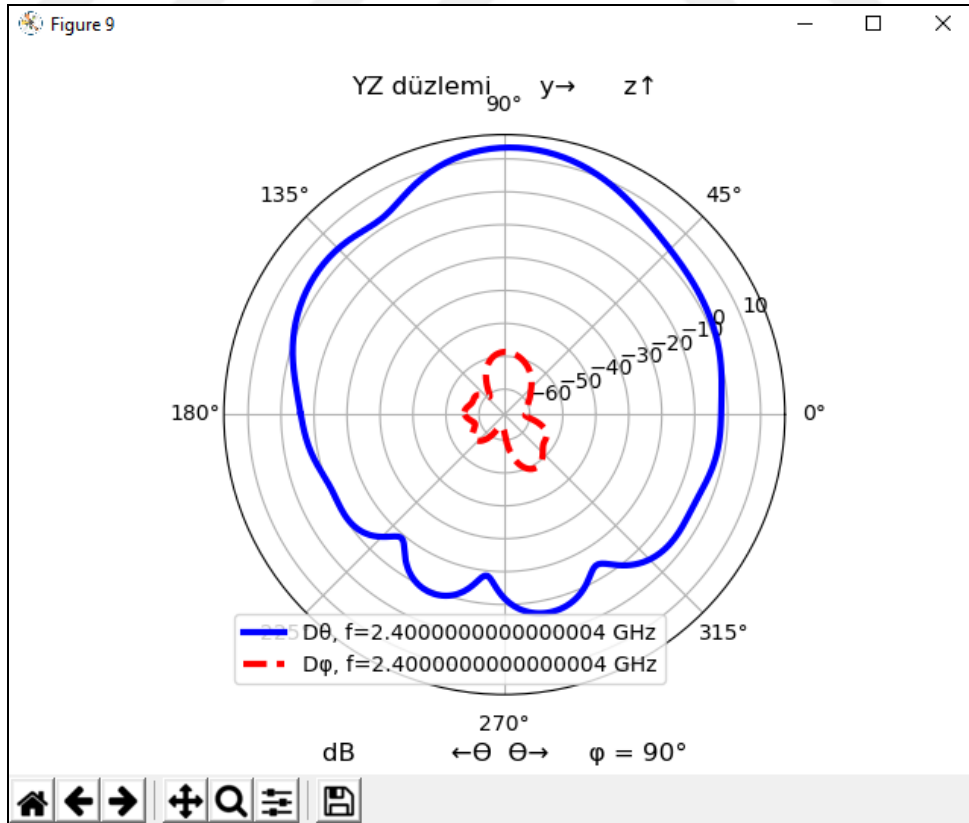
XY düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.33'te, XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.34'te ve YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.35'te gösterilmiştir.



Şekil 5.33. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği



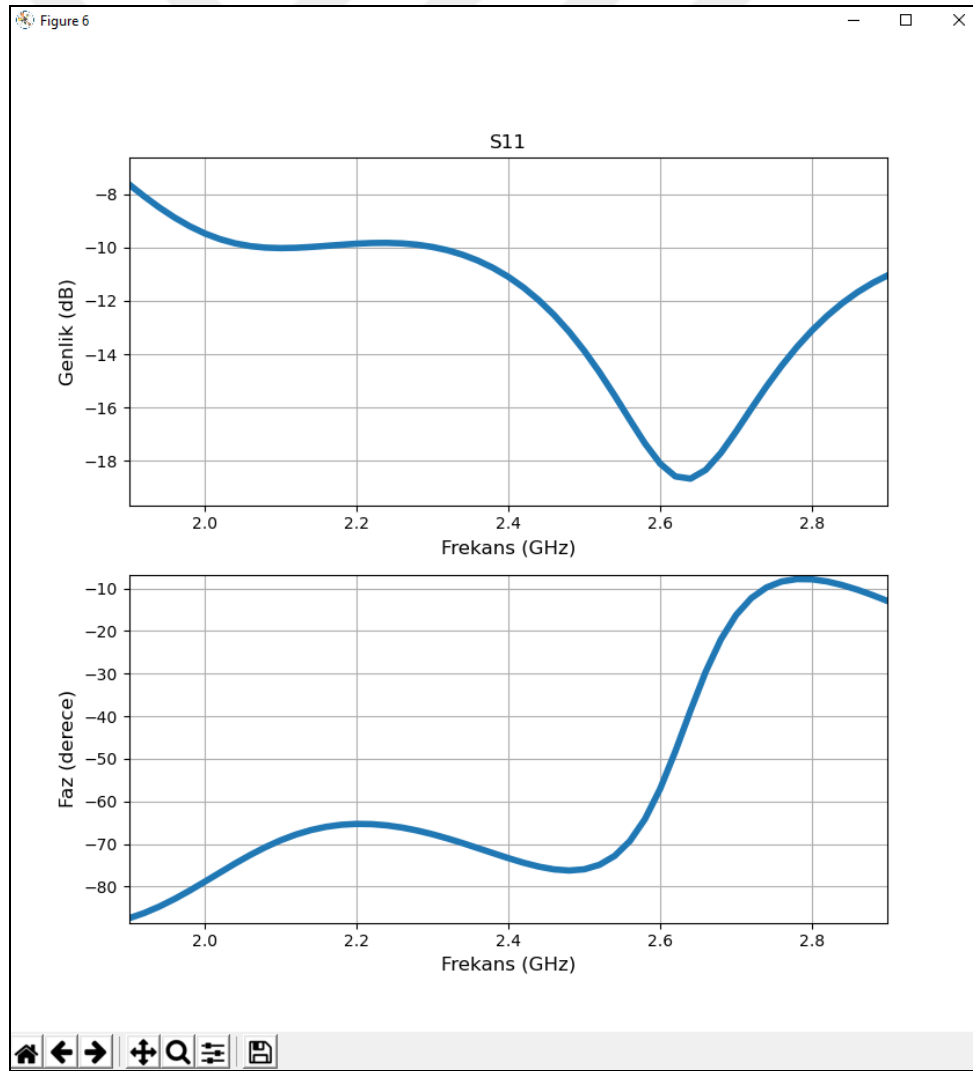
Şekil 5.34. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği



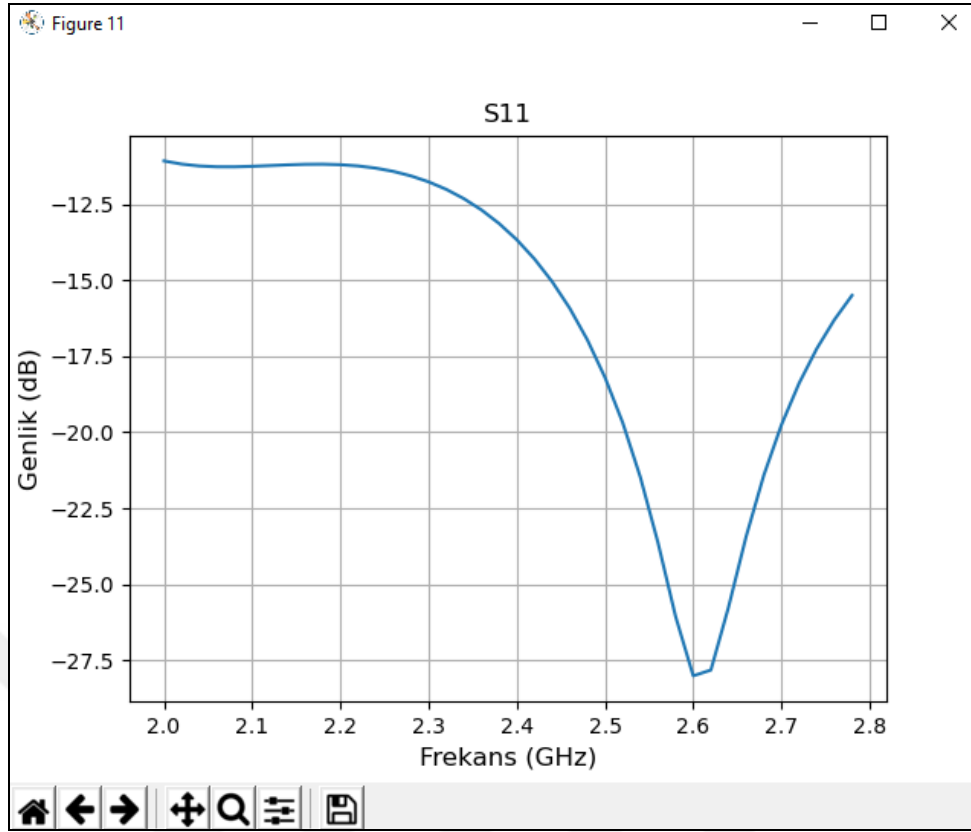
Şekil 5.35. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

İlk benzetim yapılıp, ilk örnek alındıktan sonra optimizasyon parametreleri penceresinde girilen hızlı tahmin optimizasyonu örnek sayısı kadar benzetim yapılmakta ve diğer örnekler de alınmaktadır. Optimizasyonu yapılan anten için örnek sayısı 3 olarak girilmiştir. Benzetimler yapılıp örnekler alındıktan sonra Sklearn kütüphanesi ile örnekler baz alınarak tahmin değeri elde edilmekte ve bu değerle son benzetim yapılmaktadır.

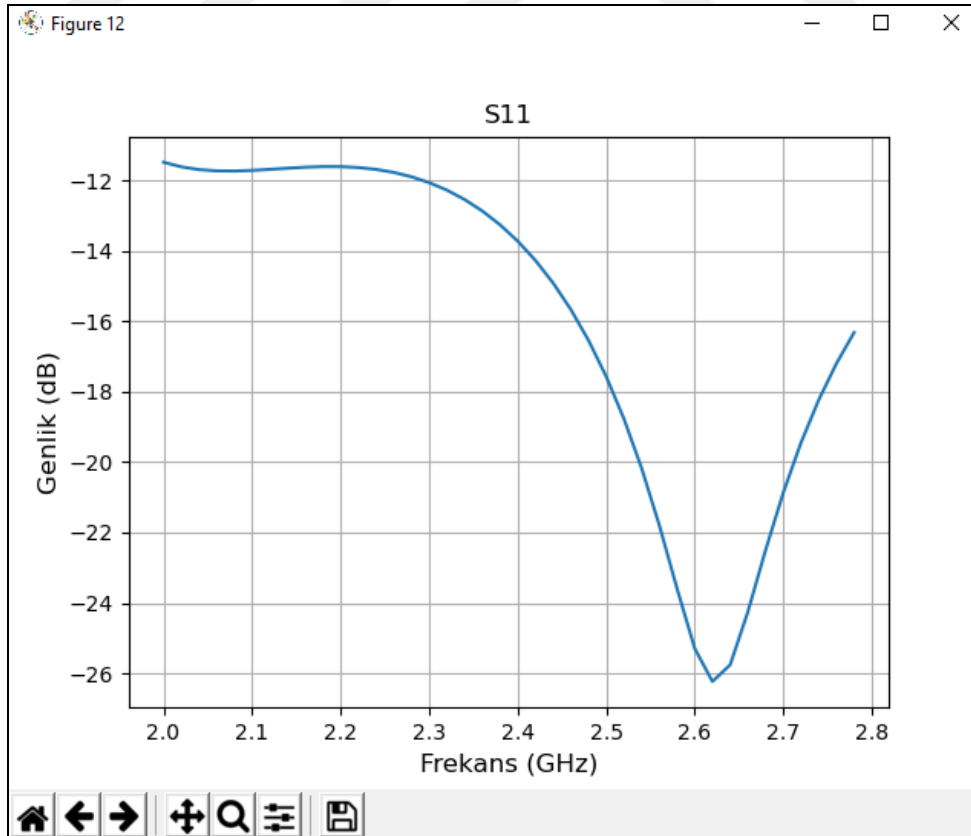
Hesaplanan değer ile yapılan, ilk benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri Şekil 5.36'da, birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.37'de, ikinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.38'de, üçüncü örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.39'da ve tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.40'da gösterilmiştir. Optimizasyon tamamlandığındaki optimizasyon penceresi Şekil 5.41'de verilmiştir.



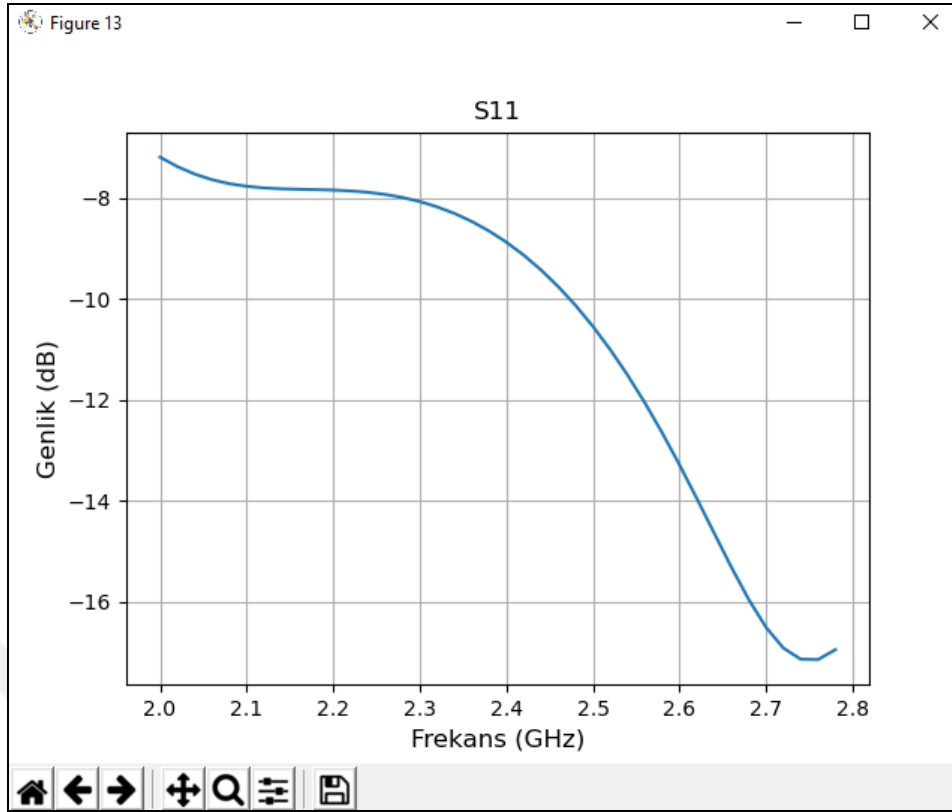
Şekil 5.36. İlk benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri



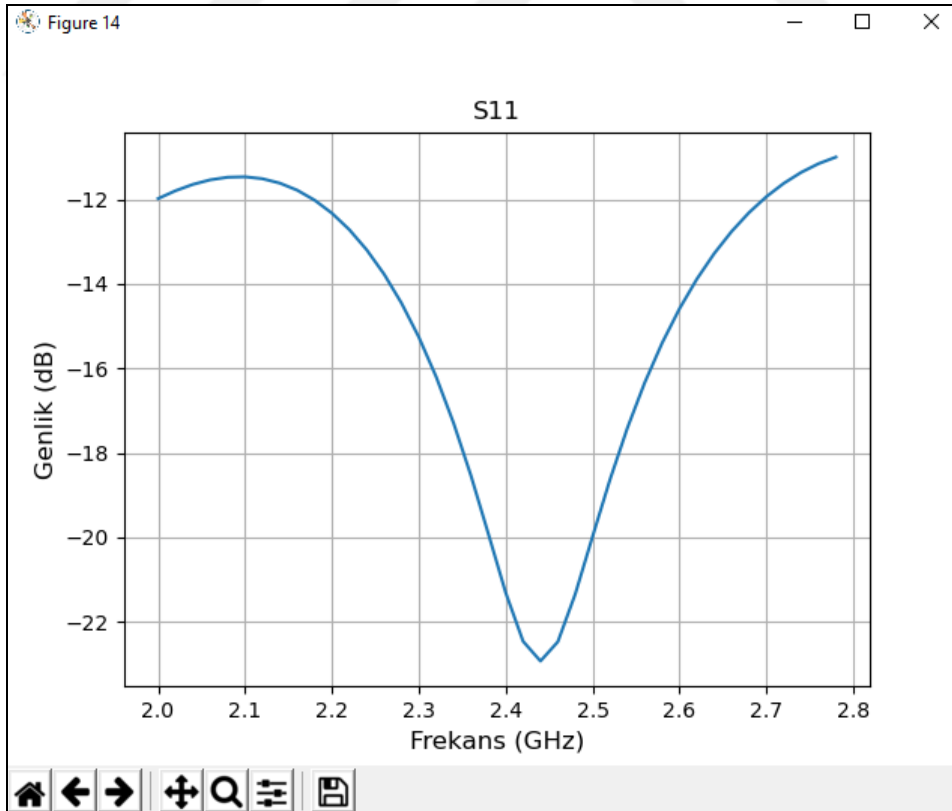
Şekil 5.37. Birinci örnek olan S₁₁ parametresi grafiği



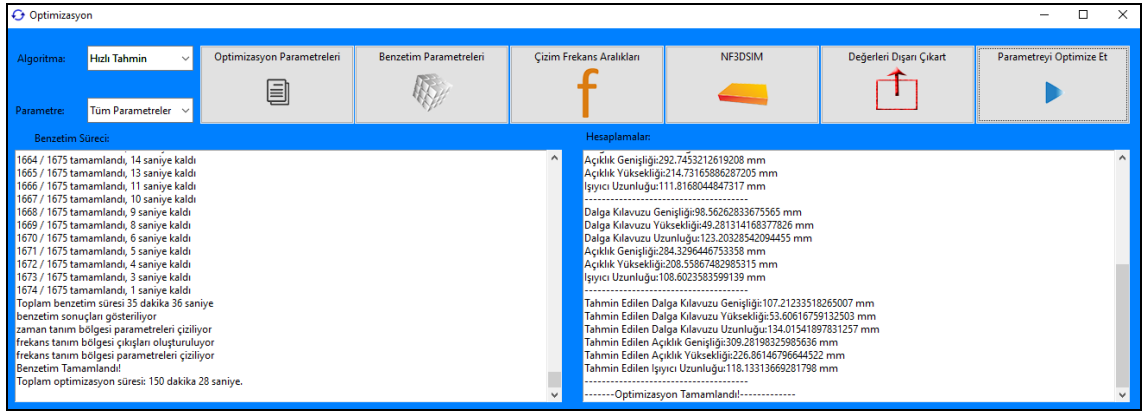
Şekil 5.38. İkinci örnek olan S₁₁ parametresi grafiği



Şekil 5.39. Üçüncü örnek olan S₁₁ parametresi grafiği

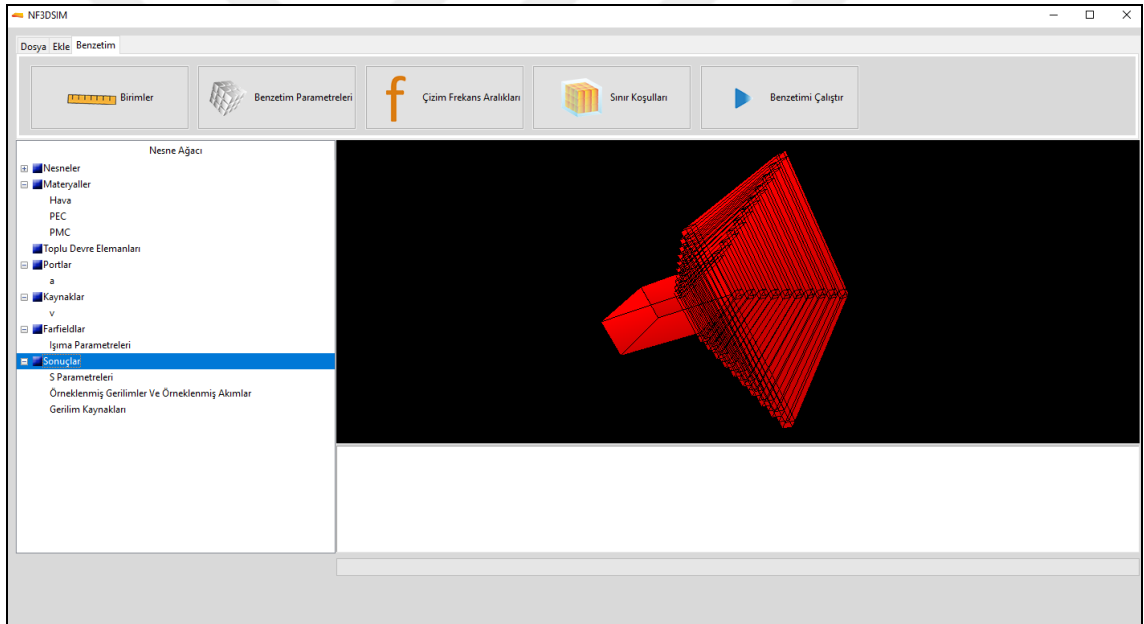


Şekil 5.40. Tahmin edilen değer ile elde edilen S₁₁ parametresi grafiği



Şekil 5.41. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi

Optimizasyondan sonra antenin son hali optimizasyon penceresindeki NF3DSIM butonuna basıldıktan sonra görülebilmektedir. Optimizasyonu yapılan antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü Şekil 5.42’te verilmiştir.



Şekil 5.42. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

Tablo 5.2’de optimizasyon algoritmalarının toplam optimizasyon süresi verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere sonuca en hızlı varan optimizasyon algoritması hızlı tahmin, en son varan ise adım adım optimizasyon algoritmasıdır. Tahmin optimizasyon algoritması ise adım adım ve hızlı tahminin ortasında yer almıştır.

Tablo 5.2. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerler

Optimizasyon Algoritması	Toplam Optimizasyon Süresi
Adım adım	3 saat 44 dakika 34 saniye
Tahmin	2 saat 52 dakika 47 saniye
Hızlı Tahmin	2 saat 30 dakika 28 saniye

Tablo 5.3'te horn antenin adım adım optimizasyondan önceki ve sonraki uzunluk değerleri, Tablo 5.4'te tahmin optimizasyondan önceki ve sonraki uzunluk değerleri, Tablo 5.5'te hızlı tahmin optimizasyondan önceki ve sonraki uzunluk değerleri verilmiştir.

Tablo 5.3. Adım adım optimizasyonu önceki ve sonraki değerler

Uzunluk	Optimizasyondan Önceki Değerler	Optimizasyondan Sonraki Değerler
Dalga Kılavuzu Genişliği	100 mm	107.8651 mm
Dalga Kılavuzu Yüksekliği	50 mm	53.9325 mm
Dalga Kılavuzu Uzunluğu	125 mm	134.8314 mm
Açıklık Genişliği	288.4761 mm	311.1652 mm
Açıklık Yüksekliği	211.6001 mm	228.2428 mm
Işıyıcı Uzunluğu	110.1861 mm	118.8524 mm

Tablo 5.4. Tahmin optimizasyonu önceki ve sonraki değerler

Uzunluk	Optimizasyondan Önceki Değerler	Optimizasyondan Sonraki Değerler
Dalga Kılavuzu Genişliği	100 mm	107.2123 mm
Dalga Kılavuzu Yüksekliği	50 mm	53.6061 mm
Dalga Kılavuzu Uzunluğu	125 mm	134.0154 mm
Açıklık Genişliği	288.4761 mm	309.2819 mm
Açıklık Yüksekliği	211.6001 mm	226.8614 mm
Işıyıcı Uzunluğu	110.1861 mm	118.1331 mm

Tablo 5.5. Hızlı tahmin optimizasyonu önceki ve sonraki değerler

Uzunluk	Optimizasyondan Önceki Değerler	Optimizasyondan Sonraki Değerler
Dalga Kılavuzu Genişliği	100 mm	107.2123 mm
Dalga Kılavuzu Yüksekliği	50 mm	53.6061 mm
Dalga Kılavuzu Uzunluğu	125 mm	134.0154 mm
Açıklık Genişliği	288.4761 mm	309.2819 mm
Açıklık Yüksekliği	211.6001 mm	226.8614 mm
Işıyıcı Uzunluğu	110.1861 mm	118.1331 mm

Tablo 5.6’da tasarlanan antenin hedeflenen merkez frekansı, tasarlanan antenin elektromanyetik benzetim sonucu görülen merkez frekansı ve anten optimizasyonu yapıldıktan sonraki merkez frekansı verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere hedeflenen merkez frekansına antenin optimizasyonu yapıldıktan sonra ulaşılmıştır.

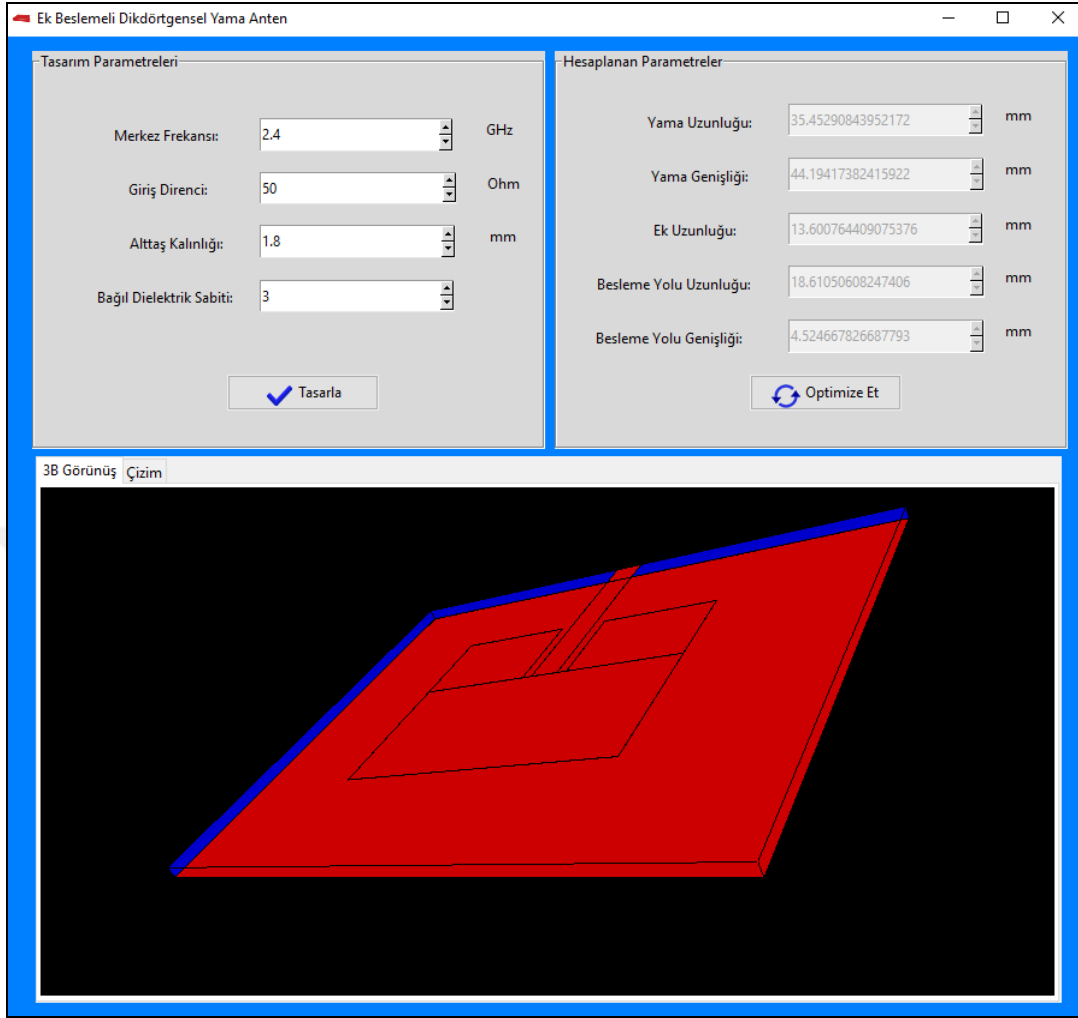
Tablo 5.6. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre hedef merkez frekansları ve optimizasyondan önceki ve sonraki frekansları

Optimizasyon Algoritması	Hedef merkez frekansı	Optimizasyondan önce merkez frekansı	Optimizasyondan sonra merkez frekansı
Adım adım	2.4 GHz	2.64 GHz	2.42 GHz
Tahmin	2.4 GHz	2.64 GHz	2.44 GHz
Hızlı Tahmin	2.4 GHz	2.64 GHz	2.44 GHz

5.2. Ek Beslemeli Dikdörtgensel Yama Mikroşerit Anten Tasarımı ve Optimizasyonu

Anten tasarım penceresinde antenin merkez frekansı 2.4 GHz, 50 ohm giriş direnci, alttabaka kalınlığı 1.8 mm ve alttaş bağlı dielektrik sabiti 3 olarak girilmiştir. Anten tasarım penceresi Şekil 5.43’te verilmiştir. Anten yama uzunluğu 35.4529 mm, yama genişliği 44.1917 mm, ek uzunluğu 13.6007 mm, besleme yolu uzunluğu 18.6105 mm ve besleme yolu genişliği 4.5246 mm olarak hesaplanmıştır. Tablo 5.7’de ise ANTDESVS yazılımında ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten

uzunlukları verilmiştir.



Şekil 5.43. Ek beslemeli mikroşerit dikdörtgen yama antenin anten tasarım penceresi

Tablo 5.7. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları

Uzunluk tipi	ANTDESVS programındaki anten uzunlukları	Ticari anten tasarım programındaki anten uzunlukları
Yama uzunluğu	35.4529mm	35.43mm
Yama genişliği	44.1941mm	44.16mm
Ek uzunluğu	13.6007mm	12.38mm
Besleme yolu uzunluğu (ek uzunluğu dahil)	32.2112mm	40.18mm
Besleme yolu genişliği	4.5246mm	4.525mm

Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları Şekil 5.44'te ve anten benzetim parametreleri ise Şekil 5.45'te verilmiştir.

Çizim Frekans Aralıkları

Çiz:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıç: 1.7999999999999999 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 3.0 GHz

Hesapla:

Frekans Tanım Bölgesi Başlangıç: 0.00235816 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Bitiş: 14.0 GHz

Frekans Tanım Bölgesi Adım: 0.00235816 GHz

Tanımla: 2.4 GHz

çoklu değerler için virgül kullanın.

TAMAM İptal

Şekil 5.44. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları

Benzetim Parametreleri

Zaman Adımı Sayısı: 6000

Birim hücrenin x, y ve z boyutları:

bx: 1.6 mm

by: 1.6 mm

bz: 1.6 mm

TAMAM İptal

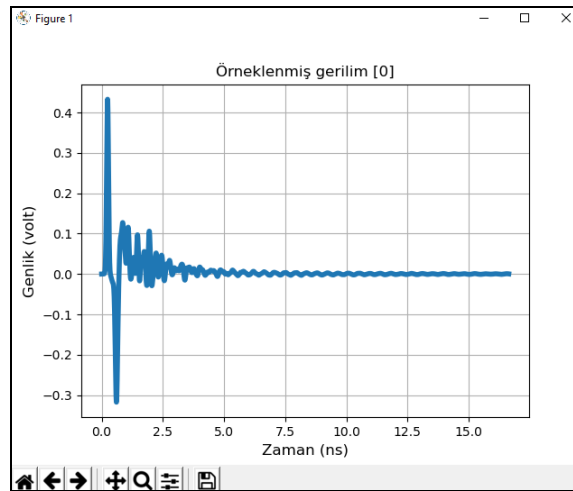
Şekil 5.45. Anten için girilen benzetim parametreleri

Antenin optimizasyonu için girilen optimizasyon parametreleri Şekil 5.46'da gösterilen optimizasyon parametreleri penceresinde verilmiştir.

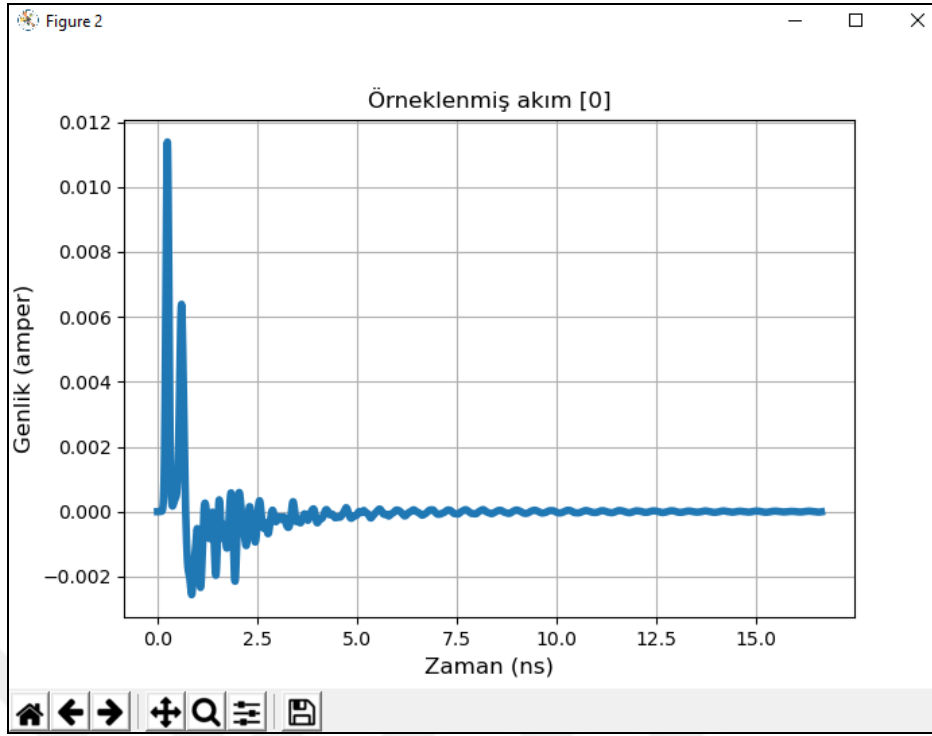
Şekil 5.46. Anten için girilen optimizasyon parametreleri

5.2.1. Antenin Adım Adım Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

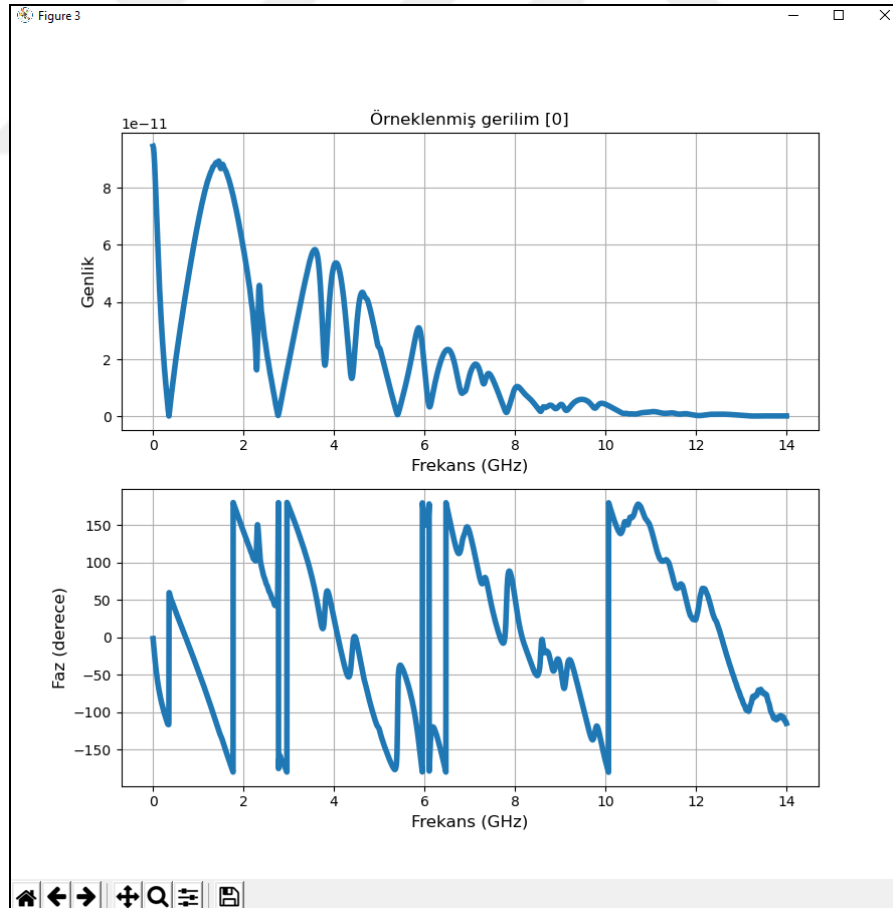
İlk olarak antenin optimizasyonu için adım adım optimizasyon algoritması kullanılmıştır. İlk benzetim tamamlandığı zaman, zaman tanım bölgesi ve frekans tanım bölgesi grafikleri kullanıcıya gösterilmektedir. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği Şekil 5.47'de, zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği Şekil 5.48'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri Şekil 5.49'da, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri Şekil 5.50'de, frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri Şekil 5.51'de verilmiştir.



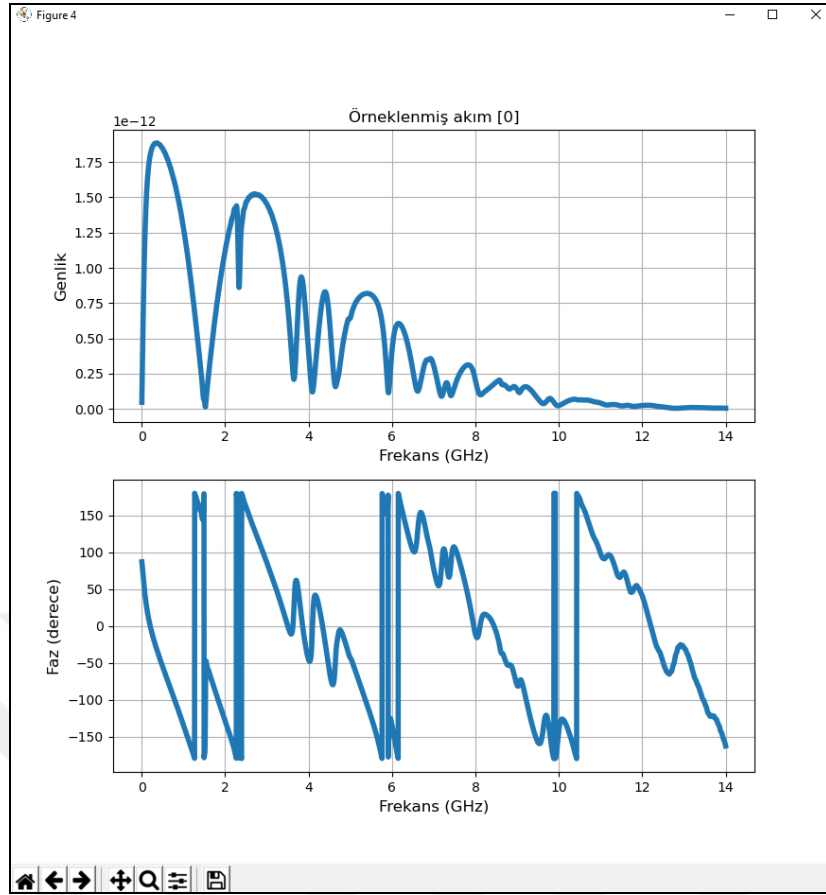
Şekil 5.47. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği



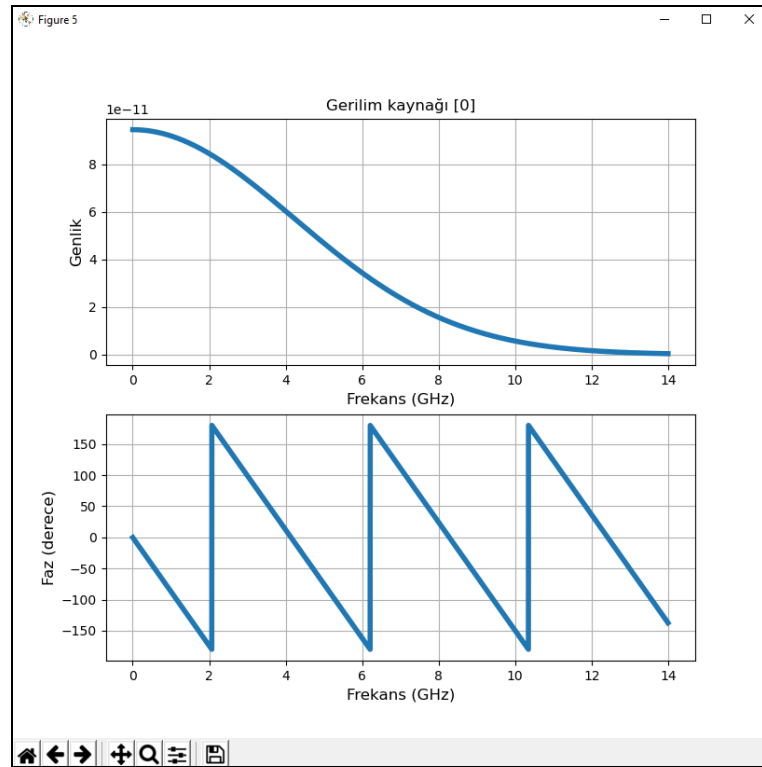
Şekil 5.48. Zaman tanım bölgesindeki örnekleme akımı grafiği



Şekil 5.49. Frekans tanım bölgesindeki örnekleme gerilim genlik ve faz grafikleri

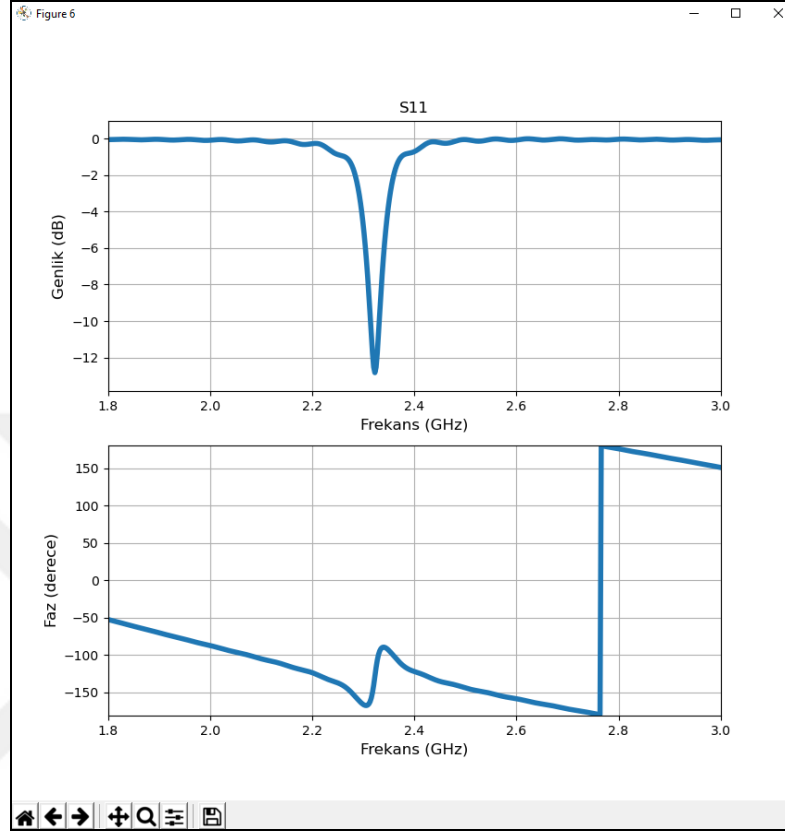


Şekil 5.50. Frekans tanım bölgesindeki örnekleme akımı genlik ve faz grafikleri

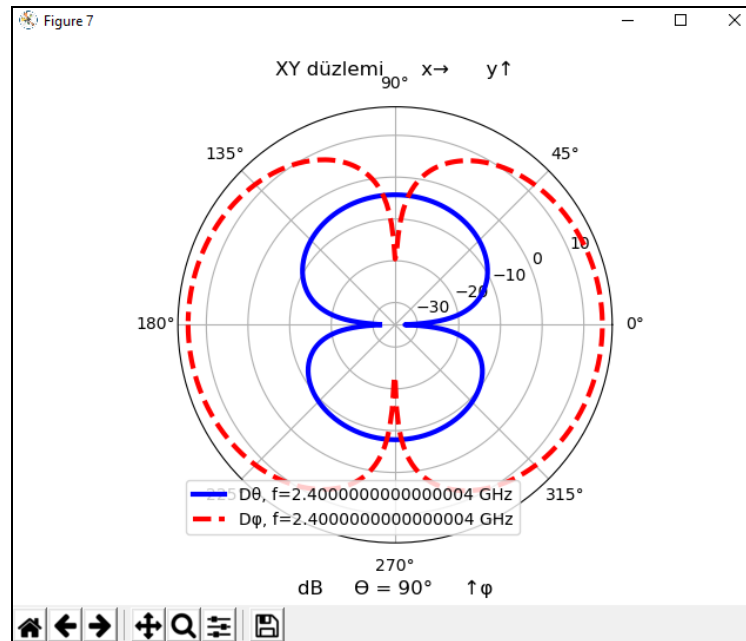


Şekil 5.51. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri

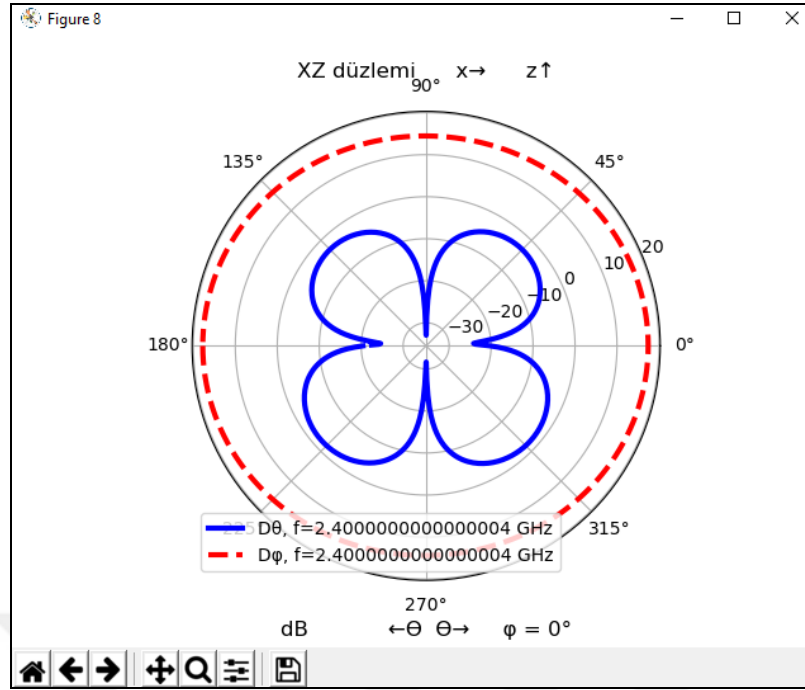
S_{11} parametresinin genlik ve faz grafikleri Şekil 5.52'de, XY düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.53'te, XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.54'te ve YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.55'te gösterilmiştir.



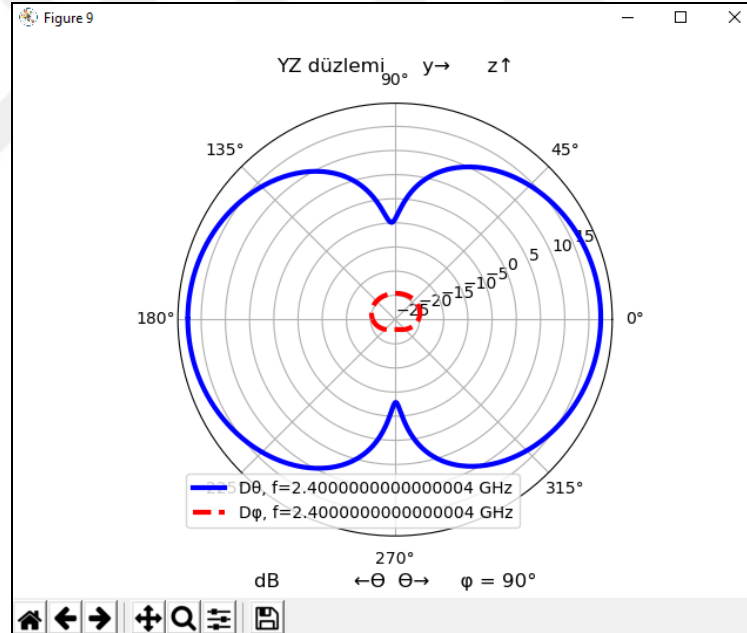
Şekil 5.52. S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



Şekil 5.53. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği

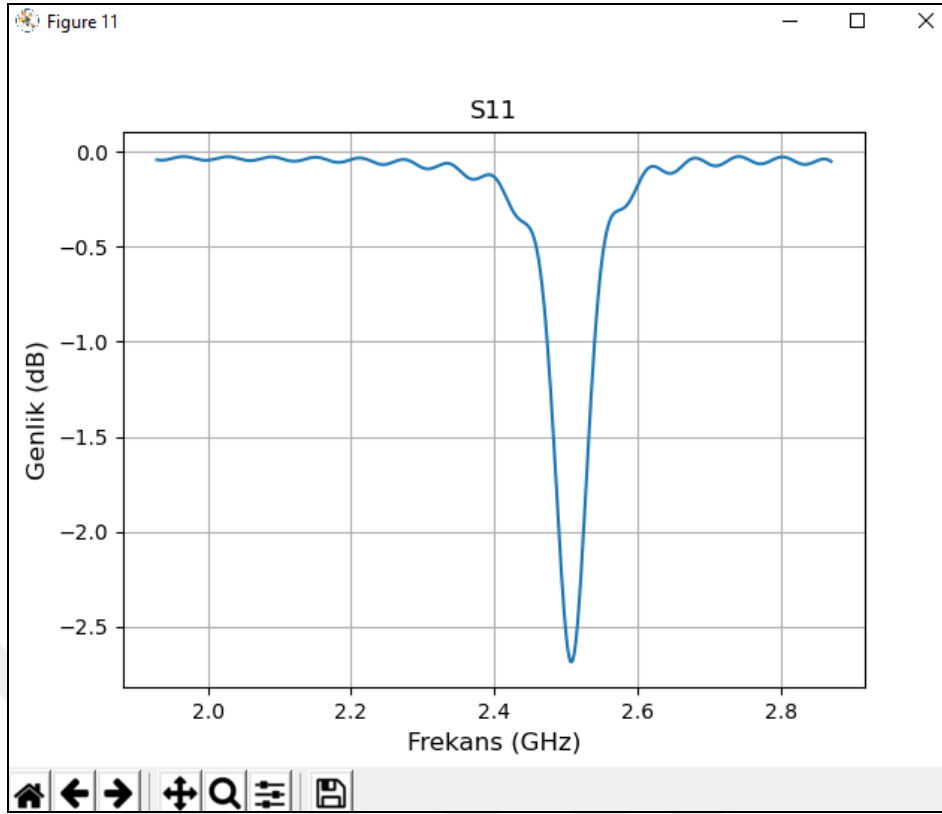


Şekil 5.54. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

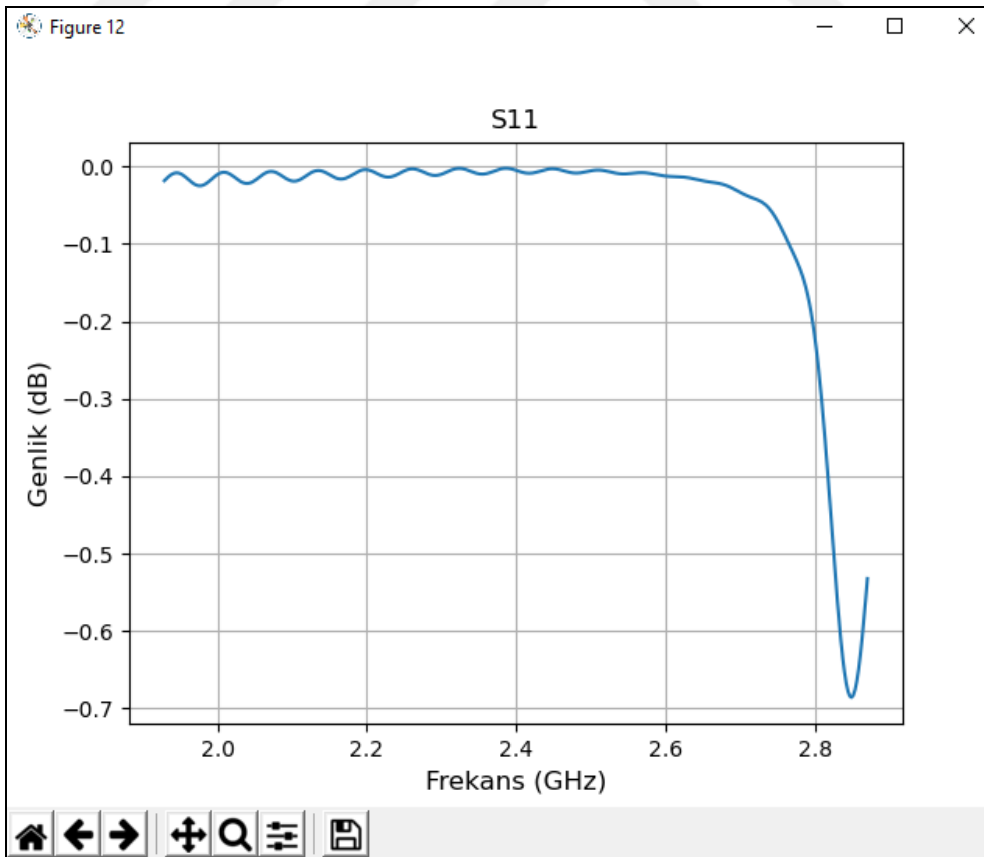


Şekil 5.55. YZ düzlemine ışıma karakteristiği

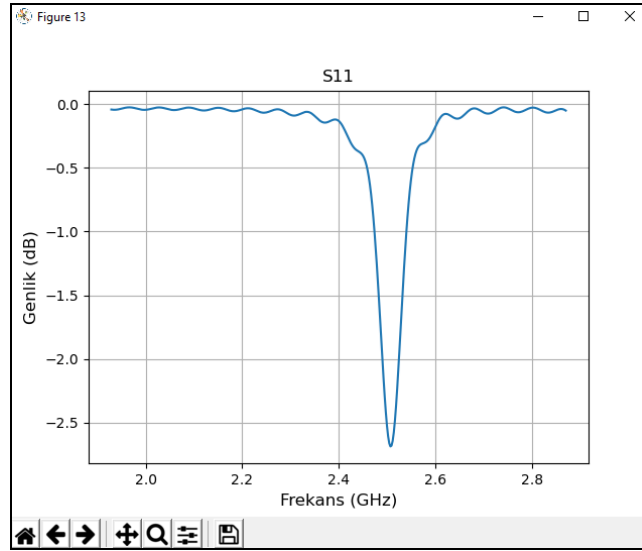
Hesaplanan değerlerin benzetiminden sonra, adım adım optimizasyon algoritması optimizasyonu 4 adımda tamamlamıştır. Birinci adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.56'da, ikinci adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.57'de, üçüncü adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.58'de, dördüncü adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.59'da ve optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.60'da gösterilmiştir.



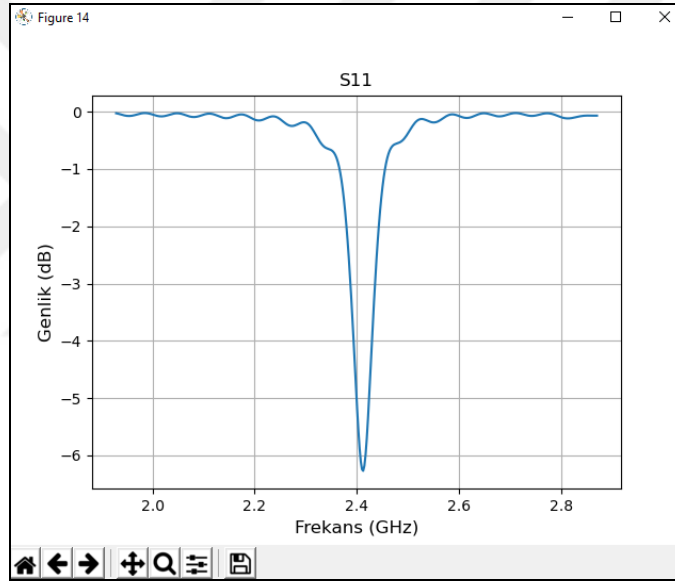
Şekil 5.56. Birinci adımda elde edilen S₁₁ parametresi grafiği



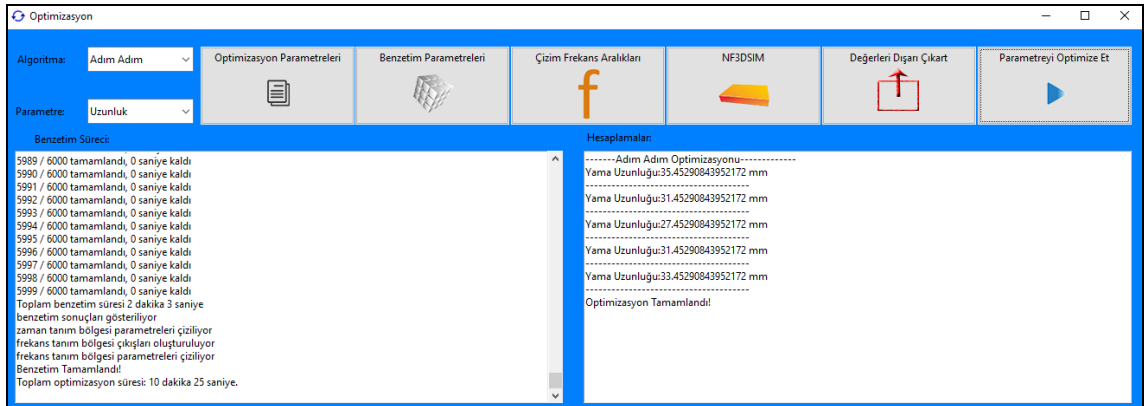
Şekil 5.57. İkinci adımda elde edilen S₁₁ parametresi grafiği



Şekil 5.58. Üçüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği

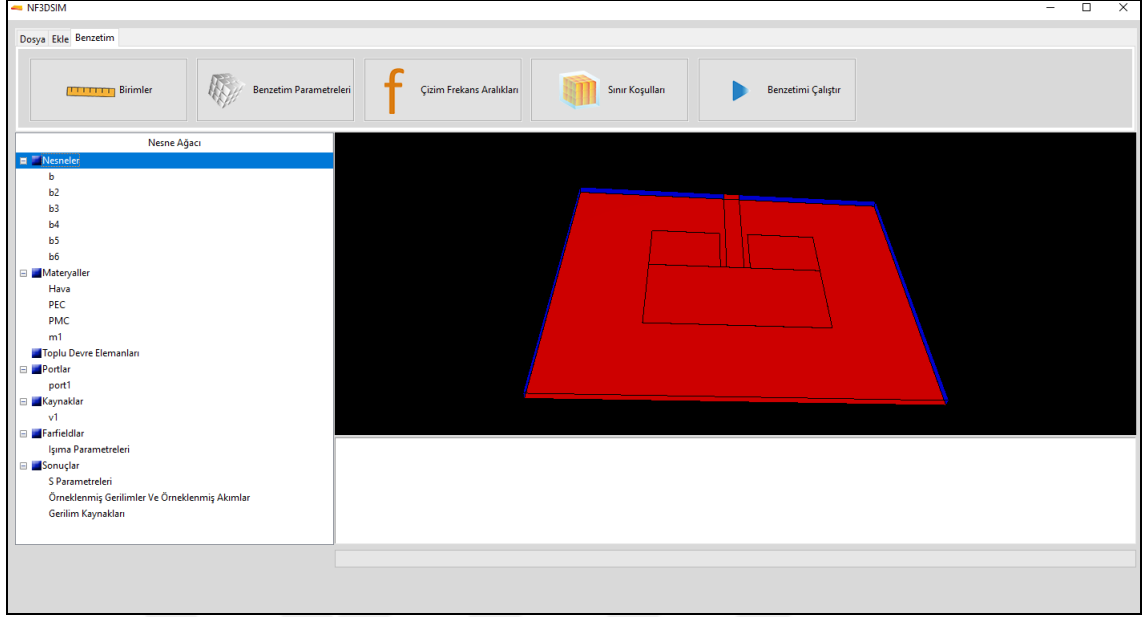


Şekil 5.59. Dördüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği



Şekil 5.60. Adım adım optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi

Şekil 5.61’de optimizasyonu yapılan antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü verilmiştir.



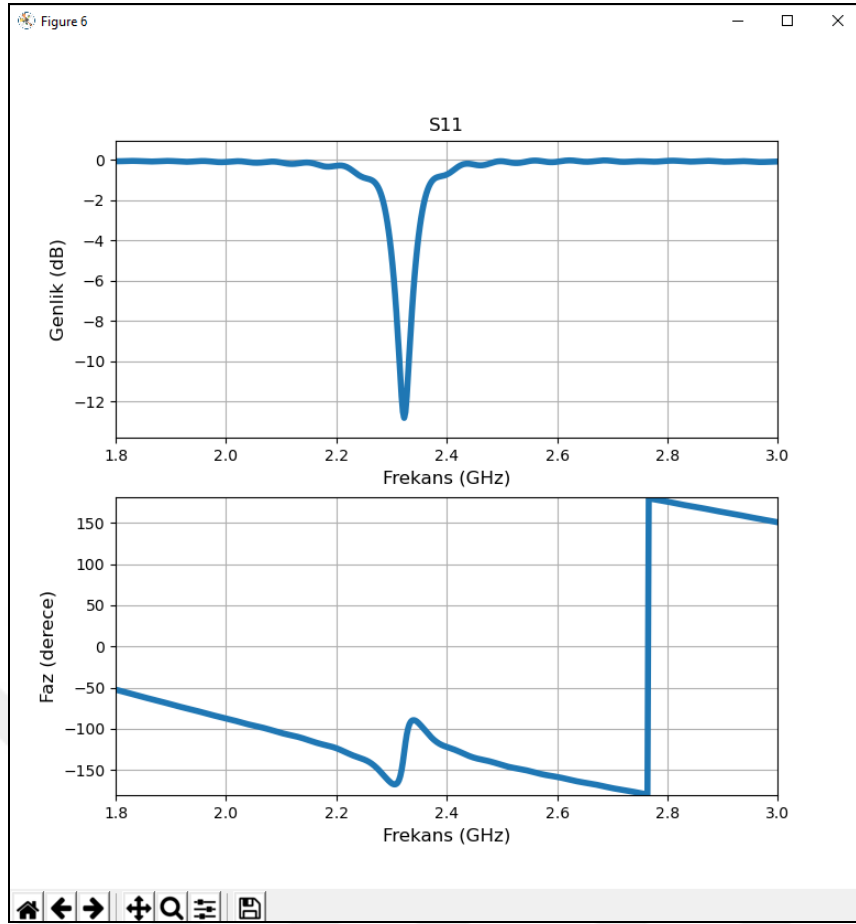
Şekil 5.61. Adım adım optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

5.2.2. Antenin Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

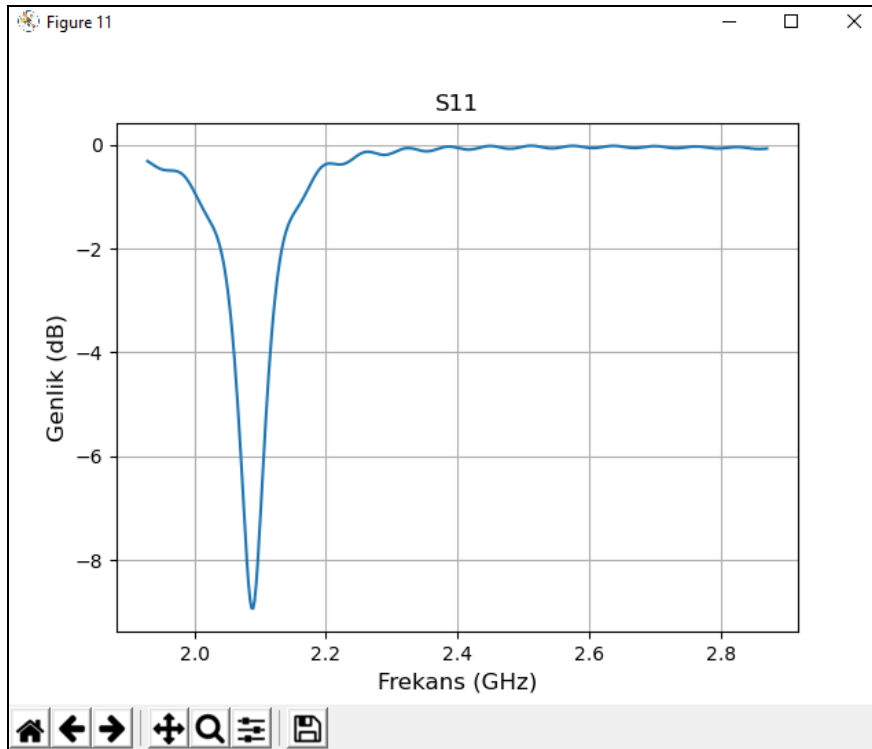
Test edilen anten için optimizasyon penceresinde, optimizasyon algoritması olarak tahmin optimizasyonu seçilmiştir. Hesaplanan parametrelerle yapılan ve ilk örnek olarak alınan benzetim işleminden sonra, zaman tanım bölgesi, frekans tanım bölgesine ait grafikler ve kutupsal grafikler kullanıcıya gösterilmektedir.

Adım adım optimizasyonu ve tahmin optimizasyonu girilen zaman adım sayısı ve Yee hücre boyutunu kullandığı için hesaplanan değerler ile yapılan benzetim grafikleri aynı olmaktadır. Tasarlanan antenin tahmin optimizasyonu algoritması örnek sayısı 2 olarak girilmiştir. Anten tasarımında hesaplanan değerler ile yapılan benzetim olan ilk örnekle beraber toplamda 3 örnek alınmış olmaktadır.

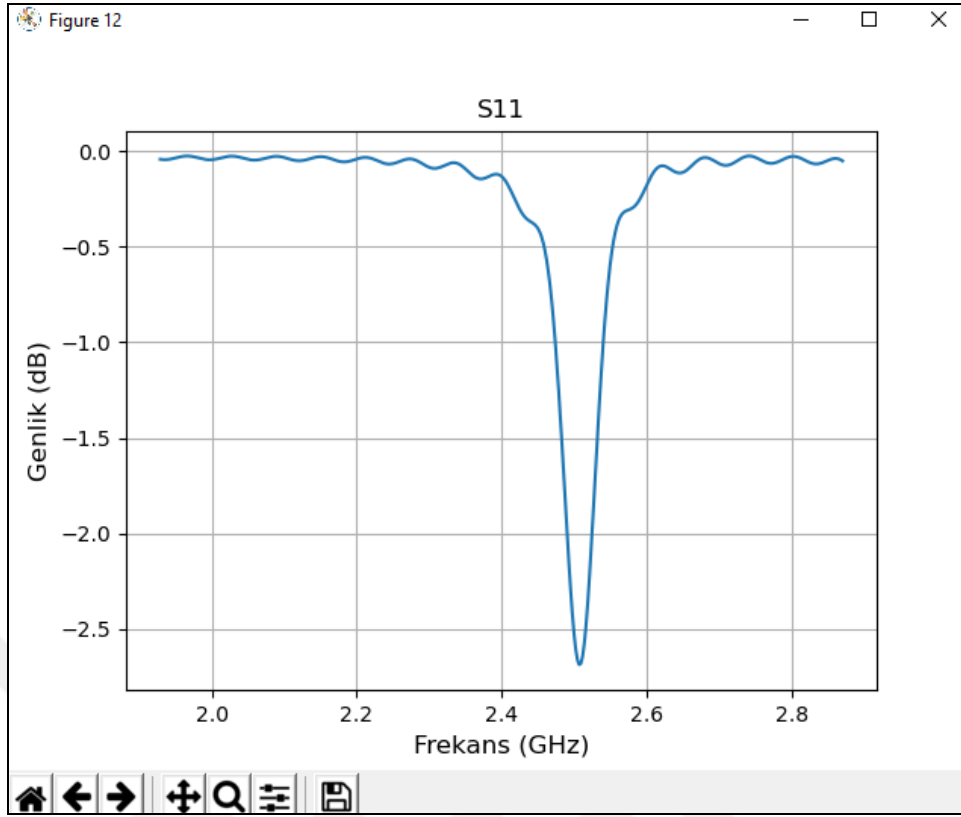
Hesaplanan değer ile yapılan ve dolayısıyla ilk benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri Şekil 5.62’de, birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.63’te, ikinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.64’te ve tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.65’te gösterilmiştir.



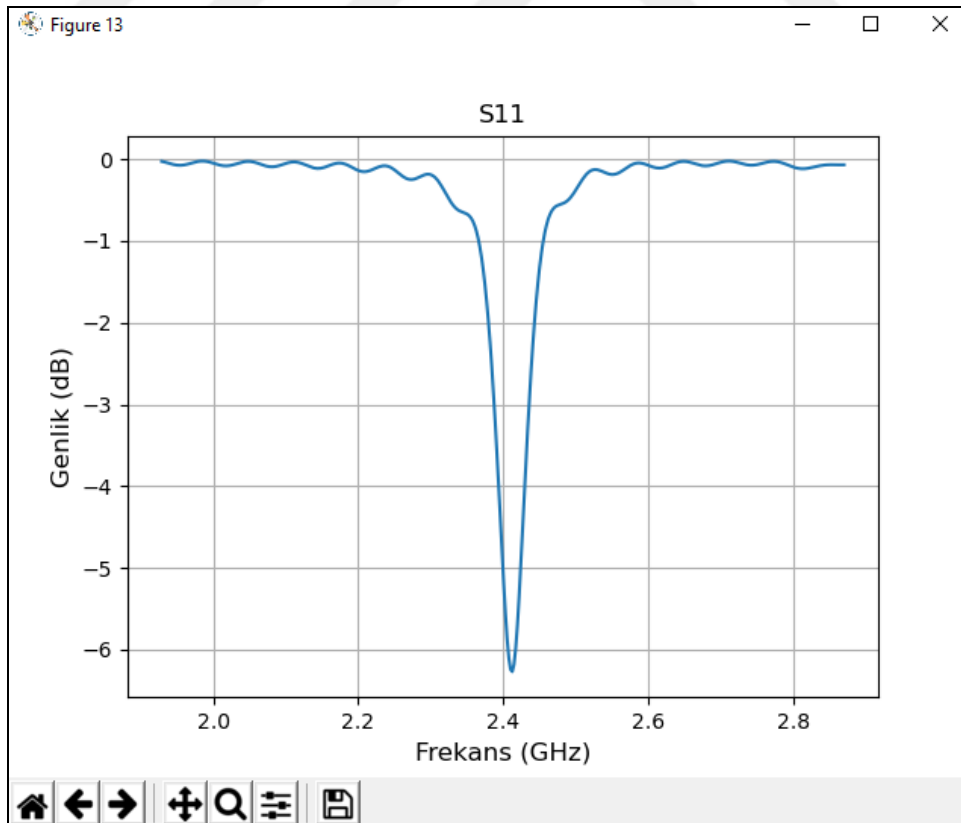
Şekil 5.62. İlk örnek olan S₁₁ parametresi genlik ve faz grafikleri



Şekil 5.63. Birinci örnek olan S₁₁ parametresi grafiği

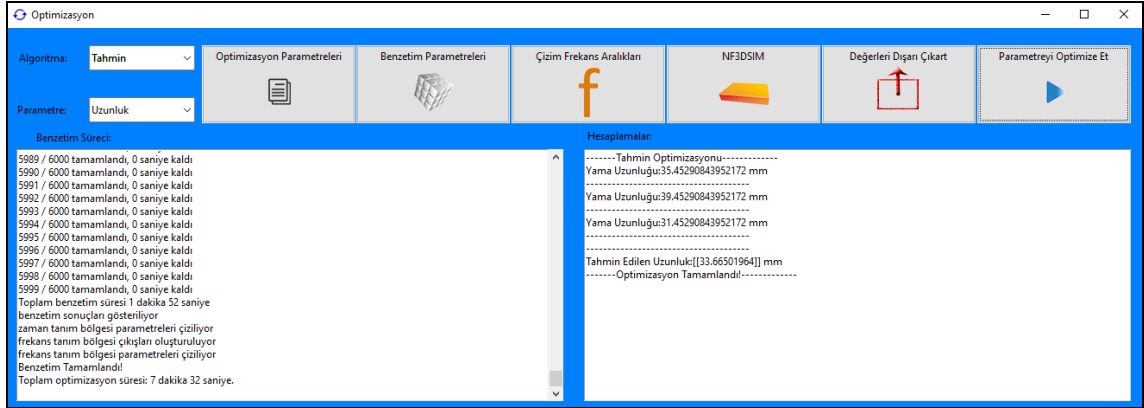


Şekil 5.64. İkinci örnek olan S₁₁ parametresi grafiği



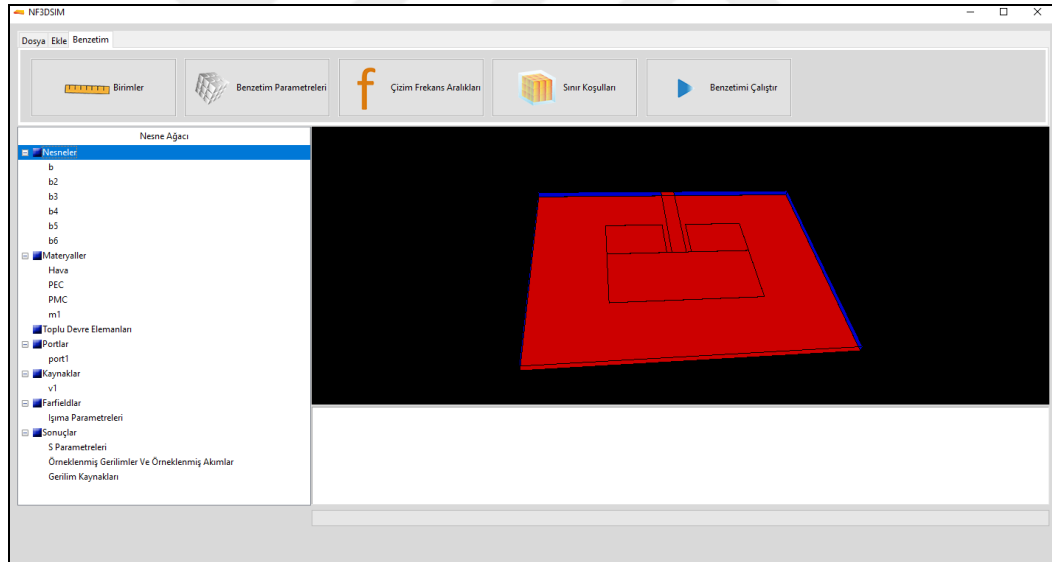
Şekil 5.65. Tahmin edilen değer için S₁₁ parametresi grafiği

Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.66’da verilmiştir.



Şekil 5.66. Tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi

Optimizasyondan sonraki antenin tasarımı optimizasyon penceresindeki NF3DSIM butonuna basıldıktan sonra görülebilmektedir. Şekil 5.67’de antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü verilmiştir.

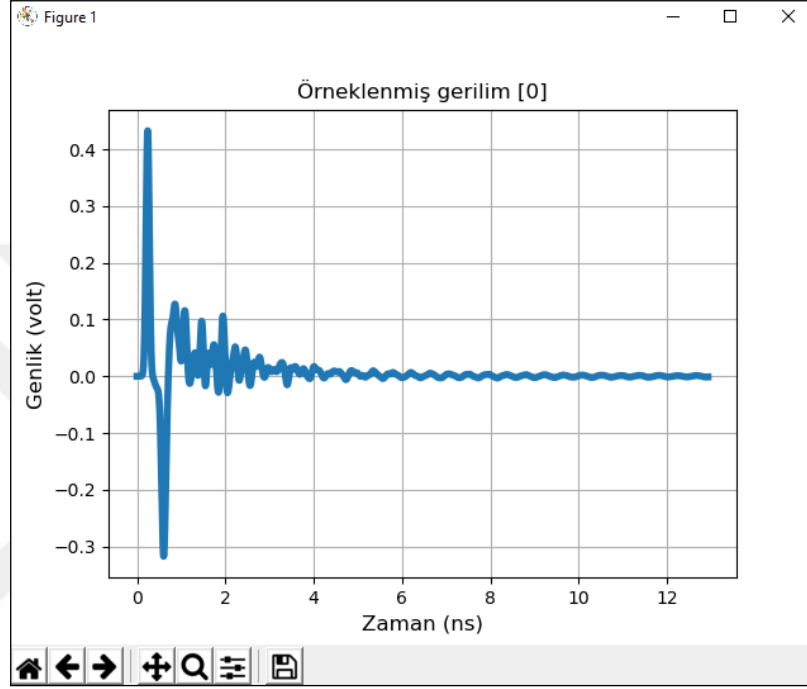


Şekil 5.67. Tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

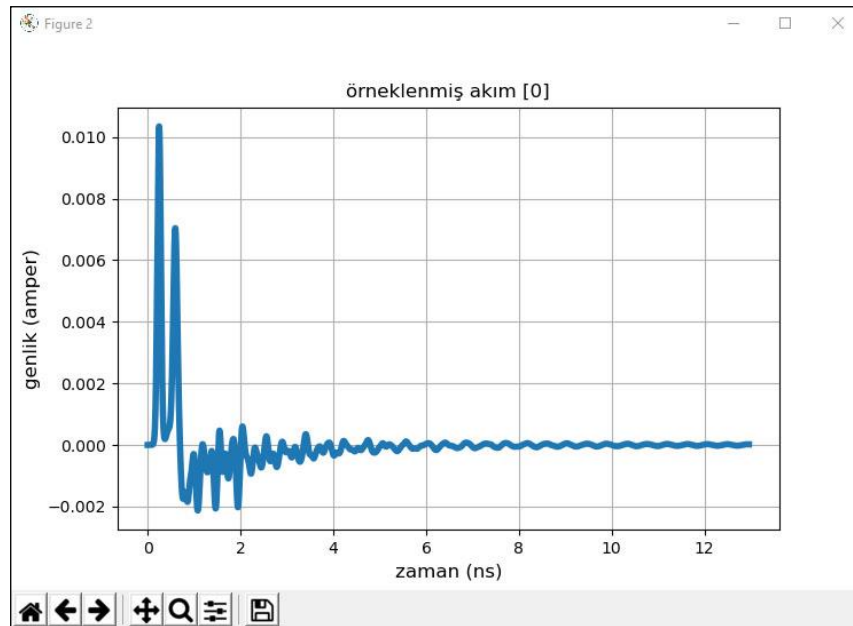
5.2.3. Antenin Hızlı Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

Test edilen anten için optimizasyon algoritması olarak hızlı tahmin optimizasyonu seçilmiştir. Yee hücre boyutu ve zaman adım sayısı anten boyutuna göre hesaplanmaktadır. İlk örnek anten tasarım penceresinde hesaplanan parametreler kullanarak yapılan benzetim ile elde edilmekte, benzetim sonuçlandığında zaman tanım

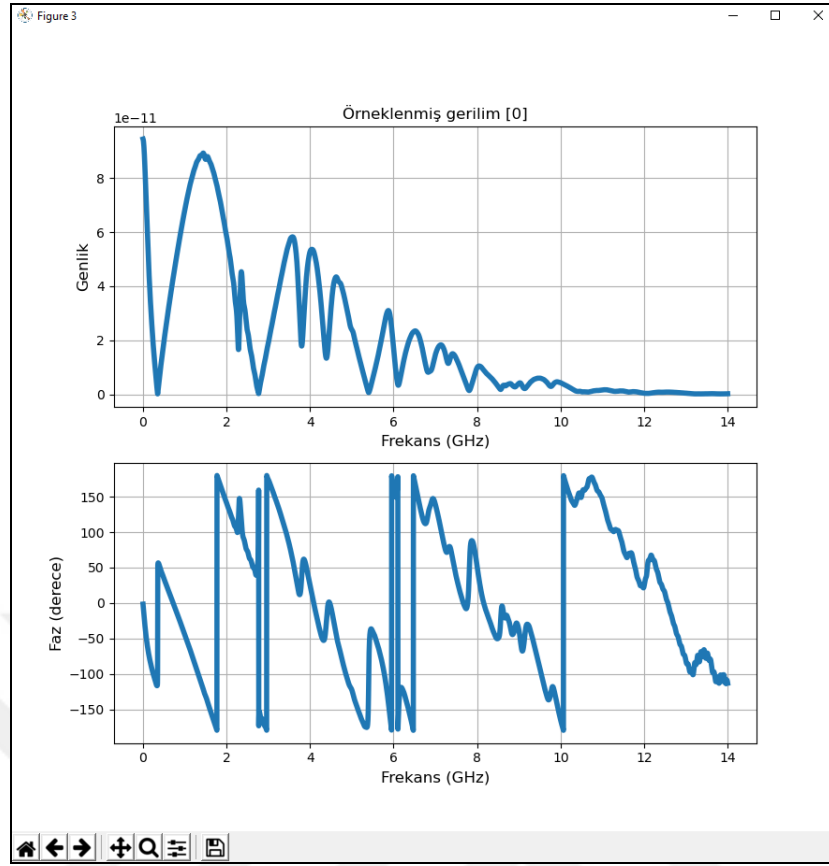
bölgesi, frekans tanım bölgesi grafikleri ve kutupsal grafikler kullanıcıya gösterilmektedir. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği Şekil 5.68'de, zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği Şekil 5.69'da, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri Şekil 5.70'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri Şekil 5.71'de, frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri Şekil 5.72'de verilmiştir.



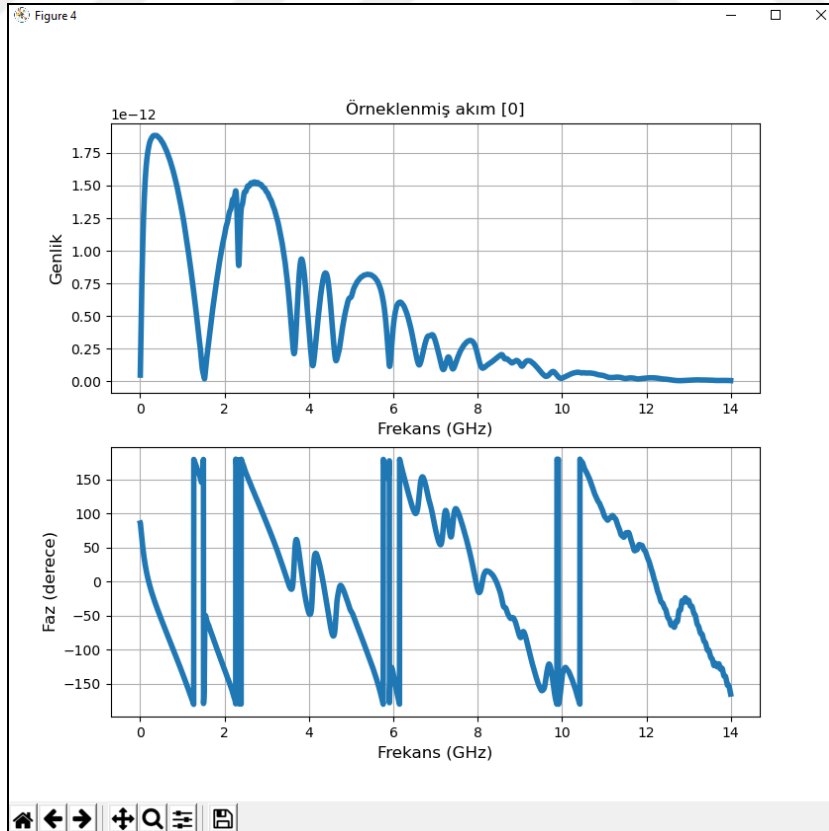
Şekil 5.68. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği



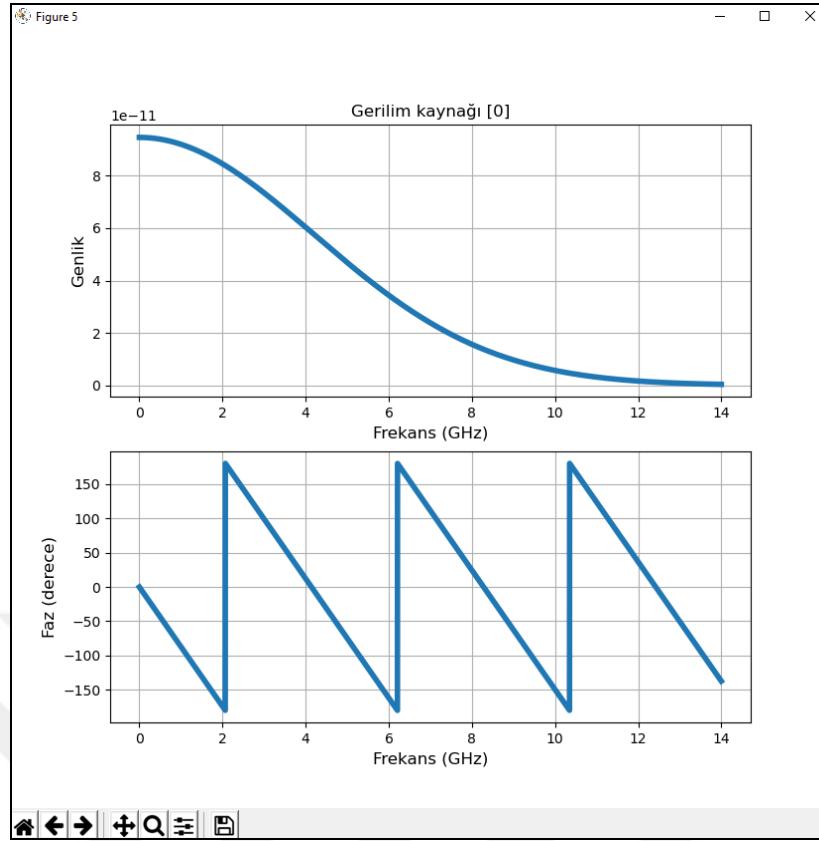
Şekil 5.69. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği



Şekil 5.70. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri

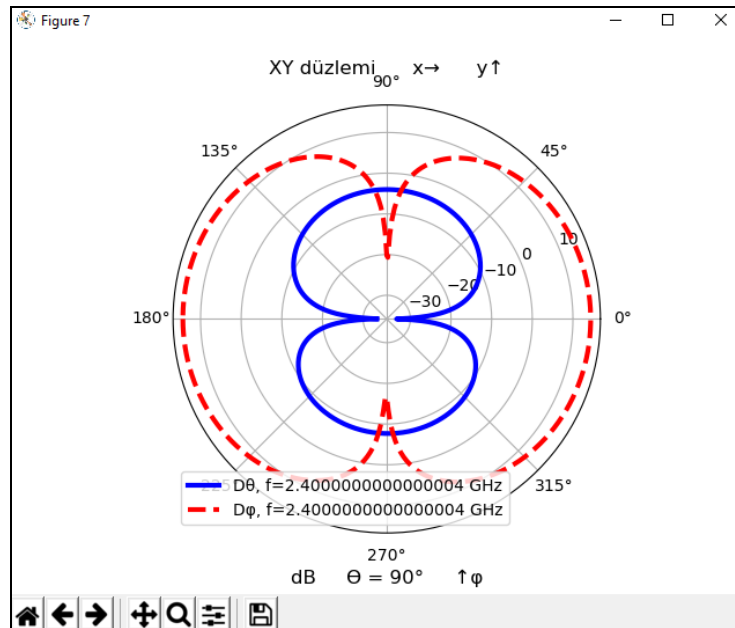


Şekil 5.71. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri

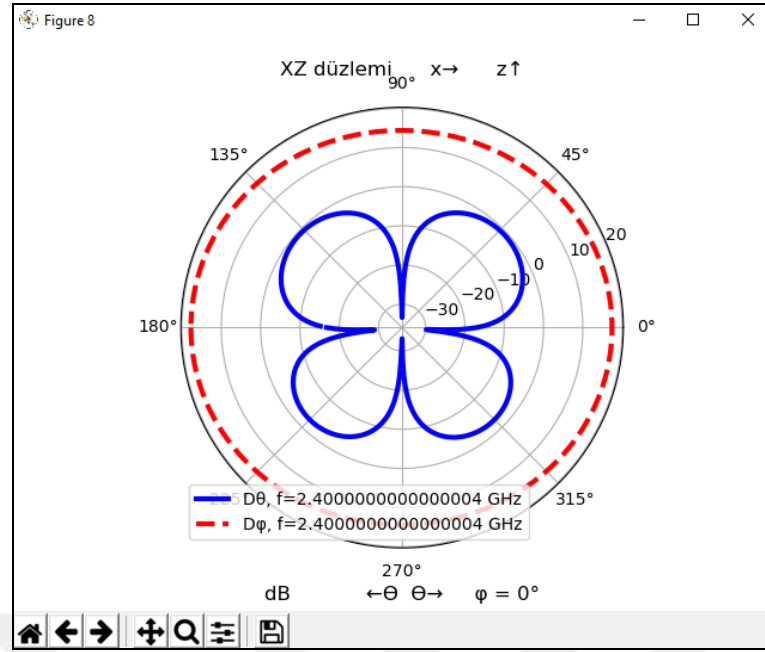


Şekil 5.72. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri

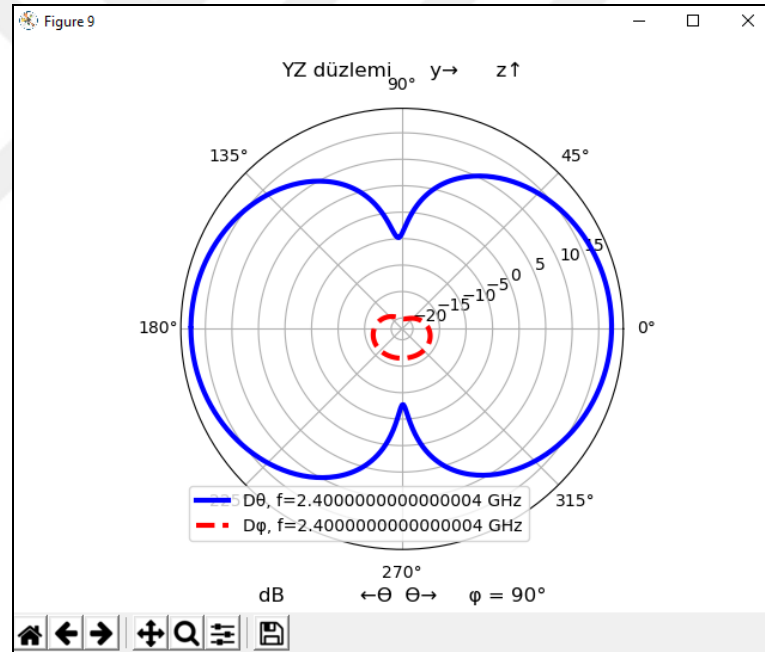
XY düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.73'te, XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.74'te ve YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.75'te gösterilmiştir.



Şekil 5.73. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği

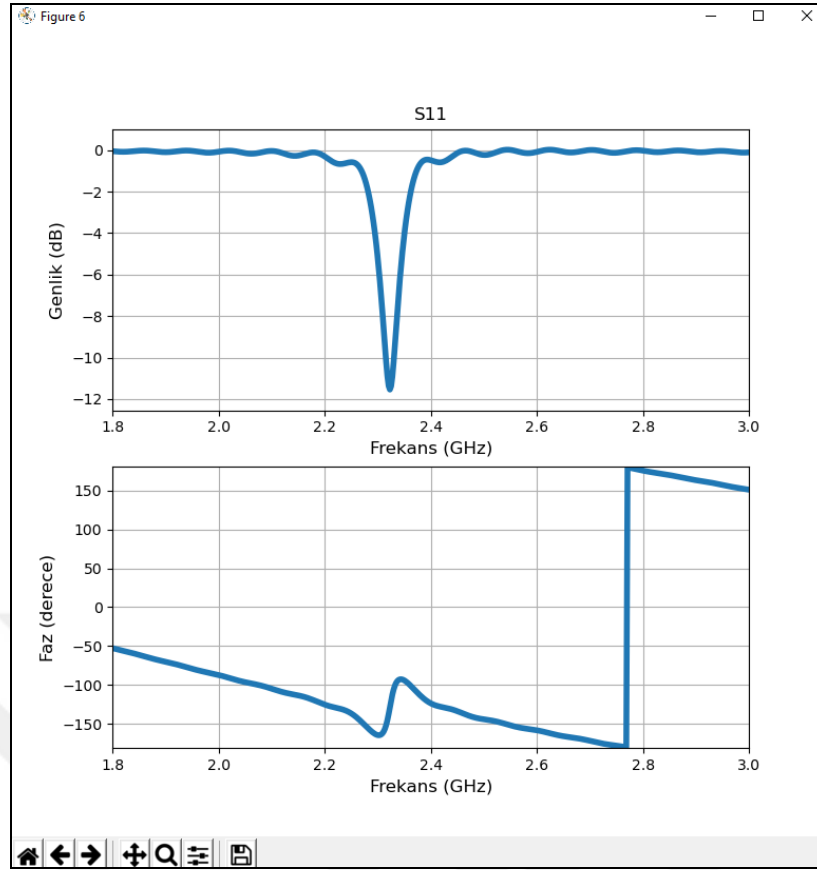


Şekil 5.74. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

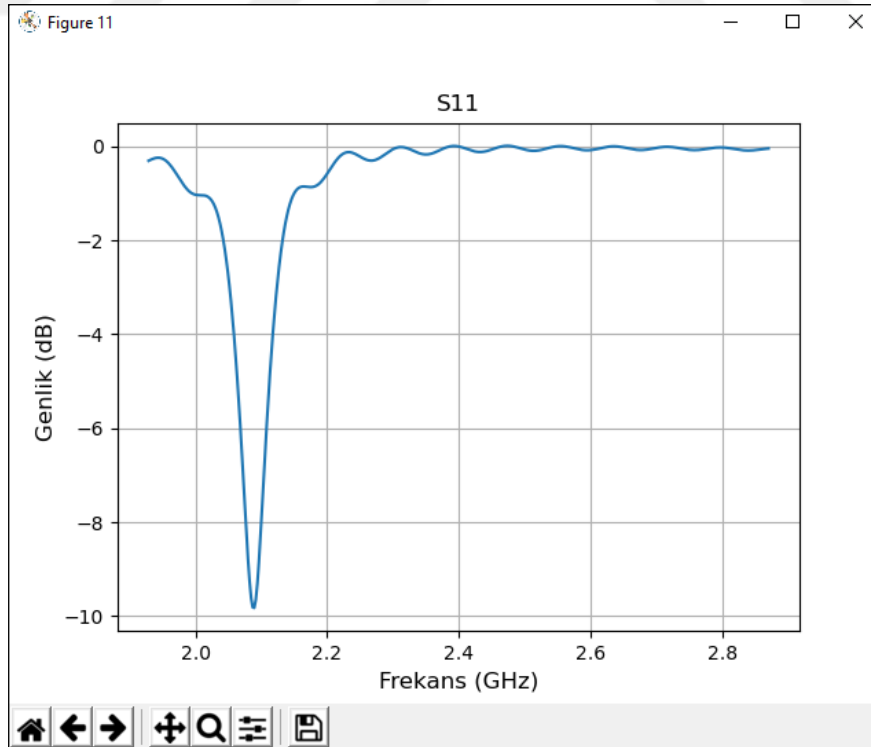


Şekil 5.75. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

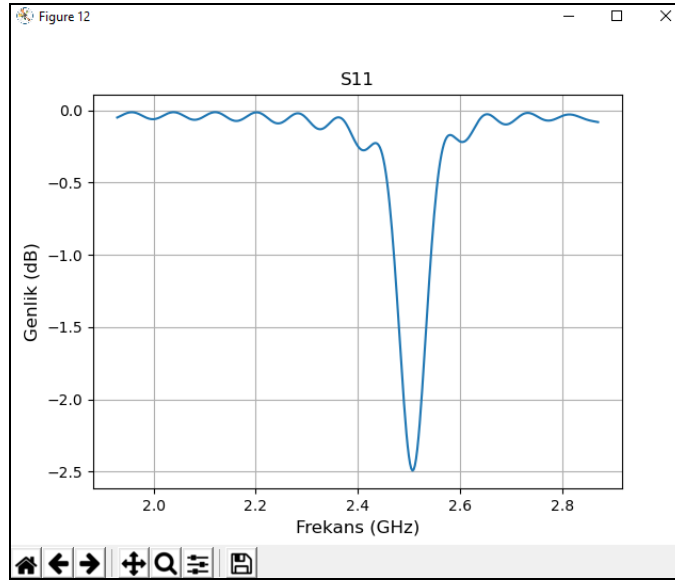
Optimizasyonu yapılan anten için örnek sayısı 2 olarak girilmiş ve ilk örnekle beraber toplamda 3 örnek alınmaktadır. Hesaplanan değer ile yapılan, ilk benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri Şekil 5.76’da, birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.77’de, ikinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.78’de ve tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.79’da ve optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.80’de verilmiştir.



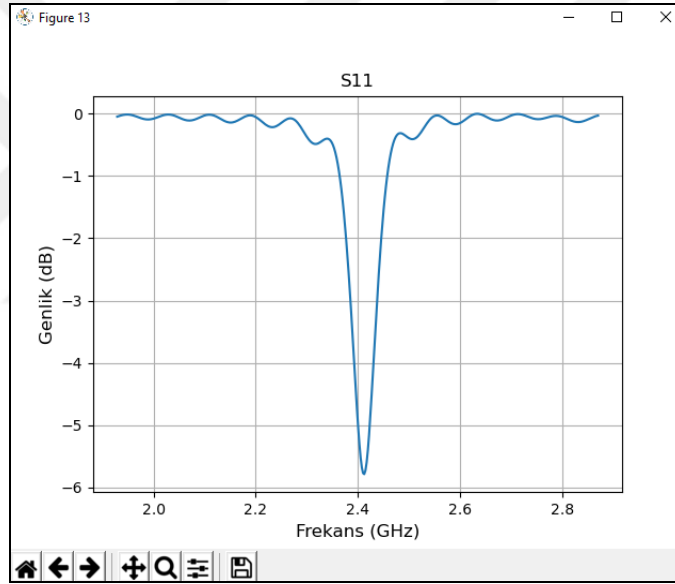
Şekil 5.76. Hesaplanan değer ile elde edilen S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



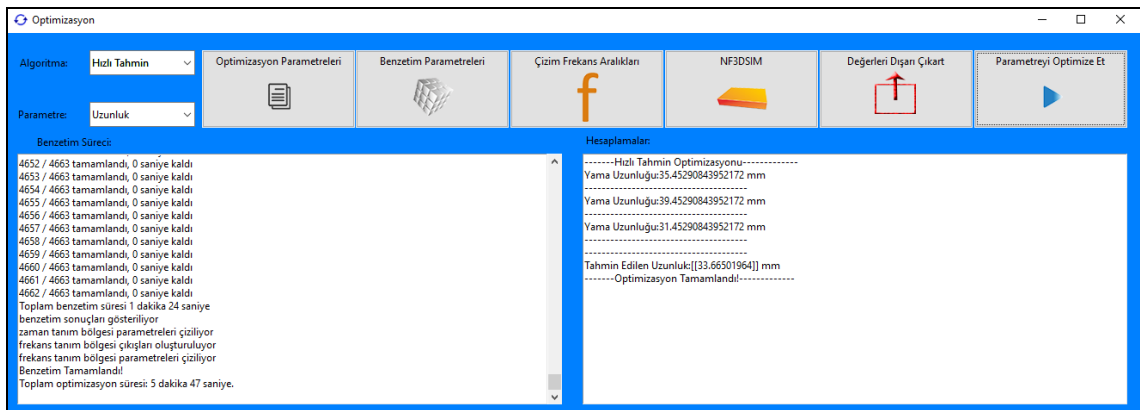
Şekil 5.77. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği



Şekil 5.78. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği

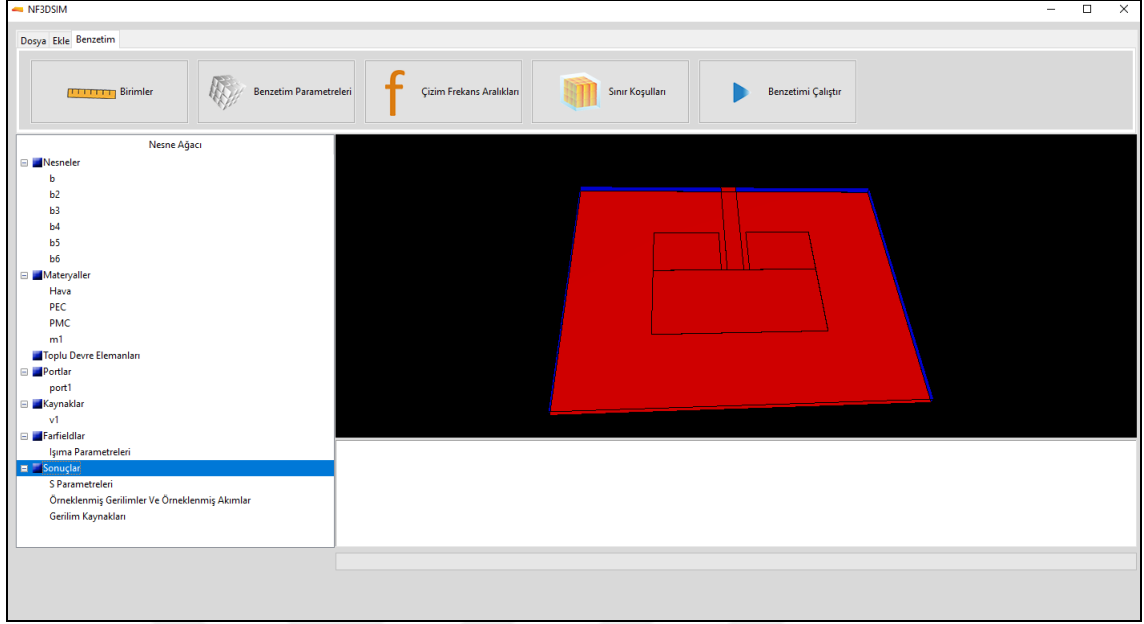


Şekil 5.79. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği



Şekil 5.80. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi

Şekil 5.81’de optimizasyonu yapılmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.81. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

Tablo 5.8’de optimizasyon algoritmalarının toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önceki yamanın uzunluk değeri ve optimizasyondan sonraki yamanın uzunluk değeri verilmiştir.

Tablo 5.8. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerler

Optimizasyon algoritması	Toplam Optimizasyon Süresi	Optimizasyondan önceki değer	Optimizasyondan sonraki değer
Adım adım	10 dakika 25 saniye	35.4529 mm	33.4529 mm
Tahmin	7 dakika 32 saniye	35.4529 mm	33.6650 mm
Hızlı Tahmin	5 dakika 47 saniye	35.4529 mm	33.6650 mm

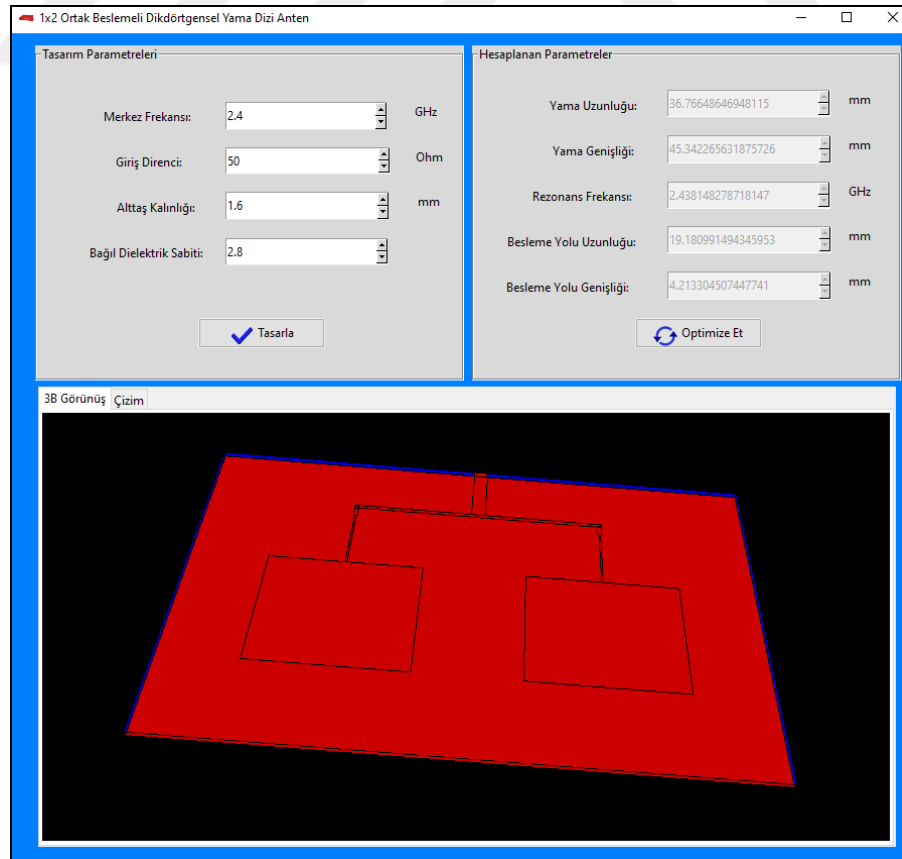
Tablo 5.9’da ise tasarlanan antenin hedeflenen merkez frekansı, tasarlanan antenin elektromanyetik benzetim sonucu görülen merkez frekansı ve anten optimizasyonu yapıldıktan sonraki merkez frekansı verilmiştir.

Tablo 5.9. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre hedef merkez frekansları ve optimizasyondan önceki ve sonraki frekansları

Optimizasyon Algoritması	Hedef merkez frekansı	Optimizasyondan önce merkez frekansı	Optimizasyondan sonra merkez frekansı
Adım adım	2.4 GHz	2.32 GHz	2.41 GHz
Tahmin	2.4 GHz	2.32 GHz	2.41 GHz
Hızlı Tahmin	2.4 GHz	2.32 GHz	2.41 GHz

5.3. 1x2 Ortak Beslemeli Dikdörtgensel Yama Dizi Anten Tasarımı ve Optimizasyonu

Merkez frekansı 2.4 GHz, giriş direnci 50 ohm, alttaş kalınlığı 1.6 mm ve alttaş bağıl dielektrik sabiti 2.8 olan 1x2 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi anten tasarlanmıştır. Antenin tasarım penceresi Şekil 5.82’de verilmiştir.



Şekil 5.82. 1x2 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi antenin tasarım penceresi

Antenin yama uzunlukları 36.7664 mm, yama genişlikleri 45.3422 mm, besleme yolu uzunluğu 19.1809 mm ve besleme yolu genişliği 4.2133 mm olarak hesaplanmıştır. ANTDESVS yazılımında ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları ise Tablo 5.10’da verilmiştir.

Tablo 5.10. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları

Uzunluk tipi	ANTDESVS programındaki anten uzunlukları	Ticari bir anten tasarım programındaki anten uzunluklar
Yama uzunluğu	36.7664 mm	35.64 mm
Yama genişliği	45.3422 mm	43.95 mm
Besleme yolu uzunluğu	19.1809 mm	20.68 mm
Besleme yolu genişliği	4.2133 mm	4.213 mm

Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları Şekil 5.83’te, anten benzetim parametreleri Şekil 5.84’te ve antenin optimizasyonu için girilen optimizasyon parametreleri Şekil 5.85’te verilmiştir.

Şekil 5.83. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları

Benzetim Parametreleri

Zaman Adımı Sayısı: 7000

Birim hücrenin x, y ve z boyutları:

bx: 1.6 mm

by: 1.6 mm

bz: 1.6 mm

TAMAM İptal

Şekil 5.84. Anten için girilen benzetim parametreleri

Optimizasyon Parametreleri

Adım Adım

Optimizasyon Adımı: 3 mm

Tolerans: 0.05 GHz

Tahmin

Örnek Sayısı: 2

Örnekler Aralığı: 3 mm

Hızlı Tahmin

Örnek Sayısı: 2

Örnekler Aralığı: 3 mm

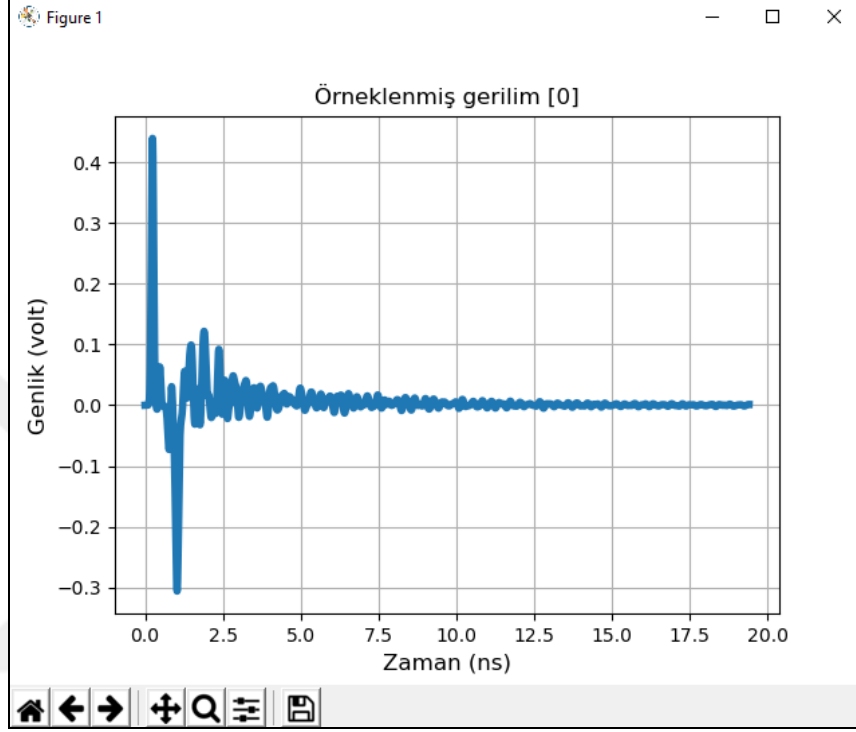
TAMAM İptal

Şekil 5.85. Anten için girilen optimizasyon parametreleri

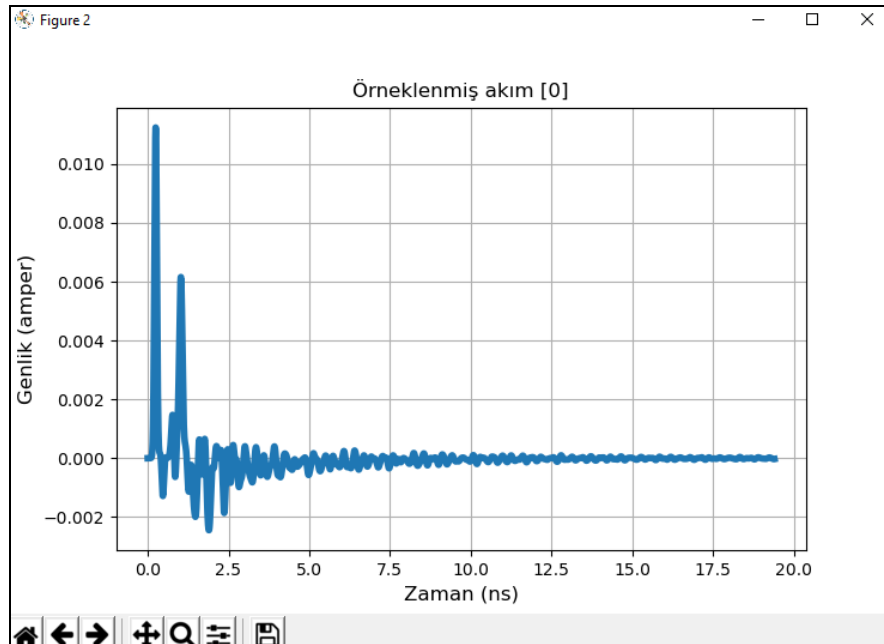
5.3.1. Antenin Adım Adım Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

Antenin optimizasyonu için adım adım optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Hesaplanan değerlerin benzetiminden sonra optimizasyonu 4 adımda tamamlamıştır. Hesaplanan değerlerle yapılan benzetim sonrası elde edilen zaman tanım bölgesindeki

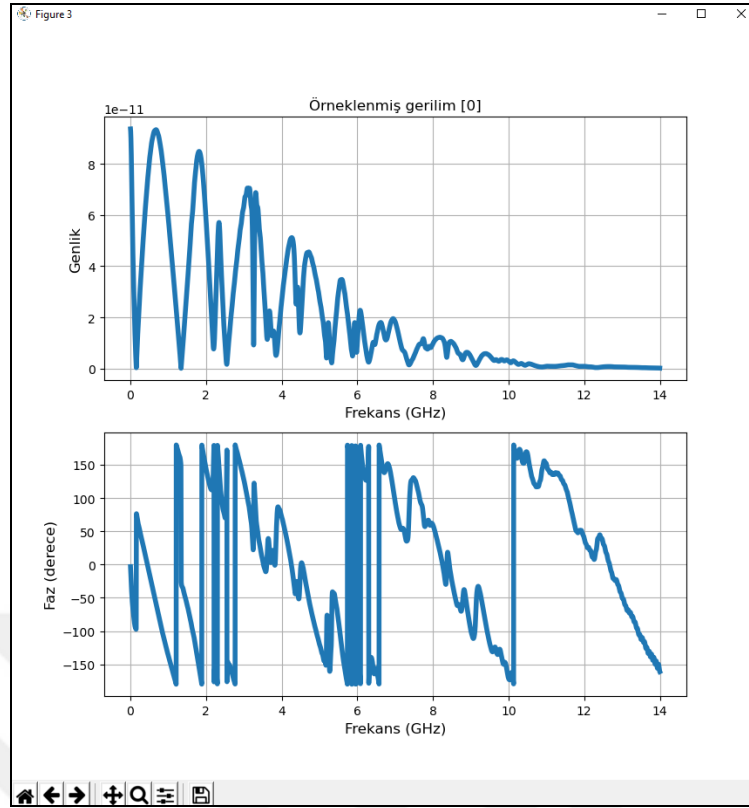
örneklenmiş gerilim grafiği Şekil 5.86'da, zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği Şekil 5. 87'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri Şekil 5.88'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri Şekil 5.89'da, frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri Şekil 5.90'da verilmiştir.



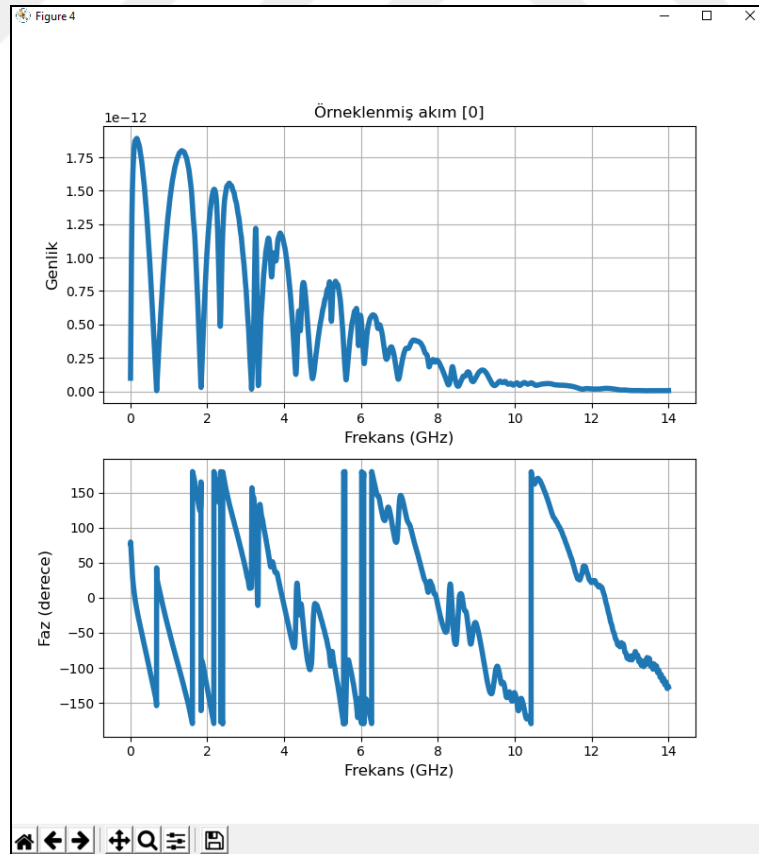
Şekil 5.86. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği



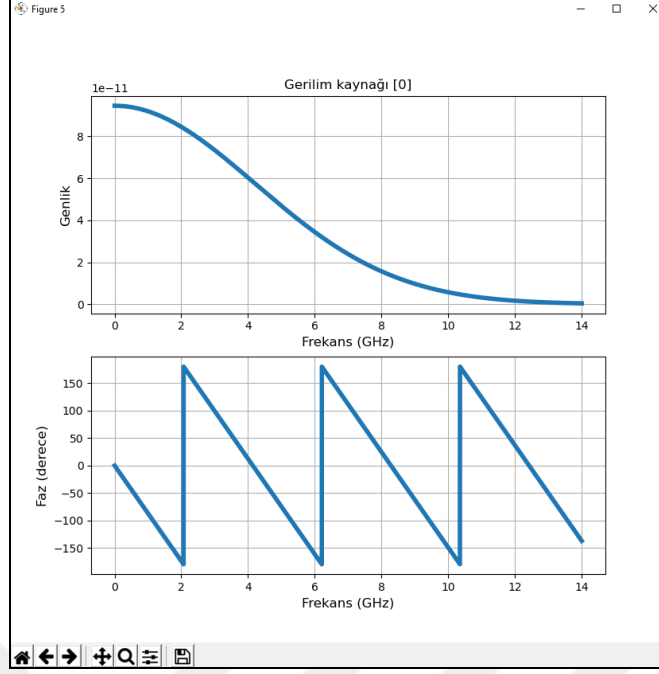
Şekil 5.87. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği



Şekil 5.88. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri

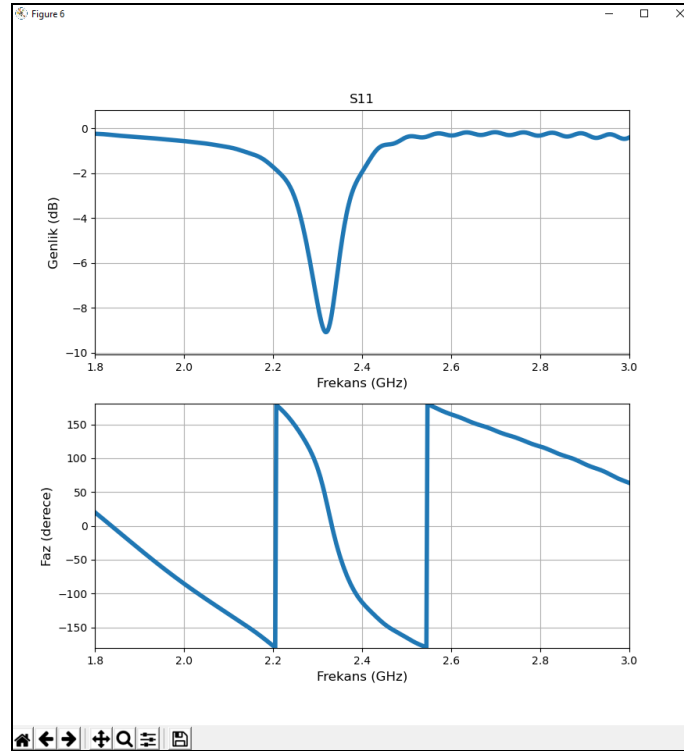


Şekil 5.89. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri

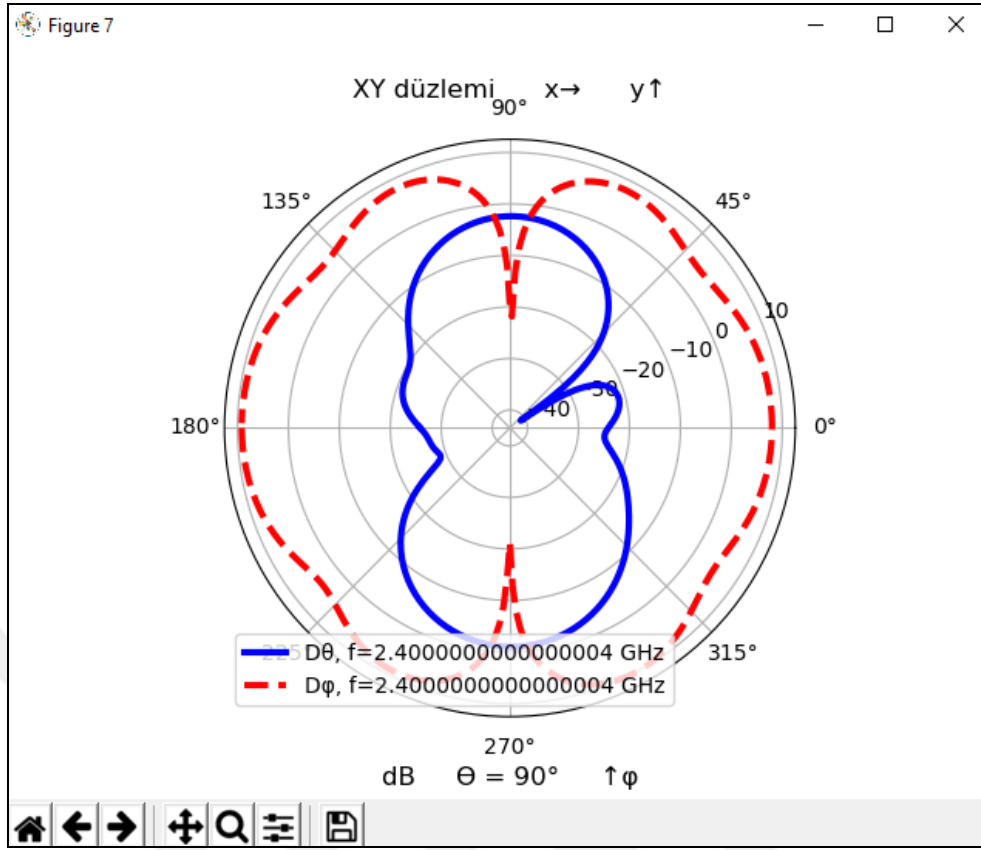


Şekil 5.90. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri

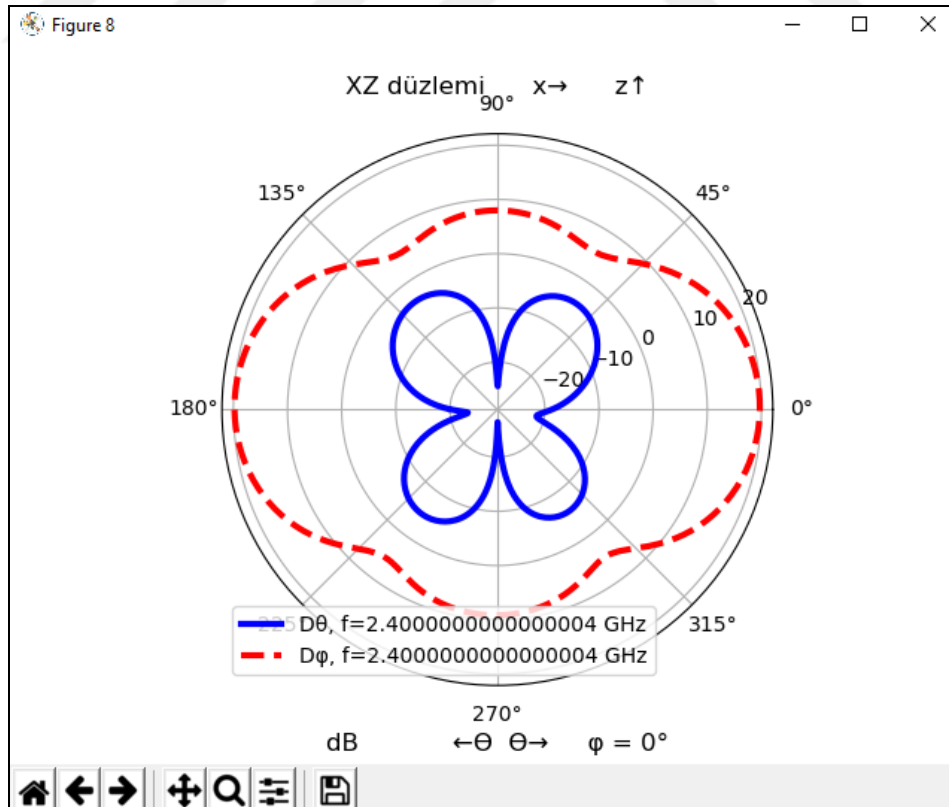
Hesaplanan değerlerle yapılan benzetim sonrası elde edilen S_{11} parametresinin genlik ve faz grafikleri Şekil 5.91'de, XY düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.92'de, XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.93'te ve YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.94'te gösterilmiştir.



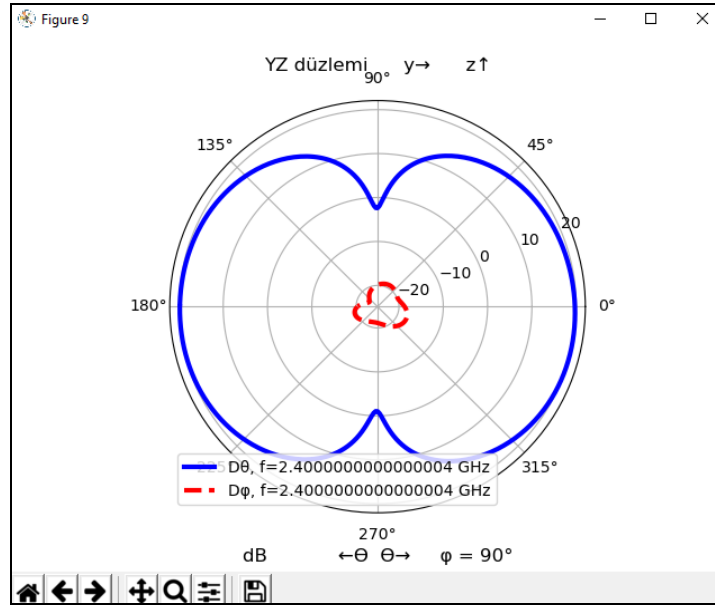
Şekil 5.91. S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



Şekil 5.92. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği

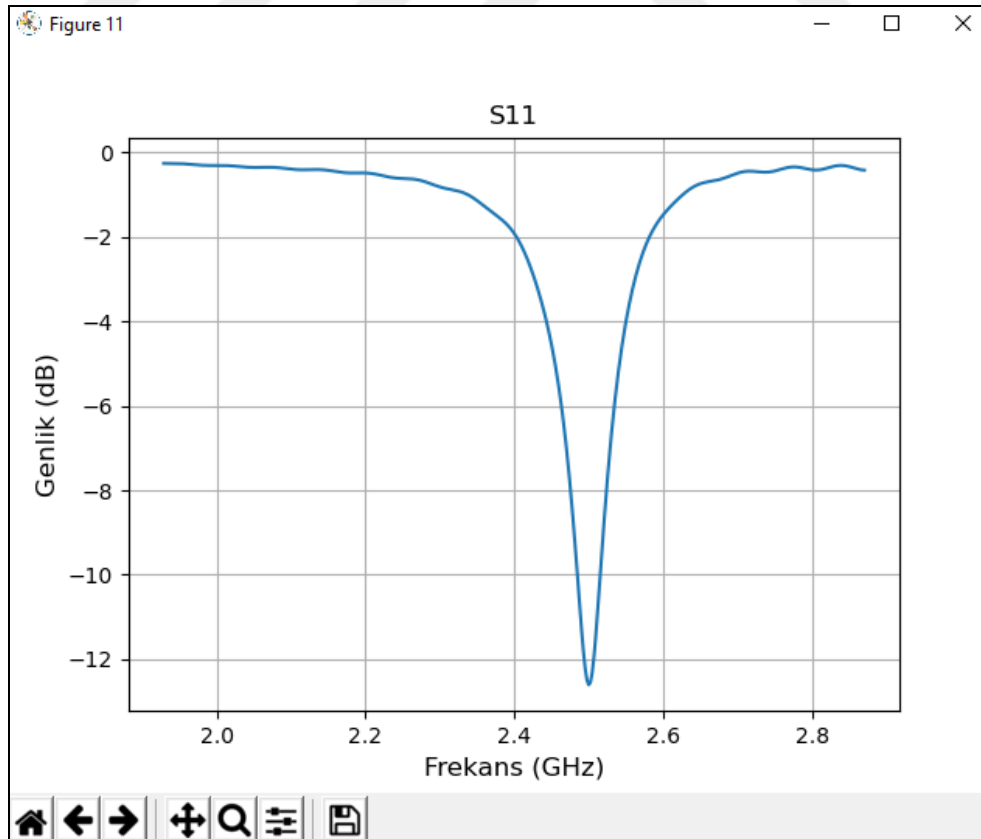


Şekil 5.93. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

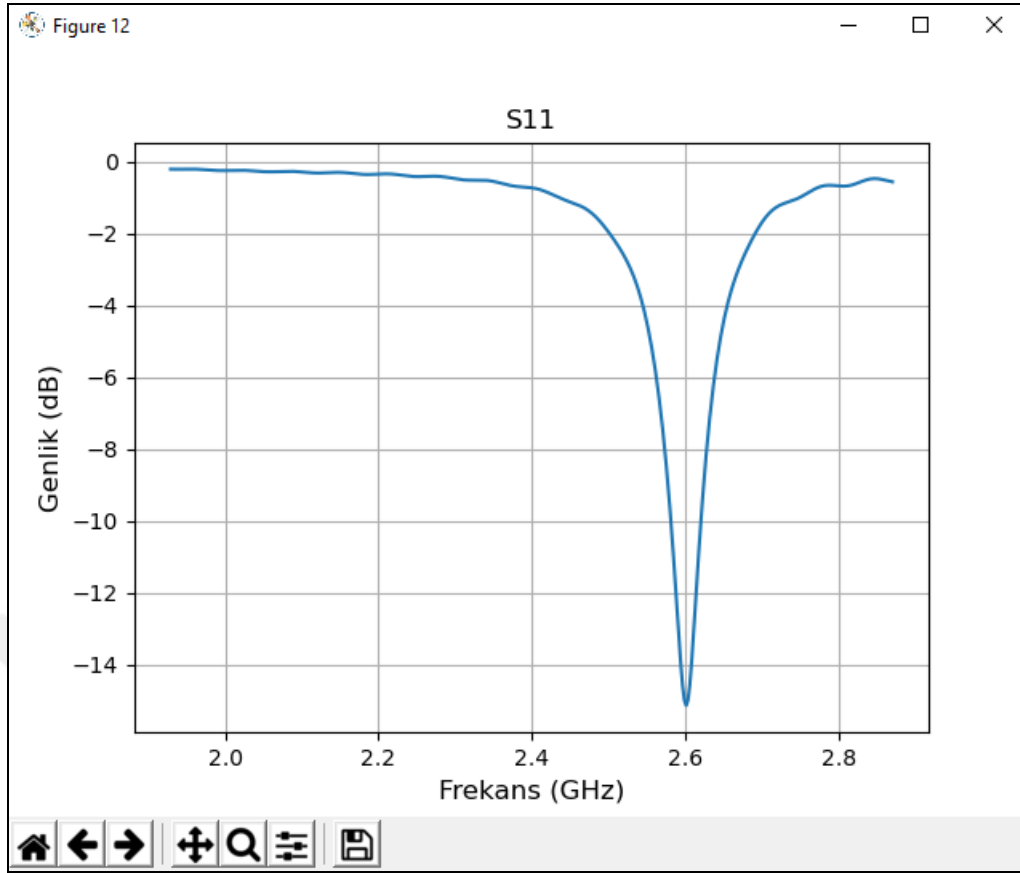


Şekil 5.94. YZ düzlemine ışıma karakteristiği

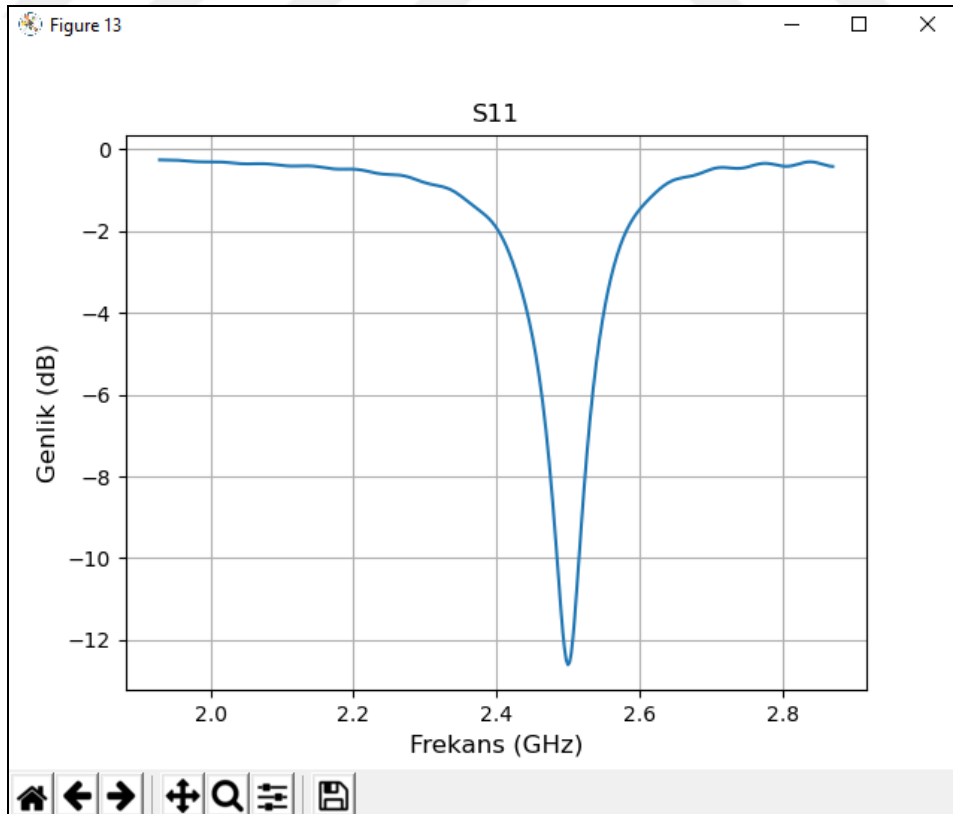
Birinci adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.95'te, ikinci adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.96'da, üçüncü adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.97'de ve dördüncü adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.98'de gösterilmiştir.



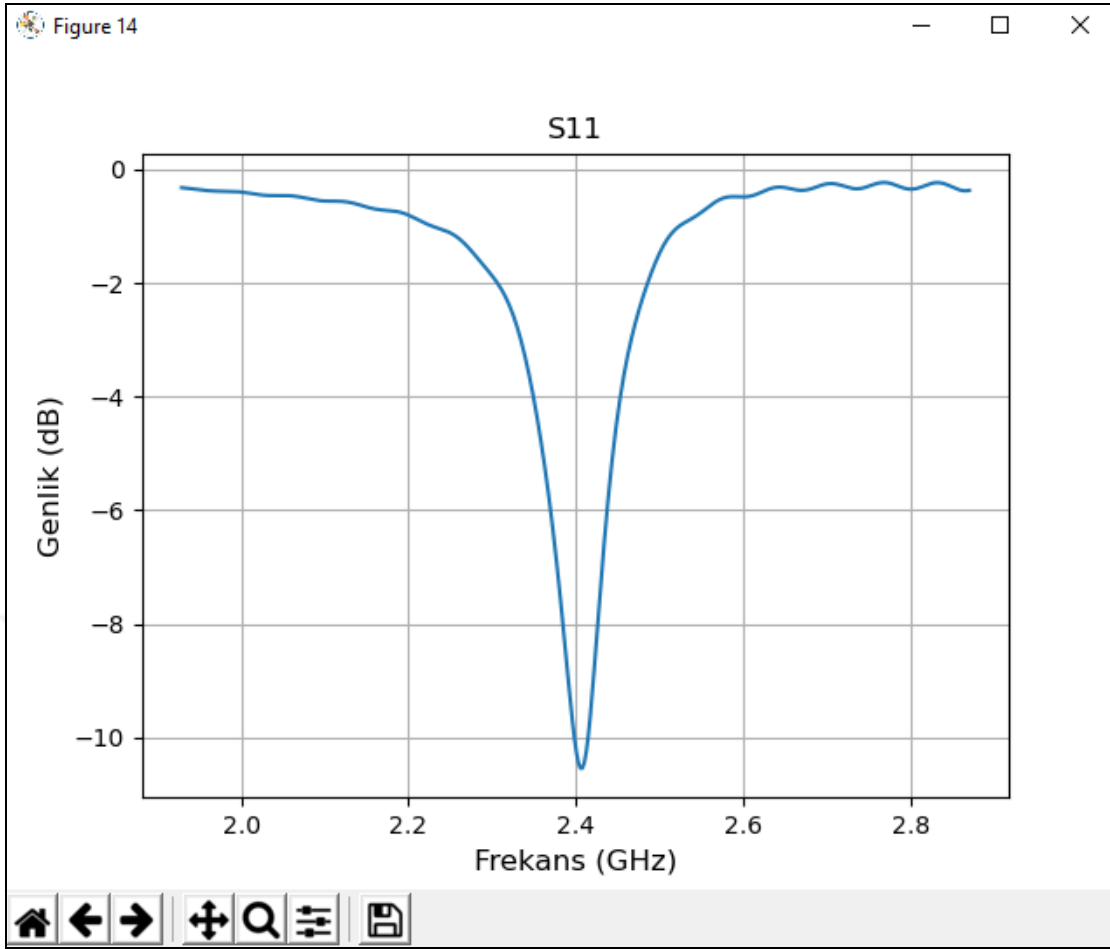
Şekil 5.95. Birinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği



Şekil 5.96. İkinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği

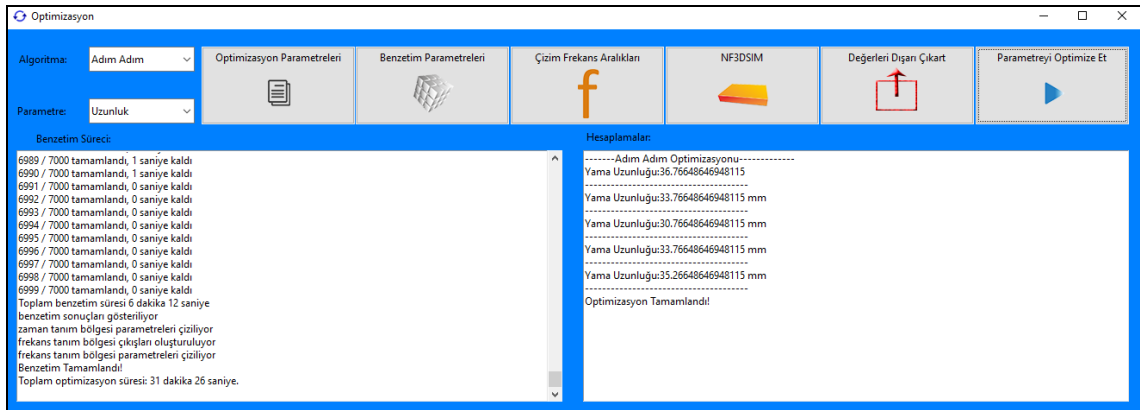


Şekil 5.97. Üçüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği

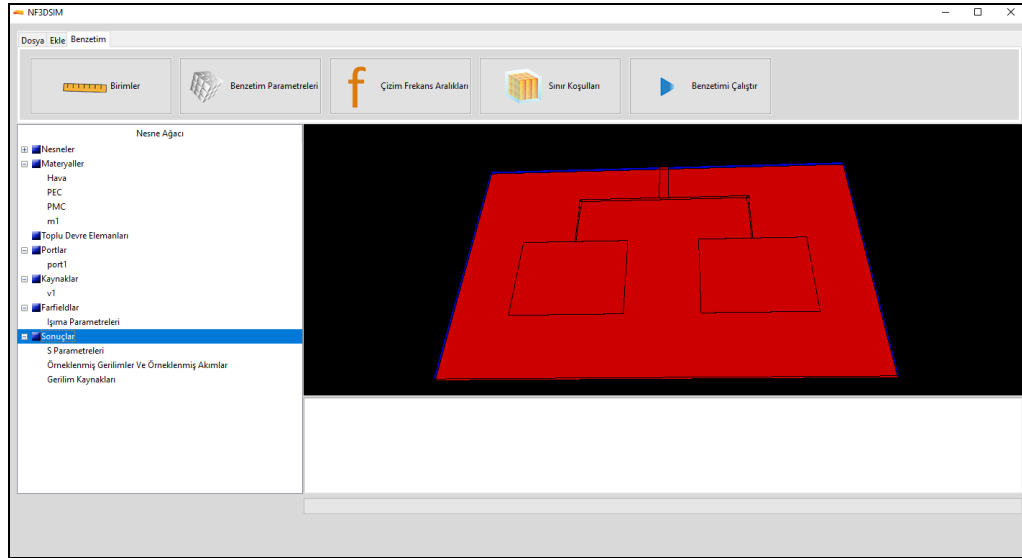


Şekil 5.98. Dördüncü adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği

Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.99’da, optimizasyonu yapılmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü Şekil 5.100’de verilmiştir.



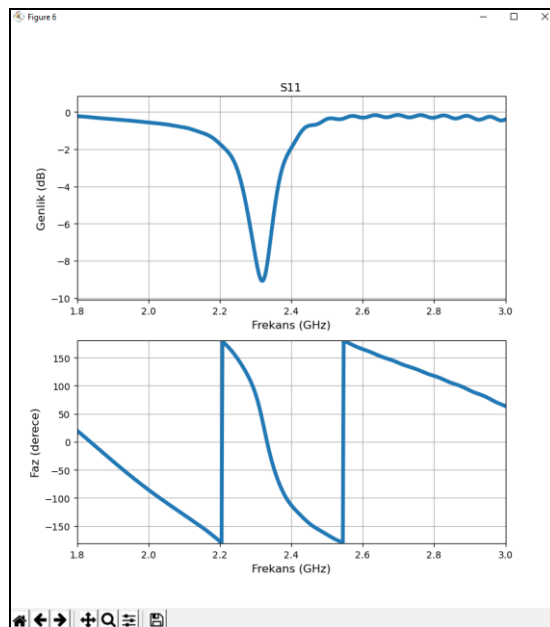
Şekil 5.99. Adım adım optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi



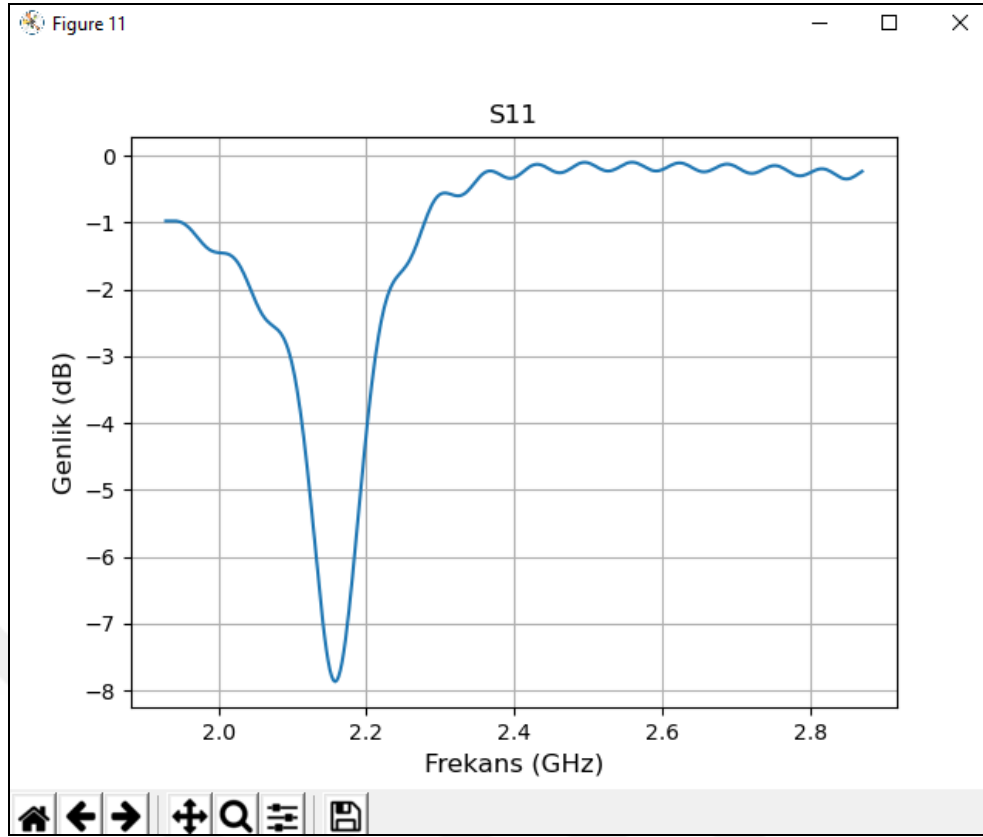
Şekil 5.100. Adım adım optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

5.3.2. Antenin Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

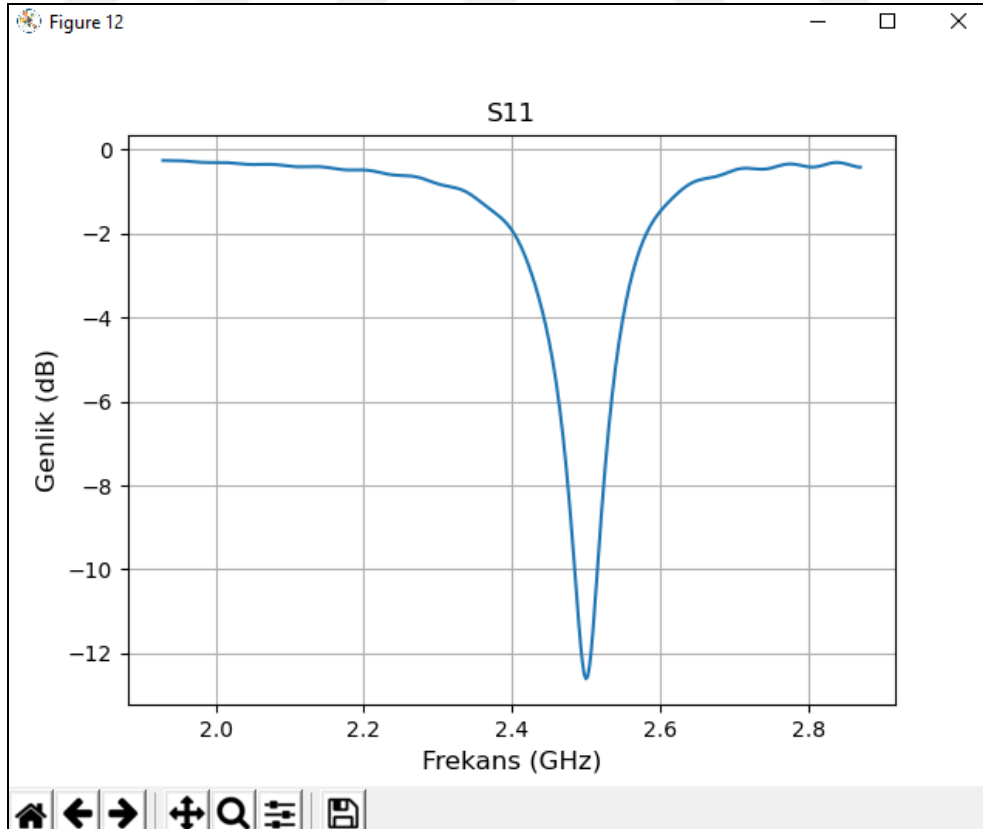
Tahmin optimizasyonu ile antenin optimizasyonu yapılmıştır. Bu anten için örnek sayısı 2 olarak girilmiş, hesaplanan değerlerle yapılan benzetim ile beraber toplamda 3 örnek alınmıştır. Hesaplanan değer ile yapılan benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri Şekil 5.101’de, birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.102’de, ikinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.103’te ve tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.104’te gösterilmiştir.



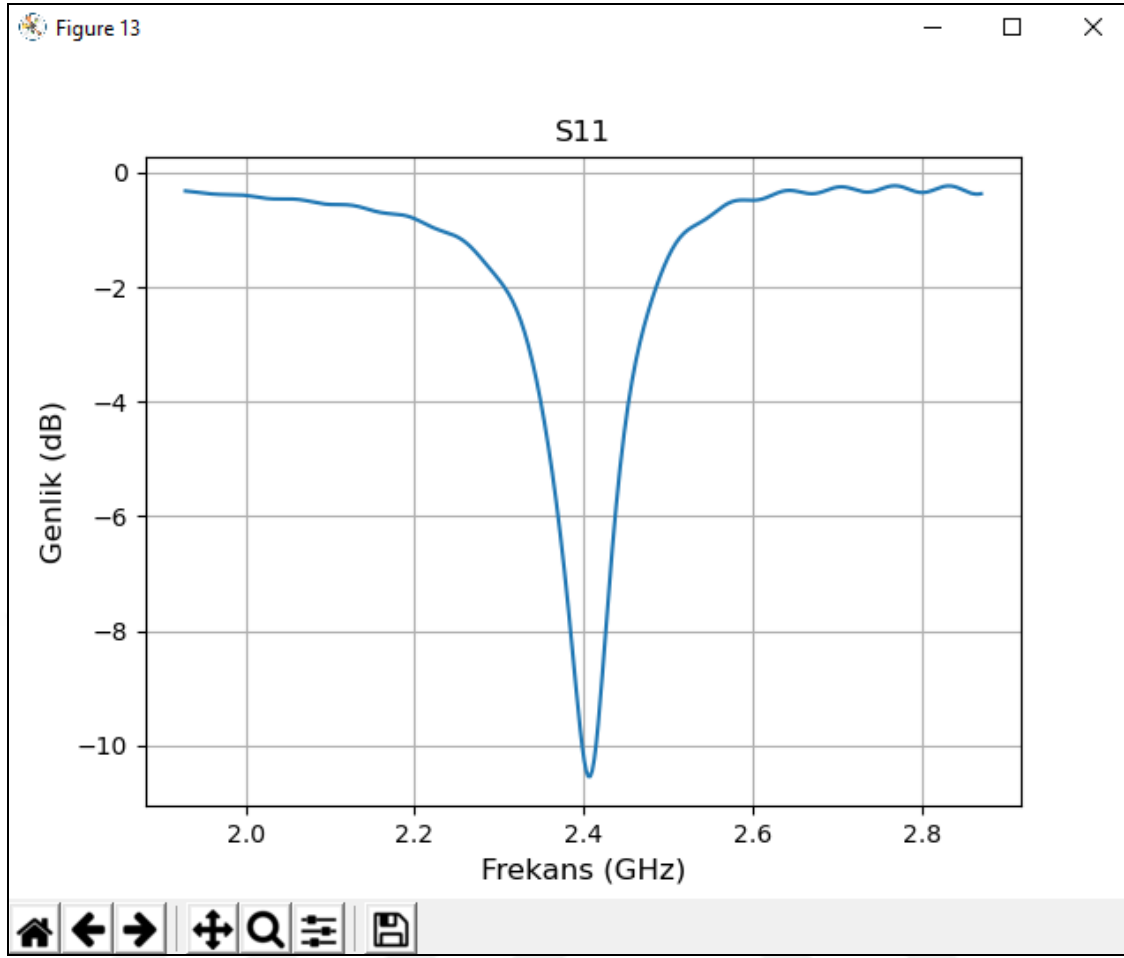
Şekil 5.101. İlk örnek olan S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



Şekil 5.102. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği

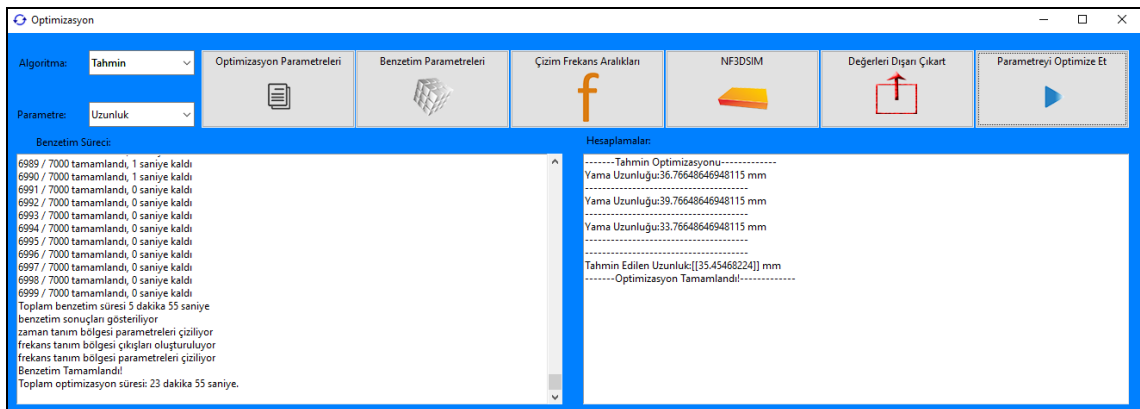


Şekil 5.103. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği

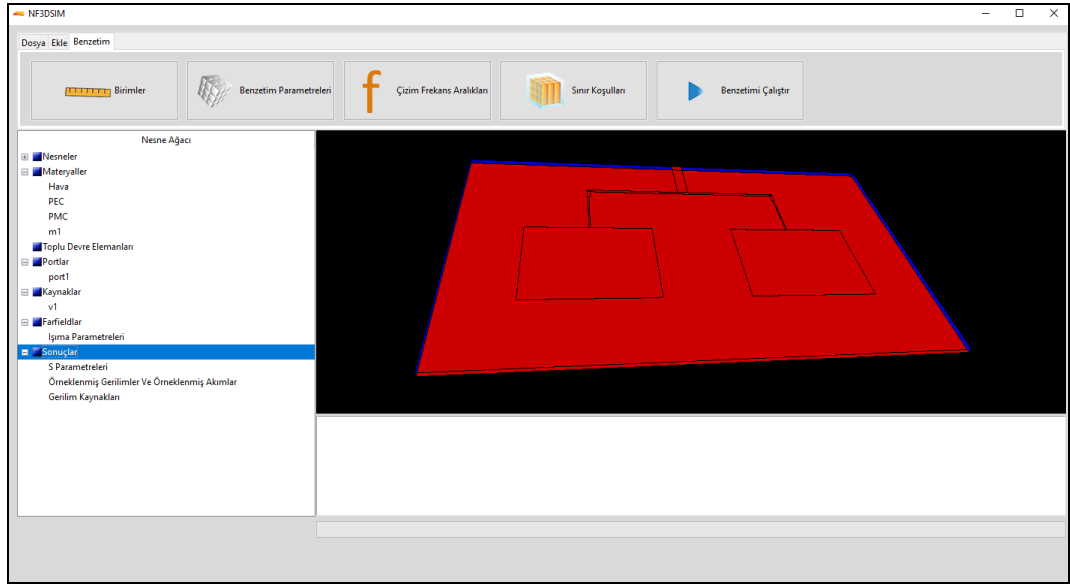


Şekil 5.104. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği

Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.105'te ve optimizasyon sonucunda oluşan antenin tasarımının NF3DSIM programındaki görüntüsü Şekil 5.106'da verilmiştir.



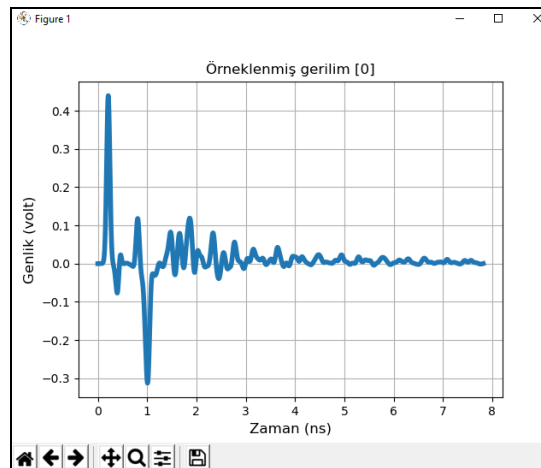
Şekil 5.105. Tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi



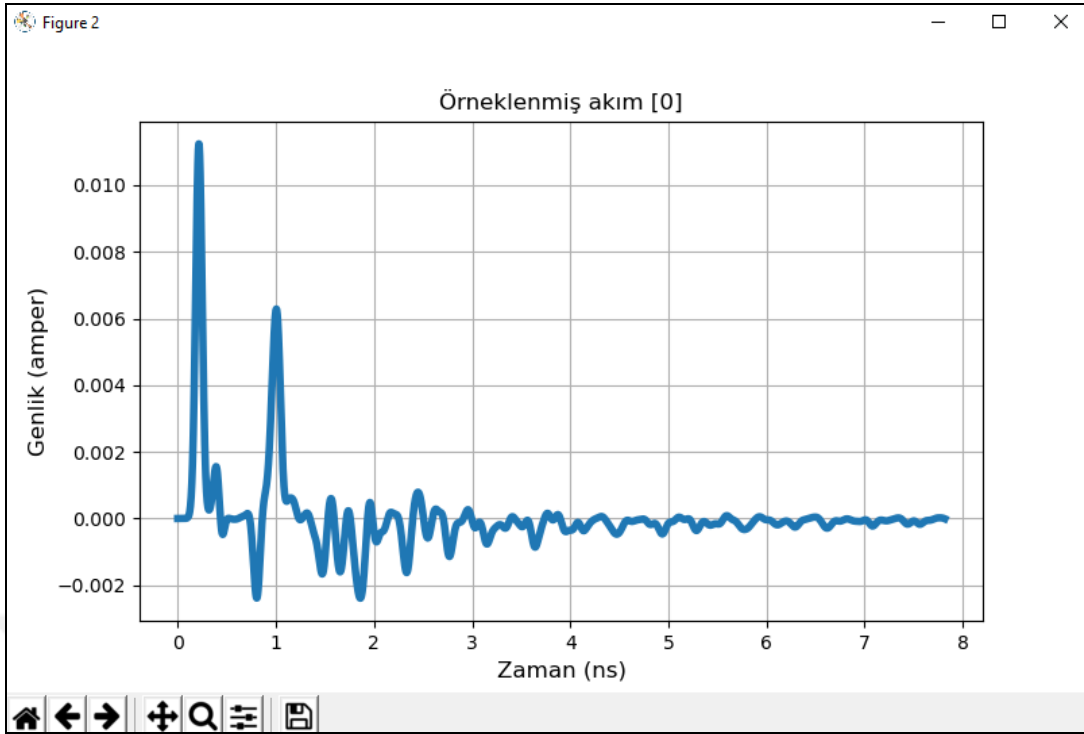
Şekil 5.106. Tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

5.3.3. Antenin Hızlı Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

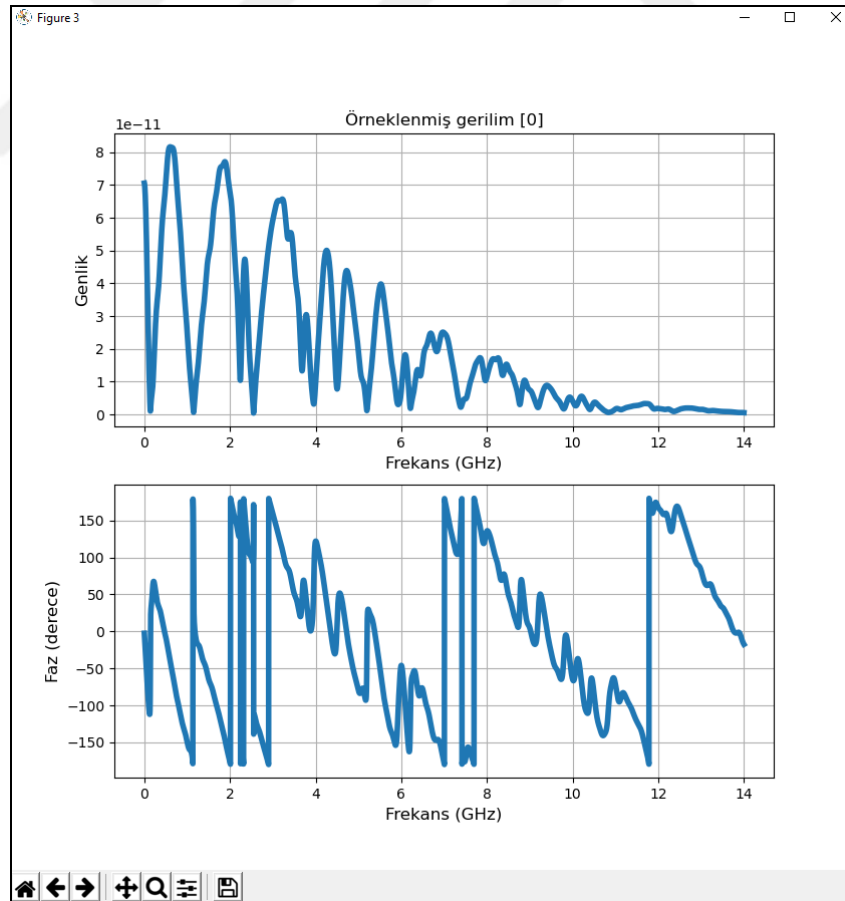
Antenin optimizasyonu hızlı tahmin optimizasyonu ile yapılmıştır. Anten optimizasyonu için örnek sayısı 2 olarak girilmiş ve ilk benzetimin de alınmasıyla toplamda 3 örnek alınmıştır. Hesaplanan değerler ile yapılan benzetim sonucu elde edilen zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği Şekil 5.107'de, zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği Şekil 5.108'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri Şekil 5.109'da, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri Şekil 5.110'da, frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri Şekil 5.111'de verilmiştir.



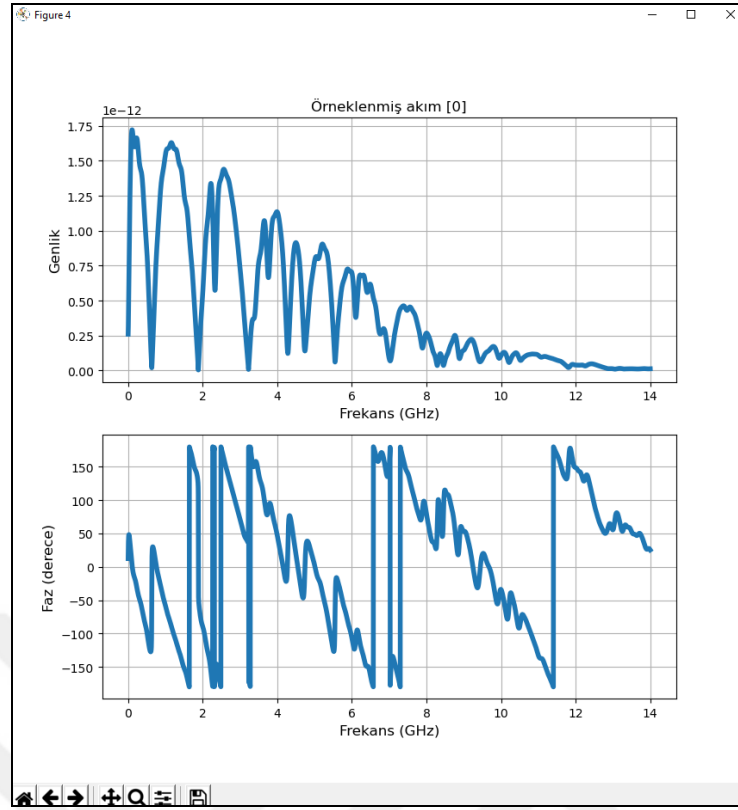
Şekil 5.107. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği



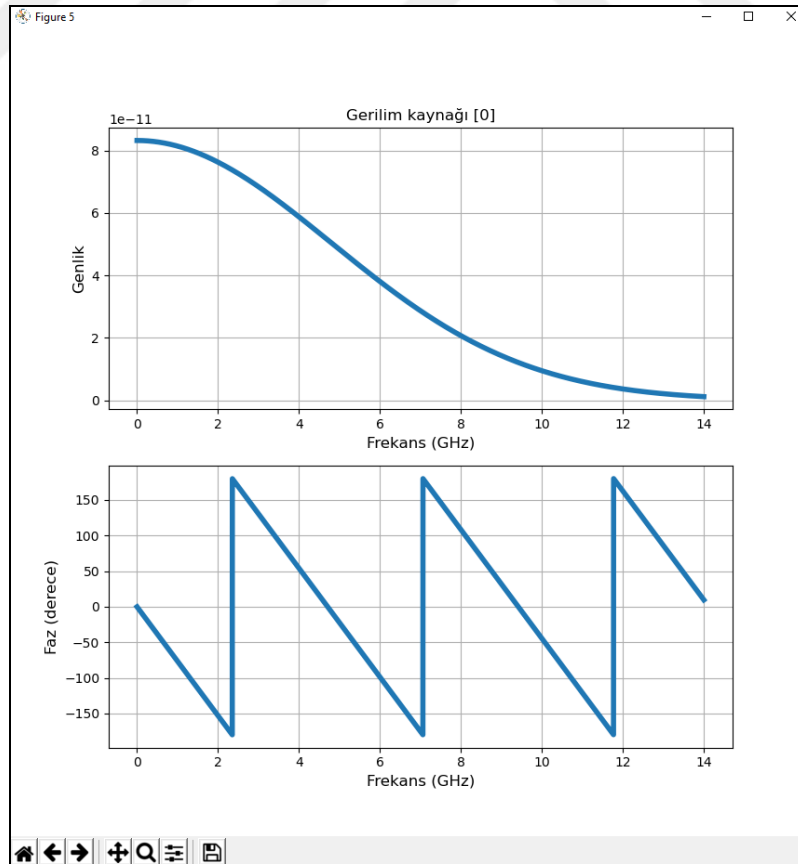
Şekil 5.108. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği



Şekil 5.109. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri

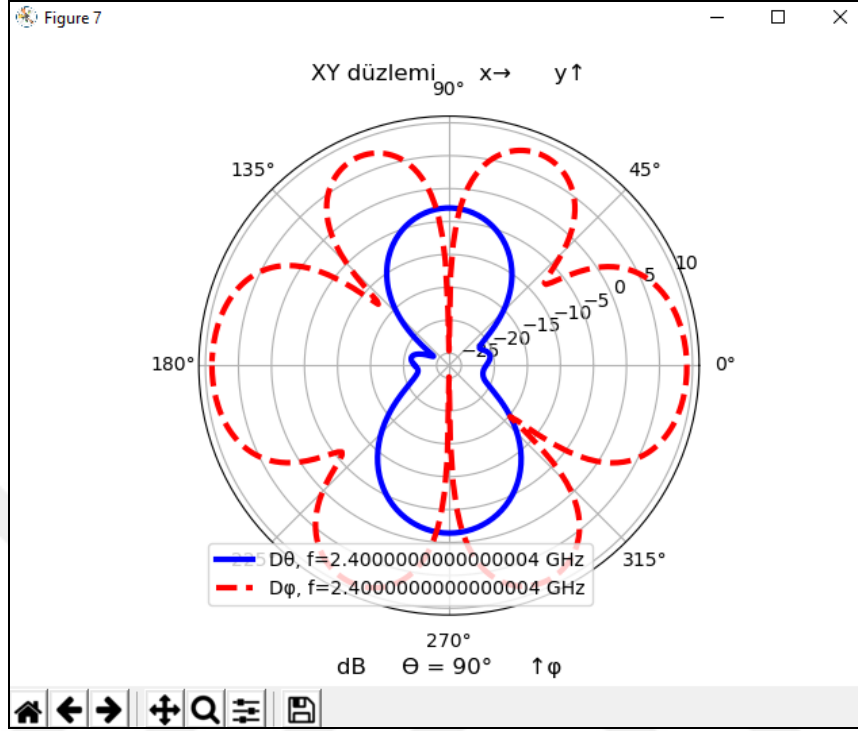


Şekil 5.110. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri

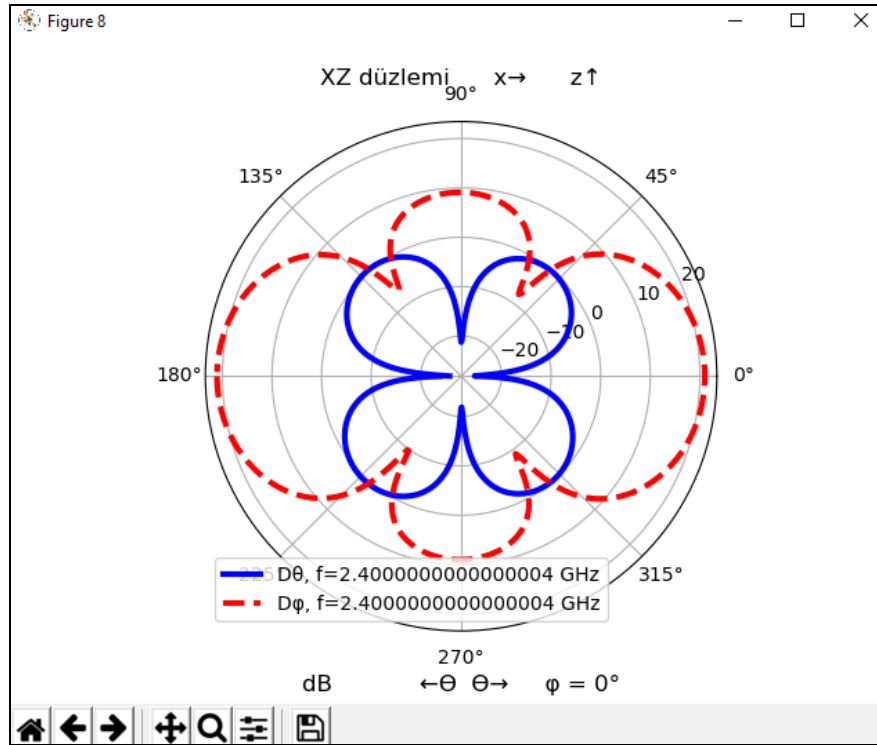


Şekil 5.111. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri

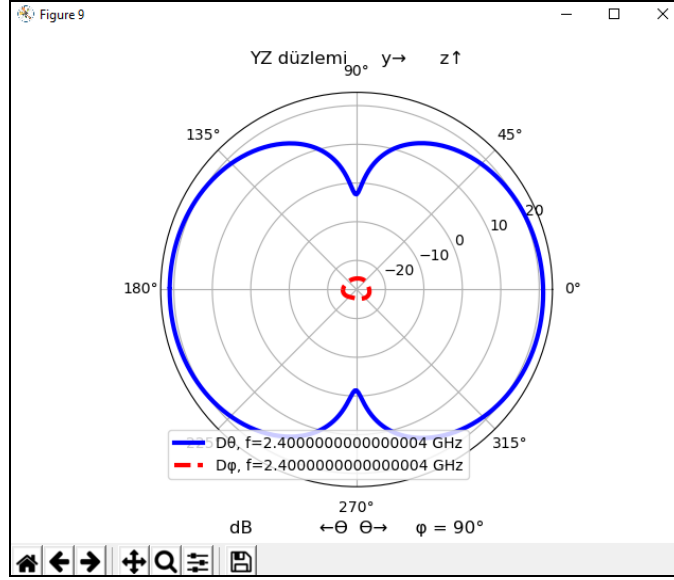
Hesaplanan değerler ile yapılan benzetim sonrası elde edilen XY düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.112'de, XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.113'te ve YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.114'te gösterilmiştir.



Şekil 5.112. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği

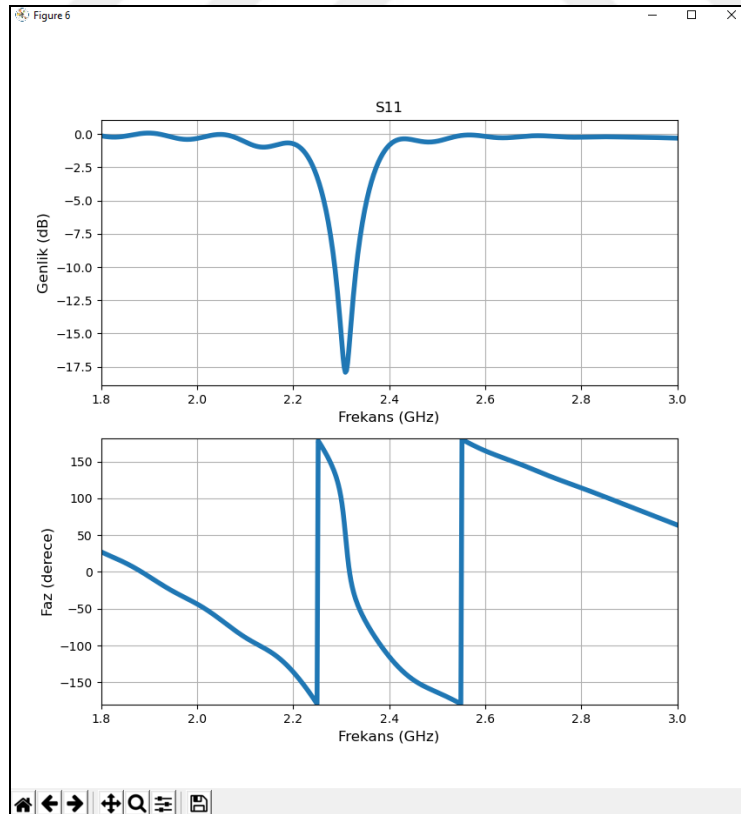


Şekil 5.113. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

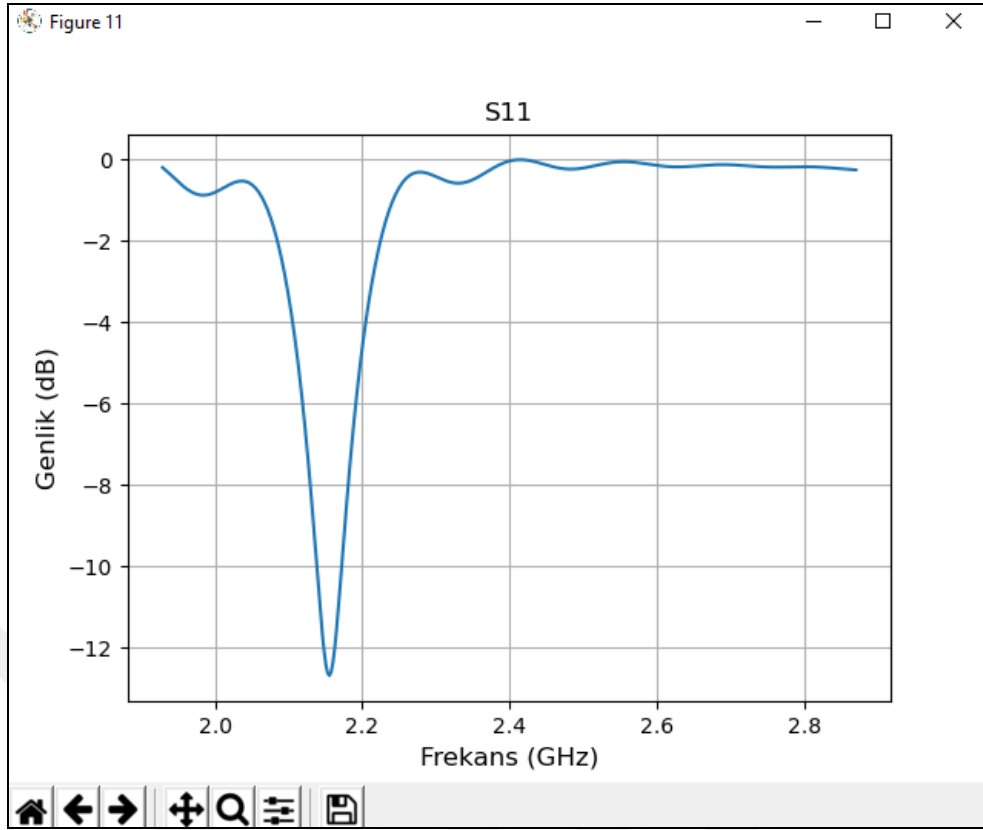


Şekil 5.114. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

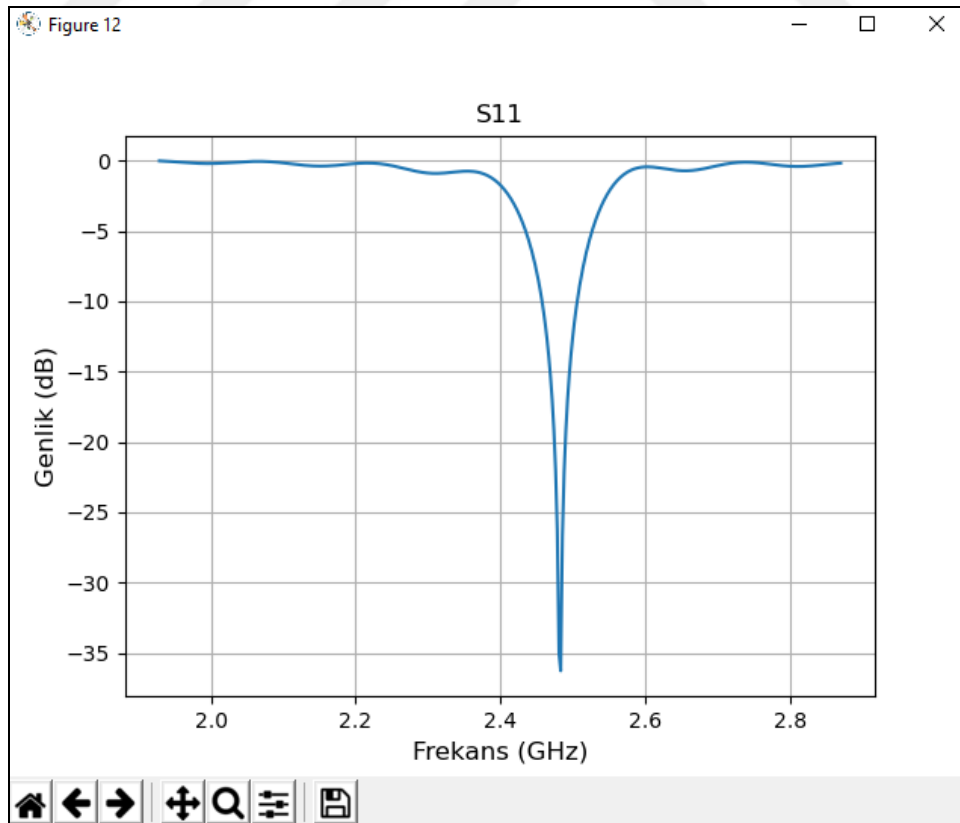
Hesaplanan değer ile yapılan benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri Şekil 5.115'te, birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.116'da, ikinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.117'de ve tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.118'de verilmiştir.



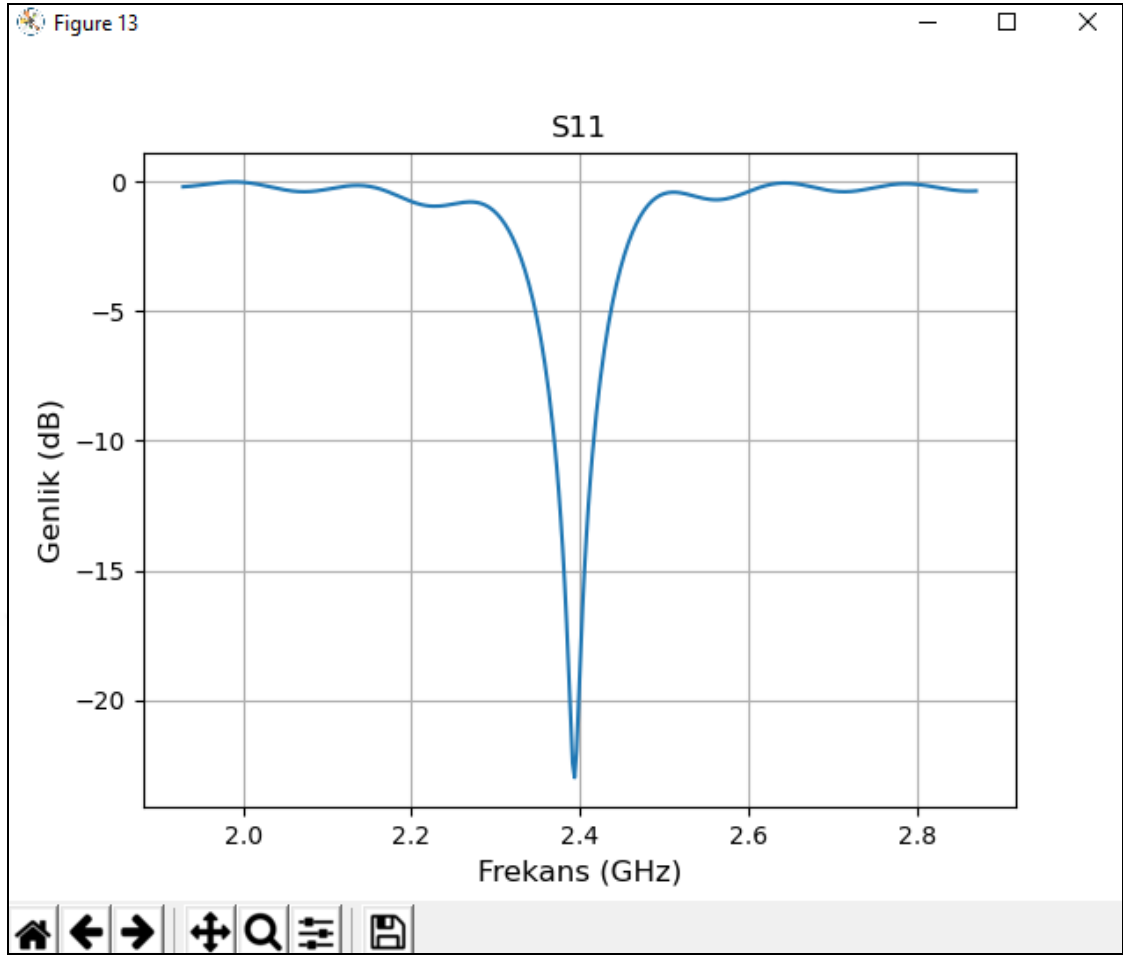
Şekil 5.115. Hesaplanan değer ile elde edilen S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



Şekil 5.116. Birinci örnek olan S₁₁ parametresi grafiği

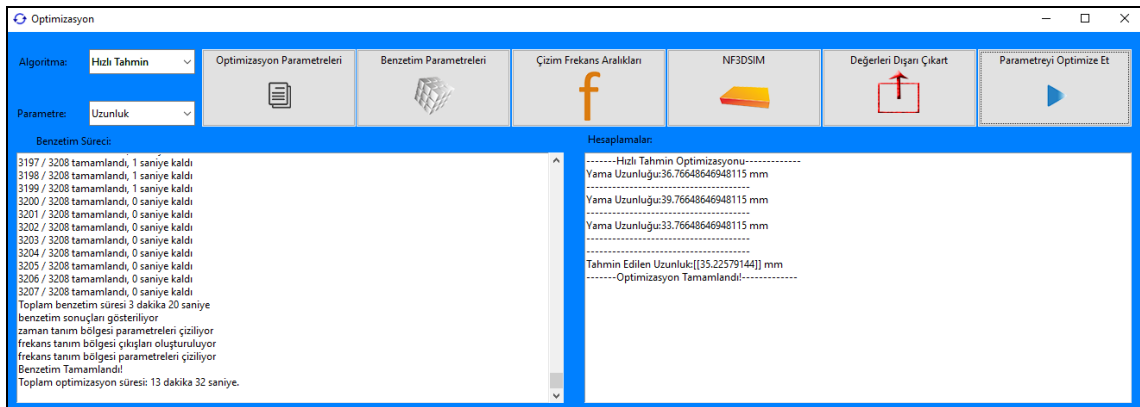


Şekil 5.117. İkinci örnek olan S₁₁ parametresi grafiği

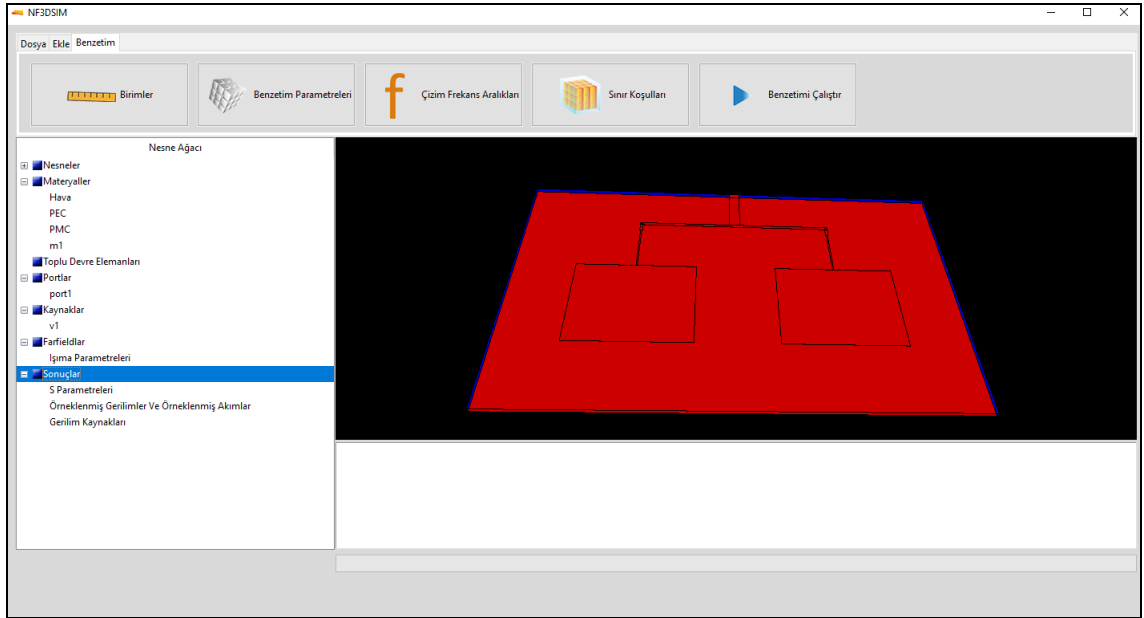


Şekil 5.118. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği

Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.119’da verilmiştir. Optimizasyon sonucu oluşan antenin tasarımı ise Şekil 5.120’de verilmiştir.



Şekil 5.119. Hızlı tahmin optimizasyonu uygulanan optimizasyon penceresi



Şekil 5.120. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

Tablo 5.11’de optimizasyon algoritmalarının toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önceki yamaların uzunluk değeri ve optimizasyondan sonraki yamaların uzunluk değeri, Tablo 5.12’de ise tasarlanan antenin hedeflenen merkez frekansı, tasarlanan antenin elektromanyetik benzetim sonucu görülen merkez frekansı ve anten optimizasyonu yapıldıktan sonraki merkez frekansı verilmiştir.

Tablo 5.11. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerler

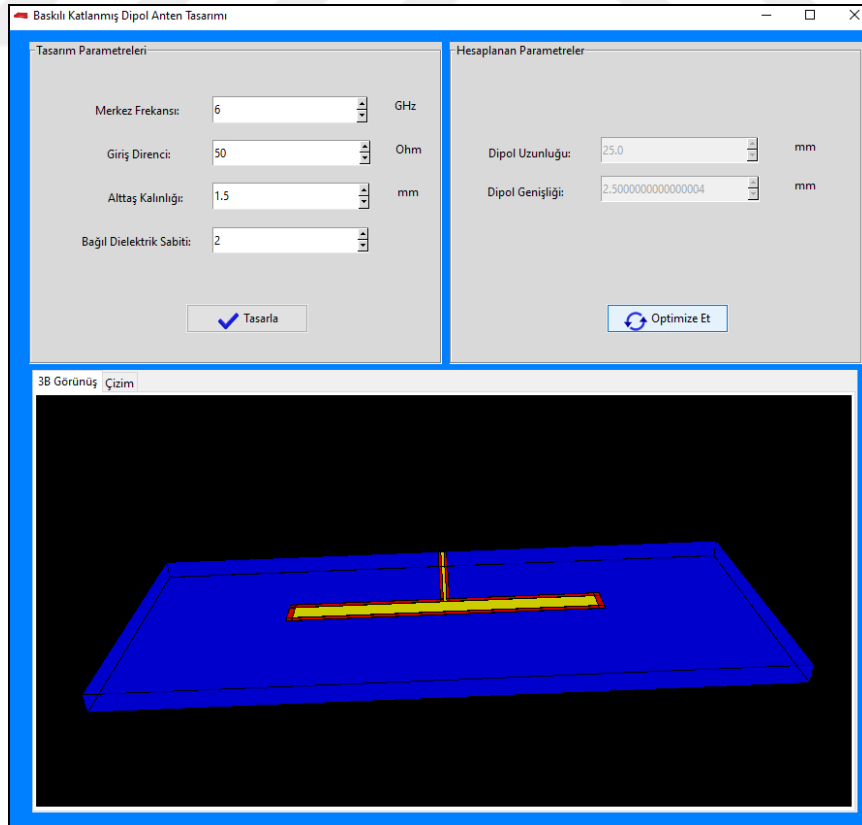
Optimizasyon algoritması	Toplam Optimizasyon Süresi	Optimizasyondan önceki değer	Optimizasyondan sonraki değer
Adım adım	31 dakika 26 saniye	36.7664 mm	35.2664 mm
Tahmin	23 dakika 55 saniye	36.7664 mm	35.4546 mm
Hızlı Tahmin	13 dakika 32 saniye	36.7664 mm	35.2257 mm

Tablo 5.12. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre hedef merkez frekansları ve optimizasyondan önceki ve sonraki frekansları

Optimizasyon Algoritması	Hedef merkez frekansı	Optimizasyondan önce merkez frekansı	Optimizasyondan sonra merkez frekansı
Adım adım	2.4 GHz	2.31 GHz	2.40 GHz
Tahmin	2.4 GHz	2.31 GHz	2.40 GHz
Hızlı Tahmin	2.4 GHz	2.30 GHz	2.39 GHz

5.4. Baskılı Katlanmış Dipol Anten Tasarımı ve Optimizasyonu

Merkez frekansı 6 GHz, giriş direnci 50 ohm, alttaş kalınlığı 1.5 mm ve alttaş bağlı dielektrik sabiti 2 olan baskılı katlanmış dipol anten tasarlanmıştır. Antenin tasarım penceresi Şekil 5.121’de verilmiştir.



Şekil 5.121. Baskılı katlanmış dipol anten tasarım penceresi

ANTDESVS yazılımında ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları ise Tablo 5.13'te verilmiştir.

Tablo 5.13. ANTDESVS programında hesaplanan anten uzunlukları ve ticari bir anten tasarım programında hesaplanan anten uzunlukları

Uzunluk tipi	ANTDESVS programındaki anten uzunlukları	Ticari anten tasarım programındaki anten uzunlukları
Dipol uzunluğu	25.0 mm ($\lambda/2$)	19.82 mm
Dipol genişliği	2.5 mm (0.05λ)	2.29 mm

Antenin dipol uzunlukluğu 25 mm ve dipol genişlikleri 2.5 mm olarak hesaplanmıştır. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları Şekil 5.122'de, anten benzetim parametreleri Şekil 5.123'te ve antenin optimizasyonu için girilen optimizasyon parametreleri Şekil 5.124'te verilmiştir.

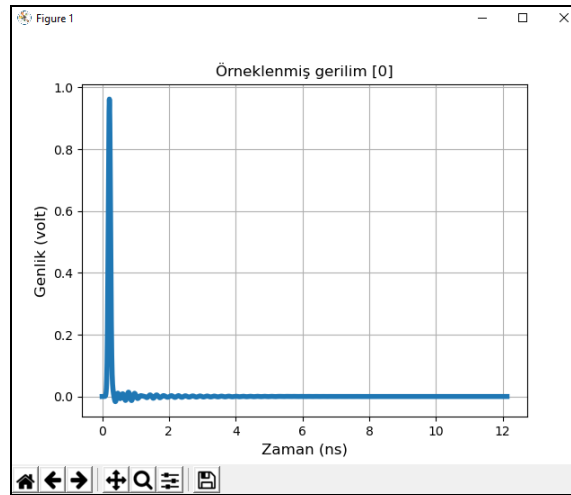
Şekil 5.122. Antenin S_{11} çizim frekans aralıkları

Şekil 5.123. Anten için girilen benzetim parametreleri

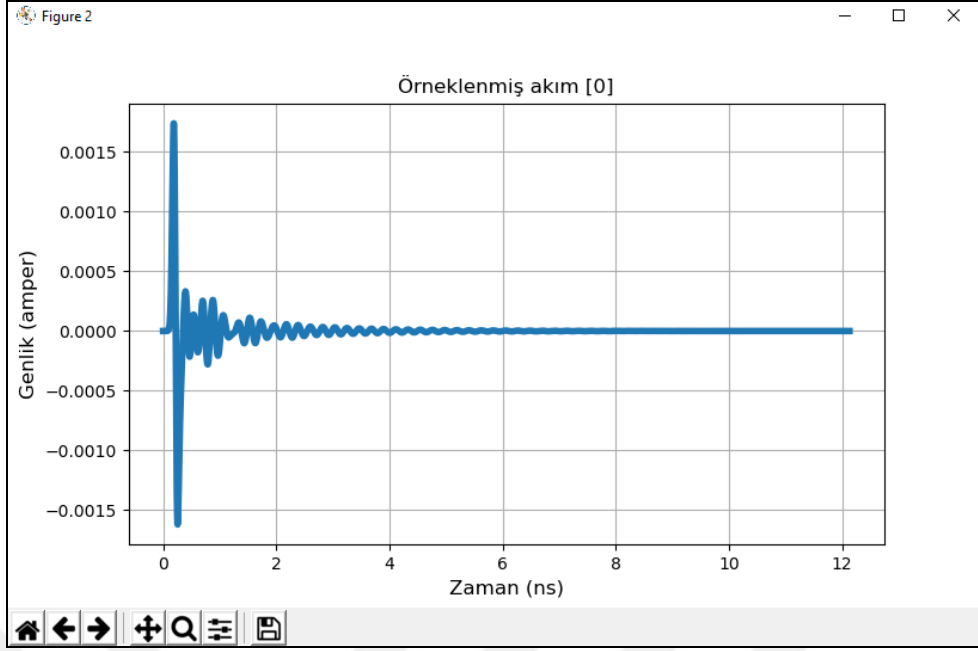
Şekil 5.124. Anten için girilen optimizasyon parametreleri

5.4.1. Antenin Adım Adım Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

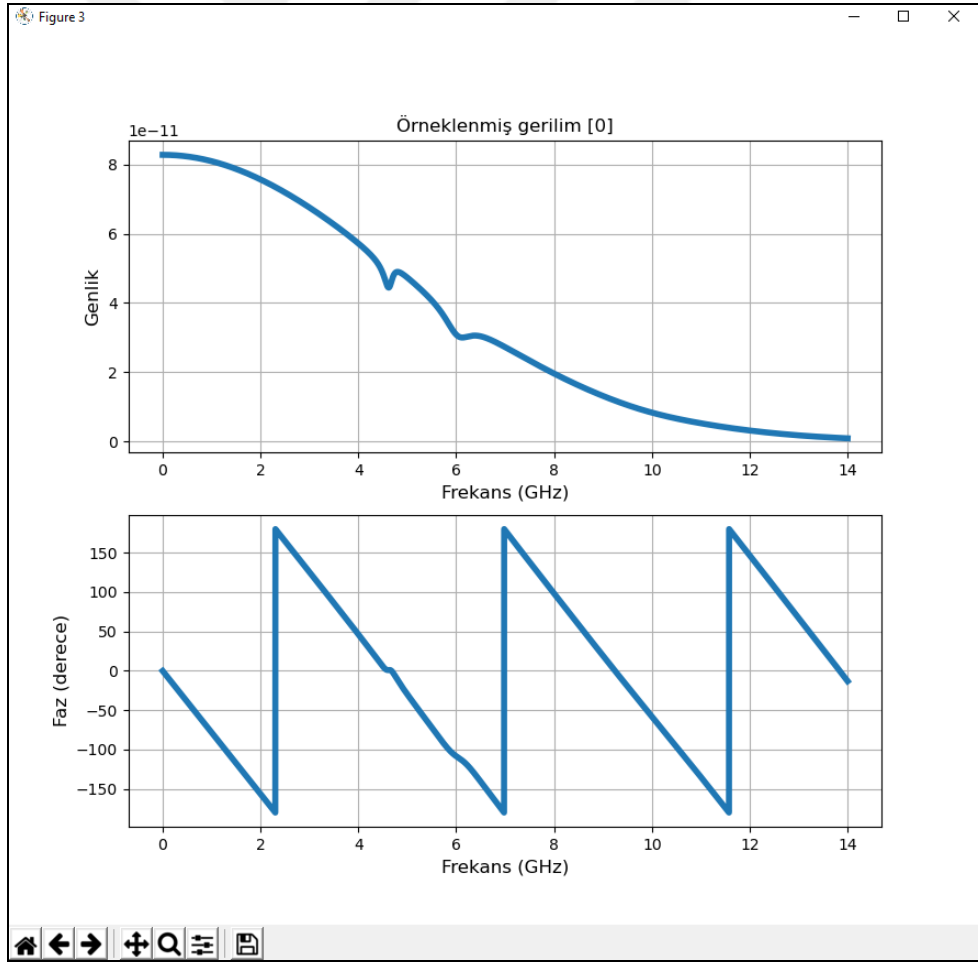
Antenin optimizasyonu için adım adım optimizasyon algoritması kullanılmış ve optimizasyon algoritması hesaplanan değerlerin benzetiminden sonra 4 adımda optimizasyonu tamamlamıştır. Hesaplanan değerler ile yapılan benzetim sonucu elde edilen zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği Şekil 5.125'te, zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği Şekil 5.126'da, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri Şekil 5.127'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri Şekil 5.128'de, frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri Şekil 5.129'da verilmiştir.



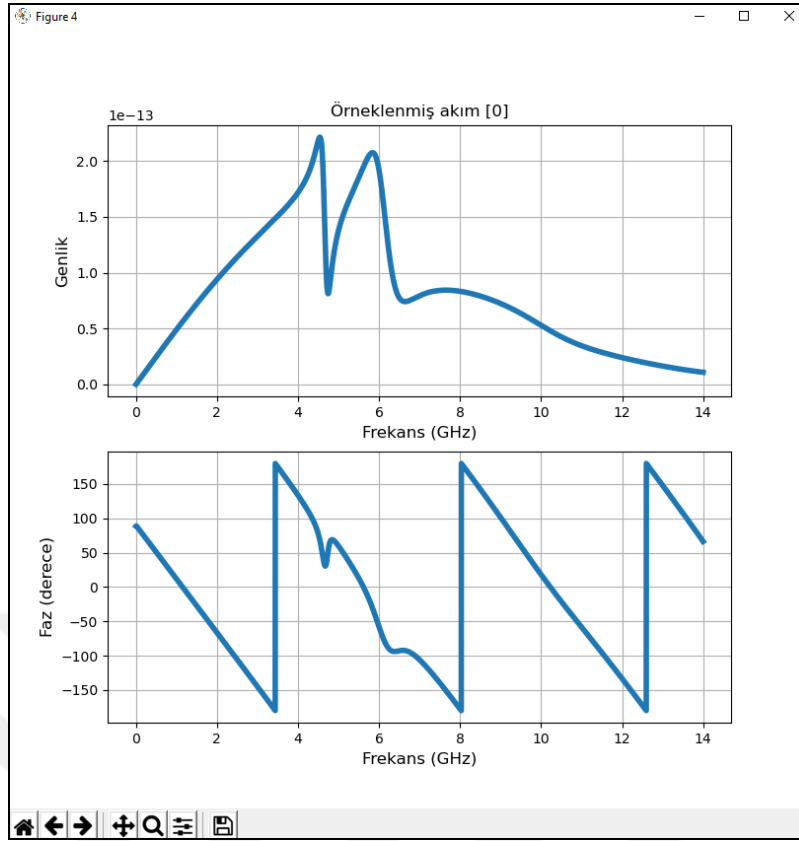
Şekil 5.125. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği



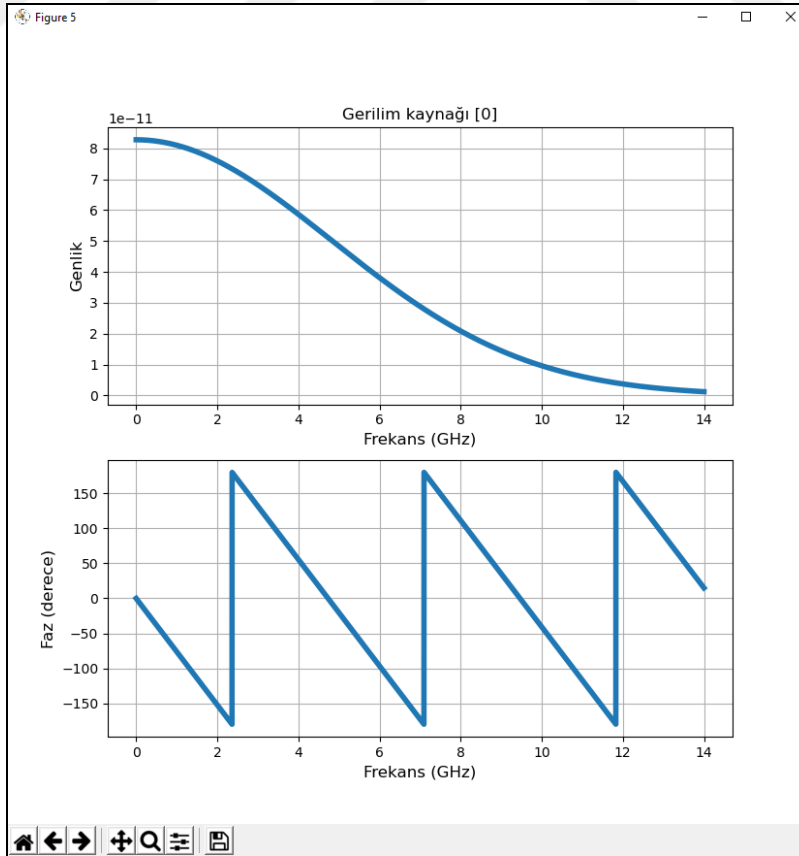
Şekil 5.126. Zaman tanım bölgesindeki örnekleme akımı grafiği



Şekil 5.127. Frekans tanım bölgesindeki örnekleme gerilim genlik ve faz grafikleri

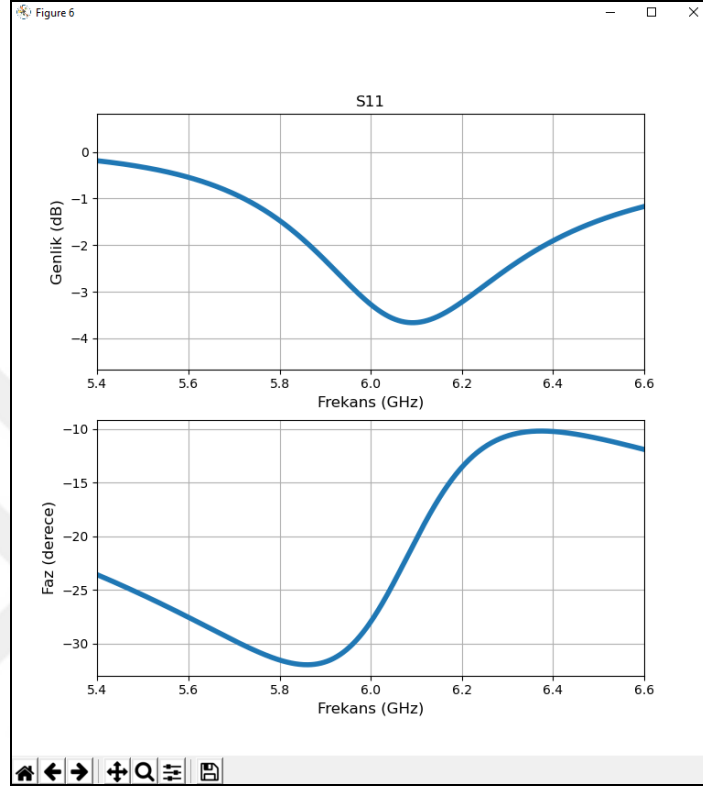


Şekil 5.128. Frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri

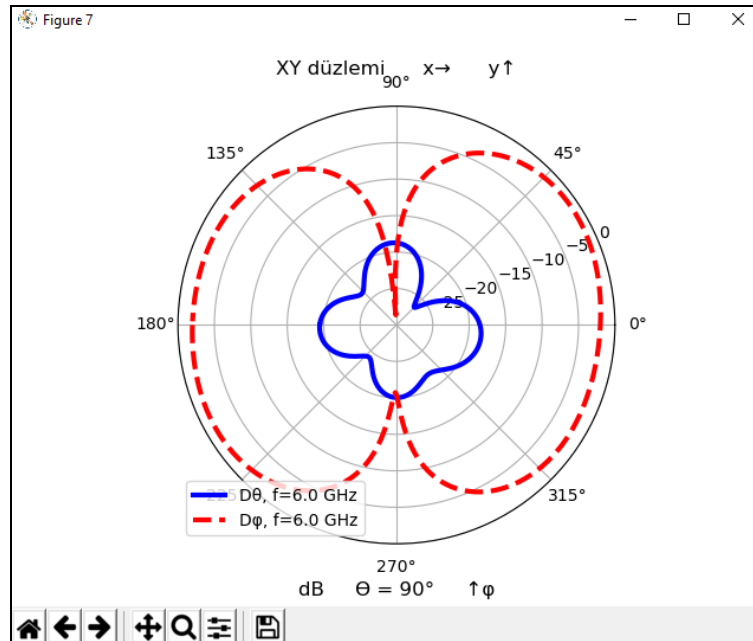


Şekil 5.129. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri

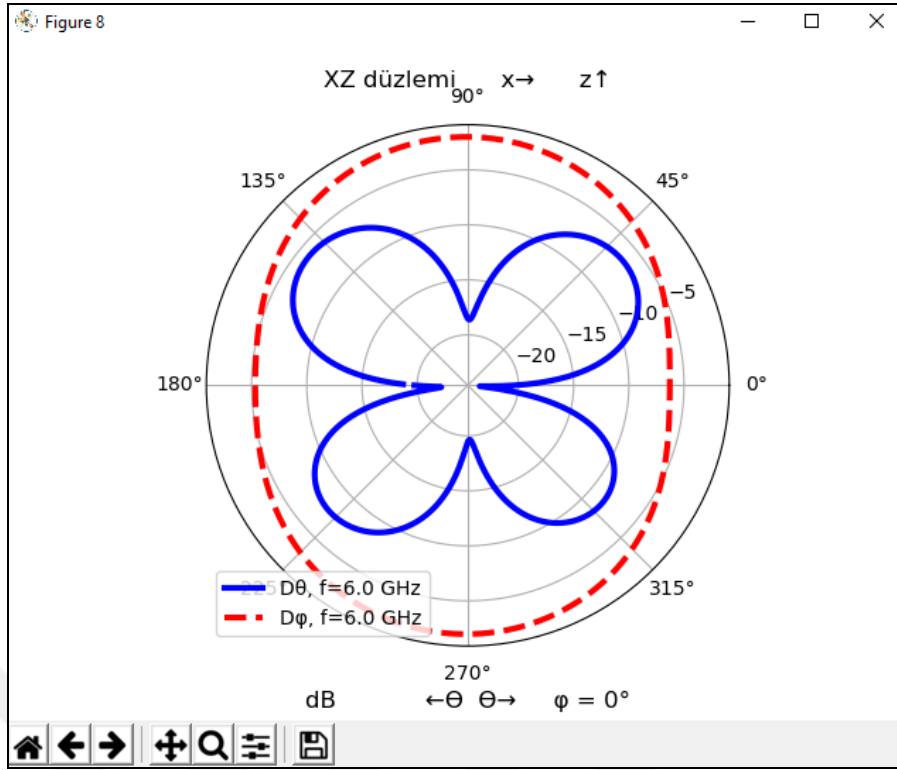
Hesaplanan değerler ile yapılan benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresinin genlik ve faz grafikleri Şekil 5.130'da, XY düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.131'de, XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.132'de ve YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.133'te gösterilmiştir.



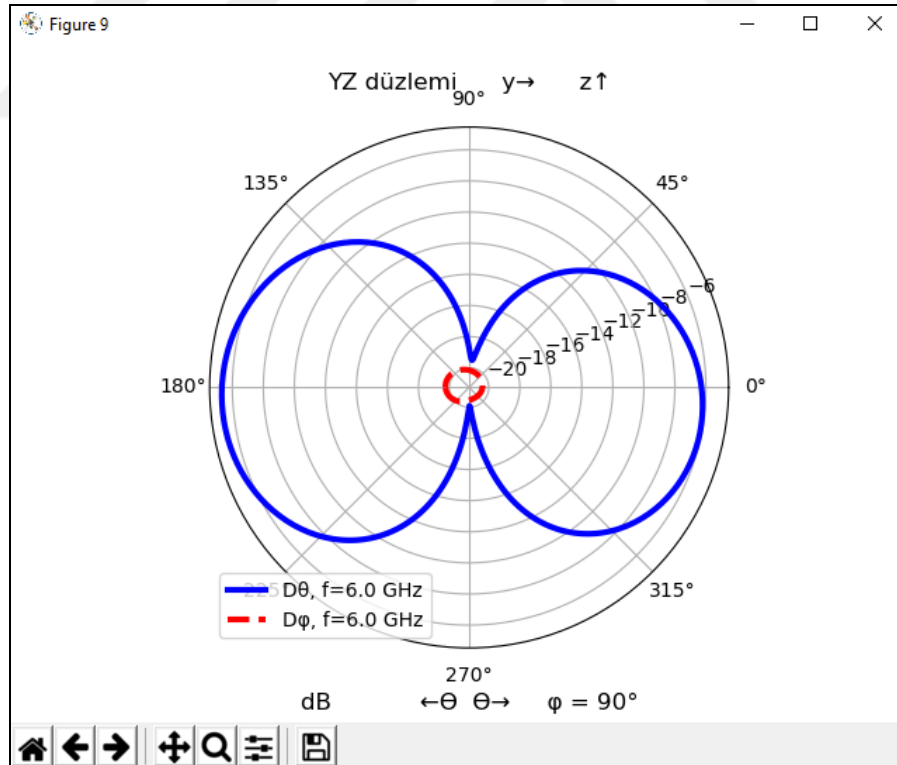
Şekil 5.130. S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



Şekil 5.131. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği



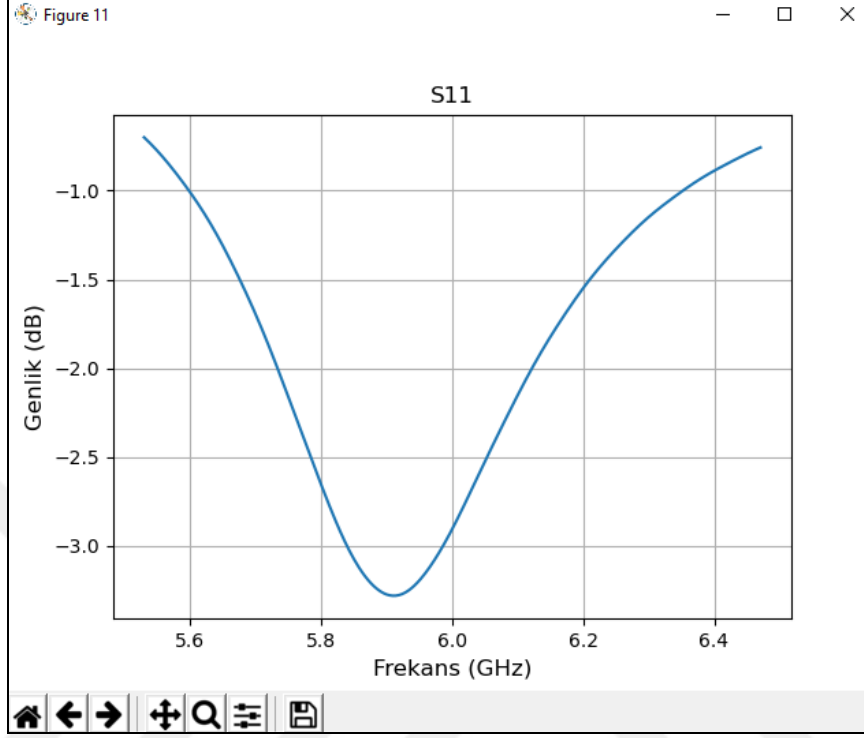
Şekil 5.132. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği



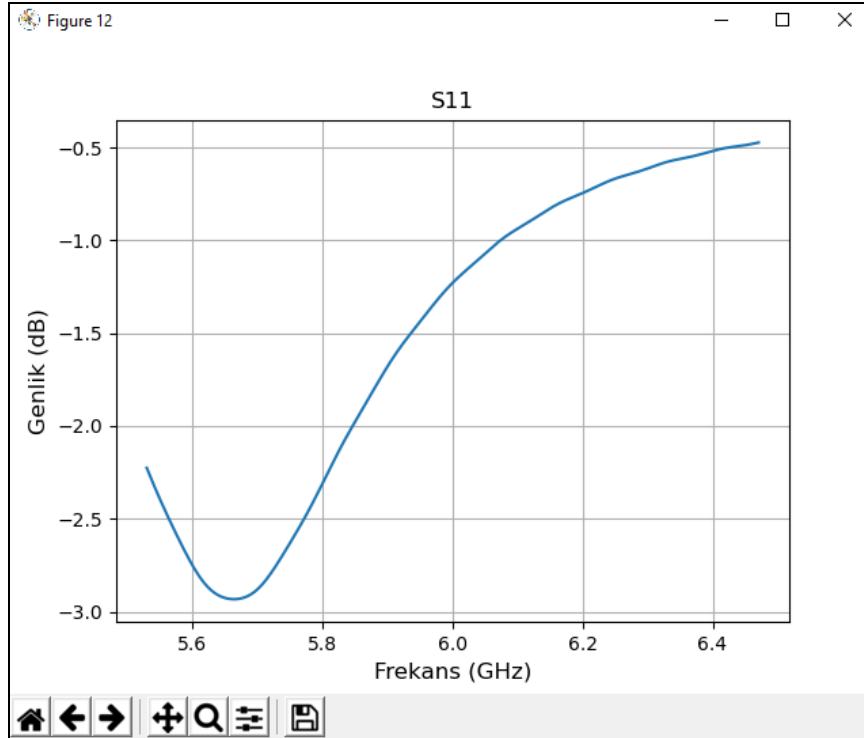
Şekil 5.133. YZ düzlemine ışıma karakteristiği

Birinci adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.134'te, ikinci adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.135'te, üçüncü adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil

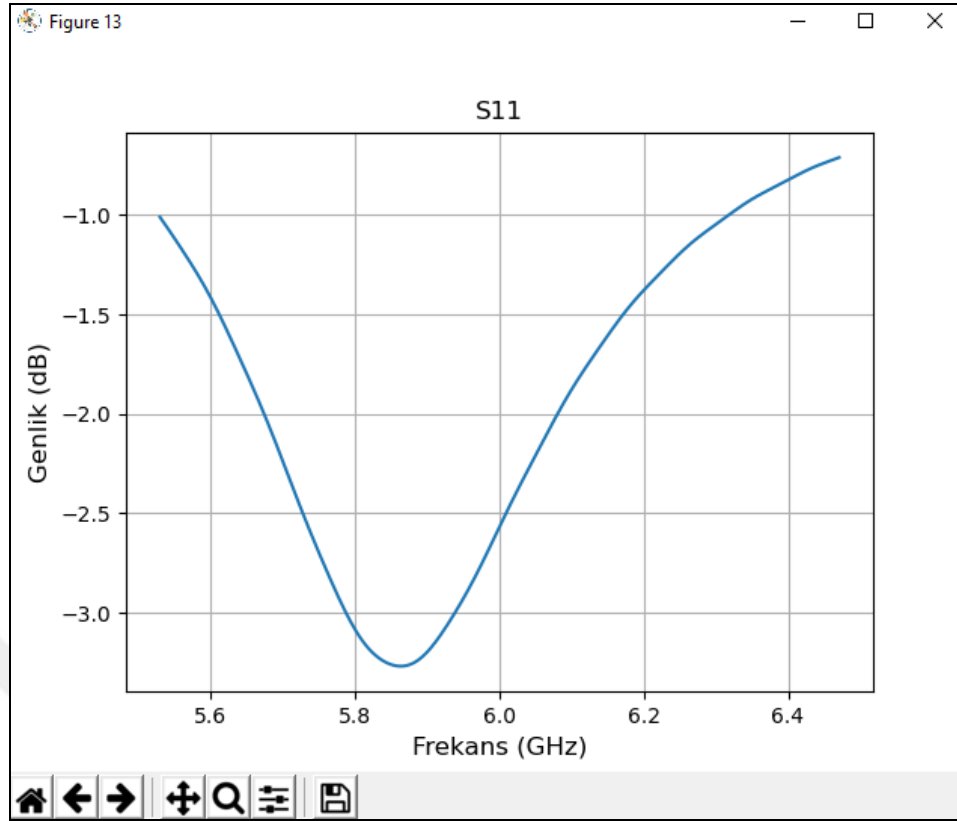
5.136'da ve dördüncü adım için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.137'de gösterilmiştir. Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.138'de ve anten Şekil 5.139'da verilmiştir.



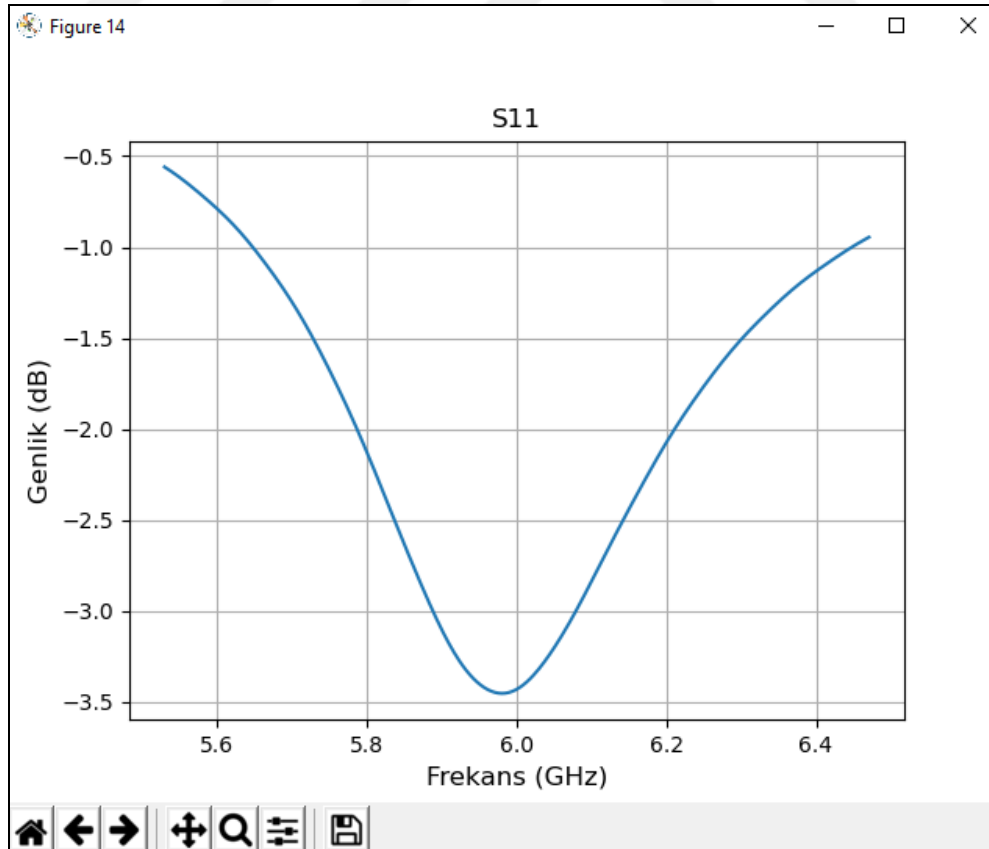
Şekil 5.134. Birinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği



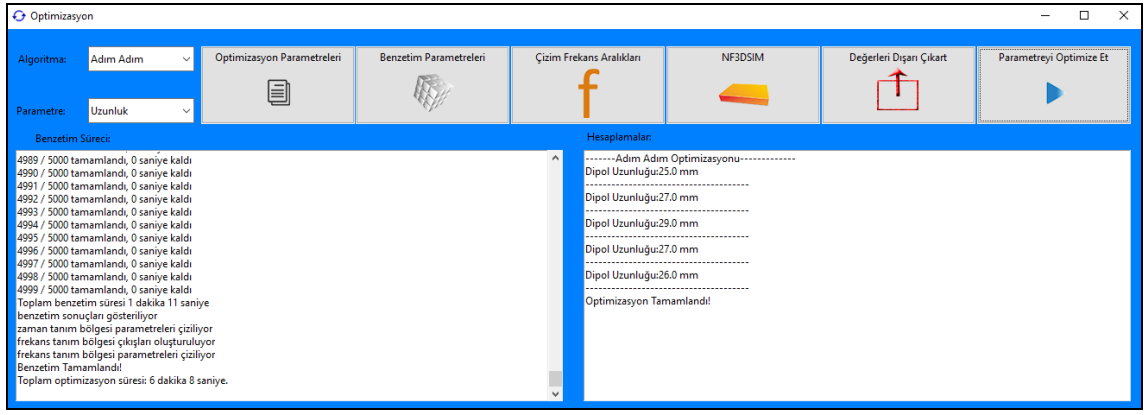
Şekil 5.135. İkinci adımda elde edilen S_{11} parametresi grafiği



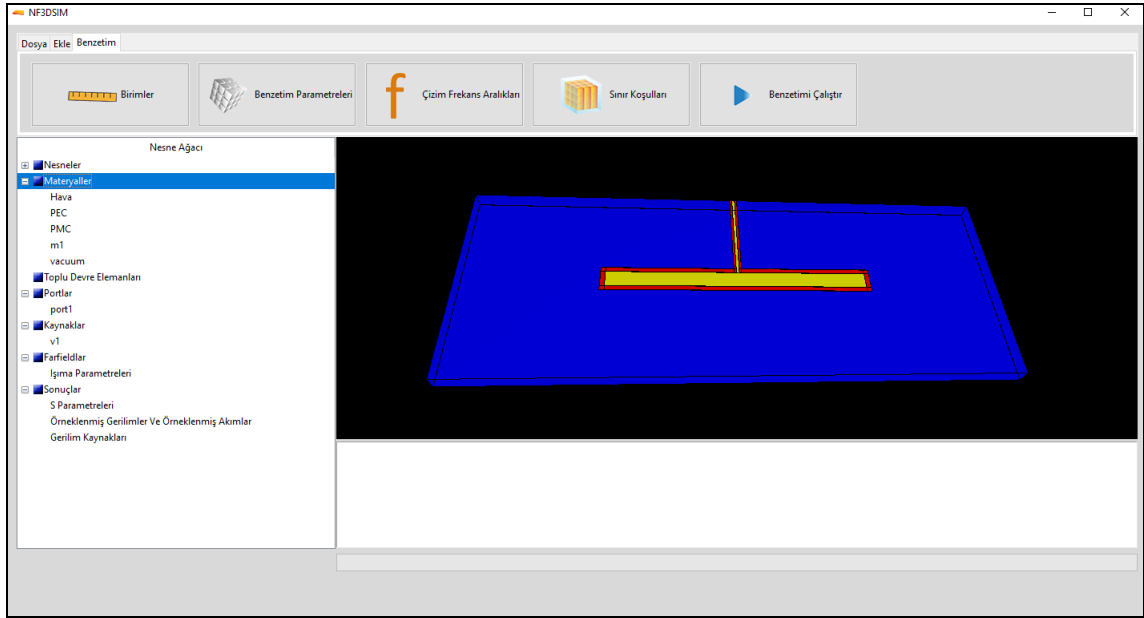
Şekil 5.136. Üçüncü adımda elde edilen S₁₁ parametresi grafiği



Şekil 5.137. Dördüncü adımda elde edilen S₁₁ parametresi grafiği



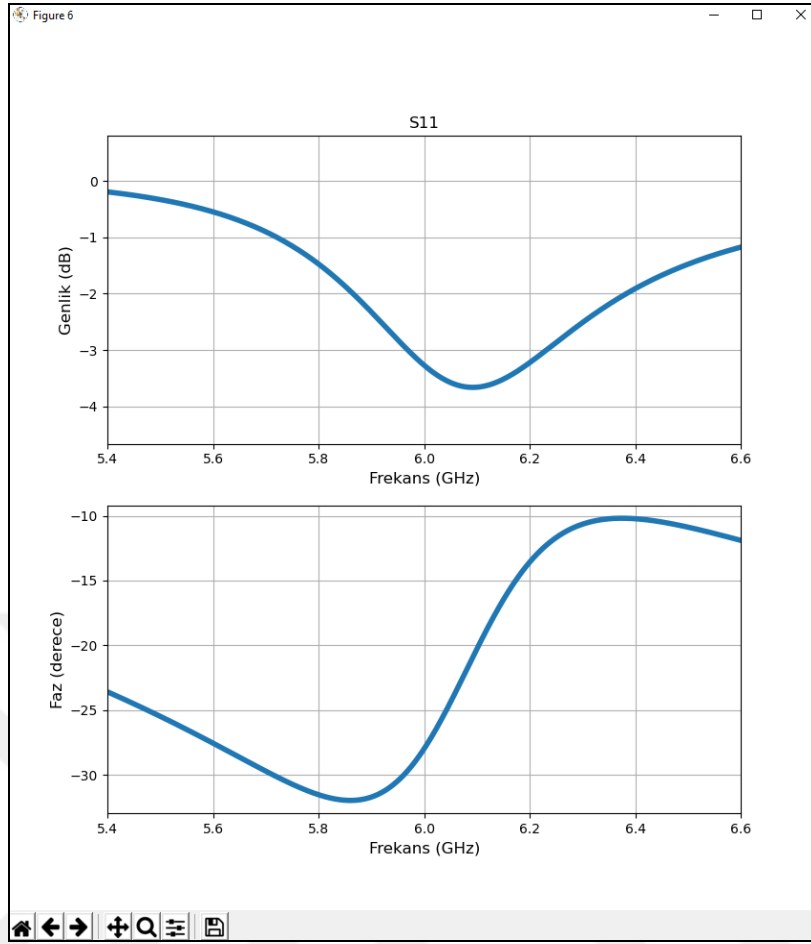
Şekil 5.138. Adım adım optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi



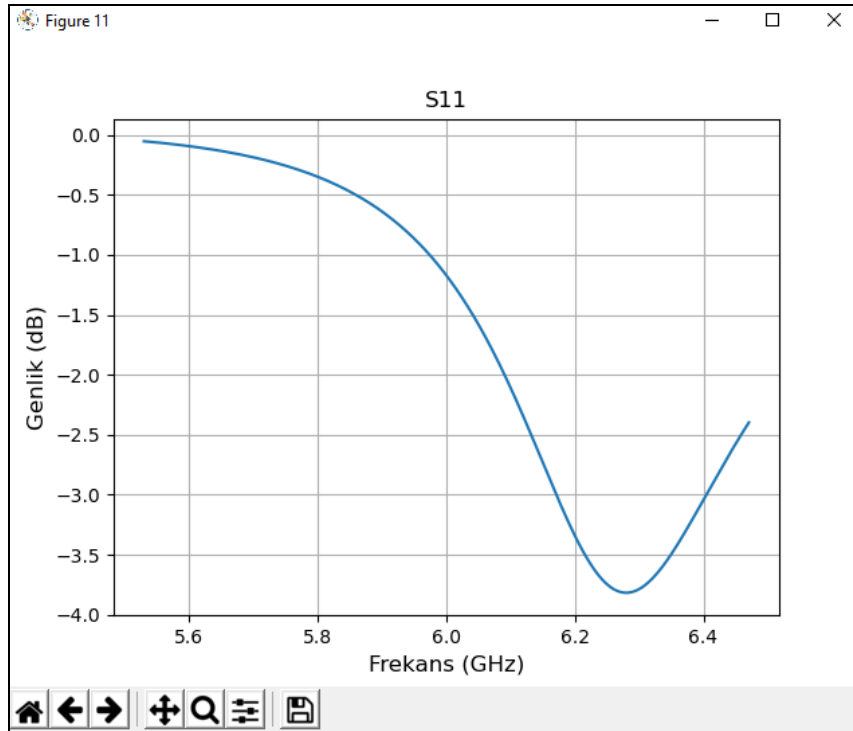
Şekil 5.139. Adım adım optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

5.4.2. Antenin Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

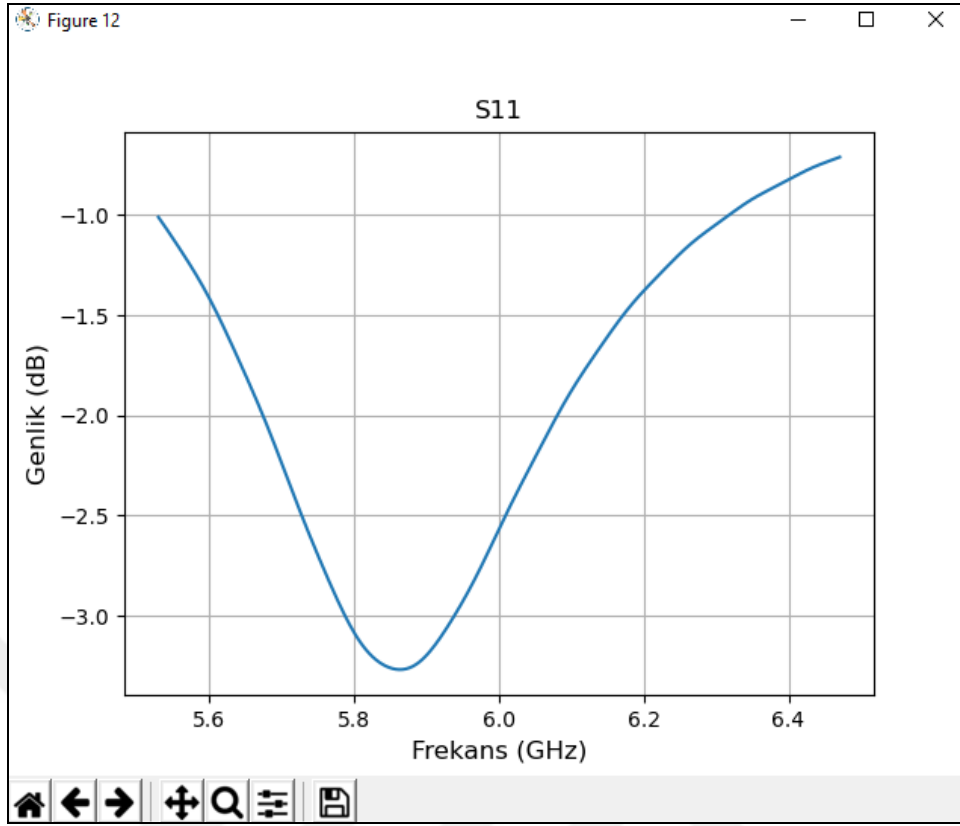
Tahmin optimizasyonu ile antenin optimizasyonu yapılmıştır. Antenin optimizasyonu için örnek sayısı 2 olarak girilmiş, hesaplanan değerlerle yapılan benzetim ile toplamda 3 örnek alınmıştır. Hesaplanan değer ile yapılan benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri Şekil 5.140'da, birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.141'de, ikinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.142'de ve tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.143'te gösterilmiştir. Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.144'te ve oluşan antenin tasarımı Şekil 5.145'te verilmiştir.



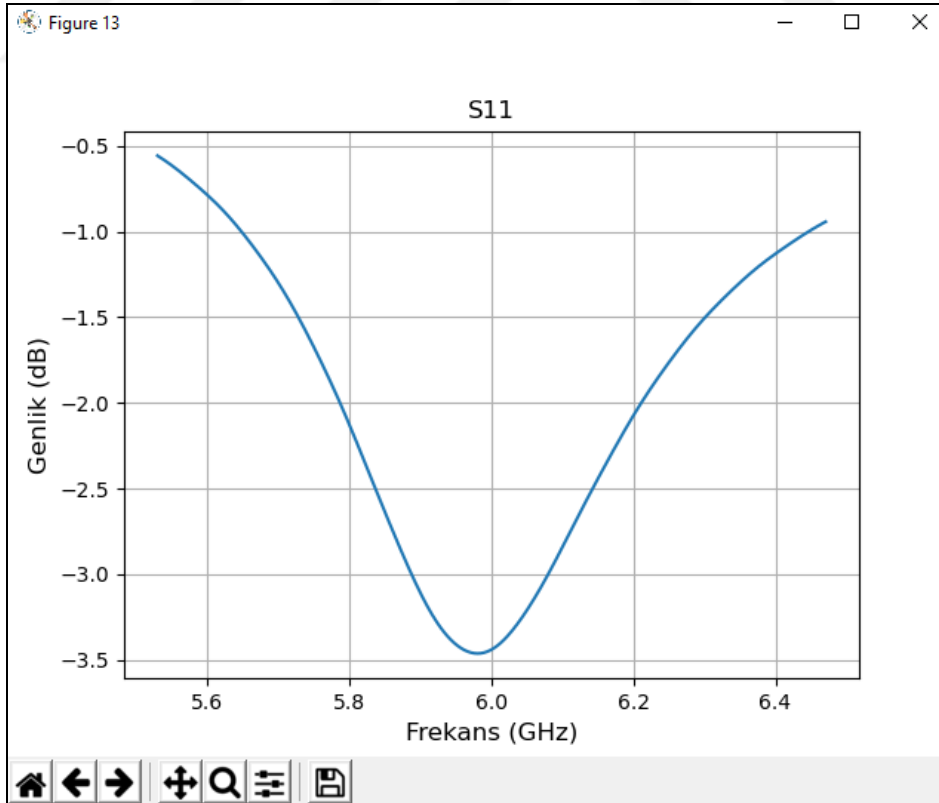
Şekil 5.140. İlk örnek olan S_{11} parametresi genlik ve faz grafikleri



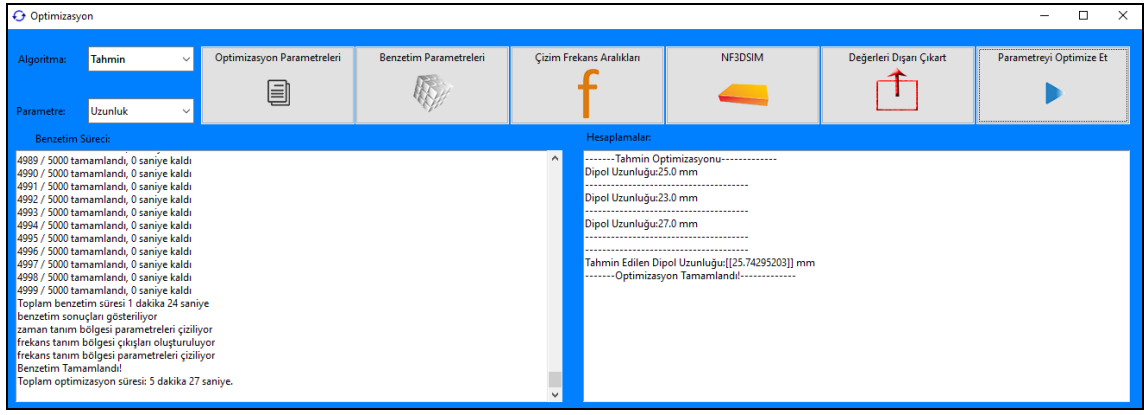
Şekil 5.141. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği



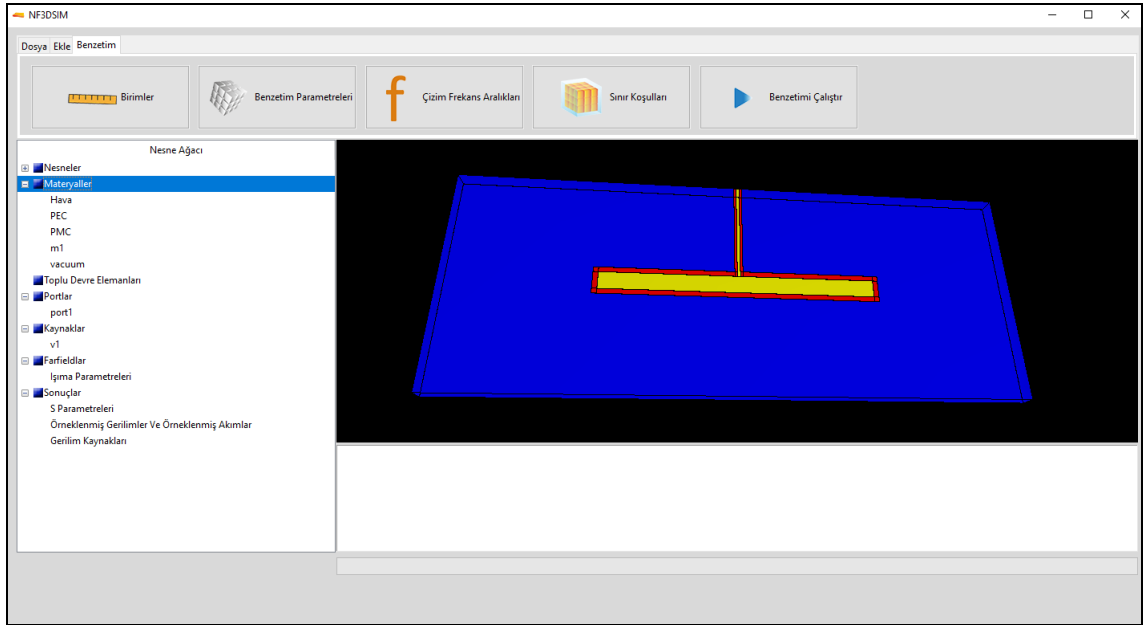
Şekil 5.142. İkinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği



Şekil 5.143. Tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği



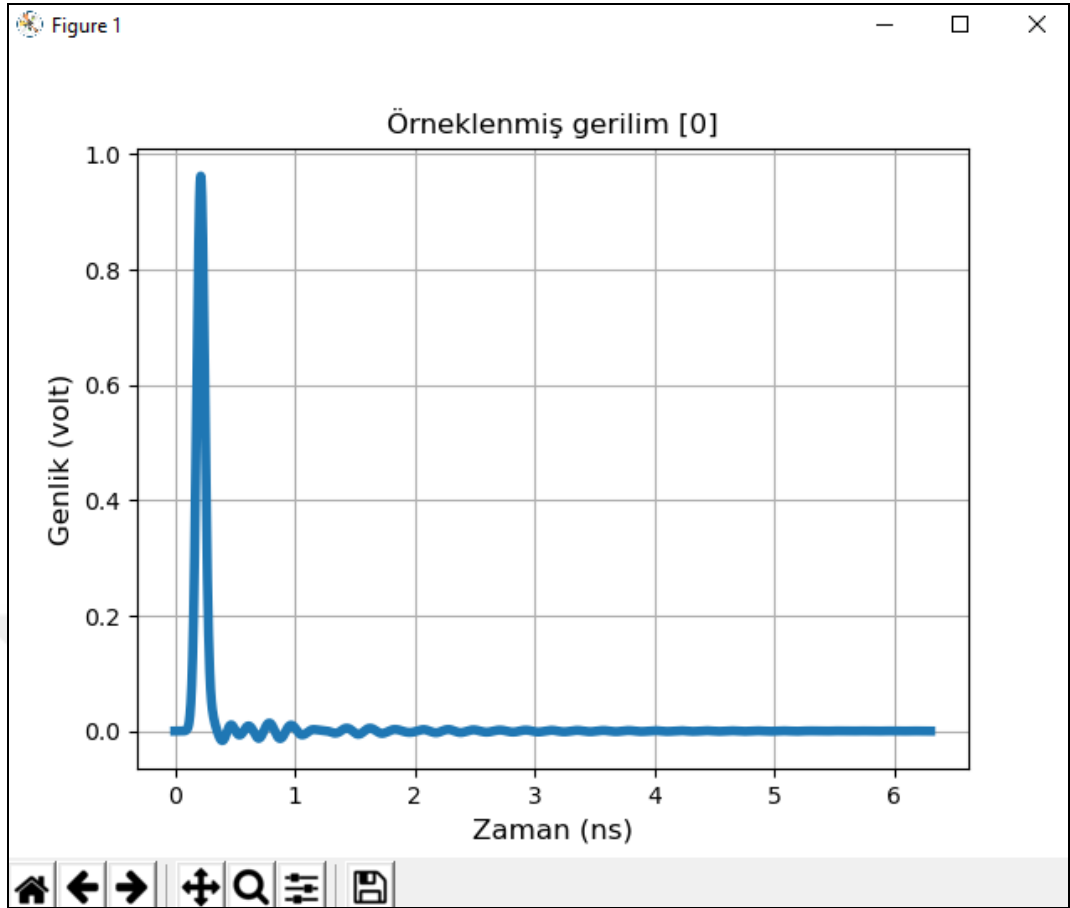
Şekil 5.144. Tahmin optimizasyon algoritması uygulanan optimizasyon penceresi



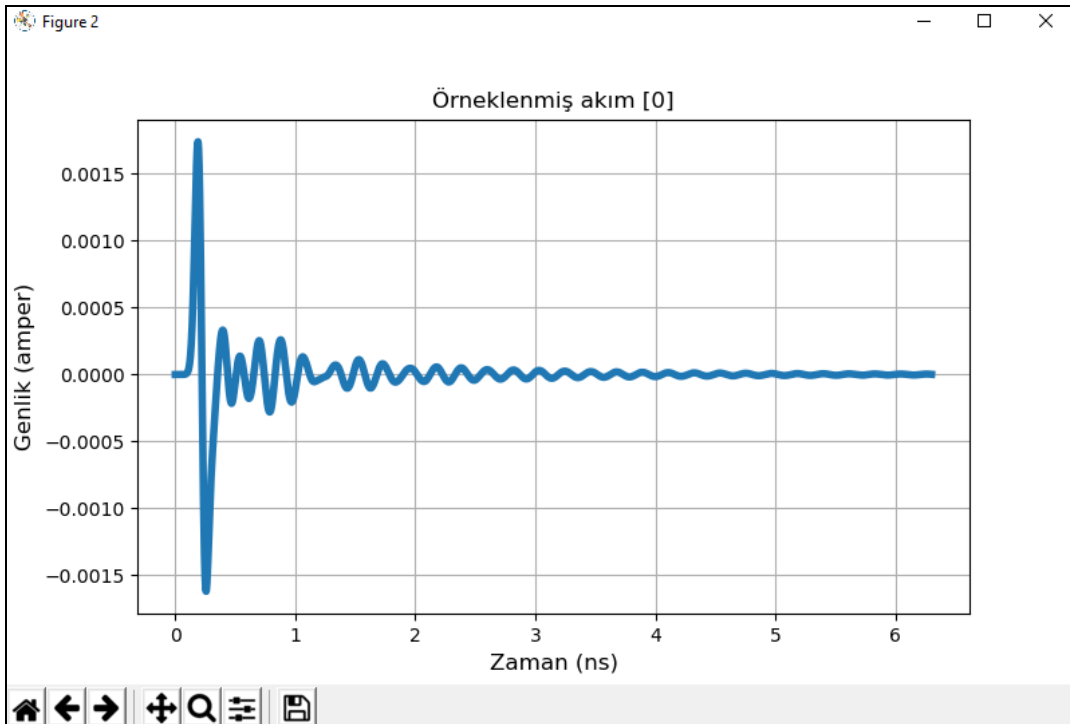
Şekil 5.145. Tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

5.4.3. Antenin Hızlı Tahmin Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

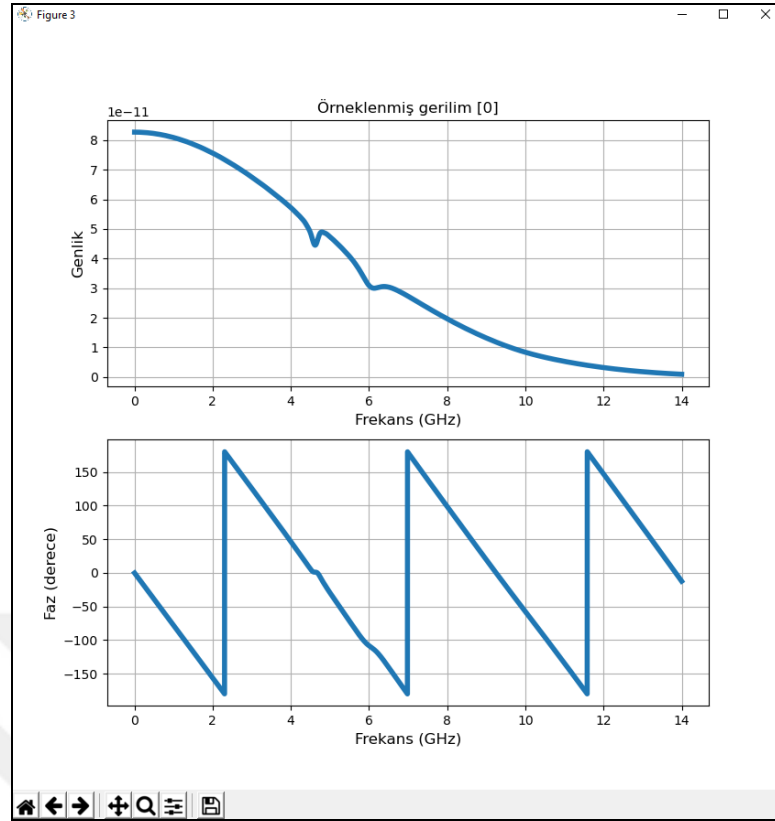
Antenin optimizasyonu hızlı tahmin optimizasyonu ile yapılmıştır. Anten optimizasyonu için örnek sayısı 2 olmakta ve ilk benzetimin de alınmasıyla toplamda 3 örnek alınmaktadır. Hesaplanan değerler ile yapılan benzetim sonucu elde edilen zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği Şekil 5.146'da, zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği Şekil 5.147'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim genlik ve faz grafikleri Şekil 5.148'de, frekans tanım bölgesindeki örneklenmiş akım genlik ve faz grafikleri Şekil 5.149'da, frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri Şekil 5.150'de verilmiştir.



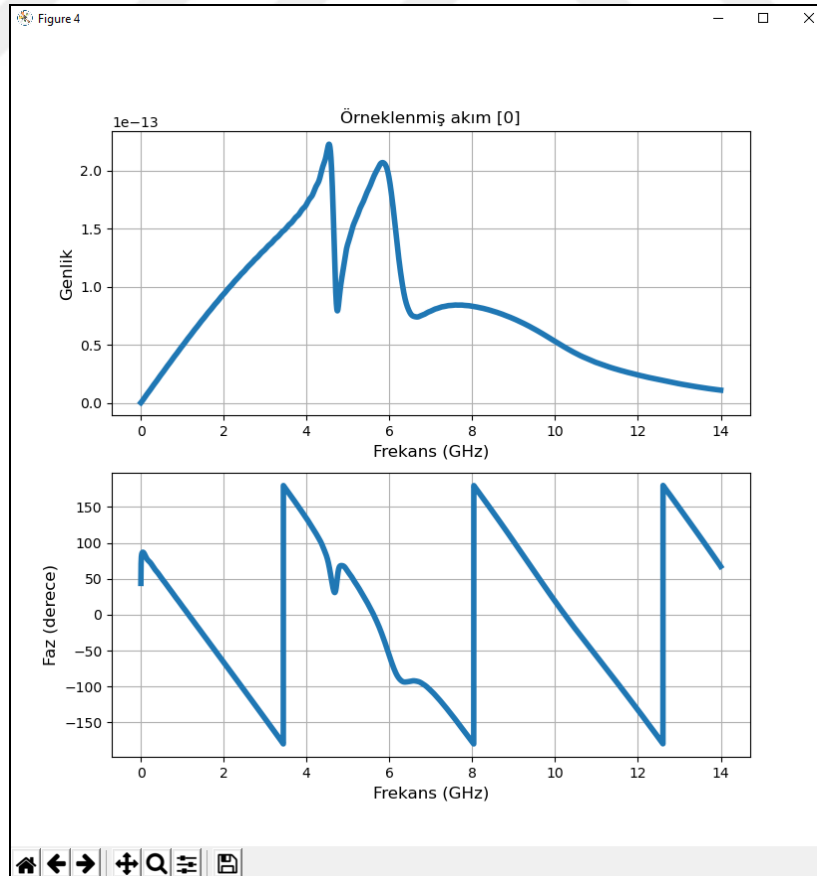
Şekil 5.146. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş gerilim grafiği



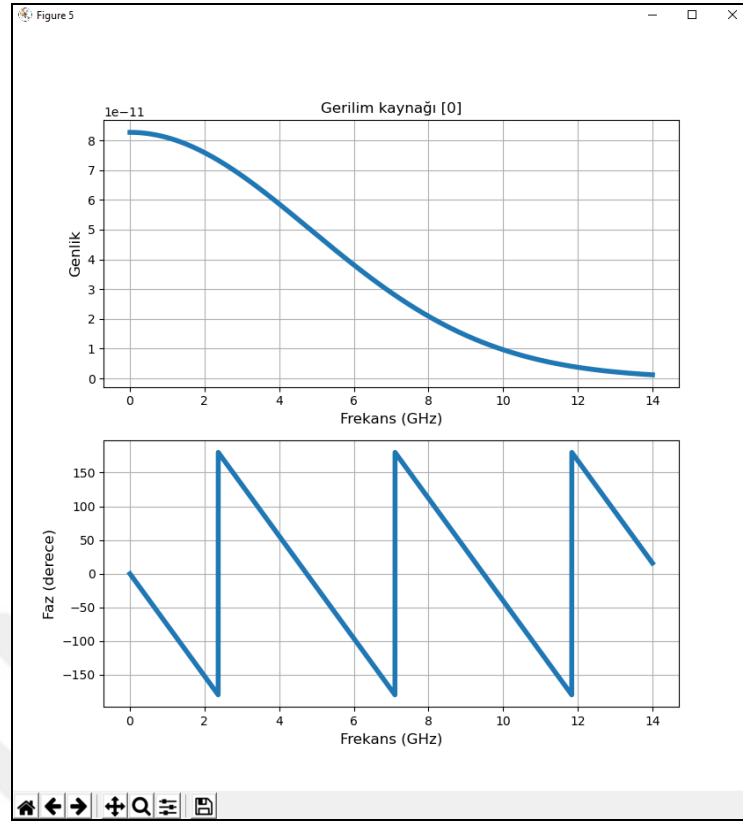
Şekil 5.147. Zaman tanım bölgesindeki örneklenmiş akım grafiği



Şekil 5.148. Frekans tanım bölgesindeki örnekleme gerilim genlik ve faz grafikleri

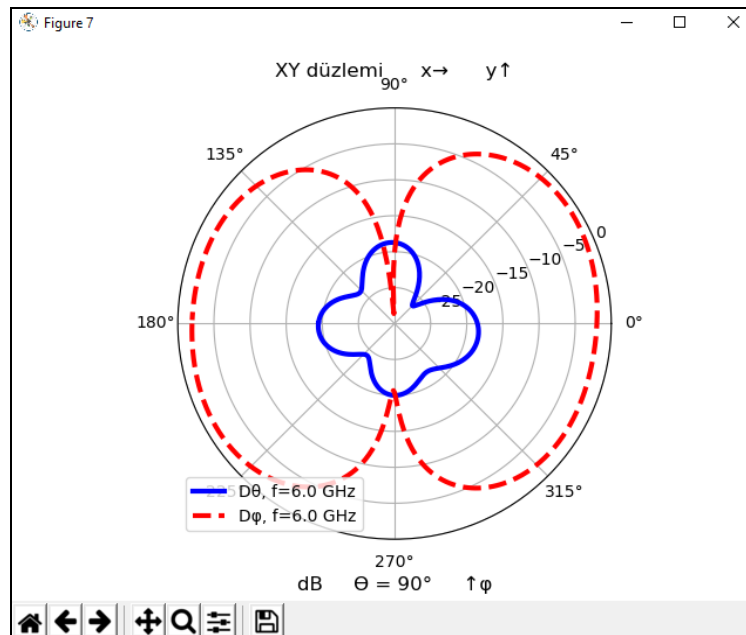


Şekil 5.149. Frekans tanım bölgesindeki örnekleme akım genlik ve faz grafikleri

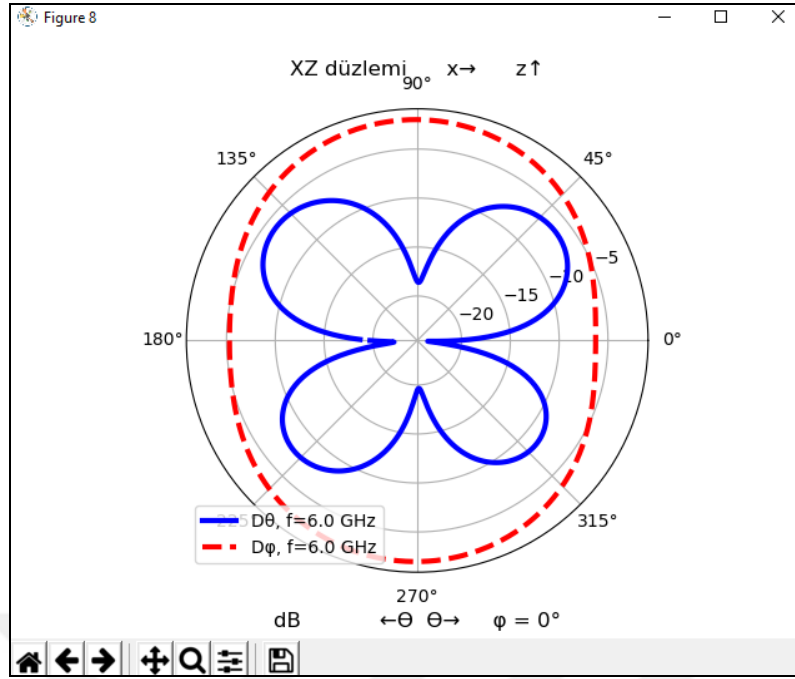


Şekil 5.150. Frekans tanım bölgesindeki gerilim kaynağı genlik ve faz grafikleri

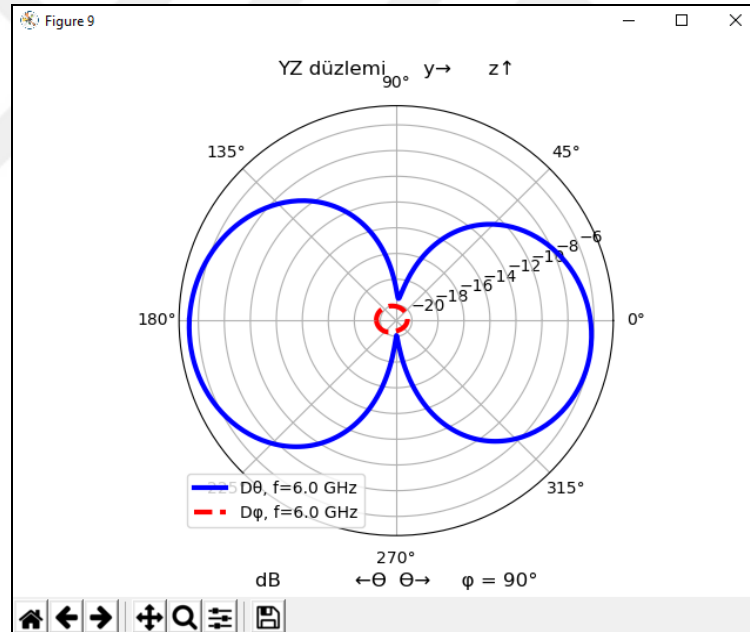
Hesaplanan değer ile yapılan benzetim sonucu elde edilen XY düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.151'de, XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.152'de ve YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği Şekil 5.153'te gösterilmiştir.



Şekil 5.151. XY düzlemine ait ışıma karakteristiği

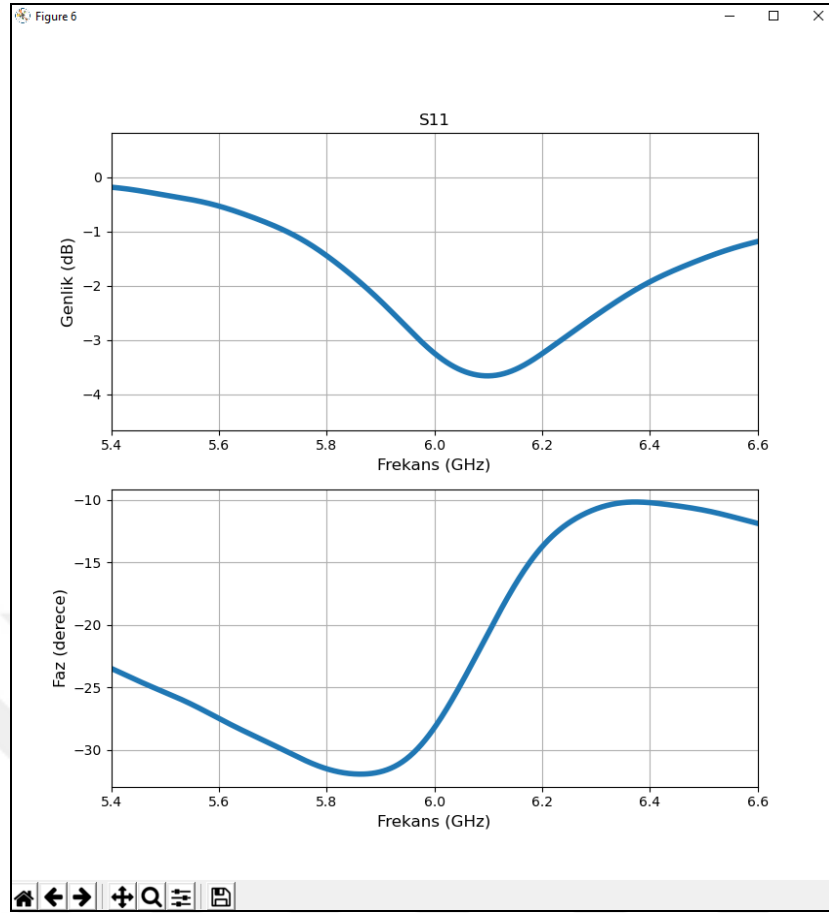


Şekil 5.152. XZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

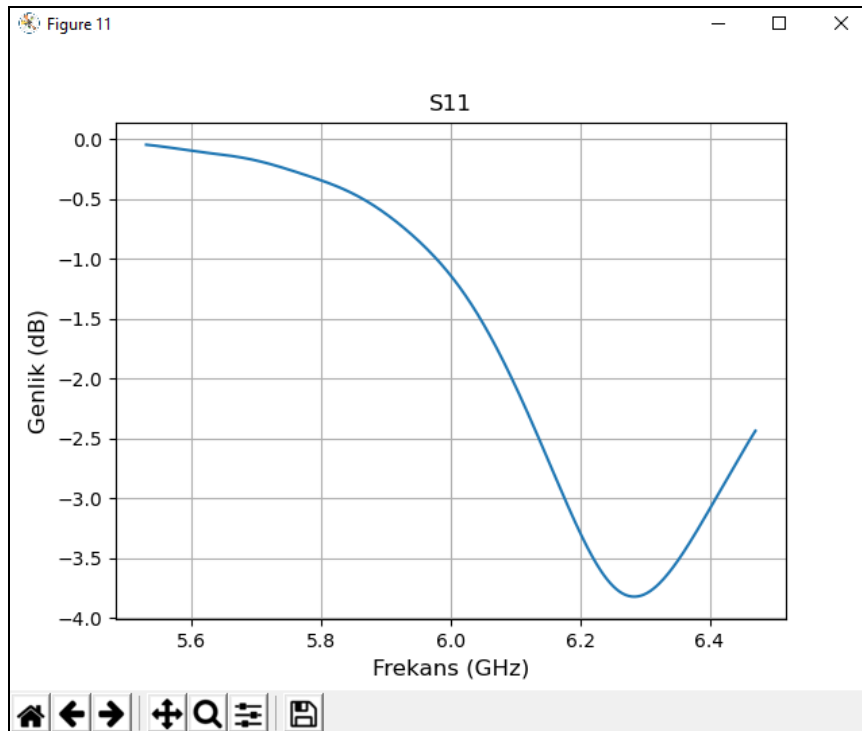


Şekil 5.153. YZ düzlemine ait ışıma karakteristiği

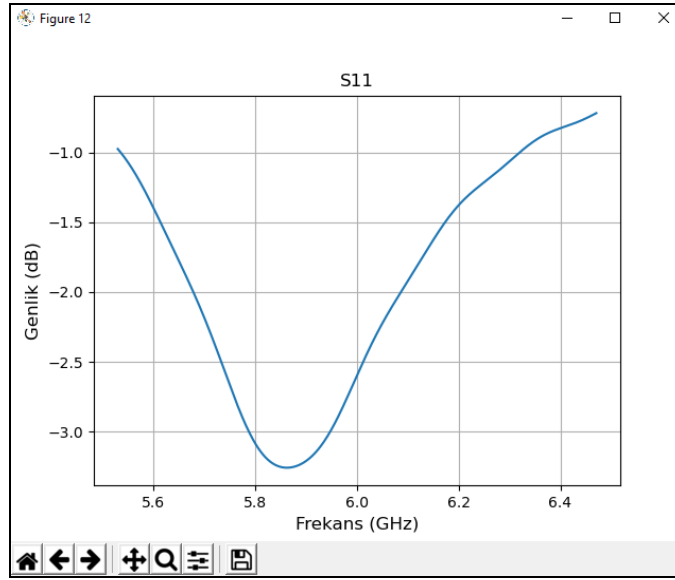
Hesaplanan değer ile yapılan benzetim sonucu elde edilen S_{11} parametresine ait genlik ve faz grafikleri Şekil 5.154'te, birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.155'te, ikinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.156'da ve tahmin edilen değer için S_{11} parametresi grafiği Şekil 5.157'de verilmiştir. Optimizasyon tamamlandığında oluşan optimizasyon penceresi Şekil 5.158'de, antenin tasarımı Şekil 5.159'da verilmiştir.



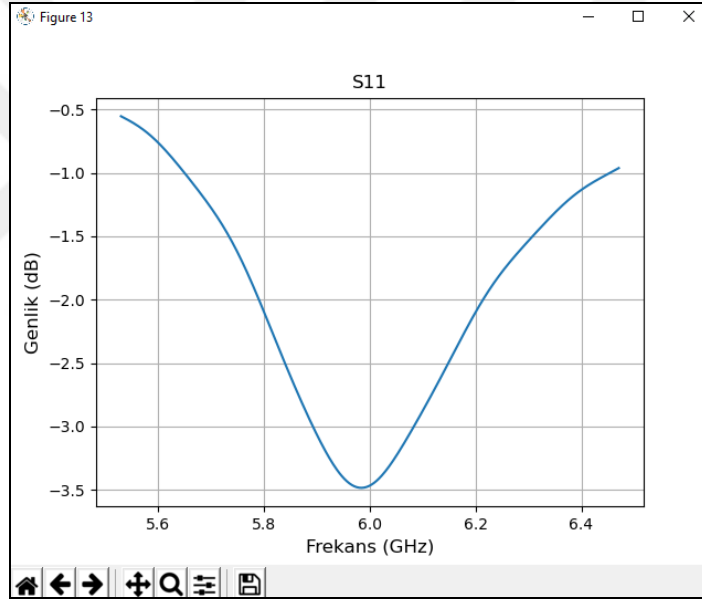
Şekil 5.154. Hesaplanan değer ile elde edilen S_{11} parametresi için genlik ve faz grafikleri



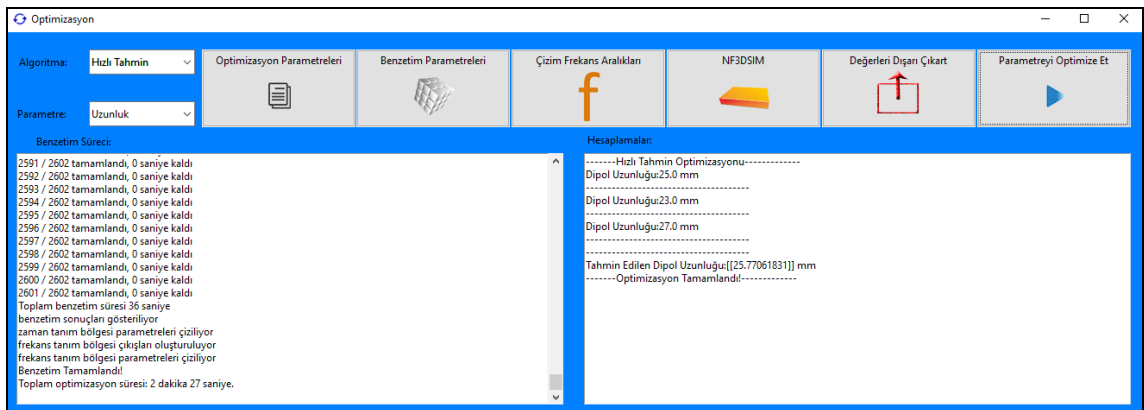
Şekil 5.155. Birinci örnek olan S_{11} parametresi grafiği



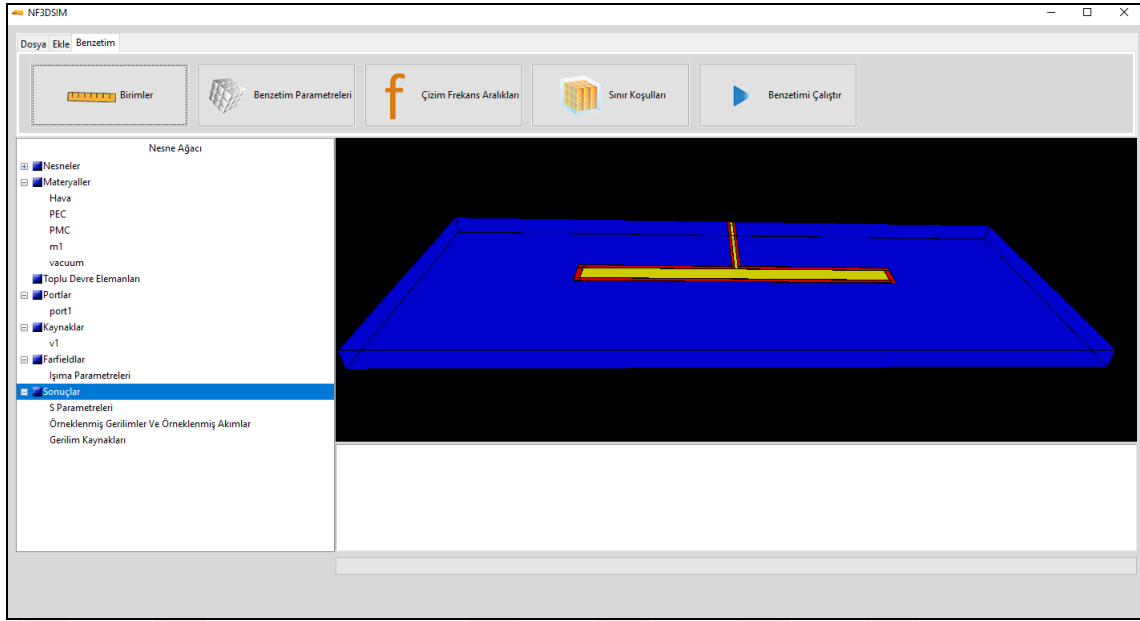
Şekil 5.156. İkinci örnek olan S₁₁ parametresi grafiği



Şekil 5.157. Tahmin edilen değer için S₁₁ parametresi grafiği



Şekil 5.158. Hızlı tahmin optimizasyonu algoritması uygulanan optimizasyon penceresi



Şekil 5.159. Hızlı tahmin optimizasyon algoritması ile optimizasyonu tamamlanmış antenin NF3DSIM programındaki görüntüsü

Tablo 5.14'te optimizasyon algoritmalarının toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önceki dipolun uzunluk değeri ve optimizasyondan sonraki dipolun uzunluk değeri verilmiştir.

Tablo 5.14. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerler

Optimizasyon Algoritması	Toplam Optimizasyon Süresi	Optimizasyondan önceki değer	Optimizasyondan sonraki değer
Adım adım	6 dakika 8 saniye	25 mm	26 mm
Tahmin	5 dakika 27 saniye	25 mm	25.7429 mm
Hızlı Tahmin	2 dakika 27 saniye	25 mm	25.7706 mm

Tablo 5.15'te ise tasarlanan antenin hedeflenen merkez frekansı, tasarlanan antenin elektromanyetik benzetim sonucu görülen merkez frekansı ve anten optimizasyonu yapıldıktan sonraki merkez frekansı verilmiştir.

Tablo 5.15. Test edilen antenin optimizasyon algoritmalarına göre hedef merkez frekansları ve optimizasyondan önceki ve sonraki frekansları

Optimizasyon Algoritması	Hedef merkez frekansı	Optimizasyondan önce merkez frekansı	Optimizasyondan sonra merkez frekansı
Adım adım	6 GHz	6.09 GHz	5.98 GHz
Tahmin	6 GHz	6.09 GHz	5.98 GHz
Hızlı Tahmin	6 GHz	6.09 GHz	5.98 GHz

6. BÖLÜM

SONUÇLAR

6.1. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada ilk olarak Python programlama dilinde Tkinter kütüphanesi kullanarak kullanıcının oluşturduğu problem geometrisinin elektromanyetik benzetimini gerçekleştiren grafik kullanıcı arayüzlü bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılıma NF3DSIM adı verilmiştir. Benzetim motoru MATLAB ortamında Elsherbeni ve Demir tarafından geliştirilen ZTBSF çözümü temel alınarak [9], Python programlama dilinde baştan yazılmıştır. Yazılan ZTBSF çözümü kütüphanesinde bulunan fonksiyonlar arayüzden bağımsız çalışabilmektedir.

Çalışmanın sonraki aşamasında anten tasarım ve optimizasyonu için bir arayüz tasarlanmış ve elektromanyetik benzetim için tasarlanan arayüz ile bütünleştirilerek müstakil bir anten tasarım yazılımı haline getirilmiştir. Bu yazılıma ANTDESVS adı verilmiştir. Tasarlanan arayüz ile istenilen hedef merkez frekansında anten tasarımı yapılabilmekte ve antenin hedef merkez frekansında olması için optimizasyon işlemi yapılabilmektedir.

Geliştirilen ANTDESVS yazılımının avantajları şu şekildedir: i) kolay bir kullanıma sahip arayüzü olması, ii) anten şablonlarının bulunması, kolay anten tasarımı yapılması ve tasarlanan antenin çiziminin üç boyutlu anlık olarak görülmesi, iii) makine öğrenmesi algoritmasının da kullanıldığı optimizasyon çeşitleri olması ve optimizasyon sonucunda hedef merkez frekansına yaklaşılmaması, iv) tasarlanan antenin kaydedilebilmesi ve daha sonra açılabilmesi, v) kullanıcının oluşturduğu problem geometrisinin elektromanyetik benzetimini gerçekleştiren bir bölüme sahip olmasıdır.

Geliştirilen NF3DSIM yazılımının özellikleri ise şu şekildedir: i) nesne olarak dikdörtgen prizması, küre, silindir, halka ve kesik koni, toplu devre elemanı olarak direnç, kondansatör, diyot ve bobin, kaynak olarak girilen dalga formunda gerilim kaynağı, elektriksel port ve materyal ekleyerek problem geometrisi oluşturulabilmesi, ii) oluşturulan problem geometrisinin anlık olarak üç boyutlu sahneye çizilmesi, iii) çizilen geometriye uzaklaştırma, yakınlaştırma, çevirme, sürükleme ve bırakma işlemleri yapılabilmesi, iv) benzetim sırasında ve sonrasında benzetimin durumu hakkında bilgi ve kalan sürenin verilmesi, v) benzetim sonrasında zaman tanım bölgesi grafikleri, frekans tanım bölgesi grafikleri, saçılma parametleri ve ışıma grafiklerine ulaşılabilmesi, vi) bölümünde grafiklerin resim olarak kaydedilebilmesi, projelerin kaydedilebilmesi ve sonra açılabilmesi, vii) tasarlanan antenin NF3DSIM yazılıma aktarılabilmesi özelliklerinin bulunmasıdır.

Müstakil elektromanyetik benzetim programını test etmek amacıyla çeyrek dalga dönüştürücü ve kenar beslemeli dikdörtgensel yama mikroşerit anten yapılarının benzetimleri ZTBSF yöntemini temel alan ticari bir benzetim programında ve geliştirilen programda yapılarak karşılaştırılmıştır. Çeyrek dalga dönüştürücü devresine ait Şekil 4.33'te verilen S_{21} karakteristikleri incelenirse NF3DSIM ve ticari benzetim programının benzer sonuçlar verdikleri görülmektedir. Bir başka yapı olan 5.8 GHz kenar beslemeli dikdörtgensel yama mikroşerit antene ait Şekil 4.45'te verilen S_{11} karakteristikleri incelenirse merkez frekanslarının NF3DSIM yazılımında 5.60 GHz, ticari yazılımda 5.63 GHz olduğu görülmektedir.

Anten tasarım ve optimizasyon yazılımı olarak geliştirilen ANTDESVS yazılımının test edilmesi amacıyla ek beslemeli dikdörtgensel yama mikroşerit anten, piramit biçimli horn anten, 1x2 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi anten ve baskılı katlanmış dipol anten olmak üzere 4 farklı anten tasarlanmış ve bu antenlerin optimizasyonları yapılmıştır. Yapılan anten optimizasyonları sonucunda merkez frekanslarının, hedef merkez frekansına yaklaştığı görülmektedir.

Detaylı olarak belirtilirse, Tablo 5.2'de verilen piramit biçimli horn antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süreleri incelendiğinde 2 saat 30 dakika 28 saniye ile sonuca en hızlı varan optimizasyon algoritması hızlı tahmin, 3 saat 44 dakika 34 saniye ile en son varan ise adım adım optimizasyon algoritması olmaktadır. 2 saat 52 dakika 47 saniye ile tahmin optimizasyon algoritması ise adım

adım ve hızlı tahminin ortasında yer almaktadır.

Tablo 5.6’da verilen piramit biçimli horn antenin hedeflenen merkez frekansları, elektromanyetik benzetim sonucu görülen merkez frekansları ve anten optimizasyonu yapıldıktan sonraki merkez frekansları incelendiği zaman, adım adım optimizasyon sonucu elde edilen 2.42 GHz, tahmin optimizasyonu sonucu elde edilen 2.44 GHz ve hızlı tahmin optimizasyonu sonucu elde edilen 2.44 GHz ile hedef merkez frekansına yaklaşıldığı görülmektedir.

Tablo 5.8’de verilen ek beslemeli dikdörtgensel yama mikroşerit antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerleri incelendiğinde 5 dakika 47 saniye ile sonuca en hızlı varan optimizasyon algoritması hızlı tahmin, 10 dakika 25 saniye ile en son varan ise adım adım optimizasyon algoritması olmaktadır. 7 dakika 32 saniye ile tahmin optimizasyon algoritması ise adım adım ve hızlı tahminin ortasında yer almaktadır.

Tablo 5.9’da verilen ek beslemeli dikdörtgensel yama mikroşerit antenin hedeflenen merkez frekansları, elektromanyetik benzetim sonucu görülen merkez frekansları ve anten optimizasyonu yapıldıktan sonraki merkez frekansları incelendiği zaman, adım adım optimizasyon sonucu elde edilen 2.41 GHz, tahmin optimizasyonu sonucu elde edilen 2.41 GHz ve hızlı tahmin optimizasyonu sonucu elde edilen 2.41 GHz ile hedef merkez frekansına yaklaşıldığı görülmektedir.

Tablo 5.11’de verilen 1x2 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerleri incelendiğinde 13 dakika 32 saniye ile sonuca en hızlı varan optimizasyon algoritması hızlı tahmin, 31 dakika 26 saniye ile en son varan ise adım adım optimizasyon algoritması olmaktadır. 23 dakika 55 saniye ile tahmin optimizasyon algoritması ise adım adım ve hızlı tahminin ortasında yer almaktadır.

Tablo 5.12’de verilen 1x2 ortak beslemeli dikdörtgensel yama dizi antenin hedeflenen merkez frekansları, elektromanyetik benzetim sonucu görülen merkez frekansları ve anten optimizasyonu yapıldıktan sonraki merkez frekansları incelendiği zaman, adım adım optimizasyon sonucu elde edilen 2.40 GHz, tahmin optimizasyonu sonucu elde edilen 2.40 GHz ve hızlı tahmin optimizasyonu sonucu elde edilen 2.39 GHz ile hedef merkez frekansına yaklaşıldığı görülmektedir.

Tablo 5.14'te verilen baskılı katlanmış dipol antenin optimizasyon algoritmalarına göre toplam optimizasyon süresi, optimizasyondan önce ve sonraki değerleri incelendiğinde 2 dakika 27 saniye ile sonuca en hızlı varan optimizasyon algoritması hızlı tahmin, 6 dakika 8 saniye ile en son varan ise adım adım optimizasyon algoritması olmaktadır. 5 dakika 27 saniye ile tahmin optimizasyon algoritması ise adım adım ve hızlı tahminin ortasında yer almaktadır.

Tablo 5.15'te verilen baskılı katlanmış dipol antenin hedeflenen merkez frekansları, elektromanyetik benzetim sonucu görülen merkez frekansları ve anten optimizasyonu yapıldıktan sonraki merkez frekansları incelendiği zaman, adım adım optimizasyon sonucu elde edilen 5.98 GHz, tahmin optimizasyonu sonucu elde edilen 5.98 GHz ve hızlı tahmin optimizasyonu sonucu elde edilen 5.98 GHz ile hedef merkez frekansına yaklaşıldığı görülmektedir.

Kenar beslemeli dikdörtgensel yama mikroşerit antene ait Şekil 4.60'da gösterilen, ZTBSF yöntemini kullanan ticari programda ve geliştirilen yazılımda yapılan benzetim sonucu elde edilen S_{11} karakteristikleri incelendiğinde, geliştirilen yazılımda elde edilen merkez frekansının 2.27 GHz, ticari programda elde edilen merkez frekansının ise 2.28 GHz olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.61 ve 4.62'de verilen ışıma karakteristiklerinin de benzer oldukları görülmektedir.

Şekil 4.66'da gösterilen kenar beslemeli dairesel yama mikroşerit antene ait, ZTBSF yöntemini kullanan ticari programda ve geliştirilen yazılımda elde edilen S_{11} karakteristikleri incelendiğinde, geliştirilen yazılımda elde edilen merkez frekansının 2.22 GHz, ticari programda elde edilen merkez frekansının ise 2.23 GHz olduğu görülmektedir. Şekil 4.67 ve 4.68'de verilen ışıma karakteristiklerinin de benzer oldukları görülmektedir.

Ek beslemeli kare yama mikroşerit antene ait Şekil 4.72'de gösterilen, geliştirilen yazılımda ve ZTBSF yöntemini kullanan ticari programda elde edilen S_{11} karakteristikleri incelendiğinde, geliştirilen yazılımda elde edilen merkez frekansının 2.35 GHz, ticari bir programda elde edilen merkez frekansının ise 2.34 GHz olduğu, Şekil 4.73 ve 4.74'te verilen ışıma karakteristiklerinin de benzer oldukları görülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada Python programla dilinde ZTBSF yöntemi ile

elektromanyetik benzetim gerçekleştiren NF3DSIM isimli grafik kullanıcı arayüzlü bir yazılım geliştirilmiştir. Daha sonra ise anten tasarımı ve optimizasyonu yapmak üzere gerçekleştiren ANTDESVS isimli grafik kullanıcı arayüzlü diğer bir yazılım geliştirilmiş ve NF3DSIM ile bütünleştirilmiştir. Geliştirilen bu yazılımların doğru sonuçlar verdikleri çeşitli örnekler üzerinde doğrulanmıştır.

6.2. Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmaya ileriki aşamalarda farklı anten tiplerinin eklenmesi, optimizasyon algoritmalarının çoğaltılması ve NF3DSIM yazılımına yeni geometriler eklenmesi ile daha ileri seviyelere çıkartılması bu konularda çalışma yapan araştırmacılar için daha faydalı bir araç haline getirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

1. Yee, K. S., 1966. Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **14** (3): 302-307.
2. Jin, J., 1993. The Finite Element Method in Electromagnetics, Wiley.
3. Johns, P. ve Beurle, R., 1971. "Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix," **Proc. IEEE**, **118**, 1203-1208.
4. Ney, M.M, 1985. Method of moments as applied to electromagnetic problems, **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **33** (10): 972-980.
5. Fish, J., Belytschko, 2007. T., A First Course in Finite Elements. John Wiley & Sons, Chichester, İngiltere, 1-9.
6. Hoefer, W., 1985. "The transmission line matrix method-theory and applications," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, **33**, 882–893.
7. Taflove, A. 1980. "Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady state electromagnetic penetration problems", **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, **22** (3): 191–202.
8. Taflove, A. 2005. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House Publishers.
9. Elsherbeni, A. ve Demir V., 2015. The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics: With MATLAB Simulations, Scitech Publishing.
10. Remcom XFDTD Software, (Web Sayfası: <https://www.remcom.com/xfddt-3d-em-simulation-software/>), (Erişim Zamanı; Eylül 2020).
11. Synopsys Inc., FullWAVE FDTD Software, (Web Sayfası: <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/passive-device-fullwave.html>), (Erişim zamanı; Kasım 2020).
12. Lumerical Inc., FDTD Software, (Web Sayfası: <https://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>), (Erişim zamanı; Kasım 2020).

13. Photon Design Ltd., OmniSim Software, (Web Sayfası: <https://www.photond.com/products/omnisim.htm>), (Erişim zamanı; Kasım 2020).
14. Oskooi, A., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J., ve Johnson, S. 2010. Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. **Computer Physics Communications**, **181** (3): 687-702.
15. Sullivan, D., 2020. Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method with Python, Wiley-IEEE Press.
16. Zhang, X., Fang, J., Mei, K. K. ve Liu., Y., 1988. "Calculation of the dispersive characteristics of microstrips by the time-domain finite-difference method". **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. **36** (2): 263–267.
17. Tirkas, P. A. ve Balanis, C. A., 1991. Finite-difference time-domain technique for radiation by horn antennas. **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest**. **3**. 1750–1753.
18. Başaran, C., 2000. Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Metodu ile Mikroşerit Devre Analizi, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 88s.
19. Erol, Y., 2001. İki Boyutlu Mikrostrip Hatların Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu ile Analizi, Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 67s.
20. Kurt, B., 2009. Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi ile İki Boyutlu Yer Radarı Modellemesi, Ankara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 96s.
21. İnce, S., 2001. FDTD Yöntemiyle İnsan Kafası Modelinde Elektromagnetik Etkilerin Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 80s.
22. Courant, R., Friedrichs K. ve Lewy, H., 1967. "On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics," **IBM Journal of Research and Development**, **11** (2): 215–234.
23. Roden J. ve Gedney, S., 2000. "Convolution PML (CPML): an efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media," **Microwave and Optical Technology Letters**, **27** (5): 334–339.

24. Balanis, C.A., 2005. Antenna Theory, Analysis and Design, 3rd ed., Wiley.
25. Deschamps, G. ve Sichak, W., 18-22 Ekim, 1953. Microstrip Microwave Antennas, Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program.
26. Byron, E. V., 1970. "A new flush-mounted antenna element for phased array application," in Proc. Phased-Array Antenna Symp., 187-192.
27. Munson, R. E., Ekim 1972. "Microstrip Phased Array Antennas," Proc. of the Twenty Second Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program.
28. Munson, R. E., 1974. "Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays," **IEEE Trans. on Antennas and Propagat.**, **22**, 74-78.
29. Howell, J. Q., 1972. "Microstrip Antennas," **IEEE AP-S Int. Symp. Digest**, 177-180.
30. Howell, J. Q., 1974. "Microstrip Antennas," **IEEE Trans. on Antennas and Propagat.**, **23**, 90-93.
31. Bernhard, J. T., Mayes, P. E., Schaubert, D. ve Mailloux, R. J., 2003. "A Commemoration of Deschamps' and Sichak's", "Microstrip Microwave Antennas: 50 Years of Development, Divergence, and New Directions".
32. Bondyopadhyay, P. K., 2000. "The first application of array antenna," Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology (Cat. No.00TH8510), Dana Point, CA, 29-32.
33. Rodriguez, V., 2010. "A brief history of horns", **In Compliance Magazine**, **27**.
34. Emerson, D. T., Aralık 1997. The work of Jagadis Chandra Bose: 100 years of MM-wave research. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **45** (12) : 2267-2273.
35. Southworth, G. C., ve King, A. P., Mart 1939. "Metal Horns as Directive Receivers of Ultra-Short Waves", **Proceedings of the IRE**, **27**, 95–102.

36. Barrow, W. L. ve Chu, L. J., Şubat 1939. "Theory of the Electromagnetic Horn". **Proceedings of the IRE.** **27**, 51–64.
37. Barrow, Wilmer L, Electromagnetic horn, U.S. Patent No. 2467578
38. Olver, A.D., 1994. Microwave horns and feeds. USA: IET. pp. 2–4. ISBN 978-0-85296-809-3.
39. Pedregosa ve diğerleri, 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python, JMLR 12, pp. 2825-2830.
40. Balanis, C.A., 1989. Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons, New York.
41. Bahl, I. J., ve Bhartia, P. 1980. Microstrip Antennas, Artech House, Dedham, MA.
42. Hammerstad, E. O., Eylül 1975. "Equations for Microstrip Circuit Design," Proc. Fifth European Microwave Conf., pp. 268–272.
43. Stutzman, W. L., ve Thiele, G. A., 2013. Antenna Theory and Design. Wiley.
44. Derneryd, A. G., 1978. "A Theoretical Investigation of the Rectangular Microstrip Antenna Element," **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, **AP-26** (4): 532–535.
45. Carver, K. R. ve Mink, J. W. 1981. "Microstrip Antenna Technology," **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, **AP-29** (1): 2–24.
46. Fletcher, Mike C., PyOpenGL, (Web Sayfası: <http://pyopengl.sourceforge.net/>), (Erişim Zamanı; Eylül 2020).
47. Wright, J., pyopengl, (Web Sayfası: <https://github.com/jonwright/pyopengl>), (Erişim Zamanı; Eylül 2020).
48. Oliphant, Travis E., 2006. A guide to NumPy, USA: Trelgol Publishing.
49. Hunter, John D., 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment, **Computing in Science & Engineering**, **9**, 90-95.

50. Virtanen, P. ve diğçerleri, 2020. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. Nature Methods, yayınlanmış.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Murat Can Serkuş

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Nuh Naci Yazgan Üniversitesi	Halen
Lisans	Nuh Naci Yazgan Üniversitesi	06/2018
Lise	Kocasinan Anadolu Lisesi	06/2014

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019- 2020	Fnf Teknoloji San. Tic. A. Ş.	ARGE Mühendisi
2020-Halen	Erel Erciyes Tedarik Elektrik Toptan Satış İthalat ve İhracat A. Ş.	Enerji Piyasaları Uzman Yardımcısı

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Soytürk, A., Serkuş, M., Yamaçlı, S., 2018, “Mikroşerit Yapıların Elektromanyetik Simülasyonu için Grafik Kullanıcı Arayüzü Bir Yazılımın Gerçekleştirilmesi”, URSI-TÜRKİYE’2018 IX. Bilimsel Kongresi,KTO Karatay Üniversitesi, Konya