Metin SAĞIK

İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKROŞERİT ANTENİN PARAMETRELERİNİ MTM YAPILAR İLE İYİLEŞTİRME VE PARAMETRE DEĞERLERİNİN YAPAY SİNİR AĞI İLE TAHMİN EDİLMESİ

Metin SAĞIK

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2019

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2019

MİKROŞERİT ANTENİN PARAMETRELERİNİ MTM YAPILAR İLE İYİLEŞTİRME VE PARAMETRE DEĞERLERİNİN YAPAY SİNİR AĞI İLE TAHMİN EDİLMESİ

Metin SAĞIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2019

Metin SAĞIK tarafından hazırlanan "MİKROŞERİT ANTENİN PARAMETRELERİNİ MTM YAPILAR İLE İYİLEŞTİRME VE PARAMETRE DEĞERLERİNİN YAPAY SİNİR AĞI İLE TAHMİN EDİLMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

.....
.....

Başkan: Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ersin ÖZDEMİR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şule ÇOLAK

Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Anabilim Dalı, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

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

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 10/06/2019

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

.....

Prof. Dr. Tolga DEPCİ

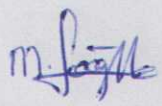
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.

ETİK BEYAN

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

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

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



Metin SAĞIK

10/06/2019

MİKROŞERİT ANTENİN PARAMETRELERİNİ MTM YAPILAR İLE İYİLEŞTİRME VE PARAMETRE DEĞERLERİNİN YAPAY SİNİR AĞI İLE TAHMİN EDİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Metin SAĞIK

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Mühendislik çalışmalarında elektromanyetik alanına konu olmuş metamalzemelere (MTM) olan ilgi artarak devam etmektedir. MTM en genel tanımıyla elektromanyetik özellikleri açısından doğada bulunmayan malzemelerdir. Bu malzemeler bilinen malzemelerin bir araya getirilmesi sonucu fiziksel olarak oluşturulabilen ve laboratuvarlarda yapay olarak üretilebilen malzemelerdir.

Yama, horn, monopol, mikroşerit ve yagi anten gibi birçok anten çeşidi vardır. Bu tez çalışmasında mikroşerit antenin tasarımı yapılmıştır ve bu antenin bazı parametreleri MTM özellikteki yapılar ile iyileştirilmek istenmiştir. Bu parametreler antenin kazancı ve yönlülüğüdür. Ayrıca elde edilen veriler yapay sinir ağlarına eğitilerek gerçek değerler tahmin edilmiştir. MTM yapıların anten ile etkileşimi sonucu elde edilen veri değerleri yapay sinir ağları (YSA) tekniği için kullanılarak eğitilmiştir. YSA tekniğini kullanmaktaki amaç YSA ile en iyi tahmin edilen MTM yapısının tespitini yapabilmektir. Tez çalışmamızda ilk önce CST MWS simülasyon programında 40 tane rastgele MTM yapısı tasarlanmış ve sonra analizleri yapılmıştır. Bu yapıların her biri 6x6 birim kare yamalardan oluşmaktadır. Yapıların dielektrik katsayısını (ε), manyetik geçirgenlikleri (μ) ve kırılma indislerini (n) bulmak için CST MWS simülasyon programında S11 ve S21 parametre verileri elde edilmiştir. Tez çalışmasının özgün yanı, rastgele ve simetrik olan MTM yapıların anten kazancına ve yönlülüğüne etkisini incelemek ve bu parametre değerlerinin YSA tekniği ile tahmininin yapılmasıdır. MTM yapıların anten ile etkileşimi sonrasında anten kazancı ve yönlülüğü iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bulunan değerler YSA ile tahmin edilmiştir ve en iyi tahmin edilen yapı belirlenmiştir. İkinci çalışmada, C şeklinde MTM özellik gösteren SRR yapısı tasarlanmıştır. C şekilli SRR yapısının ebatları değiştirilerek antenin rezonans frekansı ve S11 değeri incelenmiştir. YSA tekniği için antenin yeni rezonans frekansı ve S11 değerlerinden veri seti hazırlanmıştır. Bu değerler YSA uygulamasında eğitim işlemi yapılmış ve değerler tahmin edilmiştir.

Son olarak laboratuvarda önerilen anten ve MTM yapısının üretimi yapılmıştır. Yapıların üretiminden sonra ölçümleri gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu şekilde gerekli incelemeler yapılmıştır ve amaçlanan çalışmanın sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Mikroşerit yama anten, metamalzeme, yapay sinir ağları
Sayfa Adeti : 113
Danışman : Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

IMPROVEMENT OF MICROSTRIP ANTENNA PARAMETERS WITH MTM STRUCTURES AND ESTIMATION OF PARAMETER VALUES BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK
(M. Sc. Thesis)

Metin SAĞIK

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2019

ABSTRACT

In engineering studies, the interest in the electromagnetic field-related metamaterials (MTM) is increasing. MTM is the most general definition of materials that are not found in nature in terms of electromagnetic properties. These materials are materials that can be physically formed as a result of combining known materials and can be artificially produced in laboratories.

There are many kinds of antennas such as patch, horn, monopoly, microstrip and yagi antenna. In this thesis, the design of the microstrip antenna has been made, and some parameters of this antenna have been requested to be improved with MTM structures. These parameters are the gain and directivity of the antenna. In addition, the obtained data were trained to artificial neural networks and the actual values were estimated. The data obtained as a result of the interaction of MTM structures with the antenna are trained using artificial neural networks (ANN) technique. The aim of using the ANN technique is to determine the best estimated MTM structure with ANN. Firstly in this thesis study, 40 random MTM structures were designed and then analyzed in CST MWS simulation program. Each of these structures consists of 6x6 unit square patches. In order to find the dielectric coefficient (ε), magnetic permeability (μ) and refractive index (n) of the structures, parameter data S11 and S21 were obtained in the CST MWS simulation program. The specific aspect of the thesis study is to examine the effect of random and symmetrical MTM structures on antenna gain and directivity and to estimate these parameter values by the ANN technique. After the interaction of the MTM structures with the antenna, antenna gain and directivity were tried to be improved. The values obtained were estimated by ANN and the best-predicted structure was determined. In the second study, the SRR structure with C-shaped MTM was designed. The resonance frequency and S11 value of the antenna were examined by changing the dimensions of the C-sheped SRR structure. For the ANN technique, the data set was prepared from the new resonance frequency and S11 values of the antenna. These values were educated in ANN application and the values were estimated.

Finally, the laboratory produced the antenna and MTM structure. Measurements were made after the production of the structures and compared with the simulation results. In this way, necessary investigations have been made and the result of the intended study has been reached.

Keywords : Microstrip patch antenna, metamaterial, artificial neural network
Page Number :113
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesi, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez konusunun belirlenmesi ve çalışmaların takip edilmesinde her türlü yardımı esirgemeyen Doç. Dr. Emin Ünal'a, Dr. Öğr. Üyesi Ersin ÖZDEMİR, Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan AKGÖL'e, Araştırma Görevlileri Olcay ALTINTAŞ ile Fatih Özhan ALKURT'a, Öğretim Görevlisi Mehmet BAĞMANCI'ya, Yüksek Lisans arkadaşlarımdan Şekip DALGAÇ'a ve Emine Ceren DOĞAN'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen ailem ve merhum dedem Abdülmecit SAĞIK'ı rahmetle anarak hepsine saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3

3. ANTENLER VE METAMALZEMELER (MTMs) 9

3.1. Antenler 9

3.2. Anten Çalışma Prensibi 10

3.3. Anten Çeşitleri 11

3.3.1. Tel antenler 12

3.3.2. Horn antenler (açıklık antenler) 12

3.3.3. Dizi antenler 13

3.3.4. Yansıtıcı (reflektör) antenler 13

3.3.5. Lens antenler 14

3.3.6. Mikroşerit antenler 15

3.4. Önemli Anten Parametreleri 16

3.4.1. Işıma eğrisi 17

3.4.2. Güç ve alan ışıma eğrisi 17

3.4.3. Işıma güç yoğunluğu 18

Sayfa

3.4.4. Işıma şiddeti 18

3.4.5. Yönlülük (directivity) ve kazancı 19

3.4.6. Antenin verimi ve kazancı 20

3.5. Metamalzemeler (MTMs) 22

4. MATERYAL VE YÖNTEMLER 28

4.1. Nicolson Ross Weir (NRW) Metodu 28

4.2. Zaman Domainde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu 30

4.3. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) 33

4.4. Sonlu İterasyon tekniği (FIT) 34

4.5. CST 34

4.6. HFSS 35

4.7. Yapay Sinir Ağları (YSA) 35

4.7.1. YSA tekniği tanımı ve özellikleri 36

4.7.2. YSA tekniğini yapısı 38

4.8. Üretim ve Ölçüm Cihazları 40

5. ARAŞTIRMA BULGULARI, UYGULAMALAR VE TARTIŞMA 44

5.1. MYA ile MTM Yapıların Tasarımı ve Değerlerin YSA ile Tahmini 44

5.1.1. Mikroşerit yama antenin tasarımı ve sonuçları 45

5.1.2. MTM yapıların oluşturulması ve analiz sonuçları 50

5.1.3. Mikroşerit yama anten ile MTM yapıların karşılaştırılması ve sonuçları 56

5.1.4. MTM yapıların YSA tekniğinde eğitilmesi ve sonuçları 76

5.2. MYA ile CSRR Yapıların Etkileşimi ve Değerlerin YSA ile Tahmini 85

5.2.1. Mikroşerit yama anten tasarımı 85

Sayfa

5.2.2. C şekilli SRR (CSRR) yapısının tasarımı ve anten ile etkileşim sonuçları 87

5.2.3. Mikroşerit anten değerlerinin YSA ile tahmin edilmesi 93

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 100

KAYNAKLAR 102

EKLER 106

EK-1. 40 MTM yapısının YSA'da eğitilmesi gerekli veriler. 106

EK-2: Tüm MTM yapıların MYA ile etkileşimin sonuçları 108

EK-3: Gerçek değerler ve YSA'nın tahmin ettiği değerlerin karşılaştırılması 109

ÖZGEÇMİŞ 111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. RHM ve LHM ortamlarda EM özelliklerinin karşılaştırılması (Karaaslan, 2009). 27

Çizelge 5.1. MYA'nın 5,2 GHz frekansı için gerekli ölçüm değerleri 45

Çizelge 5.2. Antenle etkileşimi yapılan 17 MTM yapısının değişen rezonans frekans değerdeki dielektrik geçirgenliği, manyetik geçirgenliği ve kırılma indisi 57

Çizelge 5.3. Antenle etkileşimi yapılan 17 MTM yapısının değişen rezonans frekans değerdeki ışıma etkisi (Rad Eff), toplam etki (Tot Eff) ve directivity değerleri …. 58

Çizelge 5.4. CST ve HFSS analiz sonuçlarının karşılaştırılması 67

Çizelge 5.5. Hedeflen frekans değeri ile YSA'nın tahmin ettiği frekansın karşılaştırması 81

Çizelge 5.6. Gerçek ile YSA'nın tahmin ettiği yönlülük değerlerinin karşılaştırılması. 83

Çizelge 5.7. Gerçek kazanç ile YSA'nın tahmin ettiği değerlerin karşılaştırılması 84

Çizelge 5.8. Mikroşerit antenin 5,176 GHz frekansı için büyüklük ve birimi..... 86

Çizelge 5.9. Bir CSRR yapısının ebatları 88

Çizelge 5.10. Antenin yönlülüğünün Phi 0 derecedeki ışıma eğrisinin değerleri..... 91

Çizelge 5.11. Antenin kazancının Phi 0 derecedeki ışıma eğrisinin değerleri..... 92

Çizelge 5.12. Antenin yönlülüğünün Phi 90 derecedeki ışıma eğrisinin değerleri..... 92

Çizelge 5.13. Antenin kazancının Phi 90 derecedeki ışıma eğrisinin değerleri..... 93

Çizelge 5.14. Eğitim, onaylama ve test verilerin yüzdeleri işe MSE ve R değerleri..... 95

Çizelge 5.15. Gerçek Frekans ve S11 ile YSA'nın tahmin ettiği en iyi on değer 98

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Tel antenler; (a) dipol anten, (b) dairesel halka anten, (c) helisel anten (Balanis, 2005: 4) 12

Şekil 3.2. Horn anten örnekleri; (a) piramit horn, (b) konik horn ve (c) dikdörtgen dalga kılavuzu (Balanis, 2005: 5) 12

Şekil 3.3. Dizi anten çitlerine örnek; (a) yagi-uda dizi anteni, (b) dikdörtgen dalga kılavuzu dizi anteni, (c) mikroşerit yamalı dizi anteni ve (d) slotlu dalga kılavuzu dizi antenleri (Balanis, 2005: 7) 13

Şekil 3.4. n> 1 olan lens antenler; (a) dış bükey-düz, (b) dış bükey-dış bükey ve (c) dış bükey-iç bükey (Balanis, 2005: 8) 14

Şekil 3.5. n <1 olan lens antenler; (a) iç bükey-düz, (b) iç bükey-iç bükey ve (c) iç bükey-dış bükey (Balanis, 2005: 8) 14

Şekil 3.6. Mikroşerit yama anten; (a) malzeme tipleri (b) antenin parametreleri 15

Şekil 3.7. Malzemelerin sınıflandırılması ve adları (Engheta ve Ziolkowski, 2016) 22

Şekil 3.8. EM malzemelerin ε ve μ değerlerine göre EM dalgalarının davranışı 24

Şekil 3.9. EM alanların ve dalga sinyalinin vektörel bileşeni; (a) sağ el mantığı ve (b) sol el mantığı 25

Şekil 4.1. Yee gridinde EM alan bileşenleri ve uzay ortamında konuma bağlı gösterimi (Yee, 1997) 32

Şekil 4.2. Yapay sinir ağının yapıları 38

Şekil 4.3. Aksiyon fonksiyonları; (a) sigmoid fonksiyonu, (b) tanjant hiperbolik fonksiyonu 39

Şekil 4.4. Network Analiz cihazı ile mikroşerit antenin S11 değerinin ölçülmesi 41

Şekil 4.5. MATS-1000A anten eğitim cihazı 41

Şekil 4.6. Verici ve alıcı antenler: (a) horn ve (b) mikroşerit anten 42

Şekil 4.7. Ölçüm için gerekli düzenek 43

Şekil 5.1. MYAve boyutlarının isimleri 45

Şekil 5.2. MYA'nın metal ve dielektrik malzemesi; (a) ön kısım, (b) arka kısım 46

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.3. MYA'nın 5,2 GHz rezonans frekanslı S11 parametre değeri..... 46

Şekil 5.4. HFSS ve CST ara yüzünde aynı antenin karşılaştırılması..... 47

Şekil 5.5. MYA'nın fabrikasyonu; (a) ön kısım, (b) arka kısım..... 47

Şekil 5.6. MYA'nın CST, HFSS ve ölçümdeki dB S11 parametre grafiği 48

Şekil 5.7. MYA'nın Phi 0 ve Phi 90 derecedeki ışıma eğrileri; (a) ve (b) antenin yönlülüğü..... 49

Şekil 5.8. MYA'nın Phi 0 ve Phi 90 derecedeki ışıma eğrileri; (a) ve (b) anten kazancı..... 49

Şekil 5.9. MYA'nın 3 boyutlu (3D) ışıma eğrisi; Antenin (a) yönlülüğü ve (b) kazancı 50

Şekil 5.10. Tasarlanan 40 MTM yapılardan 11.MTM, 13.MTM ve 16. MTM..... 50

Şekil 5.11. CST tasarımlı bir MTM yapısının (a) sınır şartları ve (b) dalga sinyali grafiği 51

Şekil 5.12. MTM yapısının metal ve boş kısımların bit olarak gösterimi 51

Şekil 5.13. YSA için verilerin elde edilişi için yapıların işlem aşamaları 52

Şekil 5.14. MTM11 yapısının real ve sanal (a) dielektrik geçirgenlik, (b) manyetik geçirgenlik ve (c)kırılma indisi 53

Şekil 5.15. MTM13 yapısının real ve sanal (a) dielektrik geçirgenlik, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi 54

Şekil 5.16. MTM16 yapısının real ve sanal (a) dielektrik geçirgenlik, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi 55

Şekil 5.17. MYA ile MTM yapısının etkileşimi; (a) genel görünüm, (b) üst görünüm.. 56

Şekil 5.18. Anten ile MTM11 yapısının karşılaştırılması..... 59

Şekil 5.19. Anten ile MTM13 yapısının karşılaştırılması..... 59

Şekil 5.20. Anten ile MTM16 yapısının karşılaştırılması..... 60

Şekil 5.21. MYA ile MTM11'in yönlülüğü; (a) Phi 0 iken, (b) Phi 90 iken 60

Şekil 5.22.MYA ile MTM11'in kazancı; (a) Phi 0, (b) Phi 90..... 61

Şekil 5.23. MYA ile MTM13'ün Phi açısına göre yönlülüğü; (a) Phi 0, (b) Phi 90 62

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.24. MYA ile MTM13'ün kazancı; (a) Phi 0, (b) Phi 90 62

Şekil 5.25. MYA ile MTM16'nın yönlülüğü; (a) Phi 0, (b) Phi 90 63

Şekil 5.26. Antenin MTM16ile Phi açısına göre kazancı; (a) Phi 0, (b) Phi 90 63

Şekil 5.27. Antenin MTM11ile üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç 64

Şekil 5.28. MYA ile MTM11'in üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç 64

Şekil 5.29. Anten ile MTM11'in üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç 65

Şekil 5.30. MTM11 yapısının (a) elektrik alan dağılımı, (b) yüzey akım dağılımı ve (c) manyetik alan dağılımı 65

Şekil 5.31. MTM13 yapısının (a) elektrik alan dağılımı, (b) yüzey akım dağılımı ve (c) manyetik alan dağılımı 66

Şekil 5.32. MTM16 yapısının (a) elektrik alan dağılımı, (b) yüzey akım dağılımı ve (c) manyetik alan dağılımı 66

Şekil 5.33. Anten ve MTM yapıların HFSS simülasyonunda sonuçlarının karşılaştırılması 68

Şekil 5.34. MTM11 yapısıyla antenin Phi=0 ve Phi 90 derecede ışıma eğrileri; (a) ve (b) antenin yönlülüğü, (c) ve (d) anten kazancı 69

Şekil 5.35. MTM13 yapısıyla antenin Phi=0 ve Phi 90 derecede ışıma eğrileri; (a) ve (b) antenin yönlülüğü, (c) ve (d) anten kazancı 70

Şekil 5.36. MTM16 yapısıyla antenin Phi=0 ve Phi 90 derecede ışıma eğrileri; (a) ve (b) antenin yönlülüğü, (c) ve (d) anten kazancı 71

Şekil 5.37.HFSS'deantenin 3D ışıma eğrisi; antenin kazancı(a) ve (b) yönlülüğü 72

Şekil 5.38. HFSS'de antenin MTM yapılar ile etkileşimi sonucu 3D polar ışıma eğrileri; (a) ve (b) MTM11 ile, (c) ve (d) MTM13 ile ve (e) ve (f) MTM16 ile antenin yönlülüğü ve kazancı 73

Şekil 5.39. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) ve (e) CST simülasyon sonuçları, (b), (d) ve (f) ölçüm sonuçları.... 74

Şekil5.40. MTM yapıların laboratuvar ortamında anten ile etkileşimi sonucu 2D ışıma eğrisi; (a) anten, (b) anten ile MTM11, (c) anten ile MTM13 ve (d) anten ile MTM16..... 75

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.41. Sinir Ağının giriş, gizli ve çıkış katman parametreleri 76

Şekil 5.42. Sinir ağının başlatılması 77

Şekil 5.43. Eğitim için yüzdelerin belirlenmesi 77

Şekil 5.44. Eğitim algoritmasının seçilmesi ve eğitimin başlatılması 78

Şekil 5.45. Eğitim, onaylama ve testin MSE ve R sonuçları 79

Şekil 5.46. MSE grafiği 79

Şekil 5.47. CST frekans ile YSA'nın tahmin ettiği frekansının kolerasyonu 80

Şekil 5.48. CST frekansı ile YSA'nın tahmin ettiği frekansların karşılaştırması 81

Şekil 5.49. Yönlülüğün MSE ve R değerleri 82

Şekil 5.50. CST ile YSA'nın tahmin ettiği anten yönlülüğün karşılaştırması 82

Şekil 5.51. Kazancın MSE ve R değerleri 83

Şekil 5.52. CST ile YSA'nın tahmin ettiği anten kazançlarının karşılaştırması 84

Şekil 5.52. Mikroşerit antenin 5,176 GHz frekansında S11 değeri 86

Şekil 5.53. Microşerit antenin 5.176 GHz frekansındaki radyasyon patterni; (a) antenin yönlülüğü, (b) antenin kazancı 87

Şekil 5.54. CSRR yapısı ve ebatları;(a) ön yüzey, (b) arka yüzey 87

Şekil 5.55. CSRR yapı tasarımı için sınır şartlarının belirlenmesi 88

Şekil 5.56. CSRR yapısının real ve sanal (a) dielektrik sabiti, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi 89

Şekil 5.57. Test edilen 150 CSRR yapısının anten ile etkileşimi sonucu 90

Şekil 5.58. Anten ve en iyi etkileşim yapan üç CSRR yapısının S11 grafiği 90

Şekil 5.59. Mikroşerit anten ile CSRR yapısının etkileşimi 94

Şekil 5.60. YSA eğitimi için giriş ve çıkış parametreleri 94

Şekil 5.61. MSE grafiği 95

Şekil 5.62. Gerçek değer ile Tahmin edilen değerlerin korelasyonu 96

Şekil 5.63. S11 gerçek değeri ile YSA'nın tahmin ettiği değerlerin karşılaştırılması 97

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
ε	Dielektrik sabiti
μ	Manyetik geçirgenlik
E	Elektrik alan şiddeti
H	Manyetik alan şiddeti
D	Elektrik akı yoğunluğu
B	Manyetik akı yoğunluğu
$\mathbf{J_e}$	Elektrik iletim akı yoğunluğu
$\mathbf{J_m}$	Manyetik iletim akı yoğunluğu
k	Dalga vektörü
S	Poynting vektörü
ω	Açısal frekans
$\boldsymbol{\omega_p}$	Plazma frekansı
n	kırılma indisi
Z	Empedans
Γ	Yansıma katsayısı
c	Işık hızı
$\mathbf{S_{ij}}$	Saçılma parametresi
t	zaman sabiti
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
CST	Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi
DNG	Çift Negatif
DPG	Çift Pozitif
EM	Elektromanyetik

ENG	Epsilon Negatif
FDTD	Zaman Domaininde Sonlu Farklar
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
FIT	Sonlu İntegrasyon Tekniği
GA	Genetik Algoritma
HPBW	Yarım Güç Demet Genişliği
HFSS	Yüksek Frekans Yapı Simülatörü
LHM	Sol-el Yönlü Malzemeler
MATLAB	Matris Laboratuvarı
MNG	Mue Negatif
MTM	Metamalzeme
MWS	Mikrodalga Stüdyosu
NRW	Nicolson Ross Weir Metodu
PEC	Mükemmel Elektrik İletken
PMC	Mükemmel Manyetik İletken
RHM	Sağ-el Yönlü Malzemeler
SRR	Ayrık Halka Rezonatörü
TE	Dik Elektrik Alan
TEM	Enine Elektromanyetik Alan
TM	Dik Manyetik Alan
YSA	Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Elektromanyetik alanının konularından biri olan antenler, kullanıldığı yerlere göre farklı şekillerde, farklı çalışma frekanslarında ve boyutlarda oluşturulabilmektedir. Kullanım alanlarının çok geniş olmasıyla birçok önemli özellikleri de tasarım amacına göre incelenmektedir. Bunlardan biride tez çalışmamızda amaçladığımız anten kazançlarının iyileştirilmesinin nasıl ve hangi yöntemlerle gerçekleştirilebileceğidir.

Bu tez çalışmasında monopol, dipol, dikdörtgen yama anten, mikroşerit yama anten, yagi anten vs. gibi anten çeşitlerinden herhangi birinin kazancının iyileştirilmesi üzerinden yola çıkılmıştır. Son yirmi yıldır üzerinde ciddi şekilde çalışmaları yapılan metamalzemeler (MTM) ile bu amaca ulaşılmaya çalışılmıştır. Anten için tasarlanmış olan MTM'nin hangi geometrik yapısının amaçlanan hedefe daha çok yaklaştıracağı düşüncesiyle, yine 20. yüzyılda çığır açmış teknik olan yapay sinir ağları (YSA) tekniği kullanılmaya çalışılmıştır.

MTM'nin en genel tanım olarak ifade etmek gerekirse, doğada elektromanyetik özellikleri olarak mevcut olmayan bir malzeme olmasıdır. MTM'yi ilginç kılan en önemli yanı bir malzemenin elektromanyetik özelliğini ortaya koyan iki parametresinin de negatif olmasıdır. Bu parametreler malzemenin dielektrik katsayısı (ε) ve manyetik geçirgenliği (μ) değerleridir. MTM kavramı ilk defa 1968 yılında Rus bilim adamı Victor G. Veselago tarafından ortaya atılmıştır. Veselago, MTM kavramını ileri sürerken sadece teorik olarak varsayımda bulunarak iki önemli parametre olan malzemenin dielektrik katsayısı (ε) ve manyetik geçirgenliğinin (μ) eş zamanlı negatif olması durumunda oluşabilecek farklılıkları ortaya koymuştur (Veselago,1968). Veselago teorik olarak ileri sürdüğü bu ortamı sol elli malzemeler olarak adlandırmıştır (Veselago,1968). Veselago bu fikir doğrultusunda ayrıca Snell yasasını ters olarak, Doppler olayında ters etkiyi ve Cerenkov ışımasının zıt yönlüsünü ortaya koymuştur. Başlarda bu fikre pek önem verilmese de yaklaşık 30 yıl sonra yani 1996 ile 1999 yıllarında Pendry ve çalışma arkadaşları önce dielektrik katsayısını negatif ($\varepsilon<0$) yapacak yapay malzemeyi 1996 yılında, sonra da manyetik geçirgenliği negatif ($\mu<0$) yapacak tasarımı 1999 yılında elde etmeyi başardılar (Pendry, Holden, Stewart ve Youngs 1996; Pendry, Holden, Robbins ve Stewart, 1999). $\varepsilon<0$ ve $\mu<0$ değerlerinin her ikisinin de tek bir yapı üzerinden negatif olmasını 2000

yılında Smith'in çalışmalarıyla sağlanmıştır (Smith, Padilla, Vier ve Nemat-Nasser, 2000). Bundan sonraki süreçte MTM ile yapılan çalışmalar bilim dünyasında yeni bir çığır açarak birçok alanda uygulama imkânı bulunmuştur.

MTM'lerin tasarımında kullanılan bir diğer yöntemde YSA olmuştur. Tez çalışmamızda da YSA tekniğine başvurarak anten kazancını ve yönlülüğünü artırmak amacıyla en uygun MTM yapısının tespiti yapılmaya çalışıldı. YSA, MTM gibi günümüzde birçok çalışmada konu olarak istenilen amaçlara uygun bir şekilde kullanılmıştır.

YSA'nın kaynağı yapay zekâ olup, yapay zekâ konusu içerisinde bir alt başlık olarak geliştirilerek, sayısal verilerle bilgisayar ortamına uygulanması sonucu çeşitli kompleks problemlerin çok esnek bir şekilde kullanımı sayesinde bu karmaşıklığı kolay bir hale dönüştürebilme imkânı sağlamıştır. Verileri bir insan beyninin fonksiyonları gibi işlev gören aşamalarla öğrenip taramasını yapıp en uygun veriyi kullanıcıya sunarak problem çözümünü basit hale getirebilmektedir.

Giriş bölümünde MTM, YSA tekniği ile MTM malzeme ve antenle ilgili bilgilendirmeler yapılmıştır ve sonrasında bu konularla ilgili Bölüm 2'de önceki çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm 3 olarak anten ve MTM malzeme hakkında teknik bilgiler yer almaktadır. Bölüm 4'te kullanılan materyallere ve bu alanda kullanılan yöntemlere yer verilerek çalışmanın anlaşılır bir duruma getirmesi sağlanmıştır. Bölüm 4'te yapay zekanın konularından biri olan YSA'ya değinilerek YSA tekniğinde hangi aşamalardan geçilerek istenen tasarım çalışmasına ulaşıldığı teorik olarak değinilmiştir.

Bölüm 5 kısmında tez çalışmasında yapılan çalışmalara ve uygulamalara yer verilmiştir. Bu bölümde ayrıca HFSS ve CST programında tasarlanan yapıların birer örneğinin tasarlama aşamaları resimlerle anlatılmıştır. Bu bölümde ayrıca MTM yapıların dielektrik katsayısı (ε), manyetik geçirgenlik (μ) ve kırılma indisi (n) değerlerinin MATLAB programından elde edilmesi anlatılmaya çalışılmıştır.

Son bölümde Sonuçlar, Öneriler ve Tartışma hakkında bilgiler verilmiştir. Gerekli öneriler verilmiş olup son olarak çalışma hakkında tartışmaya yer verilerek tez çalışması sonlandırılmıştır. Ekler kısmında ise çalışmada toplanan bazı veriler kendi bölümlerinde fazla yer kaplamasından ve tez akışını düzgün kılmak için bu kısma eklenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tez çalışmamızın bu kısmında çalışmamıza konu olmuş MTM ve YSA tekniği ile ilgi önceden yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Öncelikle MTM hakkındaki çalışmalara, daha sonra YSA ve MTM konularının beraber işlenerek oluşturulmuş önceki çalışmalara yer verilmiştir. Aşağıda önceki çalışmalardan bazıları anlatılmıştır.

Başlangıç olarak, MTM kavramının ilk çıkış noktası olan negatif kırılma indisinin nereden geldiğinden bahsetmek gerekirse, negatif kırılma indisi kavramını ilk ileri süren yukarıda da değinildiği gibi Rus bilim adamı Veselago olmuştur (Veselago, 1968). Elektromanyetikte, elektrik alan ile manyetik alan vektörlerinin birbirlerine göre vektörel çarpımı sağ el mantığına göre bakıldığında dalganın gittiği yön olarak bilinmektedir (Bkz. Şekil 3.9a). Fakat MTM malzemeler de bu ilişki sol el olarak tespit edilmiş (Bkz. Şekil 3.9b) ve bu ilişki Veselago tarafından teorik olarak izah etmiştir. Bu malzemelere sol elli malzemeler (LHM) adı verilmiştir.

Veselago'nun ileri sürdüğü bu çalışmaya uzun süre pek önem verilmemiştir (yaklaşık 30 yıl boyunca). Sonra Pendry ve meslektaşları MTM teorisini 1996 yılında dielektrik katsayısını(ε) negatif yapacak tasarımı deneysel ortamda yapmayı başarmışlardır ve 1999'da yine Pendry ve meslektaşları manyetik geçirgenliği (μ) negatif yapacak tasarımı üretmişlerdir (Pendry ve diğerleri 1996; Pendry ve diğerleri, 1999).

Pendry ve arkadaşları ε ve μ değerlerini ayrı ayrı ele almışlar, ama 2000'li yıllara gelindiğinde bir başka araştırmacı olan Smith ve meslektaşları EM için önemli olan bu iki parametre değerlerinin her ikisinin beraber negatif yapacak tasarım çalışmasını yapmayı başarmışlardır. Sonraki dönemlerde de MTM birçok alanda ilgi görerek yeni çalışmalarda uygulama imkânlarıyla geniş bir alana yayılmıştır (Smith ve diğerleri, 2000).

Anten ile metamalzeme çalışmaları literatür taramasında yaygın olarak kullanılmıştır ve incelemeler sonucunda bu alanın oldukça ilgi gördüğü gözlenmiştir. Benzer çalışmalar 2011 yılındaki Lafmajani ve ekibi tarafından da gerçekleştirilmiştir. Lafmajani'nin çalışmasında spiral telle oluşturulan metamalzemeler ile manyetik geçirgenliğin negatif

olması sağlanmış ve bu MTM birim hücreler kullanılarak anten ebatlarının küçültme işlemi yapılmak istenmiştir (Lafmajani ve diğerleri, 2011).

MTM yapıları literatüre bakıldığında genelde dairesel ayrık halka rezonatörü (CSRR) ile tasarlandığı ve çeşitli çalışmalarda denendiği görülmektedir. Bunlardan biri de yine CSRR yapısı kullanılarak yapılan 2012 yılı Dong ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmada, CSRR yapılar yama anten üzerine tasarlanmış ve düşük bir rezonans frekansı sağlamak için paralel LC rezonatör görevi ortaya koymuş ve dielektrik altındaki toprak görevi gören metalik yüzeyde reaktif metal yüzey oluşturularak gerçeklenmiştir (Dong ve diğerleri, 2012).

Rahimi ve arkadaşlarının 2014 yılında metamalzeme kullanarak yaptıkları çalışmada, antenin boyutu küçültmeye gidilmiştir. Bunu yaparken farklı metamalzemeler kullanılmıştır. Çalışmada kablosuz uygulamalarda kullanılan antenler üzerinde periyodik yapıların etkileri incelenmiştir. Bunun için koaksiyel olarak beslemesi yapılan minyatür üç farklı anten modeli oluşturulmuştur (Rahimi ve diğerleri, 2014).

Metamalzeme temelli mikrodalga enerji hasadı ile ilgili 2014 yılındaki başka bir çalışmada Chen ve ekibi, pillerin verimliliğini artırmak için kullanılan enerji hasadı sistemini, özgün özelliklerdeki metamalzemeler ile incelemiştir (Chen ve diğerleri, 2014).

Gündüz ve arkadaşlarının 2016 yılında enerji hasadı için yaptıkları inceleme çalışmasında, EM'nin bir başka uygulama çalışmalarından olan enerji hasadı ile ilgili olarak metamalzeme kullanılmıştır. Bu çalışmada polarizasyon açısından bağımsız mükemmel çoklu bandlı metamalzeme emilimi sağlanarak enerji hasadı elde edilmiştir (Gündüz ve diğerleri, 2016).

Güncel olarak metamalzeme kaynaklı çalışmalara bakıldığında mikrodalga enerji hasadı üzerinde yapılan çalışmalar görülmektedir. Örneğin, 2018 yılında Karaaslan ve arkadaşlarının yapmış olduğu araştırma çalışmasında mikrodalga enerji hasadı uygulamaları için sayısal ve deneysel olarak yeni bir metamalzeme yapısı üretilmiştir. Yapılan yapı tekerlek şeklinde olup, tekerlek şekilli MTM yapısının yüksek enerji emilimi, kablosuz haberleşmede kullanılan frekans aralıklarında gerçekleşmiştir (Karaaslan ve diğerleri, 2018).

Karaaslan ve ekibinin benzer bir çalışmasını 2017 yılında da görmek mümkündür. Yine metamalzemeler kullanılarak mikrodalga enerji hasadı için enerji toplayabilen ve verimliliği en iyi hale getirecek önemli bir çalışma ortaya konmuştur. Bu çalışmada, çok katmanlı kare şeklinde ayrık halka yapıdaki metamalzeme özelliğine dayanan malzeme tasarımıyla enerjilerin toplanmasıyla verimi artırmak amaçlanmıştır (Karaaslan ve diğerleri, 2017).

Enerji hasadı kaynağı olarak, güneş enerjisinden elektrik elde etmek için 2017 yılında Ünal ve arkadaşlarının yapmış olduğu ultra geniş bantlı metamalzeme yapıda, çinko oksit tungsten tabanlı piramit tasarlanarak güneş enerjisinden enerji hasadı sağlanmıştır (Ünal ve diğerleri, 2017).

Akgöl ve ekibinin de 2017 yılında enerji hasadlamak için metamalzeme yapılı tasarımlar geliştirmiştir. Bu çalışmada halka bobin rezonatörlü yapılar arasına dirençli yüklere sahip metamalzeme emici özellikte yapılar tasarlanarak, enerjinin toplanması sağlanmıştır. 3-6 GHz aralıklı frekansta emilimin %82,21 civarlarda olması sağlanmıştır (Akgöl ve diğerleri, 2017).

Sensör uygulamalarına bakıldığında ise 2015 yılında Ali ve ekibinin metalik yüzeyler içindeki milimetrik çatlaklıkları tespit etmek için metamalzeme özellikteki yapıyla yüklenmiş bir dalga kılavuzu, sensör görevi görecek şekilde tasarlanmıştır. Elde edilen veriler yapay sinir ağlarında eğitilerek test edilmiş ve deneysel ortamda denemesi yapılmıştır (Ali ve diğerleri, 2015).

Tez çalışmasında MTM ile mikroşerit antenin etkileşimi sonucu anten kazancının ve yönlülüğünün artırılması için YSA tekniğine başvurulmuştur. Yapay sinir ağları üzerinde yapılan ilk çalışmalar, 1940 yılında W.S. McCulloch tarafından ortaya konulmuştur (McCulloch, 1940). 1943 yılında W.A. Pitts tarafından yayınlanan makale üzerine bu konuda çalışmalar artmaya başlamıştır (W.A. Pitts, 1943). 1954 yılına gelindiğinde tasarımı W.A. Clark ve B.G. Farley tarafından yapılan, uyarılara tepki veren ve bu uyarılara göre uyumluluk gösteren yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. 1960 yılında ise ilk sinir ağlı bilgisayar tasarımı yapılmıştır. 1985 yıllarından itibaren de hız bir şekilde YSA gelişim göstermiştir.

Tez çalışması doğrultusunda yapılan literatür araştırmalarında ise amacımızla paralellik gösteren bazı çalışmaların olduğu görülmüştür. Bunlardan biri, 2016 yılında Rajaraman ve arkadaşlarının YSA kullanarak anten üzerinde MTM tasarımıyla yeni bir model ortaya çıkararak yapmış olduğu makale çalışmasıdır (Rajaraman, Sood ve Anbazhagan, 2016). Aynı yılda CSRR yapısıyla manyetik geçirgenlik değerinin YSA tekniğinde eğitimi yapılarak en uygun CSRR boyutlarına ulaşılması denenmiştir (Nanda, Tripathy, Sahu, Mishra, 2016). Geometrik yapısı eşkenar üçgen olan bir mikroşerit antenin boyutlarını belirledikleri bir formüle göre yapay sinir ağlarında eğitimini sağlayarak uygun verilere ulaşılmış ve anten minyatürizasyonu sağlanmıştır (Gopalakrishnan, Gunasekaran, 2005). Bu çalışmalar tez çalışması için bir rehber olup çalışmada amaçlanan hedefe ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bunlarla beraber literatür çalışmalarına bakıldığında YSA tekniğinin çok kullanışlı bir uygulama tekniği olduğu anlaşılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalara bazı örnekler vermeye devam etmek gerekir ise en güncel çalışmalardan 2018 yılında Srivastava ve arkadaşlarının, yapay sinir ağlarını kullanarak dairesel bir mikroşerit yama anten üzerinde parametre tahminin yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada mobil iletişim için önemli bir parametre olan ve rezonans frekansını belirleyen dairesel yamanın yarıçapının boyutu ele alınmıştır. Bu önemli parametre ile matematiksel olarak analizler yapılmış ve doğruluğunun teyidi için YSA tekniğine başvurulmuştur (Srivastava ve diğerleri, 2018).

Türker ve arkadaşlarının 2007 yılındaki mikroşerit anten için genel bir kuralı baz alarak yapay sinir ağlarında eğitim yapılmak istenmiş ve bu amaç doğrultusunda inceleme çalışması yapılmıştır (Türker ve ark., 2007). Yine 2010 yılında RF ve mikro dalga için de oldukça yaygın olarak YSA tekniğinin kullanıldığı Thakare ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, RF mikrodalga mühendislerine yapay sinir ağları uygulamasının yararlarını, ne anlama geldiğini, hangi durumlarda kullanılacağını ve mikroşerit anten tasarımı yapılırken nasıl modelleneceği hakkında açıklamalarda bulunulmuştur (Thakare ve diğerleri, 2010).

Metamalzemenin, etkin dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenlik değerleri üzerinden ayrı ayrı yapılan çalışmaların, YSA tekniği kullanılarak ortaya konulması üzerine yapılan çalışmalarda literatürde mevcuttur. Bunlardan biri, Luna ve ekibinin metamalzeme özellikli etkin dielektrik katsayısını baz alarak, bu değerin verilerinin yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi ortaya konulmuştur (Luna ve diğerleri, 2013).

Ayrık halka rezonatörlü (AHR) yapılar üzerinde kullanılan YSA uygulamalarına bakıldığında, Sarmah ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışmada ayrık halka rezonatörlerin rezonans frekansı YSA ile optimize edilmiştir. AHR yapıların yarıçapları, boyutları, genişlikleri gibi değişkenlere göre rezonans frekanslarının değiştiği bilinmektedir. Bu mantıktan yola çıkılarak, yapılan çalışmada farklı ölçümlü uzunluk değerleri, veri seti olarak YSA tekniğinde eğitilerek optimize işlemi yapılmış ve en uygun rezonans frekans değerleri elde edilmiştir (Sarmah ve diğerleri, 2014).

Akdağlı ve arkadaşları dairesel bir mikroşerit antenin ortasına bir başka dairesel yapı çizerek, bu kısmı çıkartıp halka şeklinde farklı bir mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır. Bu halkanın iç yarıçapı ile halkanın yarıçaplarının farklı değerlerine göre oluşan rezonans frekanslar veri olarak hazırlanmış ve yapay sinir ağlarında eğitimi yapılarak rezonans frekansları tahmin edilmek istenmiştir (Akdağlı ve diğerleri, 2014).

Asılı dikdörtgen bir mikroşerit antenin alt tabakasının daha kalın olduğu ve geniş frekans durumlarda analiz sonucu elde edilen veriler, yapay sinir ağı ile eğitilerek ağın tahmin ettiği değerler ile karşılaştırılmıştır ve bu şekilde mikroşerit antenin boyutları tahmin edilmek istenmiştir (Deshmukh ve diğerleri, 2015).

Aynı yöntemle dikdörtgen mikroşerit anten yerine eşkenar üçgen yapılı mikroşerit anten tasarımı da yapay sinir ağlarında eğitilerek tahmin edilmek istenen parametre, bu teknik kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada 700-6000 MHz frekans aralığında alt tabakası daha kalın dielektrik özellikteki havanın 0,02-0.1 dalga boyu kalınlığında kalınlık değiştirilerek hesaplanan tüm frekans değerleri yapay sinir ağlarında eğitilerek tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır (Deshmukh ve diğerleri, 2015).

Antenin bir başka çeşidi olan fraktal antenler üzerinde de yapay sinir ağları uygulanarak istenen tahmini hesaplamalar bulunmak istenmiştir. Fraktal antenlerin YSA tekniğine uygulandığı örnek bir makale çalışma 2013 yılında Sivia ve arkadaşlarının yapmış olduğu dairesel fraktal antenin analizi ve tasarımı olmuştur. Antenin alt tabanı olarak Roger RT 5880 Duroid dielektrik malzeme kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada simülasyon sonuçları ile yapay sinir ağlarında tahmin edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Sivia ve diğerleri, 2013).

Khan ve arkadaşları da YSA tekniği ile mikroşerit anten tasarımı yapmışlardır. Bu çalışmada Mikroşerit anten dairesel halka şeklinde modellenmiş ve farklı boyutlardaki dairesel halkalı mikroşerit antenlerle GSM, LTE, WLAN WiMAX gibi uygulamalardaki frekans bandlardaki gerekli elektriksel parametre ve boyutların YSA'da eğitimi sağlanmıştır. Bu çalışmada geri yayılım tekniği kullanılmış ve rezonans frekansları yapay sinir ağlarında eğitilmiştir (Khan ve diğerleri, 2018).

YSA tekniğinin uygulanmasıyla mikroşerit antenin rezonans frekansını tahmin etme çalışmasına güzel bir örnek yine güncel olan ve 2018 yılında yapılmış olan Deshmukh ve arkadaşlarının mikroşerit antene farklı bir geometri vererek, bu geometrideki farklı boyutlara göre rezonans frekansları YSA tekniği ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Mikroşerit antenin geometrik şekli eşkenar üçgen alınmıştır. Bu geometrik şekil süspansiyonlu hava ve cam epoksi süspansiyonlu dielektrik tabanların modelidir ve dielektrik malzemenin kalınlığı değiştirilerek oluşan frekanslar YSA uygulamasında tahmin edilmeye çalışılmıştır (Deshmukh ve diğerleri, 2018).

Son olarak YSA tekniği kullanılarak yapılan bir çalışmaya değinmek gerekirse Singh ve arkadaşlarının 2018 yılında IE3D yazılımıyla tasarımını yaptıkları mikroşerit antenin band genişliğini değerlendirmek için bu tekniğin kullanıldığı görülmektedir. Çok katmanlı, ileri besleme özellikli ve geri yayılımlı bir YSA kullanarak mikroşerit antenin gerekli analizleri yapılmıştır (Singh ve diğerleri, 2018).

3. ANTENLER VE METAMALZEMELER (MTMs)

Bu bölümde antenler ve MTM'ler hakkında teknik bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler verildikten sonra, bu bölümün alt başlığı olacak şekilde elektromanyetik, antenler ve MTM konularında kullanılan materyal ve yöntemler anlatılmıştır.

3.1. Antenler

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan antene değinmeden önce antenler hakkında teknik bilgiler ortaya konulmuştur.

19. yüzyılın ortasından sonra elektrik ve manyetik kuvvetler ile ilgili araştırmalar yapılmıştır ve bununla birlikte elektrik alan $\vec{E}$ ve manyetik alan $\vec{H}$ terimlerine yorumlar yapılmış oldu. Başlarda bu iki kavram arasında herhangi bir bağlantı sağlanamamıştır. Sonra 1864 yıllında ünlü İngiliz fizikçi J.C. Maxwell bu iki kavram arasındaki en genel olarak bilinen Maxwell denklemlerini oluşturmuştur. Elektromanyetikte kullanılan Maxwell Denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\nabla \times \vec{\boldsymbol{E}} = -\frac{\partial \vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t} \quad \text{: Maxwell Faraday yasası (V/m)} \tag{3.1}$$

$$\nabla \times \vec{\boldsymbol{H}} = J_i - \frac{\partial \vec{\boldsymbol{D}}}{\partial t} \quad \text{: Maxwell Amper yasası (A/m)} \tag{3.2}$$

$$\nabla . \vec{\mathbf{D}} = \rho \quad \text{: Maxwell Gauss yasası (C/m}^2\text{)} \tag{3.3}$$

$$\nabla . \vec{\mathbf{B}} = 0 \quad \text{: Maxwell Gauss yasası (Weber/m}^2\text{)} \tag{3.4}$$

Yukarıdaki Maxwell denklemlerine bakıldığında herhangi bir konumdaki noktanın elektrik ve manyetik alanlarının birbiriyle olan ilişkisi o noktanın zamanına ve bulunduğu yere yani konumuna bağlı olduğu görülür. Maxwell denklemleri şunu söylemektedir; elektrik alan ile manyetik alan eğer ki zamana bağlı olarak değişmiyorsa yani statik bir durumdaysa ikisi birbirinden bağımsız olarak düşünülebilir. Diğer bir durumda yani zamana bağlı olarak değişiyorsa bu iki alan beraber düşünülerek birbirine bağlı olmaktadır. Her ikisinin beraber

olduğu ve oluşturdukları alana elektromanyetik alanlar (EMA) denir. Maxwell denklemindeki bu durum elektrik ile manyetik alanların yayılımlar yaptığını göstermektedir.

Elektromanyetik dalgaların deneysel olarak yayılım özellikleri ilk kez 1886 yılında Alman bir Fizikçi olan R.H. Hertz ileri sürerek bulmuştur. Alman fizikçi bunu bir deney üzerinde göstermiştir. Bu deneyde, bir devreden meydana gelen elektromanyetik alanın çevreye yayılarak başka bir devreyi uyardığı görülmüştür. Elektromanyetik dalga yayan cihaz üretimi 1895 ila 1897 yılları arasında kendisi İtalyan olan Marconi'nin icat ettiği telsiz telgraf ile olmuştur.

Dolayısı ile elektromanyetiği (EM) tanımlamak gerekirse şu şekilde tanımlamasını yapmamız yeterli olacaktır; içerisinde elektrik alan $\vec{E}$ ile manyetik alan $\vec{H}$ vektör bileşenlerini barındıran ve ortama yayılarak enerji aktaran dalgalardır. Elektromanyetik dalgalar elektrik alan $\vec{E}$ ve manyetik alan $\vec{H}$ vektör bileşenleri birbirine dik olacak şekilde bu iki alanın düzleme dik olarak bir yayılma gerçekleştirir. Bu noktada bir ortamın elektriksel olarak en önemli parametreleri olan dielektrik geçirgenlik katsayısı ε ile manyetik geçirgenlik katsayısı olan μ değerlerine göre malzeme sınıflandırılması yapılmaktadır. Sonraki bölümlerde malzemelerin sınıflandırılmasına MTM'leri ifade ederken tekrardan değinilecektir.

3.2. Anten Çalışma Prensibi

Antenlerin görevi ya elektromanyetik dalgaları çevreden alacak cihaz olmak ya da kendisi çevreye sinyal yaymaktır yani elektromanyetik dalga yaymaktır. Çevreye elektromanyetik dalga yayan cihazlara verici anten denir. Böyle verici anten görevi yapan cihazlar, içerisindeki kılavuz dalgalarını etrafa yayarlar. Bunun tersi görevi yapan antenlere ise alıcı antenler denir. Böyle antenler de çevreye yayılmış olan dalgaları alarak kılavuz dalgalarına dönüştürler. Bir de bu her iki antenin görevini yapabilen cihazlar mevcuttur.

Anten yapısı; antenin düzeneğini ifade ederken anteni şu şekilde tanımlanabilir; kılavuz dalgaları yapan cihaz ile çevresi arasındaki iletimi sağlar. Bu kılavuz dalgaları, cihaz dalga kılavuzu ya da iletim hattı olarak tarif edilebilir. Bu iletim hattı elektromanyetik dalgayı

verici antenden alıcı antene ya da tam tersi olarak alıcı antenden verici antene şeklinde enerji aktarımını sağlarlar.

Antenin incelediği kısımlar bunlar olup hem alıcı hem de verici olarak görevler yapar. Bu durumda antenin alıcı ve verici çalışmasında nasıl bir ilişki olduğu, alıcı ve verici antenin birbirine olan etkisi, antenden yayılan dalgaların yapısı, antenlerin farklı karakteristik özelliklerinin ne gibi etkileri olduğu üzerinde geniş çaplı incelemeler olmaktadır.

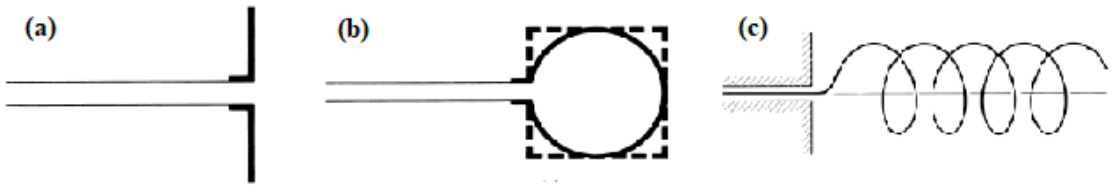
Antenleri gruplandırırken; genel karakteristik özelliklerine, ışıma özelliklerine, yapısal özelliklerine, frekans bantlarına ve uygulama alanlarına göre sınıflandırma yapmak mümkündür. Genel özelliklerine göre sınıflandırmak gerekirse şu şekilde sıralanabilir; küçük antenler, açıklık antenler (horn antenler gibi), yansıtıcı antenler, adaptif antenler, geniş bant antenleri örnek verilebilir. Işıma özelliğine göre doğrusal, dairesel ve elips yapılı antenler, noktasal kaynaklı antenler, çubuk şekilli ışıma diyagramlı, yelpaze şekilli ışıma diyagramlı antenler söylenebilir. Tez çalışmasında mikroşerit anten üzerinde analizler yapılmış olup diğer yapısal antenlere; mikroşerit yama anten, dikdörtgen yama anten, monopol ve dipol antenler, horn anten, helisel anten, düzlemsel ve doğrusal anten dizisi gibi örnekler verilebilir. Uygulama alanlarına göre antenler; haberleşme, radyo, radar, TV yayınları, yön tahmini vs. örnek verilebilir. Son olarak frekans bandlarına göre antenler; çok alçak frekanslı antenler (3-30 KHz), alçak frekanslı antenler (30-300 KHz), orta frekanslı antenler (0,3-3 MHz), yüksek frekanslı antenler (3-30 MHz), çok yüksek frekanslı antenler (30-300 MHz), ekstra çok yüksek frekanslı antenler (0,3-3 GHz), süper yüksek frekanslı antenler (3-30 GHz) ve milimetrik antenler (30-300 GHz) şeklinde sıralanmaktadır.

3.3. Anten Çeşitleri

Anten çeşitleri birden fazla olup birçok uygulama alanlarına göre tasarımları farklılık gösterir. Bu bölümde en bilinen altı anten çeşitine yer verilerek antenler hakkında genel bilgi verilmiştir.

3.3.1. Tel antenler

Bu tür antenler otomobillerde, bina çatılarında veya binaların herhangi bir yerlerinde, gemilerde olduğu gibi çok geniş kullanım alanlarına sahiptir. Tipik olarak en yaygın olanları Şekil 3'teki gibi; düz tel de denilen monopol ve dipol antenler; kare, dikdörtgen, daire, elips gibi şekilleri olan halkalı antenler ve spiral şekilleri olan helisel yapılı antenlerdir.



Şekil 3.1. Tel antenler; (a) dipol anten, (b) dairesel halka anten, (c) helisel anten (Balanis, 2005: 4)

3.3.2. Horn antenler (açıklık antenler)

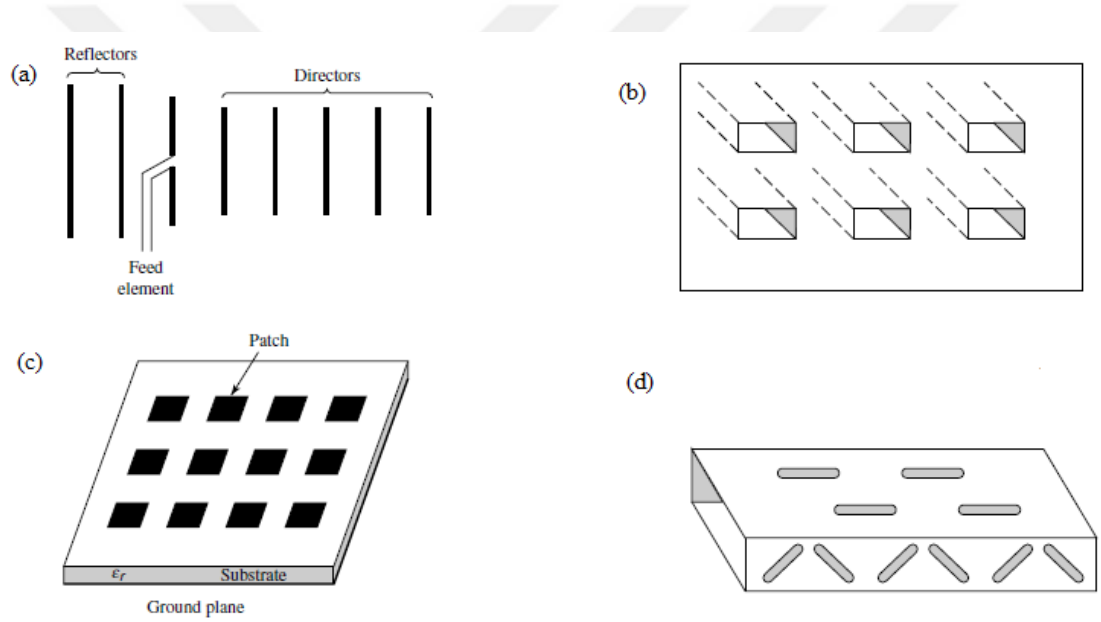
Bu anten tiplerinin kullanımının yaygın olmasının en önemli nedeni yüksek frekanslarda kullanılabilecek antenlere ve karmaşık anten tiplerine duyulan ihtiyaçtandır. Horn antenlerin çeşitleri mevcut olup örnek olarak Şekil 3.2'de de görüldüğü gibi dikdörtgen ağızlı piramit horn anten, dairesel ağızlı konik horn anten ve dalga kılavuzlu horn anten yapıları mevcuttur. Böyle antenler çevreden gelecek olumsuz durumlara karşı koruma için dış kısımları dielektrik malzemeler ile örtülerek üretilirler.



Şekil 3.2. Horn anten örnekleri; (a) piramit horn, (b) konik horn ve (c) dikdörtgen dalga kılavuzu (Balanis, 2005: 5)

3.3.3. Dizi antenler

Dizi antenler birden fazla aynı antenin bir araya getirilmesiyle tasarlanırlar. Antenlerin dizi şeklinde yapılmasının nedeni ise bazı durumlarda tek bir antenin gerçekleştiremediği ışıma özelliğini birden fazla antenin beraberce işlev görerek sağlanabilmesidir. Bu amaçla birden fazla antenin bir araya getirilmesiyle üretimi yapılan antenlere dizi antenler denir. Dizi antenler tasarlanırken belirli yönlerde ışımanın minimum olması, belirli yönlerde ise ışımanın maksimum olması istenebilir ve tasarımı yapılırken bu özellik göz önünde bulundurularak gerçekleştirilir. Şekil 3.3'te dizi antenlere örnek olarak bazı anten çeşitleri verilmiştir.



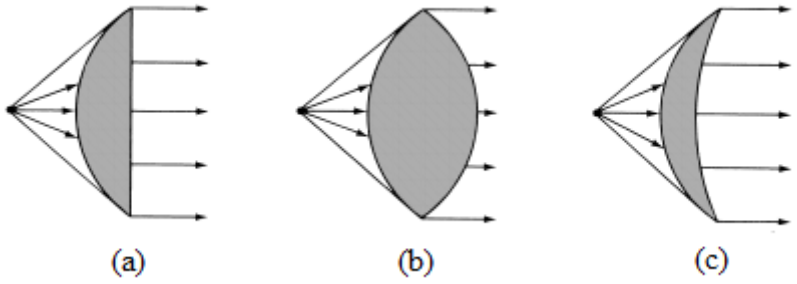
Şekil 3.3. Dizi anten çitlerine örnek; (a) yagi-uda dizi anteni, (b) dikdörtgen dalga kılavuzu dizi anteni, (c) mikroşerit yamalı dizi anteni ve (d) slotlu dalga kılavuzu dizi antenleri (Balanis, 2005: 7)

3.3.4. Yansıtıcı (reflektör) antenler

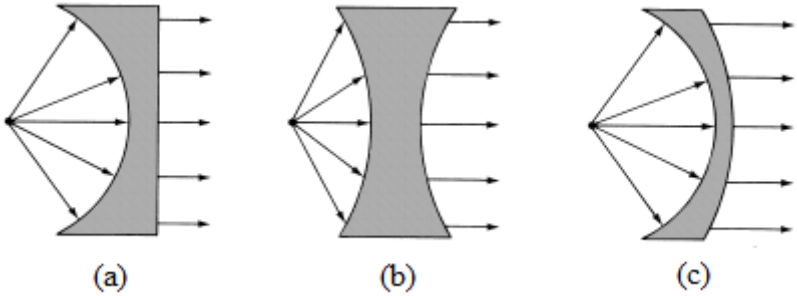
Yansıtıcı antenlerin çapları oldukça büyük olacak şekilde tasarlanır. Bunun nedeni kullanım yerlerinden kaynaklanır. Kullanım alanları daha çok gök cisimlerinin tespiti içindir. Haliyle gök cisimlerinin milyonlarca kilometre uzaklıkta olması nedeniyle buradan sinyallerin alınması veya işaretlerin yollanması için oldukça yüksek kazanca sahip antenlerin olması gerekir. Bu gereksinimden dolayı da yansıtıcı antenlerin çapları oldukça büyüktür (300 m gibi).

3.3.5. Lens antenler

Lens antenler mercek antenler olarak da bilinirler. Lens antenlerde mercekler, istenmeyen enerjinin yayılmasını engelleyebilir ve bunun için enerjiyi paralel duruma getirirler. Bu durumda uygun olan malzemeyle ve uygun geometriye sahip yapılarla mercekler enerjiyi toparlayarak düzlemsel dalga formuna dönüştürebilirler. Örneğin parabolik yansıtıcı antenlerde yüksek frekanslarından dolayı merceklerin yardımıyla istenmeyen bu durum giderilebilmektedir. Lens antenlerin geometrik yapıları Şekil 3.4'te kırılma indislerinin (n) 1'den büyük ya da Şekil 3.5'teki gibi 1'den küçük olması durumuna göre ince ve kalın mercekli olarak adlandırılır. Aynı zamanda ince mercekler için dış bükey, kalın mercekler için iç bükey mercekler de denilir.



Şekil 3.4. n> 1 olan lens antenler; (a) dış bükey-düz, (b) dış bükey-dış bükey ve (c) dış bükey-iç bükey (Balanis, 2005: 8)



Şekil 3.5. n <1 olan lens antenler; (a) iç bükey-düz, (b) iç bükey-iç bükey ve (c) iç bükey-dış bükey (Balanis, 2005: 8)

Tüm bu antenler gerçekte istenilen şartları sağlamayabilir. Bunun nedeni ideal bir ortamın sağlanamaması ve istenen özellikteki inceleme ve pratik yapmak için gerekli cihazların yeterli olmamasından kaynaklanır. İdeal bir antenden beklenen, verici antenin yaymış olduğu toplam gücün hedeflenen yönde tam olarak yayılımını yapabilmektir. Tabi bu

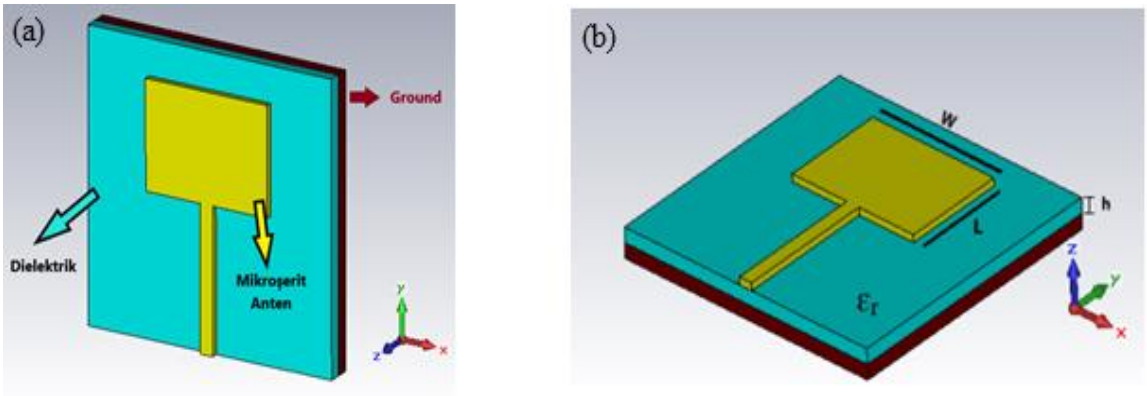
teorikte mümkündür. Ama uygulamada bu imkânsız bir durumdur. Bu nedenle istenen amaçlara uygun antenlerin tasarımı için birçok farklı özel tasarımlar yapılmaktadır.

Bu anten türlerinden sonra tez çalışmasında tasarımı yapılan mikroşerit yama antenlere yer verilecektir ve antenlerin önemli parametreleri formüllerle tanımlanmıştır. Mikroşerit yama anten anlatılırken neden bu antenin seçildiğine değinilmiş ve bu tip antenin avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir.

3.3.6. Mikroşerit antenler

Mikroşerit anten, ilk defa 1953 yıllında Deschamps'ın yayınlamış olduğu "Microstrip Microwave Antennas" adlı makalesinde bahsedildi (Deschamps, 1953). Yama antenler ise ilk defa 1972 Munson tarafından bir sempozyumda bahsedildi ve Munson'un 1994'te bu anten ile ilgili yaptığı çalışmasının yayınlanmasıyla bilinmeye başlandı (Munson, 1972; Munson, 1974).

Mikroşerit antenler haberleşmede, uçaklarda, radar sistemlerde, dizi antenlerde, medikal uygulamalarda geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Kullanılmasının en önemli nedenleri boyutlarının küçük, maliyetinin uygun ve geometrik şekillerinin dikdörtgen, daire gibi basit şekillerle sağlanıyor olmasıdır. Mikroşerit yama antenler Şekil 3.6 a'da gösterildiği gibi bir dielektrik malzeme (FR4 gibi) üzerine iletken bir malzemenin yüzeyine eklenmesiyle tasarımı mümkündür. Şekil 3.6 b'de mikroşerit antenin önemli bazı parametreleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Mikroşerit yama anten; (a) malzeme tipleri (b) antenin parametreleri

L uzunluğu antenin çalışma frekansını belirler. Aşağıdaki Eş. 3.5'deki frekans formülü L uzunluğuna bağlı olarak ayarlanır (Balanis, 2005: 819).

$$f_0 = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_o \varepsilon_r \mu_o}} \tag{3.5}$$

Buradaki W uzunluğu giriş empedansını kontrol etmektedir. W uzunluğu artıkça band genişliği de artar. h uzunluğu ise dielektrik malzemenin kalınlığı olup band genişliğini kontrol eder ve uzunluğu arttıkça band genişliği de artar. ε_r değeri dielektrik malzemenin bağıl dielektrik katsayısı olup değeri artıkça band genişliği de artar. Dielektrik katsayısı (ε_r) değeri azaldıkça saçılma artar ve antenin daha iyi ışıma yapmasını sağlar. Değerinin azalmasıyla aynı zamanda antenin verimini de artırır. Tez çalışmasında dielektrik malzeme olarak FR4 malzemesi kullanılmıştır ve kalınlığı (h) 1,6 mm ile sabittir. Tez çalışması anlatılırken bu malzemenin özelliklerine değinilecektir. Genel olarak band genişliği; W, h ve ε_r parametreleri arasındaki bağlantı aşağıdaki eşitlik (Eş. 3.6) ile ilişkilendirilebilir (Balanis, 2005: 854).

$$B \propto \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r^2} \frac{W}{L} h \tag{3.6}$$

Mikroşerit yama antenin diğer antenlere göre üstünlüklerini sıralamak gerekirse; hafiftir, küçük hacimlidir, üretim maliyeti düşüktür, düzlemsel şeklinden dolayı kullanışlıdır. Askeri amaçlı kullanılan güdümlü mermi, roketler gibi ve uydu cihazlarına ciddi bir şekilde etki etmediğinden dolayı bu cihazlara montajını mümkün kılar. Saçılma ara kesitlerinin düşük olması, çoklu frekans yapabilir olması ve son olarak uzay araçlarının aerodinamik yapılarını etkilemeyecek kadar ince olarak tasarlanması mümkün olduğundan bu gibi alanlarda kullanım üstünlükleri vardır. Zayıflıkları ise; band genişlikleri dar, güç kapasiteleri düşük, kazançları ve verimleri düşüktür. Bu gibi üstünlükleri ve zayıflıkları göz önünde bulundurulmuş ve bu tez çalışmasında mikroşerit yama anten seçilerek metamalzemeler ile amaçlanan hedefe ulaşılmak istenmiştir.

3.4. Önemli Anten Parametreleri

Anten parametreleri antenin elektriksel, mekanik özelliklerini ve sistem içerisindeki davranışlarını belirler. Elektriksel parametreler sayesinde antenin; empedansı, yönlülüğü,

verimliliği, kazancı, ışıma eğrisi ve polarizasyonu belirlenir. Mekanik parametreler ile de rüzgâr yükü ve malzeme türü belirlenir. Temel olarak anten parametreleri ise; ışıma eğrisi (diyagramı), ışıma güç yoğunluğu, ışıma şiddeti, demet genişliği, ışıma verimi ve kazancı, yönlülüğü, demet verimi vs. gibi ifade edilebilir. Bu parametrelerin neyi ifade ettiklerini aşağıda detaylandırılmıştır.

3.4.1. Işıma eğrisi

Bir antenin herhangi bir yönde ne kadarlık bir güç ışıması yapacağını belirleyen eğrilere antenin güç ışıma eğrileri denir. Antenin ışıma özelikleri koordinat açıları olan θ (Theta) ve ϕ (Phi) açılarına bağlı olarak ışıma eğrisinin genliği, fazı ve polarizasyonu ile belirlenir. Antenin ışıma eğrisi diğer adı "far-field" olan uzak alanda tanımlanır. Uzak alanda elektrik ve manyetik alanlar, yarıçapı sabit olan bir küre üzerinde hareket ettiklerinde θ ve ϕ açısal koordinatlar bu alanların fonksiyonu olarak görev yaparlar. Uzak alanın sağlanması için optik ve geometrik koşulların sağlanması gerekir. Ancak bu şarlar sağlanırsa uzak alan tanımlaması yapılabilir. Bunun için, geometrik koşul için r>> λ; optik koşul için r>> D olması gerekir. Buradaki D antenin boyutudur. Her iki koşulun sağlandığı uzaklığı bulmak için 2D/λ formül kullanılır ve bu uzaklığa Rayleigh uzaklığı denir.

3.4.2. Güç ve alan ışıma eğrisi

Anten tarafından etrafa yayılan gücün oluşturduğu eğrilere güç ışıma eğrisi denir. Uzak alanda tanımlanan bu eğrilerin ölçümleri lineer veya desibel (dB) olarak belirlenir. Eğer açısal koordinatlara göre ışıma elektrik alanın $\vec{E}$ ve manyetik alanın $\vec{H}$ boşluktaki eğrilerini veriyorsa bu eğrilere de alan ışıma eğrisi denir. Alan ışıma da uzak alanda tanımlanır ve ölçümleri lineerdir. Işıma eğrisine bakıldığında, ışımanın en yoğun olduğu demetlere ana loblar denir. Loblara demet de denir. Ana lobların yanlarında beliren ışımalara yan loblar denir. Bir de ışımanın en yoğun olduğu ana lobun zıt yönünde oluşan loblar vardır ve bunlara ise arka loblar denir. Ana lob dışındaki demetler küçük loblar olarak adlandırılır. Küçük lobların toplamı ana loba oranlanırsa yan demet seviyesi denilen oran bulunur. Işıma eğrisinin yarısına, kazancın 3 dB'ye ve alanın 0,707'ye düştüğü yönler arası açısal genişliğe yarı güç demet genişliği (HPBW), ışıma eğrisinin ilk sıfıra düştüğü yönler arası açısal genişliğe ise birinci sıfır demet genişliği (FNBW) denir.

3.4.3. Işıma güç yoğunluğu

Elektromanyetik dalgalar ile iletilen bilgi sinyalleri bir noktadan başka bir noktaya kılavuz içerisinden ya da kablosuz olarak aktarılır. Böylece güç ve enerji durumları nasıl olur gibi sorular ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bir elektromanyetik dalganın yönü Ani Poynting Vektörü kavramını ortaya çıkarmıştır. Ani Poynting vektörü anlık elektrik alan şiddeti ile anlık manyetik alan şiddetinin vektörel çarpımıyla bulunur ve Eş. 3.7'deki gibi belirtilirler (Balanis, 2005: 38).

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H} \tag{3.7}$$

Burada;

$\mathcal{W}$: ani Poynting vektörü (W/m^2)

$\mathcal{E}$: ani elektrik alan şiddeti (V/m)

$\mathcal{H}$: ani manyetik alan şiddeti (A/m)

olarak adlandırılırlar.

Poynting vektörü güç yoğunluğu olduğu için, kapalı yüzeydeki toplam gücü ifade etmek gerekir. Bunun içinde yüzey üzerinden Poynting vektörünün integrali alınarak Eş. 3.8'deki ani toplam güç bulunur (Balanis, 2005: 38).

$$\mathrm{P} = \oiint \mathrm{W}.\,\mathrm{ds} = \oiint \mathrm{W}.\,\hat{n}\mathrm{da} \tag{3.8}$$

Burada;

P : ani toplam güç (W)

$\hat{n}$: yüzey normali

da : kapalı yüzeyin sonsuz küçüklükteki alanı (m^2)

olarak adlandırılır.

3.4.4. Işıma şiddeti

Birim katı açı başına antenden ışınlanan güce denir. Aşağıda verilen Eş. 3.9 eşitliği ışıma şiddetini; Eş. 3.10 eşitliği ise toplam güç değerini verir (Balanis, 2005: 40-42).

$$U = r^2 W_{rad} \tag{3.9}$$

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U \, d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin\theta d\theta d\phi \tag{3.10}$$

Burada;

U : ışıma şiddeti (W/birim katı açı)

W_{rad} : ışıma yoğunluğu (w/m^2)

P_{rad} : toplam güç (W)

dΩ : birim katı açı

olarak adlandırılırlar.

Bir de bunlara ek olarak izotropik kaynak ışıma şiddeti kavramı vardır. İzotropik durumlarda antenin ışıma şiddeti açısal koordinatlardan bağımsız olup sadece r'ye bağlıdır. Bu durumda ışıma şiddeti ve toplam güç Eş. 3.11 ve Eş. 3.12 eşitlikleriyle bulunur.

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi} \tag{3.11}$$

$$P_{rad} = \oiint U_o d\Omega \; = \; U_o \oiint d\Omega \; = 4\pi U_o \tag{3.12}$$

Sonraki parametre demet genişliği olup bölüm 3.4.2'de değinildiği gibidir.

3.4.5. Yönlülük (directivity) ve kazancı

Birimsiz olan yönlülük, izotropik olmayan herhangi bir kaynağın yaymış olduğu maksimum ışıma şiddetinin (U) izotropik ışıma şiddetine (U_0) oranı olarak bilinir. Aşağıdaki Eş. 3.13 eşitliği yönlülük değerini verir ve D_0 ile gösterilir. D_0 aynı zamanda yönlülüğün maksimum değeri olarak da ifade edilir (D_{max}). Eş. 3.14 eşitliğinde verilen D_g formülü ise herhangi bir yöndeki ışıma şiddetinin izotropik ışıma şiddetine oranı olup bu orana yöneltici kazanç denir (Balanis, 2005: 44-45).

$$D_0 = \; D_{max} = \; \frac{U_{max}}{U_0} \; = \; \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \tag{3.13}$$

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3.14)$$

3.4.6. Antenin verimi ve kazancı

Literatür taraması sonucunda kaynak olarak kullanılan Balanis'in "Antenna Theory" kitabında toplam antenin verimi e_0 ile ifade edilmektedir (Balanis, 2005). Toplam anten verimliliği anten yapısındaki ve giriş terminallerinde meydana gelecek kayıplar düşünülerek kullanılan bir formüldür. Antenlerdeki kayıplar iletken ve dielektrik malzemeden geçen akım nedeniyle oluşan kayıp ve anten ile iletim hattı arasında oluşacak uyumsuzluktan dolayı yansımalardan kaynaklanan kayıplardır. Genel olarak yansımadan, iletkenlikten ve dielektrikten olmak üzere üç kayıp parametresi kullanılır. Antenin toplam verimliliği olan e_0 değeri Eş. 3.15 eşitliğinde verildiği gibi bu üç parametrenin çarpımı ile bulunur. Birimi olmayıp boyutsuzdur. Eş. 3.16 eşitliği ise antenin giriş terminalindeki voltaj yansıma katsayısıdır. Yansıma kaybı e_r, Eş. 3.17 eşitliğinde verildiği gibi voltaj yansıma katsayısı Γ değerinin bilinmesiyle bulunur. Antenin ışıma verimliliği bulunurken iletken ile dielektriğin verimlerini hesaplamak oldukça güçtür. Bu sorun ancak gerekli verilerin deneysel olarak bulunmasıyla kolay bir şekilde üstesinden gelinebilir. Bundan dolayı iletkenin verimi ile dielektriğin verimi arasındaki bağlantı Eş. 3.18'de verildiği gibi değerlerinin çarpılmasıyla bulunur ve e_{cd} olarak ifade edilir. Bunun sonucunda toplam anten verimliliği Eş. 3.19 eşitliğinde verildiği gibi olur (Balanis, 2005: 64-65).

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (3.15)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3.16)$$

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad (3.17)$$

$$e_{cd} = e_c e_d \quad (3.18)$$

$$e_0 = e_c e_d (1 - |\Gamma|^2) \quad (3.19)$$

Burada kullanılan terimler;

e_0 : antenin toplam verimi (boyutsuz)

e_r : yansıma verimliliği (boyutsuz)

Γ : Voltaj kayıp katsayısı

Z_{in} : antenin giriş empedansı

Z_0 : iletim hattının empedansı

e_c : iletkenin verimliliği (boyutsuz)

e_d : dielektriğin verimliliği (boyutsuz)

olarak ifade edilir.

Bir yöndeki antenin kazancını bulmak için ışıma şiddetinin ve antene giriş yapan toplam giriş gücün ne olduğu bilinmelidir. Bu iki parametrenin oranlanıp 4π katı alınarak anten kazancı bulunur. Anten kazancı Eş. 3.20 eşitliğinde ifade edildiği gibidir. Eş. 3.21'de verilen toplam giriş gücü, Eş. 3.22'de verilen toplam gücün (P_{rad}) anten verimliliğine (e_0) oranlanmasıyla tespit edilir. Bu parametreler kullanılarak Eş. 3.23 eşitliği bulunur. Böylece yönlülüğe bağlı olarak Eş. 3.24 eşitliğinde verilenler anten kazancı ifade edilebilir (Balanis, 2005: 65-68).

$$G(\theta,\phi) = 4\pi \frac{U(\theta,\phi)}{P_{in}} \tag{3.20}$$

$$P_{rad} = e_0 P_{in} \tag{3.21}$$

$$P_{in} = \frac{P_{rad}}{e_0} \tag{3.22}$$

$$G(\theta,\phi) = e_0 \left[4\pi \frac{U(\theta,\phi)}{P_{in}}\right] \tag{3.23}$$

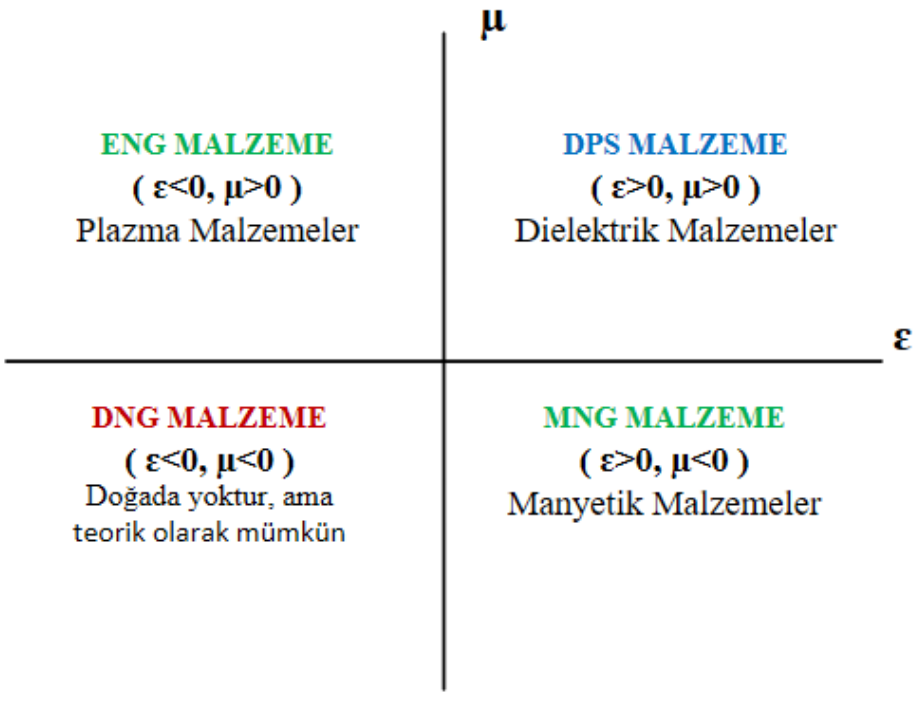
$$G(\theta,\phi) = e_0 D(\theta,\phi) \tag{3.24}$$

Buraya kadar anlatılan anten çeşitleri ve anten parametrelerine, tez çalışmasının anlaşılır olması için yer verilmiştir. Bu sayede tez çalışmasında kullanılan antenler hakkında bilinmesi gerekenler anlatılarak tezin anlaşılır olması sağlanması istenmiştir. Bu sayede anten kazanç parametresinin nereden geldiği gösterilmiş oldu. Sonraki bölümlerde metamalzeme (MTM), materyal ve yöntemler ve yapay sinir ağları (YSA) tekniği

hakkında teknik bilgilendirme yapılarak tez çalışması, bulgular ve uygulamalarından bahsedilecektir.

3.5. Metamalzemeler (MTMs)

Metamalzeme kavramı önceden de değinildiği gibi ilk kes Rus bilim adamı Veselago tarafından 1968 yılında ileri sürülmüştür. Veselago'nun bu çalışması ilk başlarda teorik olarak ortaya atılmıştır (Veselago, 1968). Elektromanyetik teorisine bakıldığında malzemelerin bir nevi kimliğini belirleyen iki önemli parametre elektromanyetikte malzemelerin sınıflandırılmasını sağlamaktadır. Bu iki parametre dielektrik sabiti ε (epsilon) ile manyetik geçirgenlik katsayısı olan μ (Mue)' dir. Elektromanyetiğin bu iki parametresi 0'dan büyük veya küçük olma durumlarına göre farklı isimlerle sınıflandırılmaktadır. Engheta'nın 2016 yılında yayınlamış olduğu bir yayında metamalzemeyi Şekil 3.7'de görüldüğü gibi anlaşılır bir şekilde sınıflandırmıştır (Engheta ve Ziolkowski, 2016).



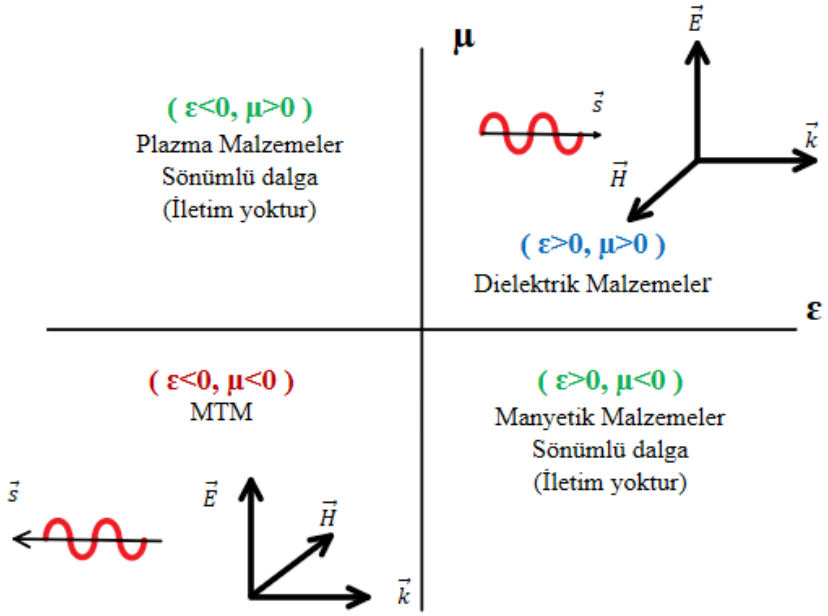
Şekil 3.7. Malzemelerin sınıflandırılması ve adları (Engheta ve Ziolkowski, 2016)

Şekil 3.7'de de görüldüğü üzere malzemelerin sınıflandırması bu önemli iki parametrenin 0'dan büyük veya küçük olması durumuna göre yapılmaktadır. Tabi burada şu ayrıntıya da

dikkat etmek gerekir. Dielektrik sabiti ile manyetik geçirgenlik katsayısı denirken, bu parametrelerin değerlerinin reel ile sanal değerlere sahip oluşları unutulmamalıdır. Ama burada reel kısım dikkate alınmaktadır ve reel olarak ifadeleri yapılmaktadır. Bu malzemeleri açıklamak gerekirse:

- DPS dielektrik malzemeler: Bu malzemelere yalıtkan malzemeler de denilmektedir. Bu malzemelerin ε ve μ değerlerinin reel kısımları pozitif olup cam, hava gibi malzemeleri örnek verebiliriz.
- ENG plazma malzemeler: Bu malzemelerin ε değerinin reel kısmı negatif, μ değerinin reel kısmı ise pozitiftir. Böyle malzemeler belli frekanslarda plazma özelliği gösterebilmektedir. Örneğin altın ve gümüş gibi.
- MNG manyetik malzemeler: bu malzemelerin ε değerinin reel kısmı pozitif, μ değerinin reel kısmı ise negatiftir.
- DNG metamalzemeler: Bu malzemelerin ε ve μ değerlerinin reel kısımları negatif olup dalganın yönü sol el mantığı ile açıklanmaktadır. MTM, doğada mevcut değildir. Belki ileriki çalışmalarda doğada bu ihtiyacı karşılayacak malzeme bulunabilir veya başka bir gezegende keşfi mümkündür. Buna bilimsel araştırmaların devam etmesiyle ancak ulaşılabilir.

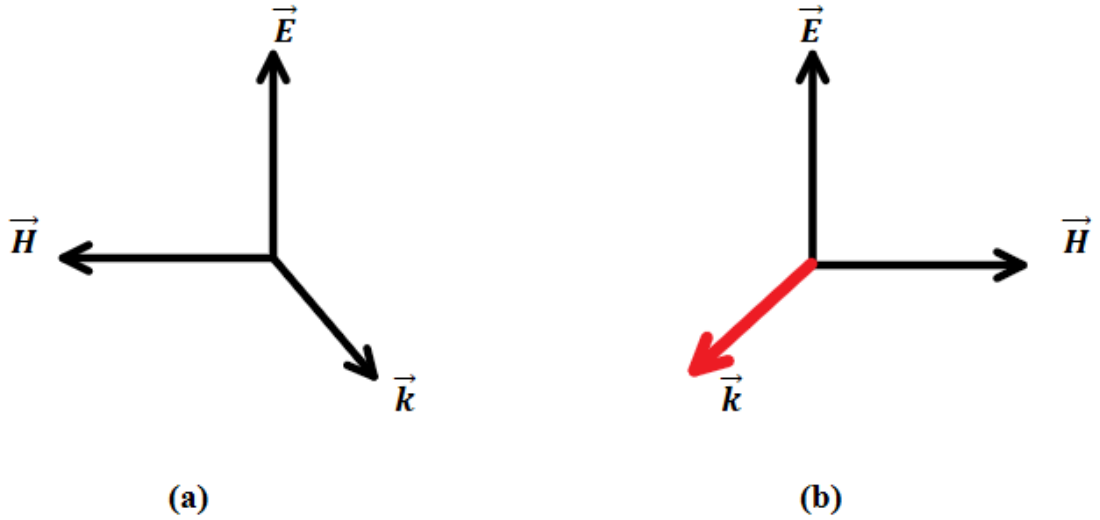
Bu sınıflandırmayı yaptıktan sonra, malzemelerin herhangi bir ortamdaki elektromanyetik dalgaların nasıl yayılım yaptıklarını Şekil 3.8’de olduğu gibi gösterilebilir (Karaaslan, 2009).



Şekil 3.8. EM malzemelerin ε ve μ değerlerine göre EM dalgalarının davranışı

Şekil 3.8'e bakıldığında DPS malzemelerde (ε>0, μ>0 olması durumunda) EM dalgaları sağ el mantığına göre hareket etmekte ve sönümleme olmayıp iletim olmaktadır. ε ve μ değerlerinin zıt işaretli olduğu malzemelerde yani ENG (ε<0, μ>0) ve MNG (ε>0, μ<0) malzemelerde ise dalgalar sönümlendiğinden iletim olmamaktadır. MTM özeliğindeki DNG (ε<0, μ<0) yapılarda ise DPS gibi iletimin olduğu fakat sol el mantığına göre EM dalgaların hareket ettiği görülmektedir (Karaaslan, 2009).

DPS malzemelere sağ el yönlü malzemeler (RHM) denir ve DNG malzemelere ise sol el yönlü malzemeler (LHM) denir. Bu malzemelerin elektrik alan $\vec{E}$ ile manyetik alanın $\vec{H}$ dik bileşenlerinin vektörel çarpımıyla elde edilen Poynting vektör $\vec{S}$ yönü ile propogasyon sabiti (k) ile dalganın hangi yöne gideceği belirlenmektedir. RHM malzemeleri sağ el kuralı uygulanarak dalganın yönü Şekil 3.9a'daki gibi olurken, LHM malzemelerin elektromanyetik alanların dik bileşenlerinden dalganın yönü Şekil 3.9b'deki gibi olmaktadır.



(a) **(b)**

Şekil 3.9. EM alanların ve dalga sinyalinin vektörel bileşeni; (a) sağ el mantığı ve (b) sol el mantığı

Yukarıdaki Şekil 3.9'dan yola çıkarak, MTM yapıları Maxwell denklemleri ile ilişkilendirip gerekli formüllerin nasıl oluştuğunu göstererek, DNG malzemelerin sol el mantığına uygunluğu gösterilmiştir. Giriş bölümünde verilen Maxwell'in diferansiyel denklemleri kaynağa bağlı oluşturulmuş formülleridir. Burada Maxwell diferansiyel denklemleri kaynağın olmadığı düşünülerek oluşturulmuştur.

$$\nabla \times \vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad \text{: Maxwell Faraday yasası} \tag{3.25}$$

$$\nabla \times \vec{\mathbf{H}} = \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} \quad \text{: Maxwell Amper yasası} \tag{3.26}$$

$$\nabla . \vec{\mathbf{D}} = 0 \quad \text{: Maxwell Gauss yasası} \tag{3.27}$$

$$\nabla . \vec{\mathbf{B}} = 0 \quad \text{: Maxwell Gauss yasası} \tag{3.28}$$

Yukarıda verilen Maxwell'in kaynaksız diferansiyel denkleminde, Eş. 3.25 eşitliği ile Eş. 3.26 eşitliğinde görüldüğü gibi EM alanları ve akı yoğunlukları ($\vec{D}$ ve $\vec{B}$) arasında bir bağlantı mevcuttur. EM alanlar ile akı yoğunlukları arasındaki bu ilişki aşağıda verilen denklemler gibidir.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \tag{3.29}$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} \quad (3.30)$$

Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi dielektrik sabitini veren ε, bağıl dielektrik katsayısı (ε_r) ile boş uzayın dielektrik sabitinin ($e_0 = \left({}^{1}/_{36\pi}\right)x10^{-9} = 8{,}854 \times 10^{-12}\, F\,/\, m$) çarpımı ile bulunur. Manyetik geçirgenlik katsayısı olan μ değeri ise bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r) ile boş uzayın manyetik geçirgenlik değeri ($\mu_0 = 4\pi x10^{-7} H\,/\,m$) ile çarpımıdır.

Şekil 3.9'de verilen sağ ve sol el mantığı ile belirlenen propogasyon sabiti de denilen $\vec{k}$ vektörü dalganın gideceği yönü belirlemektedir. Maxwell denklemi, harmonik dalgalarda ifade edildiğinde $\vec{k}$ vektörünün $\vec{E}$ vektörü ve $\vec{H}$ vektörü ile vektörel çarpımları sağ el ve sol el kuralının mantığını açıklamaktadır.

$$\vec{k}x\vec{E} = \omega\mu\vec{H} \quad (3.31)$$

$$\vec{k}x\vec{H} = -w\varepsilon\vec{E} \quad (3.32)$$

$$\vec{k}x\vec{E} = -\omega|\mu|\vec{H} \quad (3.33)$$

$$\vec{k}x\vec{H} = w|\varepsilon|\vec{E} \quad (3.34)$$

Eş. 3.31 eşitliği ve Eş. 3.32 eşitliği sağ el mantığına (RHM) uygun olduğu görülmekte olup EM dalganın hangi yönde ilerleyeceğini doğrulamaktadır (Bkz. Şekil 3.9a). Bu denklemler, sol el mantığına (LHM) uygulandığında ise eşitliğin diğer tarafını karşılamamaktadır. Ancak DNG malzemeler için yapılan çalışmaların sonucunda LHM mantığına uyması için Eş.3.31 ve Eş. 3.32 yerlerine Eş. 3.33 ve Eş. 3.34 uygulandığında bu sorun giderilmiştir. Bu durumda ε<0, μ<0 denkleme aktarıldığında LHM mantığına uyduğu görülür (Bkz. Şekil 3.9b).

Poynting vektörünün yönünü incelediğimizde (Bkz. Şekil 3.8), DPS malzemelerde dalga yönünün $\vec{k}$ ile aynı yönde olduğu görülür. Ancak DNG malzemelerde bu durum farklı olup

dalganın gittiği yön ile zıttır (Bkz. Şekil 3.8). Poynting vektörünün ($\vec{S}$) elektrik alan ile manyetik alan arasındaki ilişkiyi aşağıda verilen eşitlikle görebiliriz ve yönü kolay bir şekilde tespit edilmektedir.

$$\vec{S} = \vec{E}x\vec{H} \tag{3.35}$$

Buradan da anlaşılacağı gibi DPS malzemelerde $\vec{S}$ ile $\vec{k}$ aynı yöndedir; DNG malzemelerde $\vec{S}$ ile $\vec{k}$ yönleri zıt yöndedir (Veselago, 1968).

Son olarak DPS ve DNG malzemelerin; Poyntig vektörü, dalga vektörü, kırılma indisi, grup hızı (v_g) ve faz hızının (v_p) karşılaştırması aşağıdaki Çizelge 3.1'de verildiği gibidir.

Çizelge 3.1. RHM ve LHM ortamlarda EM özelliklerinin karşılaştırılması (Karaaslan, 2009)

Ortam	$\vec{k}$	$n = \frac{\vec{k}c}{w}$	$v_p = \omega\frac{\vec{k}}{\lvert k\rvert}$	$v_g = \nabla_{\vec{k}}\omega$	$\vec{S} = \vec{E}x\vec{H}$
RHM	+	+	+	+	+
LHM	-	-	-	+	+

4. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu bölümde MTM yapıların tasarımında yaygın olarak kullanılan ve ayrıca tez çalışmasında kullanılan yöntem ve tekniklerden bahsedilmiştir.

4.1. Nicolson Ross Weir (NRW) Metodu

NRW metodu saçılma parametresi de denilen S_{ij} parametrelerinden iletim ve yayılım özelliklerini tanımlayan S_{11} ve S_{21} değerlerinin 1970 yıllarında Nicolson'ın oluşturduğu nümerik hesaplamalarda kullanılan yöntemler olup dielektrik sabiti ε_r ile manyetik geçirgenlik katsayısı μ_r değerlerinin bulunması yöntemidir (Nicolson, 1970). Dielektrik sabiti ε_r ile manyetik geçirgenlik katsayısı μ_r sadece NRW metoduyla sınırlı olmayıp birkaç metottan biridir.

Bu tez çalışmasında da CST MWS simülasyon programında oluşturulan yapıların S_{11} ve S_{21} parametrelerinin verileri MATLAB ara yüzünde gerekli NRW metodunda kullanılarak oluşturulmuş yazılım kodlamasıyla dielektrik sabiti ε_r, manyetik geçirgenlik katsayısı μ_r ve kırılma indisi *n* elde edilmiştir. Tasarımı yapılan MTM yapıların bu üç parametre (ε_r, μ_r ve *n*) değerlerine ulaşılmıştır. CST ve HFSS programlarıyla yayılım ve iletim parametrelerine ulaşmak mümkündür. Bu değerlerden gerekli parametrelere ulaşmak için kullanılan metotlardan NRW metoduna değinmek gerekirse aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir ve aralarındaki bağlantılar kolayca görülebilir.

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \tag{4.1}$$

$$S_{21} = \frac{T(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \tag{4.2}$$

$$T = \frac{S_{11}+S_{21}-\Gamma}{1-(S11+S_{21})\Gamma} \tag{4.3}$$

$$\Gamma = X + \sqrt{X^2-1} \tag{4.4}$$

$$X = \frac{S_{11}^2-S_{21}^2+1}{2S_{11}} \tag{4.5}$$

Yukarda verilen eşitlikler antenlerde elektromanyetiğin önemli terimleri olup; S_{11} yansıma parametresi, S_{21} iletim parametresi, Γ yansıma katsayısı ve T iletim katsayısı olarak bilinir. NRW metodunda dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik katsayısını veren eşitlikleri vermek gerekirse:

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r}\left(\frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi L} ln\left(\frac{1}{T}\right)\right]^2\right) \tag{4.6}$$

$$\mu_r = \frac{1+\Gamma_1}{\Lambda(1-\Gamma)\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2}-\frac{1}{\lambda_c^2}}} \tag{4.7}$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\varepsilon_r \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}\right) = -\left(\frac{1}{2\pi L} ln\left(\frac{1}{T}\right)\right)^2 \tag{4.8}$$

Eş. 4.6, Eş. 4.7 ve Eş. 4.8'de verilen eşitliklerdeki λ_0 boş uzayın dalga boyu, λ_c kesim dalga boyu ve Λ akı bağlaşımı olarak adlandırılırlar. Eş. 4.7 eşitliğinde S parametrelerinin bulunması için $|\Gamma_1| < 1$ olmalıdır.

Tez çalışmasında, MATLAB kodunda da kullanılan empedans değeri ile kırılma indisi arasındaki ilişki aşağıdaki Eş. 4.9 ve Eş. 4.11'de gösterildiği gibidir. Buradan kırılma indisi *n* ile dalga empedansı Z değerlerinin oranlaması ile dielektrik sabiti ε_r bulunur; çarpılmasıyla da manyetik geçirgenlik katsayısı μ_r bulunur ve aralarındaki ilişki Eş. 4.13 ve Eş. 4.14 eşitliklerinde görüldüğü gibidir.

$$Z = \pm\sqrt{\frac{(1+s_{11})^2 - s_{21}^2}{(1-s_{11})^2 - s_{21}^2}} \tag{4.9}$$

$$e^{ink_0 d} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11}\frac{Z-1}{Z+1}} \tag{4.10}$$

$$n = \frac{1}{k_0 d}\left\{\left[\left[\ln(e^{ink_0 d})\right]'' + 2m\pi\right] - i\left[\ln(e^{ink_0 d})\right]'\right\} \tag{4.11}$$

Kırılma indisi *n* değerini veren Eş. 4.11 eşitliğinde gösterilen tek tırnaklı (′) kısım reel değeri bulmayı sağlar; çift tırnaklı (″) kısım ise sanal değerleri verir. Aşağıda verilen

kırılma indisi formülü ise reel kısmı temsil edecek şekilde ε_r, ve μ_r parametrelerin çarpımının karekökü olarak da ifade edilir.

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \tag{4.12}$$

$$\varepsilon = n \,/\, Z \tag{4.13}$$

$$\mu = nZ \tag{4.14}$$

NRW metodu ile tez çalışmasında MTM yapılarının DNG özellikleri gösterdiğini CST ve HFSS simülasyon programıyla ve MATLAB yazılım kodlamasıyla görülmüştür.

4.2. Zaman Domainde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu

FDTD metodu 1966 yılında Kane Yee tarafından oluşturulmuştur (Yee, 1966). Bu yöntem sonraki yıllarda diğer araştırmacılar tarafından geliştirilerek elektromanyetik sorunların çözümlerinde en çok kullanılan yöntem haline gelmiş ve halende kullanımı çok yaygındır.

FDTD yöntemi elektrik alan ile manyetik alan arasında bir bağlantı kurarak oluşturulan Maxwell'in diferansiyel denklemlerinin kullanılmasıyla zaman domaininden ayrıştırması sonucu ortaya çıkan sonuca dayanmaktadır. Aşağıdaki Eş. 4.15 ve Eş. 4.16 eşitlikleri Maxwell'in izotropik olarak belirtilen zaman domainindeki denklemleridir ve bu denklemlerdeki eşit işaretinin sağındaki sırasıyla manyetik alan ile elektrik alanın zamana bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

$$\nabla x \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \tag{4.15}$$

$$\nabla x \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{4.16}$$

Bu noktada eşitliğin sağ tarafındaki alanlar yalnız bırakılarak gerekli lamda (∇) ile ilgili alanlar vektörel (x) olarak çarpma işlemi uygulandığında Kartezyen koordinatlarda aşağıdaki altı skaler denklem elde edilir (Sadiku, 2000).

$$\frac{\partial Hx}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y}\right) \tag{4.17}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial Ex}{\partial z}\right) \tag{4.18}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial Ex}{\partial y} - \frac{\partial Ey}{\partial x}\right) \tag{4.19}$$

$$\frac{\partial Ex}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) \tag{4.20}$$

$$\frac{\partial Ey}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial_z} - \frac{\partial H_2}{\partial x}\right) \tag{4.21}$$

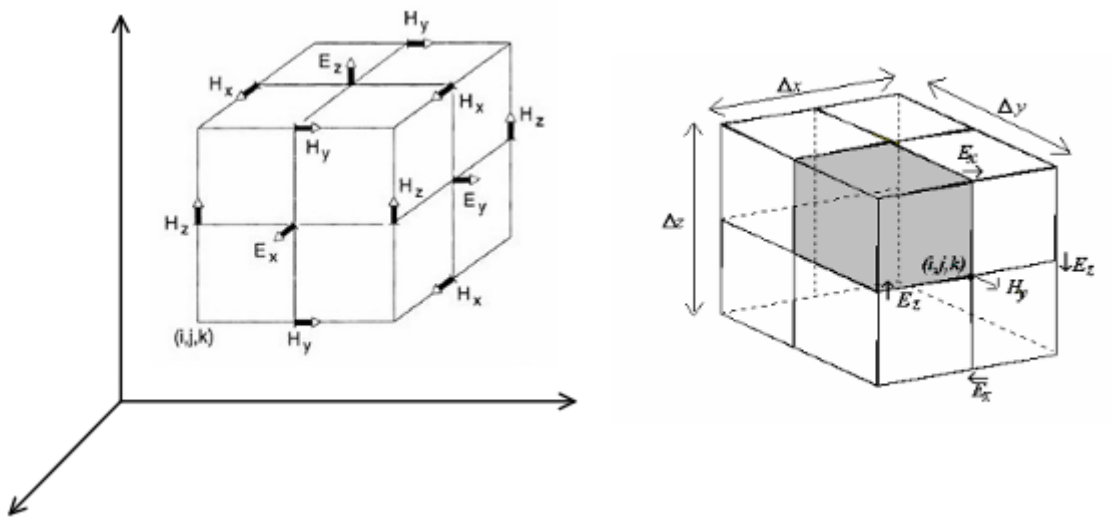
$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial Hx}{\partial y}\right) \tag{4.22}$$

Kane Yee tarafından oluşturulmuş olan FDTD metodunun EM bileşenlerinin gösterimi Şekil 4.1'de gösterildiği gibi olup gridler (ızgara) halindedir. Yee gridi olarak bilinen bu gösterim ile açık ve kolay bir şekilde elektrik alan ile manyetik alan bileşenlerinin koordinat ekseninde yönleri rahatlıkla belirlenir. Aşağıdaki Şekil 4.1'de belirtilen birim uzay noktası Eş. 4.23 eşitliğiyle belirlenir.

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \tag{4.23}$$

Uzaydaki bu durum birim olarak ifade edildiğinde nasıl konumun ve zamanın bir fonksiyonu olduğunu Eş. 4.24 eşitliğinde göstermek mümkündür.

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) = u_{i,j,k}^{n} \tag{4.24}$$



Şekil 4.1. Yee gridinde EM alan bileşenleri ve uzay ortamında konuma bağlı gösterimi (Yee, 1997)

Eş. 4.24'deki fonksiyon ifadesini uzay ve zaman türevleri için FDTD yöntemleri olan ileri, geri ve merkezi farklardan, merkezi farklar yöntemi kullanıldığında zamana ve konuma bağlı olarak kısmi diferansiyel yöntemiyle altı tane denklem zamandan ve konumdan ayrıştırılmış olur. Bu denklemler aşağıda belirtildiği gibidir (Sadiku, 2000).

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta_z, n\Delta_t) = \frac{u^n_{i+\frac{1}{2},j,k} - u^n_{i-\frac{1}{2},j,k}}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \tag{4.25}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta_z, n\Delta t) = \frac{u^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k} - u^{n-\frac{1}{2}}_{i,j,k}}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \tag{4.26}$$

Gerekli işlemler yapıldığında aşağıdaki gibi kayıpsız ortam için olması gereken altı tane kısmi diferansiyel denklem elde edilir.

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\mu}.\left[\frac{E_y^n(i,j,k+1/2) - E_y^n(i,j,k-1/2)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i,j+1/2,k) - E_z^n(i,j-1/2,k)}{\Delta y}\right] \tag{4.27}$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\mu}.\left[\frac{E_z^n(i+1/2,j,k) - E_z^n(i-1/2,j,k)}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i,j,k+1/2) - E_x^n(i,j,k-1/2)}{\Delta z}\right] \tag{4.28}$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\mu}.\left[\begin{array}{l}\frac{E_x^n(i,j+1/2,k)-E_x^n(i,j-1/2,k)}{\Delta y} \\ -\frac{E_y^n(i+1/2,j,k)-E_y^n(i-1/2,j,k)}{\Delta x}\end{array}\right] \quad (4.29)$$

$$E_x^{n+1}(i,j,k) = E_x^n(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon}.\left[\begin{array}{l}\frac{H_z^{n+1/2}(i,j+1/2,k)-H_z^{n+1/2}(i,j-1/2,k)}{\Delta y} \\ -\frac{H_y^{n+1/2}(i,j,k+1/2)-H_y^{n+1/2}(i,j,k-1/2)}{\Delta z}\end{array}\right] \quad (4.30)$$

$$E_y^{n+1}(i,j,k) = E_y^n(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon}.\left[\begin{array}{l}\frac{H_x^{n+1/2}(i,j,k+1/2)-H_x^{n+1/2}(i,j,k-1/2)}{\Delta z} \\ -\frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2,j,k)-H_z^{n+1/2}(i-1/2,j,k)}{\Delta x}\end{array}\right] \quad (4.31)$$

$$E_z^{n+1}(i,j,k) = E_z^n(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon}.\left[\begin{array}{l}\frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2,j,k)-H_y^{n+1/2}(i-1/2,j,k)}{\Delta x} \\ -\frac{H_x^{n+1/2}(i,j+1/2,k)-H_x^{n+1/2}(i,j-1/2,k)}{\Delta y}\end{array}\right] \quad (4.32)$$

FDTD metodundan merkezi farklar yöntemiyle oluşturulmuş yukarıdaki bu altı kısmi diferansiyel denklemlerden çıkartılacak bilgi dalga hareketinin herhangi bir zamanda hücre içerisini aşmaması için zaman adımlarının olabildiğince küçük olması gerekir (Sadiku, 2000).

4.3. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM)

Bir problemi sayısal olarak çözmenin diğer bir yöntemi, sonlu elemanlar metodu denilen FEM metodudur. FEM tekniği ile karmaşık olan yapıların fiziksel ifadelerini matematiksel olarak ifade etmek mümkündür. Sonlu elemanlar metodu matris denklemlerine dayandığından gerekli algoritma yöntemleriyle analizi çok kolay ve hızlı bir şekilde yapılıp istenilen sonuçlara ulaşılmaktadır. Ayrıca FEM tekniği, dielektrik yapıların oluşturulması için de yerinde bir yöntemdir.

Herhangi bir problem uzayını FEM tekniği ile analiz edebilmek için Sadiku'nun 1986 yılında belirlediği şu adımlar takip edilmiştir (Sadiku, 1989).

- Çözüm bölgesi sonlu sayıda alt bölgeye ve alt elemanlara ayrılır
- Tek bir eleman için eşitlikler elde edilir

- Çözüm bölgesindeki tüm elemanlar için elde edilen denklemler birleştirilir
- Elde edilen denklem sistemi çözülür

FDTD ve FEM yönteminin benzer yönleri vardır. Her iki yöntemle de belirlenen bölgeler küçük parçalara ayrılıp türevlerinin alınması sonucu tekrardan birleştirilip bir bütün haline getirilir. İkisindeki temel fark; FEM tekniğinde bölgesel fark alınırken FDTD tekniğinde ise noktasal yaklaşım yöntemi uygulanır. Her iki tekniğin de hesaplama hassasiyetleri oldukça yüksek olduğundan gerçek değerlere yakın sonuç verirler.

4.4. Sonlu İterasyon tekniği (FIT)

FIT tekniği Weiland tarafından 1977 yılında geliştirilen bir iterasyon tekniği olup Maxwell'in integral halindeki denklemleri gibi karmaşık işlemleri doğrusal bir forma dönüştürerek analizlerin daha kolay ve daha hassas olmasına imkân sağlamaktadır. Bu formülleştirme işlemi bilgisayar ortamında oluşturularak karmaşık yapıdaki geometrik yapıların elektromanyetik alanlarının daha kolay çözülmesini sağlayıp simülasyon olarak görebilme imkânı sağlamaktadır (Clemens ve Weiland, 2001).

FIT yöntemi esnek bir tekniğe sahiptir. Esnek bir kullanıma sahip olmasının nedeni ise karmaşık denklemleri doğrusal bir forma dönüştürüp daha hassas değerler elde edebilmesidir. Özellikle geometrik yapıların oluşturulması kolay ve basittir. Bu geometrik modellerin sınırları kavisli yapılar ise çok daha doğru sonuçlara ulaşabilme imkânı sağlar (Rahimi, 2011).

4.5. CST

Bu tez çalışmasında benzetim programı olarak kullanılan CST ve HFSS programları anten gibi birçok EM problemleri tasarlanan yapıların analizi ile gerekli parametrelerin sonuçlarını sunabilen yazılım paketleridir. CST'nin yazılımına bakıldığında FDTD, FIT ve TLM yöntemlerinin kullanıldığı görülür ve analizler bu yöntemlerden yola çıkılarak oluşturulmaktadır. Mikroşerit yama anten gibi birçok antenin tasarımları ve MTM yapıların analizleri, CST Mikrodalga Stüdyo (CST MWS) ve CST EM çalışma ortamlarında tasarlanmaktadır. CST MWS ile genelde yüksek frekanslı düşük dalga boyu gerektiren yapıların tasarımları yapılırken, CST EM çalışma ortamı ise daha çok düşük

frekans ile analizi gereken yapıların tasarımı içindir. Haberleşme alanlarında anten yapıların tasarımları ve analizleri oldukça karmaşık olduğundan CST MWS çalışma ortamında bu analizler daha kolay yapılabilmektedir. CST MWS birçok anten tasarımları (monopol, dipol, yama, helis, horn vs.) için oldukça kullanışlıdır. Bu çalışma ortamında yapı analizleri ve tasarımında en uygun çözümleme (zaman domainde, frekans, integral denklem çözücü gibi) için gerekli çözümleme tekniği ile analiz yapabilmektedir. CST MWS simülasyon programı bu tez çalışmasında amaca uygun olarak EM özellikteki parametrelerin analiz sonuçlarının simülasyonuna imkân sağlamaktadır. Bu nedenle ve esnek kullanımından dolayı CST programı kullanılmıştır.

4.6. HFSS

HFSS, Sonlu Elemanlar Metodu (FET) yöntemiyle tasarlanmıştır. Hassasiyeti çok yüksek olması nedeniyle doğru sonuçlar vermesi yüksek frekans çözümü yapabilen, iki ve üç boyutlu EM özellikleri simüle edebilen bir yazılım paketidir. EM özelliklerden anten gibi yapıların gerekli birçok parametre değerlerini analiz ederek simülasyonlarını sunabilmektedir.

HFSS simülasyonu yaparken tasarlanan yapılar düzgün veya düzensiz bir geometrik şekle sahip olsa da bu yapılara uygun mesh işlemi yaparak yapının tüm yüzeylerini çözme imkânı sağlamaktadır. Hassasiyeti yapıların boyutuna göre değişeceğinden birim hücrenin küçük olması daha iyi sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Bu özelliği nedeniyle tez çalışmasında bazı hassas ölçümler için HFSS programı da kullanılmıştır.

4.7. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Bu kısımda birçok bilimsel alanlarda kullanılarak çalışmalara konu olmuş yapay sinir ağları (YSA) tekniğine yer verilmiştir. YSA aşamaları anlaşılır bir şekilde anlatılmaya çalışılmıştır. Bilgisayar sayesinde teknolojideki hızlı ilerleyişle birlikte birçok uygulama alanında ciddi gelişmeler baş göstermiştir. Çok karmaşık problemlerin bilgisayar yazılımında birkaç kodlama ile çözümlenmeleri çok daha kolay hale gelmiş ve zamandan büyük bir tasarruf sağlanmıştır. Yine bunun gibi çok karışık mühendislik araştırmalarında bilgisayarın yeri kaçınılmaz olmuştur. YSA tekniği de bu amaçlarla mühendislik problemlerine uygulanarak çeşitli amaçlarla insan beyni gibi düşünebilme, anlayabilme,

yorumlama yapabilme gibi insan yeteneklerini sanal ortamda sayısal veriler ile sağlayarak kullanımı yaygınlaşmıştır.

YSA tekniği birçok problemin benzer verilerini öğrenebilmekte ve karşılaştırma yaparak en uygun veriyi tahmin edebilmektedir. Yapay bir beyin gibi öğrenme yeteneği kazanıp çok kullanışlı ve oldukça güçlü bir teknik olma özelliği vardır. Tez çalışmasında da MTM yapısının anten ile etkileşimi ile anten kazancına ve yönlülüğüne katkısını artıracak MTM yapısını elde etmek için YSA'ya gerekli veriler öğretilmek istenmiştir. Böylece belirli amaçlar doğrultusunda en uygun yapı tespit edilmek istenmiştir.

Bu bölümde YSA için gerekli teorik özellikler anlatılmış ve YSA'nın ne gibi alanlarda kullanılabileceğine yer verilerek YSA tekniğinin anlaşılması sağlanmak istenmiştir.

4.7.1. YSA tekniği tanımı ve özellikleri

YSA, kavramını şu kelimelerle özetlemek mümkündür; tıpkı insan beynindeki sinirlerin işlevini yerine getirerek birçok uygulamadaki sistemlerin eğitilerek öğrenme, karşılaştırma yapabilme ve gerektiğinde tekrardan hatırlama işlemleri gibi bilgiyi kullanabilme yeteneklerine sahip olarak bilgileri işleyen esnek yapılı sistemlerdir.

YSA'lar tasarımı yapılmış birçok yapay sinir ağlarının birbirlerine bağlanması olayıdır. Yapay sinir ağı için hazırlanmış algoritma aşamalarıyla öğrenme sürecine giren sistem veriler yardımıyla bilgiler bir araya getirilir. Toplanan bilgiler arasında gerekli bağlantılar kurularak bilgiler saklanır. Sonra karşılaştırma yeteneği sayesinde genelleme yaparak en uygun veriyi ortaya çıkarır. YSA mantığı ilk ortaya çıktığı zamanlar 1940'lı yıllar olup 1960'lı yıllarda ilk sinir ağlı bilgisayar ortaya çıkmıştır. 1985 yıllarından sonra artık oldukça tanınan YSA tekniği birçok uygulamada da kullanılmasıyla geniş çapta yayılarak bilim dünyasında yerini almıştır.

YSA tekniğini bu kadar popüler kılan özelliği, insan beyniyle benzer özelliklerinin olmasıdır. Bunlar; öğrenme, ilişkiler kurabilme, karşılaştırma yapabilme, tahmin edebilme yeteneği, genelleme yapabilmesi, sınıflandırmalar yapabilmesi, en uygun değerleri bulabilmesi, birçok çözümden en uygun olanını ortaya koyabilmesi şeklinde ifade edilebilir.

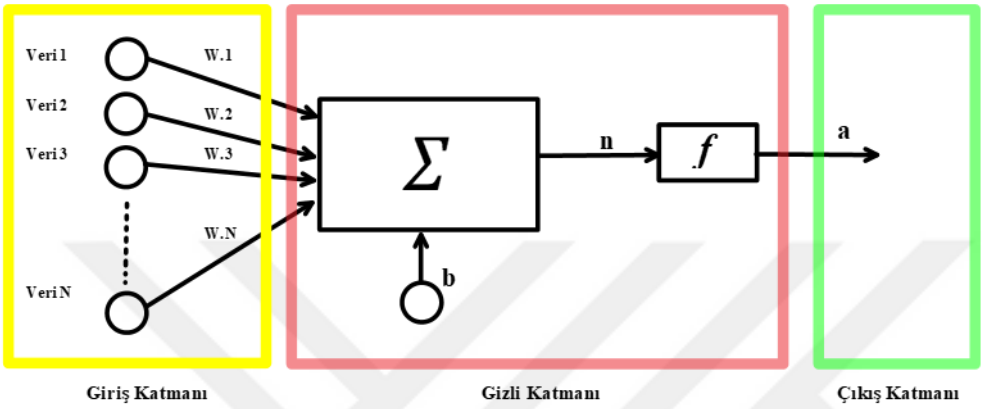
Uygulama alanlarına bakıldığı, elektrik elektronik gibi cihazlardaki sorunları tespit edebilmesi bakımından cihazların arıza analizlerine katkıda bulunabilmektedir. Aynı şekilde elektrik motor sürücülerinin kontrolünde, robotik çalışmalarda robotların kontrolünde, uçaklarda otomatik pilot uygulamalarında; haberleşme sahasında konuşmaların eş zamanlı olarak ulaşımı ve çevrimlerinde; üretim fabrikalarında kalite kontrolü, ürünlerin analizinde; tıp alanında kanserli bölgelerin tespitinde, yapay uzuvların beyin ile eş zamanlı olarak koordinasyonunu sağlayabilmede; savunma sanayisinde ise hedef tespiti, objeleri algılayıp tanımlayabilme, silah yapımı için gerekli otomasyon işlemlerinde YSA geniş bir kullanım alanı oluşturmuştur. Bu tez çalışmasında ise mühendislik alanı içerisinde EM sistemlerin konusu olmuş MTM yapıların anten kazancı ve yönlülüğünü en iyi hale getirecek yapı tespitlerini YSA tekniği ile gerçekleştirmeye çalışılmıştır.

YSA tekniğinin birçok üstün özellikleri vardır. Örneğin bazı bilgi işleyen sistemler işlemlerini seri mantığı ile çalıştığından sonuca ulaşma zamanı oldukça uzun olacağından yavaştırlar. YSA bu işlem mantığını paralel işlem olarak yaptığından sonuca oldukça hızlı bir şekilde ulaşabilme imkânı sağlamaktadır. YSA lineer olmayan problemleri çözmede de oldukça başarılıdır. Bu özelliği sayesinde karmaşık işlemleri kolay bir şekilde çözümleyebilmektedir.

YSA'nın bir diğer özelliği paralel olarak işlemler yapabildiğinden hataları çok iyi giderebilmesidir. Yani paralel işlem yapabilme özelliği sayesinde eğer bazı ağ bağlantıları işlevini hatalardan dolayı yapamaması durumunda ağın istenilen değerdeki sonuçlara ulaşmasında herhangi bir engel teşkil etmeyecektir. Bunlar gibi başka özelliklerini söylemek gerekirse; öğrenme ile genelleme yapabilme, tasarımının kolaylığı ve analizlerinin oldukça kolay olması, eksik bilgiler olduğunda da çalışmasına devam etmesi, tam olmayan bilgileri işleyebilmesi ve beklenmedik şekilde bir bozulma yapmaması gibi üstünlükleri vardır. Olumsuz yanlarından bahsetmek gerekirse; eğitim için belli bir problem belirleme gibi bir şartı yoktur, öğretilmek istenen bir problemi ağa öğretme aşamasının olması, eğitimin ne zaman, nasıl biteceğine dair herhangi bir yöntemin bulunmaması gibi özellikler sıralanabilir.

4.7.2. YSA tekniğini yapısı

YSA tekniğinin yapısına bakıldığında genel anlamda; giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan oluştuğu görülür. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi YSA üç katmandan oluşur.



Şekil 4.2. Yapay sinir ağının yapıları

Şekil 4.2'de verilen giriş katmanındaki veriler serisi, üzerinde çalışılan sistemin giriş parametrelerini oluşturmaktadır. "w" serileri ise ağırlıklardır. Gizli katmanda veriler işlenir ve sonuçlar çıkış katmanına gönderilir. Dışarıdan gönderilen veriler ağırlıklarla sisteme bağlanır ve toplama fonksiyonunda işlenerek giriş işlemleri çözülür. Sonra veriler *f* aktivasyon fonksiyonunda işlenerek çıkış bilgisini oluşturur. Aktivasyon fonksiyonu işlem türüne göre seçilip ona göre işlemi yapılır ve sonuçlar elde edilir. Yapay sinirdeki bu katmanları açıklamak gerekirse tanımları aşağıdaki gibi yapılabilir.

- Giriş Katmanı: Verilerin giriş yaptığı bölümdür. Bu bölümde giriş miktarı kadar hücre sayısı olup herhangi bir işlem yapılmaz. Giriş verileri buradan, işlenmek üzere gizli katmana ağırlıkların eşlik edilmesiyle hücreye bağlanırlar.
- Gizli Katman: Bu bölüme ara katman da denir. Ara katman sayısı ağdan ağa değişebilir. Yani bir tane ara katman olabileceği gibi birden fazla ara katman da olabilir. Bu bölümde giriş katmanından gelen, giriş ve ağırlık verileri toplama fonksiyonunda toplanarak net girdi sonucu oluşturulur ve aktivasyon işlemiyle sonuç bulunup çıkış katmanına aktarılır.
- Çıkış Katmanı: Gizli katmanda, girişte yollanan parametre değerleri işlenip ulaşılmak istenen sonuç elde edilerek çıktı olarak dışarı aktarılan katmandır.

YSA yapısındaki bu katmanlar içerisindeki diğer terimleri ifade etmek gerekirse aşağıdaki gibi tanımlama yapılabilir.

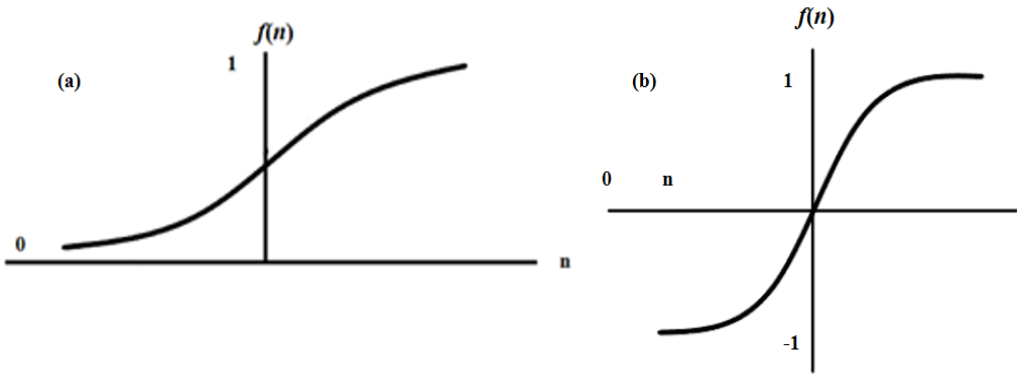
- Girdiler: Dışarıdan gelen verilerdir ya da başka bir hücreden yollanan verilerdir.
- Ağırlıklar: Sayısal olarak veriler arasında bağlantıyı ifade etmektedir. Tüm bağlantıların farklı ağırlık değerleri vardır. Beyindeki sinir hücresindeki sinapslara karşılık gelir.
- Toplama Fonksiyonu: Giriş verilerin ağırlıklarla çarpılıp toplanması sonucu toplam girdi değerini oluşturur. Beyindeki dentritlere karşılık gelir. Formülü aşağıdaki Eş. 4.33 eşitliğinde verildiği gibidir.
- Aktivasyon Fonksiyonu: Toplam girdi değerlerini sistemin yapacağı işleve göre işlenerek çıktıların elde edilmesini sağlar. Beyindeki çekirdeği temsil eder.

Toplama ve aktivasyon fonksiyonlarının genel formülü Şekil 4.2'den yola çıkarak oluşturmak gerekirse aşağıdaki gibi olur. Veriler "P" olarak temsil edilmiştir.

$$n = \sum_{i=1}^{N}(W_i P_i + b) \tag{4.33}$$

$$a = f(n) \tag{4.34}$$

Aktivasyon fonksiyonunda kullanılan işlemler YSA verilerinin genliklerini belli bir aralıkla sınırlandırarak, işlemler bu sınırlandırma şartlarına göre yapılır ve sonuca ulaşılır. En yaygın olarak 0-1 aralığında işlemleri yapan sigmoid işlemi kullanılır. Sigmoid yöntemi sürekli ve lineer olmayan bir fonksiyon özelliğine sahiptir. Şekil 4.3a'da Sigmoid yöntemine ait şekil verilmiştir ve ardından Eş. 4.35 eşitliği de verilmiştir. Bir diğer yöntem ise tanjant hiperbolik fonksiyonudur. Bu fonksiyonun değeri ise 1 ila -1 aralığındadır. Tanjant hiperbolik fonksiyonun grafiği Şekil 4.3b'deki gibi olup eşitliği Eş. 4.35'te verildiği gibidir.



Şekil 4.3. Aksiyon fonksiyonları; (a) sigmoid fonksiyonu, (b) tanjant hiperbolik fonksiyonu

Sigmoid ve tanjant hiperbolik fonksiyonunun denklemleri:

$$f(n) = 1/(1 + e^{-n}) \tag{4.35}$$

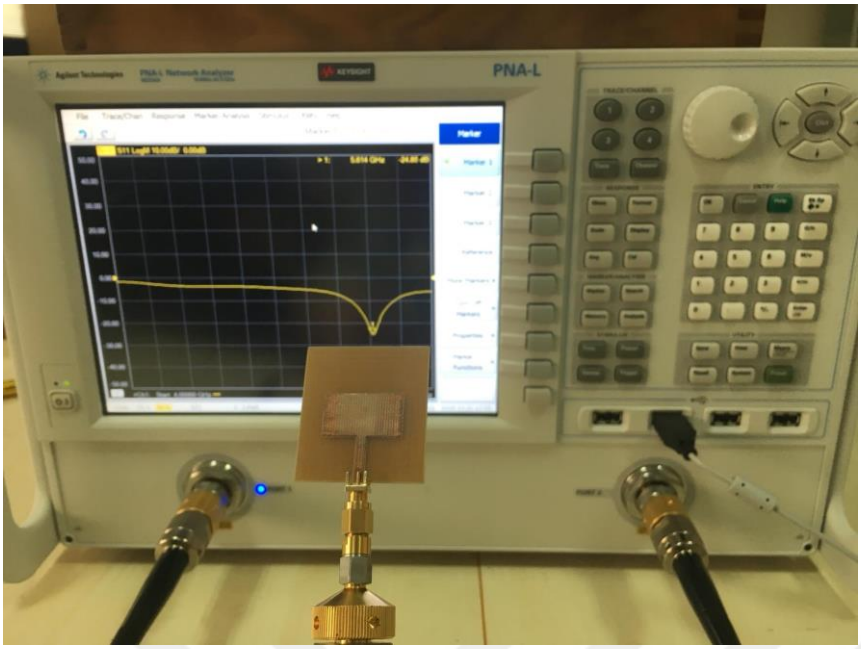
$$f(n) = (e^{n} - e^{-n})/(e^{n} + e^{-n}) \tag{4.36}$$

Eş. 4.35 ve Eş. 4.36 eşitliğindeki 'n' sinir ağını eğitmek için sisteme girişi yapılan verilerin sayısal değerleridir. Aktivasyon fonksiyonları sadece bunlarla sınırlı değildir. Ayrıca literatür taramalarında doğrusal aktivasyon fonksiyonu, basamak fonksiyonu gibi aktivasyon fonksiyonu çeşitleri de vardır (Yalçın, 2012).

YSA tekniğinin sınıflandırılması yapısına ve öğrenme algoritmasına göre ikiye ayrılabilir. Yapısal olarak; ileri ve geri besleme olarak sınıflandırılır. Öğrenme algoritmasına göre; danışmanlı öğrenme, danışmansız öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme olarak sınıflandırılır. Öğrenme algoritma çeşitlerini şu şekilde sıralamak mümkündür; geri yayılım ve esnek yayılım algoritması, delta bar algoritması, hızlı yayılım algoritması gibi çeşitleri vardır (Yalçın, 2012). Tez çalışmasında kullanılan Levenberg-Marquardt metodu (MATLAB'ta yapay sinir ağı için var olan toolbox kütüphanesinde mevcuttur), genetik algoritma (GA) vs. algoritma çeşitleri de bulunmaktadır. YSA ile ilgili çalışmalar Bölüm 5'te verilerek MTM yapısı için uygun yapı tespitine değinilecektir.

4.8. Üretim ve Ölçüm Cihazları

Mikroşerit antenin üretimi, CircuitPro programı yardımıyla Laser ve Electronics cihazına üç boyutlu çizimi için ayarlamaları yapılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te görülen Agilent Technologies PNA-L Network Analyzer N5234A cihazı ile antenin S11 parametresi ölçülmüştür. Bu cihaz S11 parametresinin yanı sıra diğer birçok parametrenin analizlerini 10 MHz – 43,5 GHz frekans aralıklarında yapabilmektedir.



Şekil 4.4. Network Analiz cihazı ile mikroşerit antenin S11 değerinin ölçülmesi

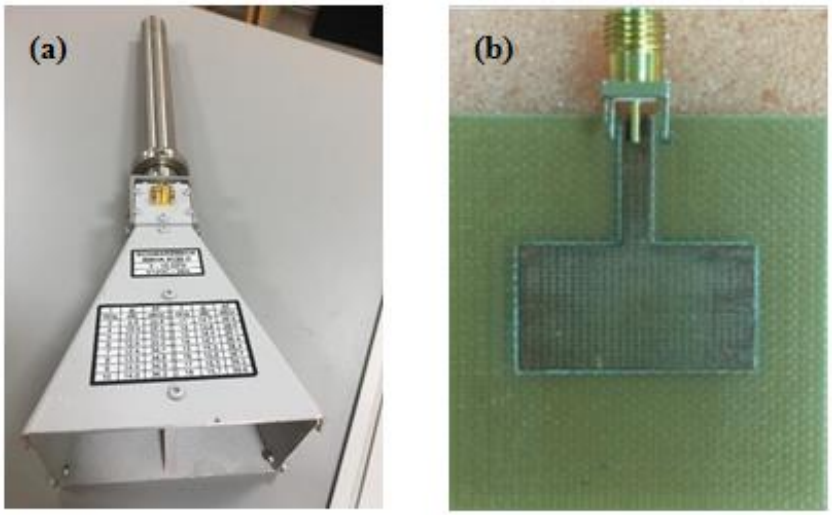
Antenin iki boyutlu ışıma eğrisinin laboratuvarda Şekil 4.5'te gösterilen MATS-1000 cihazı kullanılarak testi yapılmıştır. Bu cihaz 300 MHz – 3 GHz ve 5-6 GHz frekans aralıklarında antenlerin ışıma eğrilerini çizebilecek şekilde üretilmiştir. Antenin üretimi yapıldığında rezonans frekansı 5,65 GHz olarak test edildiğinden ışıma eğrisi için frekans 5,65 GHz olacak şekilde kalibresi yapılarak ışıma analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına ulaşabilmek için ise MATS yazılımının ara yüzünde veriler elde edilerek MTM ile karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 4.5. MATS-1000A anten eğitim cihazı

Işıma eğrisini, MATS arayüzünde oluşturmak için üretimi yapılan mikroşerit antenin rezonans frekansında çalışabilen sinyal verici herhangi bir antenin olması yeterlidir. Bu

sayede araştırmacının kendi tasarladığı antenin nasıl bir ışıma eğrisi yaptığını teyit etmek mümkündür. Bu çalışmada verici anten olarak laboratuvarda mevcut bulunan üretici firmanın yapmış olduğu ve 3-18 GHz aralıklardaki frekanslara cevap verebilen Şekil 4.6a'daki horn anten kullanılmıştır. Alıcı anten ise bizim tasarımını yaptığımız Şekil 4.6b'de görülen mikroşerit antendir. Antenin çalışma frekansı olan 5,65 GHz MATS programında kalibresi yapılıp ışıma eğrisi için simülasyonu yapılmıştır. Veriler EXCEL programına aktarılarak antenin kendi ışıması ve anten ile MTM yapıların etkileşimindeki ışıma eğrileri elde edilmiştir (Bkz. Şekil 5.33). Her MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu oluşan yeni rezonans frekans değeri MATS programında ayarlaması yapılarak test edilmiştir.



Şekil 4.6. Verici ve alıcı antenler: (a) horn ve (b) mikroşerit anten

Verici anten ile alıcı anten düzeneği Şekil 4.7'de gösterildiği gibidir. Horn antenin ortama yaymış olduğu ışımalar mikroşerit anten tarafından algılanarak MATS ile simülasyonu yapılmıştır. Mikroşerit anten ışımaları, tek bir yönde değil kendi etrafında 360 derece dönerek etrafındaki bütün ışımaları tarayıp algılama işlemini tamamlar. Sonuçlar bu şekilde tam bir tura göre elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Ölçüm için gerekli düzenek

5. ARAŞTIRMA BULGULARI, UYGULAMALAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, kullanımı ve uygulama alanını oldukça yaygın olan mikroşerit yama anten (MYA) seçilmiştir. MYA'nın seçilme nedeni bölüm 3'deki antenler bölümünde anlatılmıştır. Tez çalışmasının amacı olan anten kazancını ve yönlülüğünü artırmak amacıyla haberleşme alanında sıklıkla kullanılan 5,2 GHz frekansı seçilmiş olup, bu rezonans frekansında yapı tasarımı yapılmıştır. Anten kazancını ve yönlülüğünü artırmak için 40 MTM yapısı 6x6 matrisle her birinin kenar uzunlukları 6 mm olan kareli yama yapılar tasarlanmıştır. Rastgele oluşturulan ve simetrik olan bu 40 MTM yapısı, 5,2 GHz çalışma frekanslı anten ile analiz edilmiştir. YSA yöntemiyle en uygun yapı tespiti için eğitim işlemiyle optimize edilen yapının tespiti yapılmıştır. Tespiti yapılan yapının CST programında S11 (iletilen dalga sinyali) ve S21 (yansıyan dalga sinyali) değerleri elde edilmiştir. Bu 40 yapıdan en uygun üç yapının (11., 13. ve 16. MTM yapıların) dielektrik sabiti, manyetik geçirgenliği ve kırılma indisi değerlerine MATLAB ara yüzünde gerekli formüllerin yazılımı hazırlanmıştır. MATLAB programına aktarılmış olan S11 ve S21 parametre değerlerinden, yapıların MTM olup olmadığına dair tespit yapılmıştır. Bu üç yapı ve YSA ile bulunan 6x6 matrisli kare yamalı MTM yapısının MYA'nın kazancı ve yönlülüğü üzerindeki etkisi CST ve HFSS ara yüzünde analiz edilerek bulunmuştur. Bu etkiler grafiklerle gösterilmiş olup aşağıda yeri gelindiğinde değinilmiştir. Ayrıca 5,2 GHz çalışma frekanstaki anten ve 11., 13. ve 16. MTM yapıları laboratuvar ortamında üretimi yapılarak VNA network analizör cihazında ölçümleri yapılmıştır. Bununla beraber, anten ile MTM yapıların etkileşimi sonucundaki rezonans frekanslarıyla iki boyutlu (2D) ışıma eğrileri MATS-1000 cihazı ile ölçülerek simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırması yapılmıştır. Bu kısımdan itibaren yukarıda bahsedilenler, şekillerle anlatılarak tez çalışmasına açıklık getirilmiştir.

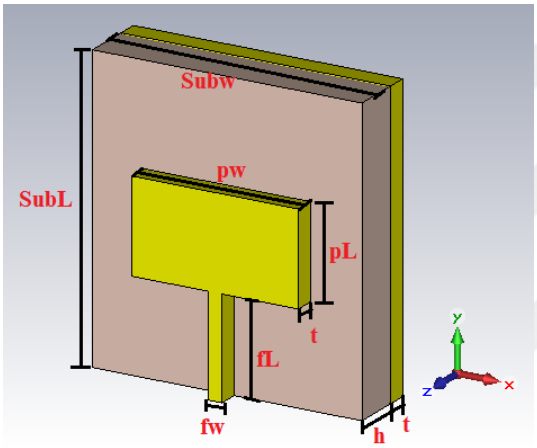
5.1. MYA ile MTM Yapıların Tasarımı ve Değerlerin YSA ile Tahmini

Bu çalışmada mikroşerit antenin hem rezonans frekansındaki S11 parametre değerleri hem de kazancı ve yönlülüğü iyileştirilmek istenmiştir. Bu amaç için 40 tane rastgele ve simetrik olan kare yamalı desenler oluşturuldu. Bu kare yamalı desenler MTM özellik gösterecek şekilde tasarlandı. Bu kısımdan itibaren, bu çalışmada yapılan işlemler ve sonuçlara yer verilecektir. Ayrıca 40 adet olan rastgele ve simetrik MTM yapıların MYA

ile etkileşimi sonucu elde edilen değerler YSA tekniği ile tahmin edilmek istenmiştir ve en iyi tahmin edilen yapı belirlenmiştir.

5.1.1. Mikroşerit yama antenin tasarımı ve sonuçları

Şekil 5.1'de 5,2 GHz rezonans frekansındaki MYA'nın boyutları parametrik uzunluklarıyla gösterilmiştir. Anten simülasyonları CST MWS ve HFSS programında çizilerek analiz edilmiştir. Çalışma boyunca ağırlıklı olarak CST MWS programından elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.



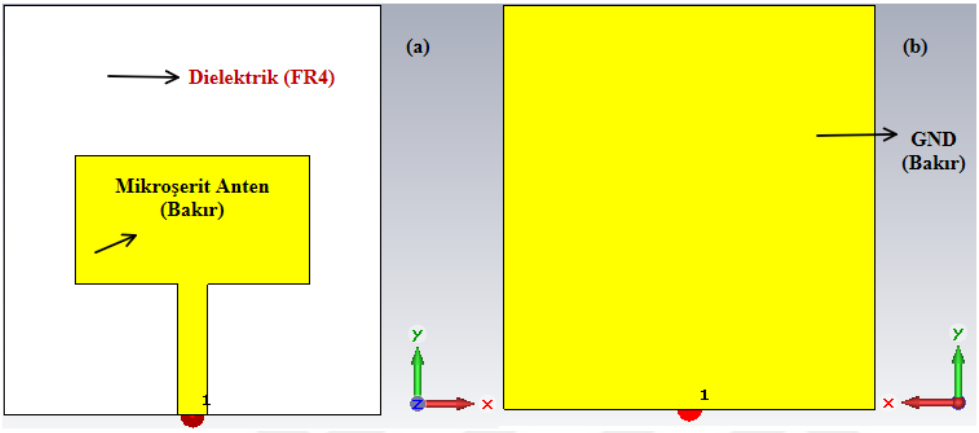
Şekil 5.1. MYAve boyutlarının isimleri

Çizelge 5.1'de MYA'nın ölçüleri verilmiştir. Çalışılmak istenen frekansa göre, ilgili ölçüm değerleri, yapılan analizlerle bulunarak rezonans frekansı tespit edilmiştir. 5,2 GHz frekansı baz alınarak antenin MTM yapıları ile etkileşimi yapılmıştır.

Çizelge 5.1. MYA'nın 5,2 GHz frekansı için gerekli ölçüm değerleri

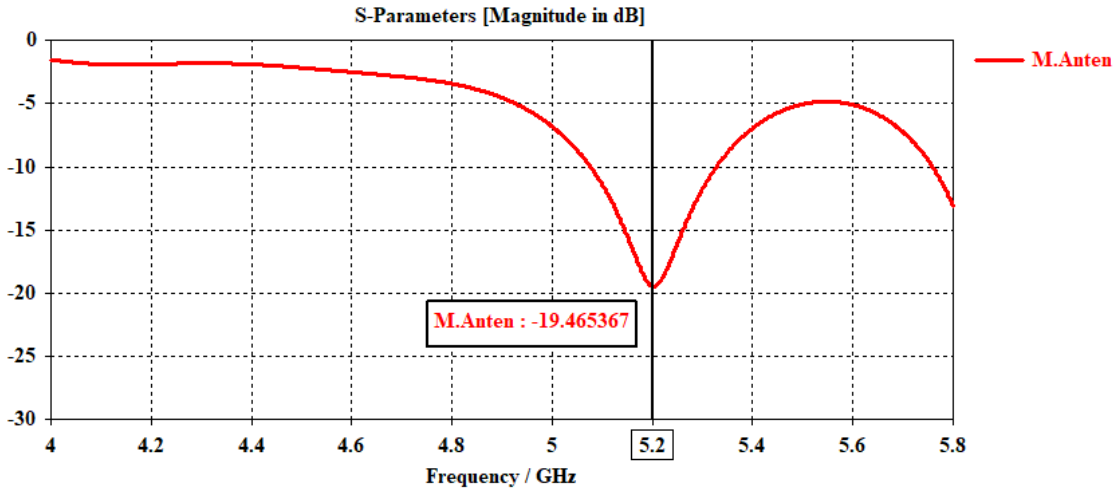
Parametreler	**Büyüklük**	**Birimi**
Plakanın Eni (Subw)	38,00	mm
Plaka Boyu (SubL)	41,25	mm
Yamanın Eni (pw)	23,50	mm
Yamanın Boyu (pL)	13,00	mm
Besleme hattının Eni (fw)	2,000	mm
Besleme hattının Boyu (fL)	14,25	mm
Plaka kalınlığı (h)	1,600	mm
Bakır kalınlığı (t)	0,035	mm
Çalışma Frekansı	5,200	GHz

CST programında tasarımı yapılan Şekil 5.2'deki anten tasarımında kullanılan dielektrik malzeme FR4 malzemesidir. FR4 malzemesinin bağıl dielektrik katsayısı 4,3 (ε_r), manyetik geçirgenliği 1 (μ_r), dielektrik kayıp tanjantı 0,025 ve tasarımdaki kalınlığı h=1,6 mm'dir. Mikroşerit anten ve antenin arka kısmı bakır olup kalınlığı t=0,035 mm'dir. Bakır malzemenin elektriksel iletkenliği 5,8001x10^7 S/m'dir.



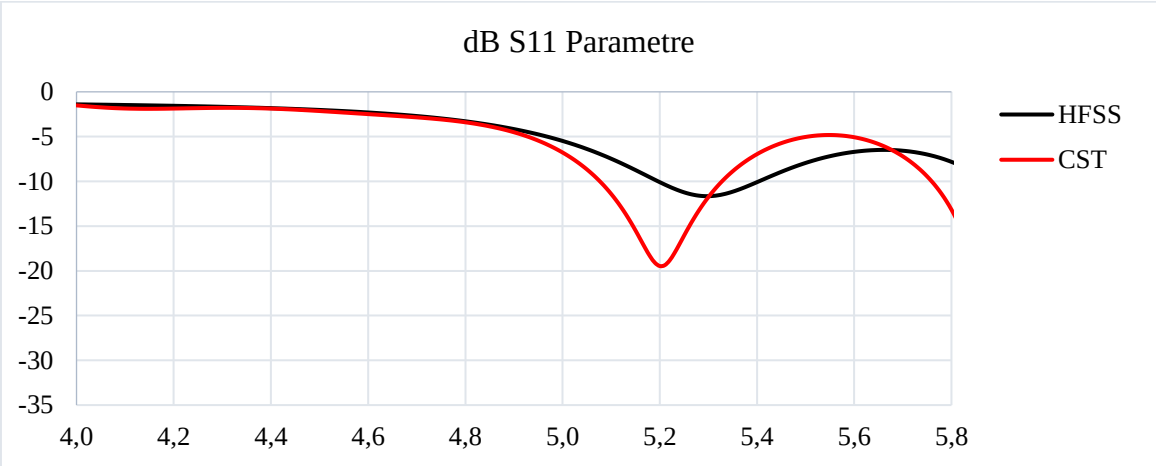
Şekil 5.2. MYA'nın metal ve dielektrik malzemesi; (a) ön kısım, (b) arka kısım

Bu özellikteki bakır metal malzeme ile FR4 dielektrik malzemeden yapılan 5,2 GHz antenin simülasyon analizinde, S11 değerinin -19,465367 dB olduğu Şekil 5.3'te görülmektedir.



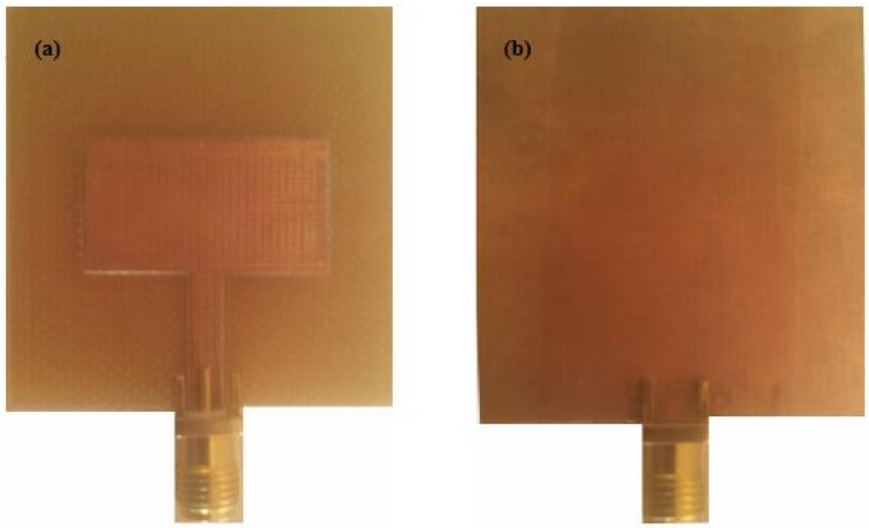
Şekil 5.3. MYA'nın 5,2 GHz rezonans frekanslı S11 parametre değeri

Şekil 5.4'te HFSS ve CST ara yüzünde dB cinsindenelde edilen S11 parametre grafiğine göre hemen hemen aynı frekanslarda rezonansa girdiği görülür. Bu farklılıklar, program analiz yöntemlerinin, tanımlı mesh sayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



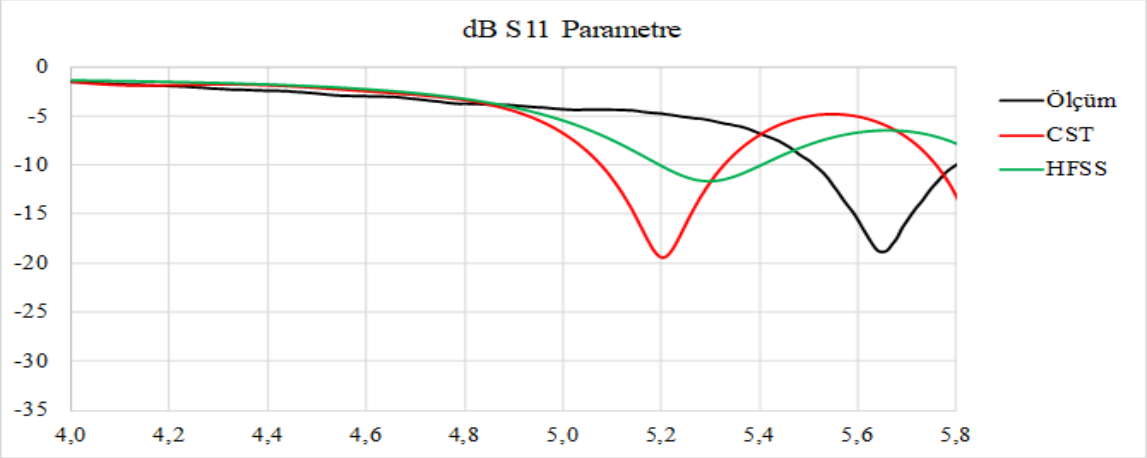
Şekil 5.4. HFSS ve CST ara yüzünde aynı antenin karşılaştırılması

Laboratuvar ortamında üretilen mikroşerit yama anten Şekil 5.5'te gösterildiği gibi olup ortam şartları ve doğal olan FR4 dielektrik malzeme üzerine işlenen bakır yapıların özelliklerinden dolayı antenin (üretimden kaynaklanan kayıplar olabilir) rezonans frekansı 5,65 GHz olarak ölçülmüştür. Fabrikasyonu yapılan antenin 5,65 GHz rezonans frekansındaki S11 parametre değeri Şekil 5.6'da gösterildiği gibi ölçülmüştür.



Şekil 5.5. MYA'nın fabrikasyonu; (a) ön kısım, (b) arka kısım

Laboratuvar ortamında üretimi yapılan Şekil 5.5'teki antenin S11 parametresi frekansa bağlı gösterimi aşağıdaki Şekil 5.6'daki gibidir.

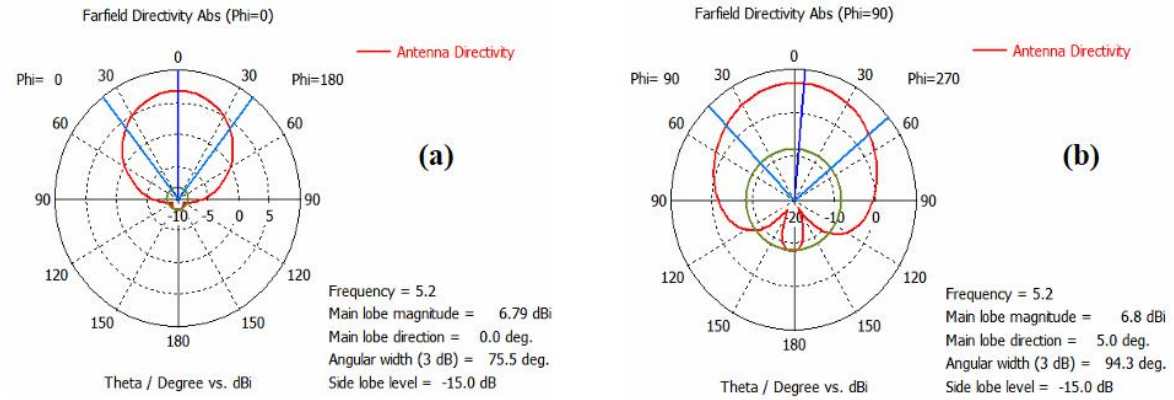


Şekil 5.6. MYA'nın CST, HFSS ve ölçümdeki dB S11 parametre grafiği

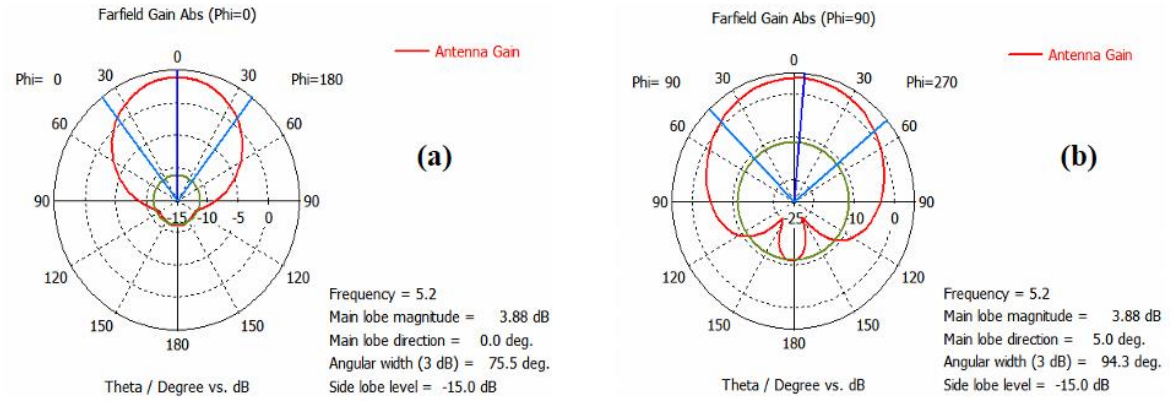
Mikroşerit antenin CST, HFSS ve ölçümde rezonans frekanslarının ve S11 değerlerinin farklı çıktığı Şekil 5.6'da görülmektedir. Öncelikle CST ve HFSS benzetim programında bu değerlerin farklı çıkmasının nedeni iki programın yazılımda analiz işlemi için kullanılan yöntemlerin farklı olmasıdır (Bkz. Bölüm 4.5 ve Bölüm 4.6). Her iki programda da mikroşerit anten aynı ebatlarda üretilerek analiz edilmiştir. Malzemeler aynı olmasına rağmen malzemelerin bazı özellikleri programa farklı tanımlanmıştır. Mesela HFSS'te FR4 malzemesinin dielektrik kayıp tanjant değeri 0,02 iken CST de bu değer 0,025 olarak tanımlanmıştır. Aynı şekilde HFSS programında FR4 malzemenin dielektrik sabiti 4,4 iken CST'de bu değer 4,3 olarak tanımlanmıştır. Simülasyonlarda benzerlik olsa da bu gibi farklılıklardan dolayı rezonans frekansı ve S11 değerinde farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ölçüm sonucunun farklı olmasının nedeni ise üretim cihazı her ne kadar iyi olsa da hassasiyetinden ve laboratuvar şartlarından dolayı antenin rezonans frekansında ve S11 parametresinde Şekil 5.6'daki gibi bir sonuç gözlenmiştir.

Anten kazancının ve yönlülüğünün artışını gözlemleyebilmek için antenin ışıma eğrilerinin çıkarılması gerekir. Antenler konusu anlatılırken ışıma eğrileri bölüm 3.4.1'de bahsedilmiştir. Işıma eğrileri ile anten kazancı ve yönlülüğündeki durumları incelenerek antenin yayılım gücünü tespit etmek mümkündür. Bu bilgilerden yola çıkarak bu tez çalışmasında CST ve HFSS ara yüzlerinden simülasyonu yapılan ve laboratuvar ortamında

da üretimi yapılan antenlerin, MTM yapılarıyla etkileşimleri sonucu ışıma eğrileri incelenmiştir. Şekil 5.7'de antenin ışıma eğrilerinin nasıl olduğu gösterilmiştir.



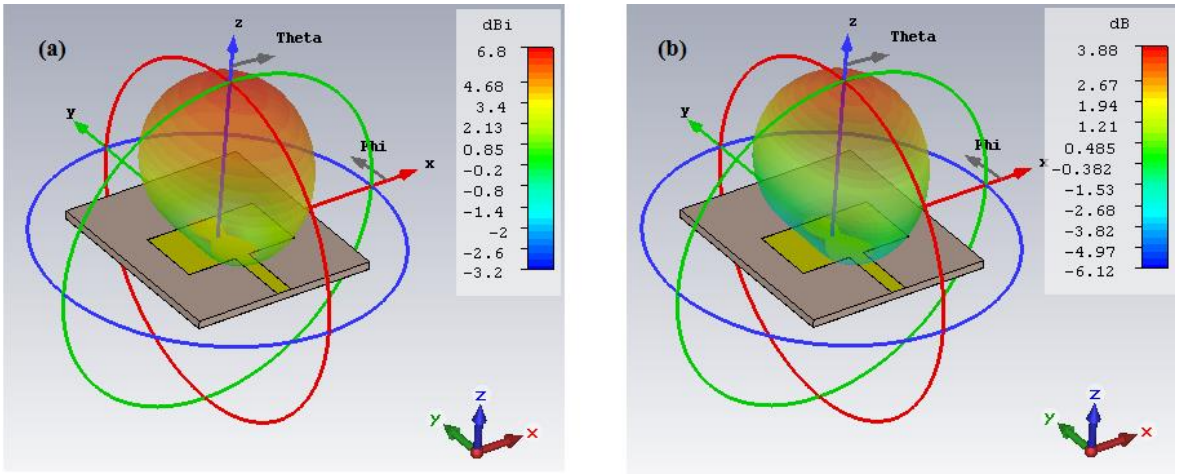
Şekil 5.7. MYA'nın Phi 0 ve Phi 90 derecedeki ışıma eğrileri; (a) ve (b) antenin yönlülüğü



Şekil 5.8. MYA'nın Phi 0 ve Phi 90 derecedeki ışıma eğrileri; (a) ve (b) anten kazancı

Antenin ışıma eğrilerine bakıldığında Phi 0 derecede antenin yönlülüğü Şekil 5.7a'da ana lobtaki ışıma değeri ve yan lobtaki ışıma değerleri sırasıyla 6,79 dBi ve-15.0 dB olduğu görülür. Açısal genişliği ise 75,5 derecedir. Bu değerler Phi 90 derecede Şekil 5.7b'de sırasıyla 6,80 dBi, -15,0 dB ve 94,3 derecedir. Aynı şekilde anten kazancının Phi 0 derecede Şekil 5.8a'da ana lob 3,88 dB, yan lob -15,0 dB ve açısal genişliği 75,5 derecedir. Phi 90 derecede Şekil 5.8b'de bu değerler sırasıyla 3,88 dB, -15,0 dB ve 94,3 derecedir. Anten yönlülüğünün ve kazancının ışıma eğrilerini daha iyi görmek gerekirse Şekil 5.9a ve Şekil 5.9b üç boyutlu grafiklere bakılabilir. MTM yapıları ile bu iki değer iyileştirilmesi yapılabilmektedir. Tez çalışmamızda tasarımı yapılan 40 MTM yapısından en uygun

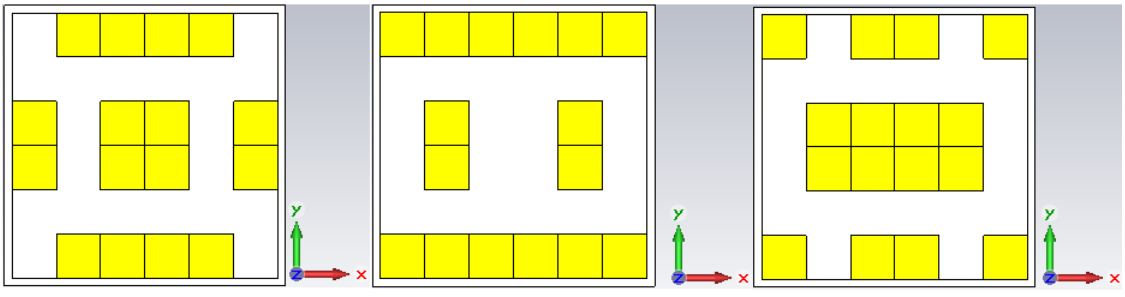
olarak seçilen yapı veya yapılar ile antenin etkileşimi sağlanarak antenin bu parametreleri iyileştirilmeye çalışmıştır. Yeri geldiğinde bunlara değinilecektir.



Şekil 5.9. MYA'nın 3 boyutlu (3D) ışıma eğrisi; Antenin (a) yönlülüğü ve (b) kazancı

5.1.2. MTM yapıların oluşturulması ve analiz sonuçları

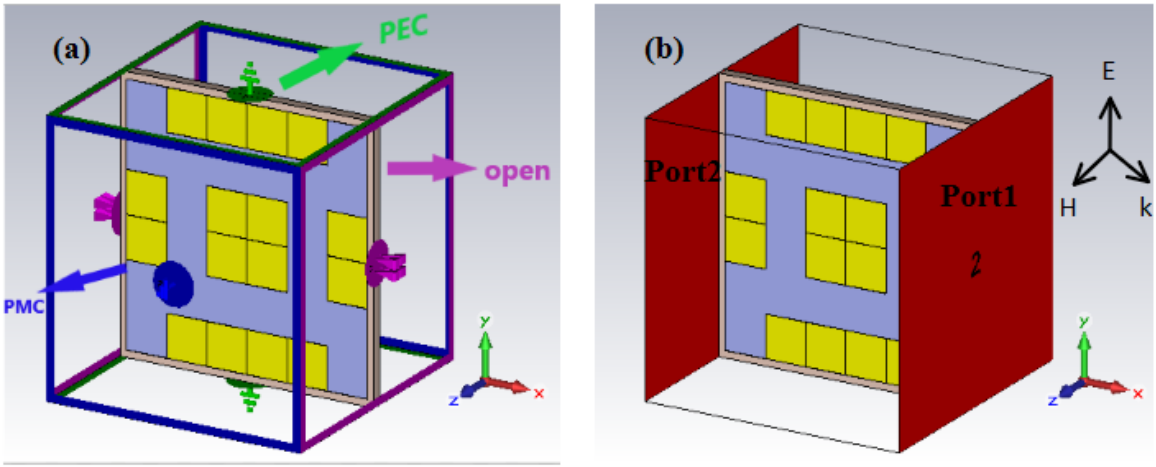
Tasarımları yapılan 40 MTM yapısı CST programında yapılmış olup, bu yapılardan 3 tanesi Şekil 5.10'da gösterildiği gibidir. Dielektrik malzeme olarak yine FR4 malzemesi kullanılmıştır. FR4 malzemenin dielektrik geçirgenliği 4,3, manyetik geçirgenliği 1, dielektrik kayıp tanjant değeri 0,025 ve kalınlığı 1,6 mm olarak belirlenmiştir. FR4 malzeme yüzeyine metal olarak bakır seçilmiş ve kalınlığı 0,035 mm ve dielektrik iletkenliği ise $5{,}8001 \times 10^7$ S/m'dir.



Şekil 5.10. Tasarlanan 40 MTM yapılardan 11.MTM, 13.MTM ve 16. MTM

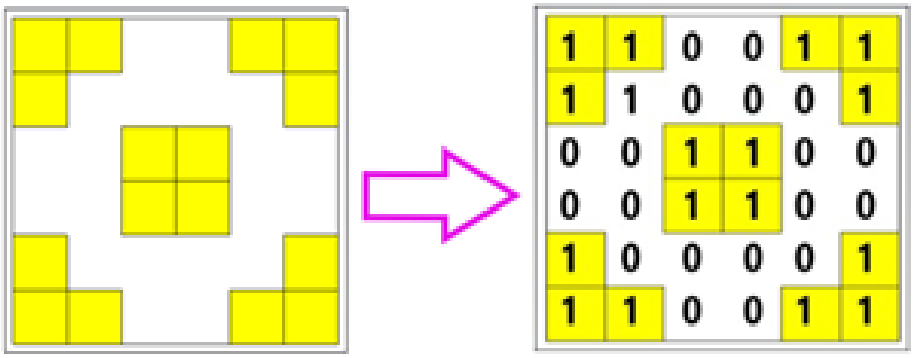
CST programında tasarımı yapılan Şekil 5.11'de gösterildiği gibi yapının sınır şartları seçilirken +x ve -x yönleri açık olarak ayarlandı. EM dalga bu yönlerde ilerleyecek şekilde uygulandı. +y ve -y yönleri mükemmel elektrik iletkenlik (PEC) olarak ayarlandı ve +z ile

-z yönleri de mükemmel manyetik iletkenlik (PMC) yapılarak ortamın TEM modlu olması sağlanmıştır.



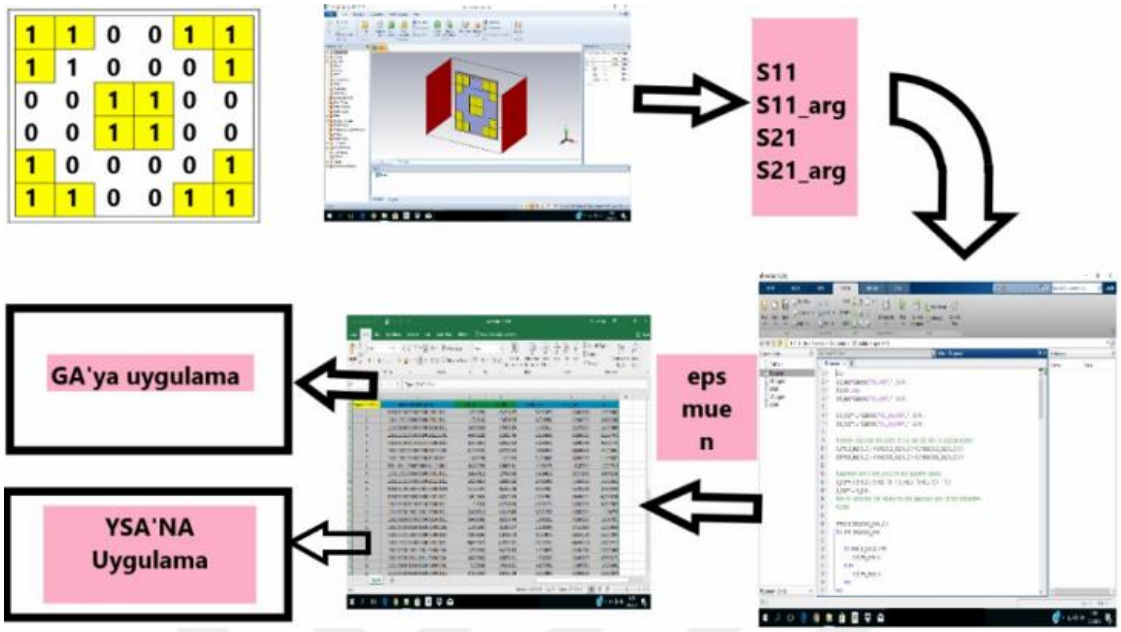
Şekil 5.11. CST tasarımlı bir MTM yapısının (a) sınır şartları ve (b) dalga sinyali grafiği

Tez çalışması için hazırlanmış olan bu 40 yapıda, (YSA tekniği için Şekil 5.12'de gösterildiği gibi) bakır tabaka 1 biti, boşluk kısımlar havayı temsil edecek şekilde 0 biti göstermektedir. Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te 40 MTM yapısının YSA tekniği için gerekli veriler verilmiştir (Bkz. EK-1). Bu verilerin MATLAB programındaki yapay sinir ağında eğitimi yapılarak anten için gerekli yapı bulunmaya çalışılmıştır. Bölüm 5.3'te YSA kısmı anlatılırken elde edilen veriler üzerinde gerekli açıklamalar yapılmıştır.



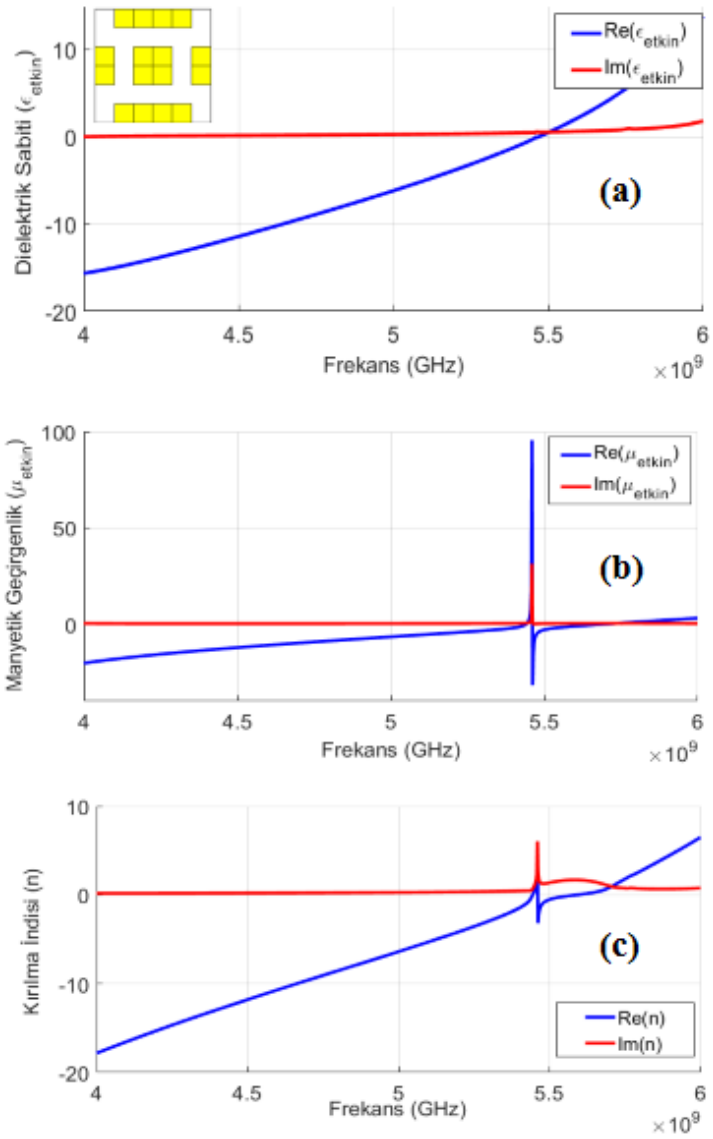
Şekil 5.12. MTM yapısının metal ve boş kısımların bit olarak gösterimi

40 MTM yapının, CST ve MATLAB yazılım programından gerekli olan verileri Ekler bölümünde listelenmiştir (Bkz. EK-1). Bu verilerin elde edilmesi için yapılan aşamalar Şekil 5.13'te gösterilerek elde edilen verilerin YSA uygulaması resmedilmiştir.



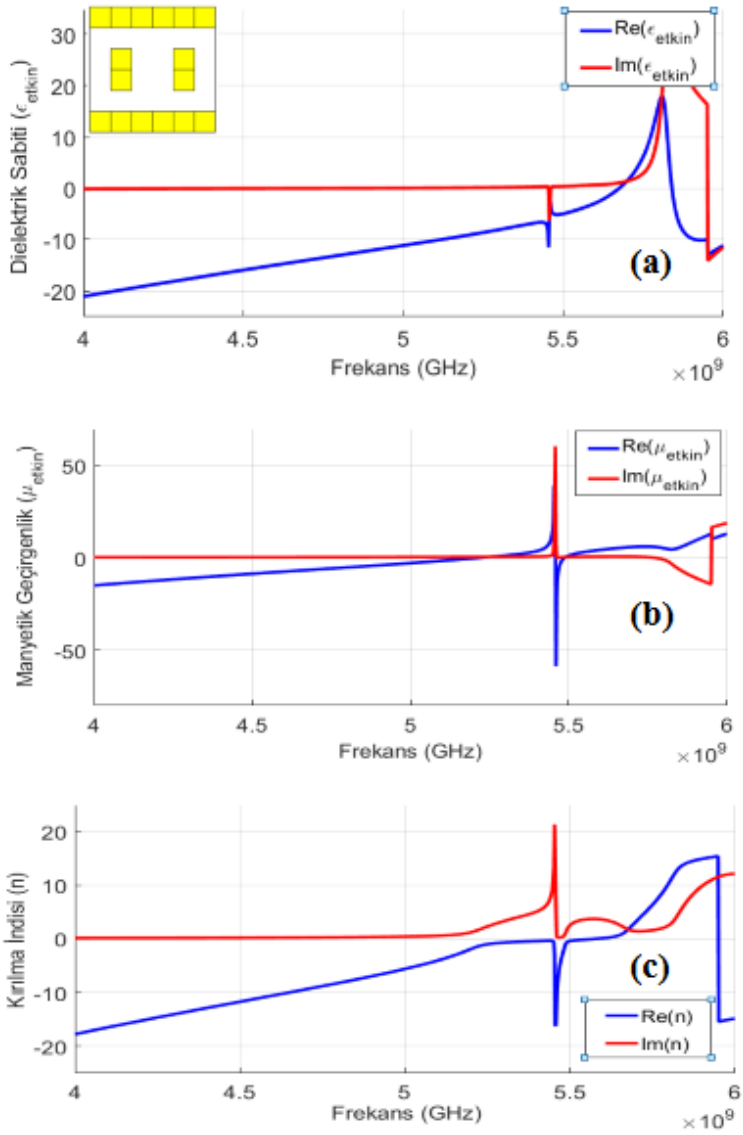
Şekil 5.13. YSA için verilerin elde edilişi için yapıların işlem aşamaları

Şekil 5.13'te de gösterildiği gibi GA ya da YSA tekniğini uygularken öncelikle CST programında tasarımları yapılan MTM yapıların S11 ve S21 parametre değerlerine ulaşıldı. Bunun amacı MATLAB programında yazılımı yapılan kodlamayla yapının metamalzeme (MTM) olup olmadığının tespitini yapmaktır. Bu şekilde MATLAB yazılımından MTM yapıları tespit etmek için S11 ve S21 değerlerini .text uzantısıyla çağrılarak kodlama aktif hale getirilir ve kodlamada kullanılan gerekli yöntemlerle tarama işlemi yapılır. Sonuç olarak yapılar için elektromanyetik bir malzemenin karakteristiğini belirleyen dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik katsayısı ve kırılma indis değerlerine ulaşılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.14a, Şekil 5.14b ve Şekil 5.14c'de verildiği gibi elde edilmiştir.



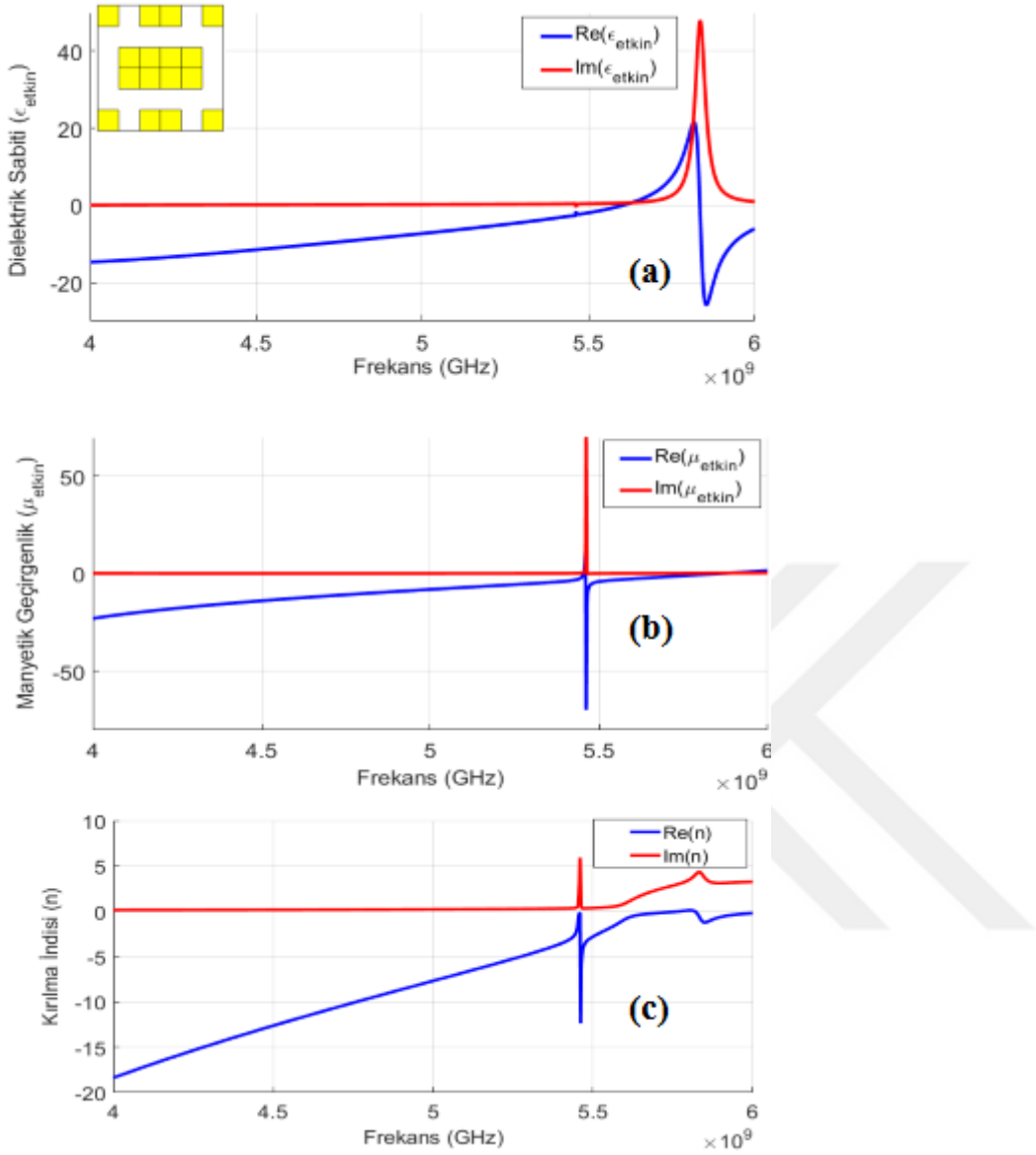
Şekil 5.14. MTM11 yapısının real ve sanal (a) dielektrik geçirgenlik, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi

Şekil 5.14'te görülen MTM11 yapısının ε, μ ve *n* grafiklerine bakıldığında bazı frekans noktaları haricinde 4-5,5 GHz aralığına kadar negatif özellik gösterdiği gözlenmiştir. Bu da MTM11 yapısının bu aralık boyunca DNG malzeme özellikli olduğunu gösterir. Şekil 5.14b'de manyetik geçirgenlik değeri gibi bazı frekans bölgelerinde sivrilmeler görmek mümkündür. Şekil 5.14 için yorum yapmak gerekirse MTM11 yapısı için referans olarak seçilen 5,462 GHz frekansta etkin dielektrik katsayısı εr = -0,094092073, etkin manyetik geçirgenliği μ_r = -31,72258948 ve kırılma indisi n = -3,18640348 değerindedir.



Şekil 5.15. MTM13 yapısının real ve sanal (a) dielektrik geçirgenlik, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi

Şekil 5.15'te de MTM11 yapısı gibi MTM13'ün ε, μ ve ***n*** grafiklerinin bazı frekans noktaları haricinde 4-5,5 GHz aralığına kadar negatif özellik gösterdiği gözlenmiştir. Bu aralıkta periyodik yapı DNG özellik gösterir. Antenle etkileşimde oluşacak rezonans frekansın bu aralığa göre hangi değer gösterdiği grafikten çıkarılabilir. Aynı şekilde Şekil 5.15'te, MTM13 yapısının etkin dielektrik katsayısı ε_r = -3,999791747, etkin manyetik geçirgenliği μ_r = -21,95326985 ve kırılma indisi n = -9,372927828 değerindedir.

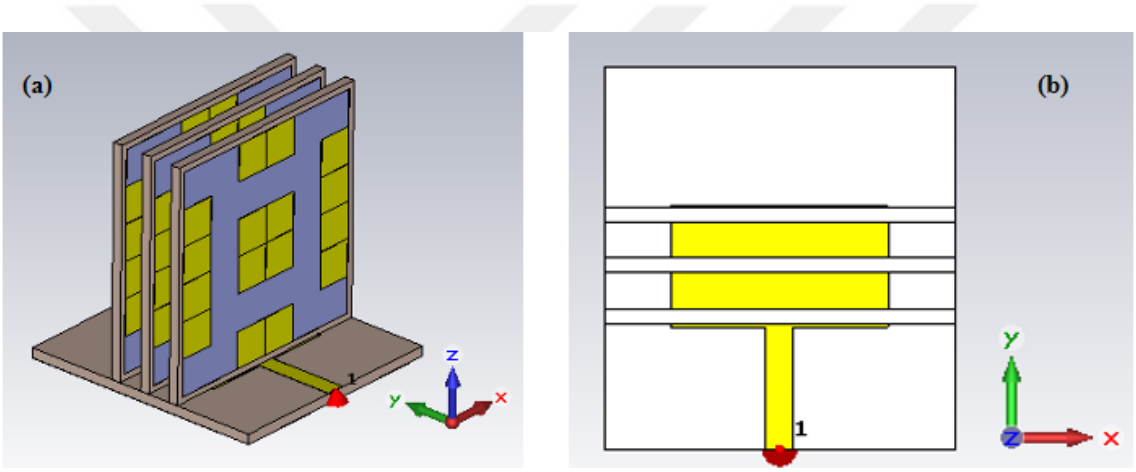


Şekil 5.16. MTM16 yapısının real ve sanal (a) dielektrik geçirgenlik, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi

Şekil 5.16'da MTM16 yapısının ise rezonans frekansında etkin dielektrik katsayısı ε_r = -1,556483089, etkin manyetik geçirgenliği μ_r = -69,71131198 ve kırılma indisi n = -12,36034349 değerlerindedir. MTM yapıların bu grafiklerine bakıldığında geniş bir frekans aralığında negatif özellik gösterdiği görülür. Kimi yerde minimum olurken kimi yerde maksimum değerlerdedir ve bu frekans değerleri arasında negatif özellik göstermeye devam etmiştir.

5.1.3. Mikroşerit yama anten ile MTM yapıların karşılaştırılması ve sonuçları

Bu kısımda anten ile seçilen en uygun üç MTM yapısını karşılaştırarak anten üzerindeki etkileri gösterilmeye çalışılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken S11 parametre değerleri, 2D ışıma eğrisi ve 3D Polar ışıma eğrilerine CST ve HFSS programları kullanılarak ulaşılmıştır. Daha çok CST verileri üzerinden gidilerek veriler listelenmiş ve şekil üzerinde açıklamalar yapılarak yorumlanmıştır. Buna ek olarak anten ve MTM yapıların yüzey akım, elektrik alan ve manyetik alan dağılımları da çıkarılmıştır. Aşağıdaki Şekil 5.17'te gösterildiği gibi, MYA ile MTM yapıları etkileşime konulmuştur. Diğer yapılar da bu şekilde antenle etkileşime konularak anten parametrelerinin iyileştirilmesi denenmiştir.



Şekil 5.17. MYA ile MTM yapısının etkileşimi; (a) genel görünüm, (b) üst görünüm

Yapıların bu şekilde antenle etkileşimi sonucunda örnek olarak en uygun seçilmiş üç MTM yapıları üzerinden gidilerek analizler sonucunda elde edilen veriler verilmiştir. 40 MTM'nin referans olarak alınan 5,462 GHz frekansta dielektrik katsayısının, manyetik geçirgenliğin ve kırılma indisinin eksi olduğu yapılar tespit edilmiştir ve 17 adet MTM yapısının bu istenen özellikte olduğu görülmüştür (Bkz. EK-1). Bu 17 MTM yapısının özellikleri Çizelge 5.2'te gösterildiği gibidir. Çizelge 5.2 MTM yapıların etkileşimi sonucu anten rezonans frekansındaki değişime göre yapıların değişen frekanstaki ε_r, μ_r, kırılma indisi (n) değerleri listelenmiş olup Çizelge 5.3'te ise antenin 3D polar ışıma eğrisinin değerleri listelenmiştir.

Çizelge 5.2. Antenle etkileşimi yapılan 17 MTM yapısının değişen rezonans frekans değerdeki dielektrik geçirgenliği, manyetik geçirgenliği ve kırılma indisi

Yapılar	MYA+MTM Frekans (GHz)	S11Parametre (dB)	permittivity (ε)	permiability (μ)	Kırılma indisi (n)
Anten	5,20	-19,465367	---	---	---
Anten+MTM11	5,15	-17,914135	-4,416	-5,064	-4,729
Anten+MTM12	5,10	-16,534297	-6,117	-8,923	-7,389
Anten+MTM13	5,14	-36,500382	-9,713	-0,985	-3,175
Anten+MTM14	5,12	-18,382593	-7,527	-1,671	-3,554
Anten+MTM15	5,22	-19,385830	-2,088	-4,370	-3,021
Anten+MTM16	5,14	-52,365022	-6,086	-6,682	-6,377
Anten+MTM17	5,18	-24,199072	-5,226	-2,999	-3,971
Anten+MTM19	5,11	-18,592454	-3,628	-3,378	-3,502
Anten+MTM20	5,11	-16,864461	-8,448	-4,257	-5,998
Anten+MTM22	5,15	-31,784777	-8,865	-3,701	-5,732
Anten+MTM25	5,06	-14,208285	-9,654	-4,367	-6,494
Anten+MTM26	4,89	-17,399647	-10,702	11,351	-17,187
Anten+MTM27	5,18	-47,038359	-2,507	-2,233	-2,390
Anten+MTM32	5,00	-28,266566	12,781	0,960	4,683
Anten+MTM34	4,84	-23,681959	-8,724	-11,177	-9,875
Anten+MTM36	4,92	-34,944790	-12,712	-3,859	-7,010
Anten+MTM38	4,88	-31,374016	-10,781	-3,940	-6,521

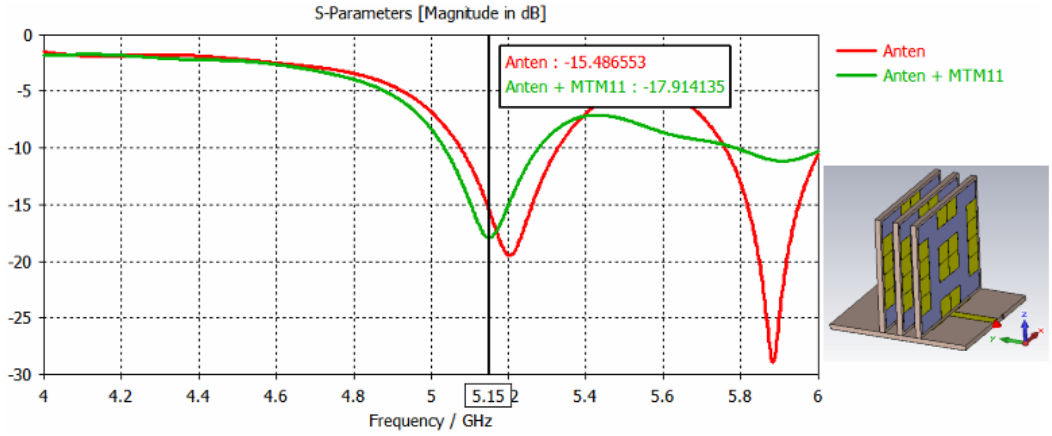
17 MTM yapısının anten ile etkileşiminden Çizelge 5.2'deki tabloda da görüldüğü gibi 5,2 GHz rezonans frekansa sahip olan MYA'nın frekans değerleri değişmiştir. Etkileşim sonucu antenin yeni rezonans frekansına göre MTM yapıların yeni frekans değerindeki dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenliği ve kırılma indisi değerleri çizelgede verildiği gibi çıkmıştır. Her bir MTM yapısının etkisi sonucu antenin S11 parametre değeri kiminde MTM13, MTM16 ve MTM27 gibi olumlu etki yaparak sırasıyla -36,500382 dB, -52,365022 dB ve -47,038359 dB olurken, kiminde ise MTM12 ve MTM20 yapıları gibi olumsuz etki yapmış olup sırasıyla -16,534297 dB ve -16,864461 dB olmuştur. En iyi sonuç için Çizelge 5.3'te verilen ışıma verimi ile toplam verimin, antenin değerine göre daha büyük değerlerde çıkmalıdır. Yönlülük değerinin de antene göre yüksek değerde çıkmalıdır. Değerlerin olumlu çıkmasındaki neden, olumlu sonuç veren yapıların antenin rezonans frekansında dielektrik sabiti, manyetik geçirgenliği ve kırılma indisi değerlerinin etkin bir şekilde antene katkı sağlayabilmesidir. Diğer yapıların bu frekanstaki etkinliği istenileni karşılamamıştır.

Çizelge 5.3. Antenle etkileşimi yapılan 17 MTM yapısının değişen rezonans frekans değerdeki ışıma etkisi (Rad Eff), toplam etki (Tot Eff) ve directivity değerleri

Yapılar	MYA+MTM Frekans (GHz)	Rad Eff (dB)	Tot Eff (dB)	Directivity (dBi)
Anten	5,20	-2,919	-2,973	6,802
Anten+MTM11	5,15	-3,205	-3,280	8,324
Anten+MTM12	5,10	-3,595	-3,697	8,550
Anten+MTM13	5,14	-2,744	-2,745	7,450
Anten+MTM14	5,12	-3,342	-3,409	7,686
Anten+MTM15	5,22	-2,507	-2,561	6,572
Anten+MTM16	5,14	-2,769	-2,770	7,612
Anten+MTM17	5,18	-1,775	-1,794	7,279
Anten+MTM19	5,11	-3,384	-3,448	8,310
Anten+MTM20	5,11	-3,128	-3,223	7,966
Anten+MTM22	5,15	-2,851	-2,853	6,951
Anten+MTM25	5,06	-3,982	-4,156	6,503
Anten+MTM26	4,89	-3,287	-3,362	6,717
Anten+MTM27	5,18	-3,306	-3,306	6,712
Anten+MTM32	5,00	-2,473	-2,481	6,933
Anten+MTM34	4,84	-2,809	-2,826	5,604
Anten+MTM36	4,92	-1,685	-1,686	5,392
Anten+MTM38	4,88	-1,667	-1,671	5,309

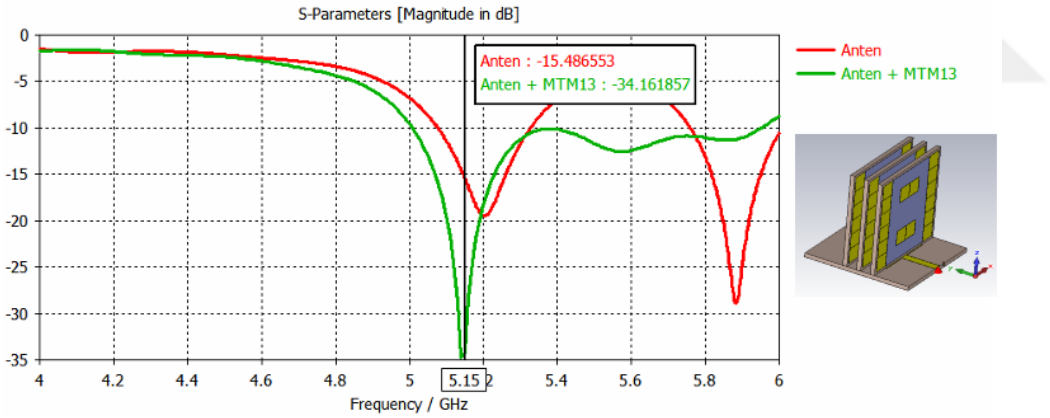
Çizelge 5.3'e bakıldığında MTM13, MTM16 ve MTM17 yapılarının yönlülüğü ile beraber ışıma verimi ile toplam verimliğin arttığı görülmektedir. Bu da bize göstermektedir ki tasarımı yapılan MTM yapıların anten ile etkileşimi sonucunda bu yapıların anten ışımasına olumlu yönde etki sağlayabilmektedir. Bunun gibi birçok yapının da antene etkisi olumlu olsa da diğer özelliklerini istenilen düzeyde iyileştirmeyebilir. Bunun için de anten ile etkileşimi yapılacak MTM yapısının iyi bir şekilde ve uygun geometride tasarımı yapılmalıdır.

Analizler sonucunda 17 MTM yapısından MTM11, MTM13 ve MTM16 en uygunları olarak seçilmiş olup bu yapıların üretimi laboratuvarda yapılmıştır. Analizleri de yapılarak test edilmiştir. MTM11'in yönlülüğü diğerlerine nazaran daha iyi olduğundan örnek olarak MTM13 ve MTM16 ile beraber analiz sonuçları verilmiştir. Bu üç yapının anten ile etkileşimi sonucunda S11 parametreleri ve üç boyutlu ışıma eğrilerinin yönlülüğü ile kazanç değerleri Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de verilerek karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 5.18. Anten ile MTM11 yapısının karşılaştırılması

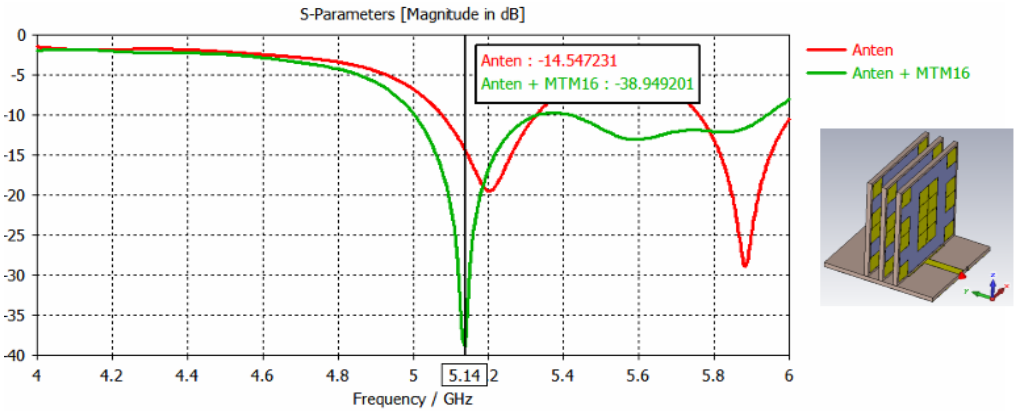
5,2 GHz rezonans frekansına sahip olan MYA'nın bu frekanstaki S11 parametre değeri Şekil 5.18'teki grafikte görüldüğü gibi -19,465351 dB değerindedir. MTM11 yapısı anten ile etkileşime girildiğinde -17,914135 dB değerine ulaşmıştır. 3D polar ışıma eğrisine bakıldığında değerleri Çizelge 5.3'e bakıldığında 8,324 dBi değerine yükseldiği görülür.



Şekil 5.19. Anten ile MTM13 yapısının karşılaştırılması

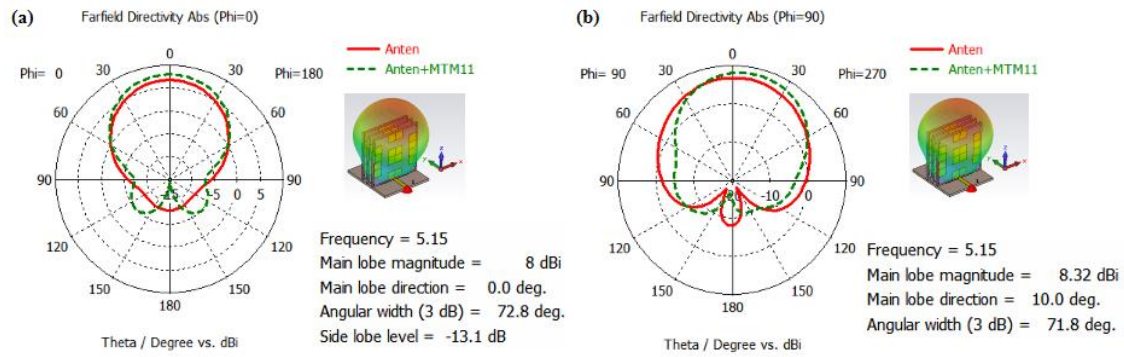
5,2 GHz rezonans frekansa sahip olan mikroşerit anten MTM13 yapısı ile etkileşime girildiğinde Şekil 5.19'da görüldüğü gibi antenin yeni rezonans frekans değeri 5,15 GHz olmuştur. S11 parametre değeri ise -34,161857 dB olmuştur. 3D polar ışıma eğrisine Çizelge 5.3'de bakıldığında 7,450 dBi değerine yükseldiği görülür. Işıma etkinliği ve toplam etkinliğinin değerleri sırasıyla -2,744 dB, -2,745 dB olup ışımanın etkinliği artmıştır. Önerilen MTM yapıları antenin rezonans frekansındaki S11 saçılma parametresine olumlu etkisi sağlamıştır. Bu durumun sonucu olarak antene verilen güç MTM yapıların negatif etkisi sayesinde antenden yansıyan gücün azalmasını sağlamıştır.

Antenin rezonans frekansında MTM11 ile 50 MHz, MTM13 ile 50 MHz ve MTM16 ile 60 MHz kayma meydana gelmiştir. Sırasıyla antenin yeni rezonans frekans değerleri 5,15 GHz, 5,15 GHz ve 5,14 GHz olmuştur. Bu frekans değerlerinde antenin S11 değerleri MTM yapılarının negatiflik özelliklerinden dolayı azaldığı gözlenmiştir.



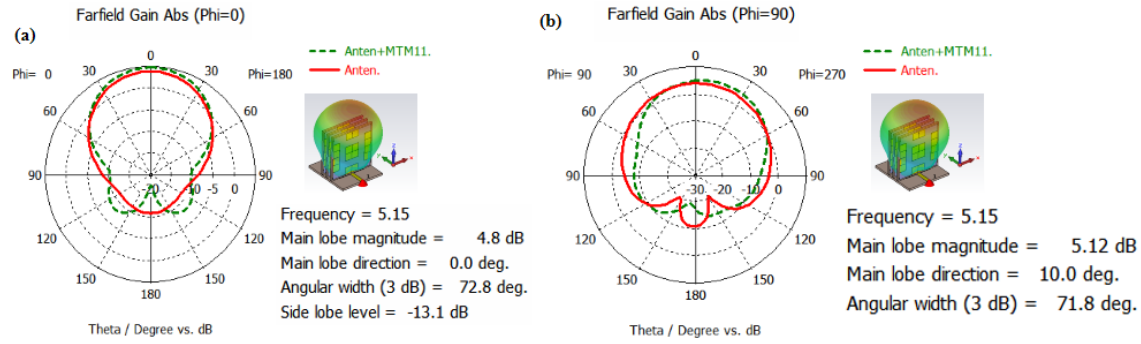
Şekil 5.20. Anten ile MTM16 yapısının karşılaştırılması

Son olarak mikroşerit anten MTM16 ile etkileşime koyulduğunda Şekil 5.20'deki gibi anten rezonans değeri 5,14 GHz olmuştur. S11 parametresi -38,949201 dB olacak şekilde iyi bir değere ulaşmıştır. Işıma yönlülüğüne Çizelge 5,3'e bakıldığında ise 7,612 dBi olarak artmıştır. Işıma etkinliği ve toplam etkinliği sırasıyla -2,769 dB ve -2,770 dB olarak analiz edilmiştir. Bu yapıların etkileşimi sonucu 2 boyutlu ışıma eğrilerinin değerleri Şekil 5.21'de Phi=0 ve Phi=90 derece için antenin yönlülüğü ve kazancının MTM ile etkileşimleri ile karşılaştırılmıştır.



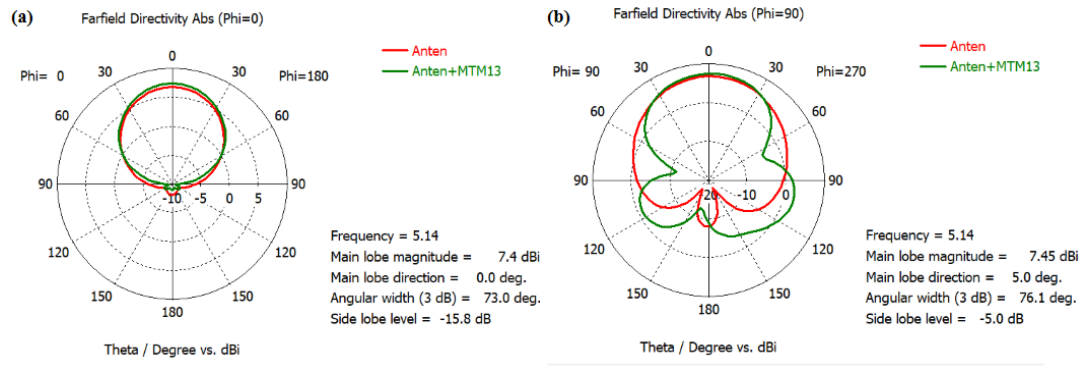
Şekil 5.21. MYA ile MTM11'in yönlülüğü; (a) Phi 0 iken, (b) Phi 90 iken

Antenin MTM11 ile etkileşimi sonucu iki boyutlu olarak yönlülüğü ve kazancı Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'deki gibidir. Bu durumda Şekil 5.21'de antenin yönlülüğü Phi 0 ve Phi 90 derece durumunda bakıldığında arttığı görülür. Açısal genişlik (3 dB), Phi 0 derece durumunda 75,5 dereceden 72,8 dereceye; Phi 90 derece durumunda ise 94,3 dereceden 71,8 derece azalma olmuştur. Bu değerlerin normal bir şekilde azalması beklenir.



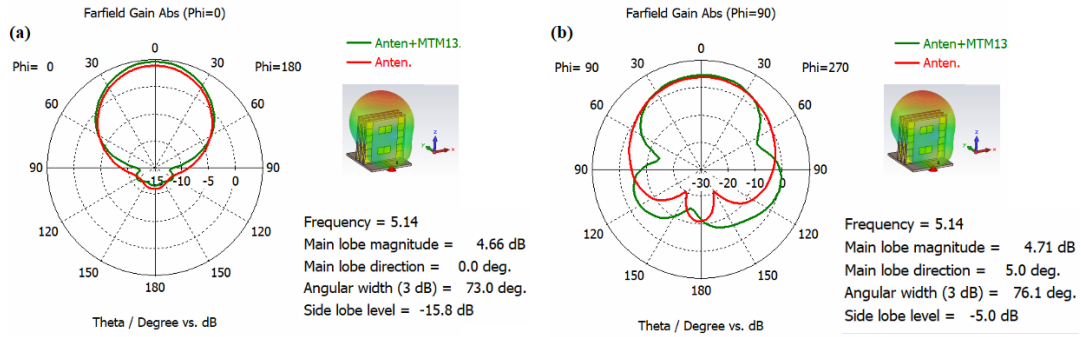
Şekil 5.22.MYA ile MTM11'in kazancı; (a) Phi 0, (b) Phi 90

Anten kazancının MTM11 ile etkileşimi sonucunda meydana gelen değişmeleri Şekil 5.22'de görmek mümkündür. Anten kazancı Phi 0 derecede 3,88 dB değerinden 4,8 dB değerine yükselmiştir. Phi 90 derecede ise Şekil 5.19b'deki gibi 3,88 dB değerinden 5,12 dB değerine yükselmiştir. Açısal genişlik (3 dB) yine Phi 0 derece durumunda 75,5 dereceden 72,8 dereceye; Phi 90 derece durumunda ise 94,3 dereceden 71,8 derece azalma olmuştur. Antenin ışıma demetlerindeki bu iyileşmenin nedeni yine MTM yapıların negatiflik özelliğine dayanır. Çünkü bir antende meydana gelen radyasyon demetleri etrafa saçılmaktadır. Bunun nedeni antenin tasarımındaki malzemelerin pozitif özelliğinden kaynaklanır. Pozitif özellikteki malzemeler antene verilen güce karşılık antendeki ışımaları yeteri kadar koruyamamaktadır ve kayıplar meydana gelmektedir. Ancak MTM yapıların negatif özelliği bu soruna çözüm sunabilmektedir. MTM yapılar sayesinde kayıplar azaltılmış ve antenin kazancına ve yönlülüğüne olumlu etki sağlamıştır.



Şekil 5.23. MYA ile MTM13'ün Phi açısına göre yönlülüğü; (a) Phi 0, (b) Phi 90

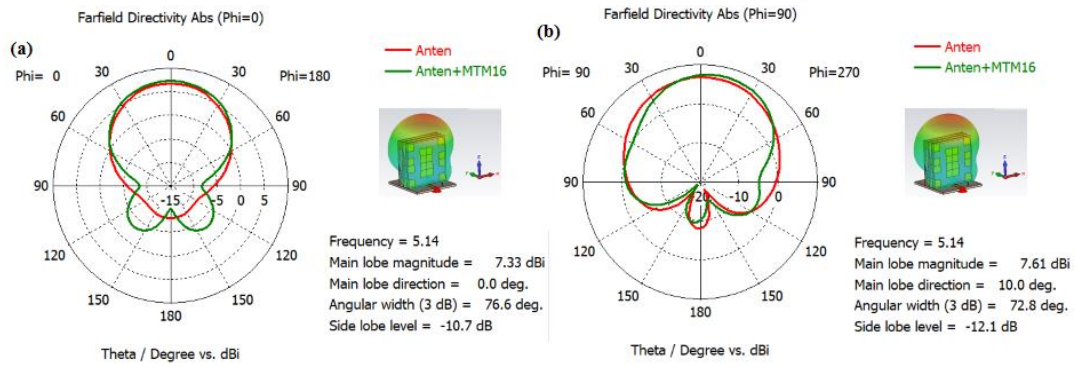
Antenin MTM13 ile etkileşimi sonucu iki boyutlu olarak yönlülüğü ve kazancı Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'deki gibidir. Bu durumda Şekil 5.23'te antenin yönlülüğü Phi 0 ve Phi 90 derece durumlarına bakıldığında arttığı görülür. Açısal genişlik (3dB), Phi 0 derecede Şekil 5.24a'da gösterildiği gibi 75,5 dereceden 73,0 dereceye; Şekil 5.24b'de ise Phi 90 derecede 94,3 dereceden 76,1 dereceye azaldığı görülür. Açısal genişliğin 73,0 dereceye düşmesiyle gücün yarıya düştüğü genişlik azalmıştır. Bu durum Phi 90 durumunda iken daha fazla olmuştur. Farklı derecelerde açısal genişlikteki değerin birbirine yakın değerlere ulaştığı görülmüştür. MTM etkisi ile istenen azalım sağlanmıştır.



Şekil 5.24. MYA ile MTM13'ün kazancı; (a) Phi 0, (b) Phi 90

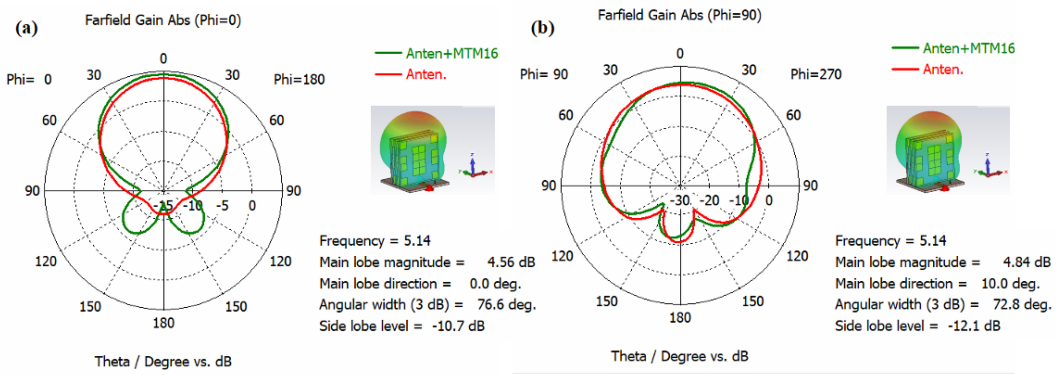
Anten kazancının MTM13 ile etkileşimi sonuçlarını, Şekil 5.24'de görmek mümkündür. Anten kazancı Şekil 5.24a'daki Phi 0 derecede 3,88 dB değerinden 4,66 dB değerine yükselmiştir. Phi 90 derecede ise Şekil 5.24b'deki gibi 3,88 dB değerinden 4,71 dB değerine yükselmiştir. Açısal genişlik (3 dB) yine Phi 0 derecede Şekil 5.24a'da gösterildiği gibi 75,5 dereceden 73,0 dereceye; Şekil 5.24b'de ise Phi 90 derecede 94,3 dereceden 76,1 dereceye azaldığı görülür. MTM yapısının antenin kazancına ve açısal

genişliğine olan etkisi göstermiştir ki negatif geçirgenlik sağlayan malzemeler antenin parametreleri üzerinde etkinlik sağlayabilmektedir. MTM13 yapısı anten kazancını Phi 0 derecede 4,66 dB değerine yükseltmiştir ve yaklaşık %20,10 kadarlık bir artış sağlamıştır. Phi 90 derecede ise yaklaşık %21, 39 kadarlık artış sağlanmıştır.



Şekil 5.25. MYA ile MTM16'nın yönlülüğü; (a) Phi 0, (b) Phi 90

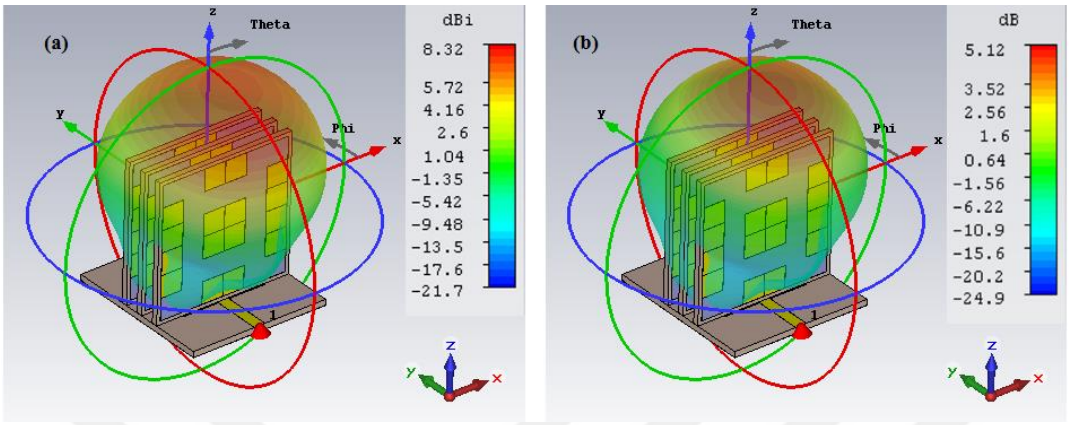
Son olarak MYA'nın MTM16 ile etkileşimi sonucu iki boyutlu olarak yönlülüğü ve kazancı Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'daki gibidir. Bu durumda antenin yönlülüğü Phi 0 ve Phi 90 derece durumuna bakıldığında arttığı görülür. Açısal genişlik (3 dB), Şekil 5.25a'daki gibi Phi 0 derecede 75,5 dereceden 76,6 dereceye artmıştır; Şekil 5.25b'de ise Phi 90 derecede bu değer 94,3 dereceden 72,8 dereceye azaldığı görülür.



Şekil 5.26. Antenin MTM16ile Phi açısına göre kazancı; (a) Phi 0, (b) Phi 90

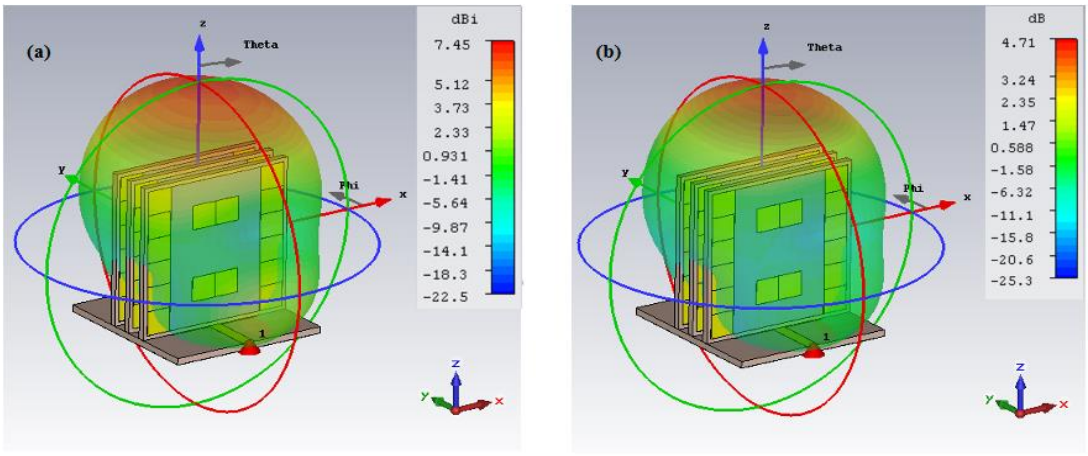
Anten kazancının MTM16 ile etkileşiminde yukarıdaki değerleri Şekil 5.26'da görmek mümkündür. Anten kazancı Şekil 5.26a'da gösterildiği üzere Phi 0 derecede 3,88 dB değerinden 4,56 dB değerine yükselmiştir. Phi 90 derecede ise Şekil 5.26b'deki gibi 3,88

dB değerinden 4,84 dB değerine yükselmiştir. 3 dB aralığındaki açı değeri yukarıda Şekil 5.25'te anten yönlülüğü için söylendiği gibidir.

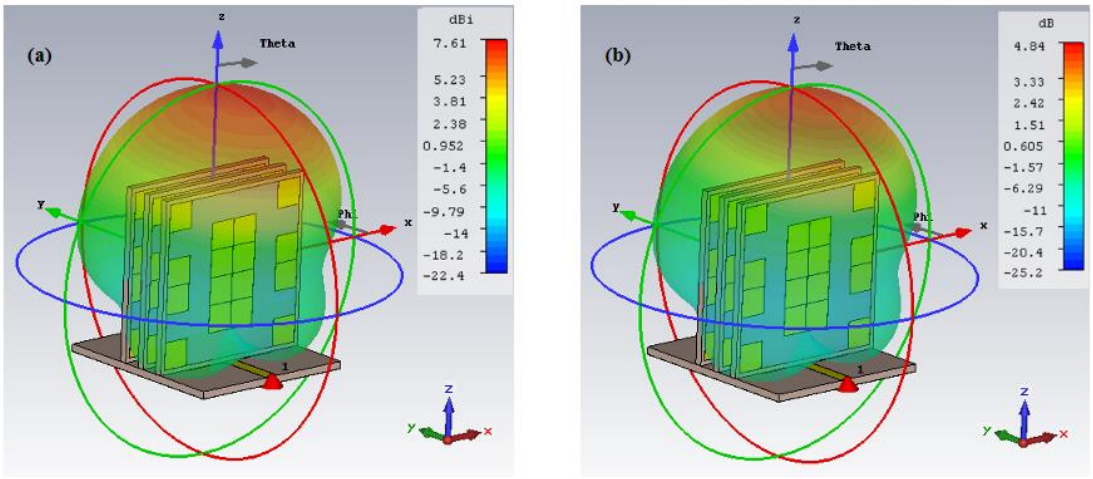


Şekil 5.27. Antenin MTM11ile üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Yukarıdaki 3D polar ışıma eğrisine bakıldığında 2D ışıma eğrisine göre ışımaların durumunu daha iyi görmek mümkündür. Şekil 5.27a'da anten ile MTM11 yapısının etkileşimi sonucunda yönlülüğü grafikte görüldüğü gibi 6,8 dBi değerinden 8,32 dBi değerine yükseldiği görülmektedir. Şekil 5.27b'de ise anten kazancının 3,88 dB değerinden 5,12 dB değerine yükselmiştir. Işıma etkinliği ile toplam ışıma etkinliği ise sırasıyla -2,919 dB'den -3,205 dB'ye, -2,973 dB'den -3,280 dB'ye düşmüştür. Bu istenmeyen bir durumdur. İstenen durum değerin sıfıra yaklaşmasıdır. Ama yönlülüğü ve kazancı iyi durumdadır. Diğer seçilmiş MTM'ler için gerçekleşen değişim aşağıda verilen Şekil 5.28 ile Şekil 5.29'daki gibidir.

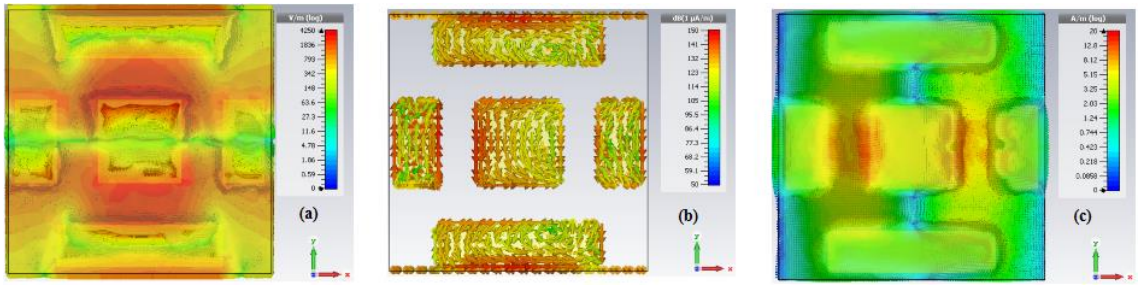


Şekil 5.28. MYA ile MTM11'in üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç



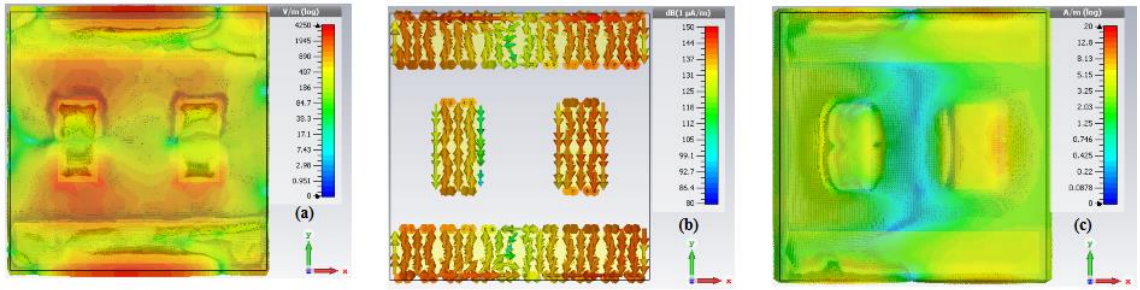
Şekil 5.29. Anten ile MTM11'in üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Mikroşerit antenin MTM yapılarıyla etkileşiminden de görüldüğü gibi 5,2 GHz durumunda antenin yönlülük değeri 6,802 dBi, kazancı 3,882 dB iken Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da görüldüğü gibi sırasıyla yönlülük değerleri; MTM13 ile 7,450 ve MTM16 ile 7,612 dBi değerinde olup anten kazancı ise sırasıyla MTM13 ile 4,706 dB ve MTM16 4,843 dB değerine yükselmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere MTM yapıları, antenin rezonans frekansını bir miktar etkilese de anten yönlülüğü ve kazancını iyileştirebilmekte olduğu simülasyon analizleriyle test edilerek görülmüştür. Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te bu sonuçlar daha iyi incelenebilir. CST simülasyon programında elde edilen sonuçlar bu şekildedir. Aşağıda ise bu üç yapının elektrik alan dağılımı, yüzey akım dağılımları ve manyetik alan dağılımları gösterilmiştir. Şekil 5.30'te MTM11 yapısının elektrik alan dağılımı, yüzey akım dağılımı ve manyetik alan dağılımı verilmiştir. Aynı şekilde MTM13 ve MTM16 yapılarının da bu dağılımları Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de verildiği gibidir.



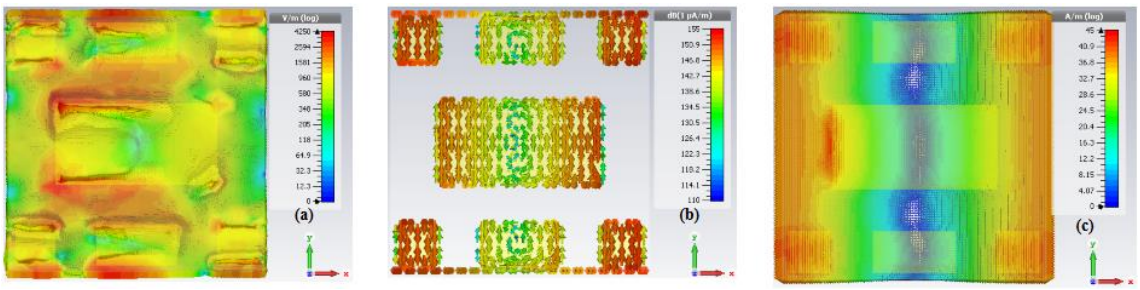
Şekil 5.30. MTM11 yapısının (a) elektrik alan dağılımı, (b) yüzey akım dağılımı ve (c) manyetik alan dağılımı

MTM11 yapısının 5,436 GHz rezonans frekansında elektrik alan dağılımını Şekil 5.30a'daki gibi xy düzlemde olacak şekilde ayarlanmıştır. Elektrik alan dağılımının bu şekilde görünmesi için birim metre başına gerilim değeri logaritma cinsinden 0-4250 V/m olarak ayarlanmıştır. 5,436 GHz frekans değerinde yapının yüzey akım dağılımı Şekil 5.30b'de olduğu gibi bir davranış sergilemektedir. Yüzey akım dağılımı birim metredeki mikro amper değerleri 77,7-147,1 dB olarak ayarlanarak bu aralıkta gözlenmiştir. Şekil 5.30c'de ise yine xy düzleminde manyetik alan dağılımı sonucu oluşan görüntü verilmiştir. Logaritma cinsinden birim metredeki amper değeri 0-20 A/m olarak ayarlanarak manyetik alan dağılımı tespit edilmiştir.



Şekil 5.31. MTM13 yapısının (a) elektrik alan dağılımı, (b) yüzey akım dağılımı ve (c) manyetik alan dağılımı

Elektrik alan dağılımı, yüzey akım dağılımı ve manyetik alan dağılımı Şekil 5.31'de görüldüğü gibidir. Bu dağılımlar rezonans MTM13 yapısının rezonans frekansının 5,47 GHz olduğu durumdadır. Elektrik alan dağılım 0-4250 V/m olacak şekilde ayarlanarak oluşturulmuştur. Sırasıyla yüzey akın dağılımı 110-155 dB µA/m, manyetik alan dağılımı ise 0-45 A/m aralıklarındaki dağılımların nasıl olduğu gösterilmiştir.



Şekil 5.32. MTM16 yapısının (a) elektrik alan dağılımı, (b) yüzey akım dağılımı ve (c) manyetik alan dağılımı

Aynı şekilde MTM16 yapısı da rezonans frekansın 5,436 GHz olduğu durumdaki elektrik alan dağılımı, yüzey akım dağılımı ve manyetik alan dağılımı sırasıyla Şekil 5.32a, Şekil 5.32b ve Şekil 5.32c'de gösterildiği gibidir. Elektrik alan dağılım 0-4250 V/m aralığında olacak şekilde ayarlanmıştır. Sırasıyla yüzey akın dağılımı 110-155 dB μA/m, manyetik alan dağılımı ise 0-45 A/m aralığında ayarlanarak dağılımları gözlenmiştir.

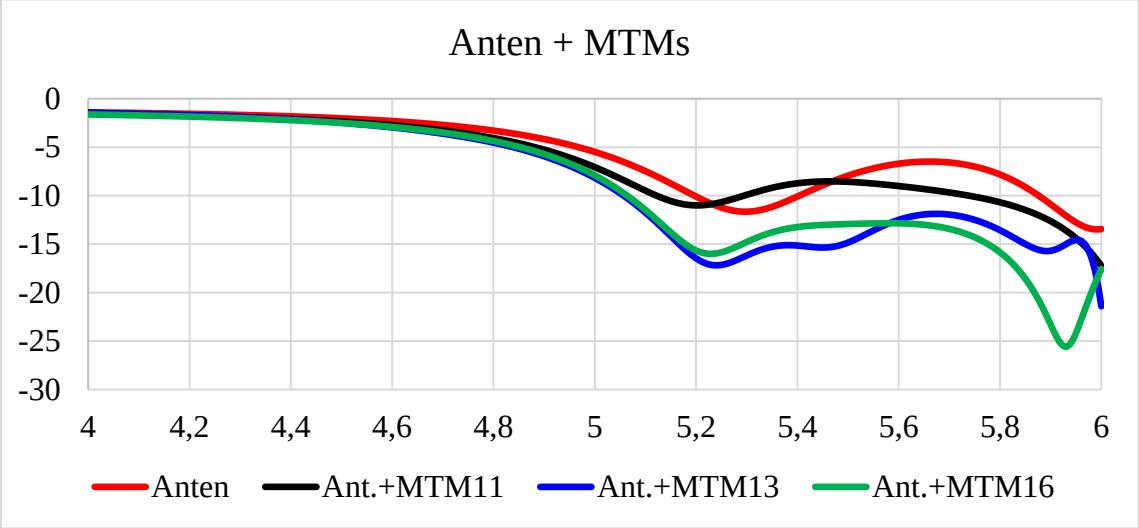
HFSS simülasyon sonuçlarına bakılacak olursa, Şekil 5.33'de dB S11 parametre değerleri grafikte gösterildiği gibidir. Antenin 5,3 GHz rezonans frekansında S11 değeri -11,6562 dB değerindedir. Grafikte de görüldüğü gibi antenin rezonans frekansı 5,3 GHz değeri CST'deki gibi 5,2 GHz değildir. Bu da programlar arasındaki yazılımda kullanılan bölüm 4'te değinildiği gibi çözümleme yöntemlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Ama MTM yapıların etkisi ile CST de olduğu gibi HFSS ile de antenin S11 parametre değerleri iyileştirmiştir. 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışıma eğrilerine aşağıdaki şekillere bakıldığında istenen şartların HFSS ile de sağlandığı görülebilmektedir. CST ve HFSS sonuçları kıyaslandığında benzer ışımalar yapıldığı gözlenmektedir.

Çizelge 5.4. CST ve HFSS analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Anten	**CST analiz sonuçları**				**HFSS analiz sonuçları**			
	MYA	**MYA + MTM11**	**MYA + MTM13**	**MYA + MTM16**	**MYA**	**MYA + MTM11**	**MYA + MTM13**	**MYA + MTM16**
Frekansı (GHz)	5,20	5,15	5,15	5,14	5,30	5,20	5,24	5,23
S11 (dB)	-19,46	-17,91	-34,16	-38,94	-11,65	-11,00	-17,18	-16,00
Kazancı (dB), Phi0/90	3,88 / 3,88	4,8 / 5,12	5,14 / 4,71	4,56 / 4,84	4,7241/ 4,6193	5,6278/ 5,2347	5,0294/ 4,9322	5,6133/ 5,0260
Yönlülüğü (dBi), Phi0/90	6,79 / 6,80	8,00 / 8,32	7,4 / 7,45	7,33 / 7,61	7,1894/ 7,0946	8,6313/ 8,2382	7,5319/ 7,4347	8,0155/ 7,4283

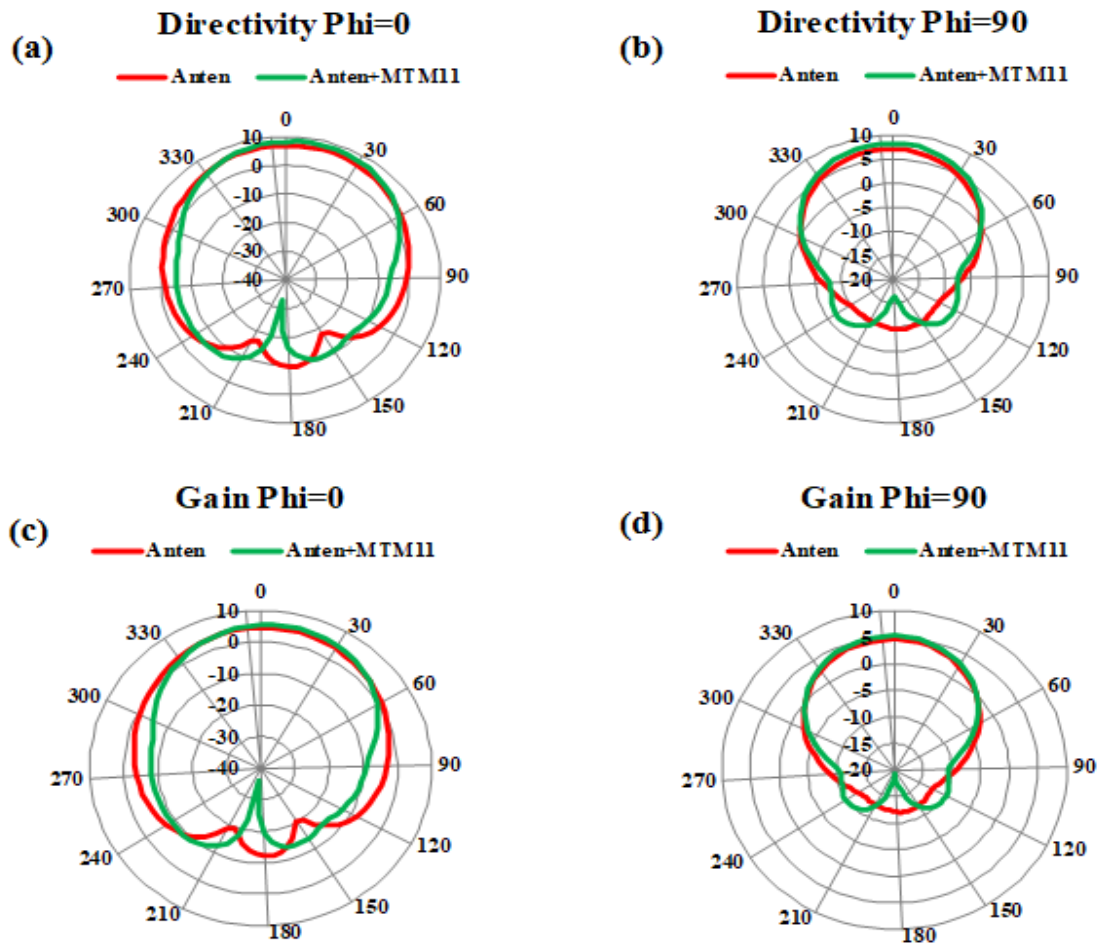
CST ve HFSS benzetim programında tasarımı yapılan mikroşerit anten ve MTM yapıların simülasyonlarından analiz sonuçlarını daha iyi karşılaştırabilmek için Çizelge 5.4. oluşturulmuştur. Çizelgede verilen değerlere bakılarak CST ve HFSS programları arasındaki farklar görülebilmektedir. Bunun nedeni iki programın oluşturulması sırasında

kaynak olarak alınan bölüm 4.5 ve bölüm 4.6'da değinilen çözüm yöntemlerinin farklı olmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz.



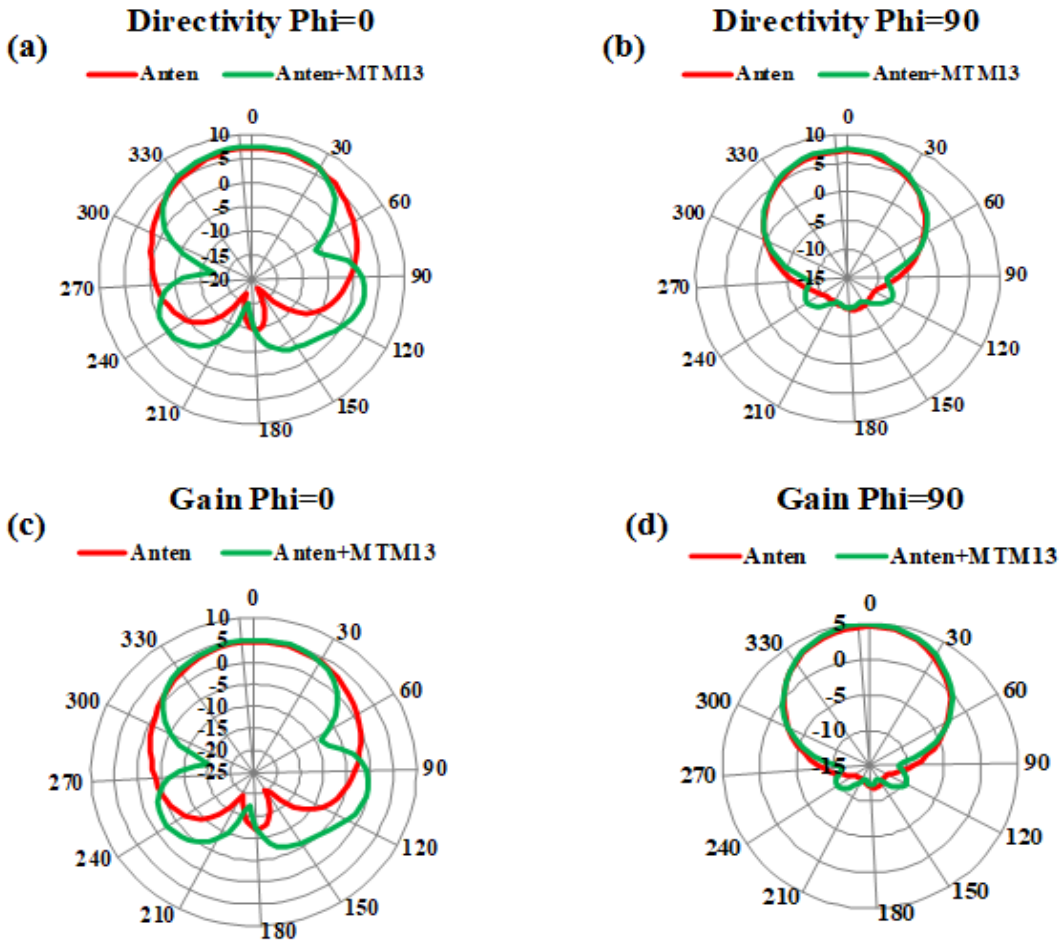
Şekil 5.33. Anten ve MTM yapıların HFSS simülasyonunda sonuçlarının karşılaştırılması

Grafikte de görüldüğü gibi yukarıda verilen CST grafik değerleriyle yaklaşık aynı sonuçlar çıkmıştır. Antenin MTM11 ile etkileşimi, HFSS programında Şekil 5.33'te gösterildiği gibi rezonans frekansını 5,2 GHz olmuştur. 5,2 GHZ frekanstaki S11 parametre değerinin -11,0049 dB değerindedir. Antenin MTM13 ile yeni frekansı 5,24 GHz olup S11 parametre değeri ise -17,1886 dB'dir. Aynı şekilde MTM16 yapısı ile antenin rezonans frekansı 5,23 GHz, S11 parametresi ise -16,0016 dB değerindedir. 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışıma eğrileri ise aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibidir.



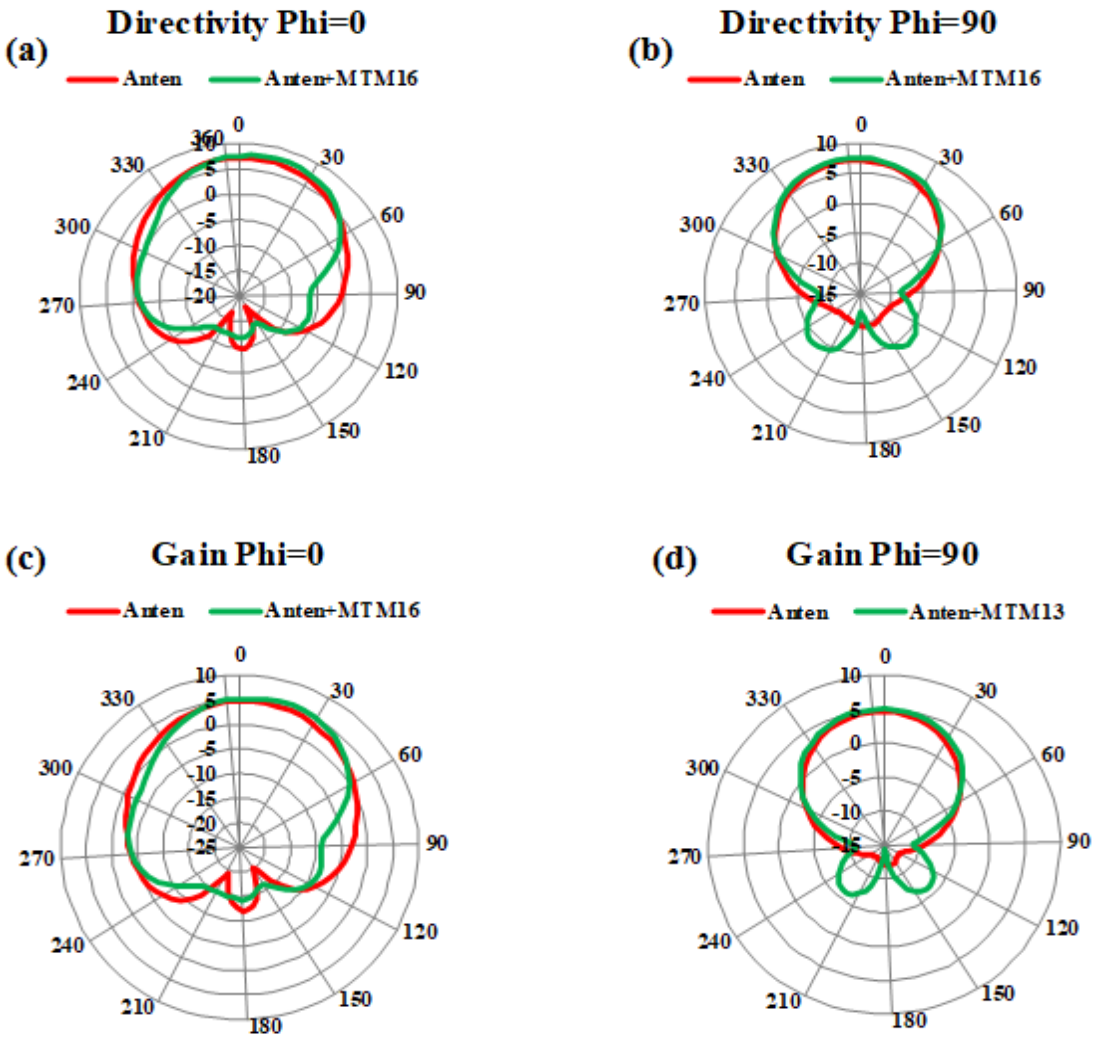
Şekil 5.34. MTM11 yapısıyla antenin Phi=0 ve Phi 90 derecede ışıma eğrileri; (a) ve (b) antenin yönlülüğü, (c) ve (d) anten kazancı

HFSS ile analizleri yapılan MYA ve MTM'lerin bir araya getirilmesi sonucunda anten ışıma eğrisinde yönlülük ve kazanç değerlerinin iki boyutlu görünümleri Phi açısının 0 ve 90 derece durumu, Şekil 5.34'te gösterildiği gibi bulunmuştur. Antenin yönlülüğü 5,3 GHz rezonans frekansında ve Phi 0 derecede değeri 7,1894 dB iken MTM11 ile rezonans frekansı 5,2 GHz olarak en iyi yönlülük değeri 8,6313 dB olmuştur. Phi 90 derecede anten yönlülük değeri 7,0846 dB iken MTM11 ile bu değer 8,2382 dB olmuştur. Anten kazancının Phi açısına göre değerleri ise sırasıyla, 0 derecede 4,7241 dB değerinden 5,6278 dB değerine; 90 derecede 4,6193 dB değerinden 5,2347 dB değerine yükselmiştir.



Şekil 5.35. MTM13 yapısıyla antenin Phi=0 ve Phi 90 derecede ışıma eğrileri; (a) ve (b) antenin yönlülüğü, (c) ve (d) anten kazancı

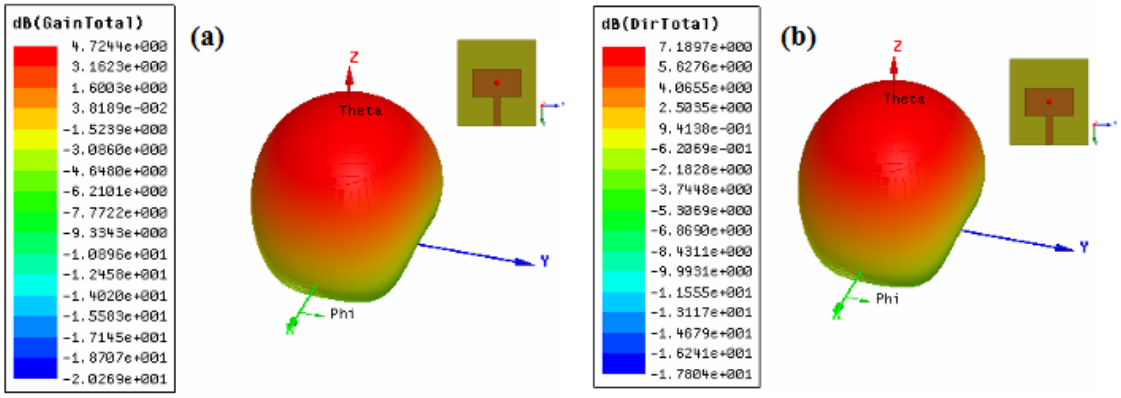
MYA ve MTM13 bir araya getirilmesi sonucunda anten ışıma eğrisinde yönlülük ve kazanç değerlerinin iki boyutlu görünümleri ise Phi açısının 0 ve 90 derece için Şekil 5.35'deki gibi çıkmıştır. Antenin yönlülüğü 5,3 GHz ve Phi 0 derecede 7,1894 dB değerinde iken MTM13 ile frekansı 5,24 GHz değerinde olup en iyi yönlülük değeri 7,5319 dB'ye çıkmıştır. Phi 90 derecede anten 7,0846 dB iken MTM13 ile bu değer 7,4347 dB olmuştur. Anten kazancının Phi açısına göre değerleri ise sırasıyla, 0 derecede 4,7241 dB değerinden 5,0294 dB değerine; 90 derecede 4,6193 dB değerinden 4,9322 dB değerine yükselmiştir. Anten kazancı ile yönlülük arasında bazı anten kayıplarının ihmal edilişi kadar fark vardır. Bunlar dielektrik kayıpları, direnç kayıpları, VSWR (gerilim durağan dalga oranı) gibi kayıplardır. Bölüm 3.4.5 ve bölüm 3.4.6'da değinildiği gibi antenin verimliliği ile yönlülük değerlerinin çarpımı antenin kazancını vermektedir. Bu nedenden dolayı Şekil 5.35'te karşılaştırması yapılan anten kazancı ve yönlülüğünün ışıma eğrileri birbirine benzese de matematiksel değerleri farklıdır.



Şekil 5.36. MTM16 yapısıyla antenin Phi=0 ve Phi 90 derecede ışıma eğrileri; (a) ve (b) antenin yönlülüğü, (c) ve (d) anten kazancı

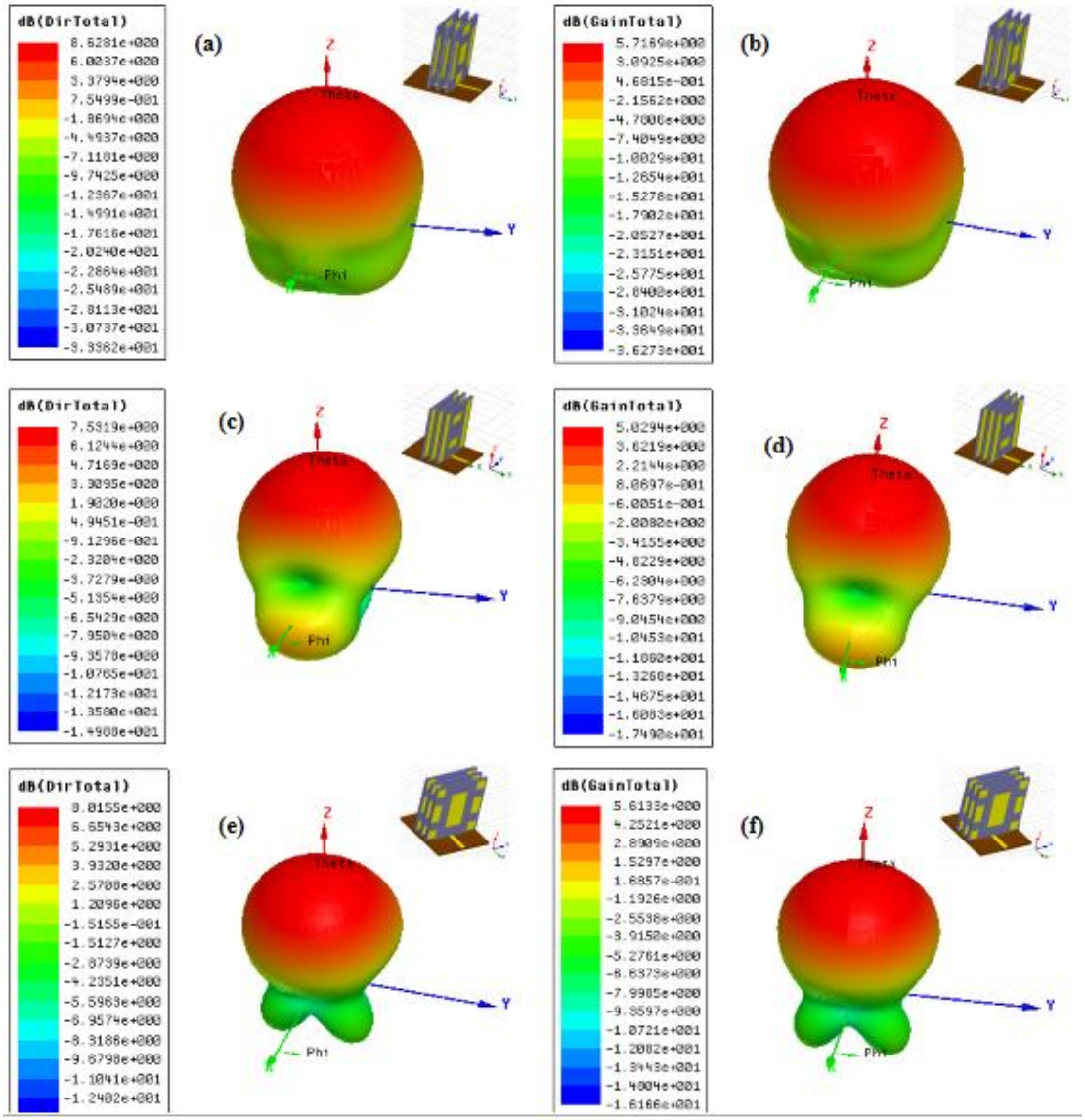
Son olarak MTM16 yapısının anten ile etkileşiminde meydana gelen analiz sonuçlarına değinilmiştir. Phi açısının 0 ve 90 derece olduğu durumda mikroşerit antenin ışıma eğrisinde yönlülük ve kazanç değerlerinin MTM16 ile değişimi Şekil 5.36'daki gibi bulunmuştur. Antenin yönlülüğü 5,3 GHz rezonans frekansta ve Phi 0 derecede 7,1894 dB iken MTM16 ile yeni rezonans frekansı 5,23 GHz olup, en iyi yönlülük değeri 8,0155 dB değerine yükselmiştir. Phi 90 derecede anten yönlülüğü 7,0846 dB iken MTM16 ile bu değer 7,4283 dB olmuştur. Anten kazancının Phi açısına göre değerleri ise sırasıyla, 0 derecede 4,7241 dB değerinden 5,6133 dB değerine; 90 derecede 4,6193 dB değerinden 5,0260dB değerine yükselmiştir.

HFSS benzetim programında tasarımı yapılan antenin ışıma eğrilerinin MTM11, MTM13 ve MTM16 gibi negatif geçirgenlik gösteren yapılar sayesinde anten kayıplarındaki azalmalar sağlanarak anten kazancında artış sağladığı gözlenmiştir. Aynı zamanda antenin yönlülüğünü de daha iyi durumlara getirerek anten ışıma eğrilerindeki yönelimlerde iyileşmeler olmuştur. İyi bir antenden beklenen de iletilen veya alınan verilerde gözlenecek kayıpları en aza indirmek, yüksek verim sağlamak, uzun mesafelerde daha iyi iletim için daha fazla ışıma genişliği sağlamaktır. MTM yapılarının anten için bu imkânı sağlayabildiği gözlenmiştir.



Şekil 5.37.HFSS'deantenin 3D ışıma eğrisi; antenin kazancı(a) ve (b) yönlülüğü

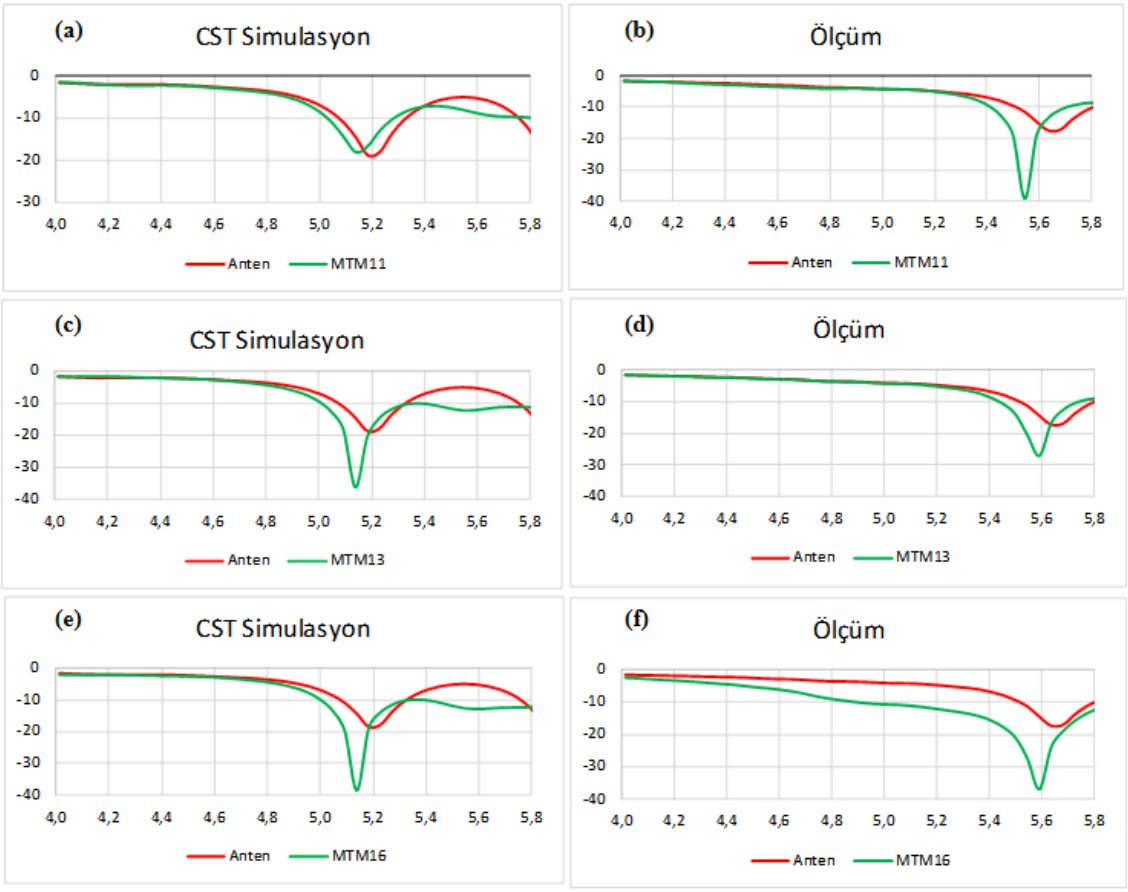
Anten kazancı 3D polar ışıma eğrisi için Şekil 5.37a'ya bakıldığında 4,7244 dB olarak bulunmuştur. Anten yönlülüğünün üç boyutlu polar ışıma eğrisi ise Şekil 5.37b'deki gibi olup yönlülük değeri 7,1897 dB olduğu görülür. Bir antene verilen güç ışıma etkisi sonucu anten belli yönlerde güç yoğunluğuna göre ışıma yapar. Yönlülüğün en fazla olduğu yerde en iyi yayılım yapılır. Çeşitli tasarım yöntemleri ile anten yönlülüğü ve kazancı artırılabilir ve bu amaçla yapılan MTM yapıları ile anten yönlülüğü ve kazancındaki iyileşmeler aşağıda verilen Şekil 5.38'de gösterilmiştir.



Şekil 5.38. HFSS'de antenin MTM yapılar ile etkileşimi sonucu 3D polar ışıma eğrileri; (a) ve (b) MTM11 ile, (c) ve (d) MTM13 ile ve (e) ve (f) MTM16 ile antenin yönlülüğü ve kazancı

Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'in karşılaştırması yapıldığında MTM yapıları anten kazancı ve yönlülüğünde hedeflenen iyileştirmeyi sağlamıştır ve CST sonuçları ile bazı farklılıkların dışında aynı sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Şekil 5.38'de de MTM yapıları ile etkileşim sonucu antenin yönlülüğündeki artış sırasıyla MTM11 ile 8,6281 dB, MTM13 ile 7,5919 dB ve MTM16 ile 8,0155 dB değerlerine çıkmıştır. Anten kazancı ise Şekil 5.38b, Şekil 5.38d ve Şekil 5.38f'de görüldüğü gibi sırasıyla MTM11 ile 5,7169 dB, MTM13 ile 5,0294 dB ve MTM16 ile 5,6133 dB değerlerine yükselmiştir.

Simülasyon ve laboratuvarda üretimi yapılan anten ve MTM yapıların ölçüm sonuçları Şekil 5.39'da S11 parametreleri ve Şekil 5.40'da ise iki boyutlu (2D) ışıma eğrileri karşılaştırılmasıyla verilmiştir. Şekil 5.39'da görüldüğü gibi üretimi yapılan antenin ölçümünde rezonans frekansı 5,65 GHz olarak gözlenmiştir. MTM yapıların analizleri de 5,65 GHz frekans değeri baz alınarak anten kazancı ve yönlülüğü en uygun üç yapıyla test edilerek daha iyi hale getirilmeye çalışılmıştır. CST benzetim programında antenin rezonans frekansı 5,2 GHz değerinde iken üretimi yapılan antenin rezonans frekansında meydana gelen kaymanın nedeni laboratuvar şartları ve cihazların hassasiyetlerinden kaynaklıdır.

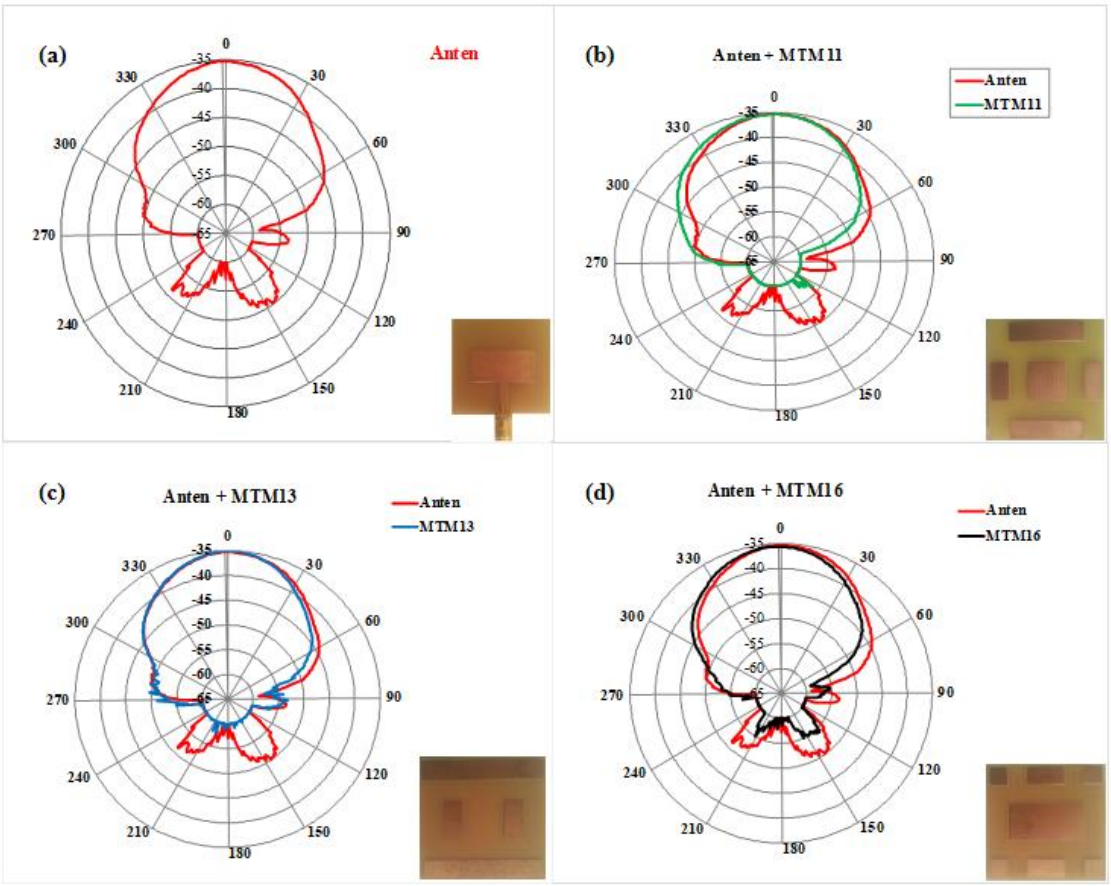


Şekil 5.39. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) ve (e) CST simülasyon sonuçları, (b), (d) ve (f) ölçüm sonuçları

Aşağıda verilen iki boyutlu ışıma eğrisi laboratuvar ortamında MATS-1000 cihazı ile ölçülerek bulunmuş olup Microsoft Excel programına veriler aktarılarak grafikler oluşturulmuştur. Şekil 5.40a grafiğinde antenin 5,65 GHz frekanstaki ışıma eğrisi iki boyutta çıkartılmıştır. Şekil 5.40b, Şekil 5.40c ve Şekil 5.40d grafiklerinde ise üretimi

yapılan MTM11, MTM13 ve MTM16 yapıların anten ile etkileşimi sonucunda sırasıyla 5,542 GHz, 5,59 GHz ve 5,58GHz frekanslardaki iki boyutlu ışıma eğrilerinin ölçümü gözlenmektedir.

Şekil 5.40b'de gösterildiği üzere MTM11, anten ile etkileşiminde yan loblardaki ışımalar metamalzemenin 5,542 GHz frekansındaki negatif özelliğinden dolayı azalmıştır. Ana loblarda ise antenin yönlülüğünde düzelme olmuştur. Kayıpların azalmasıyla anten verimliliği artmıştır. Bu da anten kazancını olumlu etkilemiştir. Aynı şekilde Şekil 5.40c'deki MTM13 yapısını ile Şekil 5.40d'deki MTM16 yapısının anten üzerindeki olumlu etki sağladığı görülmektedir. Bu yapılarla da antenin yan loblarındaki azalma, kayıpları azaltarak anten verimliliğini artırmıştır. Sonuç olarak antenin yan loblarındaki azalmayla anten kazancında metamalzeme yapısının olumlu bir etkisi olmuştur.



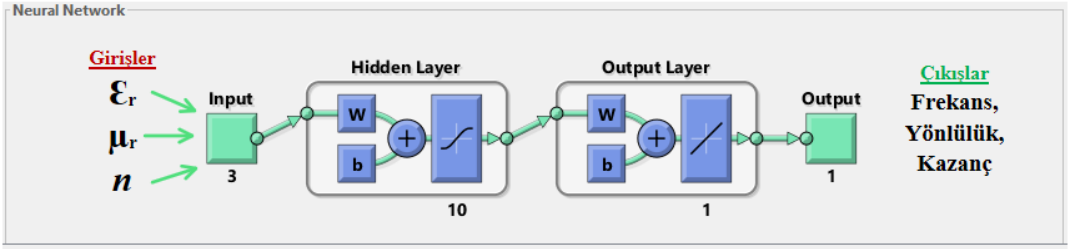
Şekil5.40. MTM yapıların laboratuvar ortamında anten ile etkileşimi sonucu 2D ışıma eğrisi; (a) anten, (b) anten ile MTM11, (c) anten ile MTM13 ve (d) anten ile MTM16

5.1.4. MTM yapıların YSA tekniğinde eğitilmesi ve sonuçları

MTM yapıların anten ile etkileşiminde en iyi yapının hangisi olduğunun belirlenmesi için yapay zekanın bir alt konusu olan yapay sinir ağları (YSA) tekniği kullanılmıştır. YSA uygulamasında, eğitim işlemi için MATLAB R2016 programı kullanılmıştır. Uygun yapıları tespit etmek için gerekli veriler hazırlanıp YSA ile eğitilmesi sonucunda, çalışmanın amacına ulaşılmak istenmiştir (Bkz. EK-1).

YSA tekniği ile, eğitim için veriler EK-2 verilerinden dielektrik katsayısı (epsilon), manyetik geçirgenlik (Mue) ve kırılma indisi giriş verisi olarak alındı. Çıkış verileri ise sırasıyla MYA ile etkileşim sonucu yeni rezonans frekansları, yönlülük değerleri ve kazanç değerleridir. MATLAB R2016a programı kütüphanesindeki 'nnstart' komutu ile YSA uygulaması aktifleştirildi. YSA toolbox arayüzünde verilerin çağırılmasıyla eğitim işlemi yapılmıştır. Eğitim sonucu hedef değerler YSA'nın tahmin ettiği değerlerle karşılaştırıldı ve analiz sonuçları aşağıdaki şekillerde eğitim grafikleri verilerek yorumlanmıştır.

Öncelikle MYA ile MTM yapılarının frekans için eğitimi yapılmıştır. Aşağıdaki şekiller frekans eğitimi için analiz sonucunda elde edilen değerlerdir. EK-2 kısmında verilen epsilon, mue ve kırılma indisine ait ilgili frekansa sahip MTM yapıların değerleridir. Şekil 5.41'de gösterildiği gibi üç giriş ve üç farklı çıkış vardır. Bu çıkış değerleri frekans, yönlülük ve kazanç değerleridir. Gizli katmanda veriler 10 nöron ağı olacak şekilde ayarlandı. Yapılan işlemleri adım adım şu şekilde ifade edebiliriz.



Şekil 5.41. Sinir Ağının giriş, gizli ve çıkış katman parametreleri

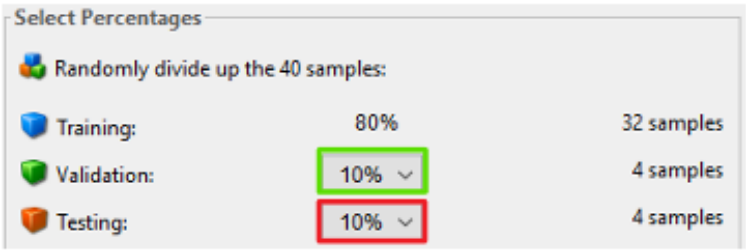
Öncelikle veriler MATLAB programına yüklenir. Üç giriş bir çıkış olduğundan giriş değerleri MATLAB'de 40x3 matrisi ile çağrılır. Çıkış verileri ise 40x1 matrisi olacak şekilde oluşturulur. Sonra "nnstart" komutu ile Şekil 5.42'deki sinir ağını başlatacak

pencere açılır ve “Fittin app” seçeneği seçilir.



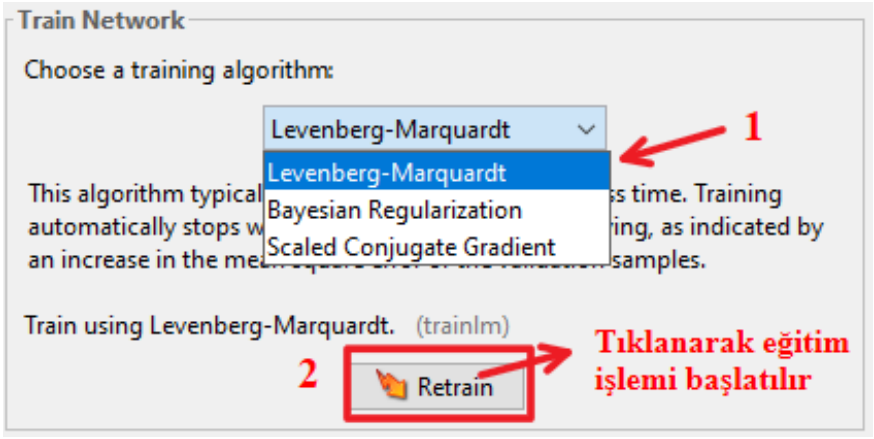
Şekil 5.42. Sinir ağının başlatılması

Sinir ağı başlatıldıktan sonra, 40 MTM yapısının ne kadarı eğitim için ne kadarı test için olacağını belirleme işlemi Şekil 5.43’teki yüzde oranları ile belirtilir. Eğitimin yüzde oranı, onaylama yüzdesi ile test yüzdelerinin seçilmesiyle belirlenir. Bu tez çalışmasında eğitim olarak 32 veriyi kullanmak için, eğitim yüzde oranı %80 olması onaylama yüzdesi ve test yüzdesinin belirtilmesiyle seçilir. Bu yüzde oranları istenildiği gibi değiştirilebilir.



Şekil 5.43. Eğitim için yüzdelerin belirlenmesi

Yüzde oranları, onaylama ve test için %10 olarak ayarlandığında, 40 veriden rastgele dörder veri seçilir ve eğitim için %80 olarak 32 veri kalır. Bu işlem adımından sonra Şekil 5.44’te gösterildiği gibi eğitim algoritması seçilir. “Train” seçeneği tıklanarak eğitim işlemi başlatılır.



Şekil 5.44. Eğitim algoritmasının seçilmesi ve eğitimin başlatılması

Şekil 5.44'te gösterildiği gibi eğitim algoritması için "Levenberg-Marquardt" algoritması seçilmiştir. Bu algoritma tipi çok kısa sürede daha çok veriyi belleğinde tutar. Eğitim işlemi, onaylama işleminin MSE (Mean Square Error) olarak sınırlanan değere geldiğinde, eğitim işlemi otomatik olarak durur. Buradaki MSE kavramı hedeflenen değer ile YSA'nın bulduğu değer arasındaki farkların ortalama karesi olarak ifade edilir ve değer ne kadar sıfıra yakın ise o kadar doğrudur anlamına gelir. Bunun ile beraber R denilen bir kavram vardır. R; hedef değeri ile YSA'nın bulduğu değer arasındaki ilişkiyi ölçer. Bu değer 0-1 arasındadır. Eğitim işlemi sonucu R değerinin 0-1 arasında olması istenir. Aksi durumda eğitim tekrar başlatılır. İstenen değere ulaşılana kadar bu işlem tekrarlanabilir. MSE ve R değeri Eş. 5.1 ve Eş. 5.2'deki eşitlikler ile bulunur.

$$MSE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(R_i-P_i)^2 \tag{5.1}$$

$$R=\sqrt{1-\frac{\sum(R_i-P_i)^2}{\sum(R_i-R_m)^2}} \tag{5.2}$$

Burada,

N: veri sayısını

R_i: Hedeflenen değeri

P_i: YSA'da tahmin edilen değeri

R_m: R_i değerlerinin ortalamasını

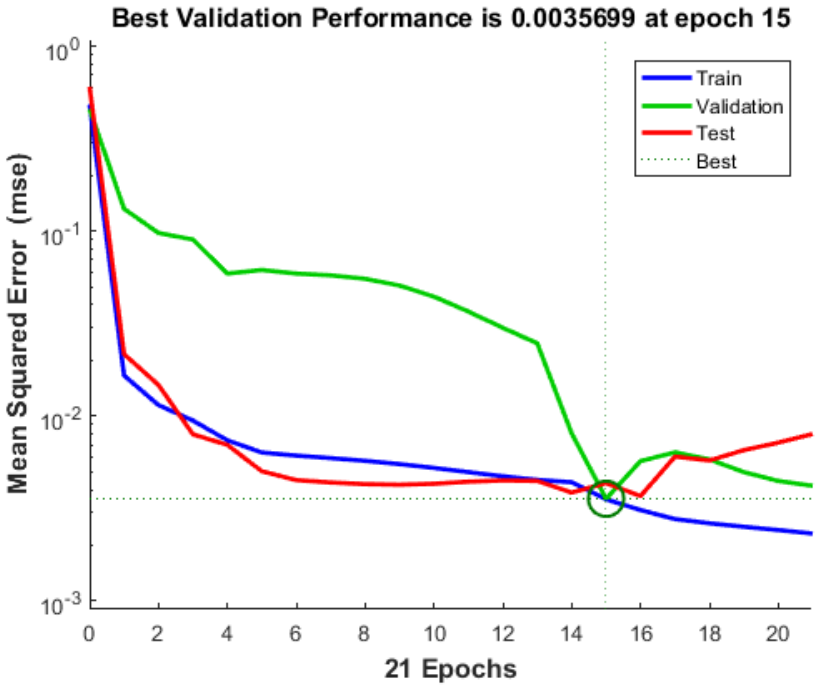
ifade eder.

Results

	Samples	MSE	R
Training:	32	3.54631e-3	8.86885e-1
Validation:	4	3.56987e-3	9.78966e-1
Testing:	4	4.33643e-3	9.32117e-1

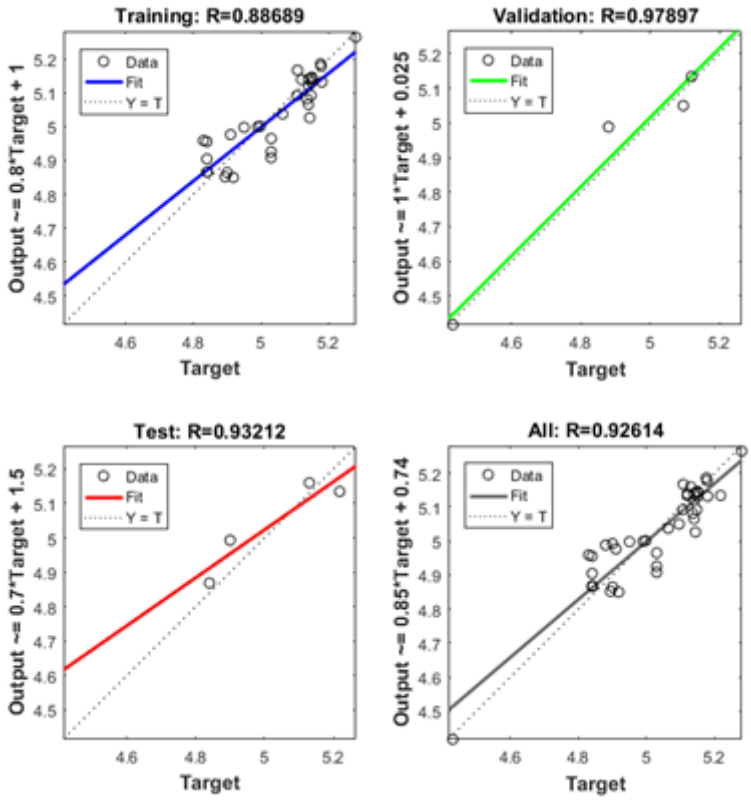
Şekil 5.45. Eğitim, onaylama ve testin MSE ve R sonuçları

Eğitim sonucunda eğitim, onaylama ve test değerlerinin MSE ve R değerleri Şekil 5.45'teki gibidir. Eğitimin MSE değeri sıfıra yakın bir değerde $3{,}54631 \times 10^{-3}$ olarak çıkmıştır. R değeri ise 0-1 arasında bir değer olup 0,886885 çıkmıştır. Diğerlerin değerlerine de bakıldığında MSE değeri sıfıra yaklaşmıştır ve R değerleri de 0-1 arasında çıkmıştır.



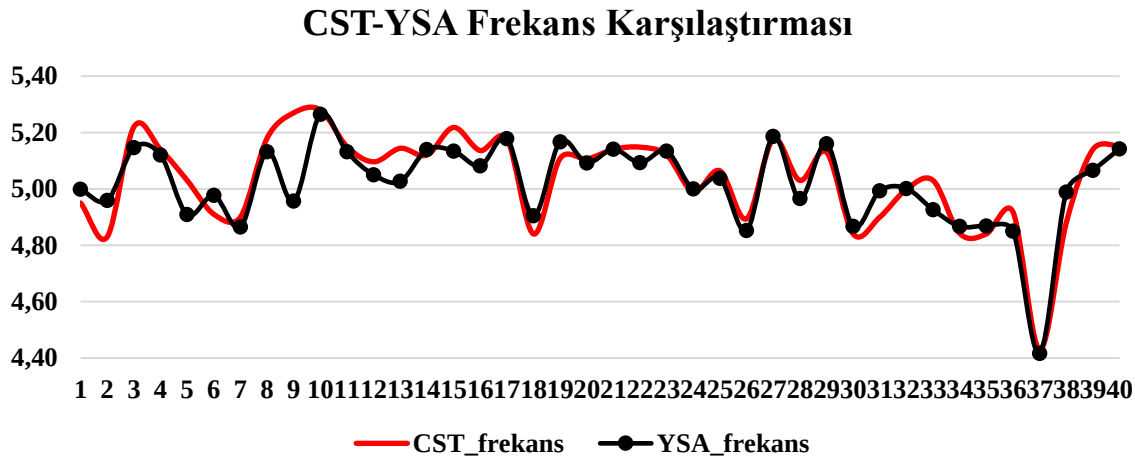
Şekil 5.46. MSE grafiği

Şekil 5.46 grafiğine bakıldığında MSE değeri, hedeflenen frekans değeri ile YSA'nın tahmin ettiği frekansın arasındaki farkının ortalamasının karesi olarak ifade ediliyordu. 21 iterasyon sonucu MSE değeri "Validation" değerinin en iyi sıfıra yaklaştığı iterasyon sayısını 15 olarak belirlemiştir. Bu iterasyonda tüm değerlerin çakıştığı görülür. Bu durum her zaman olacak diye bir şart yoktur, ama üç değerin çakışması istenen bir durumdur.



Şekil 5.47. CST frekans ile YSA'nın tahmin ettiği frekansının kolerasyonu

Eğitim, onaylama ve test sonuçlarının hedef değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.47 grafiğindeki gibidir. Eğitim değeri %88 değerlerdedir. Genelde YSA uygulamalarında iyi bir eğitim için %70, %80'lerde olması iyi olarak değerlendirilir. Genel anlamda tüm verilerin tahmini ise %92,614 değerlerinde çıkmıştır. Şekil 5.47'de verilen grafiklerin yatay ekseni gerçek değerleri, dikey ekseni ise eğitim sonucu tahmin edilen değerleri belirtmektedir. Eğitim verilerindeki frekansların gerçek değerleri ile YSA tarafından tahmin edilen değerleri arasında yapılan karşılaştırmada, aralarındaki ilişkiyi ölçen R değerinin 0,88689 olarak bulunmuştur. Bahsedildiği üzere R değeri 0-1 arasında bir değer olup 1'e yaklaşma durumuna göre yorumlanmıştır. R değeri 1 değerine çok yaklaşmıştır. Bu bize eğitimin iyi bir şekilde sinir ağına yapıldığını gösterir. Aynı şekilde Şekil 5.47'de onaylama (validation) sonucu da sinir ağının iyi bir şekilde eğitildiğini göstermektedir ve R değeri 0,97897 olarak bulunmuştur. Son olarak Test verileri karşılaştırılmış olup R değeri 0,93212 olarak bulunmuştur. Tüm bu verilerin sinir ağına eğitilme başarısında ise R değeri 0,92614 bulunmuştur.

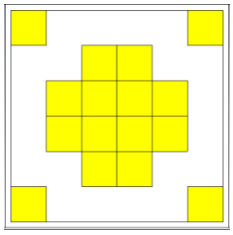


Şekil 5.48. CST frekansı ile YSA'nın tahmin ettiği frekansların karşılaştırması

Gerçek frekans değeriyle YSA'nın tahmin ettiği frekans değerine Şekil 5.48'e bakıldığında, en iyi tahminin MTM21 ile olduğu görülmektedir. En iyi on değeri ayıkladığımızda Çizelge 5.5'te verildiği gibi olduğu görülür. Bütün karşılaştırmalara bakılmak istenir ise EK-3'te verildiği gibi çıkmıştır.

Çizelge 5.5. Hedeflen frekans değeri ile YSA'nın tahmin ettiği frekansın karşılaştırması

Yapı	Gerçek	Tahmin	Fark
Anten+MTM10	5,280	5,265	0,015151
Anten+MTM17	5,178	5,179	0,000532
Anten+MTM20	5,106	5,092	0,013873
Anten+MTM21	5,140	5,140	0,000393
Anten+MTM23	5,120	5,134	0,014145
Anten+MTM24	4,990	4,999	0,009457
Anten+MTM27	5,176	5,186	0,010097
Anten+MTM32	4,998	5,001	0,003407
Anten+MTM37	4,430	4,417	0,013454
Anten+MTM40	5,150	5,142	0,008163



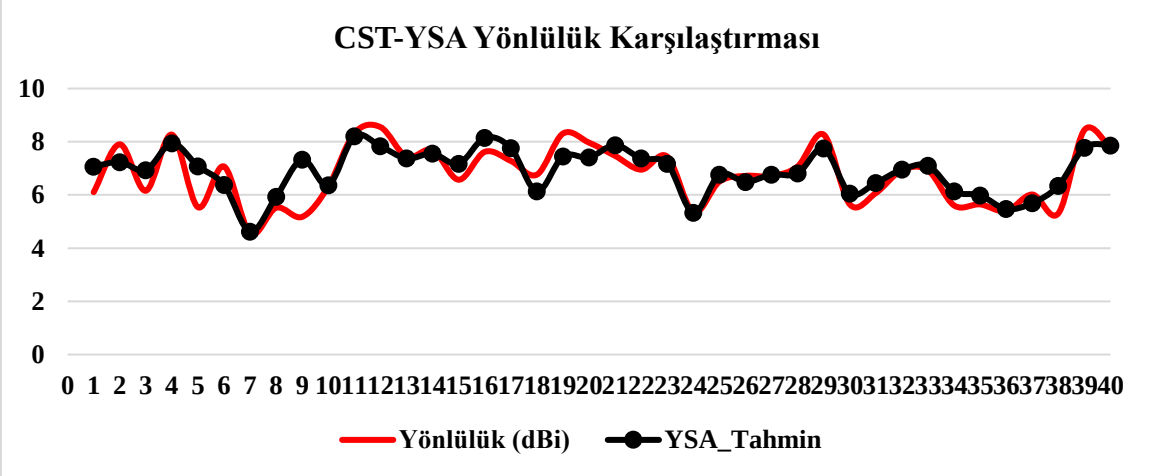
YSA uygulaması, EK-2'de verilen yönlülük ve anten kazanç değerleri için yukarıda anlatılan işlem adımları kullanılarak uygulandığında, aşağıdaki grafiklerde verilen değerler çıkmıştır. Eğitim sonucu beklenen hedef değerler ile YSA uygulamasında çıkan değerler arasındaki durum Şekil 5.50 ve Şekil 5.52'deki gibidir. Şekil 5.49 ile Şekil 5.51'e bakıldığında ise yönlülük ve anten kazancı için yapılan eğitim işlemi sonucu MSE ve R değerleri verilmiştir.

Results

	Samples	MSE	R
Training:	28	4.71124e-1	8.05288e-1
Validation:	6	7.87422e-1	4.71311e-1
Testing:	6	7.36054e-1	5.87804e-1

Şekil 5.49. Yönlülüğün MSE ve R değerleri

Yönlülük değerlerinin YSA'da eğitilmesi sonucunda, Şekil 5.49'den MSE değerlerin istenildiği gibi 0-1 arasında bir değer olup ne kadar çok sıfıra yakın değerler alırsa o kadar iyi demektir. Aynı şekilde R için de durum aynı olup 0-1 arasında bir değer çıktığı görülür. Anten yönlülüğünün YSA'da eğitilmesi sonucunda 40 yapının tahmini ile gerçek değeri arasındaki durum Şekil 5.50'de yapılan karşılaştırma grafiğinde görüldüğü gibidir.

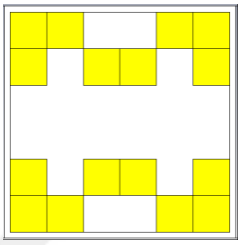


Şekil 5.50. CST ile YSA'nın tahmin ettiği anten yönlülüğün karşılaştırması

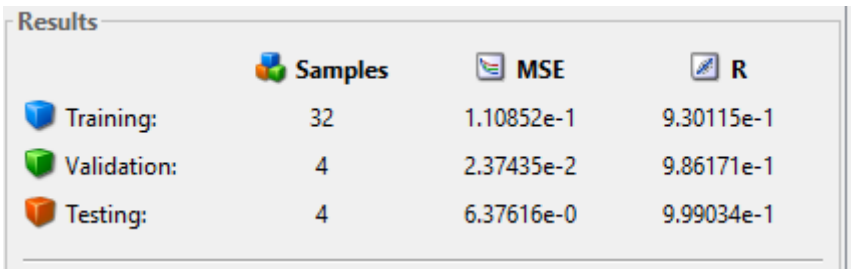
Yönlülüğün gerçek değerleri ile YSA'nın tahmin etti değerleri Şekil 5.50'de görülmektedir ki birbirlerine yakın değerler çıkmıştır. Grafikte birbiriyle çakışmış veya çakışmaya yakın olan değerler istenen değerler olup en iyi on değer sıralandığında Çizelge 5.6'te verildiği gibi listelenmiştir. Bu durumda en iyi eğitimi yapılmış yapının MTM24 olduğu görülür. Gerçek ile tahminin arasındaki fark 0,017716 değerindedir. Şekil 5.50'de yatay eksendeki sayılar yapıları temsil etmektedir ve 40 yapının eğitim sonucunda antenin gerçek frekans değeri ile kıyaslamasını yapılmıştır. Yuvarlak noktalar sinir ağının eğitim işlemi sonucu YSA'nın tahmin ettiği frekans değerini göstermektedir.

Çizelge 5.6. Gerçek ile YSA'nın tahmin ettiği yönlülük değerlerinin karşılaştırılması

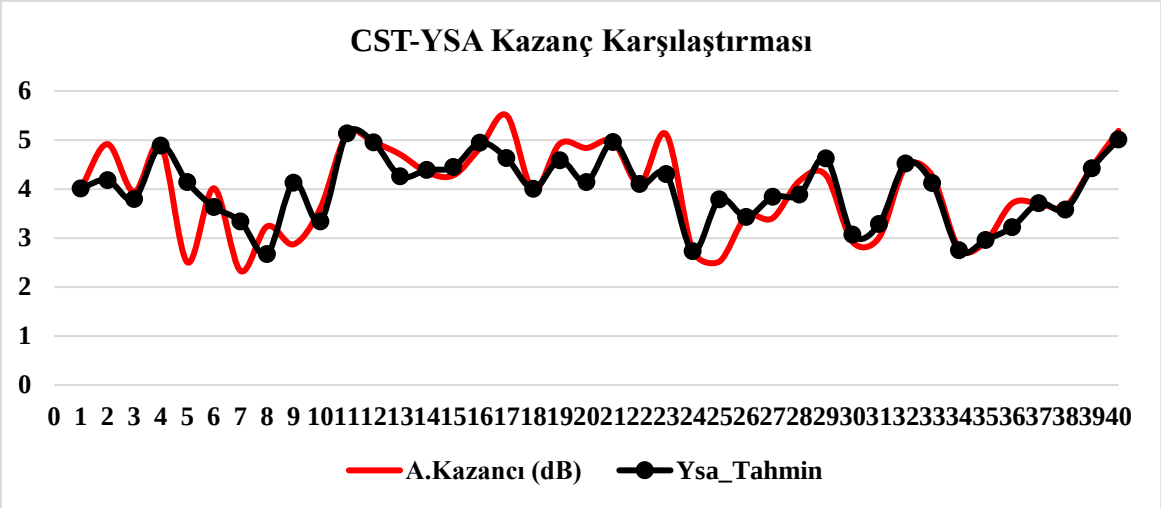
Yapı	Gerçek	Tahmin	Fark
Anten+MTM7	4,550	4,625	0,075251
Anten+MTM10	6,320	6,364	0,043893
Anten+MTM11	8,324	8,206	0,118316
Anten+MTM13	7,434	7,372	0,061723
Anten+MTM14	7,686	7,555	0,131377
Anten+MTM24	5,350	5,332	0,017716
Anten+MTM27	6,712	6,765	0,053286
Anten+MTM32	6,933	6,953	0,019661
Anten+MTM36	5,392	5,470	0,078041
Anten+MTM40	7,724	7,864	0,139894



Son olarak anten kazancının, YSA tekniği ile eğitilmesi sonu elde edilen verilere değinilmiştir. Şekil 5.51'de eğitim sonucunda elde edilen MSE ve R değerleri görülmektedir. MSE'nin test değerine bakıldığında 1 değerinden büyük olduğu görülmekte, ama diğer değerler istenildiği gibi 0-1 arasında çıkmıştır. Eğitim durumlarında böyle durumların görülmesi mümkündür. R değerlerine bakıldığında ise tüm değerlerin 0-1 aralığında çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.51. Kazancın MSE ve R değerleri

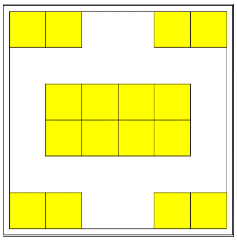


Şekil 5.52. CST ile YSA'nın tahmin ettiği anten kazançlarının karşılaştırması

MYA ile MTM yapıların etkileşimi sonucunda anten kazancında meydana gelen kazanç değerleri YSA tekniğinde eğitilmek istendiğinde Şekil 5.52'de verilen gerçek anten kazancı ile YSA'nın tahmin ettiği değerler yapılan karşılaştırma gibi çıkmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda kazanç değeri en iyi tahmin edilen yapının MTM22 olduğu görülür. Hata payı, Çizelge 5.7'de verildiği gibi $7{,}34479 \times 10^{-5}$ olarak çıkmıştır. En iyi on anten kazancı Çizelge 5.7'de verildiği gibidir. Bütün karşılaştırmalar EK-3'te verilmiştir.

Çizelge 5.7. Gerçek kazanç ile YSA'nın tahmin ettiği değerlerin karşılaştırılması

Yapı	Gerçek	Tahmin	Fark
Anten+MTM1	4,015	4,013	0,0024793240
Anten+MTM4	4,895	4,882	0,0125055529
Anten+MTM11	5,119	5,132	0,0130992365
Anten+MTM12	4,955	4,953	0,0018229747
Anten+MTM18	3,983	4,005	0,0224037576
Anten+MTM21	4,970	4,955	0,0146336904
Anten+MTM22	4,101	4,101	0,0000734479
Anten+MTM24	2,738	2,732	0,0059075280
Anten+MTM26	3,430	3,432	0,0019633161
Anten+MTM37	3,703	3,712	0,0093787614



5.2. MYA ile CSRR Yapıların Etkileşimi ve Değerlerin YSA ile Tahmini

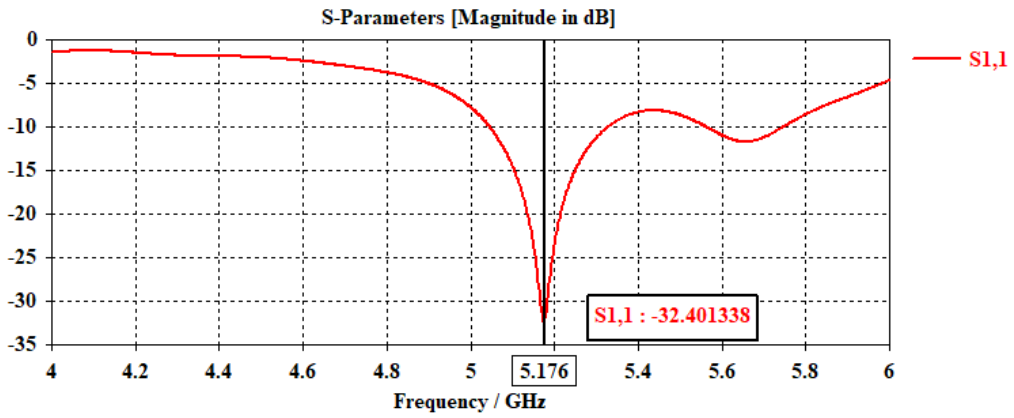
Bu kısımda 5.1 bölümünde yapılan çalışmaya benzer bir çalışma yapılmış olup tez çalışmasına eklenmiştir. Bu çalışmada diğer çalışmadan farklı olarak, antenin kazanç değerleri ile yönlülük değerleri sinir ağında eğitimi yapılmamıştır. Bu çalışmada sadece CSRR yapılarının mikroşerit antenin frekansına ve S11 değerine etkisi incelenmiştir. Daha sonra antenin SRR yapısı ile antenin değişen frekans değerleri ile S11 değerleri sinir ağında eğitilmiştir ve bu değerleri tahmin edilmek istenmiştir. SRR yapısı metamalzeme özellik gösteren bir yapıdır ve negatif manyetik geçirgenlik özelliği gösteren bir yapı tasarımıdır. Bu yapılar ile antenin S11 değeri azaltılmaya çalışılmıştır. C şekilli SRR yapısının ebatları değiştirildi ve 150 farklı ebat için antenin rezonans frekansı ve S11 değeri üzerindeki etkisi incelendi. Bu çalışmaya ek olarak 150 farklı ebattaki SRR yapısı ile anten frekansı ve S11 değerleri YSA tekniği ile tahmin etmek için yapay sinir ağlarında eğitildi. Eğitimde, beş giriş verisine karşılık iki çıkış verisi tahmin edilmek istenmiştir. Bu kısımdan itibaren bu çalışma ile ilgili veriler analiz edilmiştir.

5.2.1. Mikroşerit yama anten tasarımı

Mikroşerit anten tasarımında kullanılan malzemeler 5.1.1 bölümünde anlatıldığı gibidir. Bu çalışmada mikroşerit antenin rezonans frekansı 5,176 GHz olarak alınmıştır. Çizelge 5.7'de mikroşerit antenin ebatları verilmiştir. Antenin rezonans frekansı CSRR yapısının negatif geçirgenlik gösteren frekans aralığı olacak şekilde Çizelge 5.8'deki mikroşerit yama antenin ebatları baz alınarak CST MWS benzetim programında ölçümü yapılmış olup belirlenen rezonans frekans 5,176 GHz'dir. Aynı zamanda, literatür taramasında 5150-5350 MHz frekans aralığındaki HIPERLAN (High Performance Local Area Network) cihazlarının bilgisayar cihazlarının telsiz ortamında birbirine bağlantı sağlayacak yerel alan ağı için çözüm olarak sunulan bir band aralığı oluşturulmuştur. Bu aralıktaki frekans baz alınarak 5,176 GHz frekans aralığında anten tasarımı oluşturulmuştur (Nejdi, 2018).

Çizelge 5.8. Mikroşerit antenin 5,176 GHz frekansı için büyüklük ve birimi

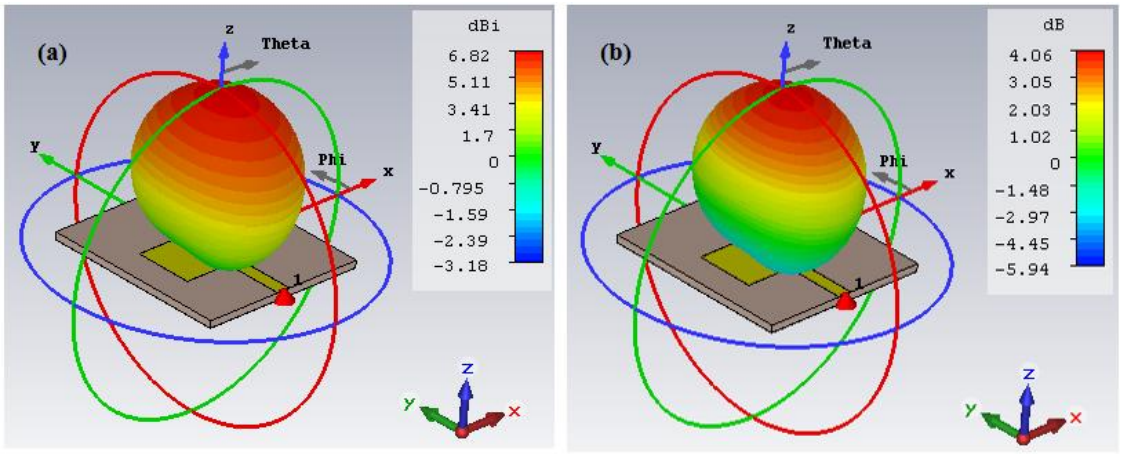
Parametreler	**Büyüklük**	**Birimi**
Plakanın Eni (Subw)	38,00	mm
Plaka Boyu (SubL)	41,25	mm
Yamanın Eni (pw)	24,40	mm
Yamanın Boyu (pL)	12,80	mm
Besleme hattının Eni (fw)	3,059	mm
Besleme hattının Boyu (fL)	13,173	mm
Plaka kalınlığı (h)	1,600	mm
Bakır kalınlığı (t)	0,035	mm
Çalışma Frekansı	5,176	GHz



Şekil 5.52. Mikroşerit antenin 5,176 GHz frekansında S11 değeri

Antenin 5,176 GHz rezonans frekanstaki S11 değeri Şekil 5.52'de -32,401338 dB olduğu görülür. C şekilli SRR yapısı ile antenin rezonans ve S11 değerleri incelenmiş ve en iyi S11 değerini hangi SRR yapısının ebatları ile sağlandığı tespit edilmek istemiştir. Ayrıca en iyi S11 değeri hangi frekans değerinde olduğu tespit edilmiştir.

Antenin ışıma eğrilerinin CSRR yapıları ile karşılaştırılması Şekil 5.53'te gösterildiği gibidir ve Çizelge 8'de antenin Phi açısının 0 ve 90 derece olduğu durumdaki karşılaştırılması listelenmiştir. Antenin 5,176 GHz rezonans frekansındaki 3D ışıma eğrisi Şekil 5.53'te verildiği gibidir.

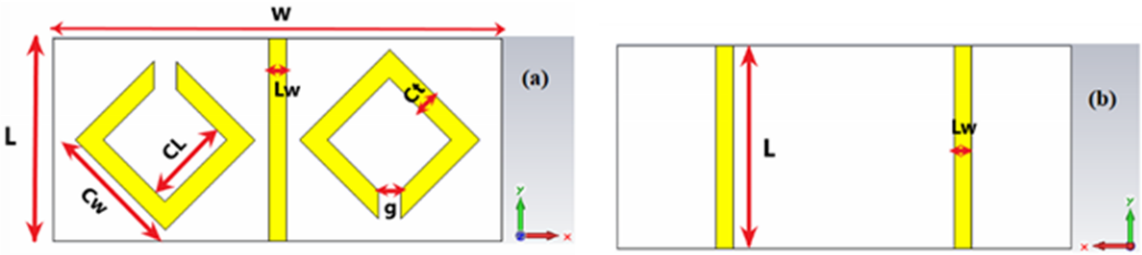


Şekil 5.53. Microşerit antenin 5.176 GHz frekansındaki radyasyon patterni; (a) antenin yönlülüğü, (b) antenin kazancı.

Antenin 5,176 GHz frekanstaki ışıma eğrisinde, Şekil 5.53a'daki anten yönlülük değeri 6,818 dBi, Şekil 5.53b antenin kazancı ise 4,063 dB değerindedir. Bu çalışmada SRR yapısının antenin rezonans frekansı ve S11 değerindeki etkilerine bakıldığından bu kısımdan itibaren C şekilli SRR yapısının tasarımına ve anten ile etkileşimi sonucunda meydana gelen değişmelere yer verilmiştir. Antenin ışıma eğrisinde tespiti yapılan en iyi CSRR yapısıyla etkileşiminin karşılaştırılması tablo olarak Çizelge 8, Çizelge 9, Çizelge 10 ve Çizelge 11'de verilmiştir.

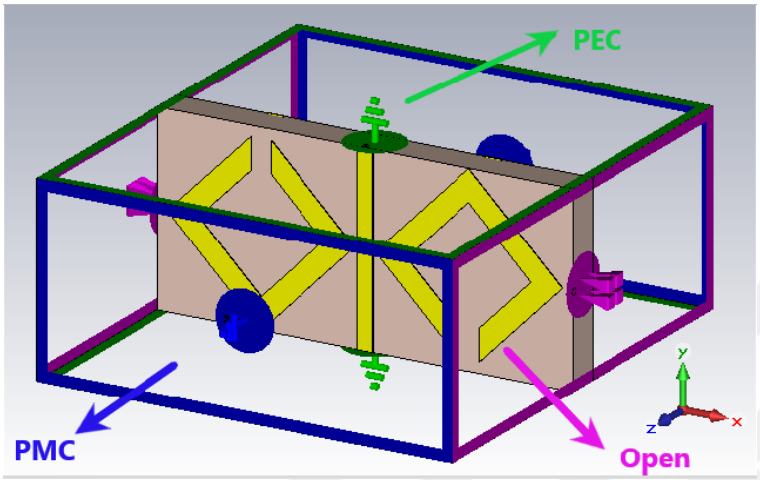
5.2.2. C şekilli SRR (CSRR) yapısının tasarımı ve anten ile etkileşim sonuçları

C şekilli SRR yapısının boyutlarına verilen parametrik ifadeler Şekil 5.54'te gösterildiği gibidir. Bu parametreler sayesinde SRR yapısının boyutları parametrik olarak değiştirilmiştir ve YSA için veriler hazırlanmıştır. Bu sayede 150 veri oluşturulmuştur. 150 faklı boyutlu SRR'nin anten üzerinde etkileri analiz edilmiştir.



Şekil 5.54. CSRR yapısı ve ebatları; (a) ön yüzey, (b) arka yüzey

SRR yapıları tasarlanırken, sınır şartları Şekil 5.55'te gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Bu sayede mikrodalga sinyalleri yanlardan gelecek şekilde ayarlanmıştır. Elektrik alan ve manyetik alan yönleri ise gelen dalgaya dik olacak şekilde ayarlanmış ve TEM modunda analizleri yapılmıştır. TEM modu için dalga sinyali yönünde elektrik alan (Ex=0) ve manyetik alan (Hx=0) sıfır olmalıdır.

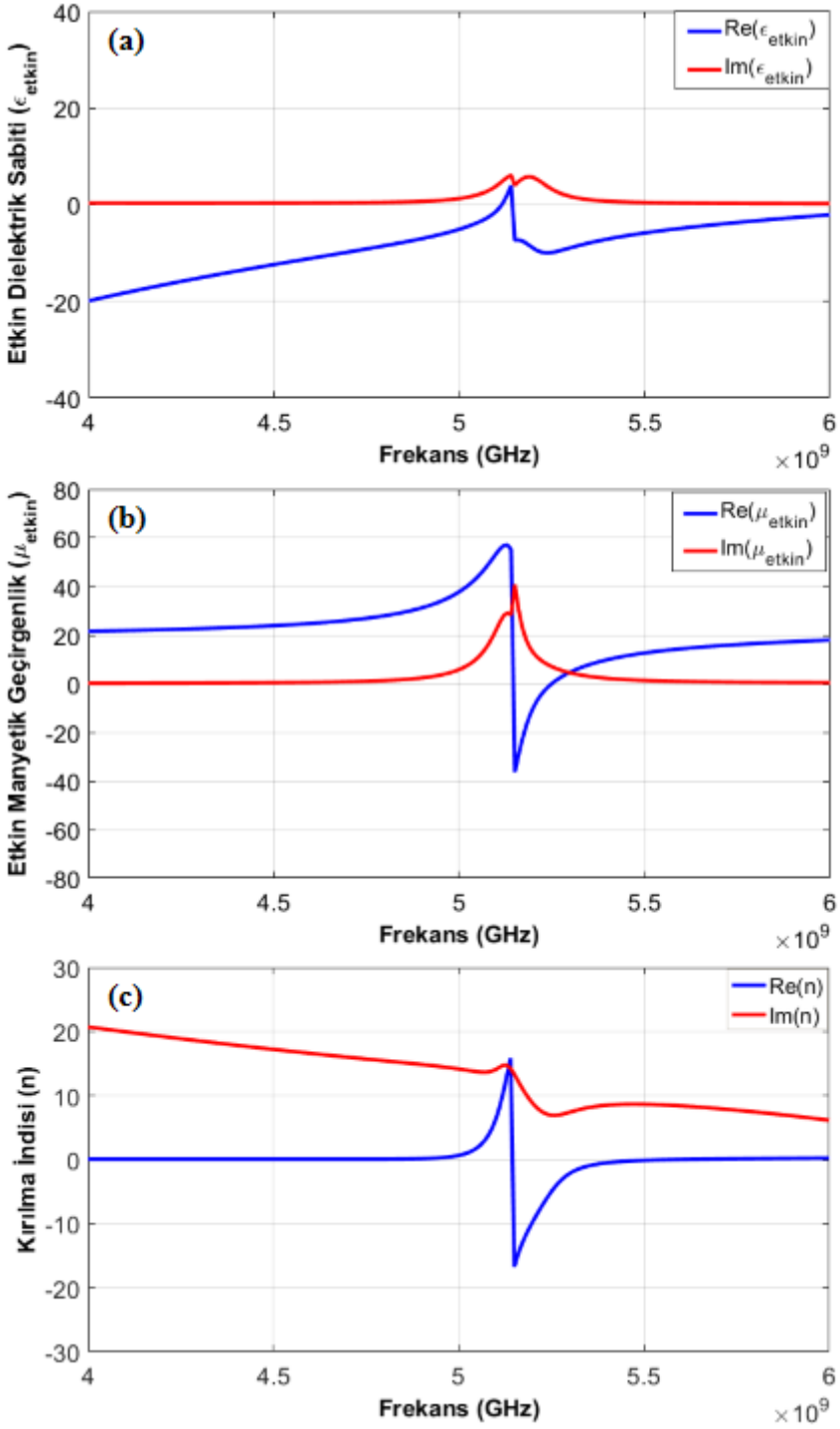


Şekil 5.55. CSRR yapı tasarımı için sınır şartlarının belirlenmesi

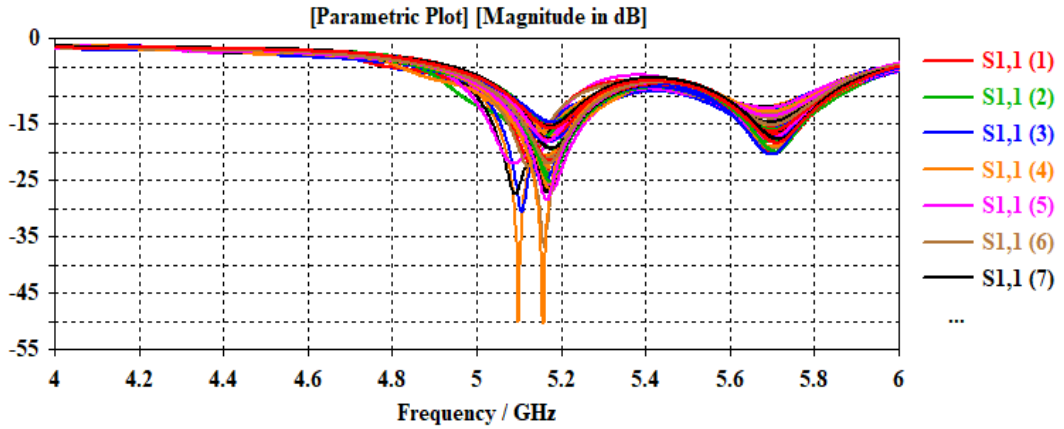
Çizelge 5.9. Bir CSRR yapısının ebatları

Ct	**Cw**	**CL**	**Lw**	**g**
0,3535	4,95	4,243	0,5	0,5

Çizelge 5.9'da bir CSRR yapısının ebatlarıdır verilmiştir. Bu ebatlar parametrik olarak CST benzetim programında parametre olarak atanarak bahsedilen 150 CSRR yapısının anten frekansına ve S11 değerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen 150 yeni frekans ve S11 değerleri YSA yönteminde eğitilmek üzere oluşturulmuş ve tahmini değerlere ulaşılmıştır. Aşağıda Çizelge 5.8'de verilen CSRR yapısının ebatları baz alınarak dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisinin grafiği verilmiştir.

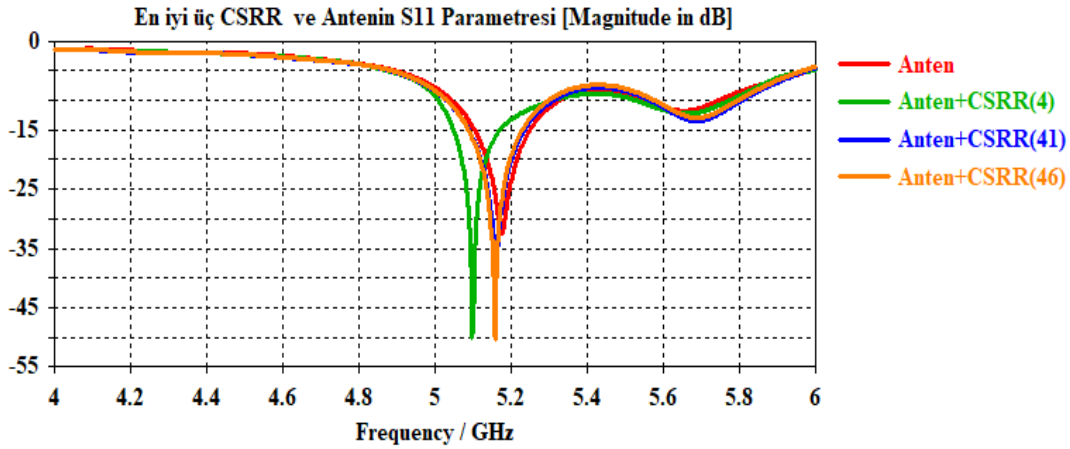


Şekil 5.56. CSRR yapısının real ve sanal (a) dielektrik sabiti, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi



Şekil 5.57. Test edilen 150 CSRR yapısının anten ile etkileşimi sonucu

Şekil 5.57'de 150 farklı ebatta ki CSRR yapısının anten ile etkileşimi sonucu rezonans frekansının karşılaştırılması yapılmıştır. En iyi üç yapı 4.CSRR, 41.CSRR ve 46.CSRR yapılarıdır. Bu yapılar ile antenin yeni rezonans frekansı sırasıyla 5,098 GHz, 5,16 GHz ve 5,158 GHz değerindedir. Burada en iyiyi belirleme, antenin S11 değeri baz alınarak gerçekleştirilmiştir. SRR yapısı negatif geçirgenlik özellik sergileyebilen bir metamalzeme yapısı olduğundan anten üzerinden yansıyan kayıplar en aza indirilmek istenmiştir. Bu amaç doğrultusunda SRR yapılar anten ile etkileşimi yapıldığında CSRR yapısının hangi ebatlarda anten üzerindeki yansımaları daha çok azalttığına bakılarak yapı tespiti yapılmıştır. Şekil 5.57'de de gösterildiği gibi 4.CSRR, 41.CSRR ve 46.CSRR yapısı antenin rezonans frekansında belli bir kayma yapsa da geri dönüş kaybını antenin salt yapısından daha çok azaltma sağlamıştır.



Şekil 5.58. Anten ve en iyi etkileşim yapan üç CSRR yapısının S11 grafiği

5,098 GHz frekansta S11 değeri -50,038437 dB, 5,16 GHz frekansta S11 değeri -36,790862 dB ve 5,158 GHz frekansta ise S11 değeri -42,257859 dB değerindedir. Şekil 5.58'de bu üç CSRR yapısı ile antenin S11 grafiklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Aşağıda verilen tablolar, antenin 4.CSRR, 41.CSRR ve 46.CSRR yapısı ile etkileşimi sonucu kazanç ve yönlülük değerlerini içermektedir. Bu değerler Phi açısının 0 ve 90 derece durumundaki ışıma eğrilerinin ana lob değeri, 3 dB açısal genişliği ve yan lob değerleridir.

Çizelge 5.10. Antenin yönlülüğünün Phi 0 derecedeki ışıma eğrisinin değerleri

Phi=0 Yönlülük	**Anten/ Anten+CSRR4**	**Anten/ Anten+CSRR41**	**Anten/ Anten+CSRR46**
Ana Lop	6,81 / 8,15 dBi	6,81 / 7,14 dBi	6,81 / 7,26 dBi
Açısal Genişlik (3 dB)	77,2 / 70,6	77,2 / 77,4	77,2 / 76,9
Yan Lop Seviyesi	0 / -13,9 dB	0 / -18,7 dB	0 / 0 dB

Çizelge 5.10'da antenin radyasyon ışıma eğrisini ana lobundaki yönlülüğünün değeri, açısal genişlik değeri ve yan lop değeri verilmiştir. SRR yapısının negatif manyetik geçirgenlik gösteren metamalzeme özelliği sayesinde antenin yönlülük ışıma eğrisinde iyileşmeler olduğu sayısal veriler ile gözlenmiştir. Bunun sonucunda çizelge 5.58'de de görüldüğü üzere Phi 0 derecede CSRR4 yapısının etkisi sonucu sırasıyla ana lop değeri 6,81 dBi değerinden 8,15 dBi değerine yükseldiği, açısal genişliğin 77,2 dereceden 70,6 dereceye düştüğü ve yan lobun ise 0 dB değerinden -13,9 dB değerine düştüğü gözlenmiştir. CSRR41 yapısının etkisi sonucu sırasıyla ana lop değeri 6,81 dBi değerinden 8,15 dBi değerine yükseldiği, açısal genişliğin 77,2 dereceden 70,6 dereceye düştüğü ve yan lobun ise 0 dB değerinden -13,9 dB değerine düştüğü gözlenmiştir. Aynı şekilde CSRR46 yapısının etkisi sonucu bu değerleri sırasıyla ana lop değeri 6,81 dBi değerinden 8,15 dBi değerine yükseldiği, açısal genişliğin 77,2 dereceden 70,6 dereceye düştüğü ve yan lob ise 0 dB değerinden -13,9 dB değerine düşmüştür.

Çizelge 5.11. Antenin kazancının Phi 0 derecedeki ışıma eğrisinin değerleri

Phi=0 Kazanç	**Anten/ Anten+CSRR4**	**Anten/ Anten+CSRR41**	**Anten/ Anten+CSRR46**
Ana Lop	4,05 / 3,98 dB	4,07 / 4,22 dB	4,07 / 3,98 dB
Açısal Genişlik (3 dB)	77,2 / 70,6	77,2 / 77,4	77,2 / 70,6
Yan Lop Seviyesi	0 / -13,9 dB	0 / -18,7 dB	0 / 0 dB

SRR yapısının metamalzeme etkisi ile Phi 0 derecede antenin kazanç ışıma eğrisindeki analiz sonucu Çizelge 5.59'daki gibidir. Anten kazancının değerleri Phi 0 derecedeki CSRR4 yapısının etkisi sonucu sırasıyla ana lop değeri 4,05 dB değerinden 8,15 dBi değerine yükseldiği, açısal genişliğin 77,2 dereceden 70,6 dereceye düştüğü ve yan lob ise 0 dB değerinden -13,9 dB değerine düşmüştür. CSRR41 ve CSRR46 yapılasının etkileri Çizelge 5.11'de listelendiği gibidir.

Çizelge 5.12. Antenin yönlülüğünün Phi 90 derecedeki ışıma eğrisinin değerleri

Phi=90 Yönlülük	**Anten/ Anten+CSRR4**	**Anten/ Anten+CSRR41**	**Anten/ Anten+CSRR46**
Ana Lop	6,82 / 8,15 dBi	6,82 / 7,63 dBi	6,82 / 7,75 dBi
Açısal Genişlik (3 dB)	91,6 / 64,8	77,2 / 81,5	77,2 / 81,4
Yan Lop Seviyesi	-15,3 / -9,5 dB	0 / -11,6 dB	0 / -12,2 dB

Phi 90 derecedeki antenin kazanç ve yönlülük ışıma eğrilerinin analiz sonuçları Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12'de listelendiği gibidir. Çizelge 5.12'de görüldüğü üzere anten yönlülüğünün ışıma eğrisinin analiz sonuçları CSRR4 için sırasıyla ana lop değeri 6,82 dBi değerinden 8,15 dBi değerine yükseldiği, açısal genişliğin 91,6 dereceden 64,8 dereceye düştüğü ve yan lob ise -15,3 dB değerinden -9,5 dB değerine yükseldiği görülür. Burada yan lobda istenildiği gibi azalma sağlanmamıştır. CSRR41 ve CSRR 46 yapılarının etkileri Çizelge 5.11'de listelendiği gibidir.

Çizelge 5.13. Antenin kazancının Phi 90 derecedeki ışıma eğrisinin değerleri

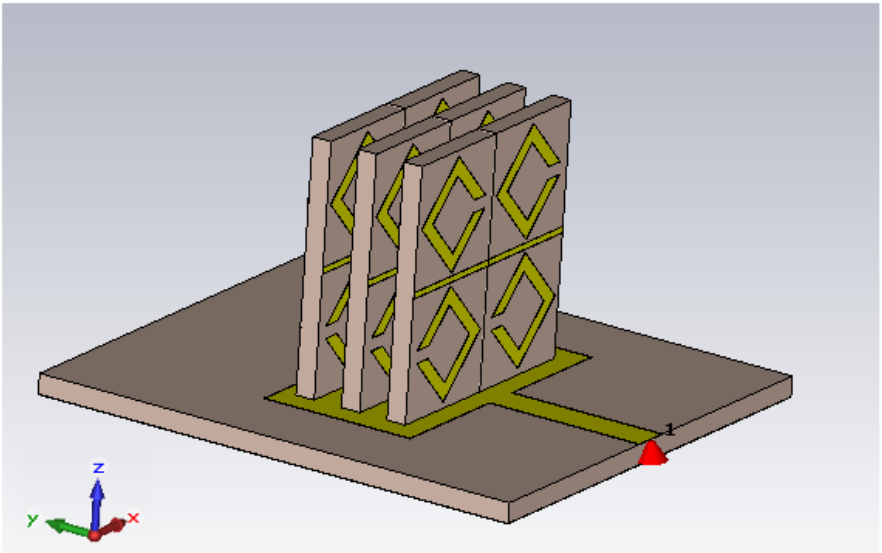
Phi=90 Kazanç	**Anten/ Anten+CSRR4**	**Anten/ Anten+CSRR41**	**Anten/ Anten+CSRR46**
Ana Lop	4,07 / 3,98 dB	4,07 / 4,71 dB	4,07 / 4,67 dB
Açısal Genişlik (3 dB)	91,6 / 64,8	77,2 / 81,5	77,2 / 81,4
Yan Lop Seviyesi	-15,3 / -9,5 dB	0 / -11,6 dB	0 / -12,2 dB

Phi 90 derecede antenin kazanç ışıma eğrisinin analiz sonuçları Çizelge 5.12'de listelendiği gibidir. Burada CSRR4 yapısının antenin kazanç ışıma eğrisindeki etkisi ise sırasıyla ana lop değeri 4,05 dB değerinden 3,98 dBi değerine düştüğü, açısal genişliğin 77,2 dereceden 70,6 dereceye düştüğü ve yan lob ise 0 dB değerinden -13,9 dB değerine düştüğü gözlenmiştir. CSRR41 ve CSRR46 yapılasının etkileri ise Çizelge 5.13'te listelendiği gibidir.

5.2.3. Mikroşerit anten değerlerinin YSA ile tahmin edilmesi

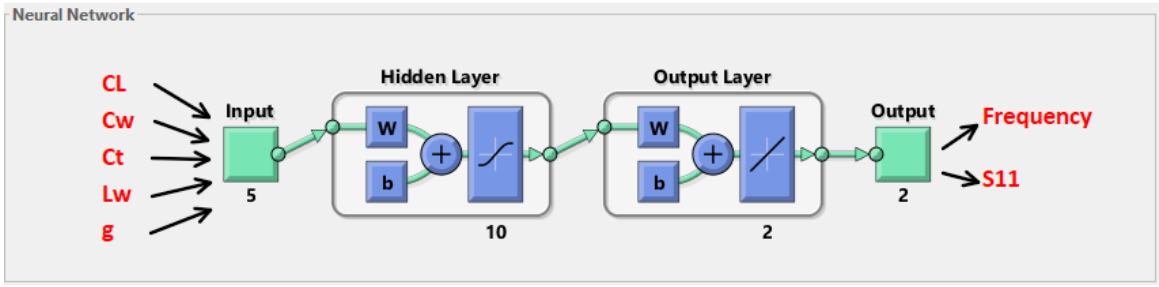
Anten ile C şekilli SRR yapısının etkileşimi Şekil 5.59'daki gibidir. Bu işlem sonucunda antenin rezonans frekansı ve geri dönüş kayıp değeri YSA tekniğinde eğitilmiştir. Sonrada gerçek değerler ve YSA'nın tahmin ettiği değerler karşılaştırılmıştır.

YSA tekniğindeki eğitim için 150 veri hazırlanmıştır. Ağ eğitimi için, Ci, Clw, Cl, Cw ve g giriş verisidir. Çıkış verileri geri dönüş kaybı denilen S11 parametresidir. MATLAB programında YSA ara yüzü "nnstart" komutu ile hazırlanmıştır. Eğitim süreci, YSA araç kutusu ara yüzünde veri çağrılarak başlatılmıştır. Eğitim süreci sonucunda YSA tarafından tahmin edilen değerler gerçek değerlerle karşılaştırılmış ve analiz sonuçları aşağıda verilen grafiklerle yorumlanmıştır.



Şekil 5.59. Mikroşerit anten ile CSRR yapısının etkileşimi

Aşağıdaki şekiller S11 eğitimi için analizde elde edilen değerlerdir. Şekil 5.60'da gösterildiği gibi beş giriş verisi ve iki çıkış verisi vardır. Gizli katman 10 nöron ağı olacak şekilde ayarlanmıştır.



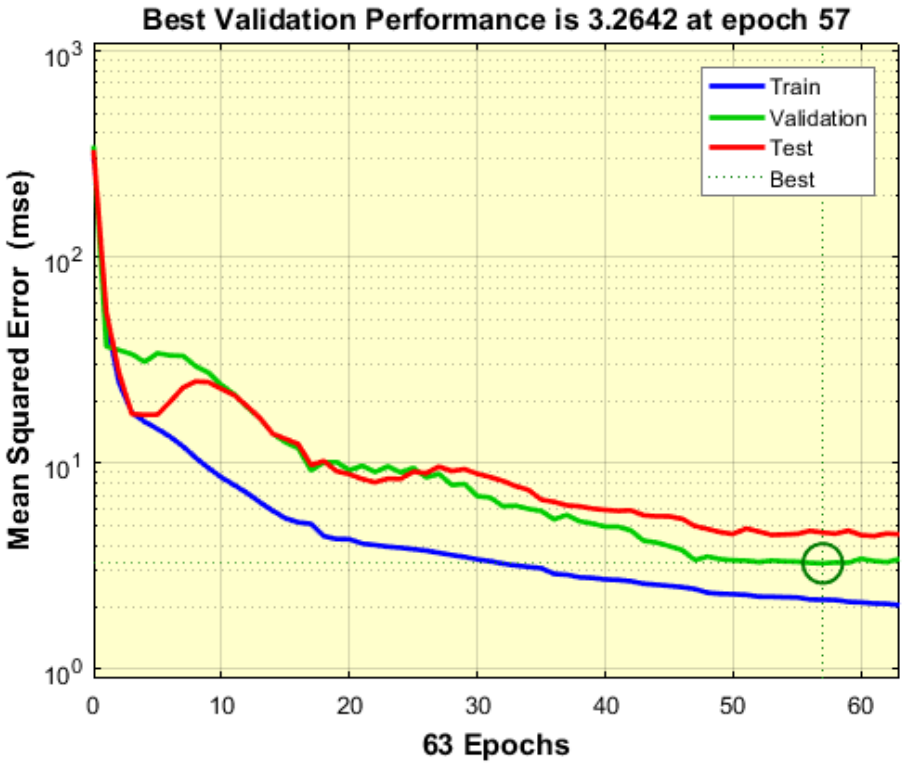
Şekil 5.60. YSA eğitimi için giriş ve çıkış parametreleri

Öncelikle veriler beş giriş ve iki çıkış olduğundan giriş değerleri MATLAB'de 150x5 matris formatında olmalıdır. Dolayısıyla çıkış verileri de 150x2 matris formatında olmalıdır. Giriş ve çıkış verileri belirlendikten sonra 150 veri setinin ne kadarı eğitim için ve ne kadarı test için olacağı belirtilmelidir. Bunun için de Çizelge 5.14'te gösterildiği gibi yüzde oranları ayarlanmalıdır. Eğitimin yüzde oranı, onaylama yüzdesi ile test yüzdesinin ayarlanmasıyla belirlenir. Eğitim yüzdesi, onaylama yüzdesi ve test yüzdesi eşit olarak ayarlandığında %80 olarak belirlenmiştir. Bu yüzde oranları istenildiği gibi değiştirilebilir. Onaylama ve test yüzdesi ayarlandığında eğitimin yüzde oranı da ayarlanmış olur.

Çizelge 5.14. Eğitim, onaylama ve test verilerin yüzdeleri işe MSE ve R değerleri

	Yüzde Oranları	Örnekler	MSE	R
Training	80 %	120	0,00354631	0,886885
Validation	10 %	15	0,00356987	0,978966
Testing	10 %	15	0,00433643	0,932117

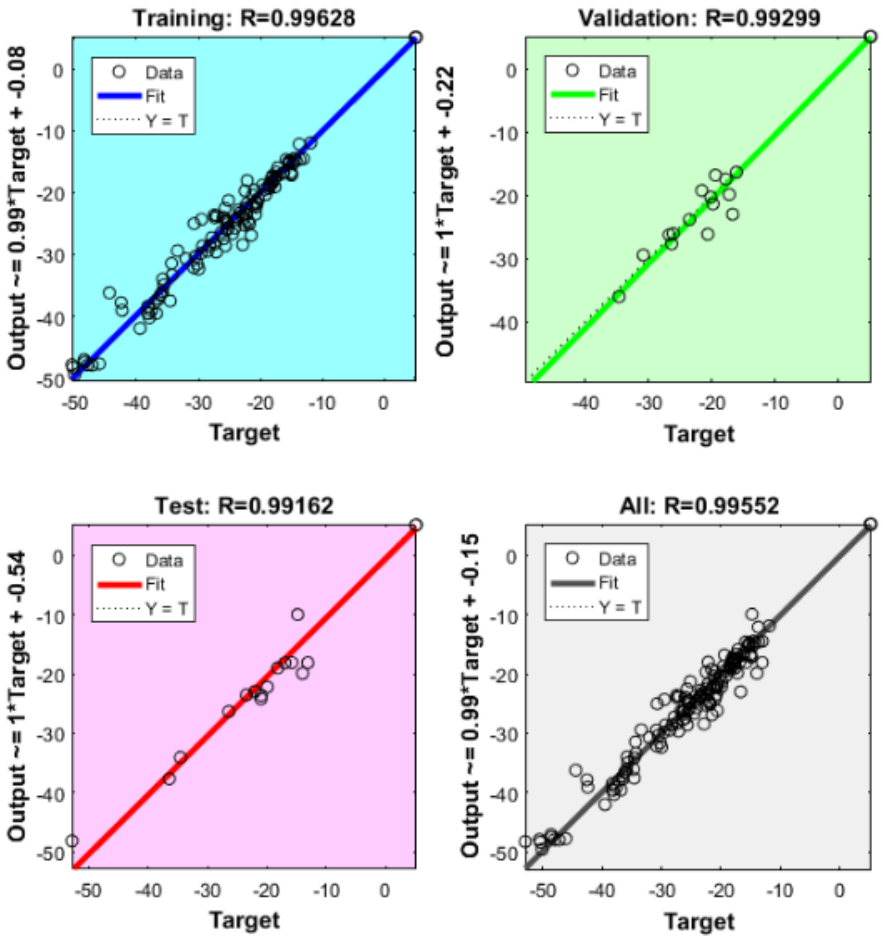
YSA uygulamasında eğitim algoritması olarak "Levenberg-Marquardt" algoritması seçilmiştir. Bu algoritma tipi çok kısa sürede daha çok veriyi hafızasında tutar. Eğitim işlemi, onaylama işleminin MSE (Mean Squared Error) sınırlanmış değerine ulaştığında eğitim işlemi otomatik olarak durur. MSE ve R hakkındaki bilgiler daha önce bölüm 5.1.3 kısmında bahsedilmişti. YSA uygulaması sonucunda eğitim, onaylama ve test değerlerinin MSE ve R değerleri Çizelge 5.14'teki gibidir. Eğitimin MSE değeri sıfıra yakın bir değerde çıkmıştır ve 0,00354631 olarak bulunmuştur; R değeri ise 0-1 arasında bir değer olup değeri 0,886885 çıkmıştır. Diğer değerlere de bakıldığında MSE değerleri sıfıra yaklaşmıştır ve R değerleri de 0-1 arasında çıkmıştır.



Şekil 5.61. MSE grafiği

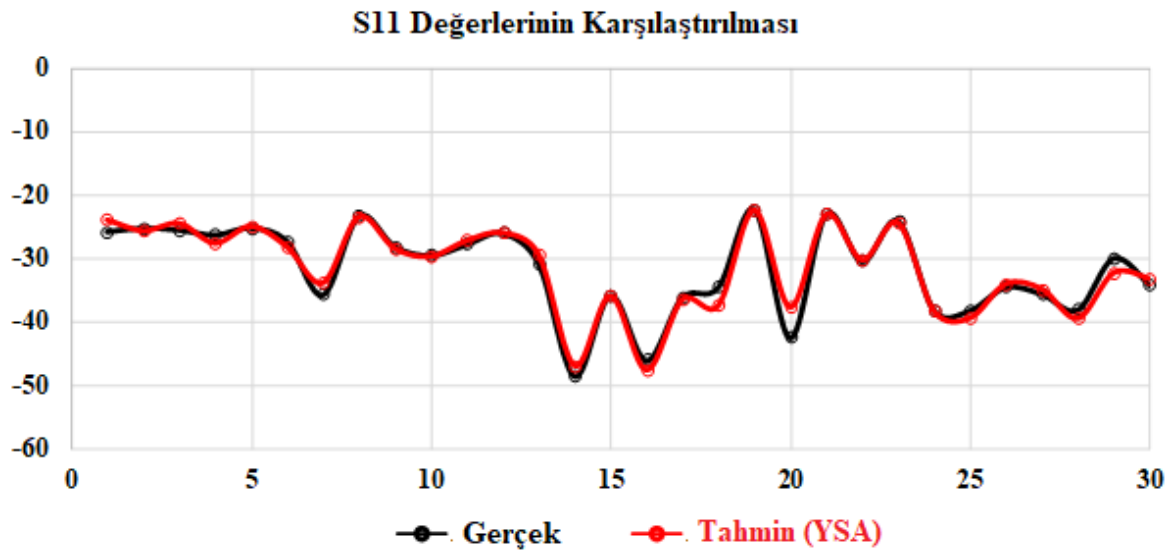
Şekil 5.61'deki grafiğe bakıldığında, MSE değeri 63 iterasyon sonucu "Validation" değerinin en iyi performansını 57. iterasyonda elde edilmiştir. Bu üç değerin de çakışması beklenen bir durumdur. Bu durum her zaman olacak diye bir şart yoktur, ama bu üç değerin çakışması istenen bir durumdur.

MATLAB programının sunmuş olduğu YSA arayüzüne giriş veriler çağrıldığında, bu değerler eğitim, onaylama ve test verilerini rastgele olarak ayrılarak sinir ağı eğitilir. Şekil 5.61'de verilen MSE grafiğinde, MSE değeri onaylama işlemi için en iyi performans değeri ile sınırlandırılmıştır. Yapılan iterasyon aşamalarında onaylama işleminin sergilediği en iyi performansın 57. iterasyonda olduğu tespit edilmiştir. Bu işlemde gerçek değer ile tahmin edilen değerin farklarının ortalama karesi alındığında MSE değerleri bulunmaktadır (Bkz. Eş. 5.1). Eğitim sonucu gerçek ile tahmin arasındaki ilişki Şekil 5.62'de gösterildiği gibi bulunmuştur.



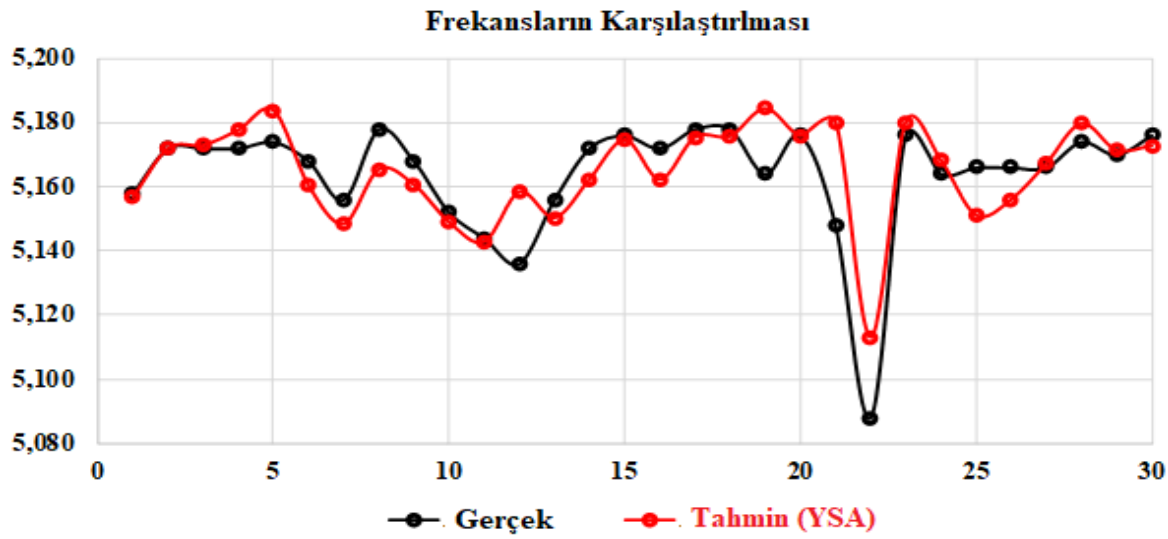
Şekil 5.62. Gerçek değer ile Tahmin edilen değerlerin korelasyonu

Eğitim, onaylama ve test sonuçlarının değerleri ile gerçek değerler arasındaki ilişki Şekil 5.62'deki grafikte gösterildiği gibi analiz edilmiştir. Eğitim sonucunun değeri yaklaşık olarak %99,628 değerindedir. Genelde YSA uygulamalarında iyi bir eğitim için %70, %80'lerde olması istenir. Genel anlamda tüm verilerin tahmini ise %99,552 olarak bulunmuştur. Şekil 5.62'de verilen dört grafikte yatay eksendeki değerler gerçek değerleri gösterir. Dikey eksende gösterilen değerler ise, YSA yönteminde giriş verileri arasında bir ilişkilendirme yapılması sonucu bulunan tahmini değerlerdir. Şekil 5.62'ye bakıldığında eğitim, onaylama ve test verilerinin sinir ağına eğitilmesi sonucunda değerler arasındaki ilişkiyi belirleyen R değeri 1 değerine oldukça yakın çıkmıştır. R değerleri eğitim için 0,99628, onaylama için 0,99299, test için 0,99162 ve tüm verilerin arasındaki ilişki 0,99552 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.63. S11 gerçek değeri ile YSA'nın tahmin ettiği değerlerin karşılaştırılması

Şekil 5.63'te gerçek S11 değeri ile YSA tekniğinin tahmin ettiği S11 değerleri verilmiştir. Yatay eksende verilenler yapının kaçıncı yapı olduğunu gösterir. 150 veriden en iyi 30 veri şekilde görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Şekil 5.63'te yapılan karşılaştırmada, değerlerin birbirlerine ne kadar yakın olduğu açık bir şekilde görülmektedir. YSA tekniği ile eğitim işlemi iyi bir şekilde sağlanmıştır. Aynı şekilde Şekil 5.64'deki frekans karşılaştırmasında da bu durumu görmek mümkündür. Frekans değerleri hemen hemen birbirlerine yakın değerlerdedir. S11 eğitiminde olduğu gibi frekans eğitimi de istenilen iyi sonuçları vermiştir.



Şekil 5.64. Frekansın gerçek değeri ile YSA'nın tahmin ettiği değerlerin karşılaştırılması

Şekil 5.63 ve Şekil 5.64'teki verilerden en iyi tahmin edilen on değer Çizelge 9'daki gibi bulunmuştur. Çizelge 5.15'a bakıldığı zaman, en iyi tahminin CSRR yapısının CSRR22 yapısı olduğu görülmektedir. En iyi on yapı CST MWS ile bulunan en iyi on değer ile karıştırılmamalıdır. Buradaki en iyi on değer gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki fark olarak tanımlanan hataya göre en iyi on değerdir.

Çizelge 5.15. Gerçek Frekans ve S11 ile YSA'nın tahmin ettiği en iyi on değer

Ct	**Cw**	**CL**	**Lw**	**g**	G.Frekans.	T.Frekans	**G. S11**	**T. S11**	**x.CSRR**
0,3535	4,95	4,243	1,25	0,75	5,158	5,157	-25,856891	-24,021779	17
0,3535	5,657	4,95	0,5	0,75	5,172	5,172	-25,307462	-25,769454	22
0,3535	5,657	4,95	0,75	0,75	5,172	5,173	-25,583030	-24,578295	27
0,7070	4,95	3,536	0,75	1,5	5,152	5,149	-29,596614	-29,792646	60
0,7070	4,95	3,536	1	1,25	5,144	5,143	-27,862936	-27,292612	64
0,7070	5,657	4,243	0,5	0,75	5,176	5,175	-35,842886	-36,015020	72
0,7070	5,657	4,243	0,75	0,75	5,178	5,175	-36,174757	-36,588814	77
1,0610	4,95	2,828	0,5	1,25	5,164	5,168	-38,220490	-38,439619	104
1,0610	4,95	2,828	1	1,5	5,166	5,167	-35,637340	-34,949108	115
1,0605	5,657	3,536	1,25	0,75	5,176	5,173	-34,281769	-33,339588	137

Çizelge 5.15’te en iyi tahmin edilen yapının 22.CSRR yapısı olduğu görülür. Burada en iyi tahmin, gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki mutlak farka bakılarak söylenmiştir. Eğer S11 değerinin azalışı göz önünde bulundurulursa o zaman en iyi yapının 77.CSRR olduğunu söyleyebiliriz.

Bu çalışma ile birlikte tez çalışmasında yapılmak istenenler anlatılmıştır ve SRR yapıları metamalzeme özellik göstererek antenin istenen parametrelerindeki değişimler incelenmiş ve gözlenmiştir. YSA tekniği ile antenin parametreleri arasında bir ilişki kurarak hazırlanan veriler YSA’ya eğitilmiş ve değerler tahmin edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, anten çeşitlerinden 5,2 GHz rezonans frekansta çalışan MYA'nın tasarımı yapılarak antenin kazancı ve yönlülüğü MTM yapılarla en iyi hale getirilmek istenmiştir ve en uygun MTM yapısının tespiti için YSA tekniğine başvurulmuş ve gerekli veri setleri oluşturulup MATLAB R2016a programında YSA eğitimi sağlanarak yapının istenen değerleri tahmin edilmek istenmiştir.

Bu çalışmada, hedeflenen amaca ulaşmak için antenin belirlenen çalışma frekansına uygun tasarımı CST MWS ve HFSS Ansoft programında yapılmıştır. Ağırlıklı olarak CST sonuçları verilmiştir. MTM yapıları rasgele ve simetrik 6x6 birim hücreli kare yamalardan oluşan 38x38 mm^2 yapılarda 40 yapının CST MWS programında tasarımları yapılmıştır. Simülasyon sonucunda yapıların S11 ve S21 parametre değerleri yapıların MTM özellik gösterip göstermediğini teyit etmek için yazılım kodlamasının hazırlandığı MATLAB programına aktarılarak kodlama aktifleştirilmiş ve yapıların etkin dielektrik, etkin manyetik ve kırılma indisleri elde edilmiştir. Bu yapılar anten ile etkileşime girdirilerek en uygun üç yapı belirlenmiştir. Daha sonra YSA tekniği ile eğitim işlemi yapılıp bulunan değerler tahmin edilerek karşılaştırılması yapılmış ve uygun yapıya ulaşılmak istenmiştir. Kullanılan CST ve HFSS programlarının yazılımlarına bakıldığında uygulanan metotların NRW, FDTD, FIT ve FEM metotları gibi yöntemlerin olduğu görülmüş ve bu yöntemlerden yola çıkılarak anten ve MTM yapıları tasarlanmış ve analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır.

MYA ile etkileşime girdirilen MTM yapılar antenin rezonans frekansını değiştirmiştir. Bu beklenen bir durum olup asıl amacımız değişen frekanslarda S11 parametre değerini dB biriminde eksi değer olarak artırabilmektir. S11 değerinin isten şekilde iyileşmesini ışıma eğrilerinin incelenmesiyle antenin yönlülüğünün ve kazancının artırılması istenmiştir. Bazı yapıların MTM özellik göstermesine rağmen antenin verimliliğini artırmadığı gözlenmiştir. Diğer yapıların ise istenen şekilde S11'in, yönlülüğün, kazancın, ışıma veriminin ve toplam verimliliğin hep beraber iyileştirdikleri teyit edilmiştir. Yapıların YSA uygulamasında eğitimi sağlanarak da gerçekte bulunan değerlerle karşılaştırılmıştır.

MYA ile MTM yapılardan en uygun üç yapının üretimleri yapılıp ölçüm sonuçları analiz edilerek simülasyon ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Laboratuvar ortamı ve

kullanılan malzeme imkanlarından kaynaklı olarak antenin çalışma frekansı 5,65 GHz olarak analiz edilmiş ve bu değere göre MTM ile etkileşimi yapılmıştır. Etkileşim sonucu oluşan yeni rezonans frekansına göre iki boyutlu ışıma eğrilerinin MATS-1000 cihazında analizleri yapılarak ölçüm sonuçlarına ulaşılmıştır. Üretimi yapılan anten ve MTM yapılarının karşılaştırması gerçekleştirilip ışıma eğrilerindeki düzelmeler incelenmiş ve grafikleri Microsoft EXCEL programında karşılaştırmıştır.

Bu tez çalışması sonucunda rastgele ve simetrik şekilli yapıların anten ile etkileşimlerinde anten verimliliğine katkı sağladığı görülmüştür. Birçok yeni fikirlere de zemin hazırlayan bu çalışma sayesinde ileriki çalışmalarda bu mantık çerçevesinde birçok uygulama alanını da ilgilendirecek yeni fikirler ortaya çıkmıştır. Bir sonraki araştırmacıların da bu çalışma mantığında yeni fikirlerle çok daha özgün tasarımlar yaparak anten gibi farklı çalışma alanında uygulanması mümkün olan yenilikler yapmaları mümkündür.

Sonuç olarak YSA tekniği ile bir sonraki çalışmalara destek olabileceği düşüncesiyle bu teknikten faydalanılarak EM ortamlar için kullanılan parametre değerleri ile anten ve MTM tasarımlarındaki parametrelerin eğitimleri mümkün olup yeni algoritmaların geliştirmesi sağlanabilir.

Bu tez çalışmasında yapılan ikinci uygulama C şekilli SRR yapısı olmuştur. C şekilli metamalzeme özelliği gösteren SRR yapısı kullanılarak mikroşerit antenin rezonans frekansında S11 değeri en iyi değere getirilmek istenmiştir. Ayrıca CSRR yapısının ebatlarının değiştirmesi sonucu elde edilen 150 veri YSA tekniğinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. 150 veri YSA tekniği ile eğitim işlemine koyularak elde edilen rezonans frekansı ve S11 değerleri tahmin edilmiştir. Bu teknikle hangi yapının en iyi tahmin edileceği tespit edilmek istenmiştir. SRR yapısının farklı ölçüm değerleri antenle etkileşime koyularak YSA için gerekli veri seti hazırlanmıştır. Veriler YSA tekniği ile ağa eğitilmiştir.

Sonuç olarak SRR yapıların antenler gibi birçok uygulama alanları için de kullanılabileceği görülmüştür. YSA tekniğinin esnek kullanımı sayesinde, birçok alanda elde edilen verilerin gerçeğe yakın bir şekilde tahminler yaptığı görülmüştür ve iyi bir şekilde veriler arasında bağlantılar kurarak iyi bir eğitim yaptığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

Akgol, O., Bağmancı, M., Karaaslan, M., ve Ünal, E. (2017). Broad band MA-based on three-type resonator having resistor for microwave energy harvesting. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, *51* (2), 134-149.

Akdagli, A., ve Kayabasi, A. (2014). An accurate computation method based on artificial neural networks with different learning algorithms for resonant frequency of annular ring microstrip antennas. *Journal of Computational Electronics*, *13*(4), 1014-1019.

Ali, A., Hu, B., ve Ramahi, O. (2015). Intelligent detection of cracks in metallic surfaces using a waveguide sensor loaded with metamaterial elements. *Sensors*, *15* (5), 11402-11416.

Balanis, C. A. (1992). Antenna theory: A review. *Proceedings of the IEEE*, *80* (1), 7-23.

Balanis, C. A. (2005). Antenna Theory, Hoboken. *New Jersey: John Wiley ve Sons, Inc*, *8*, 21-31.

Chen, Z., Guo, B., Yang, Y., ve Cheng, C. (2014). Metamaterials-based enhanced energy harvesting: A review. *Physica B: Condensed Matter*, *438*, 1-8.

Clemens, M., ve Weiland, T. (2001). Discrete Electromagnetism With the Finite Integration Technique-Abstract. *Journal of electromagnetic waves and applications*, *15* (1), 79-80.

Clark, W. A., ve Farley, B. G. (1955, March). Generalization of pattern recognition in a self-organizing system. In *Proceedings of the March 1-3, 1955, western joint computer conference* (pp. 86-91). ACM.

Deschamps, G. A. (1953). Microstrip microwave antennas. In Proceedings of the Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program, Oct (pp. 18-22).

Deshmukh, A. A., Kulkarni, S. D., Venkata, A. P. C., ve Phatak, N. V. (2015). Artificial neural network model for suspended rectangular microstrip antennas. *Procedia Computer Science*, *49*, 332-339.

Deshmukh, A. A., Venkata, A. P. C., Nagarbowdi, S., ve Kulkarni, S. D. (2015, January). Artificial neural network model for suspended equilateral triangular microstrip antennas. In *Communication, Information ve Computing Technology (ICCICT), 2015 International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.

Deshmukh, A. A., Shukla, M., Patel, S., Labde, S., ve Venkata, A. P. C. (2018). Resonance Frequency Estimation for Equilateral Triangular Microstrip Antennas Using Artificial Neural Network Model. In *Proceedings of International Conference on Wireless Communication* (pp. 67-74). Springer, Singapore.

Dong, Y., Toyao, H., ve Itoh, T. (2012). Design and characterization of miniaturized patch antennas loaded with complementary split-ring resonators. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, *60* (2), 772.

Engheta, N., ve Ziolkowski, R. W. (Eds.). (2006). *Metamaterials: physics and engineering explorations*. John Wiley ve Sons.

Gopalakrishnan, R., ve Gunasekaran, N. (2005, March). Design of equilateral triangular microstrip antenna using artificial neural networks. In *Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, 2005. IWAT 2005. IEEE International Workshop on* (pp. 246-249). IEEE.

Gunduz, O. T., ve Sabah, C. (2016). Polarization angle independent perfect multiband metamaterial absorber and energy harvesting application. *Journal of Computational Electronics*, *15* (1), 228-238.

Karaaslan, M., 2009. Negatif kırılma indisli metamalzemelerin elde edilmesi, Doktora tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimle Enstitüsü*, 128 s, Adana.

Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., ve Sabah, C. (2017). Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications. *Optics Communications*, *392*, 31-38.

Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., Altıntaş, O., ve Sabah, C. (2018). Broad band metamaterial absorber based on wheel resonators with lumped elements for microwave energy harvesting. *Optical and Quantum Electronics*, *50* (5), 225.

Khan, I., Tian, Y. B., Vllah, H., Rahman, S. U., ve Kamal, M. M. (2018, May). Design Annular Ring Microstrip Antenna Based on Artificial Neural Network. In *2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)* (pp. 2033-2037). IEEE.

Lafmajani, I. A., ve Rezaei, P. (2011). Miniaturized rectangular patch antenna loaded with spiral/wires metamaterial. *European Journal of Scientific Research*, *65* (1), 121-130.

Luna, D. R., Vasconcelos, C. F. L., ve Cruz, R. M. S. (2013, August). Using natural optimization algorithms and artificial neural networks in the design of effective permittivity of metamaterials. In *Microwave ve Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International* (pp. 1-4). IEEE.

Marconi, G. (1897). Improvements in transmitting electrical impulses and signals, and in apparatus therefor. *British patent*, *12*, 039.

McCulloch, W. S., ve Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, *5* (4), 115-133.

Mehra, P., ve Wah, B. W. (1992). *Artificial neural networks: concepts and theory* (Vol. 680). Los Alamitos: IEEE Computer Society Press.

Nanda, S., Tripathy, A., Sahu, P. K., ve Mishra, R. K. (2016). IANN Method for Synthesis of Metamaterial. *Antenna Test & Measurement Society*.

Nejdi, I. H., Rhazi, Y., Lafkih, M. A., ve Bri, S. (2018, November). Designing Multiband Multilayered Microstrip Antenna for UMTS, ISM, Communication Satellite, HiperLAN and C-Band. In *2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)* (pp. 1-8). IEEE.

Munson, R. (1974). Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, *22* (1), 74-78.

Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J., ve Youngs, I. (1996). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical review letters*, *76* (25), 4773.

Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., ve Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, *47* (11), 2075-2084.

Rahimi, Z. (2011). The finite integration technique (FIT) and the application in lithography simulations, Doktora Tezi, *Friedrich-Alexsander Üniversitesi Mühandislik Fakültes*,132 s, Erlangen,

Rahimi, M., Zarrabi, F. B., Ahmadian, R., Mansouri, Z., ve Keshtkar, A. (2014). Miniaturization of antenna for wireless application with difference metamaterial structures. *Progress In Electromagnetics Research*, *145*, 19-29.

Rajaraman, G., Sood, K., ve Anbazhagan, S. (2013). A Novel Method to Compute Resonant Frequency of Metamaterial Based Patch Antennas Using Neural Networks.

Sadiku, M.N.O., 2000. Numerical Techniques in Electromagnetics, Second Edition. *CRC Press,* 760 p.

Sadiku, M. N. (1989). A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems. *IEEE Transactions on Education*, *32* (2), 85-93.

Sarmah, K., Sarma, K. K., ve Baruah, S. (2014, December). ANN based optimization of resonating frequency of split ring resonator. In *Computational Intelligence for Communication Systems and Networks (CIComms), 2014 IEEE Symposium on* (pp. 1-6). IEEE.

Singh, P., Singh, V. K., Lala, A., ve Bhoi, A. K. (2018). Design and Analysis of Microstrip Antenna Using Multilayer Feed-Forward Back-Propagation Neural Network (MLPFFBP-ANN). In *Advances in Communication, Devices and Networking* (pp. 393-398). Springer, Singapore.

Sivia, J. S., Pharwaha, A. P. S., ve Kamal, T. S. (2013). Analysis and design of circular fractal antenna using artificial neural networks. *Progress In Electromagnetics Research*, *56*, 251-267.

Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., ve Schultz, S. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical review letters*, *84* (18), 4184.

Srivastava, M., Saini, S., ve Thakur, A. (2018). Analysis and Parameter Estimation of Microstrip Circular Patch Antennas Using Artificial Neural Networks. In *Soft Computing: Theories and Applications* (pp. 285-292). Springer, Singapore.

Thakare, V. V., ve Singhal, P. (2010). Microstrip antenna design using artificial neural networks. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering: Co-sponsored by the Center for Advanced Manufacturing and Packaging of Microwave, Optical, and Digital Electronics (CAMPmode) at the University of Colorado at Boulder*, *20* (1), 76-86.

Türker, N., Güneş, F., ve Yildirim, T. (2007). Artificial neural design of microstrip antennas. *Turkish Journal of Electrical Engineering ve Computer Sciences*, *14* (3), 445-453.

Ünal, E., Bağmancı, M., Karaaslan, M., Akgol, O., Arat, H. T., ve Sabah, C. (2017). Zinc oxide–tungsten-based pyramids in construction of ultra-broadband metamaterial absorber for solar energy harvesting. *IET Optoelectronics*, *11* (3), 114-120.

Weiland, M. C. T. (2001). Discrete electromagnetism with the finite integration technique. *Progress In Electromagnetics Research*, *32*, 65-87.

Veselago, V. G. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of and μ. *Soviet physics uspekhi*, *10* (4), 509.

Yalçın, N. (2012). Sezgisel algoritma öğrenmeli yapay sinir ağları ile epilepsi hastalığının teşhisi *(Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).*

Yee, K. S., ve Chen, J. S. (1997). The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *45* (3), 354-363.

EKLER

EK-1. 40 MTM yapısının YSA'da eğitilmesi gerekli veriler.

Yapılar	Yapıların bit olarak gösterimi	S11(dB)	S21(dB)	epsilon_real	mue_real	n
MTM1	011110 010010 000000 000000 101101 111111	-1,233361355	-17,24117887	5,800516702	-26,46421718	-12,88239682
MTM2	111111 100001 001100 001100 100001 111111	-1,72228132	-7,67637039	-0,266509082	-22,19465663	-3,439401568
MTM3	110011 011110 000000 000000 011110 110011	-24,00586824	-0,759597105	-16,68924115	-12,53782902	-14,50073669
MTM4	111111 110011 000000 001100 111111 100001	-4,467696529	-2,539939706	-3,886145469	-16,86987935	-8,102797473
MTM5	111111 000000 110011 110011 000000 111111	-4,415364912	-3,222268084	-4,261898763	-21,09842444	-9,500537734
MTM6	101101 111111 000000 000000 111111 101101	-2,130348152	-9,073072554	3,661445398	-14,85086788	-15,17898653
MTM7	111111 101101 000000 000000 010010 111111	-1,61107198	-16,193064	5,175266007	-24,99942617	-11,45600673
MTM8	110011 111111 000000 000000 111111 110011	-30,40465293	-0,566893241	-13,05491791	-12,3871601	-12,72567519
MTM9	110011 100001 001100 001100 100001 110011	-3,432472816	-3,379409985	-3,326446131	-19,27108738	-8,009808103
MTM10	111111 110011 000000 000000 110011 111111	-10,23434014	-1,680959082	-20,41556056	-7,633363681	-14,55358413
MTM11	011110 000000 101101 101101 000000 011110	-1,119777247	-10,42578518	-0,094092073	-31,72258948	-3,186460348
MTM12	011110 000000 001100 001100 100001 110011	-1,653488634	-9,833703843	-1,026679634	-34,64658997	-6,290698186
MTM13	111111 000000 010010 010010 000000 111111	-3,682534	-3,174271045	-3,999791747	-21,95326985	-9,372937828
MTM14	110011 000000 101101 101101 000000 110011	-2,349716316	-8,141604485	-0,457017403	-22,49226801	-5,0118759
MTM15	111111 011110 000000 000000 011110 111111	-5,643991883	-4,833149794	-1,383452812	-17,28000266	-16,30407871
MTM16	101101 000000	-1,109723367	-12,39586637	-1,556483089	-69,71131198	-12,36034349

	011110 011110 000000 101101					
MTM17	111111 100001 101101 001100 000000 111111	-1,955618264	-9,337612973	0,175349148	-24,14752313	-4,227391944
MTM18	111111 100001 000000 000000 100001 111111	-9,845427473	-0,722110291	-7,033621593	-14,44469394	-10,07967714
MTM19	101101 000000 101101 101101 000000 101101	-1,250556433	-19,41887705	4,493380286	-35,15013198	-7,268591009
MTM20	101101 000000 111111 111111 000000 101101	-3,045259633	-3,858584231	-3,39152339	-22,64453357	-8,763933171
MTM21	100001 001100 011110 011110 001100 100001	-7,19538548	-1,701461921	4,617727924	0,016977991	16,58368401
MTM22	110011 000000 011110 011110 000000 110011	-2,755592347	-4,347585789	-3,558929946	-29,85981638	-10,31009879
MTM23	100001 001100 111111 111111 001100 100001	-5,439383543	-2,248095612	1,747413278	-4,166705945	-16,64087256
MTM24	111100 101111 000000 000000 101111 111100	-19,28936969	-0,412497902	-14,44883861	-10,65924219	-12,41454934
MTM25	111111 000000 111111 111111 000000 111111	-2,09657542	-5,938972675	-2,861051983	-35,78678561	-10,11868846
MTM26	110011 110011 000000 000000 111111 111111	-12,95018407	-1,890027625	-16,24279647	-9,943643534	-14,67243262
MTM27	111111 000000 101101 101101 000000 111111	-5,753178003	-3,116826236	-4,586428352	-18,03767621	-9,170564885
MTM28	110011 000000 110011 110011 000000 110011	-8,551230294	-0,976180489	-6,716563565	-16,00276168	-10,36744536
MTM29	111111 001100 100001 100001 001100 111111	-7,190540011	-4,126036648	-5,069090804	-18,42650012	-10,24422325
MTM30	111111 100001 001100 001100 100001 110011	-2,404364838	-5,957026071	-1,407854097	-20,54087261	-5,610213104
MTM31	110011 110011 000000 111111 000000 111111	-4,151173694	-5,581538882	-1,732505411	-16,40658512	-6,238845895
MTM32	101101 101101 000000 111111 000000 111111	-3,152630597	-7,029017655	-3,028067348	-31,77304237	-9,882034598
MTM33	101101 000000 110011 110011	-5,981146445	-1,640555552	-5,310560306	-17,16195025	-9,547194573

	000000 101101					
MTM34	111111 000000 001100 001100 100001 110011	-2,155195877	-8,205119225	-0,670521742	-24,22078181	-5,149324659
MTM35	110011 100001 001100 001100 100001 111111	-2,741113171	-5,253999165	-1,583799011	-18,61220599	-5,611241917
MTM36	111111 111111 000000 110011 000000 110011	-3,217776888	-4,107821296	-3,422189284	-23,25156014	-8,938497002
MTM37	111111 100001 001100 111111 000000 111111	-2,152494333	-9,690924165	3,43578346	-16,40700428	-14,97288164
MTM38	101101 111111 000000 000000 111111 111111	-2,665948516	-7,699811763	2,729124945	-13,64231118	-15,37997972
MTM39	101101 111111 000000 000000 110011 111111	-4,06305834	-4,995557883	0,778687128	-7,906674469	-15,35384242
MTM40	101101 111111 001100 000000 111111 110011	-11,36315749	-0,8380193	-24,47304598	-7,989308316	-14,09727562

EK-2: Tüm MTM yapıların MYA ile etkileşimin sonuçları

Epsilon (ε)	**Mue (μ)**	**Kırılma indisi (n)**	**Frekans GHz**	**S11 Simülasyon**	**Rad Eff (dB)**	**Tot Eff (dB)**	**Directivity (dBi)**	**Gain (dB)**
-11,340	-1,944	-4,845	4,95	-36,864	-2,089	-2,091	6,104	4,015
-10,928	-0,741	-2,897	4,83	-19,591	-2,989	-3,034	7,905	4,916
4,293	-3,831	-0,492	5,15	-14,175	-3,649	-3,824	6,779	3,939
-16,659	20,002	-0,980	5,14	-13,713	-3,375	-3,57	8,269	4,895
-13,507	-1,044	-3,804	5,03	-19,671	-3,034	-3,084	5,538	2,504
-11,277	-3,328	-6,133	4,91	-12,290	-3,054	-3,311	7,069	4,015
-16,947	0,297	-5,302	4,9	-18,178	-2,223	-2,292	4,55	2,327
-4,121	0,714	-0,286	5,18	-20,463	-2,28	-2,322	5,518	3,238
-8,013	9,189	-0,062	4,84	-27,078	-1,814	-1,822	5,584	2,872
-2,581	7,067	0,760	5,28	-17,682	-2,695	-2,773	6,584	3,609
-4,416	-5,064	-4,729	5,15	-17,914	-3,205	-3,280	8,324	5,119
-6,117	-8,923	-7,389	5,096	-16,534	-3,595	-3,697	8,550	4,955
-9,713	-0,985	-3,175	5,144	-36,500	-2,756	-2,757	7,434	4,706
-7,527	-1,671	-3,554	5,12	-18,383	-3,342	-3,409	7,686	4,345
-2,088	-4,370	-3,021	5,218	-19,386	-2,507	-2,561	6,572	4,278
-6,086	-6,682	-6,377	5,136	-52,365	-2,763	-2,763	7,621	4,843
-5,226	-2,999	-3,971	5,178	-24,199	-1,775	-1,794	7,279	5,504
-17,008	-0,942	-4,088	4,84	-21,905	-2,781	-2,806	6,764	3,983
-3,628	-3,378	-3,502	5,108	-18,592	-3,384	-3,448	8,310	4,926

-8,448	-4,257	-5,998	5,106	-16,864	-3,128	-3,223	7,966	4,838
8,067	-8,826	-0,024	5,14	-36,759	-2,498	-2,499	7,468	4,97
-8,865	-3,701	-5,732	5,148	-31,785	-2,851	-2,853	6,951	4,101
5,261	-5,535	-0,054	5,12	-29,354	-2,433	-2,533	7,441	5,115
-45,749	3,191	-0,522	4,99	-21,071	-2,612	-2,644	5,35	2,738
-9,654	-4,367	-6,494	5,064	-14,208	-3,982	-4,156	6,503	2,521
-10,702	11,351	-17,187	4,894	-17,400	-3,287	-3,362	6,717	3,43
-2,507	-2,233	-2,390	5,176	-47,038	-3,306	-3,306	6,712	3,406
-16,882	-0,185	-2,200	5,03	-18,218	-2,91	-2,98	7,073	4,163
11,374	-1,930	-0,302	5,13	-13,809	-3,983	-4,174	8,266	4,283
-12,076	0,438	-1,017	4,84	-22,017	-2,721	-2,746	5,644	2,923
-16,099	1,051	-1,201	4,9	-18,232	-3,066	-3,128	6,075	3,009
12,781	0,960	4,683	4,998	-28,267	-2,473	-2,481	6,933	4,46
-12,810	-1,304	-4,118	5,03	-22,416	-2,658	-2,686	6,924	4,266
-8,724	-11,177	-9,875	4,842	-23,682	-2,809	-2,826	5,604	2,795
-12,293	0,617	-0,882	4,84	-22,017	-2,721	-2,746	5,644	2,923
-12,712	-3,859	-7,010	4,918	-34,945	-1,685	-1,686	5,392	3,707
-13,466	-8,717	-10,836	4,43	-40,755	-2,313	-2,314	6,016	3,703
-10,781	-3,940	-6,521	4,88	-31,374	-1,667	-1,671	5,309	3,642
-9,403	9,737	-0,336	5,14	-16,749	-3,996	-4,094	8,448	4,452
12,808	-1,097	0,640	5,15	-42,185	-2,537	-2,538	7,724	5,186

EK-3: Gerçek değerler ve YSA'nın tahmin ettiği değerlerin karşılaştırılması

Yapılar	**Frekans GHz**	**YSA_FT**	**Yönlülük (dBi)**	**YSA_Y_Tahmini**	**Kazanç (dB)**	**Ysa_G_Tahmin**
Anten+MTM1	4,950	4,998	6,104	7,069	4,015	4,0125
Anten+MTM2	4,830	4,959	7,905	7,235	4,916	4,1833
Anten+MTM3	5,220	5,146	6,158	6,936	3,939	3,7960
Anten+MTM4	5,140	5,120	8,269	7,939	4,895	4,8825
Anten+MTM5	5,030	4,908	5,538	7,082	2,504	4,1382
Anten+MTM6	4,910	4,977	7,069	6,374	4,015	3,6317
Anten+MTM7	4,900	4,865	4,55	4,625	2,327	3,3374
Anten+MTM8	5,180	5,132	5,518	5,935	3,238	2,6739
Anten+MTM9	5,270	4,956	5,177	7,325	2,872	4,1272
Anten+MTM10	5,280	5,265	6,32	6,364	3,609	3,3368
Anten+MTM11	5,150	5,131	8,324	8,206	5,119	5,1321
Anten+MTM12	5,096	5,050	8,550	7,831	4,955	4,9532
Anten+MTM13	5,144	5,027	7,434	7,372	4,706	4,2616
Anten+MTM14	5,120	5,139	7,686	7,555	4,345	4,3884
Anten+MTM15	5,218	5,134	6,572	7,170	4,278	4,4450
Anten+MTM16	5,136	5,082	7,621	8,147	4,843	4,9448

Anten+MTM17	5,178	5,179	7,279	7,760	5,504	4,6306
Anten+MTM18	4,840	4,905	6,764	6,133	3,983	4,0054
Anten+MTM19	5,108	5,167	8,310	7,450	4,926	4,5880
Anten+MTM20	5,106	5,092	7,966	7,410	4,838	4,1407
Anten+MTM21	5,140	5,140	7,468	7,871	4,97	4,9554
Anten+MTM22	5,148	5,093	6,951	7,371	4,101	4,1011
Anten+MTM23	5,120	5,134	7,441	7,170	5,115	4,3037
Anten+MTM24	4,990	4,999	5,35	5,332	2,738	2,7321
Anten+MTM25	5,064	5,038	6,503	6,768	2,521	3,7888
Anten+MTM26	4,894	4,852	6,717	6,492	3,43	3,4320
Anten+MTM27	5,176	5,186	6,712	6,765	3,406	3,8379
Anten+MTM28	5,030	4,965	7,073	6,806	4,163	3,8830
Anten+MTM29	5,130	5,160	8,266	7,748	4,283	4,6240
Anten+MTM30	4,840	4,866	5,644	6,057	2,923	3,0703
Anten+MTM31	4,900	4,993	6,075	6,455	3,009	3,2847
Anten+MTM32	4,998	5,001	6,933	6,953	4,46	4,5195
Anten+MTM33	5,030	4,926	6,924	7,100	4,266	4,1205
Anten+MTM34	4,842	4,867	5,604	6,135	2,795	2,7487
Anten+MTM35	4,840	4,869	5,644	5,986	2,923	2,9585
Anten+MTM36	4,918	4,850	5,392	5,470	3,707	3,2229
Anten+MTM37	4,430	4,417	6,016	5,696	3,703	3,7124
Anten+MTM38	4,880	4,989	5,309	6,345	3,642	3,5820
Anten+MTM39	5,140	5,066	8,448	7,780	4,452	4,4226
Anten+MTM40	5,150	5,142	7,724	7,864	5,186	5,0116

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : SAĞIK, Metin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 14.10.1992, Hatay
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (539) 626 5051
Faks :
e-mail : metinsagik@hotmail.com.tr

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet Tarihi**
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Erciyes Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2016
Lisans	Erciyes Üniversitesi / Makine Mühendisliği (Çift Anadal)	2016
Lise	Atatürk Lisesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-2018	DÖRTYOL MESLEK YÜKSEKOKULU	Kısmi Zamanlı Öğretim Görevlisi
2017-2017	DÖRTYOL MESLEK YÜKSEKOKULU	Kısmi Zamanlı Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Sağık, M., Karaaslan, M., Ünal, E., Karadağ, F., ve Özdemir, E. (2018). Design Of Metamaterial Structure With Genetic Algorithm For Antenna Gain Improvement. *5th*

Internatıonal conference on materials science and advanced-nanotechnologies for next generation (MSNG2018), (s. 100-104). Nevşehir.

Sağık, M., Karaaslan, M., Ünal, E., Karadağ, F., ve Akgöl, O. (2018). Increasing The Gain Of Different Antenna Types Using A Metamaterial Based Structure. *5th Internatıonal conference on materials science and advanced-nanotechnologies for next generation (MSNG2018),* (s. 105-108). Nevşehir.

Hobiler

Basketbol, Futbol, Kitap okuma, Okçuluk

DİZİN

A

Abstract v, vii
Açısal genişlik 60, 62
Aktivasyon 37, 38, 39
Ana lob 17
Ayrık halka rezonatör 7

B

Bakır 45, 46, 49, 50

C

CSRR ix, x, xv, 4, 6, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 97, 98, 100
CST iv, x, xii, xv, 2, 27, 29, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 55, 65, 66, 67, 72, 73, 84, 87, 97, 99

D

Dielektrik x, xii, xv, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 32, 46, 53, 54, 56, 70,
Dipol xi, 1, 11, 12, 34
DNG xv, 23, 24, 26, 29, 52, 53
DPS 23, 24, 26

E

EKLER ix, 105, 112
Elektrik xiii, 3, 5, 9, 10, 18, 24, 25, 26, 29, 30, 55, 66, 87
Elektrik alan xiii, 3, 9, 18, 24, 26, 29, 30, 66, 87
Elektrik alan dağılımı 65, 66
Elektromanyetik iv, 1, 10, 18, 24,

F

Farfield 17
FDTD viii, xv, 29, 30, 32, 33,
FR4 15, 16, 23, 45, 46, 47, 49
Fraktal 7
Frekans x, xv, 4, 7, 8, 39, 40, 41, 53, 54, 58, 82, 84, 85, 87, 96

G

Genetik algoritma 39

H

Haberleşme 11, 36, 43
HFSS viii, x, xiv, xvi, 2, 27, 29, 33, 34, 43, 47, 67, 68, 99
Horn anten xi, 12

I,İ

ışıma diyagramı 11
ışıma eğrisi xii, xiii, 16, 17, 40, 49, 55, 74, 85
Iletim katsayısı 28
iterasyon 33, 78, 95

K

Kayıp tanjant 47, 49
Kaynaklar ix, 101
Kılavuz 10, 18
Kırılma iv, xv, 2, 3, 14, 28, 29, 43, 51,54, 55, 87, 99, 102
Kırılma indisi x, xii, 3, 26, 27, 28, 29, 43, 52, 56, 75, 88

L

Literatür iv, 3, 6, 39, 84, 113

M

Manyetik iv, x, xv, 1, 2, 9, 10, 17, 18, 22, 28, 29, 49, 51, 56,
Manyetik alan dağılımı 65, 66
MATLAB iv, v, 2, 27, 28, 29, 39, 43, 50, 51, 93, 95, 99
Maxwell 9, 24, 25, 29, 33, 104
Mercek antenler 13
Metamalzemeler 1, 3, 4, 5, 16, 23
mikroşerit iv, xi, 1, 8, 11, 13, 15, 46, 47, 58, 59, 67, 71, 84, 100
Monopol iv, 1, 11, 12, 34
MSE x, xiv, xv, 77,82, 94, 95
MTM iv, v, xiv, 1, 2, 3, 9, 21, 23, 24, 27, 40, 56, 57, 58, 68, 71, 72, 76, 83, 105, 107

O

Onaylama x, xiv, 76, 77, 78, 79, 93, 94, 95, 96

Ö

Özet iv, vii
Özgeçmiş ix, 110

P

Phi x, xii,17, 48, 59, 60, 61, 62, 63, 68, 69, 90, 91, 92
Polarizasyon 4, 16
Poynting Vektörü 18

R

Radar 11, 15
Radyo 11
Rayleigh 17
Rezonans frekansı 4, 6, 7, 44, 46, 47,69, 71, 73, 84, 89, 92, 100
rezonatör, 4

S

S11, iv, v, xiv, xv, 27, 28, 43, 45, 56, 57, 58, 59, 66, 67, 68, 85, 86, 90, 92, 93, 100, 105,
Sensor, 5
Sigmoid, xi, 38
Sinir, iv, xi, 1, 5, 6, 21, 34, 35, 37, 50, 75, 79, 82, 84, 95, 96, 104
Snell, 1
SRR, ix, xvi, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 92, 98, 1

V

Veselago, 1, 3, 22, 104

Y

Yansıma katsayısı, 20, 28
Yansıtıcı antenler, 13
Yapay, iv, 1, 2, 5, 6, 7, 8, 21, 34, 35, 36, 39, 50, 75, 84, 104
YSA, iv, viii, ix, x, xv, xvi, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 36, 37, 38, 39, 43, 44, 50, 51, 75, 77, 78, 79, 80, 87, 92, 93, 94, 100, 105, 108
Yüzey akım dağılımı, xiii, 65, 66



TEKNOVERSİTE

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE