



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**FRAKTAL ANTEN PARAMETRELERİNİN
METAMALZEMELER YARDIMIYLA
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Emine Ceren DOĞAN

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

MAYIS 2019



**FRAKTAL ANTEN PARAMETRELERİNİN METAMALZEMELER
YARDIMIYLA İYİLEŞTİRİLMESİ**

Emine Ceren DOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK ANABİLİM DALI**

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

MAYIS 2019

Emine Ceren DOĞAN tarafından hazırlanan “FRAKTAL ANTEN PAREMETRELERİNİN METAMALZEMELER YARDIMIYLA İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Emin ÜNAL

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi)

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



Başkan: Prof. Dr. Bekir ÖZÇELİK

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Atom ve Moleküler Fiziği, Çukurova Üniversitesi)

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



Üye : Doç. Dr. Emin ÜNAL

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi)

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



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan AKGÖL

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi)

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



Tez Savunma Tarihi: 31/05/2019

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



ETİK BEYAN

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

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

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



Emine Ceren DOĞAN

31/05/2019

FRAKTAL ANTEN PARAMETRELERİNİN METAMALZEMELER YARDIMIYLA
İYİLEŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Emine Ceren DOĞAN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Metamalzemeler (MTM) doğada bulunmayan, yapay olarak istenilen amaca uygun bir şekilde tasarlanan ve üretilen malzemelerdir. Son yıllarda, gizleme (Shelby, Smith, & Schultz, 2001), süper lensler (Pendry, Schurig, & Smith, 2006), antenler (Fang, Lee, Sun, & Zhang, 2005), emici (Bakir, ve diğerleri, 2018;Akgol, ve diğerleri, 2017;Bakir, Karaaslan, Unal, Akgol, & Sabah, 2017)ve sensörler (Altintas, Aksoy, Unal, Karakasli, & Karaaslan, 2018;Akgol, Karaaslan, Unal, & Sabah, 2017) gibi farklı MTM uygulama alanları üzerine yapılan çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. Anten boyutlarının küçültülmesi ve performansının iyileştirilmesi metamalzemelerin anten uygulamalarından bazılarıdır. Geleneksel antenlere göre daha avantajlı oldukları için anten olarak bu çalışmada Fraktal antenler tercih edilmiştir.

Bu tez çalışmasında Sonlu İntegrasyon Tekniği temelli bir simülasyon programı kullanılmıştır. Simülasyon programı yardımıyla aralarındaki oran sabiti 0,65 olan dairesel şekillerden oluşan fraktal anten tasarlanmış ve boyutları optimize edilmiştir. Bu çalışmada eşkenar dörtgen ve eliptik olmak üzere 2 farklı MTM yapısı tasarlanmıştır. Birinci tasarımda, eşkenar dörtgen yamadan oluşan birim hücreler 2x4 dizi şeklinde FR4 üzerine yerleştirilmiştir. Her yapının toplam boyutu 38x38 mm'dir. İkinci tasarımda eşkenar dörtgen yama yerine hücre boyutları aynı olan eliptik şekiller yerleştirilmiştir. İki MTM yapısının simülasyon sonucunda elde edilen (yansıma) S11 ve (iletim) S21 parametre değerleri kullanılarak yapının etkin dielektrik sabiti(ϵ), etkin manyetik geçirgenliği(μ) ve kırılma indisi (n) değerleri hesaplanmış ve çalışma frekansında bu değerlerin negatif olduğu görülmüştür. 2x4 birim hücreden oluşan farklı sayıda MTM yapı anten üzerine 90 derece açıyla yerleştirilmiş ve bu yapıların antenin S11 değeri, yönlülüğü ve kazancı üzerine etkileri araştırılmıştır. Fraktal antenin 2 ve 3 boyutlu ışıma eğrileri de ayrıca incelenmiştir.

Anten ve MTM yapılarının üretimi laboratuvarında yapılmış ve ölçümler PNA L N5234A Network Analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, nümerik ve deneysel sonuçlar birbirleri ile literatür sonuçları dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçlarının ve deneysel sonuçların birbiri ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, MTM yapılarının antenin yönlülüğünü, kazancını, verimini, bant genişliğini arttırdığı, S11 değerini ve ışıma açısı genişliğini azalttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Metamalzeme, fraktal anten, minyatürleşme, UWB, Ultra geniş bant

Sayfa Adedi : 91

Danışman : Doç. Dr. Emin ÜNAL

IMPROVEMENT OF FRACTAL ANTENNA PARAMETERS BY METAMATERIALS
(M. Sc. Thesis)

Emine Ceren DOĞAN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

May 2019

ABSTRACT

Materials that are not found in nature, which can be artificially designed and produced for the desired purpose are called Metamaterials (MTM). In recent years, studies on different fields of application of MTMs such as cloaking, super lenses, antennas, absorber and sensors have increased significantly. Reducing the antenna size and improving its performance are some of the antenna applications of MTMs. In this study, fractal antennas, which are known to be more advantageous than conventional antennas, are preferred as wave emitting elements.

In this thesis, a simulation program based on Finite Integration Technique is used. With the help of simulation program, the fractal antenna consisting of circular shapes with a ratio constant of 0.65 is designed and optimized in size. In this study, two different MTM structures, rhombus and elliptic, were designed. In the first design, the unit cells consisting of the rhombic patch are arranged on the FR4 in the form of a 2x4 array. The overall size of each sample is 38x38 mm. In the second design, elliptical shapes with identical dimensions of cells are replaced by a rhombus patch. The values of effective dielectric constant (ϵ), effective magnetic permeability (μ) and refractive index (n) of the structure are calculated using the parameter values of S11 and S21 obtained from the simulation of two MTM structures and these values are found to be negative at the working frequency. A different number of MTM structures consisting of 2x4 units of cells are placed on the antenna at an angle of 90 degrees and the effects of these structures on the S11 value, directivity and gain of the antenna are investigated. The 2 and 3 dimensional radiation patterns of the fractal antenna are also examined.

Antenna and MTM structures are fabricated in the laboratory and measurements are made by using PNA L N5234A Network Analyzer. As a result, numerical and experimental results are compared with each other by considering literature results. The results show that the simulation results and experimental results are in good agreement. In addition, it is observed that MTM structures increased antenna directivity, gain, efficiency, bandwidth, decreased S11 value and radiation angle width.

Key Words : Metamaterial, fractal antenna, miniaturization, UWB, Ultra Wide Band
Page Number : 91
Supervisor : Assoc. Prof. Dr.Emin ÜNAL

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesinde yardımcı olan, araştırmalar esnasında sabır ve özveriyle beni yönlendiren değerli bilgilerini benden esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Emin ÜNAL'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez konumun belirlenmesinde yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN ve Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan AKGÖL'e, maddi, manevi desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması süresi boyunca bilgilerini benden esirgemeyen, antenlerin üretimi ile ölçümlerine yardımcı olan Araştırma Görevlileri Olcay ALTINTAŞ ile Fatih Özkan ALKURT'a ve Yüksek Lisans arkadaşlarımdan Şekip DALGAÇ ile Metin SAĞIK'a teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın her anında yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen canım AİLEM'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. FRAKTAL ANTENLER VE METAMALZEMELER	6
3.1.Fraktal Anten Çeşitleri	7
3.1.1. Koch Anten	7
3.1.2. Sierpinski Gasket Fraktal Anten.....	8
3.1.3. Sierpinski Carpet Fraktal Anten	9
3.1.4.Hilbert Curve Anten	9
3.2.Metamalzemeler	10
4. 4. MATERYAL VE YÖNTEMLER	14
4.1. Sayısal Yöntemler	14
4.2. Zaman Domainde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu.....	14
4.3. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM).....	14
4.4. Sonlu İterasyon Tekniği (FIT).....	15
4.5 Üretim ve Ölçüm Cihazları	16
5. ARAŞTIRMA BULGULARI, UYGULAMALARI VE TARTIŞMA.....	18

	Sayfa
5.1. Fraktal Anten Tasarımı ve Sonuçları	18
5.2. MTM Yapıların Oluşturulması ve Analiz Sonuçları.....	21
5.3 Fraktal Anten+MTM Yapılarının Tasarımı ve Karşılaştırılması.....	25
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	71
DİZİNLER	72



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Fraktal antenin 5,47 GHz için boyutları	19
Çizelge 5.2. Fraktal anten üzerine çeşitli mesafelerde konulan MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışırma büyüklüğü, yan loblardaki ışırma büyüklüğü ve ışırma açısı değerleri.....	36
Çizelge 5.3. Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan 2MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışırma büyüklüğü, yan loblardaki ışırma büyüklüğü ve ışırma açısı değerleri.....	41
Çizelge 5.4. Fraktal anten üzerine çeşitli mesafelerde konulan MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışırma büyüklüğü, yan loblardaki ışırma büyüklüğü ve ışırma açısı değerleri.....	45
Çizelge 5.5. Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan 2 MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışırma büyüklüğü, yan loblardaki ışırma büyüklüğü ve ışırma açısı değerleri.....	49
Çizelge 5.6. Fraktal anten üzerine çeşitli mesafelerde konulan MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışırma büyüklüğü, yan loblardaki ışırma büyüklüğü ve ışırma açısı değerleri.....	52
Çizelge 5.7. Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan 2 MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışırma büyüklüğü, yan loblardaki ışırma büyüklüğü ve ışırma açısı değerleri.....	55
Çizelge 5.8. Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışırma büyüklüğü, yan loblardaki ışırma büyüklüğü ve ışırma açısı değerleri.....	59
Çizelge 5.9. Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan 2 MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışırma büyüklüğü, yan loblardaki ışırma büyüklüğü ve ışırma açısı değerleri.....	62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Koch fraktal (Kar tanesi) (Mete, 2011)	7
Şekil 3.2. Sierpinski ara levhası	8
Şekil 3.3. Sierpinski halı (Shareef, 2015)	9
Şekil 3.4. Hilbert şekli oluşum adımları (Shareef, 2015)	9
Şekil 3.5. Malzemelerin sınıflandırılması ((Engheta & Ziolkowski, 2016)	10
Şekil 3.6. Poynting vektörü (S) ile dalga vektörünün (k^{\rightarrow}), (a) DPS, (b)DNG ortamlardaki davranışları	12
Şekil 4.1. Fraktal anten+ MTM yapısının Network Analiz cihazı ile ölçülmesi	15
Şekil 4.2. İki boyutlu ışınma eğrisinin ölçümü için gerekli düzenek	15
Şekil 5.1 . Fraktal antenin metal ve dielektrik malzemesi; (a) ön kısım, (b) arka kısım	16
Şekil 5.2. Fraktal anten için sayısal olarak elde edilen S11 grafiği	17
Şekil 5.3. Fraktal antenin fabrikasyonu a) ön kısım b) arka kısım	17
Şekil 5.4. Fraktal antenin sayısal ve deneysel S11 grafiği.....	18
Şekil 5.5. Fraktal antenin $\Phi=0$ derecede uzak alan ışınma eğrisi b) fraktal antenin yönlülüğünün üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi	20
Şekil 5.6. Fraktal anten şekli.....	21
Şekil 5.7. Fraktal antenin yarıçapının frekansa göre değişim grafiği	21
Şekil 5.8. Tasarlanan MTM yapılarının önden görünüşü	22
Şekil 5.9. MTM yapısının (a) sınır şartları b) dalga sinyali grafiği	22
Şekil 5.10. Eşkenar dörtgen MTM yapısının reel ve sanal (a) dielektrik sabiti, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi	23
Şekil 5.11. Elips şeklinde MTM yapısının reel ve sanal (a) dielektrik sabiti, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi	24
Şekil 5.12. a) MTM yapısının önden görünüşü, Tasarlanan anten ve 1 MTM yapısının görüntüleri b) sayısal c) deneysel ölçüm şekli	25

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. Anten ve anten+1mtm S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu ...	25
Şekil 5.14. Anten ile 1MTM'nin üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç.....	26
Şekil 5.15. Fraktal anten ve 1MTM yapısının 2 boyutlu ışıma eğrisi grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu	26
Şekil 5.16. Tasarlanan anten ve 2 MTM yapısının görüntüleri a) sayısal b) deneysel ölçüm	27
Şekil 5.17. Anten ve anten+2mtm S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu	27
Şekil 5.18. Anten ile 2 MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç.....	28
Şekil 5.19. Fraktal anten ve 2MTM yapısının 2 boyutlu ışıma eğrisi grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm.....	28
Şekil 5.20. Tasarlanan anten ve +3 MTM yapısının simülasyon görüntüsü.....	29
Şekil 5.21. Anten ve anten+3 MTM yapısının S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu	29
Şekil 5.22. Anten ile 3 MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç	29
Şekil 5.23. Fraktal anten ve 3 MTM yapısının 2 boyutlu ışıma eğrisi grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm	30
Şekil 5.24. Tasarlanan anten ve 1 MTM yapısının görüntüleri a) sayısal b) deneysel ölçüm	30
Şekil 5.25. Anten ve anten+1MTM yapısının S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu	31
Şekil 5.26. Anten ile 1MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç	31
Şekil 5.27. Fraktal anten ve 1MTM yapısının 2 boyutlu ışıma eğrisi grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm	32

Şekil	Sayfa
Şekil 5.28. Tasarlanan anten ve 2 MTM yapısının görüntüleri a) sayısal b) deneysel ölçüm	32
Şekil 5.29. Anten ve anten+2MTM yapısının S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu	33
Şekil 5.30. Anten ile 2MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışımaya eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç	33
Şekil 5.31. Fraktal anten ve 2 MTM yapısının 2 boyutlu ışımaya eğrisi grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm	33
Şekil 5.32. Tasarlanan anten ve 3 MTM yapısının sayısal görüntüsü	34
Şekil 5.33. Anten ve anten+3 MTM yapısının S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu	34
Şekil 5.34. Anten ile 3MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışımaya eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç	35
Şekil 5.35. Fraktal anten ve 3 MTM yapısının görüntüleri a) sayısal b) deneysel ölçüm	35
Şekil 5.36. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simülasyon programında 2 boyutlu gösterimi b) simülasyon programında 3 boyutlu şekli c) ölçüm düzeneği ..	36
Şekil 5.37. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c), (e) ve (g) simülasyon sonuçları, (b), (d), (f) ve (h) deneysel ölçüm sonuçları	37
Şekil 5.38. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=22,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu	38
Şekil 5.39. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=20,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu	38
Şekil 5.40. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=12,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu	39
Şekil 5.41. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=10,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu	39

Şekil	Sayfa
Şekil 5.42. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri	
a) (x=22,40 mm) b) (x=12,40 mm).....	40
Şekil 5.43. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simüle edilmiş 2 boyutlu gösterimi	
b) simüle edilmiş 3 boyutlu şekli c) üretim şekli	40
Şekil 5.44. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler;	
(a), (c), (e) simülasyon sonuçları, (b), (d), (f) ve ölçüm sonuçları.....	42
Şekil 5.45. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=12,40 mm) Phi=0 derecede	
yönlülüğünün uzak alan ışına eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	43
Şekil 5.46. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=15,40 mm) Phi=0 derecede	
yönlülüğünün uzak alan ışına eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	43
Şekil 5.47. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=18,40 mm) Phi=0 derecede	
yönlülüğünün uzak alan ışına eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	44
Şekil 5.48. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri	
a) (x=12,40 mm) b) (x=18,40 mm).....	44
Şekil 5.49. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi	
b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli	45
Şekil 5.50. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler;	
(a), (c), (e) simülasyon sonuçları, (b), (d), (f) ölçüm sonuçları	46
Şekil 5.51. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=11,53 mm) Phi=0 derecede	
yönlülüğünün uzak alan ışına eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	47
Şekil 5.52. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=21,40 mm) Phi=0 derecede	
yönlülüğünün uzak alan ışına eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	47
Şekil 5.53. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=23,40 mm) Phi=0 derecede	
yönlülüğünün uzak alan ışına eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	48
Şekil 5.54. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize	
görüntüleri a) (x=11,53mm) b) normalize (x=21,40mm).....	48
Şekil 5.55. Fraktal anten+2MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi	
b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli	49

Şekil	Sayfa
Şekil 5.56. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler;(a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları.....	50
Şekil 5.57. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=12,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	50
Şekil 5.58. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=15,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	51
Şekil 5.59. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) (x=12,40 mm) b) (x=15,40 mm).....	51
Şekil 5.60. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli.....	52
Şekil 5.61. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları.....	53
Şekil 5.62. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=10 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	53
Şekil 5.63. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=20 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	54
Şekil 5.64. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) (x=10.00 mm) b) (x=20,00 mm).....	54
Şekil 5.65. Fraktal anten+2MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli.....	55
Şekil 5.66. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları.....	56
Şekil 5.67. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=17,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	57
Şekil 5.68. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=19,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	57
Şekil 5.69. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=22,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışımaya eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.70. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) (x=19,40mm) b) (x=23,40mm) normalize hali.....	58
Şekil 5.71. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) ölçüm düzeneği.....	59
Şekil 5.72. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları.....	60
Şekil 5.73. Fraktal antenin ve 1 MTM yapısının (x=12 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	60
Şekil 5.74. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=20 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu	61
Şekil 5.75. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize edilmiş görüntüleri a) (x=12 mm) b) (x=20 mm)	61
Şekil 5.76. Fraktal anten+2 MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli	62
Şekil 5.77. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları.....	63
Şekil 5.78. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=14,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	64
Şekil 5.79. Fraktal antenin ve 2 MTM yapısının (x=15,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu.....	64
Şekil 5.80. Fraktal anten ve 2 MTM yapısının deneysel ölçüm normalize edilmiş görüntüleri a) (x=14,40 mm) b) (x=15,40 mm)	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
D	Elektrik Akı Yoğunluğu
dB	Desibel
E	Elektrik Alan Şiddeti
GHz	Gigahertz
H	Manyetik Alan Şiddeti
J_e	Elektrik Akım Yoğunluğu
J_m	Manyetik Akım Yoğunluğu
k	Dalga Vektörü
m²	Metrekare
n	Kırılma İndisi
R	Konum Vektörü
S	Poynting Vektörü
S₁₁	Yansımaya Katsayısı
S₂₁	İletim Katsayısı
σ	Elektriksel İletkenlik
δ	Kayıp Tanjantı
ϵ	Dielektrik Sabiti
ϵ_0	Boş Uzayın Dielektrik Sabiti
ϵ_r	Bağıl Dielektrik Sabiti
ϵ''	Dielektrik Sabitinin Sanal Kısmı
μ	Manyetik Geçirgenlik
μ_0	Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği
μ_r	Bağıl Manyetik Geçirgenlik
μ''	Manyetik geçirgenliğin Sanal Kısmı
ω	Açısal Frekans

Kısaltmalar**CPW****CSRR****DPS****EBG****EM****ENG****FEM****FDTD****FIT****FR4****GPS****HMA****LHM****MNG****MTM****PEC****PMC****SRR****TEM****UWB****Wi-fi****WLAN****Açıklamalar**

Eş Düzlemsel Dalga Kılavuzu

Tamamlayıcı Ayrık Halka Rezonatörü

Çift Pozitif

Elektromanyetik Bant Aralığı

Elektromanyetik

Epsilon Negatif

Sonlu Elemanlar Metodu

Zamanda Sonlu Farklar Metodu

Sonlu İntegrasyon Tekniği

Çift Yüzlü Bakır Plaket

Küresel Konumlama Sistemi

Hilbert Minkowski Anteni

Sol-elli Malzeme

Mü Negatif

Metamalzeme

Mükemmel Elektrik İletken

Mükemmel Manyetik İletken

Ayrık Halka Rezonatörü

Enine Elektromanyetik Dalga

Ultra Geniş Bant

Kablosuz Bağlantı Alanı

Kablosuz Yerel Alan Ağ

1. GİRİŞ

Kablosuz iletişim sistemlerinde antenlerin büyük bir rolü vardır. Ancak geleneksel antenlerin tekli rezonans frekansına sahip olmaları, fiziksel boyutları, kazanç, verim ve yönlülükte sınırlı olmaları gibi sınırlandırmalara sahiptirler (Balanis, 2005). Bu sınırlandırmaları aşmanın 2 çözümü vardır. Birincisi antenler üzerine fraktal şekiller uygulayarak fraktal anten tasarlamaktır. Fraktal antenler kendine benzerlik özelliği ile geniş frekans dizisine ve multiband davranış gösterirken, boşluk doldurma özelliği sayesinde de anten boyutunda küçülme (minyatürleşmeyi) sağlar. Fraktal antenlerin kendine benzerlik ve boşluk doldurma özelliklerinden dolayı bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar son yıllarda hızlı bir şekilde artmaktadır. İkinci yolu ise anten üzerine MTM yapısı uygulamaktır.

Bu tez çalışmasında dairesel şekillerden oluşan fraktal anten tasarlamak ve anten parametrelerini (kazanç, verim, yönlülük, vb.) MTM yapılarını kullanarak en iyi hale getirmek amaçlanmıştır.

Metamalzemeler (MTM); doğada bulunmayan, laboratuvar ortamında yapay olarak üretilen, periyodik yapılardan meydana gelen malzemelerdir. Metamalzemeler solak malzemeler ve çift negatif materyaller olarak da adlandırılırlar. Bir ortamın EM özelliklerini belirlemek için iki önemli parametre vardır. Bunlar dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenlik katsayısı (μ)'dır. Bu parametreler kullanılarak elde edilen kırılma indisi,

$$n^2 = \mu \cdot \epsilon \quad (1.1)$$

şeklindedir. μ, ϵ değerleri pozitif olduğunda kırılma indisinin de pozitif olduğu Eş. 1.1'de görülmektedir. Doğada bulunan malzemeler sağ el kuralına uymaktadır ve sağ eli malzemeler olarak bilinirler. Sol eli malzemeler ile ilgili teorik kuramı ilk olarak 1968 yılında Rus bilim adamı Victor G. Veselago tarafından yapılmıştır (Veselago, 1968). Veselago çalışmasında belirli frekans aralığında dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenlik katsayısının (μ) eşzamanlı olarak negatif olduğu bir ortamın elektromanyetik özelliklerini araştırmıştır. Bu ortamda yayılan dalganın manyetik alan vektörü (\vec{H}), dalga

yönü vektörü (\vec{k}) ve elektrik alan vektörlerinin (\vec{E}) yönlerinin sol el kuralına uyduğu not edilmiştir (Veselago, 1968). Ayrıca, Metamalzemelerin Snell yasası, Doppler olayı ve Cerenkov ışınması gibi olaylarda normal malzeme davranışı göstermediği de ortaya konulmuştur. (Karaaslan, 2009). Böyle bir ortamın doğada somut olarak var olmaması nedeniyle Veselago'nun çalışmaları önceleri ilgi görmemiş ve yaklaşık 30 yılın sonunda Pendry ve arkadaşları 1996 yılında dielektrik sabiti negatif olan yapay malzemelerin elde edilebileceği gösterilmiştir. (Pendry J. , Holden , Stewart, & Youngs, 1996). 1999 yılında ise manyetik geçirgenliği negatif olan yapay malzemelerin elde edilebileceği gösterilmiştir. (Pendry J. , Holden, Robbins, & Stewart, 1999). Daha sonra Smith ve ark. 2000 yılında dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenlik katsayısının (μ) eşzamanlı olarak negatif olan MTM yapısını üretmişlerdir (Smith, Padilla, Vier, Nemat-Nasser, & Schultz, 2000).

Giriş bölümünde tezin amacı, çözümlenmesi hedeflenen problemin ne olduğu, araştırma esnasında kullanılacak yöntemlerden bahsedilmiştir. Bölüm 2'de yapılan literatür taraması sonucunda yapılan diğer çalışmalardan bahsedilmiştir. Bölüm 3'de Materyal ve Yöntemlere yer verilmiş olup araştırma sırasında kullanılan metotlardan bahsedilmiş ve fraktal anten ve MTM yapılarının tasarımı ve üretimi esnasında kullanılan cihazlar açıklanmıştır.

Bölüm 4'de Araştırma Bulguları, Uygulamaları ve Tartışma kısmına yer verilmiştir. Burada tasarlanan fraktal anten ve MTM yapılarının tasarımı, simülasyon ve fabrikasyon sonuçları detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca MTM yapılarının metamalzeme özelliği gösterdiği deneysel ve sayısal olarak gösterilmiştir. Fraktal anten üzerine MTM yapılarının yerleştirilmesiyle oluşturulan birçok numunenin simülasyon ve deneysel sonuçlarına yer verilmiş ve metamalzemelerin fraktal anten parametreleri üzerine olan etkileri tartışılmıştır.

Bölüm 5'te Sonuç ve Önerilere yer verilmiş olup burada ele alınan problemden, kullanılan yöntem ve araştırma sonucunda elde edilen verilerden bahsedilip, yorumlar yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Fraktal antenler küçük kesit alanına, çoklu rezonans frekansına ve geniş bant genişliğine sahiptirler. Düşük maliyetlidirler, düşük yan loblara sahiptirler, ayrıca daha güvenilir oldukları için bu antenlere ilgili yapılan çalışmalar gittikçe artmaktadır. Aşağıda fraktal antenlerle ilgili yapılan çalışmalardan bazıları ile metamalzeme yapılarının fraktal antenlerle birlikte kullanıldığı çalışmalardan bazıları özetlenmiştir.

Jena ve arkadaşları 2013 yılında Sierpinski halı geometrisine dayanan çok bantlı fraktal anten tasarlamış ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yineleme sayısı arttıkça antenin boyutunda küçülme kazancında ise iyileşme olduğu görülmüştür (Jena, Mangaraj, & Mishra, 2013).

Singhal ve Singh çalışmasında CPW beslemeli altıgen monopol anten içerisinde Sierpinski yapısını elde edebilmek için kare yuvaların çıkarılmasıyla anten yapıları elde etmişlerdir. Bu çıkarma işlemi 2 defa tekrarlanmasıyla daha önceki çalışmalara göre daha geniş bant genişliği ve minyatürleşme sağlanmıştır (Singhal & Singh, 2016).

Sivia ve Bhatia 2015 yılında yaptığı çalışmada fraktal tabanlı mikroşerit yama anteni tasarlamıştır. Çoklu rezonans frekansı elde edilmesinden dolayı tasarlanan anten ultra geniş bant (UWB) uygulamaları için kullanışlıdır (Sivia & Bhatia, 2015).

Darimireddy ve arkadaşları üçgen şekillerle birbirine bağlanmış altıgen minyatürize anten tasarlamışlar ve bu durumu 3 kez tekrarlayarak karşılaştırmalar yapmıştır (Darimireddy, Reddy, & Prasad, 2018).

Bir başka çalışmada ultra geniş bant (UWB) altıgen fraktal yama anteninin tasarımı, üretimi ve ölçümü yapılmıştır. Bu anten, kenarlarında Koch kar tanesi fraktal ile altıgen şekil kullanılarak elde edilmiştir. Antenin bant genişliğinin ve kazancının arttığı görülmüştür (Gupta & Mathur, 2018).

Ali ve arkadaşları decagonal yama anten tasarlamışlardır. Rezanatör üzerinden Sierpinski kare yuvalarına dayanan simetrik 5 adet oyuk aynı zamanda zeminden de dikdörtgen

şeklinde 2 adet oyuk çıkartılarak antenin verimi ve kazancı iyileştirilmiştir (Ali, B K, & Biradar, 2018).

2018 yılında gerçekleştirilen bir başka çalışmada Hilbert Minkowski anteni (HMA) olarak bilinen Minkowski eğrisi üzerine Hilbert eğrisi konularak fractal anten tasarlanmıştır. Minkowski Hilbert anteni olarak bilinen hilbert eğrisi üzerinde ki Minkowski eğrisi üzerine konularak iki anten tasarlanmıştır. HMA da kazancın daha iyi MHA da frekans bandı sayısı daha iyi olduğu görülmüştür (Bangı & Sivia, 2018).

2018 yılında yapılan diğer bir çalışmada kareye indirgenmiş mikroşerit yama anten üzerine sierpinski ve Koch fraktal geometrileri uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda sierpinski yama anteni üzerindeki yineleme sayısı arttıkça rezonans frekans değerinde azalma olduğu görülmüştür. Koch fraktal geometrinin ise çoklu rezonans frekansına neden olduğu görülmüştür (Hirway & Shaikh, 2018).

2018 yılında yapılan bir çalışmada CPW beslemeli UWB Gosper adası altıgen monopol anten tasarlanmıştır. Standart antene kıyasla bant genişliğinin daha iyi olduğu görülmüştür (Safia & Eleftheriades, 2018).

Madhav ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları çalışmada U ve W şeklinde yuvalı fraktal anten tasarlamışlardır. U ve W şeklindeki yuvaların arttırılması ile çok bantlı yapı elde edilmiştir. Tasarlanan anten Wi-Max, Hava tahmini RADAR sistemleri ve WLAN uygulamalarında çalışmaktadır (Madhav, ve diğerleri, 2018).

Fraktal antenler enerji hasadında da kullanılmaktadır. 2018 yılında yapılan çalışmada aralarında sabit bir oran bulunan üçgen şekillerden fraktal anten tasarlanmıştır. Fraktal anten çoklu rezonans frekansına sahip olduğu için tek bantlı antenlere göre daha fazla enerji toplayabildiği ve sistemin verimliliğini arttırdığı görülmüştür (Çelik & Kurt, 2018).

Yong ve Shaobin' in 2008 yılında kare yapının içerisine karenin uzunluğunun yarısı yarıçap ile dairesel şekil çıkartılarak yeni Taç Kare Fraktal Anten yapısı elde edilmiştir ve aynı şekilde tekrarlamaya devam etmiştir. Yineleme sayısı arttıkça antenin daha fazla rezonans frekansına sahip olduğunu ve frekans ayırımının istediğimiz gibi değiştirmenin mümkün olduğu görülmüştür(Yong & Shaobin , 2008).

2012 yılında Suganthi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada anten dielektrik malzeme üzerine Hilbert Curve Fraktal geometrisini, arkasına ise CSRR yapısı yerleştirilerek tasarlanmıştır. MTM yapısı SRR ve CSRR yapılarından meydana gelmektedir. SRR yapısındaki iletken kısım CSRR yapısında bir yuva olarak gözükmektedir. Oluşturulan yapıların tasarımı HFSS 3D Simülasyon programında yapılmıştır. Tasarlanan yapının çoklu rezonans frekansına sahip olduğu, kazancında ve yönlülüğünde gözle görülür değişimler olduğu görülmüştür(Suganthi, Raghavan, Kumar, & Thilagar, 2012).

Ayrıca, dielektrik malzeme üzerine mikro şerit beslemeli dikdörtgen monopole anten ve eşkenar dörtgen yapıları, alt tarafına ise CSRR yapısı yerleştirilerek anten yapısı elde edilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen yapının simülasyon ve üretim sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüş WiMAX, WLAN ve RADAR uygulamalarında kullanılabileceği tespit edilmiştir. (Rani & Pandey, 2016).

2016 yılında yapılan çalışmada CPW ile beslenen CSRR yüklü Sierpinski üçgen fraktal anteni tasarlanmış ve çoklu rezonans frekansı ürettiği görülmüştür (Elavarasi & Shanmuganatham, 2016).

2018 yılında ise CPW ile beslenen CSRR yüklü Koch yıldız geometrisine sahip anten tasarlanmış ve çoklu rezonans ürettiği görülmüştür (Elavarasi & Shanmuganatham, 2018a).

2018 yılında yapılan diğer çalışmada ise CSRR yüklü yaprak şeklinde Koch fraktal anten tasarlayarak çoklu rezonans ürettiği görülmüştür (Elavarasi & Shanmuganatham, 2018b).

Sharma ve arkadaşları 2017 yılında SRR yapılarının daha iyi empedans uyumu ve fraktal antenin bant genişliğini iyileştirdiği teorisinden yola çıkarak çok bantlı dairesel fraktal anten tasarlamış ve daha sonra SRR'ler ekleyerek her iki durum için sonuçları karşılaştırmıştır (Sharma, Lakwar, Kumar, & Garg, 2017).

3. FRAKTAL ANTEN VE METAMALZEMELER

Fraktal kelimesinin anlamı parçalanmış ya da kırılmıştır ve Latince fractus kelimesinden türemiştir. İlk olarak 1975 yılında Polonya asıllı matematikçi Benoit Mandelbrot tarafından ortaya atıldığı bilinmektedir (Çelik & Kurt, 2018). Fraktal şekiller bir yapının orantılı olarak küçültülmesi ya da büyütülmesiyle elde edilir. Başka bir deyişle fraktal, çoğunlukla kendine benzeme özelliği gösteren, sonsuza kadar birbirini tekrarlayan yapılardan oluşan karmaşık geometrik şekillerin ortak adıdır. Fraktallar doğada yaygın olarak bulunurlar. Örnek vermek gerekirse eğrelti otu, kar tanesi, piramit karnabaharı, Damlataş mağarası, salyangoz kabuğu, kozalak, bizmut kristalleri.

Fraktal geometrilerin birçok kullanım alanları vardır. Bunlardan bir tanesi de antenlerdir. Fraktal antenler ilk kez 1988 yılında Dr. Cohen tarafından oluşturulmuştur.

Fraktal antenlerin birçok avantajı vardır. Küçük kesit alanına sahiptirler, empedans eşleştirmeye gerek yoktur, çoklu rezonans frekansına sahiptirler, daha büyük bant genişliklerine sahiptirler, düşük maliyetlidirler, daha düşük yan loblara sahiptirler, bazı durumlarda daha yüksek kazançla sahiptirler. Fraktal antenler diğer geleneksel antenlere göre daha güvenilirlerdir, çünkü fraktal antenler performansını iletken geometrisinden elde ederler. Fraktal antenlerin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da vardır. Fraktal antenler daha karmaşık yapıya sahiptirler ve bazı durumlarda daha düşük kazançla sahip olabilirler.

Fraktal antenlerin kendine benzerlik, yineleme faktörü ve boşluk doldurma özellikleri nedeni ile son yıllarda bu anten çeşidine rağbet artmaktadır. Fraktal geometrilerin yineleme sayısı arttıkça rezonans frekansları arasındaki mesafe azalır bu nedenle bant genişliğini arttırmak için uygun yineleme faktörü seçilmelidir (Hirway & Shaikh, 2018). Fraktal antenler kendine benzerlik özelliği sayesinde multiband davranış ve geniş bir frekans dizisine sahip olurken, boşluk doldurma özelliği ile anten boyutunda küçülmeye yani minyatürleşmeye neden olur. Bu küçülme sayesinde fraktal antenler cep telefonları ve mikrodalga uygulamalarında kullanılabilir. Fraktal antenler çoklu şekillerinden dolayı çok farklı frekans dizilerinde eş zamanlı olarak optimal çalışabilir. Askeri, savunma, uzay iletişim sistemleri, mobil iletişim Wİ-Fİ, kablosuz yerel alan ağı (WLAN), Global konum belirleyen uydu sistemleri (GPS), Elektromanyetik bant aralığı (EBG) alçak geçiren filtre uygulamaları çoklu frekans bandında çalışması için geniş bantlı antenlere ihtiyaç

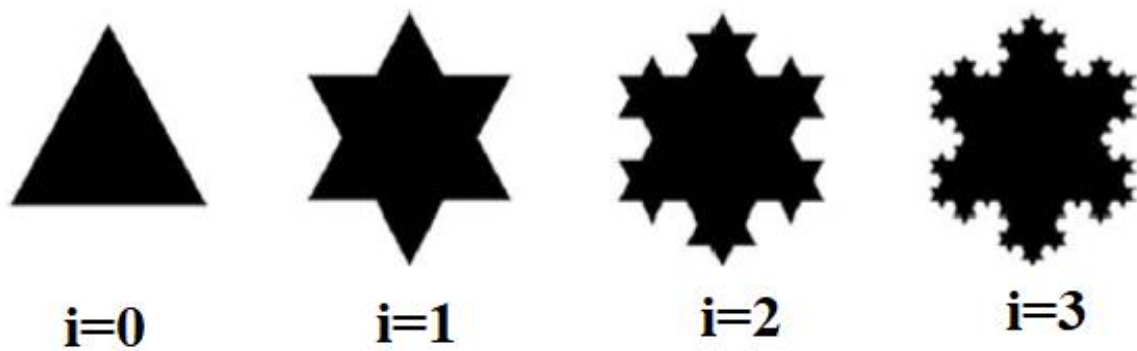
duyar (Mete, 2011). Fraktal şekiller iki kategoride sınıflandırılabilir rastgele ve deterministik (Balanis, 2005). Fraktal antenlerde deterministik geometriler daha yaygın olarak kullanılır. Deterministik fraktal yapılarda yaygın olarak kullanılan 5 geometri vardır. Bunlar Koch kar tanesi, Sierpinski ara levhası, Hilbert eğrisi, Minkowski, Peano eğrisi örnek verilebilir (Shareef, 2015).

3.1. Fraktal Anten Çeşitleri

Yaygın olarak kullanılan Fraktal Şekiller Hilbert eğrisi, Sierpinski gasket fraktal anteni, Koch ve Minkowski antenleri, Sierpinski halıları, fraktal ağaç geometrileridir. Aşağıda fraktal anten çeşitlerinden bazıları açıklanmıştır.

3.1.1. Koch antenna

Bu şekli ilk düşünen 1904 yılında İsveçli matematikçi Niels Helge Von Koch olmuştur. Herhangi bir şekil (eşkenar üçgen, kare vb.) seçilir. İkinci adım olarak eşkenar üçgen seçilmişse mesela üçgenin her bir kenarı 3 parçaya ayrılır ve ortadaki parçaya yeni bir eşkenar üçgen eklenerek yeni yapılar elde edilir ve bu durum defalarca tekrarlanır (Tiwari, Rattan, & Gupta, 2014). Koch fraktal anteni çoklu rezonans frekansına sahip olmayı sağlarlar (Hirway & Shaikh, 2018).



Şekil 3.1 Koch fraktal (Kar tanesi) (Mete, 2011)

Koch eğrisinin $i=1,2,3$ yinelemelerinin yineleme fonksiyonu formülasyonları aşağıdaki gibidir (Elavarasi & Shanmuganatham, 2017a).

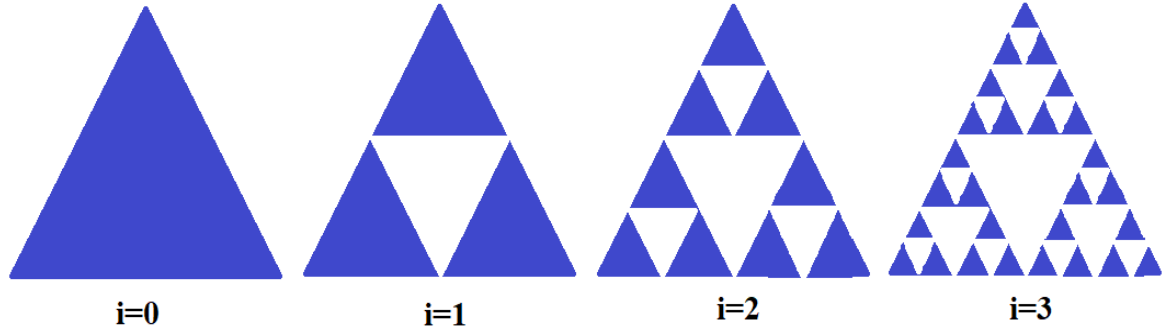
$$W_1(x, y) = \left[\frac{1}{3}x; \frac{1}{3}y \right] \quad (3.1)$$

$$W_2(x, y) = \left[\frac{1}{6}x - \frac{\sqrt{3}}{6}y + \frac{1}{3}; \frac{\sqrt{3}}{6}x + \frac{1}{6}y \right] \quad (3.2)$$

$$W_3(x, y) \left[\frac{1}{6}x + \frac{\sqrt{3}}{6}y + \frac{1}{2}; \frac{-\sqrt{3}}{6}x + \frac{1}{6}y + \frac{\sqrt{3}}{6} \right] \quad (3.3)$$

3.1.2. Sierpinski gasket fraktal anten

Sierpinski üçgeni ilk kez 1915 yılında Polonyalı matematikçi Sierpinski tarafından tanımlanmıştır. Sierpinski üçgeni tasarlanırken üçgenin her kenarının merkez noktaları birleştirilerek daha küçük üçgenler elde edilir ve bu örüntü alt üçgenler içinde sonsuz sayıda tekrarlanır. Fraktal antenlerin kendine benzerlik özelliğinin iyi bir örneğidir ve bu sayede multiband davranış ve geniş bir frekans dizisine sahip yapılardır (Elavarasi & Shanmuganatham, 2016).



Şekil 3.2 Sierpinski ara levhası

Sierpinski ara levhasının $i=1,2,3$ yinelemelerinin yineleme fonksiyonu formülasyonları aşağıdaki gibidir.

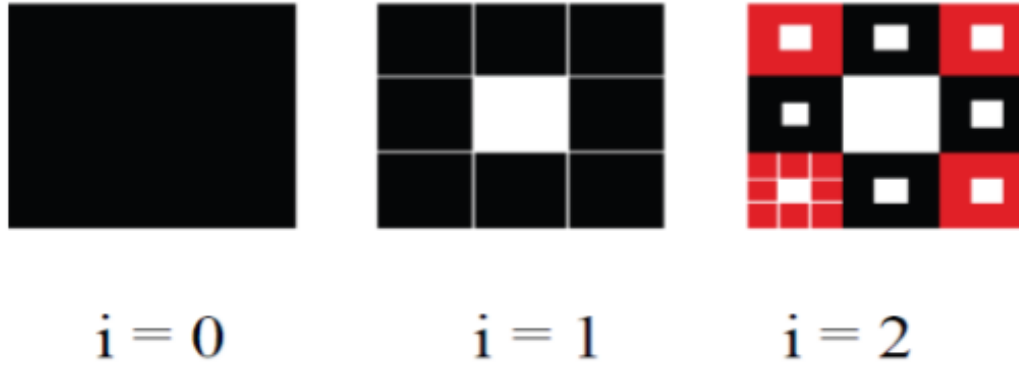
$$W_1(x, y) = \left[\frac{1}{2}x; \frac{1}{2}y \right] \quad (3.4)$$

$$W_2(x, y) = \left[\frac{1}{2}x + \frac{1}{2}; \frac{1}{2}y \right] \quad (3.5)$$

$$W_3(x, y) = \left[\frac{1}{2}x + \frac{1}{4}; \frac{1}{2}y + \frac{\sqrt{3}}{4} \right] \quad (3.6)$$

3.1.3. Sierpinski carpet fraktal anten

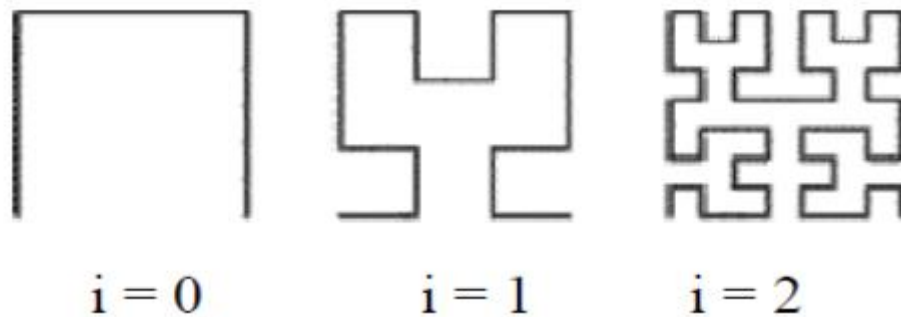
Sierpinski halı 1916 yılında Waclaw Sierpinski tarafından tanımlanmıştır (Hirway & Shaikh, 2018). Sierpinski halı fraktal anteni, anten uygulamaları içinde en çok çalışılan fraktal geometrisidir. Sierpinski halı fraktal antenleri kendine benzer geometrik yapılardan elde edildiğinden çok bantlı yapıya sahiptirler (Kadir, Ja'afar, & Aziz , 2007).



Şekil 3.3. Sierpinski halı (Shareef, 2015)

3.1.4. Hilbert fraktal anten

Alman matematikçi David Hilbert tarafından 1891'de tanımlanmış boşluk dolduran bir eğridir. Her bir adım bir önceki adımın 4 kopyasının birleştirilmesiyle elde edilir.



Şekil 3.4. Hilbert şekli oluşum adımları (Shareef, 2015)

Hilbert eğrisinin adımlarının formülasyonu;

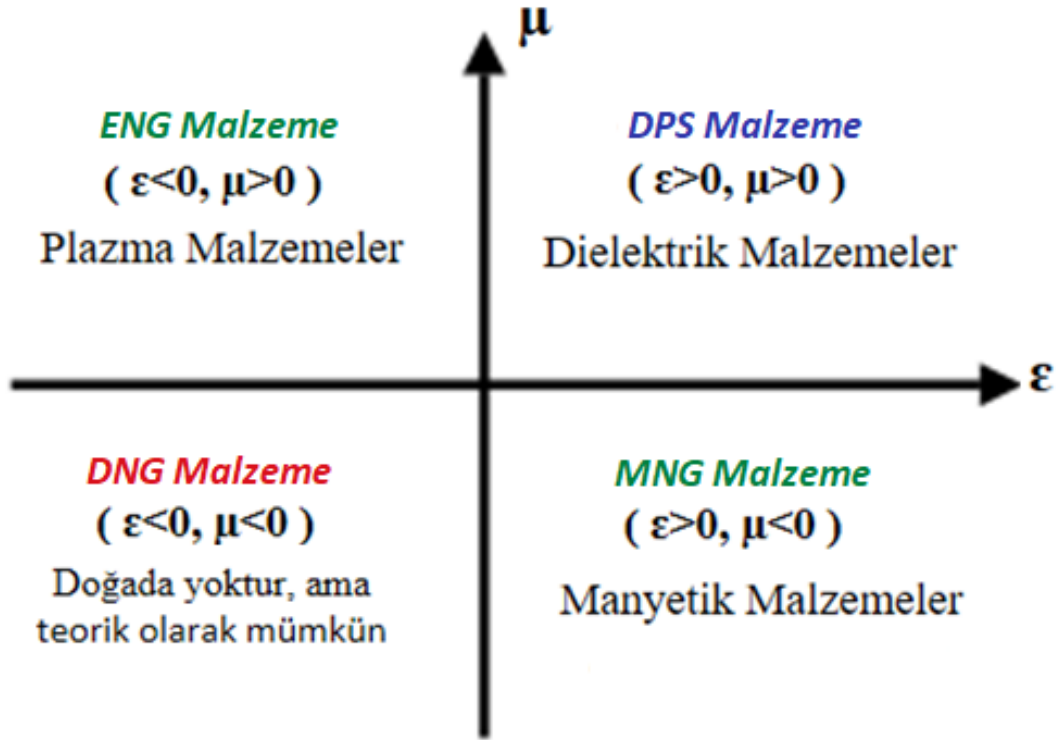
$$W_1(x, y) = \left[\frac{1}{2}y - \frac{1}{2}; -\frac{1}{2}x - \frac{1}{2} \right] \quad (3.7)$$

$$W_2(x, y) = \left[\frac{1}{2}x - \frac{1}{2}; \frac{1}{2}y + \frac{1}{2} \right] \quad (3.8)$$

$$(W_3(x, y) = \left[\frac{1}{2}x + \frac{1}{2}; \frac{1}{2}y + \frac{1}{2} \right] \quad (3.9)$$

3.2. Metamalzemeler (MTMs)

Metamalzemeler önceki bölümlerde bahsedildiği gibi eşzamanlı olarak negatif dielektrik sabitine, negatif manyetik geçirgenliğe ve negatif kırılma indisine sahip olan yapay malzemelerdir. Elektromanyetikte malzemelerin sınıflandırılması ϵ, μ değerlerinin negatif veya pozitif olmasına göre gerçekleştirilir. 2016 yılında Engheta yayınında malzemeleri Şekil 3.5'deki gibi sınıflandırmıştır (Engheta & Ziolkowski, 2016).



Şekil 3.5. Malzemelerin sınıflandırılması (Engheta & Ziolkowski, 2016)

Şekilde görüldüğü gibi malzemeler ϵ, μ değerlerinin pozitif veya negatif olmasına göre sınıflandırılır. Bu iki parametre hem reel hem de sanal kısımlardan meydana gelir yani karmaşıktırlar ama sınıflandırma yapılırken reel (gerçek) kısım baz alınır. Dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik katsayısı pozitif ($\epsilon > 0, \mu > 0$) olan ortamlara çift pozitif (DPS)

ortamda denir. FR4, Hava, Dielektrik gibi doğada bulunan çoğu malzememe bu ortama örnek olarak verilebilir. Bu ortamda elektromanyetik dalgalar yayılabilir ve Elektrik alan vektörü (\vec{E}), manyetik alan vektörü (\vec{H}) ve dalga vektörü (\vec{k}) bu ortamda sağ el kuralına uymaktadır. Enerji akış yoğunluğu olan poynting vektörü (\vec{S}), dalganın yayılım yönüyle aynı yönlüdür. Dielektrik sabiti negatif, manyetik geçirgenlik katsayısı pozitif ($\epsilon < 0, \mu > 0$) olan ortamlar Epsilon negatif (ENG) ortamlar olarak adlandırılır. EM dalgalar bu ortamda sönümlenirler yani iletim yoktur. Belirli frekans bantlarında plazmalar ENG özelliği gösterirler. Dielektrik sabiti pozitif, manyetik geçirgenlik katsayısı negatif ($\epsilon > 0, \mu < 0$) olan ortamlara Mü negatif (MNG) ortamlar denir. Bu ortamda da iletim yoktur. EM dalgalar sönümlenir. Dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik katsayısı negatif ($\epsilon < 0, \mu < 0$)olan ortamlara çift negatif (DNG) ortamlar denir. Elektrik alan vektörü (\vec{E}), manyetik alan vektörü (\vec{H}) ve dalga vektörü (\vec{k}) bu ortamda sol el kuralına uymaktadır. Bu yüzden bu malzemelere sol eli malzemeler de (LHM) denir. Bu malzemeler doğada bulunmazlar ancak yapay olarak elde edilebilirler. DNG ortamda EM dalgalar yayılır ve aşağıdaki Maxwell eşitliklerinin diferansiyel formuna dayanır.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.13)$$

\vec{E} : Elektrik alan vektörü (V/m)

\vec{D} : Elektrik akı yoğunluğu (C/m²)

\vec{H} : Manyetik alan vektörü (A/m)

\vec{B} : Manyetik akı yoğunluğu (Web/m²)

Elektrik ve manyetik alan vektörlerinin elektrik ve manyetik akı yoğunlukları ile ilişkileri Eş. 3.14 ve Eş. 3.15'de gösterilmiştir.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (3.14)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad (3.15)$$

μ_0 , boş uzayın manyetik geçirgenliğini ifade eder ve değeri $4\pi \times 10^{-7}$ (F/m), ε_0 , boş uzayın dielektrik sabitini temsil eder değeri $8,854 \times 10^{-12}$ (H/m)'dir. μ_r , bağıl manyetik geçirgenlik, ε_r , bağıl dielektrik sabitidir.

DPS ortamlarda düzlem harmonik bir dalga için Maxwell denklemleri Eşitlik (3.11) ve Eşitlik (3.12) de verilmiştir. \vec{k} vektörünün \vec{E} ve \vec{H} ile vektörel olarak çarpımı Eş. 3.16 ve Eş. 3.17'de verilmiştir. Elektrik alan (\vec{E}), manyetik alan (\vec{H}) ve dalga vektörü (\vec{k}) bu ortamda sağ el kuralına uymaktadır. Güç yoğunluğu olarak da adlandırılan poynting vektörü (\vec{s}), dalganın yayılım yönüyle aynı yönlüdür.

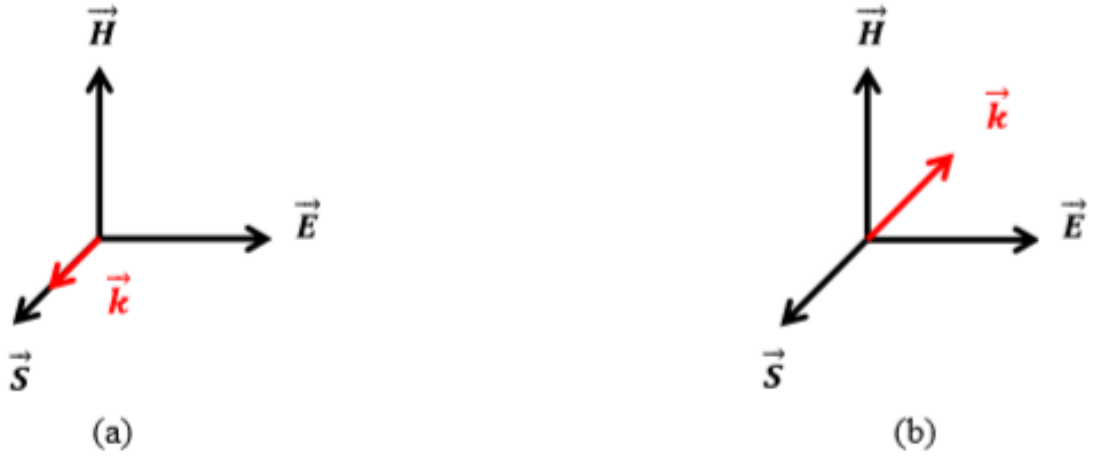
$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H} \quad (3.16)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \varepsilon \vec{E} \quad (3.17)$$

DNG ortamı için denklemler yeniden yazıldığında Eş. 3.18 ve Eş. 3.19'da görüldüğü gibi, Elektrik alan (\vec{E}), manyetik alan (\vec{H}) ve dalga vektörü (\vec{k}) bu ortamda sol el kuralına uymaktadır. Enerji akış yoğunluğu olan poynting vektörü (\vec{s}), dalganın yayılım yönüyle zıt yönlü olduğu Şekil 3.6b'de gösterilmiştir.

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega \cdot |\mu| \cdot \vec{H} \quad (3.18)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = \omega \cdot |\varepsilon| \cdot \vec{E} \quad (3.19)$$



Şekil 3.6. Poynting vektörü (\vec{S}) ile dalga vektörünün (\vec{k}), (a) DPS, (b) DNG ortamlardaki davranışları

4. MATERİYAL VE YÖNTEMLER

4.1. Sayısal Yöntemler

Elektromanyetik problemlerin çözümünde pek çok sayısal yöntem kullanılmakta olup bu çözümlerin bazıları frekans domaininde bazıları ise zaman domaininde gerçekleşmektedir. Kullanılan her yöntemin kendine özgü koşullarda ancak doğru sonucu verdiği için tüm elektromanyetik problemler için tek bir çözüm yöntemi kullanılmaz (Erol & Balık, 2001). EM problemlerin çözümünde yaygın olarak Zaman Domaininde Sonlu Farklar Metodu (FDTD), Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), Sonlu İntegrasyon Tekniğidir (FIT) metotları kullanılır.

4.2. Zaman Domaininde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu

Zaman domaininde Sonlu Farklar metodu 1966 yılında Kane Yee tarafından ortaya atılmış ileriki yıllarda başka insanlar tarafından geliştirilerek EM problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır (Yee & Chen, 1997). FDTD yöntemi diferansiyel formda bulunan Maxwell denklemlerinin zaman domaininde çözümünde kullanılır. Büyük alanlar için çözümde büyük kolaylık sağlar ve gerçeğe yakın çözümler elde edilir. FDTD metodunu genel olarak birim hücre küçük hücrelere ayrılmış olup bu küçük hücreler için ayrı ayrı E ve H alanlarının x, y ve z bileşenleri elde edilir (Erol & Balık, 2001).

FDTD ve FEM yöntemlerinin ikisinde de belirli bir bölge küçük parçalara bölünüp hepsinin ayrı ayrı türevlerinin alınmasıyla tekrar birleştirilerek bütün halinde çözülmesi mantığı yatar. İki yöntem de oldukça hassas ve gerçeğe yakın çözümler sunar. Yalnız FDTD noktasal yaklaşım tekniğini kullanırken, FEM bölgesel yaklaşım tekniğini çözümlerinde uygular.

4.3. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM)

Sonlu Elemanlar Metodu ilk kez 1943 yılında Courant tarafından ileri sürülmüş (Courant, 1943) ve 1968 yılında EM problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. FEM, karmaşık yapıya sahip olan yapılar için çok uygundur. FEM dalga kılavuzlarında, biyolojik

nesneler tarafından EM dalgaların emilimi (SAR), elektrik makinelerinde, yarı iletken teknolojilerinde, mikroşerit antenlerde, İotropik ortamların incelenmesinde FEM kullanılırken isotropik olmayan yapılarında incelenmesinde de kullanılmaktadır (Karaaslan, 2009). Sonlu elemanlar metodunun çalışma prensibi, problem uzayının sınırlı sayıda parçalara bölünmesiyle cebirsel denklemler sistemine dönüştürülerek denklemlerin çözülmesidir.

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

- Çözüm bölgesi sonlu sayıda alt bölgeye ve alt elemanlara ayrılmalı
- Tek bir eleman için eşitlikler elde edilmeli
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanlar için elde edilen denklemler birleştirilmeli
- Elde edilen denklem sistemi çözülmeli

4.4. Sonlu İterasyon tekniği (FIT)

FIT tekniği 1977 yılında Thomas Weiland tarafından geliştirilen ve günümüze kadar çeşitli alanlarda kullanılan, frekans domaininde gerçekleşen elektromanyetik problemleri Maxwell denklemlerinin integral formundan yararlanarak nümerik olarak çözebilen bir yöntemdir. FIT yöntemi Maxwell denklemlerinin integral formunu doğrusal bir denklem sistemine dönüştürerek karmaşık yapıların analizini hem kolaylaştırır hem de daha güvenilir sonuçlar elde etmemizi sağlamaktadır. FIT metodu aşağıdaki formüllerden meydana gelmektedir (Clemens & Weiland, 2001).

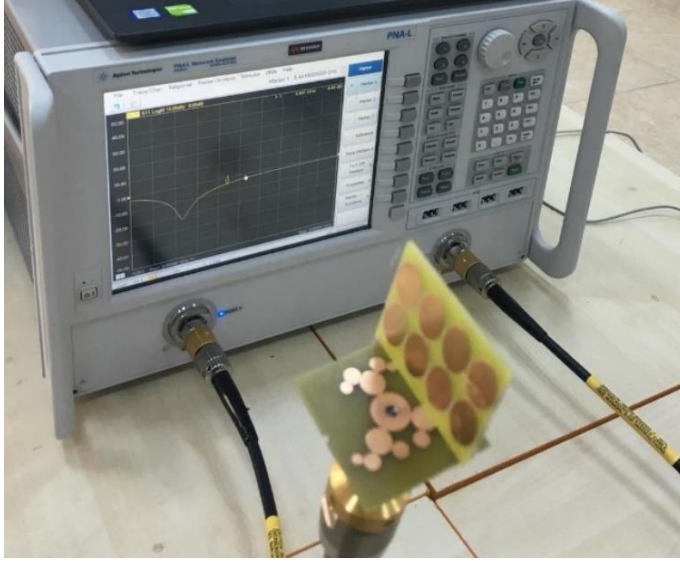
$$\frac{\partial}{\partial t} D(R, t) = -\nabla \times H(R, t) - J_e(R, t) \quad (4.1)$$

$$D(R, t) = \varepsilon''(R) \cdot E(R, t) \quad (4.2)$$

R: konum vektörünü, t: zaman değişkenini, J_e : elektrik akım yoğunluk vektörünü, ε'' : dielektrik sabitinin sanal kısmını ifade etmektedir.

4.6. Üretim ve Ölçüm Cihazları

Tasarlanan fraktal anten ve MTM yapıların Laser & Electronics cihazında 3 boyutlu olarak üretimi yapıldı. Üretimi yapılan anten ve MTM yapılarının yansıma katsayısı olan S11 parametresi Şekil 4.1’de gösterilen Agilent Technologies PNA-L Network Analyzer N5234A cihazı ile ölçüldü. Bu cihaz 10MHz ile 43,5 GHz arasında ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 4.1.Fraktal anten+ MTM yapısının Network Analiz cihazı ile ölçülmesi

Üretimi yapılmış olan fraktal antenin 2 boyutlu ışınım eğrisini elde edebilmek için MATS-1000A cihazı kullanıldı. Bu cihaz 300 MHz- 3 GHz ve 5-6 GHz arasında ışınım eğrisi elde edebilmektedir. Üretmiş olduğumuz antenin rezonans frekansı 5,47 GHz olduğu için ışınım eğrilerini elde edilebilmiştir. Işınım eğrisini elde edebilmek için 3-18 GHz arasında çalışan bir horn anten sinyal verici olarak kullanıldı. Elde edilen veriler Microsoft EXCEL programı yardımıyla grafiğe dönüştürülmüştür.

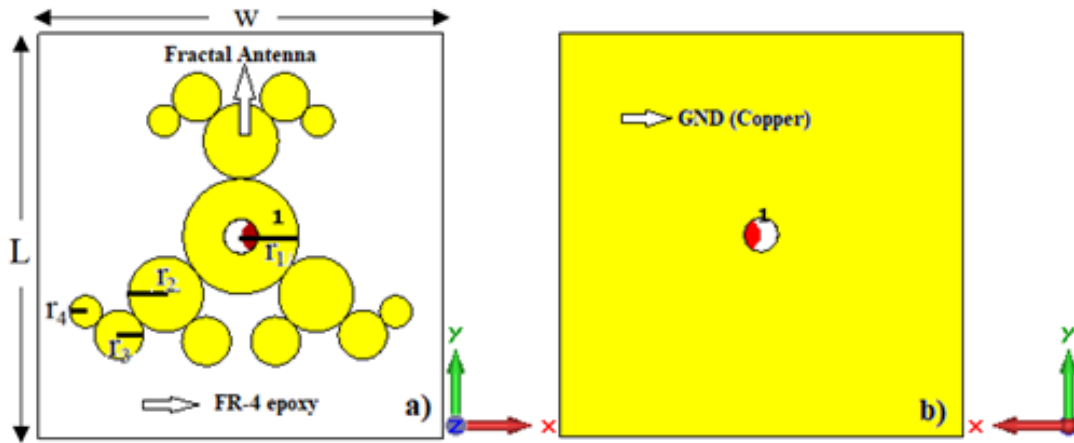


Şekil 4.2. İki boyutlu ışınma eğrisinin ölçümü için gerekli düzenek

5. ARAŞTIRMA BULGULARI, UYGULAMALARI VE TARTIŞMA

5.1. Fraktal Antenin Tasarımı ve Sonuçları

Fraktal antenler, diğer geleneksel antenlere göre yüksek kazançlı, küçük kesit alanına sahip, düşük maliyetli, çoklu rezonansa sahip ve daha güvenilir olması nedeniyle bu çalışmada kullanılmıştır. Tasarlanan antenin önden ve arkadan görünüşü Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



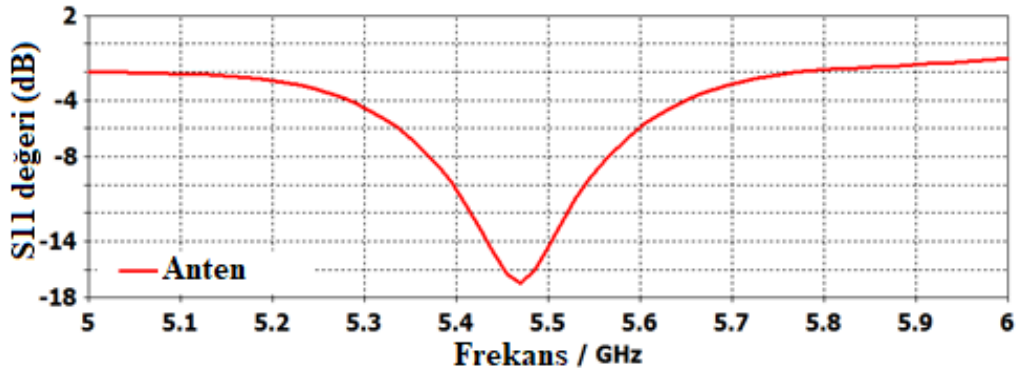
Şekil 5.1 . Fraktal antenin metal ve dielektrik malzemesi; (a) ön kısım, (b) arka kısım

Fraktal antenler temel olarak dielektrik zeminden, ışıyan metal yama ile toprak zemin düzleminden oluşmaktadır. Fraktal antenin boyutları Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Fraktal anten ve arkasında kullanılan metal düzlem 35x35 mm boyutunda, 0,035 mm kalınlığına sahip ve elektriksel iletkenliği $5,8001 \times 10^7$ S/m'dir. Dielektrik malzeme olarak ise iyi performansa ve düşük maliyete sahip olan 1,6 mm kalınlığında, $\epsilon_r=4,40$, $\mu_r=1$ ve dielektrik kayıp tanjantı $\delta\epsilon=0,02$ olan FR4-epoxy malzemesi seçilmiştir. Besleme için en büyük dairenin ortasından 1,5 mm yarıçapında oyuk açılmıştır. Fraktal şekil ile arkadaki metal düzleme temas edecek şekilde discrete port atanmıştır.

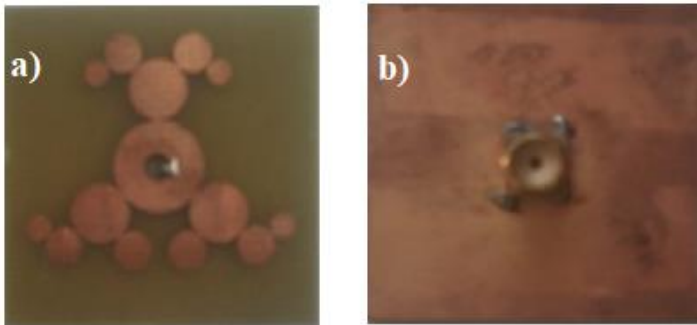
Çizelge 5.1. Fraktal antenin 5,47 GHz için boyutları

Antenna parameters	Size
Frequency	5.47 GHz
Fractal Shape bigger circle (r1)	5 mm
Fractal shape smaller circle (r2)	5x0.65 mm
r3	2.112 mm
r4	1.373 mm
Plate length (L)	35 mm
Plate width (W)	35 mm
Plate thickness	1.635 mm

Tasarlanan fraktal anten FIT tabanlı simülasyon programı kullanılarak analiz edilmiştir. Şekil 5.2’de fraktal antenin yansıma katsayısı, S11 grafiği verilmiştir. S11 parametresi için -10 dB referans olarak kabul edilmiş olup bu değerin altındaki değerlerde antenin verimli bir şekilde çalıştığı bilinmektedir. Fraktal antenin S11 parametresi -16,947 dB değerine kadar düşmektedir. S11 parametresi değerleri bant genişliğini belirlememize de yardımcı olmaktadır. Fraktal antenin bant genişliği yaklaşık olarak 146 MHz civarındadır.

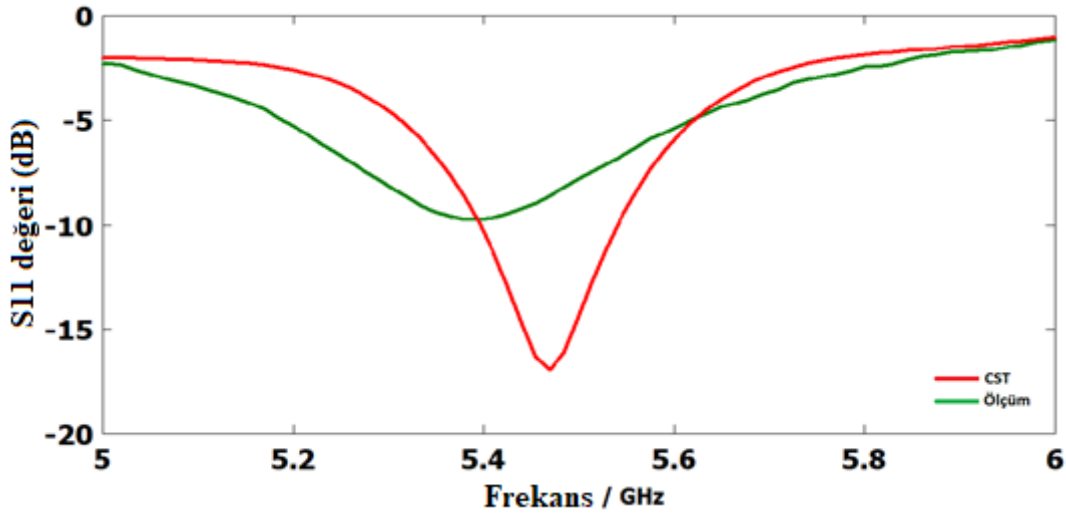


Şekil 5.2. Fraktal anten için sayısal olarak elde edilen S11 grafiği



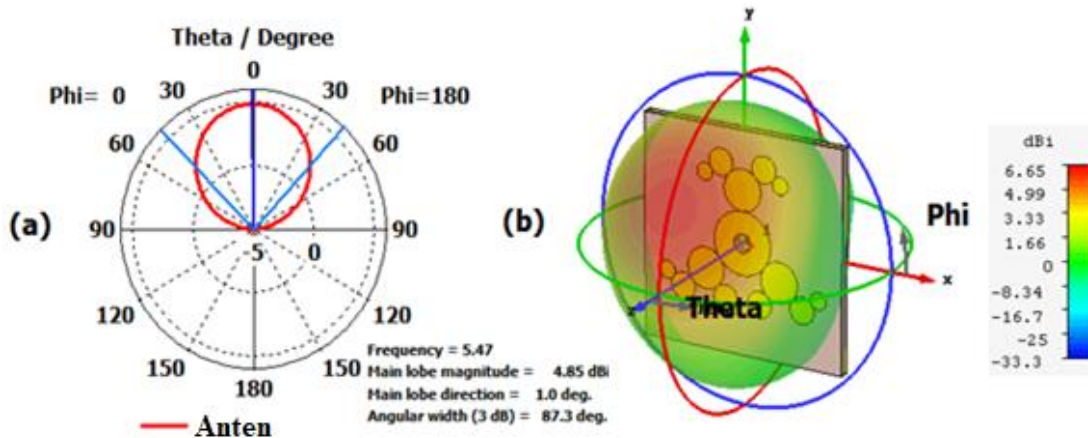
Şekil 5.3. Fraktal antenin fabrikasyonu a) ön kısım b) arka kısım

Laboratuvar ortamında üretimi yapılan (Şekil 5.3'te gösterilen) fraktal antenin yansımaya katsayısı, S11 grafiği Şekil 5.4'te gösterilmiştir. S11 değerinin 5,425 GHz'de -9,3131151 dB olduğu görülmektedir.



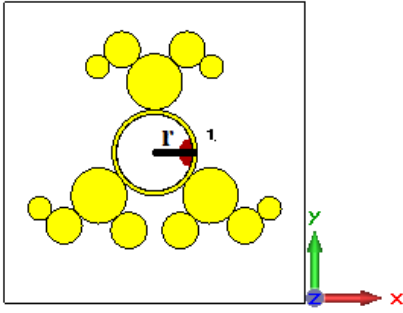
Şekil 5.4. Fraktal antenin sayısal ve deneysel S11 grafiği

Tasarlanan fraktal antenin verimini, yönlülüğünü ve kazancını belirleyebilmek için antenin yayılım deseni de incelenmelidir. Şekil 5.5'de antenin uzak alan ışınması ve 3 boyutlu gösterimi gösterilmiştir.

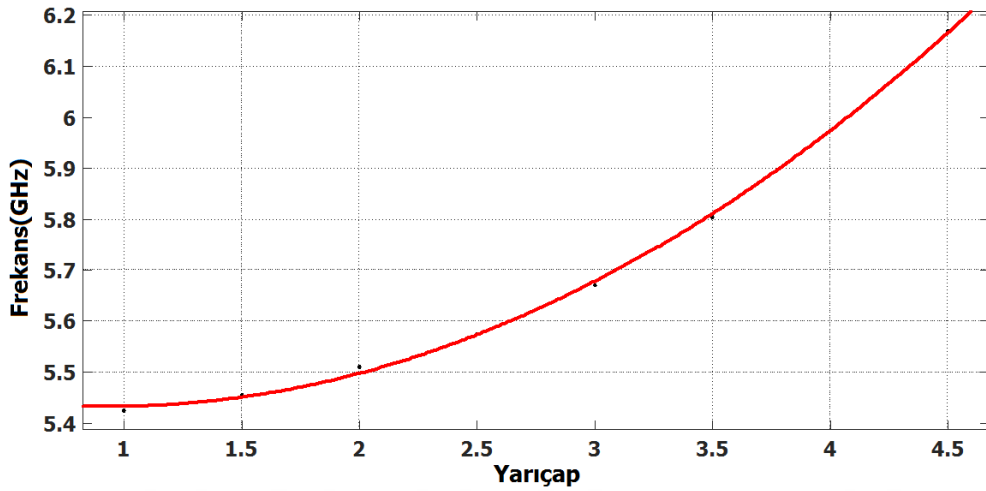


Şekil 5.5. Fraktal antenin Phi=0 derecede uzak alan ışınma eğrisi b) fraktal antenin yönlülüğünün üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi

Antenin Phi= 0 derecede ana loblardaki ışınma büyüklüğü 4,85 dBi, yan loblarda ışınma görülmemektedir. Hüzme açısı 87,3° olduğu Şekil 5.5a'da görülmektedir. Antenin yönlülüğü Şekil 5.5b'de görüldüğü gibi 6,65 dBi'dir.



Şekil 5.6. Fraktal anten şekli

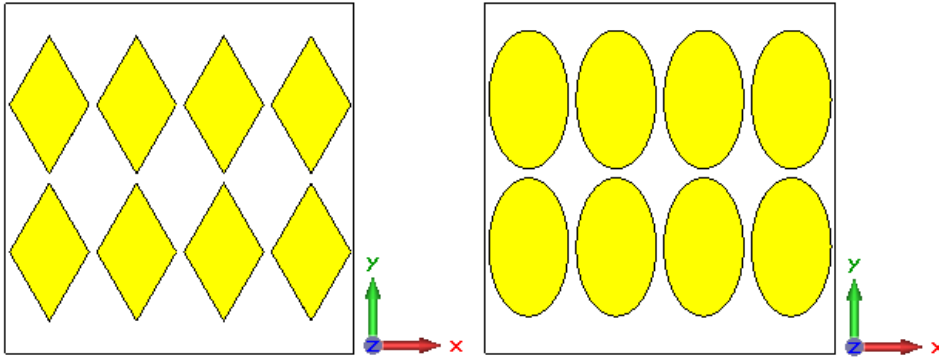


Şekil 5.7. Fraktal antenin yarıçapının frekansa göre değişim grafiği

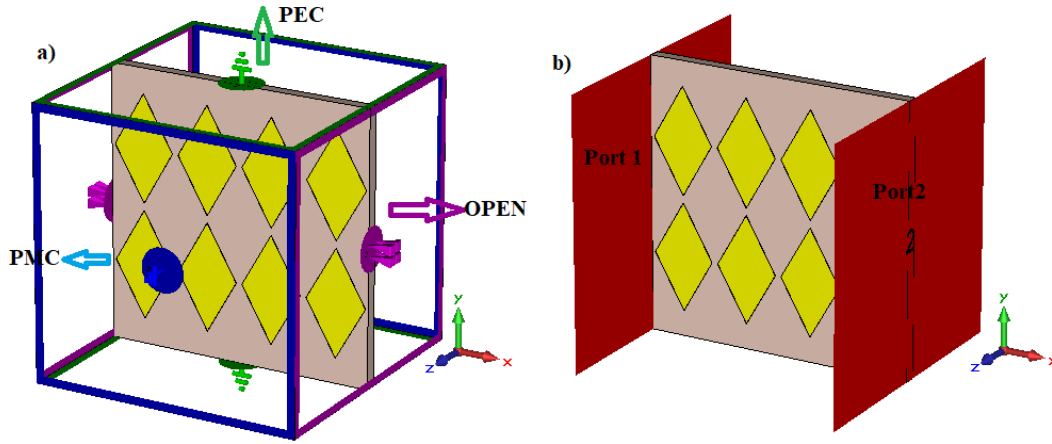
Şekil 5.7’de fraktal antenin ortasında bulunan dairesel şeklin yarıçapının büyüklüğüne göre frekansta meydana gelen değişim görülmektedir. Yarıçapın artmasıyla antenin çalışma frekansında lineer bir kayma görülmektedir.

5.2. MTM Yapıların Oluşturulması ve Analiz Sonuçları

Şekil 5.8’de görülen MTM yapılarının toplam boyutu 38mmx38mm boyutlarındadır. Dielektrik malzeme olarak dielektrik geçirgenliği 4,3, manyetik geçirgenliği 1, dielektrik kayıp tanjant değeri 0,025 ve kalınlığı 1,6 mm olan FR4-epoxy seçilmiştir. FR4 malzemenin yüzeyine bakır seçilmiş olup kalınlığı 0,035 mm ve dielektrik iletkenliği ise $5,8001 \times 10^7$ S/m’dir. Tasarlanan MTM yapıları dielektrik yüzey üzerine 2x4 periyodik olarak birbirinin aynısı eşkenar dörtgen ve eliptik yapıların yerleştirilmesiyle oluşmuştur. Her bir eşkenar dörtgenin kenar uzunluğu 8,66 mm, eliptik şeklin uzunluğu 8,66 mmx15 mm’dir.



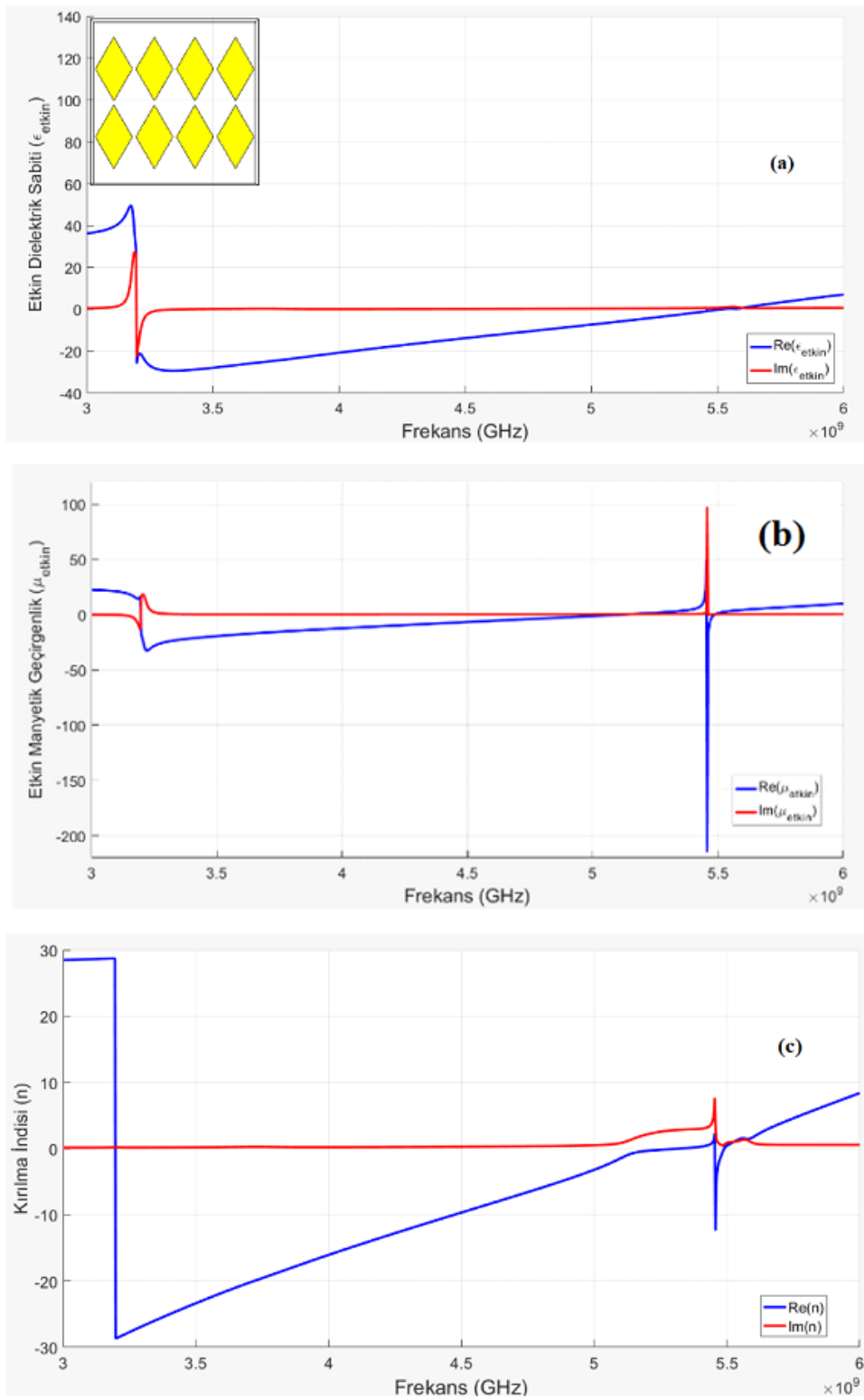
Şekil 5.8. Tasarlanan MTM yapılarının önden görünüşü



Şekil 5.9. MTM yapısının (a) sınır şartları (b) dalga sinyali grafiği

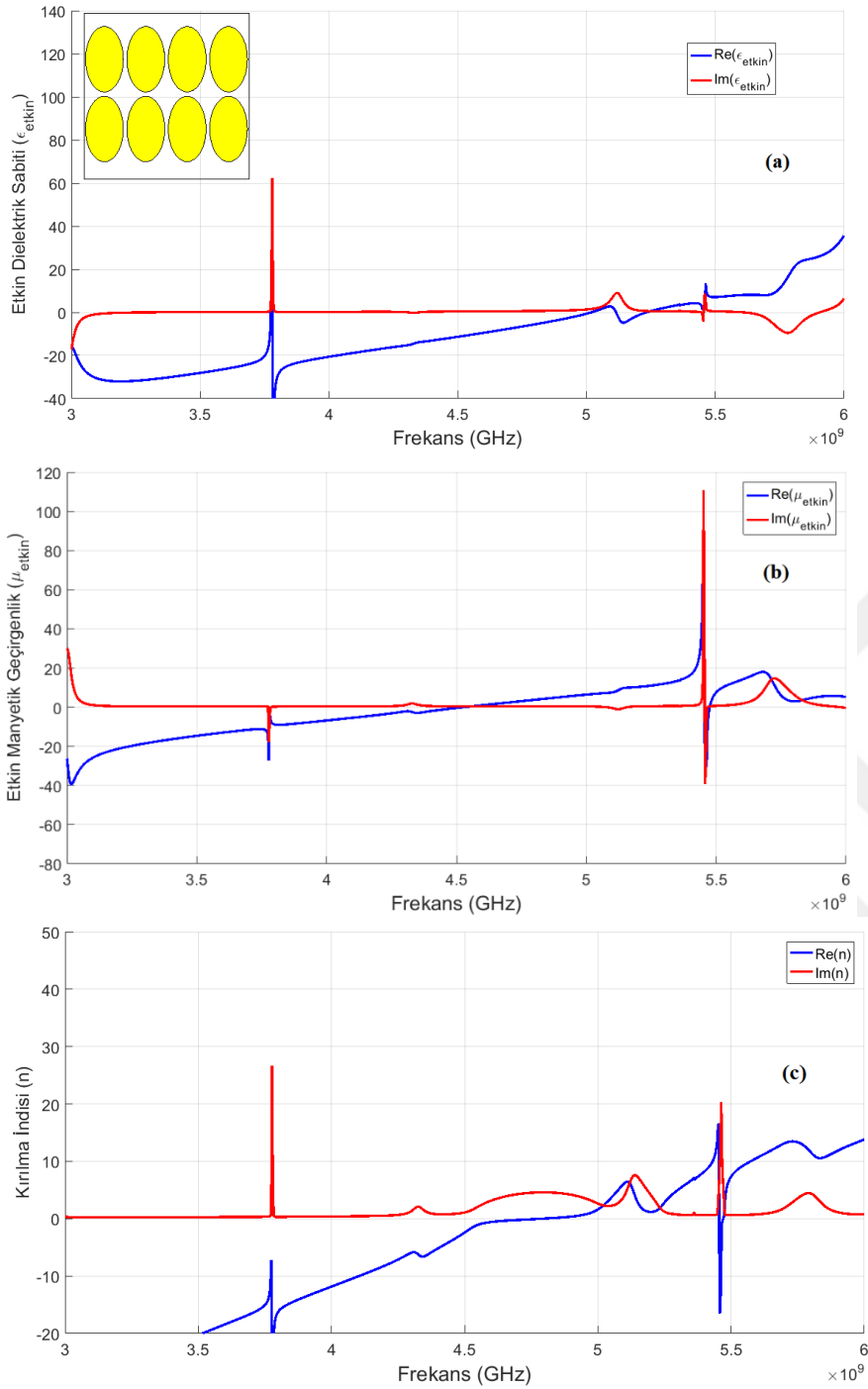
MTM yapısının simülasyonunda mükemmel elektrik iletken (PEC) ve mükemmel manyetik iletken (PMC) sınır koşulları kullanıldı. Elektromanyetik sinyallerin $+x$ ve $-x$ yönlerinde ilerleyebilmesi için bu yönler açık bırakıldı. Uyarılan dalganın TEM modunda olması sağlandı.

Bir yapının MTM olabilmesi için eşzamanlı olarak negatif dielektrik sabitine, negatif manyetik geçirgenliğe ve negatif kırılma indisine sahip olması gerekmektedir. Tasarlanan yapıların MTM özelliği gösterip göstermediğini anlamak için, simüle edilen S_{11} ve S_{21} değerleri kullanılarak yapının etkin dielektrik sabiti (ϵ), etkin manyetik geçirgenliği (μ) ve kırılma indisinin (n) değerleri hesaplanmış ve çalışma frekansında bu değerlerin negatif olduğu görülmüştür. Dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisi grafikleri Şekil 5.10a, Şekil 5.10b, Şekil 5.10c'de ve Şekil 5.11a, Şekil 5.11b, Şekil 5.11c'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Eşkenar dörtgen MTM yapısının reel ve sanal (a) dielektrik sabiti, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi

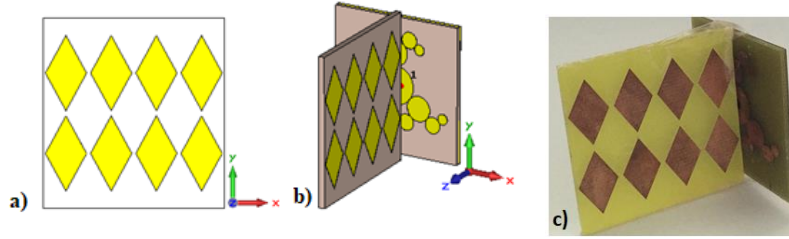
Şekil 5.10'da görüldüğü gibi MTM yapımızın dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisi değerleri yaklaşık 3GHz- 5,5GHz arasında eş zamanlı negatif olduğu görülmektedir ve antenin çalışma frekansı bu aralıkta yer almaktadır.



Şekil 5.11. Elips şeklinde MTM yapısının reel ve sanal (a) dielektrik sabiti, (b) manyetik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi

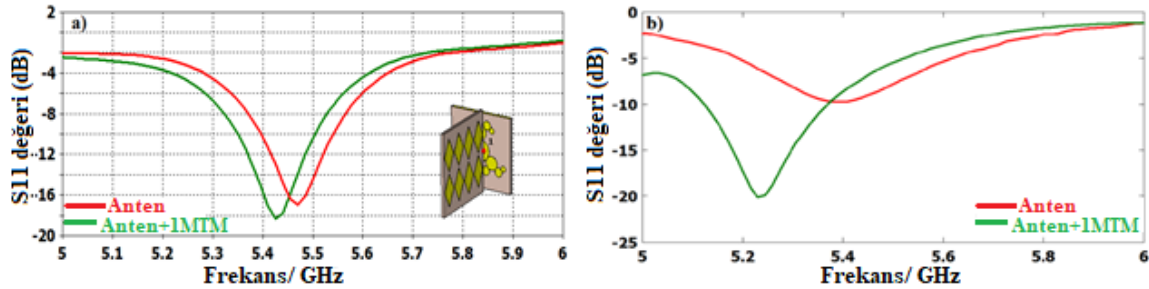
Sol-elli metamalzeme yapı kullanılacak antenin uygun çalışma frekansı 5,47 GHz'dir. Tasarlanan MTM yapısının yaklaşık olarak 3 GHz - 5,5 GHz arasında sol-elli MTM özelliği gösterdiği Şekil 5.11'de görülmektedir ve antenin çalışma frekansı bu aralıkta yer almaktadır. Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'deki grafikler iki yapının da MTM olduğunu ispatlamaktadır.

5.3. Fraktal Anten ile MTM Yapıların Karşılaştırılması ve Sonuçları



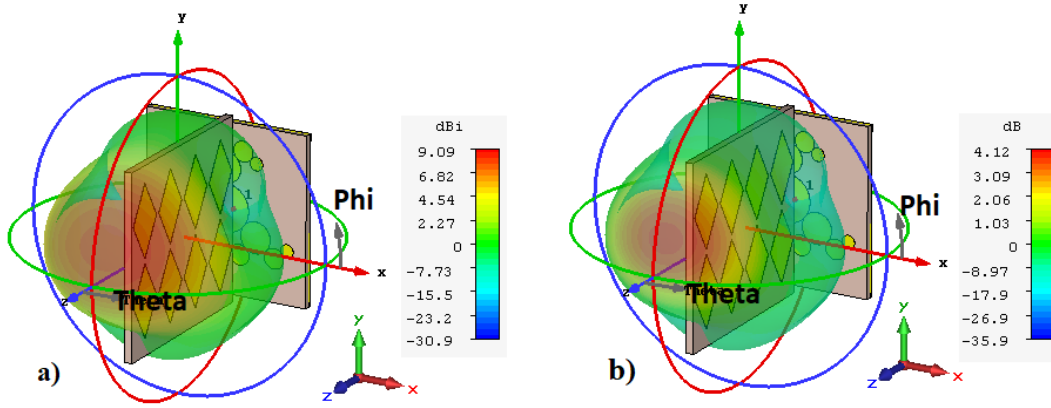
Şekil 5.12. a) MTM yapısının önden görünüşü, Tasarlanan anten ve 1 MTM yapısının görüntüleri b) sayısal c) deneysel ölçüm şekli

Çalışma frekansı 5,47 GHz olan fraktal antenin üzerine Şekil 5.12a’da gösterilen MTM yapısı 90° gelecek şekilde Şekil 5.12b’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Tasarlanan antenin yansımaya katsayısının (S11) simülasyon ve deneysel ölçüm sonucu Şekil 5.13’de verilmiştir.



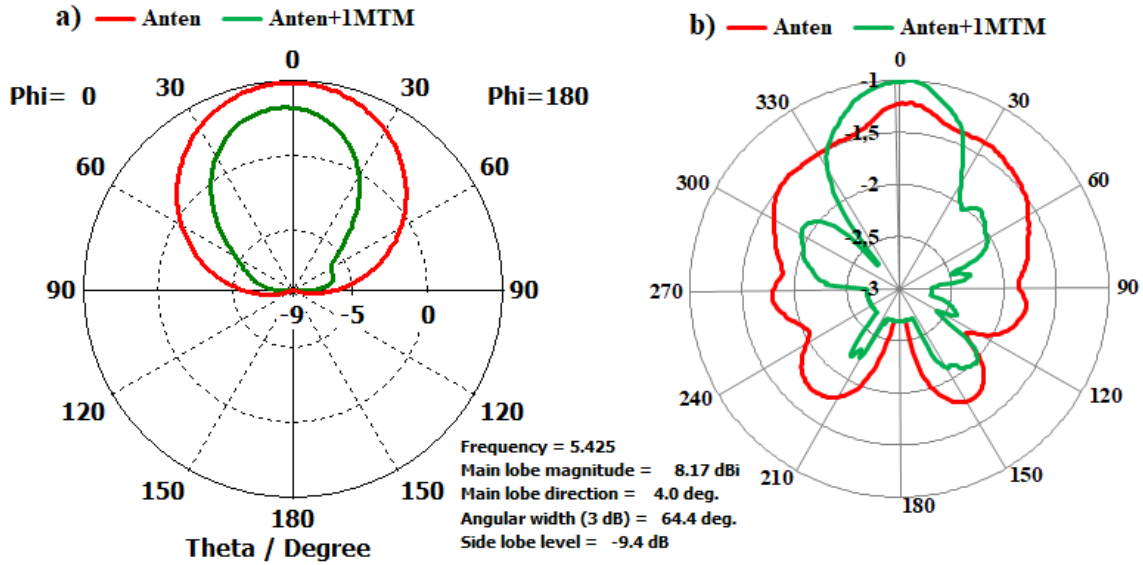
Şekil 5.13. Anten ve anten+1MTM yapılarının S11 grafiği a) sayısal b) deneysel ölçüm

Şekil 5.13a’ya bakıldığında antenin simülasyon sonucunda S11 değeri -16,973 dB iken, MTM yapısı eklendikten sonra bu değer -18,311 dB’ye düştüğü görülmektedir. Antenin bant genişliği 146 MHz’den 153,5 MHz’e yükselmiştir. Üretimi yapılan anten ve 1 MTM yapımızın S11 değeri 5,23 GHz’de -20,110 dB olarak ölçülmüştür. Yönlülük, verim ve kazancını belirleyebilmemiz için antenimizin 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışınım örüntüleri önemlidir.



Şekil 5.14. Anten ile 1MTM'nin üç boyutlu (3D) polar ışım eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

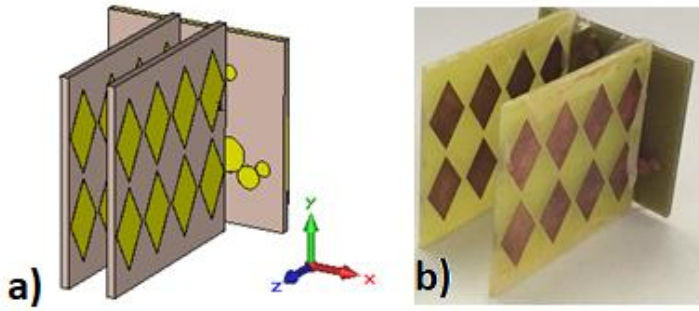
Şekil 5.14'de anten ve 1 MTM yapısının üç boyutlu polar yönlülük ve kazanç ışım eğrileri verilmiştir. Antenimizin yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB iken, 1 MTM eklendikten sonra yönlülüğü 9,09 dBi, kazancı 4,12 dB olmuştur. MTM yapısı kullanılarak antenin yönlülüğü ve kazancı artırılmıştır. Anten+1MTM yapısının tek yönde ışım yaptığı görülmektedir.



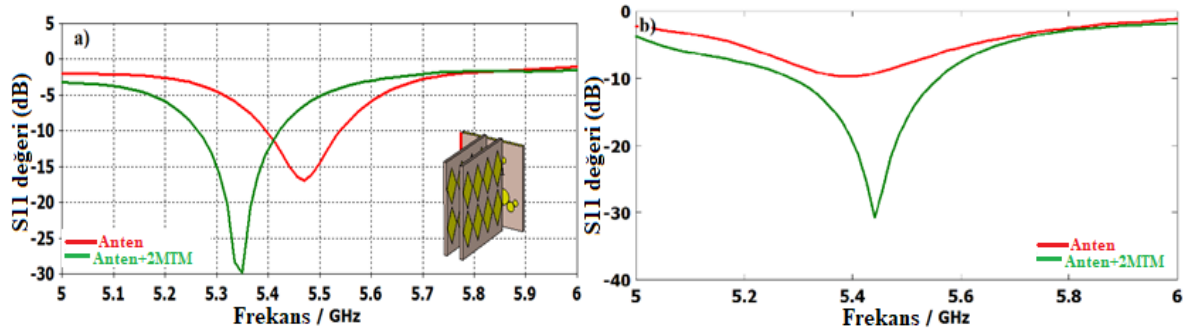
Şekil 5.15. Fraktal anten ve 1MTM yapısının 2 boyutlu ışım eğrisi grafiği a) sayısal b) deneysel ölçüm (normalize)

Şekil 5.15'de fraktal anten ve fraktal anten+ 1 MTM yapısının 2 boyutlu ışım eğrisi grafikleri görülmektedir. Şekil 5.15a'da fraktal antenin 1 MTM yapısı ile etkileşimi sonucu Phi=0 derecede yönlülük grafiği verilmiştir. Antenin Phi= 0 derecede ana loblardaki ışım büyüklüğü 4,85 dBi, hüzmeye açısı 87,3 derecedir. MTM yapısı eklendikten sonra oluşan

yeni yapının ana lobunda ki ışıma büyüklüğü 8,17 dBi, yan lobundaki ışıma büyüklüğü -9,4 dB değerindedir. Hüzme açısı ise 64,4 derecedir. Şekil 5.15b’de antenin ve üzerine yerleştirilmiş 1 MTM yapısının 2 boyutlu ışıma eğrileri laboratuvar ortamında MATS-1000 cihazı ile ölçülmüş olup veriler EXCEL programında grafiğe dökülmüştür. MTM yapısı sayesinde antenin yan loblarının küçüldüğü ve ana lob yönünde ışımının arttığı görülmektedir. Sonuç olarak MTM yapısının antenin yönlülüğünü ve kazancını arttırmıştır.

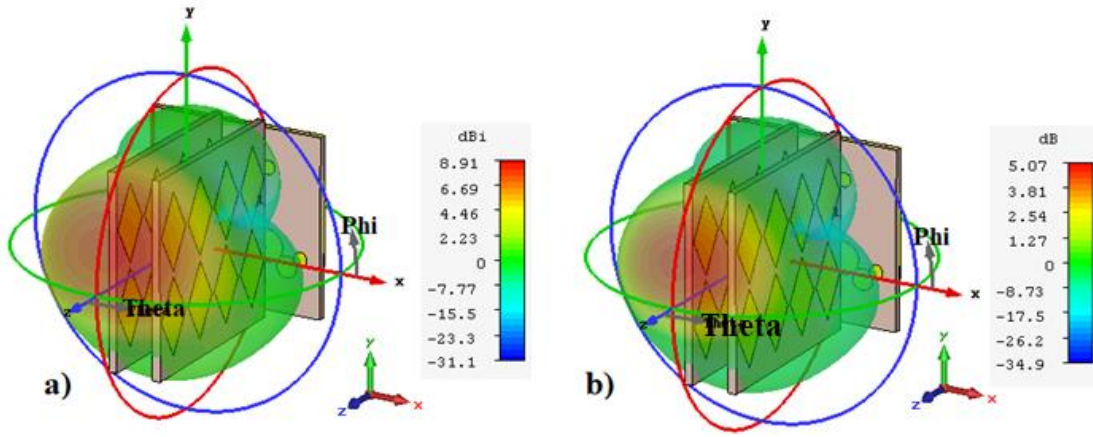


Şekil 5.16. Tasarlanan anten ve 2 MTM yapısının görüntüleri a) sayısal b) deneysel ölçüm



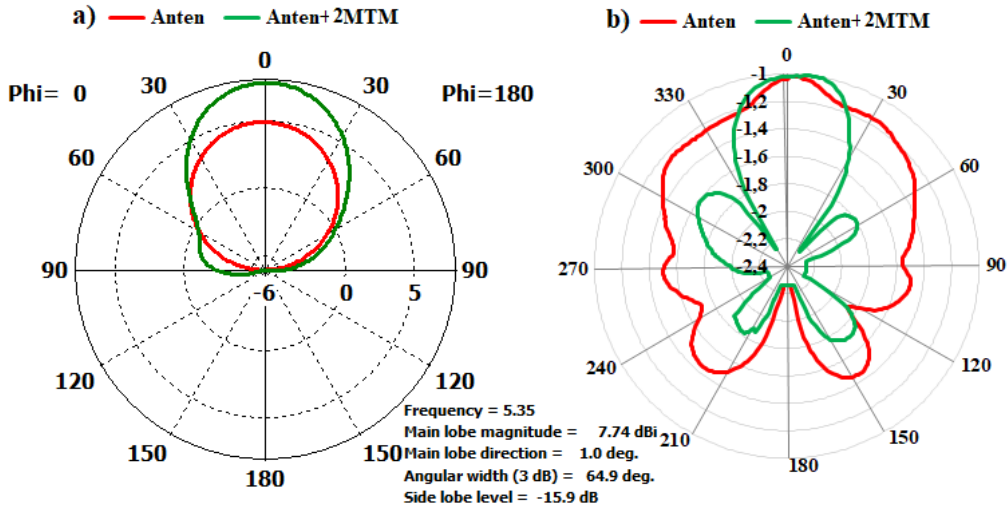
Şekil 5.17. Anten ve anten+2MTM S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm

Antenin üzerine 2 adet MTM yapısı eklediğimizde yansıma katsayısı, S11’in grafiği Şekil 5.17’de verilmiştir. 2 MTM arasındaki uzaklık 7,40 mm’dir. Şekil 5.17a’da görüldüğü gibi oluşturulan yeni yapının simülasyon sonucunda elde edilen S11 değeri 5,35 GHz’de -29,873 dB’ye düşmüştür. Bant genişliği 156,3 MHz’dir. Üretilen anten ve 2 MTM yapımızın S11 değeri 5,44 GHz’de -30,749 dB olarak ölçülmüştür. Oluşturulan antenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışıma eğrileri aşağıda verilmiştir.



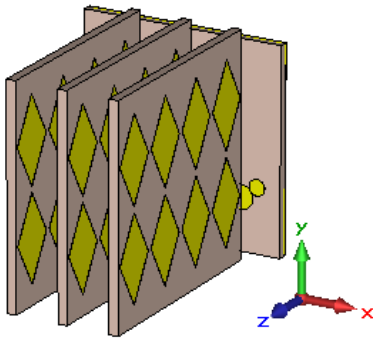
Şekil 5.18. Anten ile 2 MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışım eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Antenin yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB değerindedir. Antenine üzerine 2 MTM yapısı bırakıldıktan sonra kazancı 5,07 dB, yönlülüğü 8,91 dBi olmuştur. Yayılım beklendiği gibi tek yöndedir.

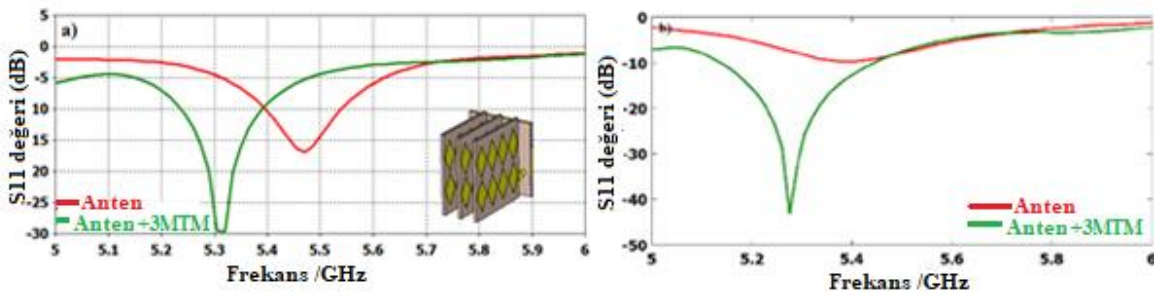


Şekil 5.19. Fraktal anten ve 2MTM yapısının 2 boyutlu ışım eğrisi grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm (normalize)

Şekil 5.19a'da fraktal anten ve 2 MTM yapısının $\Phi=0$ derecede yönlülük ışım eğrisi grafiği verilmiştir. Fraktal anten ve 2 MTM yapısının etkileşimi sonucu oluşan yeni yapının ana lobundaki ışım büyüklüğü 7,74 dBi, yan lobundaki ışım değeri -15,9 dB'dir. Hüzme açısı 64,9 derecedir. Şekil 5.19b'de görülen ürettiği yapıları Anten+2 MTM yapısında ana lobundaki ışımın arttığını, yan lobundaki ışımın azaldığını görülmektedir. MTM'li yapıların antenin yönlülüğü ve kazancı attırdığını görülmektedir.

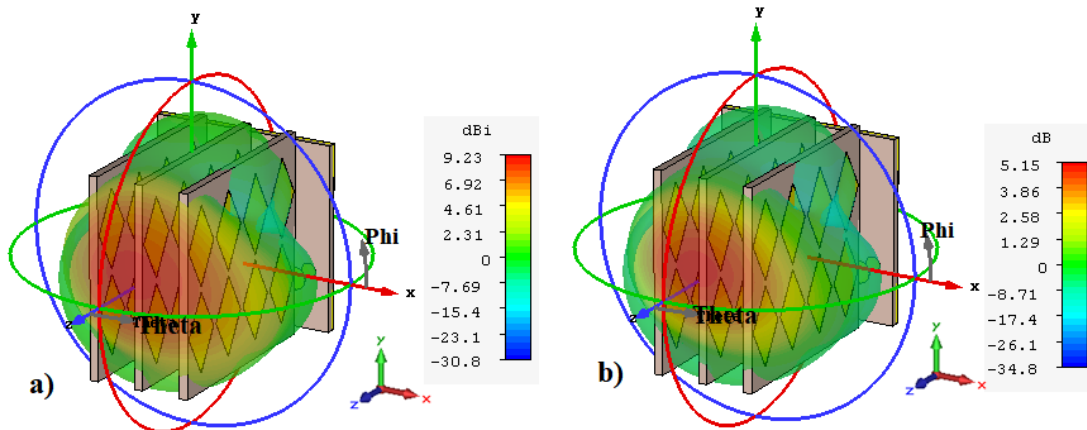


Şekil 5.20. Tasarlanan anten ve +3 MTM yapısının simülasyon görüntüsü



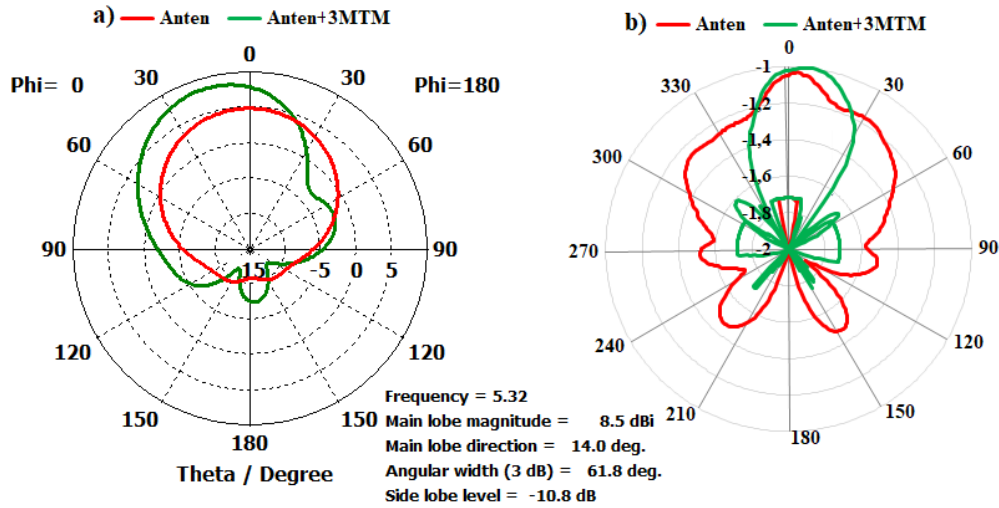
Şekil 5.21. Anten ve anten+3 MTM yapısının S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu

Antenin üzerine üç tane metamalzeme yapısı yerleştirildiğinde; yansımaya katsayısı olan S11 grafiği Şekil 5.21’de verilmiştir. Metamalzemeler arasındaki uzaklık 7,40 mm’dir. Tasarlanan antenin simülasyon sonuçlarına göre S11 değeri 5,32 GHz’de -29,576 dB’ye düşmüştür. Bant genişliği 159,2 MHz’e ulaşmıştır. Üretilen yeni yapımızın S11 değeri 5,275 GHz’de -43,119 dB ölçülmüştür. Oluşturulan antenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışınma eğrileri aşağıda verilmiştir.



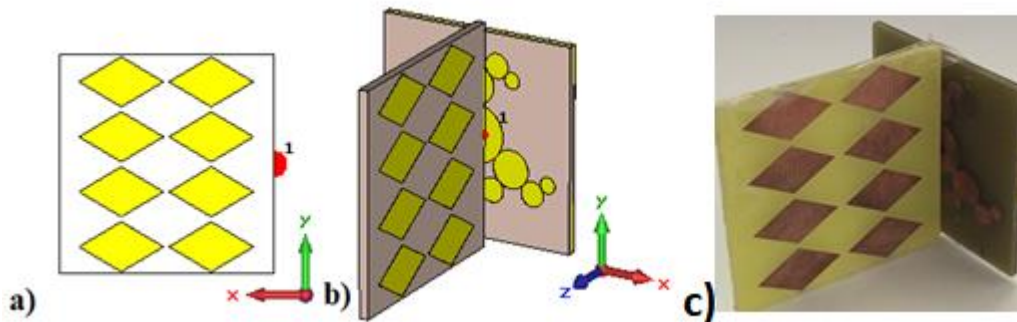
Şekil 5.22. Anten ile 3 MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Antenin kazancı MTM olmadan 1,19 dB iken, 3 MTM yapısı yerleştirildikten sonra 5,15 dB'ye yükseldiği Şekil 5.22b'de görülmektedir. Yönlülüğü ise 6,65 dBi'den 9,23 dBi'ye yükselmiştir.



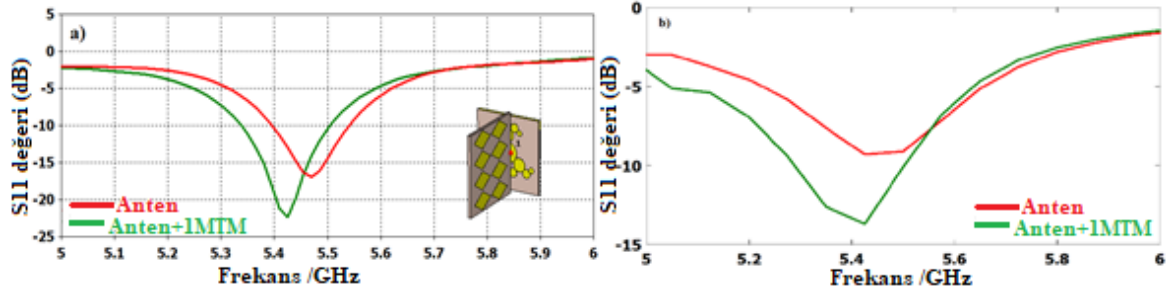
Şekil 5.23. Fraktal anten ve 3 MTM yapısının 2 boyutlu ışınma eğrisi grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm (normalize)

Şekil 5.23'te fraktal anten ile anten + 3 MTM yapısının hem sayısal hem de deneysel ölçüm sonucu açığa çıkan 2 boyutlu ışınma eğrisi grafikleri verilmektedir. Phi=0 derecede simülasyon grafiğine bakıldığında ana lobdaki ışınma büyüklüğü 8,5 dBi, yan lobdaki ışınma -10,8 dB seviyesindedir. Hüzme açısı 87,3 dereceden 61,8 dereceye indiği görülmektedir. Ölçüm sonucunda 2 boyutlu radyasyon paterni grafiğine baktığımızda yeni yapımızın hem yönlülüğü hem de kazancı arttırdığı görülmektedir. Üretim ve simülasyon sonuçları uyum içerisindedir. Işımanın tek yönde olduğu görülmektedir.



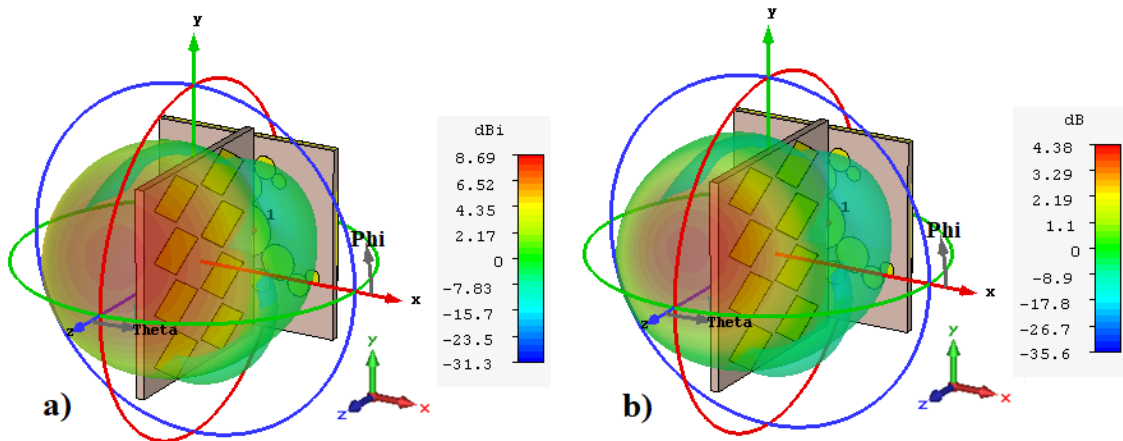
Şekil 5.24. Tasarlanan anten ve 1 MTM yapısının görüntüleri a) sayısal b) deneysel ölçüm

Tasarlanan MTM yapısı 90° döndürülerek anten üzerine Şekil 5.24'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Oluşturulan yeni yapının sayısal ve deneysel ölçüm S11 grafikleri Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



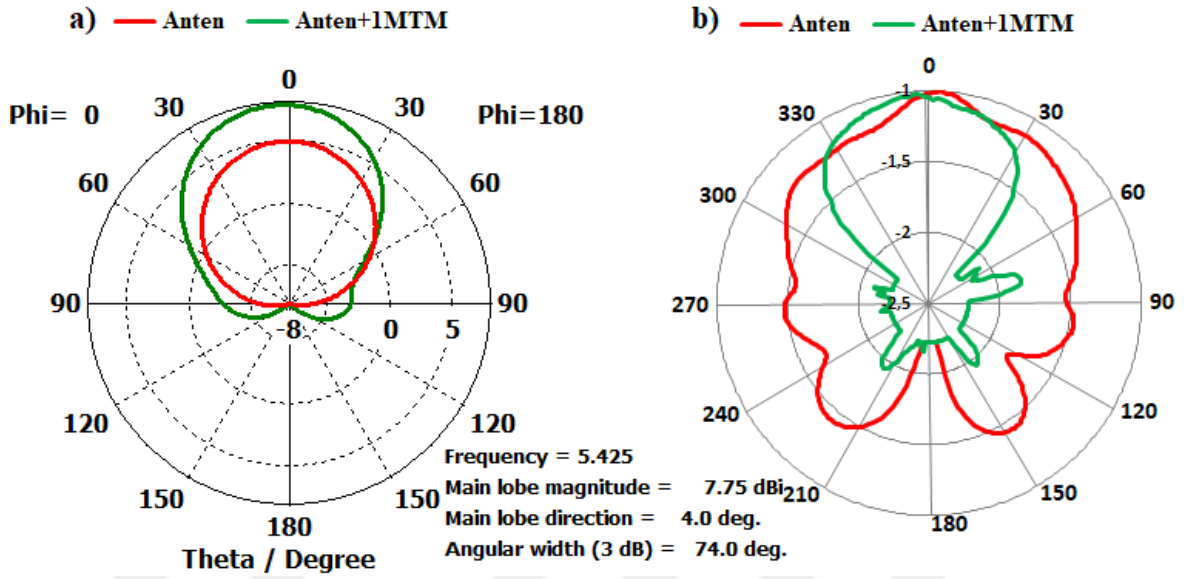
Şekil 5.25. Anten ve anten+1MTM yapısının S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu

Tasarlanan MTM yapımızı 90 derece çevirip antenimizin üzerine yerleştirdiğimizde simülasyon sonucunda S11 değeri $5,425$ GHz'de $-22,376$, deneysel çalışmada ise $5,425$ GHz'de $-13,678$ ölçülmüştür. Hem simülasyon hem de üretim sonuçlarından MTM yapısının S11 değerini düşürdüğü görülmektedir. Yapımızın bant genişliği $167,4$ MHz'dir. MTM yapısının bant genişliğini arttırdığı S11 değerinin de beklendiği gibi düşürdüğü görülmektedir. Oluşturulan antenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışınma eğrileri aşağıda verilmiştir.



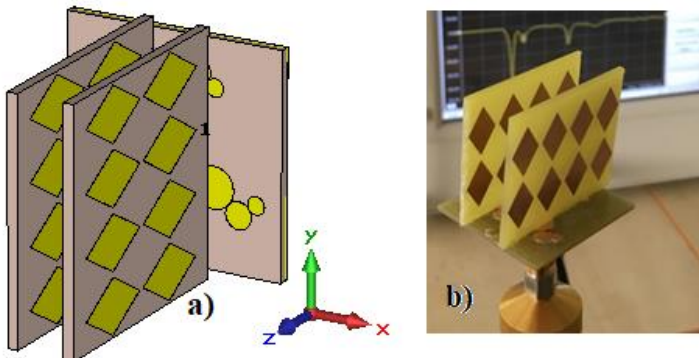
Şekil 5.26. Anten ile 1MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

MTM yapısı antenin yönlülüğünü ve kazancını arttırdığı Şekil 5.26a ve Şekil 5.26b'de görülmektedir. Tasarlanan antenin kazancı $1,19$ dB iken, 1 MTM eklendiğinde $4,38$ dB'ye, yönlülüğü $6,65$ dBi'den $8,69$ dBi'ye yükselmiştir.

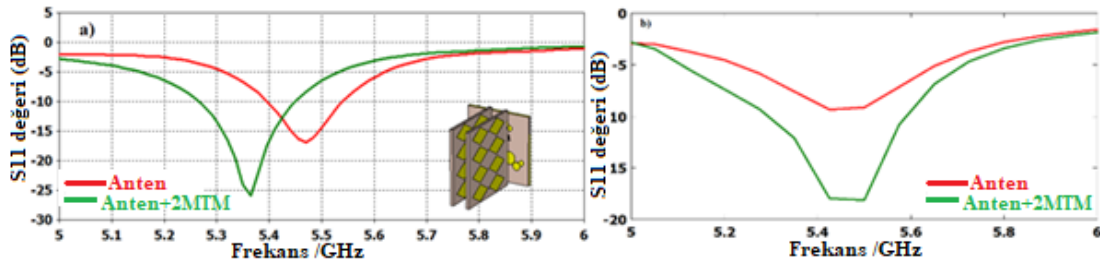


Şekil 5.27. Fraktal anten ve 1MTM yapısının 2 boyutlu ışınma eğrisi grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm (normalize)

Fraktal anten ve MTM yapısının sayısal ve deneysel ölçüm sonucunda elde edilen 2 boyutlu ışınma eğrisi grafikleri Şekil 5.27a ve Şekil 5.27b’de gösterilmektedir. Şekil 5.27a’ya bakıldığında anten ile 1MTM yapısının etkileşimi sonucu $\Phi=0$ derecede ana lobdaki ışınma büyüklüğü 7,75 dB, yan lobundaki ışınma değeri görülmemektedir. Hüzme açısı 74,0 derecedir. Üretim sonucu ortaya çıkan ışınma eğrisi grafiği Şekil 5.27b’de görülmektedir. Antenin yan loblarını azalttığı ana lobundaki ışınmayı arttırdığı görülmektedir. Aynı zamanda MTM yapısının antenin yönlülüğünü ve kazancını da arttırdığı görülmektedir.

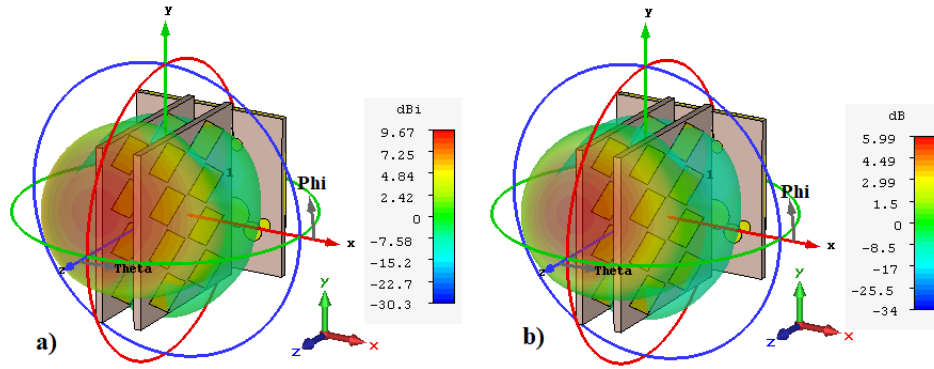


Şekil 5.28. Tasarlanan anten ve 2 MTM yapısının görüntüleri a) sayısal b) deneysel ölçüm



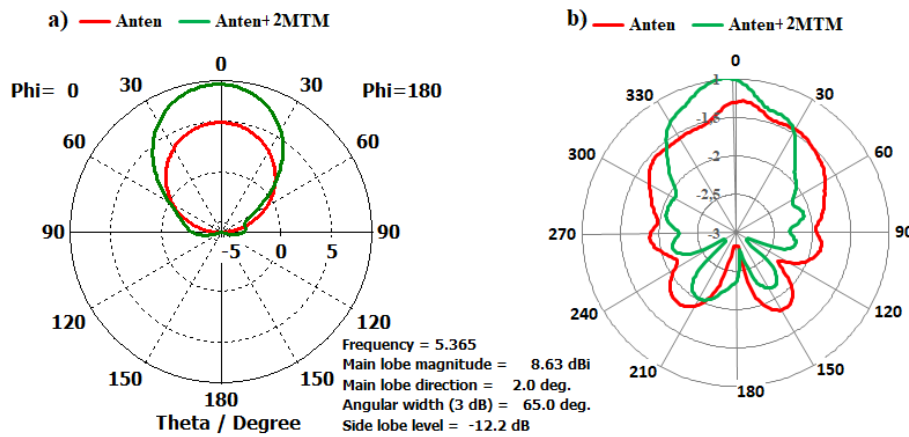
Şekil 5.29. Anten ve anten+2MTM yapısının S11 grafiği a) sayısal b) deneysel ölçüm sonucu

Antenin üzerine iki tane metamalzeme yapısı yerleştirildiğinde; yansımaya katsayısı (S11) Şekil 5.29'da gösterilmiştir. S11 değeri 5,365 GHz'de -25,908 dB'ye düşmüştür. Bant genişliği 183,5 MHz'dir. Üretilen yeni yapının S11 değeri 5,5 GHz'de -18,134 dB olmuştur. Oluşturulan antenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışınım eğrileri aşağıda verilmiştir.



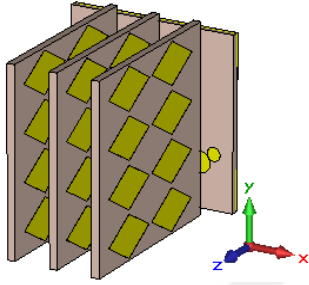
Şekil 5.30. Anten ile 2MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışınım eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Söz konusu antenin kazancı 1,19 dB iken 2 MTM eklendiğinde 5,99 dB,yönlülüğü 6,65 dBi'den 9,67 dBi'ye yükselmiştir. Işınım beklendiği gibi tek yönde olmuştur.

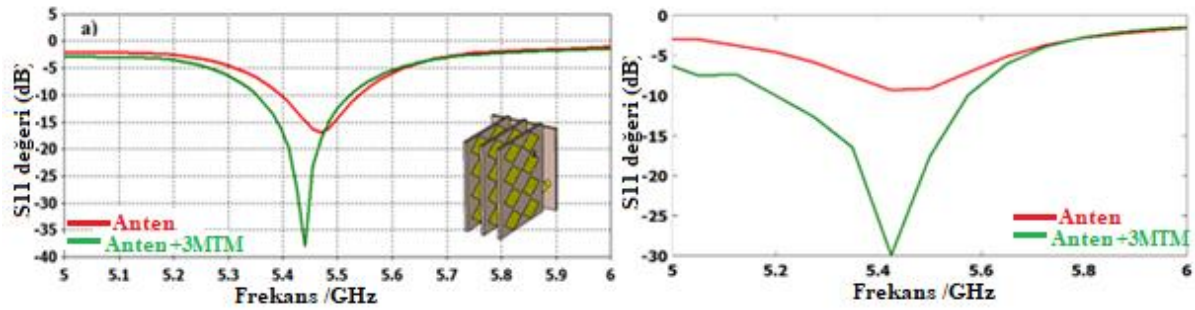


Şekil 5.31. Fraktal anten ve 2 MTM yapısının 2 boyutlu ışınım eğrisi grafiği a) sayısal b) deneysel ölçüm (normalize)

Fraktal anten ile 2 MTM yapısının etkileşimi sonucu sayısal ve deneysel ölçüm sonucu ortaya çıkan 2 boyutlu ışınım eğrisi grafikleri Şekil 5.31a ve Şekil 5.31b’de sırasıyla verilmiştir. $\Phi=0$ derecede simülasyon sonucuna göre MTM olmadan antenin ana lobundaki ışınım büyüklüğü 4,85 dBi, yan lobunda ışınım görülmemektedir. Antene 2MTM yapısı eklendiğinde ana lobundaki ışınım büyüklüğü 8,63 dB, yan lobundaki ışınım miktarı ise -12,2 dB olduğu görülmektedir. Hüzme açısı 87,3 dereceden 65,0 dereceye düşmektedir. Üretim sonucunda oluşan ışınım eğrisi grafiğine bakıldığında yan loblarda azalma, ana lobundaki ışınım miktarında artma görülmekte olup bununla birlikte antenin yönlülüğünü ve kazancını MTM yapıları ile arttırılmıştır.

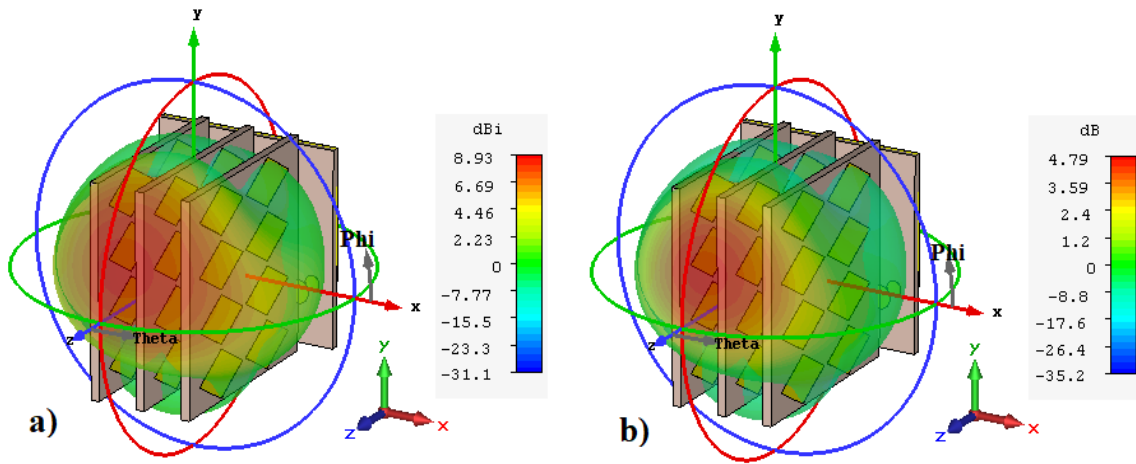


Şekil 5.32. Tasarlanan anten ve 3 MTM yapısının sayısal görüntüsü



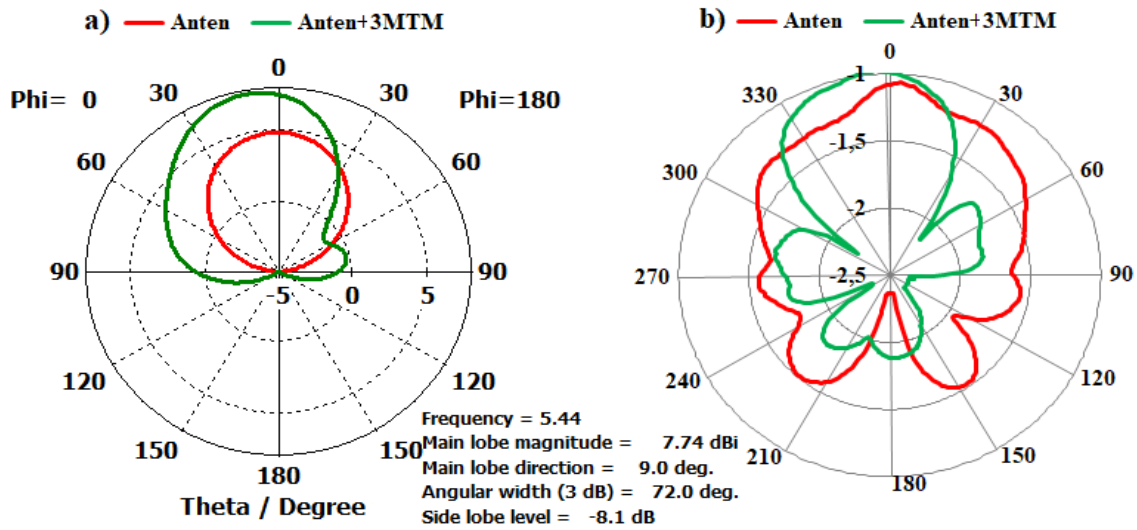
Şekil 5.33. Anten ve anten+3 MTM yapısının S11 grafiği a) sayısal b) Deneysel ölçüm sonucu

Antenin üzerine üç tane metamalzeme yapısı yerleştirildiğinde, yansımaya katsayısı, S11 Şekil 5.33’de verilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen S11 değeri 5,44 GHz’de -38,024 dB olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen yapının S11 değeri 5,425 GHz’de -29,923 dB olarak ölçülmüştür. Bant genişliği 172 MHz’dir. Oluşturulan antenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışınım eğrileri aşağıda verilmiştir.



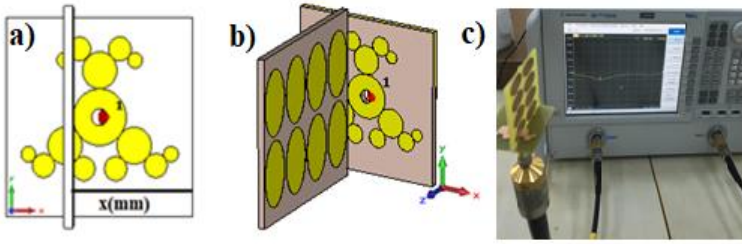
Şekil 5.34. Anten ile 3MTM yapısının üç boyutlu (3D) polar ışım eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

MTM yapıları eklenerek antenin kazancı 1,19 dB'den 4,79 dB'ye yönlülüğü 6,65 dBi'den 8,93 dBi'ye yükselmiştir.



Şekil 5.35. Fraktal anten ve 3 MTM yapısının görüntüleri a) sayısal b) deneysel ölçüm (normalize)

Fraktal anten ve MTM yapısının sayısal ve deneysel ölçüm sonucunda elde edilen 2 boyutlu ışım eğrisi grafikleri Şekil 5.35a ve Şekil 5.35b'de gösterilmektedir. $\Phi=0$ derecede simülasyon sonucu grafiğine bakıldığında ana lobdaki ışım büyüklüğü 7,74 dBi, yan loblardaki ışım miktarı -8,1 dB'dir. Hüzme açısı 72 derecedir. Üretim sonucunda MTM yapılarının antenin yan loblarını azalttığı ana lobundaki ışımayı arttırdığı görülmektedir. Aynı zamanda MTM yapısının antenin yönlülüğünü ve kazancını da arttırdığı görülmektedir.



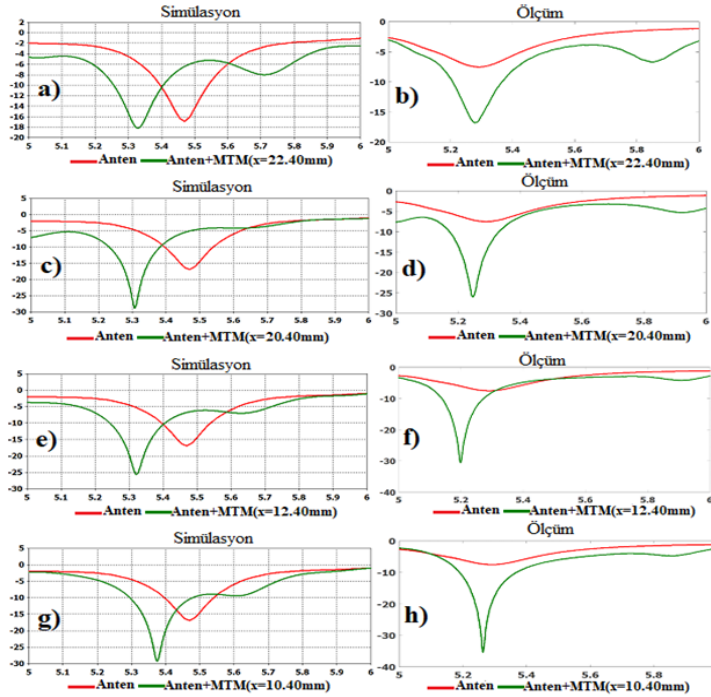
Şekil 5.36. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simülasyon programında 2 boyutlu gösterimi b) simülasyon programında 3 boyutlu şekli c) ölçüm düzeneği

Önceki sayfalarda detaylı bir biçimde anlatılan fraktal anten üzerine periyodik şekilde yerleştirilmiş eliptik şekillerden oluşan MTM yapısı 90° olarak yerleştirilmiştir ve Şekil 5.36’da gösterilmiştir. Oluşan yeni yapı simülasyon programında MTM yapısının konulacağı mesafe parametrik olarak atanmıştır. 15 farklı mesafeye yerleştirilen MTM yapısının antenin üzerindeki konumuna göre anten + 1MTM yapısının yansımaya katsayısı, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü, yan loblardaki ışımaya büyüklüğü ve ışımaya açısı değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Fraktal anten üzerine çeşitli mesafelerde konulan MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü, yan loblardaki ışımaya büyüklüğü ve ışımaya açısı değerleri

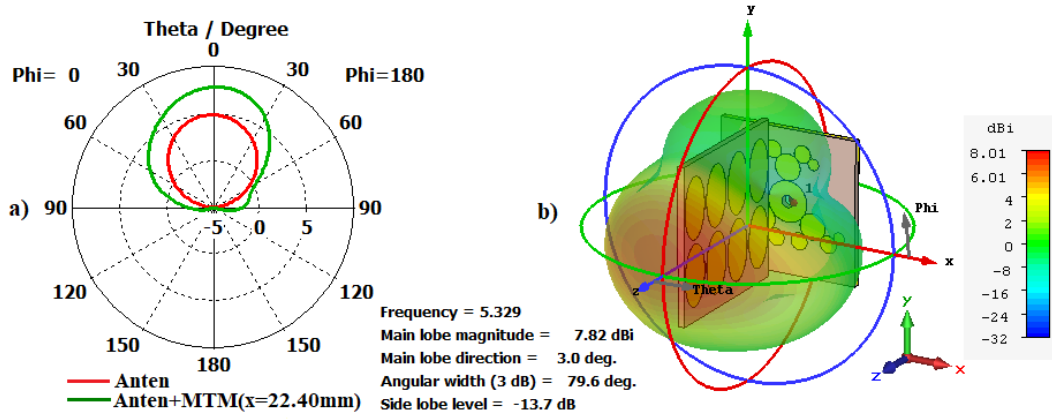
Mesafe(mm)	Frekans(GHz)	S11(dB)	yönlülük(dBi)	kazanç (dB)	ana lobdaki ışımaya büyüklüğü	yan loblardaki ışımaya miktarı	İşımaya açısı
32.40 mm	5,446	-12,405	7,64	2,09	7,8	-7,5	44,7
30.40 mm	5,448	-13,164	7,69	2,27	7,58	-3,7	49,1
28.40 mm	5,459	-18,352	7,61	2,91	7,44	-8,5	87,5
26.40 mm	5,448	-32,828	7,26	3,08	7,21	-10,9	94,8
24.40 mm	5,374	-15,871	7,96	4,56	7,9	-9,2	86,8
22.40 mm	5,329	-18,191	8,01	4,49	7,82	-13,7	79,6
20.40 mm	5,308	-28,787	7,53	2,45	7	-15	77,3
18.40 mm	5,324	-15,196	5,85	-0,637	4,22	-2,1	99
16.40 mm	5,373	-11,145	6,19	0,157	4,59	-2,8	99,9
14.40 mm	5,337	-13,528	7,72	2,23	7,43	-15,7	71,2
12.40 mm	5,322	-25,64	8,36	4,07	8,34	-15	71,6
10.40 mm	5,375	-29,2443	8	4,36	7,95	-9,5	82,4
8.40 mm	5,435	-29,868	7,32	3,05	7,31	-8,6	93,5
6.40 mm	5,445	-16,016	6,7	1,71	6,5	-8,6	102,8
4.40 mm	5,44	-13,102	6,96	1,46	6,84	-2,6	45,4

Çizelge 5.2’ye bakıldığında anten üzerine yerleştirilen MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucunda antenin yönlülüğünü, kazancını, ana lobundaki ışımaya büyüklüğünü arttırdığı görülmektedir. Şekil 5.37’de $x=22,40$ mm; $20,40$ mm; $12,40$ mm; $10,40$ mm uzağa yerleştirilen MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu simülasyon ve ölçümde elde edilen S11 grafikleri verilmiştir.



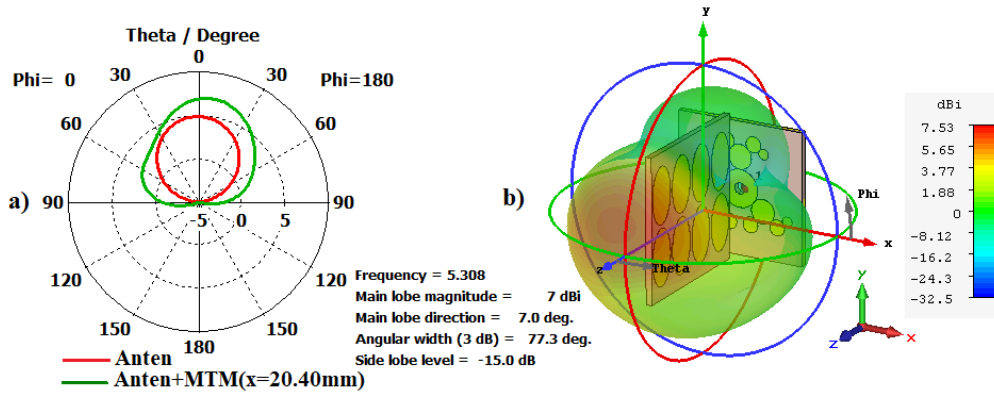
Şekil 5.37. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c), (e) ve (g) simülasyon sonuçları, (b), (d), (f) ve (h) deneysel ölçüm sonuçları

Şekil 5.37a ve Şekil 5.37b’de antenin üzerine 1MTM yapısı 90° gelecek şekilde $x=22,40$ mm uzaklığında yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Şekil 5.37a’da simülasyon sonucuna göre antenin S11 değeri 5,47 GHz’de -16,947 dB değerinde iken, antenin 1 MTM ile etkileşimi sonucunda yansıma katsayısı, S11 değerinin 5,329 GHz’de -18,191 dB olduğu görülmektedir. Simülasyon programında tasarımı yapılan anten laboratuvar ortamında üretildiğinde (Şekil5.37b) antenin S11 değeri 5,286 GHz’de -7,545 dB, 1MTM eklendiğinde bu değer 5,279 GHz’de -16,821 dB olmuştur. Bant genişliği ise 146 MHz iken 150 MHz olmuştur. Şekil5.37c ve Şekil5.37d’de antenin üzerine MTM yapısı 90° olacak biçimde $x=20,40$ mm uzaklığında yerleştirilmiştir. Simülasyon sonucuna göre anten+1MTM yapımızın S11 değeri 5,308 GHz’de -28,787 dB olduğu Şekil 5.37c’de görülmektedir. Ölçüm sonucuna göre üretilen MTM yapının S11 değeri 5,249 GHz’de -25,979 dB’dir. Bant genişliği 151,8 MHz’dir. Anten üzerine MTM yapısı $x=12,40$ mm uzaklığa yerleştirildiğinde yeni oluşan yapının simülasyon programında S11 değeri 5,322 GHz’de -25,640 dB, ölçüm sonucunda ise 5,199 GHz’de -30,531 dB olarak ölçülmüştür. Bant genişliği 162 MHz’dir. MTM yapısı $x=10,40$ mm uzağa yerleştirildiğinde oluşan anten+1MTM yapısının sayısal olarak elde edilen S11 değeri 5,375 GHz’de -29,243 dB, ölçüm sonucunda 5,263 GHz rezonans frekansında -35,3707 dB ölçülmüştür. Bant genişliği ise 183,2 MHz’dir.



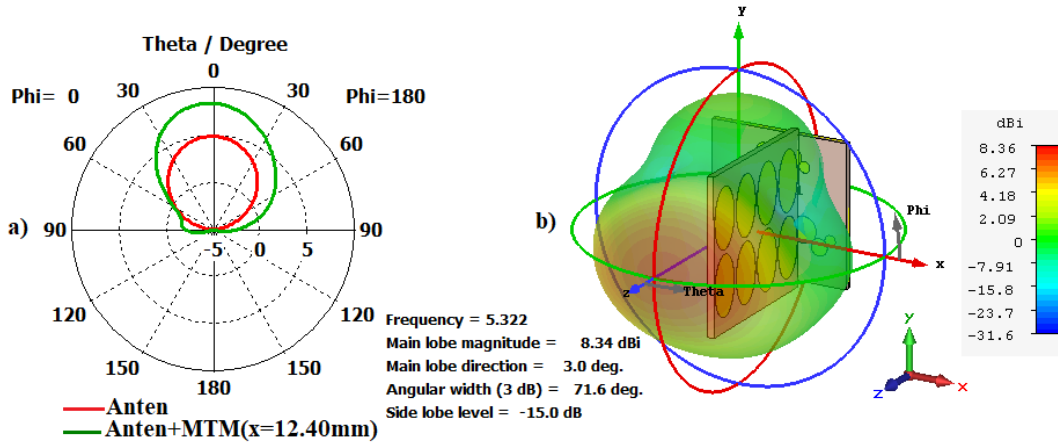
Şekil 5.38. Fraktal anten ve 1MTM yapısının ($x=22,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Şekil 5.38a'da verilen $\Phi=0$ derecede simülasyon sonucu grafiğine bakıldığında ana lobdaki ışınma büyüklüğü sadece antenin 4,85 dBi, $x=22,40$ mm uzaklığa konumlandırılmış MTM yapısı eklendiğinde 7,82 dBi, yan loblardaki ışınma miktarı hiç yokken MTM yapısı eklendiğinde -13,7 dB olmuştur. Hüzme açısı 87,3 derece iken, 79,6 dereceye düşmüştür. MTM yapısı eklenerek antenin yönlülüğü 6,65 dBi iken 8,01 dBi, kazancı 1,19 dB'den 4,49 dB'ye yükselmiştir.



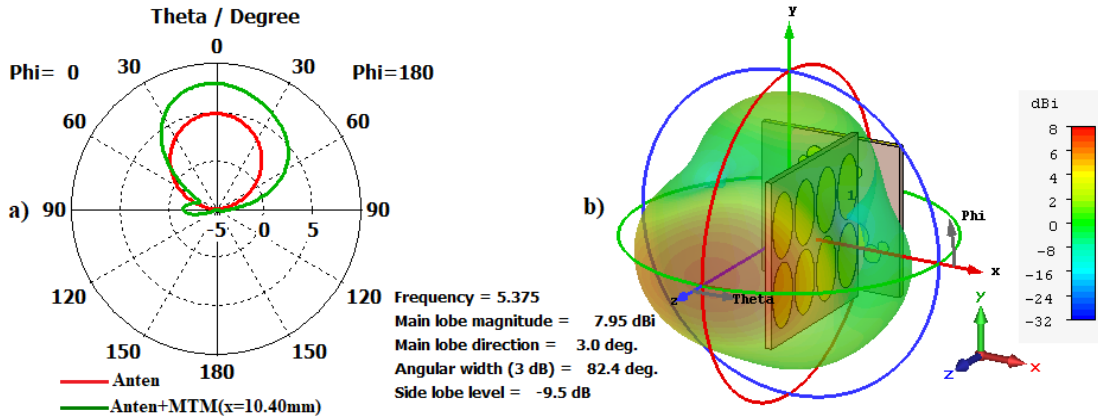
Şekil 5.39. Fraktal anten ve 1MTM yapısının ($x=20,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Fraktal antenin ve 1 MTM ($x=20,40$ mm) yapısının $\Phi=0$ derecede 2 ve 3 boyutlu uzak alan ışınma eğrileri Şekil 5.39'da verilmiştir. Antenin MTM yapısı ile etkileşimi sonucu ana lobundaki ışınma büyüklüğü 7,0 dBi, yan loblardaki ışınma miktarı -15,0 dB'dir. Hüzme açısı 77,3 derecedir. Oluşan yapının yönlülüğü 7,53 dBi, kazancı 2,45 dB'dir.



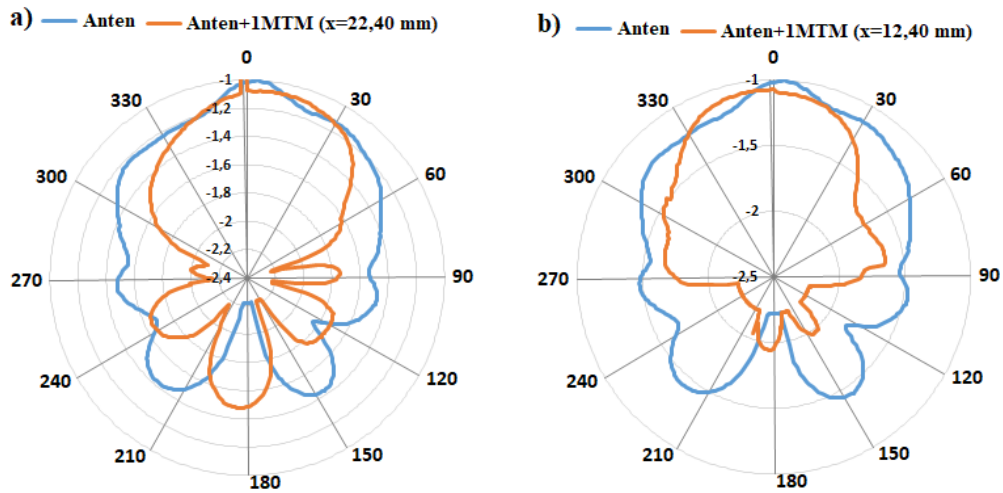
Şekil 5.40. Fraktal anten ve 1MTM yapısının (x=12,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Şekil 5.40'da Fraktal antenin ve 1 MTM (x=12,40 mm) yapısının Phi=0 derecede 2 ve 3 boyutlu uzak alan ışınma eğrileri verilmiştir. Anten+1MTM yapısının ana lobundaki ışınma büyüklüğü 8,34 dBi, yan loblardaki ışınma miktarı -15,0 dB'dir. Hüzme açısı 71,6 derecedir. Oluşan yapının yönlülüğü 8,36 dBi, kazancı 4,07 dB'dir.



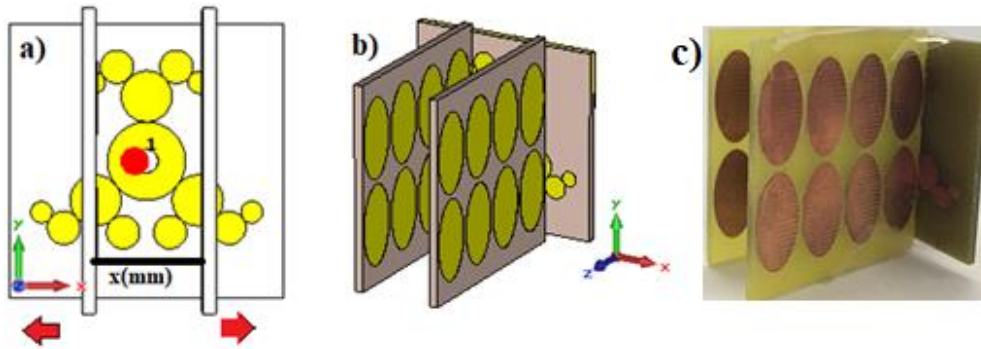
Şekil 5.41 Fraktal anten ve 1MTM yapısının (x=10,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Şekil 5.41'de fraktal anten üzerine eliptik MTM yapısı x=10.40 mm uzaklığa konumlandırılmıştır. Oluşan yapının ana lobundaki ışınma büyüklüğü 7,95 dBi, yan lobundaki ışınma miktarı -9,5 dB'dir. Hüzme açısı 82,4 derecedir. Şekil 5.41b'de ise yeni oluşturulan yapının 3 boyutlu yönlülük eğrisi verilmiştir. Antenin yönlülüğü 8,0 dB, kazancı 4,36 dB'dir.



Şekil 5.42. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) ($x=22,40$ mm) b) ($x=12,40$ mm)

Yukarıda verilen 2 boyutlu ışınma eğrisi anten üzerine $x=22,40$ mm, $x=12,40$ mm uzaklığında konumlandırılmış MTM yapıları ile etkileşimi sonucu laboratuvar ortamında oluşturulan yapıların MATS-1000 cihazı yardımıyla radyasyon paterni verileri elde edilmiş olup EXCEL programında grafiğe dökülmüştür. MTM yapısı sayesinde yan lobların azaldığı ve yönlülüğün arttığı görülmektedir.



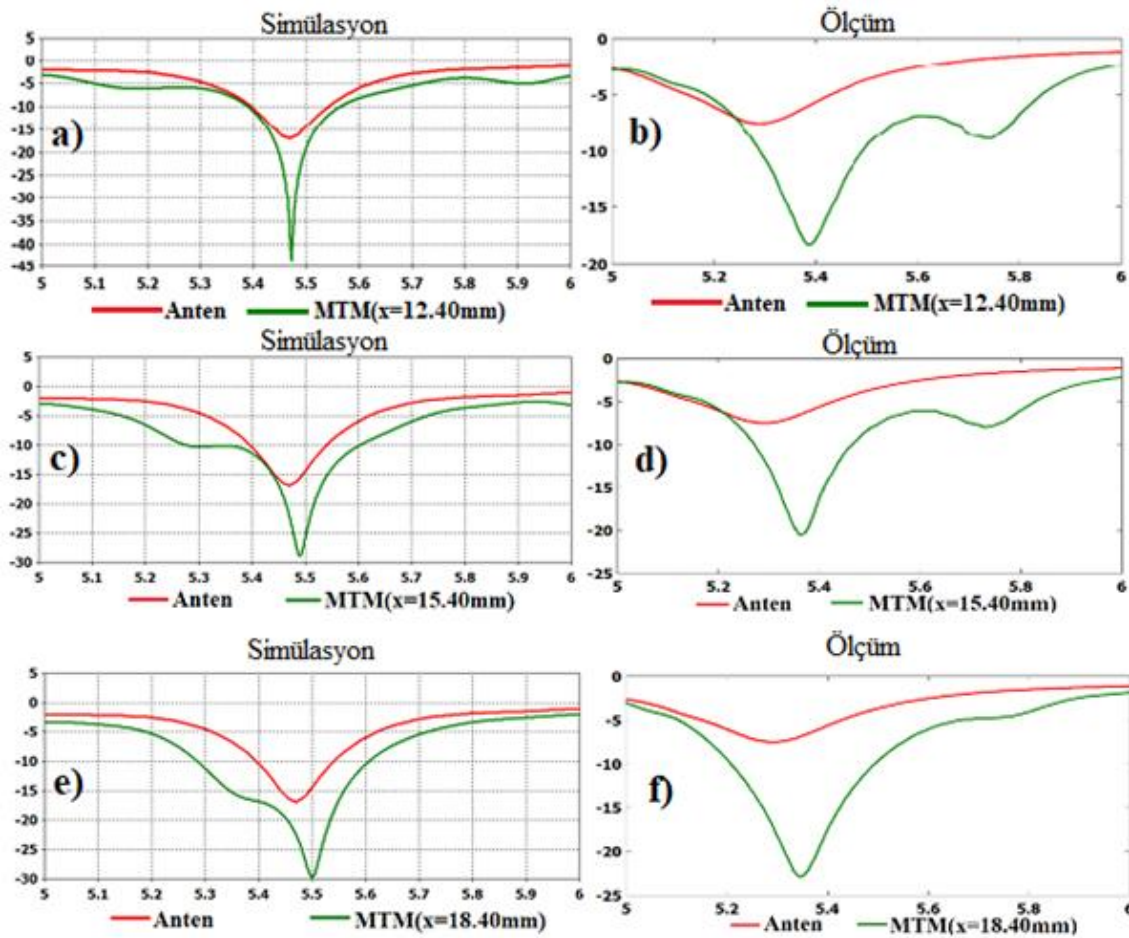
Şekil 5.43. Fraktal anten+2MTM yapısının a) simüle edilmiş 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilmiş 3 boyutlu şekli c) üretim şekli

Fraktal anten üzerine 2 MTM yapısı yerleştirilerek Şekil 5.43'de gösterilen yapı oluşturulmuştur. Oluşturulan yapı simüle edilirken iki MTM arasındaki mesafe referans alınarak parametrik atanmıştır ve 26 farklı uzaklık baz alınarak antenin 2MTM yapısı ile etkileşimi sonucunda ortaya çıkan S_{11} değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışınma büyüklüğü, yan loblardaki ışınma büyüklüğü ve ışınma açısı değerleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan 2MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışıma büyüklüğü, yan loblardaki ışıma büyüklüğü ve ışıma açısı değerleri

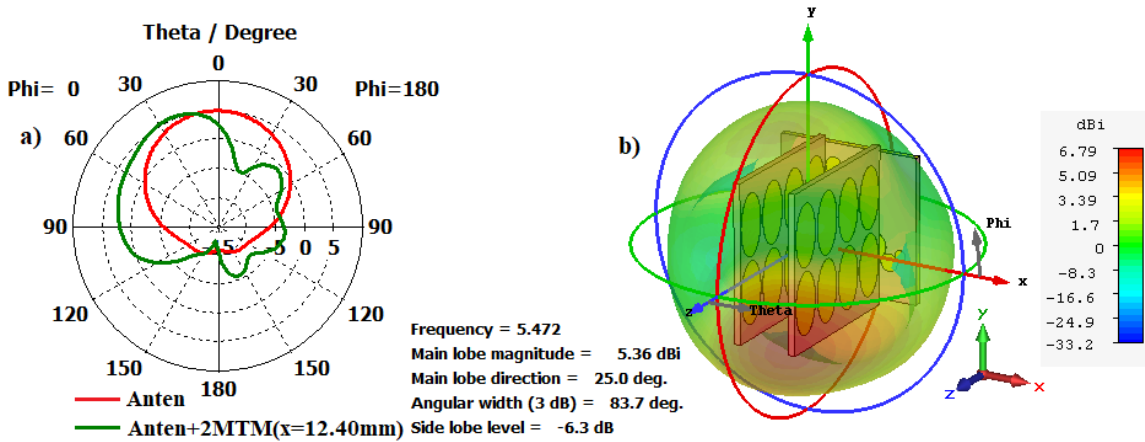
Mesafe(mm)	Frekans(GHz)	S11(dB)	yönlülük(dBi)	kazanç (dB)	ana lobdaki ışıma büyüklüğü	yan loblardaki ışıma miktarı	ışıma açısı
2,40 mm	5,122	-18,235	6,63	3,32	3,81	-10,8	148,1
3,40 mm	5,168	-25,544	7,13	3,95	4,38		143,1
4,40 mm	5,065	-28,329	5,04	1,67	4,17	-0,6	76,7
5,40 mm	5,061	-30,25	6,07	2,79	5,77	-4,1	81,4
6,40 mm	5,4	-14,64	7,46	4,68	5,7	-3,4	7,02
7,40 mm	5,109	-19,054	7,66	4,44	7,34	-8,7	84,5
8,40 mm	5,184	-18,08	8,02	5,05	7,35	-11,2	61
9,40 mm	5,451	-13,95	7,27	4,93	6,52	-4,3	83,9
10,40 mm	5,218	-14,016	9,14	6,17	8,96	-15,9	64,6
11,40 mm	5,535	-20,226	7,55	4,51	5,72	-11,4	76,5
12,40 mm	5,472	-43,634	6,79	3,19	5,36	-6,3	83,7
13,40 mm	5,582	-15,904	8,54	5,62	7,42	-14,5	57,1
14,40 mm	5,531	-22,271	7,98	4,78	6,33	-15,9	57,3
15,40 mm	5,49	-28,905	8,2	4,55	7,56	-11,7	53,5
16,40 mm	5,54	-17,177	9,22	6	8,84	-19,4	49,5
17,40 mm	5,448	-19,745	7,05	2,9	4,08	-3,5	50,5
18,40 mm	5,5	-29,69	8,93	5,23	8,54	-21,2	46,9
19,40 mm	5,461	-22,364	8,113	3,87	7,99	-10,5	44,9
20,40 mm	5,454	-16,573	6,64	2,05	6,57	-7,4	57,5
21,40 mm	5,457	-16,14	6,34	1,65	6,15	-7,5	53,4
22,40 mm	5,457	-17,127	8,23	3,59	7,85	-11,5	42,8
23,40 mm	5,437	-16,67	10	5,9	9,93	-12,5	44,2
24,40 mm	5,437	-15,36	9,61	5,17	9,61	-9,7	42,1
25,40 mm	5,438	-12,49	8,07	3,03	8,05	-6,4	41,5
26,40 mm	5,436	-12,47	9,34	4,41	9,22	-10,8	41,3
27,40 mm	5,437	-10,64	7,59	1,59	5,59	-3,5	42,2

Çizelge 5.3'e bakıldığında 2 MTM arasındaki mesafelere bağlı olarak anten ile etkileşimi sonucunda antenin S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışıma büyüklüğünün neredeyse hepsi için arttığı, hüzmeye açısının ise azaldığı görülmektedir. X=12,40 mm; 15,40 mm; 18,40 mm için sayısal ve ölçüm sonucu değerleri Şekil 5.44'de detaylı olarak verilmiştir.



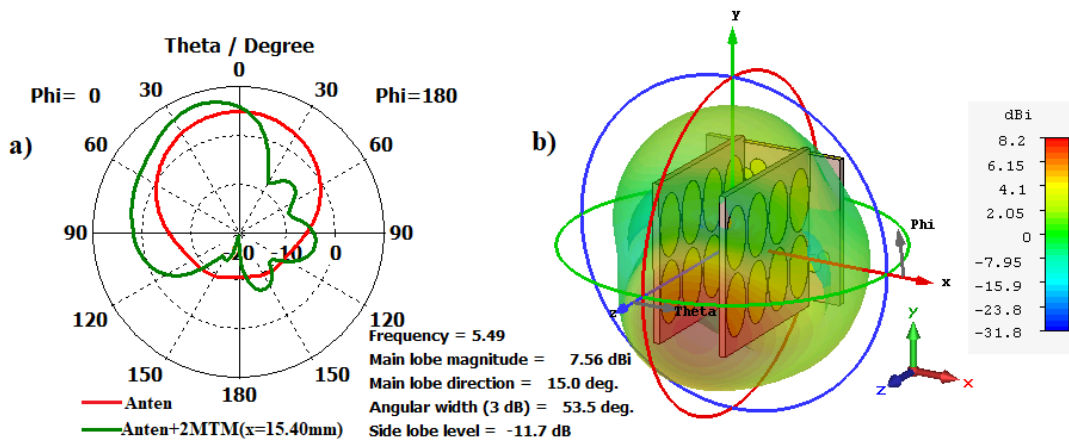
Şekil 5.44. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c), (e) simülasyon sonuçları, (b), (d), (f) ve ölçüm sonuçları

Şekil 5.44’de anten ile 2 MTM yapısının ($x=12,40$ mm) etkileşimi sonucunda oluşan yeni yapının yansıma katsayısı, S11 grafiği simülasyon ve ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 5.44a ve Şekil 5.44b’de verilmiştir. Simülasyon sonucuna göre antenin S11 değeri 5,47 GHz ‘de -16,947 dB değerinde iken, 2 MTM yapısı eklendikten sonra antenin S11 değeri 5,472 GHz’de -43,634 dB, ölçüm sonucuna göre 5,387 GHz’de -18,349 dB’dir. Bant genişliği 170,3 MHz’dir. 2MTM arasındaki mesafe $x=15,40$ mm olduğunda S11 değeri simülasyonda 5,49 GHz’de -28,905 dB, ölçüm sonucuna göre 5,36 GHz’de -20,506 dB’dir. Bant genişliği 324,5 MHz’dir. Aradaki mesafe $x=18,40$ mm iken S11 değeri simülasyonda 5,5 GHz’de -29,69 dB, ölçüm sonucuna göre 5,344 GHz’de -22,857 dB’dir. Bant genişliği ise 320,2 MHz’dir.



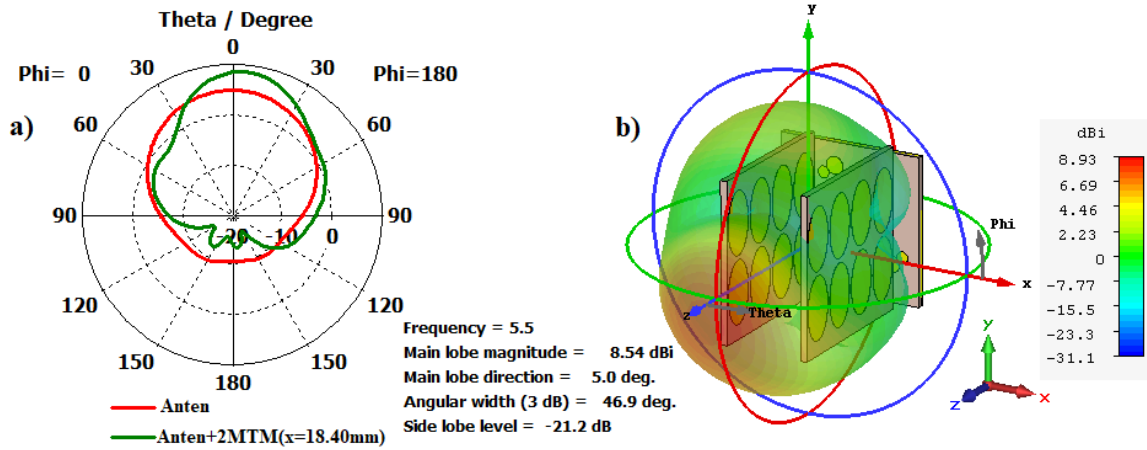
Şekil 5.45 Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=12,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınım eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Anten+2MTM yapısının 2 boyutlu ışınım eğrisi Şekil 5.45a'da verilmiştir. MTM olmadan antenin ana lobundaki ışınım büyüklüğü 4,85 dBi, hüzmeye açısı 87,3 derecedir. 2 MTM yapısı yerleştirildikten sonra antenin ana lobundaki ışınım büyüklüğü 5,36 dBi, hüzmeye açısı ise 83,7 dereceye düşmüştür. Antenin 3 boyutlu ışınım eğrisi incelendiğinde antenin yönlülüğünün 6,79 dBi, kazancının 3,19 dB'ye yükselmiştir.



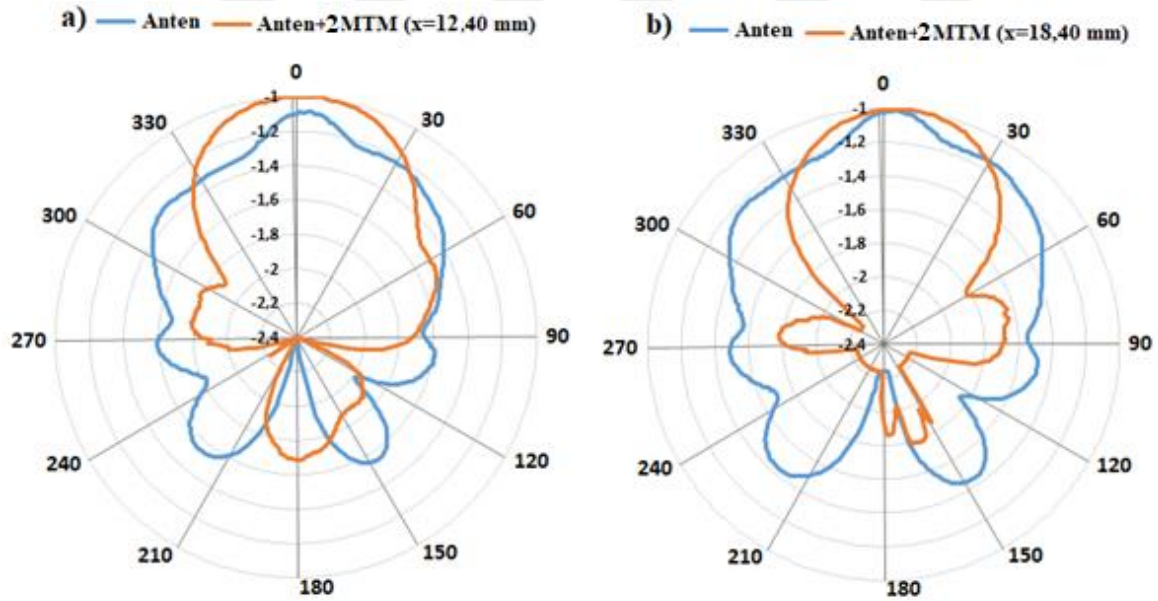
Şekil 5.46. Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=15,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınım eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Metamaterialler arasında ki uzaklık $x=15,40$ mm olduğunda; antenin ana lobundaki ışınım büyüklüğü 7,56 dBi, yan loblardaki ışınım miktarı -11,7 dB olduğu Şekil 5.46a'da görülmektedir. Hüzmeye açısı 53,5 derecedir. Antenin yönlülüğü 8,2 dBi, kazancı 4,55 dB'ye yükselmiştir. Antenin 2 MTM yapısı ile etkileşimi sonucunda antenin yönlülüğünün, kazancının ve ana lobundaki ışınım miktarının arttığı görülmektedir.



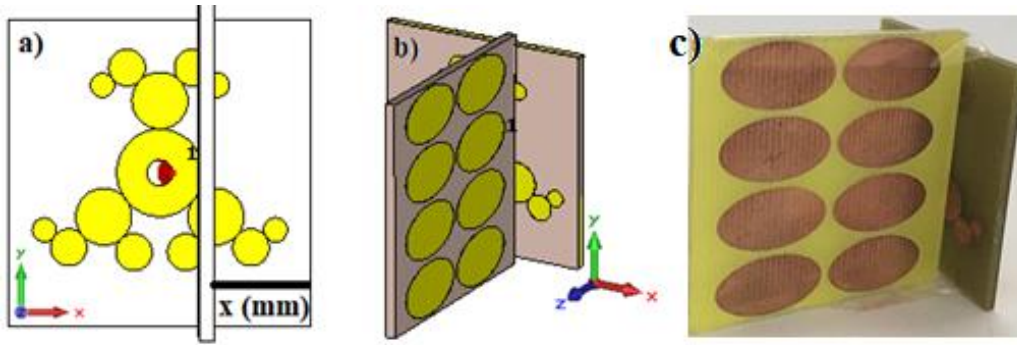
Şekil 5.47 Fraktal anten ve 2MTM yapısının (x=18,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Aradaki mesafe 18,40 mm olduğunda; antenin ana lobundaki ışınma büyüklüğü 8,54 dBi, yan loblardaki ışınma miktarı -21,2 dB olduğu Şekil 5.47a'da görülmektedir. Işınma açısı ise 46,9 derecedir. Antenin yönlülüğü 8,93 dBi, kazancı 5,23 dB'ye yükselmiştir.



Şekil 5.48. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) (x=12,40 mm) b) (x=18,40 mm)

Yukarıda Şekil 5.48'de x=12,40 mm ve x=18,40 mm uzaklıktaki MTM yapıları ve antenin etkileşimi sonucu laboratuvar ortamında elde edilen ölçüm sonuçları yer almaktadır. Antenin ışınmasına zıt yönde olan oluşan yan lobların küçüldüğü, ana loblardaki ışınmanın arttığı açıkça görülmektedir.



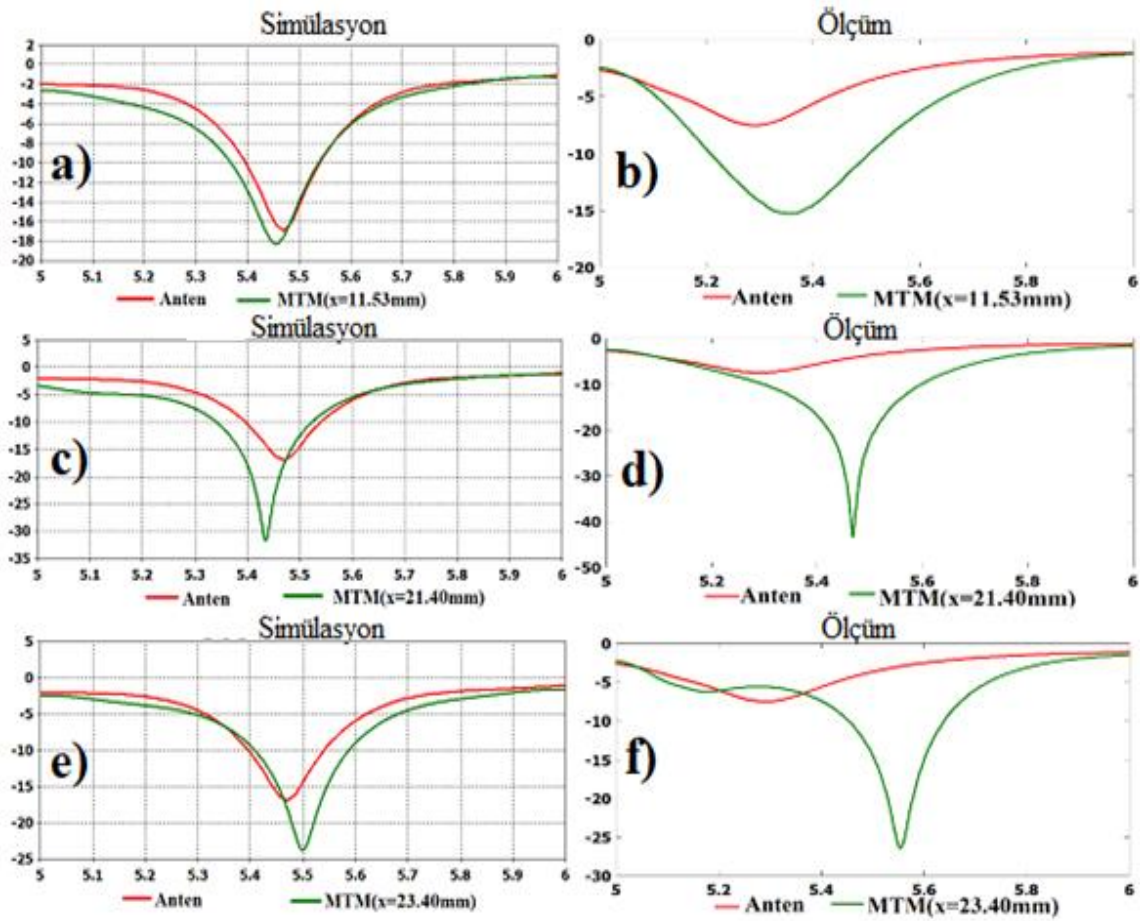
Şekil 5.49. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli

Anten üzerine MTM yapısı 90° çevrilmiş olarak çeşitli uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Anten ve MTM yapısının etkileşimi sonucu simülasyon programında yapının sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü, yan loblardaki ışımaya büyüklüğü ve ışımaya açısı değerleri elde edilmiş ve Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Fraktal anten üzerine çeşitli mesafelerde konulan 1MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü, yan loblardaki ışımaya büyüklüğü ve ışımaya açısı değerleri

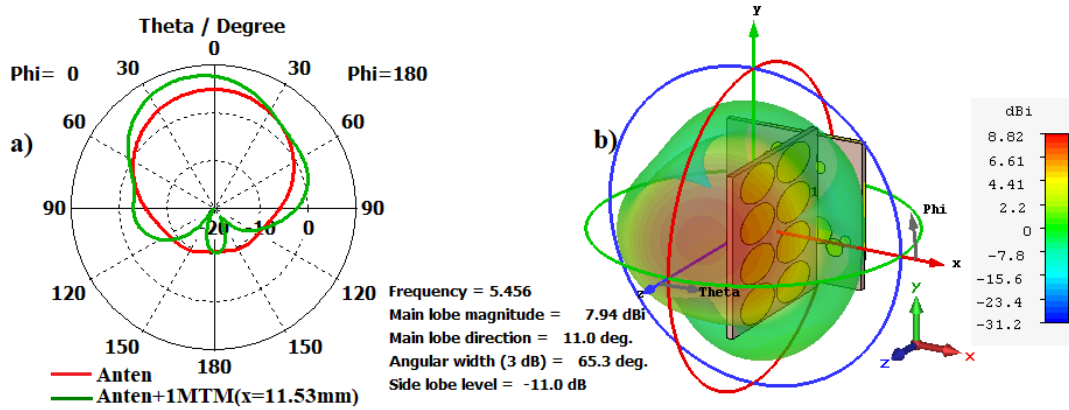
Mesafe(mm)	Frekans(GHz)	S11(dB)	yönlülük(dBi)	kazanç (dB)	ana lobdaki ışımaya büyüklüğü	yan loblardaki ışımaya miktarı	Işıma açısı
3,42mm	5,481	-12,873	7,61	1,68	5,91	-1,3	56,5
5,66 mm	5,487	-13,723	7,81	1,99	6,16	-2	57,8
7,41 mm	5,492	-15,652	8,3	3,07	6,92	-3,8	60,7
9,41 mm	5,448	-18,318	8,49	3,78	7,25	-4,9	63,8
11,53 mm	5,456	-18,288	8,82	4,38	7,94	-11	65,3
13,40 mm	5,443	-16,984	8,92	4,3	8,28	-19,6	65,7
15,40 mm	5,446	-14,695	8,37	3,35	7,88	-18,2	69,6
17,40 mm	5,436	-21,237	8,74	4,23	8,19	-21,1	69
19,40 mm	5,427	-20,336	8,67	3,76	8	-18,6	69
21,40 mm	5,435	-31,754	9,05	4,97	8,28	-12	68,3
23,40 mm	5,5	-23,749	8,59	4,54	7,42	-9,7	75,1
25,40 mm	5,502	-17,431	8,09	3,33	6,63	-8,6	103,8
27,40 mm	5,498	-14,323	7,65	2,2	5,85	-1,4	63,8
29,40 mm	5,49	-13,049	7,81	2,18	6,17	-1,6	59,2
31,40 mm	5,482	-12,193	7,26	1,32	5,27	-13,4	44,1

Anten üzerine $x = 11,53$ mm; $21,40$ mm; $23,40$ mm uzaklığa yerleştirilen MTM yapıları detaylı olarak incelenmiş olup; S11 sayısal grafikleri, Şekil 5.50a, Şekil 5.50c, Şekil 5.50e ve ölçüm grafikleri, Şekil 5.50b, Şekil 5.50d, Şekil 5.50f'de verilmiştir.



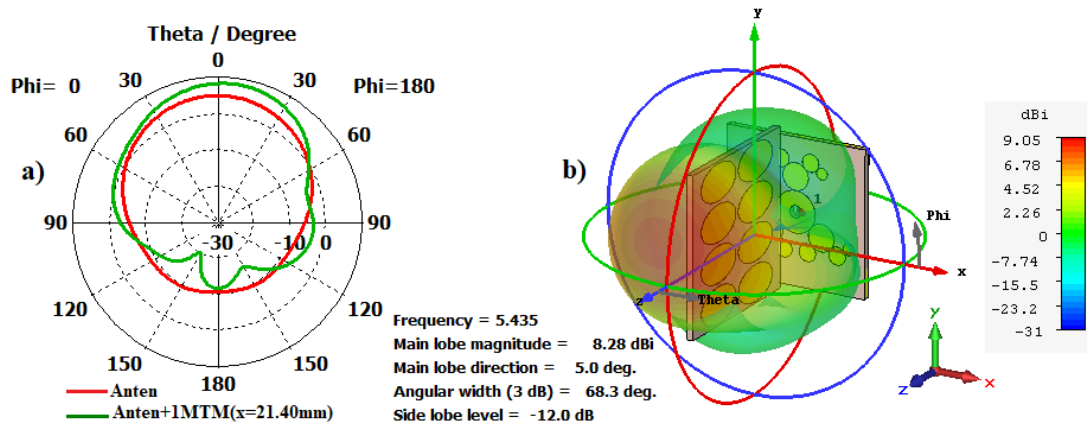
Şekil 5.50. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c), (e) simülasyon sonuçları, (b), (d), (f) ölçüm sonuçları

Şekil 5.50a ve Şekil 5.50b'ye bakıldığında MTM yapısı anten üzerine $x=11,53$ mm uzağa yerleştirilmiş olup, yapının yansımaya katsayısı, S11 sayısal ve ölçüm grafikleri verilmiştir. Simülasyon programına göre S11 değeri 5,456 GHz'de -18,288 dB, ölçüm sonucuna göre 5,365 GHz'de -15,321 dB ölçülmüştür. Bant genişliği 169,2 MHz'dir. $X=21,40$ mm uzaklığa MTM yapısı yerleştirildiğinde sayısal S11 değeri Şekil 5.50c'de verilmiş ve 5,435 GHz'de -31,754 dB, ölçüm sonucuna göre S11 değeri Şekil 5.50d'de görüldüğü gibi 5,468 GHz'de -43,370 dB ölçülmüştür. Bant genişliği 182,2 MHz'dir. $X=23,40$ mm uzağa yerleştirildiğinde MTM yapısı sayısal S11 değeri Şekil 5.50e'de verilmiş ve 5,5 GHz'de -23,749 dB, ölçüm sonucuna göre S11 değeri Şekil 5.50f'de görüldüğü gibi 5,554 GHz'de -26,4879 dB ölçülmüştür. Bant genişliği 178,8 MHz'dir.



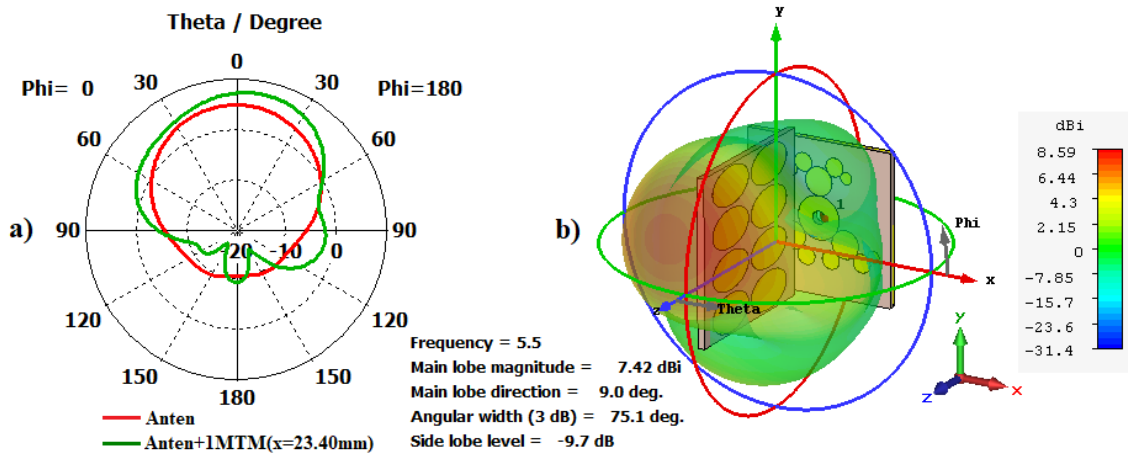
Şekil 5.51 Fraktal anten ve 1MTM yapısının (x=11,53 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Fraktal anten ve MTM yapısının etkileşimi sonucu yapının 2 ve 3 boyutlu ışıma eğrisi grafikleri Şekil 5.51’de verilmiştir.2 boyutlu ışıma eğrisi grafiğine göre antenin ana lobundaki ışıma büyüklüğü 7,94 dBi’ye yükselmiş olup, yan loblardaki ışıma miktarı -11,0 dB olmuştur. Hüzme açısı ise 65,3 derecedir. 3 boyutlu ışıma eğrisi grafiğine baktığımızda antenin yönlülüğü 8,82 dBi, kazancı ise 4,38 dB’ye yükselmiştir.



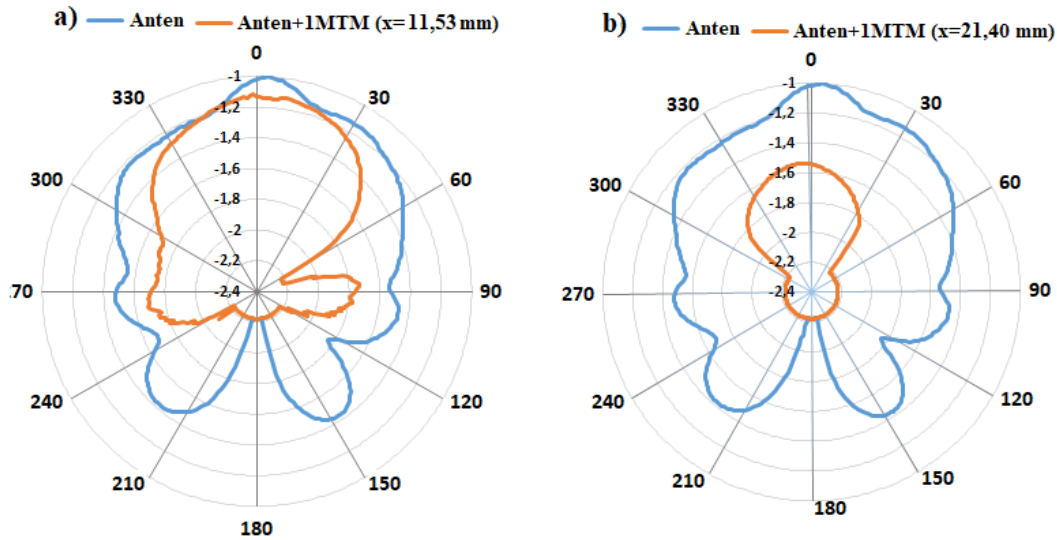
Şekil 5.52. Fraktal anten ve 1MTM yapısının (x=21,40 mm) Phi=0 derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Fraktal anten ve MTM yapısının etkileşimi sonucu yapının 2 ve 3 boyutlu ışıma eğrisi grafikleri Şekil 5.52’de verilmiştir Ana lobundaki ışıma büyüklüğü 8,28 dBi, yan loblardaki ışıma miktarı -12,0 dB’dir. Hüzme açısı ise 68,3 derecedir. Antenin yönlülüğü 9,05 dBi, kazancı 4,97 dB’dir.



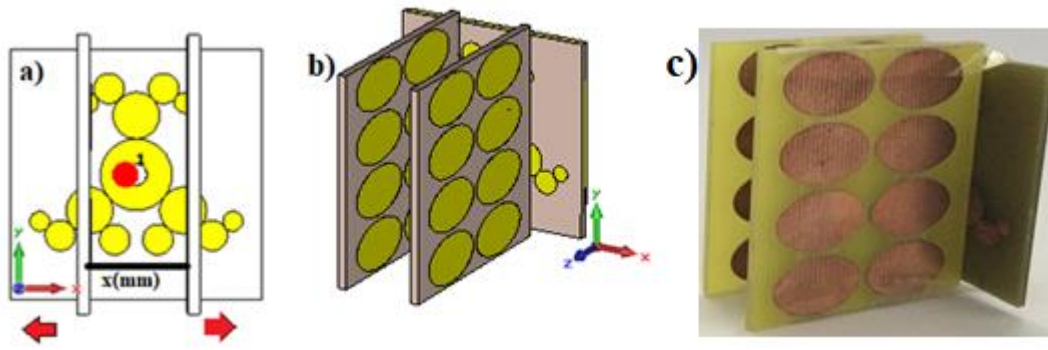
Şekil 5.53. Fraktal anten ve 1MTM yapısının ($x=23,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışım eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Fraktal anten üzerine MTM yapısı $x=23,40$ mm uzaklığa bırakıldığında; ana ve yan loblardaki ışım büyüklüğü sırasıyla 7,42 dBi ve -9,7 dB'dir. Hüzme açısı 75,1 derecedir. Şekil 5.53b'de görüldüğü gibi antenin yönlülüğü 8,59 dBi, kazancı 4,54 dB'dir.



Şekil 5.54. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) ($x=11,53$ mm) b) normalize ($x=21,40$ mm)

Yukarıda Şekil 5.54'de $x=11,53$ mm ve $x=21,40$ mm uzaklıktaki MTM yapısı ve antenin etkileşimi sonucu laboratuvar ortamında elde edilen ölçüm sonuçları yer almaktadır. MTM yapısının yan lobları azalttığı görülmektedir.



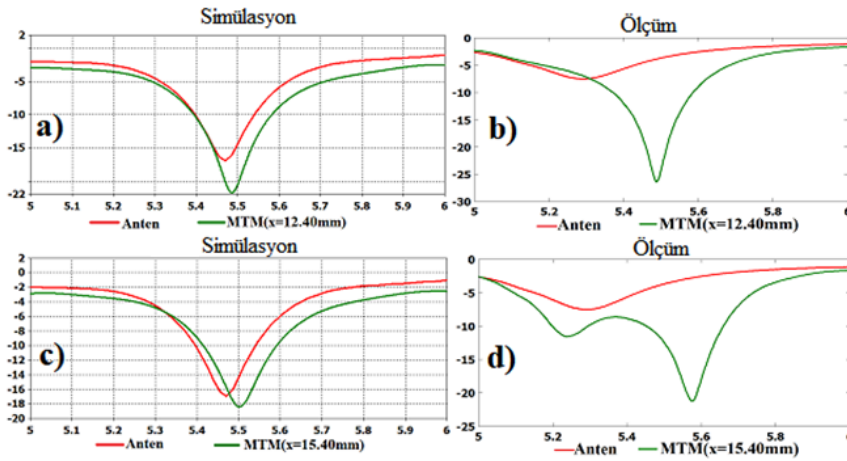
Şekil 5.55. Fraktal anten+2MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli

Fraktal anten üzerine 90° gelecek şekilde aralarında farklı mesafeler bulunan 2MTM yapısı yerleştirilmiş olup simülasyon programında 26 farklı yapının S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışınma büyüklüğü, yan loblardaki ışınma büyüklüğü ve ışınma açısı değerleri tespit edilip Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan 2 MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışınma büyüklüğü, yan loblardaki ışınma büyüklüğü ve ışınma açısı değerleri

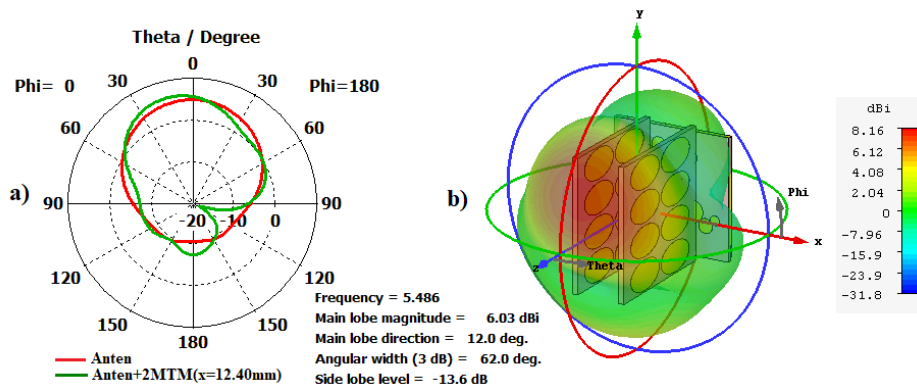
Mesafe(mm)	Frekans(GHz)	S11(dB)	yönlülük(dBi)	kazanç (dB)	ana lobdaki ışınma büyüklüğü	yan loblardaki ışınma miktarı	ışınma açısı
3,40 mm	5,361	-16,943	5,1	1,08	2,15	-0,6	52,6
4,40 mm	5,361	-13,163	6	1,11	1,86	-9	147,1
5,40 mm	5,357	-12,917	6,34	1,39	2,18	-9,4	144,1
6,40 mm	5,382	-14,661	6,8	2,17	3,28	-10,6	112
7,40 mm	5,378	-15,644	6,53	2,04	2,57	-9,3	130,4
8,40 mm	5,395	-17,454	7,91	3,61	5,9	-14,1	72,1
9,40 mm	5,418	-20,038	7,79	3,67	5,61	-12,7	72,3
10,40 mm	5,457	-21,216	7,86	4	7	-13,8	71,9
11,40 mm	5,479	-21,352	8,04	4,25	5,77	-13,1	69,9
12,40 mm	5,486	-21,751	8,16	4,39	6,03	-13,6	62
13,40 mm	5,479	-21,946	7,62	3,83	4,32	-11,6	72,4
14,40 mm	5,496	-19,683	8,58	4,61	6,58	-13,9	62,8
15,40 mm	5,502	-18,395	8,66	4,63	6,63	-14,1	61,5
16,40 mm	5,498	-17,637	7,97	3,79	4,54	-12,2	68,7
17,40 mm	5,513	-16,63	8,78	4,55	6,38	-14,8	61,5
18,40 mm	5,515	-15,818	8,74	4,47	6,24	-13,5	59,6
19,40 mm	5,519	-14,302	8,93	4,34	6,41	-14,5	58,2
20,40 mm	5,508	-15,099	8,39	3,97	4,07	-13,4	62
21,40 mm	5,509	-13,851	8,33	3,52	4,09	-12,6	62,6
22,40 mm	5,518	-12,659	9,22	4,22	6,49	-15,1	54,1
23,40 mm	5,516	-12,109	9,26	4,13	6,43	-15,1	53,1
24,40 mm	5,515	-11,762	9,64	4,62	7,23	-11,5	50,9
25,40 mm	5,51	-11,039	9,3	3,97	5,82	-11,1	50,1
26,40 mm	5,503	-10,88	8,52	2,84	3,67	-6,9	51,7
27,40 mm	5,505	-10,621	9,24	3,5	5,74	-7,7	47,8
28,40 mm	5,503	-10,357	9,16	3,21	5,36	-8,7	47,6

2 MTM arasındaki mesafe $x=12,40$ mm ve $x=18,40$ mm olarak ayarlanıp anten ile etkileşimi sonucunda Şekil 5.56a, Şekil 5.56c simülasyon sonuçları, Şekil 5.56b, Şekil 5.56d'de ölçüm sonuçları S11 parametrelerindeki değişim detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 5.56. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları

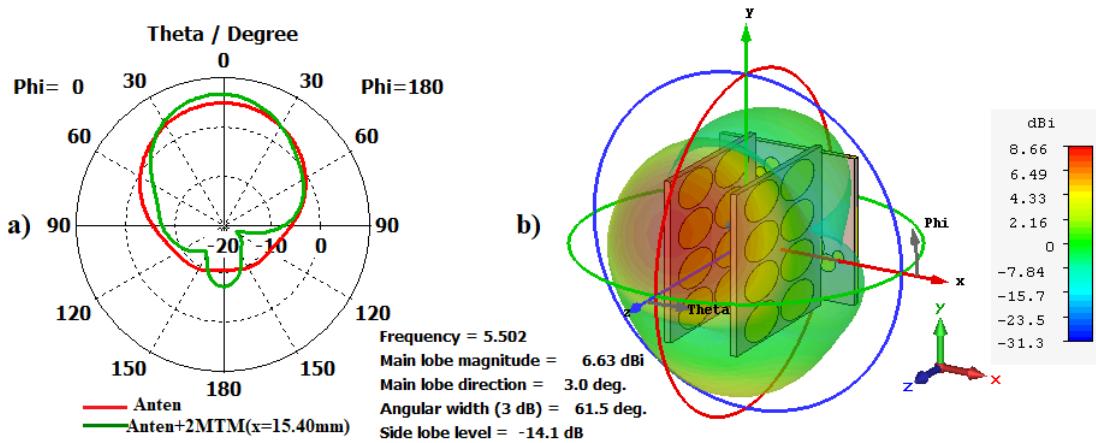
Anten ile 2MTM yapısının ($x=12,40$ mm) etkileşimi sonucu yansıma katsayısı, S11'in sayısal ve ölçüm değerleri sırasıyla; 5,486 GHz'de -21,751 dB; 5,488 GHz'de -26,389 dB'dir. Bant genişliği 188,7 MHz'dir. 2 MTM arasında $x= 15,40$ mm mesafe bırakıldığında bu kez sayısal ve ölçüm sonucu S11 değerleri sırasıyla 5,502 GHz'de -18,395 dB; 5,57 GHz'de -21,216 dB olmuştur. Bant genişliği ise 175,2 MHz'dir. Anten ile 2 MTM yapısının kazancını, yönlülüğünü tespit edebilmek için 2 ve 3 boyutlu ışınma eğrilerini incelemek gerekir.



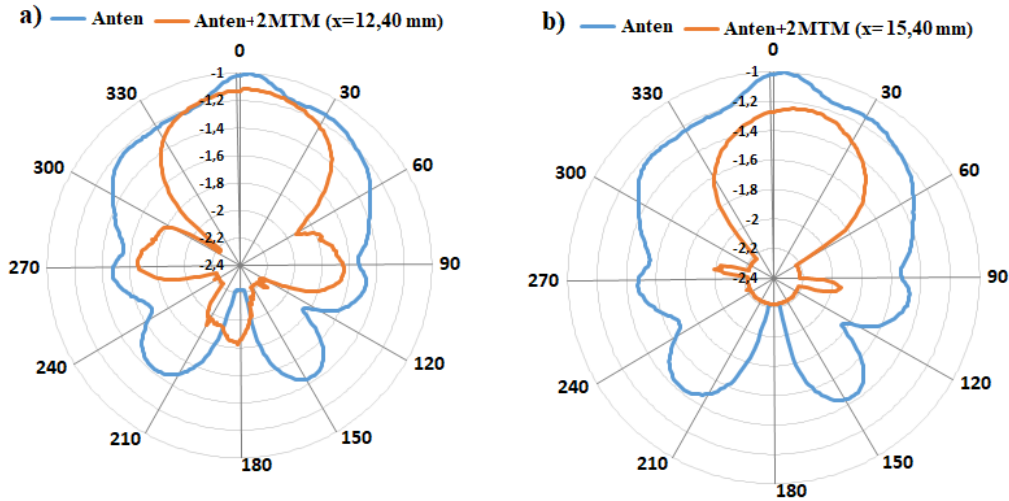
Şekil 5.57. Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=12,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Fraktal anten üzerine 2 MTM yapısı arasındaki uzaklık $x=12,40$ mm olarak ayarlanıp bırakıldığında; Ana ve yan loblardaki ışınma büyüklüğü sırasıyla 6,03 dBi ve -13,6 dB olduğu Şekil 5.57a'da görülmektedir. Hüzme açısı 62,0 derecedir. Şekil 5.57b'de görüldüğü gibi antenin yönlülüğü 8,16 dBi, kazancı 4,39 dB'dir.

Şekil 5.58a'ya bakıldığında fraktal anten ile 2 MTM arasında $x=15,40$ mm mesafe bırakıldığında ana ve yan loblardaki ışıma büyüklükleri sırasıyla 6,63 dBi, -14,1 dB olarak verilmiştir. Hüzme açısı 61,5 derecedir. Antenin yönlülüğüne baktığımızda 8,66 dBi, kazancı 4,63 dB olduğu Şekil 5.58b'de görülmektedir. İki yapı içinde 2 MTM yapısının antenin yönlülüğünü, kazancını, ana loblardaki ışıma büyüklüğünü arttırmıştır. Hüzme açısını ise azalttığı görülmektedir.

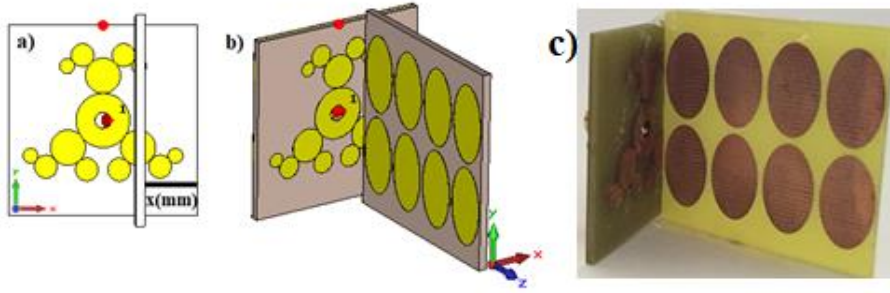


Şekil 5.58. Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=15,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu



Şekil 5.59. Fraktal anten ve 2MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) ($x=12,40$ mm) b) ($x=15,40$ mm)

MTM'ler arasındaki uzaklık $x= 12,40$ mm ve $x=15,40$ mm seçildiğinde laboratuvar ortamında elde edilen ışıma eğrisi grafikleri Şekil 5.59'da verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi antenin yan loblardaki ışıma miktarı azalmıştır.



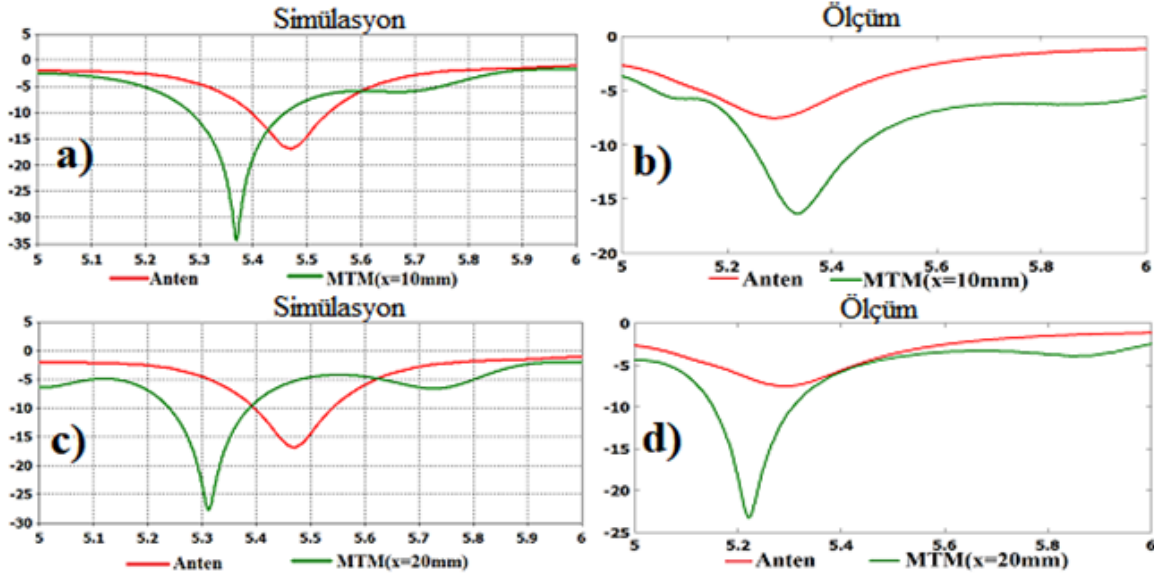
Şekil 5.60. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli

Fraktal anten üzerine MTM yapısı 90° gelecek biçimde Şekil 5.60b’de gösterildiği gibi yeni yapı tasarlanmıştır. MTM yapısı anten üzerine 15 farklı yere konulmuş ve anten ile MTM yapılarının etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışınma büyüklüğü, yan loblardaki ışınma büyüklüğü ve ışınma açısı değerleri simülasyon programında tespit edilmiş ve Çizelge 5.5’te yer verilmiştir.

Çizelge 5.6. Fraktal anten üzerine çeşitli mesafelerde konulan MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışınma büyüklüğü, yan loblardaki ışınma büyüklüğü ve ışınma açısı değerleri

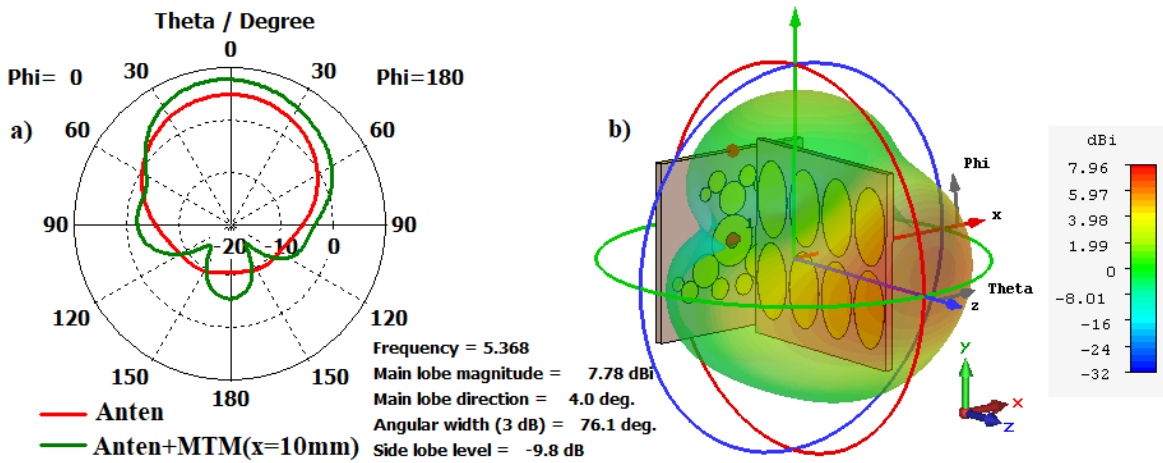
Mesafe(mm)	Frekans(GHz)	S11(dB)	yönlülük(dBi)	kazanç (dB)	ana lobdaki ışınma büyüklüğü	yan loblardaki ışınma miktarı	ışınma açısı
4 mm	5,44	-13,413	6,6	1,17	6,46	-1,3	47,7
6 mm	5,446	-18,366	6,97	2,03	6,67	-8,3	97,8
8 mm	5,412	-32,181	7,65	3,61	7,54	-9,3	91,3
10 mm	5,368	-34,889	7,96	4,38	7,78	-9,8	76,1
12 mm	5,33	-17,607	8,07	3,67	7,79	-14,9	69,8
14 mm	5,341	-11,967	6,67	0,576	6,49	-3	55,1
16 mm	5,364	-11,295	6,56	0,615	5,47	-4,1	102
18 mm	5,32	-16,811	6,24	0,071	5,35	-2,7	92,4
20 mm	5,314	-27,089	8,2	3,69	8,07	-14,3	74,4
22 mm	5,346	-17,272	8,21	4,65	8,15	-10,1	81,8
24 mm	5,416	-18,709	7,93	4,42	7,92	-9,4	87,5
26 mm	5,456	-21,757	7,21	2,8	7,07	-11,3	96,6
28 mm	5,45	-14,886	7,26	2,28	5,12	-2,8	85,6
30 mm	5,446	-11,649	7,45	1,75	7,4	-4	45,2
32 mm	5,442	-11,998	7,64	1,89	4,76	-4,4	48,8

Çizelge 5.6’ya göre anten üzerinde $x=10$ mm ve $x=20$ mm mesafe bulunan MTM yapılarının sayısal ve ölçüm sonuçlarına göre S11 grafikleri Şekil 5.61’de verilmiştir.



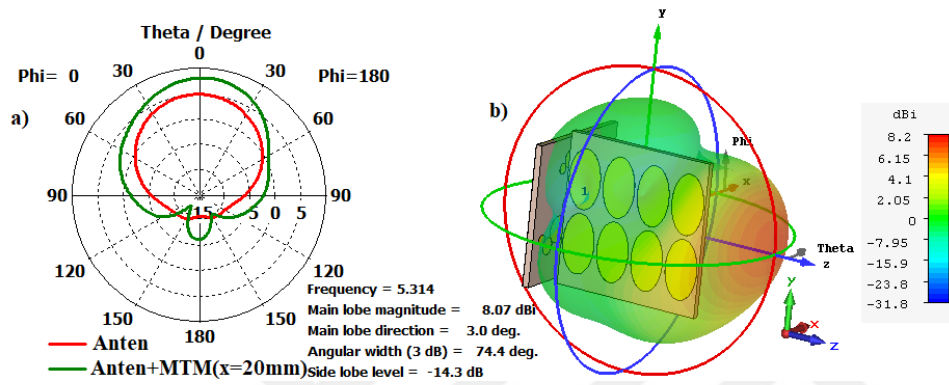
Şekil 5.61. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları

Anten üzerine MTM yapısı $x=10$ mm uzaklığa konulduğunda sayısal ve ölçüm sonucunda antenin yansımaya katsayısı, S11 değeri Şekil 5.61a ve Şekil 5.61b'de sırasıyla verilmiştir. Bu değerler, sayısal olarak 5,368 GHz'de -34,889 dB elde edilmiş, deneysel olarak ise 5,335GHz'de -16,367 dB ölçülmüştür. Bant genişliği 146 MHz'den 172,4 MHz'e yükselmiştir. Şekil 5.61'de görüldüğü gibi mesafe $x=20$ mm olarak ayarlandığında bu değerler sırasıyla 5,314GHz'de -27,089 dB, 5,22GHz'de -23,243 dB olarak ölçülmüştür. Bant genişliği ise 150 MHz'dir.



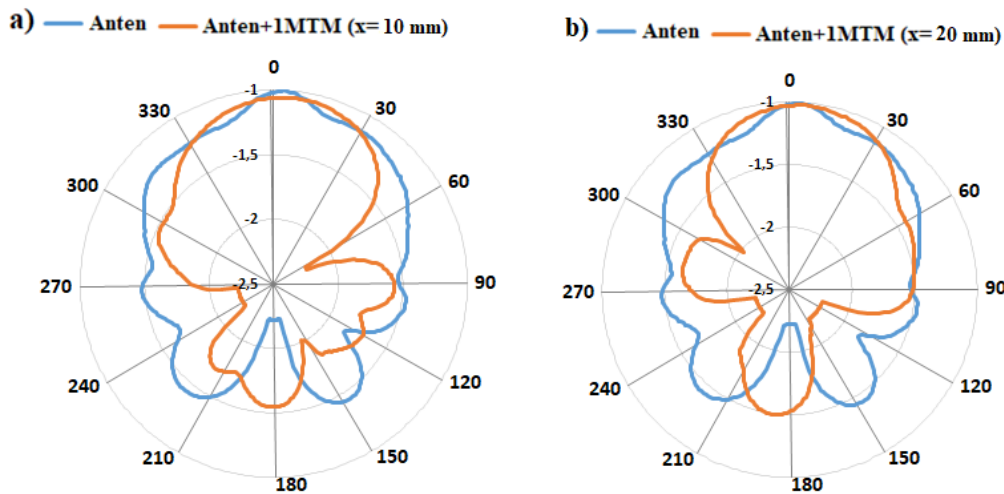
Şekil 5.62. Fraktal anten ve 1MTM yapısının ($x=10$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınım eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Fraktal anten üzerine $x=10$ mm uzaklığa yerleştirilen MTM yapısının $\Phi=0$ derecede 2 boyutlu ışınma eğrisini incelediğimizde ana ve yan loblardaki ışınma büyüklüğünün sırasıyla 7,78 dBi ve -9,8 dB olduğu görülmektedir. Hüzme açısı 76,1 derecedir. Antenin 3 boyutlu ışınma eğrisine Şekil 5.62b'de bakacak olursak, antenin MTM olmadan yönlülük değeri 4,85 dBi iken, MTM eklendikten sonra 7,96 dBi olmuştur. Antenin kazancı 1,19 dB iken, MTM yapısı eklendikten sonra 4,38 dB olmuştur.



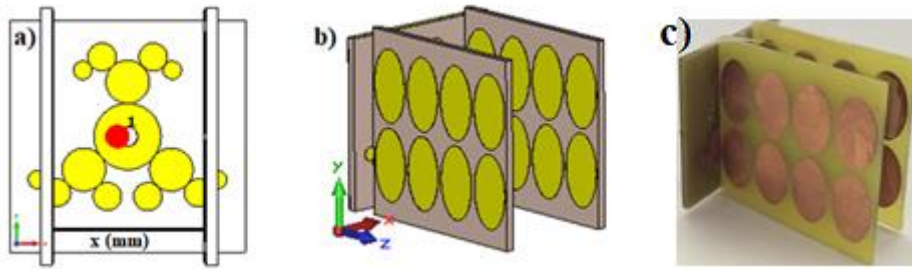
Şekil 5.63. Fraktal anten ve 1MTM yapısının ($x=20$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

MTM yapısı anten üzerine $x=20$ mm uzağa yerleştirildiğinde $\Phi=0$ derecede 2 boyutlu ışınma eğrisi grafiği Şekil 5.63a'da verilmiştir. Ana lobunda ışınma büyüklüğü 8,07 dBi, yan loblardaki ışınma büyüklüğü -14,3 dB'dir. Hüzme açısı ise 74,4 derecedir. Antenin yönlülüğünü kazancını daha iyi belirleyebilmek için 3 boyutlu ışınma eğrisine bakacak olursak yönlülük 8,2 dBi, kazanç ise 3,69 dB'ye yükselmiştir.



Şekil 5.64. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) ($x=10.00$ mm) b) ($x=20.00$ mm)

Yukarıda 2 ve 3 boyutlu ışına eğrileri verilmiş olan anten+MTM yapıları laboratuvar ortamında üretilip ışına eğrileri grafiğe dökülmüştür ve Şekil 5.64'deki grafikler elde edilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı gibi antenin yan loblarında azalma, ana lobda ki ışımada ise artış görülmüştür.



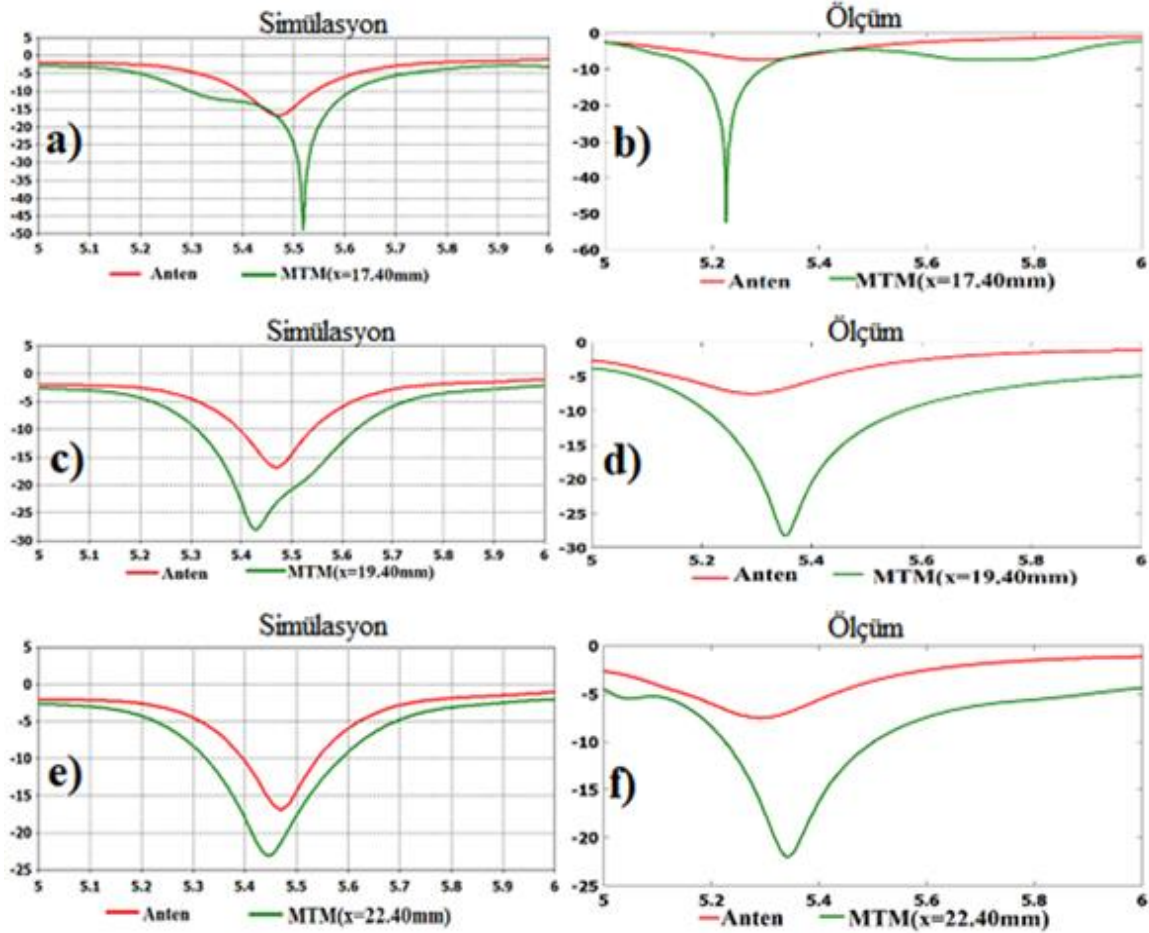
Şekil 5.65. Fraktal anten+2MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli

Fraktal anten üzerine aralarında farklı mesafeler bulunan 2 MTM yapısı yerleştirilerek 26 farklı yapı elde edilmiştir. Çizelge 5.7'de 26 farklı yapının S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışına büyüklüğü, yan loblardaki ışına büyüklüğü ve ışına açısı değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.7. Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan 2 MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışına büyüklüğü, yan loblardaki ışına büyüklüğü ve ışına açısı değerleri

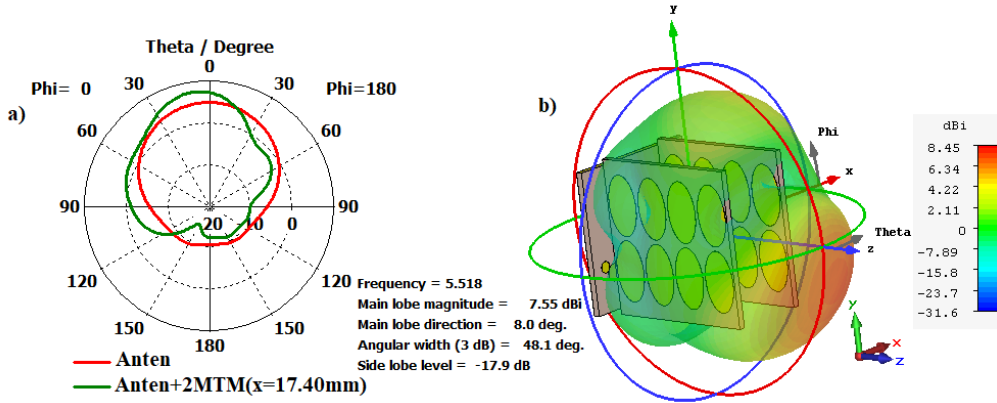
Mesafe(mm)	Frekans(GHz)	S11(dB)	yönlülük(dBi)	kazanç (dB)	ana lobdaki ışına büyüklüğü	yan loblardaki ışına miktarı	ışına açısı
3,40 mm	5,149	-33,619	7,42	4,2	4,42		139,2
4,40 mm	5,0716	-20,714	4,84	1,37	3,34		161,7
5,40 mm	5,047	-18,931	5,6	1,87	3,71		65,3
6,40 mm	5,059	-30,763	6,61	3,33	5,77		111,7
7,40 mm	5,032	-18,927	7,11	3,52	6,94	-4,9	61,2
8,40 mm	5,113	-19,032	8,11	5,03	7,67	-16,6	76,5
9,40 mm	5,14	-15,384	8,63	5,67	8,37	-16,7	7,07
10,40 mm	5,524	-11,937	7,88	5,44	6,42	-13	70,9
11,40 mm	5,584	-14,159	7,99	5,27	5,85	-13,7	81,7
12,40 mm	5,545	-14,616	7,98	4,98	6,36	-6,4	66,1
13,40 mm	5,521	-23,272	7,03	3,72	4,08	-11,9	119,6
14,40 mm	5,59	-16,032	8,48	5,47	7,25	-18,3	56,6
15,40 mm	5,578	-15,88	8,66	5,54	7,77	-18,2	55,6
16,40 mm	5,503	-22,673	7,21	3,24	4,41	-5,3	77,9
17,40 mm	5,518	-48,877	8,45	4,68	7,55	-17,9	48,1
18,40 mm	5,458	-33,432	8,14	4,41	8,07	-13	50,8
19,40 mm	5,458	-27,994	10	6,62	10	-18,5	47,7
20,40 mm	5,464	-16,872	7,23	2,57	4,61	-2,4	54,8
21,40 mm	5,473	-14,51	7,5	2,62	4,61	-3,7	46,8
22,40 mm	5,446	-23,071	9,94	6,04	9,94	-12	44,2
23,40 mm	5,446	-19,043	9,78	5,65	9,78	-12,2	43,1
24,40 mm	5,44	-15,183	9,82	5,47	9,7	-11,3	43,1
25,40 mm	5,443	-13,904	9,33	4,62	9,36	-13,7	41,6
26,40 mm	5,443	-10,549	8	2,07	5,33	-4,7	38,9
27,40 mm	5,437	-11,407	7,79	2,28	7,79	-7,4	38,7
28,40 mm	5,434	-11,002	7,98	2,41	7,79	-7,4	40,2

Bu yapılar arasından en uygun 3 mesafe ($x=17,40$ mm; $19,40$ mm; $22,40$ mm) seçilerek detaylı olarak hem sayısal hem de ölçüm sonuçlarından elde edilen S11 grafikleri Şekil 5.66'da incelenmiştir.



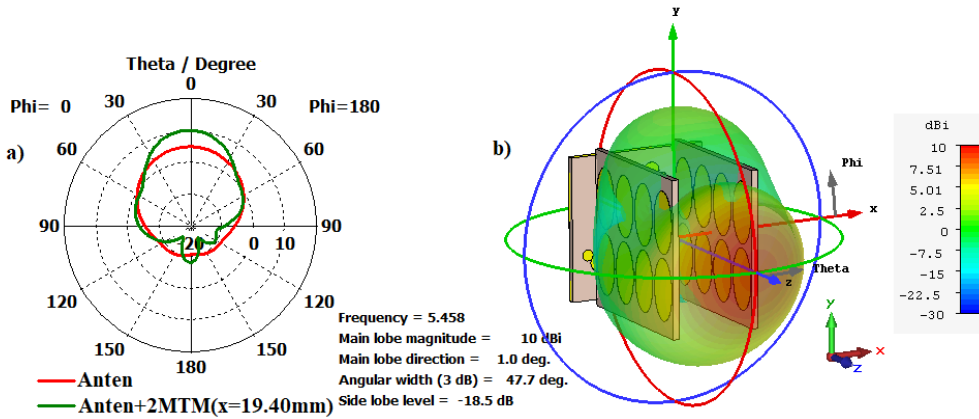
Şekil 5.66. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları

İki MTM arasındaki mesafe $x=17,40$ mm olarak ayarlanıp anten üzerine 90° gelecek şekilde yerleştirildiğinde S11 sayısal ve ölçüm değerleri Şekil 5.66a ve Şekil 5.66b'de verilmiştir. Bu değerler sırasıyla; $5,518$ GHz'de $-48,877$ dB; $5,226$ GHz'de $-52,463$ dB olarak ölçülmüştür. Bant genişliği $314,1$ MHz'dir. Mesafe $x=19,40$ mm olarak ayarlandığında bu değerler sırasıyla $5,458$ GHz'de $-27,994$ dB; $5,35$ GHz'de $-28,261$ dB olduğu Şekil 5.66c ve Şekil 5.66d'de görülmektedir. Bant genişliği ise $322,3$ MHz'dir. $X=22,40$ mm olarak ayarlandığında ise değerler $5,446$ GHz'de $-23,071$ dB; $5,343$ GHz'de $-22,02$ dB olarak ölçülmüştür. Bant genişliği $263,2$ MHz'dir



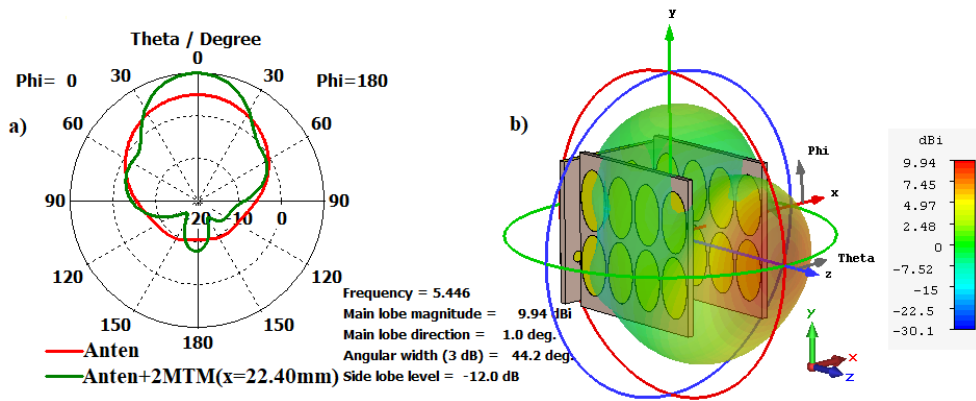
Şekil 5.67. Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=17,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

MTM'ler arasındaki mesafe $x=17,40$ mm olarak ayarlandığında 2 ve 3 boyutlu ışıma eğrisi sayısal ve ölçüm sonucu grafikleri Şekil 5.67'de verilmiştir. Işıma eğrisine 2 boyutlu olarak baktığımızda antenin ana lobundaki ışıma büyüklüğü 7,55 dBi'ye yükselmiş, yan loblardaki ışıma miktarı -17,9 dB olmuştur. Hüzme açısı ise 48,1 dereceye düşmüştür. Bu eğriyi 3 boyutlu olarak incelediğimizde antenin yönlülüğü 8,45 dBi'ye, kazancı ise 4,68 dB'ye yükselmiştir.



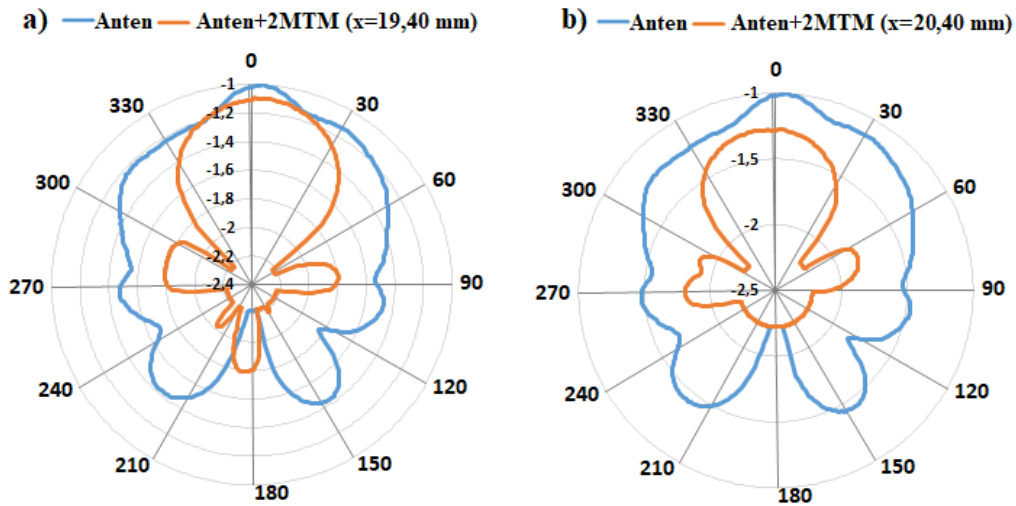
Şekil 5.68. Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=19,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışıma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Aradaki mesafe $x=19,40$ mm olarak ayarlandığında anten+2MTM yapısının 2 ve 3 boyutlu ışıma eğrisi Şekil 5.68'de verilmiştir. 2 boyutlu ışıma eğrisine baktığımızda ana lobun ışıma büyüklüğü 10 dBi, yan loblardaki miktar ise -18,5 dB'dir. Hüzme açısı 87,3 dereceden 47,7 dereceye düşmüştür. 3 boyutlu olarak baktığımızda antenin yönlülüğü MTM yapıları olmadan 6,65 dBi iken, 10 dBi'ye, kazancı 1,9 dB iken 6,62 dB'ye yükselmiştir.



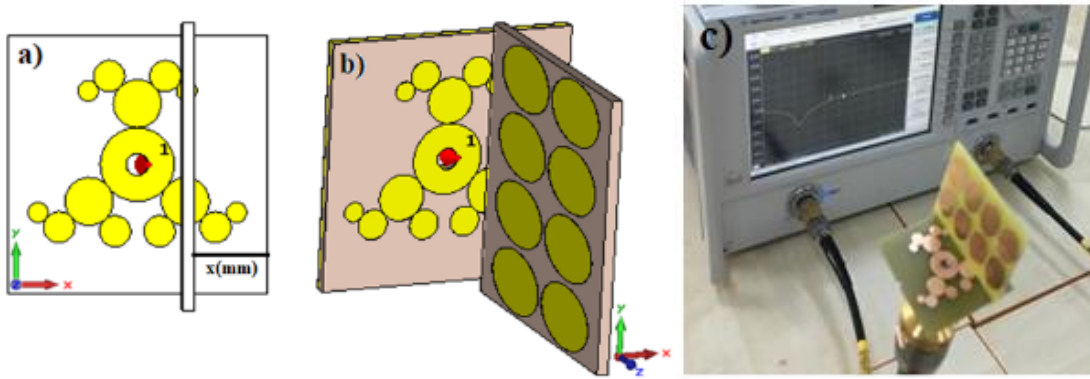
Şekil 5.69. Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=22,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınım eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

MTM'ler arasındaki mesafe $x=22,40$ mm olarak ayarlandığında ana lobundaki ışınım büyüklüğü 9,94 dBi, yan lobundaki ışınım miktarı ise -12.0 dB olarak Şekil 5.69a'da görülmektedir. Hüzme açısı ise 87,3 dereceden 44,2 dereceye düşmüştür. Şekil 5.69b'de 3 boyutlu olarak baktığımızda MTM olmadan antenin yönlülüğü 6,65 dBi iken, 2 MTM yapısı konularak 9,94 dBi ye yükselmiştir. Kazanç ise 1,19 dB'den 6,04 dB'ye yükselmiştir.



Şekil 5.70. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize görüntüleri a) ($x=19,40$ mm) b) ($x=23,40$ mm) normalize hali

Mesafeler $x=19,40$ mm ve $x=23,40$ mm olduğunda, anten üzerine konulan MTM'lerin laboratuvar ortamında elde edilen ışınım eğrisi grafikleri sırasıyla Şekil 5.70a ve Şekil 5.70b'de verilmiştir. MTM yapılarının antenin yan loblarını düşürdüğü görülmektedir.

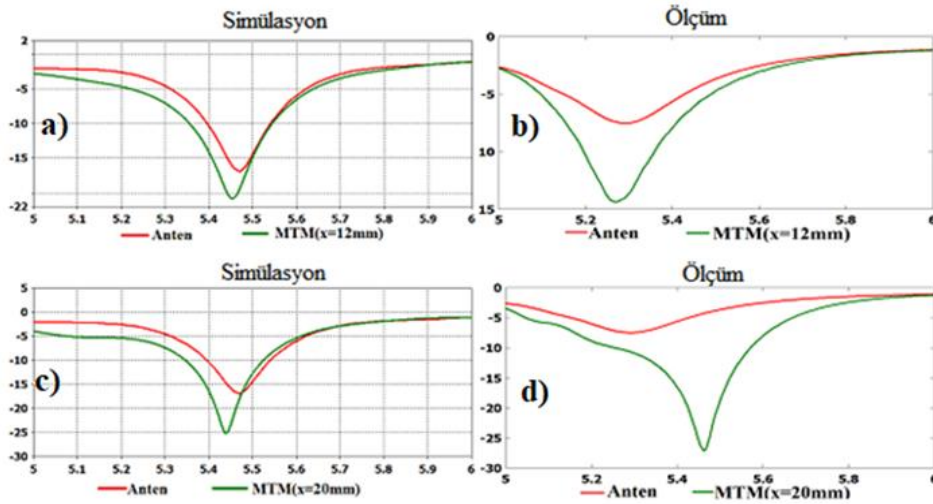


Şekil 5.71. Fraktal anten+1MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) ölçüm düzeneği

Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde 1 MTM yapısı yerleştirilerek 15 farklı yapı oluşturulmuş olup hepsi için ayrı ayrı S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü, yan loblardaki ışımaya büyüklüğü ve ışımaya açısı değerleri incelenmiştir Çizelge 5. 8’de verilmiştir.

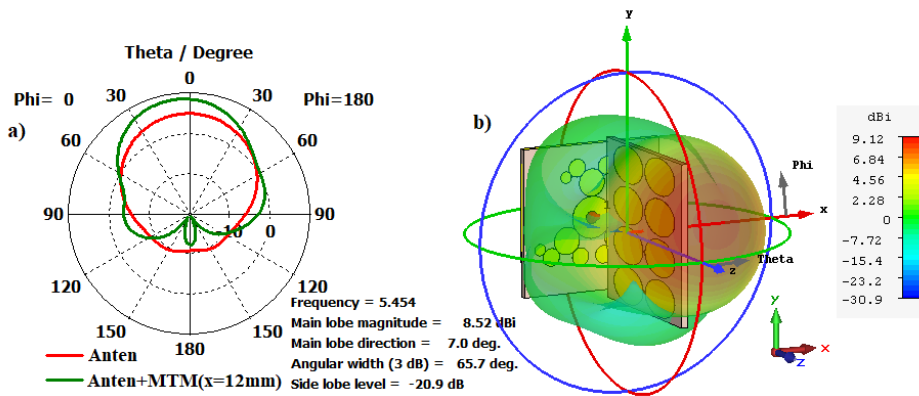
Çizelge 5.8.Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü, yan loblardaki ışımaya büyüklüğü ve ışımaya açısı değerleri

Mesafe(mm)	Frekans(GHz)	S11(dB)	yönlülük(dBi)	kazanç (dB)	ana lobdaki ışımaya büyüklüğü	yan loblardaki ışımaya miktarı	ışımaya açısı
2 mm	5,486	-12,852	7,45	1,5	5,82	-0,9	55,8
4 mm	5,492	-13,593	8,03	2,38	6,73	-2,6	57,6
6 mm	5,498	-14,633	7,93	2,39	6,59	-2,8	59
8 mm	5,501	-17,509	8,35	3,47	7,24	-4,5	63,4
10 mm	5,5	-22,493	8,78	4,67	7,86	-10,4	66,1
12 mm	5,454	-20,813	9,12	5,08	8,52	-20,9	65,7
14 mm	5,45	-16,305	8,71	3,92	8,24	-19	67,8
16 mm	5,462	-17,824	8,72	4,4	8,34	-20,8	69,4
18 mm	5,438	-20,362	8,53	3,68	8,14	-18,4	71,3
20 mm	5,439	-25,094	8,95	4,6	8,44	-11,7	68,8
22 mm	5,462	-26,797	8,79	4,65	8,09	-11,5	71,5
24 mm	5,506	-19,906	8,36	4	7,35	-10,2	77,8
26 mm	5,507	-15,946	8,13	3,22	6,98	-2,9	66,3
28 mm	5,499	-13,539	7,65	2,09	6,23	-1,5	59,5
30 mm	5,489	-12,576	7,52	1,75	6,06	-1	57,1



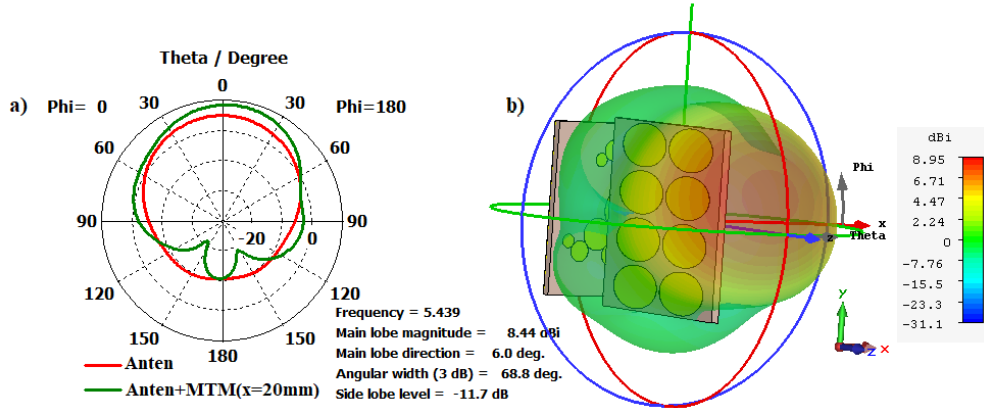
Şekil 5.72. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları

Şekil 5.72a ve Şekil 5.72b’de anten üzerine $x=12$ mm uzağa yerleştirilmiş MTM yapısının simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen S11 grafikleri yer almaktadır. Şekil 5.72a’ya bakıldığında MTM olmadan anten 5,47 GHz’de -16,947 dB iken, 1 MTM eklendikten sonra 5,454 GHz rezonans frekansında -20,813 dB değerine ulaşmıştır. Şekil 5.72b’de ölçüm sonuçlarına göre MTM yapısı olmadan anten 5,286 GHz’de -7,545 dB değerinde iken, MTM yapısı eklendikten sonra 5,26 GHz’de -14,28 dB değerinde ölçülmüştür. Bant genişliği ise 186 MHz’dir. MTM yapısı anten üzerine $x=20$ mm uzaklığa yerleştirildiğinde simülasyon sonucuna göre MTM olmadan antenin S11 değeri 5,47 GHz’de -16,947 dB iken, MTM yapısı eklendikten sonra değeri 5,439 GHz’de -25,094 dB değerindedir. Ölçüm sonuçlarına göre 1MTM eklendikten sonra antenin S11 değeri 5,46 GHz’de -27,154 dB’dir. Bant genişliği ise 176 MHz’dir.



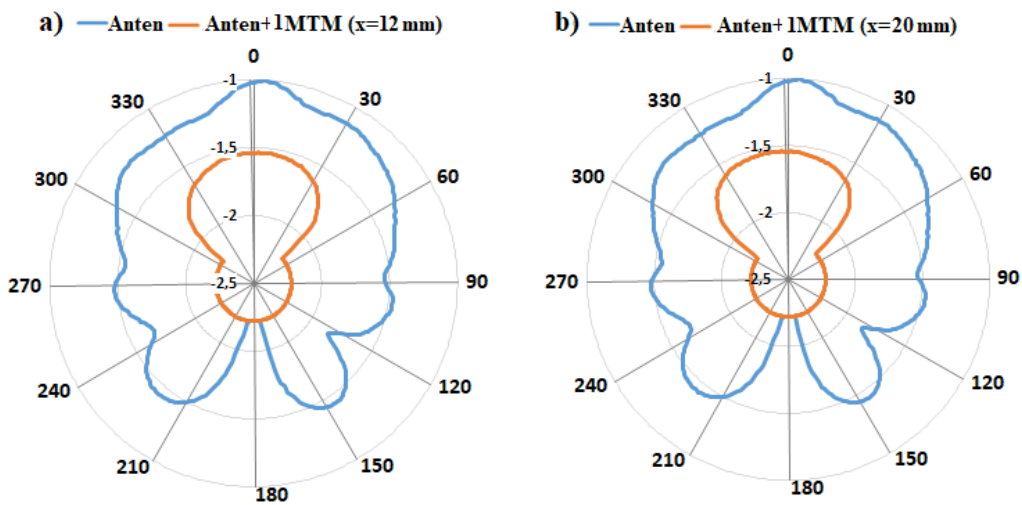
Şekil 5.73. Fraktal anten ve 1MTM yapısının ($x=12$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınım eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Fraktal anten üzerine MTM yapısı $x=12$ mm uzaklığa yerleştirilerek oluşturulan yapının yönlülüğünün $\Phi=0$ derecede 2 ve 3 boyutlu uzak alan ışınması Şekil 5.73’de verilmiştir. Oluşturulan yeni yapının ana ve yan lobundaki ışınma büyüklüğü sırasıyla 8,52 dBi, -20,9 dB olduğu görülmektedir. Hüzme açısı 65,7 derecedir. 3 boyutlu ışınma eğrisine baktığımızda antenin yönlülüğü 9,12 dBi, kazancı ise 5,08 dB’dir.



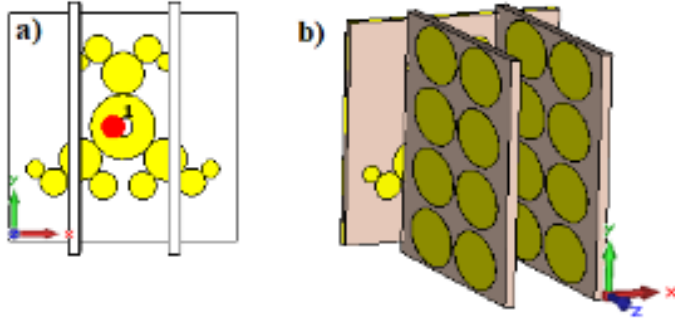
Şekil 5.74. Fraktal anten ve 1MTM yapısının ($x=20$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Mesafe $x=20$ mm olarak ayarlandığında antenin ana lobundaki ışınma miktarı 8,44 dBi, yan loblarda oluşan ışınma miktarı -11,7 dB, hüzme açısı 68,8 derece olduğu Şekil 5.74a’da görülmektedir. Antenin yönlülüğü 8,95 dBi, kazancı 4,6 dB’dir.



Şekil 5.75. Fraktal anten ve MTM yapısının deneysel ölçüm normalize edilmiş görüntüleri a) ($x=12$ mm) b) ($x=20$ mm)

Şekil 5.75a ve Şekil 5.75b’de anten üzerine $x=12$ mm ve $x=20$ mm mesafelerde yerleştirilmiş MTM yapısının deneysel ölçüm sonucunda elde edilen normalize edilmiş 2 boyutlu ışımaya eğrisi grafikleri verilmiştir. Yan lobların azaldığı görülmektedir.

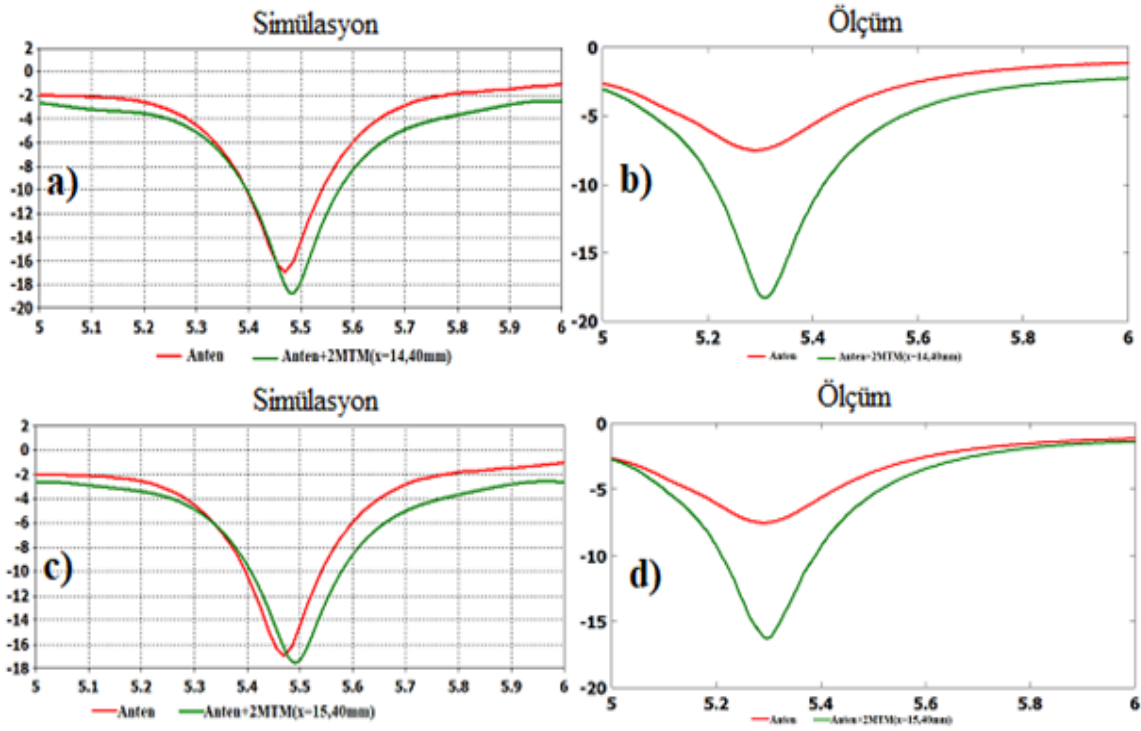


Şekil 5.76. Fraktal anten+2 MTM yapısının a) simüle edilen 2 boyutlu gösterimi b) simüle edilen 3 boyutlu şekli c) üretim şekli

Anten üzerine 2MTM yapısı yerleştirilerek Şekil 5.76’da gösterilen yapı elde edilmiş olup 2 MTM arasında çeşitli mesafeler bırakılarak 26 farklı yapı elde edilmiştir. Bu yapıların sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü, yan loblardaki ışımaya büyüklüğü ve ışımaya açısı değerleri Çizelge 5.9’da detaylı olarak verilmiştir.

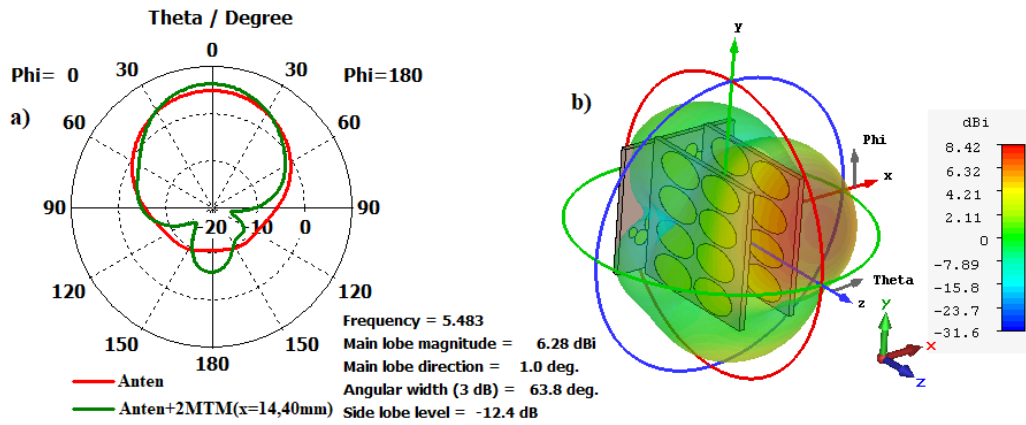
Çizelge 5.9.Fraktal anten üzerine farklı mesafelerde konulan 2 MTM yapısının anten ile etkileşimi sonucu S11 değeri, yönlülüğü, kazancı, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü, yan loblardaki ışımaya büyüklüğü ve ışımaya açısı değerleri

Mesafe(mm)	Frekans(GHz)	S11(dB)	yönlülük(dBi)	kazanç (dB)	ana lobdaki ışımaya büyüklüğü	yan loblardaki ışımaya miktarı	ışımaya açısı
3,40 mm	5,337	-16,418	4,69	0,562	1,68	-0,9	56,8
4,40 mm	5,341	-14,607	5,7	0,751	1,76	-9,3	151,8
5,40 mm	5,34	-14,287	5,6	0,941	2,3	-2,7	96
6,40 mm	5,364	-14,89	6,55	1,9	3,01	-10,3	108,4
7,40 mm	5,359	-16,442	6,18	1,81	2,37	-9,3	124,3
8,40 mm	5,375	-17,269	7,65	3,19	5,51	-12,3	76,5
9,40 mm	5,403	-18,553	7,64	3,48	5,54	-12,2	74
10,40 mm	5,444	-21,03	7,56	3,75	5,16	-4,8	65,4
11,40 mm	5,467	-20,722	7,86	3,98	5,39	-11,6	72
12,40 mm	5,474	-21,201	7,96	4,17	5,57	-12	66,7
13,40 mm	5,469	-21,31	7,56	3,74	4,12	-10,6	78,8
14,40 mm	5,483	-18,734	8,42	4,38	6,28	-12,4	63,8
15,40 mm	5,491	-17,507	8,49	4,36	6,26	-12,5	62,7
16,40 mm	5,486	-17,472	7,86	3,62	4,37	-10,9	69,2
17,40 mm	5,497	-15,768	8,63	4,27	5,95	-12,6	60,2
18,40 mm	5,5	-15,266	8,67	4,31	5,71	-13,3	63,1
19,40 mm	5,504	-13,892	8,83	4,14	6,17	-12,8	58,3
20,40 mm	5,497	-15,474	8,19	3,79	3,71	-11,6	64,8
21,40 mm	5,497	-13,289	8,28	3,4	4,11	-11,7	61
22,40 mm	5,504	-12,265	9,13	4,02	6,25	-13,3	54,3
23,40 mm	5,501	-11,705	9,16	3,86	6,14	-13,2	52,8
24,40 mm	5,5	-11,442	9,53	4,28	6,72	-13,8	51,1
25,40 mm	5,496	-10,727	9,27	3,69	6,09	-13,2	50,4
26,40 mm	5,49	-10,715	8,43	2,69	3,71	-7,8	52,6
27,40 mm	5,491	-10,387	9,13	3,24	5,34	-9,4	47,8
28,40 mm	5,489	-10,109	9,1	3,06	5,17	-6,8	47,4



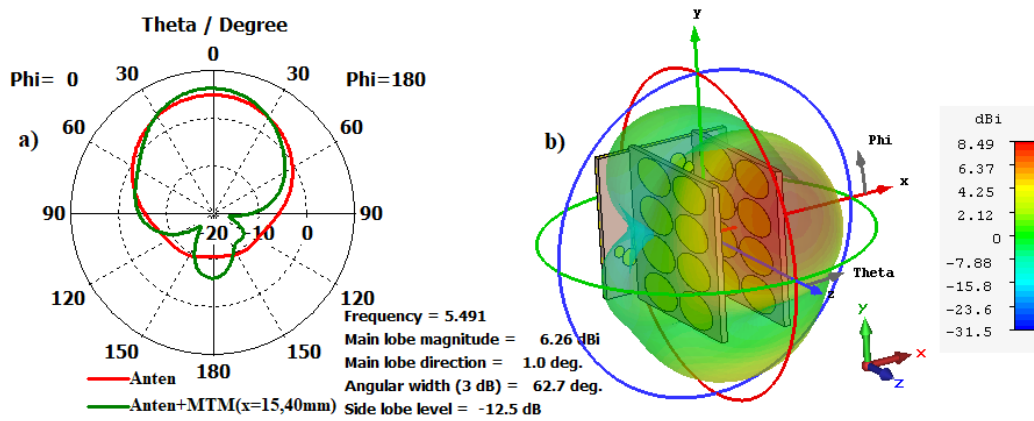
Şekil 5.77. Yapıların anten ile etkileşimleri sonucu S11 parametresindeki değişimler; (a), (c) simülasyon sonuçları, (b), (d) deneysel ölçüm sonuçları

Şekil 5.77a ve Şekil 5.77b'de anten üzerine $x=14,40$ mm uzağa yerleştirilmiş MTM yapısının simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen S11 grafikleri yer almaktadır. Şekil 5.77a'ya bakıldığında MTM olmadan anten 5,47 GHz'de -16,947 dB iken, 1 MTM eklendikten sonra 5,483 GHz rezonans frekansında -18,734 dB değerine ulaşmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre MTM yapısı olmadan anten 5,286 GHz'de -7,545 dB değerinde iken, MTM yapısı eklendikten sonra 5,30 GHz'de -18,341 dB değerinde ölçülmüştür. Bant genişliği ise 175,8 MHz'dir MTM yapısı anten üzerine $x=15,40$ mm uzaklığa yerleştirildiğinde simülasyon sonucuna göre MTM olmadan antenin S11 değeri 5,47 GHz'de -16,947 dB iken, MTM yapısı eklendikten sonra değeri 5,491 GHz'de -17,507 dB değerindedir. Ölçüm sonuçlarına göre 1MTM eklendikten sonra antenin S11 değeri 5,296 GHz'de -16,299 dB'dir. Bant genişliği ise 172 MHz'dir



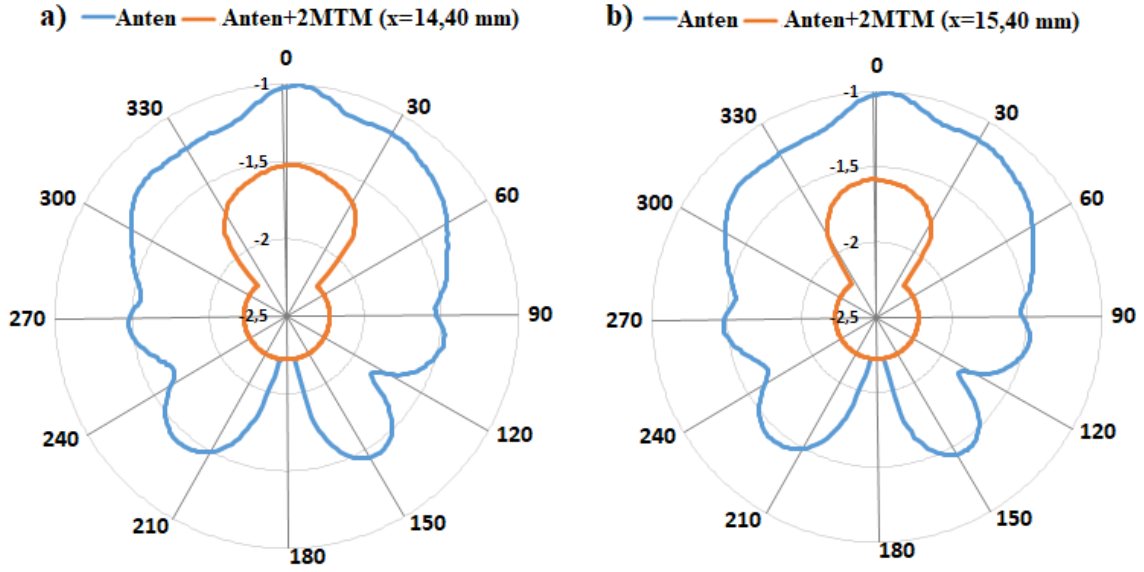
Şekil 5.78. Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=14,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

Anten üzerine 2MTM yapısı arasındaki uzaklık $x=14,40$ mm olarak ayarlandığında antenin ana ve yan lobundaki ışınma miktarları sırasıyla 6,28 dBi ve -12,4 dB'dir. Hüzme açısı 63,8 derecedir. Yapısının $\Phi=0$ derecede 3 boyutlu uzak alan ışınma eğrisine Şekil 5.78b'ye bakıldığında yönlülüğünün 8,42 dBi, kazancının ise 4,38 dB olduğu görülmektedir. Antenin yönlülüğünü ve kazancını MTM yapısının arttırdığı görülmektedir.



Şekil 5.79. Fraktal anten ve 2MTM yapısının ($x=15,40$ mm) $\Phi=0$ derecede yönlülüğünün uzak alan ışınma eğrisi a) 2 boyutlu b) 3 boyutlu

2MTM arasında $x=15,40$ mm mesafe bırakıldığında antenin MTM'ler ile etkileşimi sonucu antenin ana ve yan loblarındaki ışınma büyüklüğü 6,26 dBi, -12,5 dB olduğu Şekil 5,79a'da görülmektedir. Antenin yönlülüğü 8,49 dBi, kazancı ise 4,36 dB'ye yükselmiştir.



Şekil 5.80. Fraktal anten ve 2 MTM yapısının deneysel ölçüm normalize edilmiş görüntüleri a) (x=14,40 mm) b) (x=15,40 mm)

Şekil 5.80a ve Şekil 5.80b'de anten üzerine x=14,40 mm ve x=15,40 mm mesafelerde yerleştirilmiş MTM yapısının deneysel ölçüm sonucunda elde edilen normalize edilmiş 2 boyutlu ışınma eğrisi grafikleri verilmiştir. MTM yapısının antenin yan loblarını azalttığı görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 5,47 GHz de çalışan bir fraktal anten tasarımı yapılarak antenin yönlülüğünün, kazancının ve verimliliğinin MTM'li yapılar kullanarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Simülasyon programında 4 farklı boyutta dairesel şekillerden oluşmuş ve her daire arasındaki oran sabit 0,65 olan bir fraktal anten tasarlanmıştır. MTM yapısı olarak 2 farklı yapı tasarlanmıştır. Birinci MTM yapısı 38 mmx38 mm boyutunda FR4 malzeme üzerine yerleştirilmiş 2x4 birim hücreli eşkenar dörtgen yapılardan oluşmuştur. İkinci MTM yapısı ise birincisi ile aynı boyutlarda dielektrik malzeme üzerine periyodik biçimde eliptik şekillerin yerleştirilmesiyle oluşmuştur. MTM yapılarının simülasyon sonucunda elde edilen S11 ve S21 parametre değerleri kullanılarak yapının etkin dielektrik sabiti, etkin manyetik geçirgenliği ve kırılma indisi hesaplanmış ve çalışma frekansında bu parametrelerin negatif olduğu görülmüştür. Birinci çalışma olarak ilk MTM yapısını farklı sayılarda ve farklı şekillerde anten ile etkileşimi sağlanmıştır. İkinci çalışma olarak ise diğer MTM yapısını anten üzerine farklı sayılarda ve farklı noktalara konularak birçok yapı elde edilmiştir. Simülasyon programında yapıların S11 değerine, bant genişliğine, yönlülüğüne, kazancına, ana lobundaki ışına büyüklüğüne, hüzme açısına bakılmıştır. Anten üzerine bırakılan MTM yapılarının antenin parametrelerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Laboratuvar ortamında anten ve MTM yapılarının üretimi yapılmış olup S11 değerleri ve 2 boyutlu ışına eğrileri elde edilmiştir. Nümerik ve deneysel ölçüm sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Simülasyon programında MTM olmadan antenin yansıma katsayısı, S11 değeri 5,47 GHz'de -16,947 dB ölçülmüştür. Eliptik şekilde 2 MTM yapısı eklendikten sonra anten ile MTM yapısının etkileşimi sonucu elde edilen S11 değeri 5,428 GHz'de -27,994 dB olmuştur. Antenin yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB, ana lobundaki ışına büyüklüğü 4,85 dBi iken 2 MTM yapısı eklendikten sonra yönlülük 10 dBi, kazanç 6,62 dB, ana lobundaki ışına büyüklüğü 10 dBi olmuştur. Bant genişliği ise 146 MHz iken, 2 MTM yapısı eklendikten sonra 322,3 MHz'e yükselmiştir. Işıma açısı genişliği 87,3 derece iken, MTM yapıları eklendikten sonra 47,7 dereceye düşmüştür. Deneysel ölçüm sonucuna göre anten+2MTM yapısının yansıma katsayısı, S11 değeri ise 5,458 GHz'de -27,994 dB değerine düşmüştür. Eşkenar dörtgen şeklinde 2 MTM yapısı anten üzerine bırakılmasıyla simülasyon sonucunda elde edilen S11 değeri 5,365 GHz'de -25,908 dB, yönlülüğü 9,67 dBi, kazancı 5,99 dB, ana lobundaki ışına büyüklüğü 8,63 dBi, bant genişliği 183,5 MHz'e yükselmiştir. Hüzme açısı ise 65 derecedir. Üretimi gerçekleştirilen Anten +2MTM yapısının S11 değeri ise 5,5 GHz'de -

18,134 dB'ye düşmüştür. MTM yapıları eklendikten sonra rezonans frekansında meydana gelen kaymaların sebebi; MTM yapı ile anten arasındaki etkileşim olarak açıklanabilir.

Ölçümler sonucundan elde edilen verilere göre MTM yapılarının antenin S11 değerini eksi olarak arttırdığı, aynı zamanda da antenin kazancını, verimini ve bant genişliğini arttırdığı, ışınma açısı genişliğini azalttığı görülmektedir. Deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları arasındaki farklar ise ölçüm ve üretim hatalarından kaynaklanmaktadır.



KAYNAKLAR

- Akgol, O., Altintas, O., Dalkılınc, E., Unal, E., Karaaslan, M., & Sabah, C. (2017). Metamaterial absorber-based multisensor applications using a meander-line resonator. *Optical Engineering*.
- Akgol, O., Karaaslan, M., Unal, E., & Sabah, C. (2017). Implementation of a perfect metamaterial absorber into multi-functional sensor applications. *Modern Physics Letters B*.
- Ali, T., B K, S., & Biradar, R. (2018). A Miniaturized Decagonal Sierpinski UWB Fractal Antenna. *Progress In Electromagnetics Research*, 161-174.
- Altintas, O., Aksoy, M., Unal, E., Karakasli, F., & Karaaslan, M. (2018). A Split Meander Line Resonator-Based Permittivity and Thickness Sensor Design for Dielectric Materials with Flat Surface. *Journal of Electronic Materials*, 6185-6192.
- Bakir, M., Karaaslan, M., Akgol, O., Altintaş, O., Unal, E., & Sabah, C. (2018). Sensory applications of resonator based metamaterial absorber. *Optik*, 741-746.
- Bakır, M., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Microwave metamaterial absorber for sensing applications. *Opto-Electronics Review*, 318-325.
- Balanis, C. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design* (s. Third Edition,(641-652)). içinde in Canada: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Bangi, I., & Sivia, J. (2018). Minkowski and Hilbert curves based hybrid fractal antenna for wireless applications. *AEÜ-International Journal of Electronics and Communications*, 159-168.
- Clemens, M., & Weiland, T. (2001). Discrete Electromagnetism With the Finite Integration Technique. *Progress In Electromagnetics Research*, 65-87.
- Courant, R. (1943). *Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations*. Verlag nicht ermittelbar.
- Çelik, K., & Kurt, E. (2018, April). Design and Simulation of the Antenna for RF Energy Harvesting Systems. *6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)*, s. 148-150.
- Darimireddy , N., Reddy, R., & Prasad, A. (2018). A Miniaturized Hexagonal-Triangular Fractal Antenna for Wide-Band Applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* , 104-110.
- Elavarasi, C., & Shanmuganatham, T. (2016). CSRR loaded Sierpinski gasket fractal antenna for multiband applications. *International Conference on Emerging Technological Trends [ICETT]*.
- Elavarasi, C., & Shanmuganatham, T. (2018a). Multiband SRR loaded Koch star fractal antenna. *Alexandria Engineering Journal*, 1549-1555.
- Elavarasi, C., & Shanmuganatham, T. (2018b). Multiband SRR Loaded Leaf shaped Koch fractal with modified CPW-Fed Antenna. *International Journal of Electronics Letters*, 137-145.
- Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (Eds.). (2006). *Metamaterials: physics and engineering explorations*. John Wiley & Sons.

- Erol, Y., & Balık, H. (2001). Zaman Domeninde Sonlu Farklar Metodu İle Tek Boyutlu Yapılarda Elektromanyetik Dalga Yayılımının Simülasyonu. *1. ULUSAL BİLİŞİM-MULTİMEDYA KONFERANSI*.
- Fang, N., Lee, H., Sun, C., & Zhang, X. (2005). Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *Science*, 534-537.
- Gupta, M., & Mathur, V. (2018). Hexagonal Fractal Antenna using Koch for Wireless Applications. *Frequenz 2018*, 443-453.
- Hirway, H., & Shaikh, T. (2018). Comparison of Low Profile Sierpinski and Koch Fractal Antenna for Wireless Application. *Proceeding of 2018 IEEE International Conference on Current Trends toward Converging Technologies, Coimbatore, India*, 1-6.
- Jena, M., Mangaraj, B., & Mishra, D. (2013). Bandwith and Gain enhancement of multiband fractal antenna based on the sierpinski carpet geometry. *ICTACT journal on communication technology*, 669-674.
- Kadir, M., Ja'afar, A., & Aziz, Z. (2007, December). Sierpinski Carpet Fractal Antenna. *Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, s. 1-4.
- Karaaslan, M. (2009). Negatif kırılma indisli metamalzemelerin elde edilmesi. *Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, 128 s, Adana*.
- Madhav, B., Reddy, V., Rajasekar Reddy, D., Sankar, K., Ramanujan, E., Prakash, V., & Rao, M. (2018). Tree shaped fractal antenna with multiband characteristics. *International Journal of Engineering and Technology*, 333-338.
- Mete, C. (2011). Minkowski Fraktal Anten Tasarımı ve Yapay Sınır Ağı Modeli. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- Pendry, J., Holden, A., Robbins, D., & Stewart, W. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, s. 2075-2084.
- Pendry, J., Schurig, D., & Smith, D. (2006). Controlling Electromagnetic Fields. *Science*, 1780-1782.
- Pendry, J., Holden, A., Stewart, W., & Youngs, I. (1996). Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures. *Physical review letters*, s. 4773.
- Rani, R., & Pandey, S. (2016). CSRR Inspired Conductor Backed CPW-Fed Monopole Antenna for Multiband Operation. *Progress In Electromagnetics Research*, 135-143.
- Sadiku, M. (1989). A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems. *IEEE Transactions on Education*, 85-93.
- Safia, O., & Eleftheriades, G. (2018). A New Gosper Island Fractal UWB Monopole Antenna with Enhanced Bandwidth Characteristics. *In 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 1043-1044.
- Shareef, A. (2015). Simulation of Fractal Antenna Properties Composed of Metamaterials. *Republic of Iraq Ministry of Higher Education and Scientific Research Al-Mustansiriyah University, PhD THESIS*.

- Sharma, V., Lakwar, N., Kumar, N., & Garg, T. (2017). Multiband low-cost fractal antenna based on parasitic split ring resonators. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 913-919.
- Shelby, R., Smith, D., & Schultz, S. (2001). Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*.
- Singhal, S., & Singh, A. (2016). CPW-fed hexagonal Sierpinski super wideband fractal antenna. *The Institution of Engineering and Technology*, 1701-1707.
- Sivia, J., & Bhatia, S. (2015). Design of Fractal Based Microstrip Rectangular Patch Antenna for Multiband Applications. *2015 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, 712-715.
- Smith, D., Padilla, W., Vier, D., Nemat-Nasser, S., & Schultz, S. (2000). Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Physical review letters*, s. 4184.
- Suganthi, S., Raghavan, S., Kumar, D., & Thilagar, S. (2012). A Compact Hilbert Curve Fractal Antenna on Metamaterial Using CSRR. *PIERS Proceedings, Kuala Lumpur*.
- Tiwari, A., Rattan, D., & Gupta, I. (2014). Fractal Antenna Design Geometries and Its Applications. *International Journal of Engineering and Computer Science*, .
- Veselago, V. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*.
- Yee, K., & Chen, J. (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*, 354-363.
- Yong, W., & Shaobin, L. (2008). A new modified crown square fractal antenna. *In 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 400-402.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DOĞAN, Emine Ceren
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 30,08,1995, Gaziantep
 Medeni hali : Bekar
 Telefon :
 Faks : 0 (326) 202 00 00
 E-mail : emnecerendogan@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2019
Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi // Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2017
Lise	Opet Anadolu Lisesi	2013

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- METAMATERIAL INTEGRATED 5.47 GHZ FRACTAL ANTENNA DESIGN, 6. INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICS, ENGINEERING, NATURAL & MEDICAL SCIENCES MARCH 8-10, 2019 ADANA

Hobiler

Kitap okumak, Puzzle yapmak, Yürümek, Masa tenisi oynamak

DİZİN

A

Açı genişliği · 17, 23, 25, 36
 anten · i, vi, vii, viii, ix, x, xi, xii, xiii, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13, 14, 15, 16, 18, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63

B

bant genişliği · 3, 16, 22, 28
 boşluk doldurma · 1, 5

C

CPW · viii, 3, 4, 65, 66
 CSRR · viii, 4, 65

Ç

çoklu rezonans · 3, 4, 5, 6

D

dielektrik sabiti · i, 1, 19, 20, 63
 DNG · vii, 9, 10, 11
 düşük maliyet · 5

E

eliptik · i, 18, 33, 36, 63

eşkenar dörtgen · i, 18, 63

F

FDTD · iv, viii, 12, 66
 FEM · iv, viii, 12, 13
 FIT · iv, viii, 12, 13, 16
 FR4 · i, ii, viii, 9, 15, 18, 63
 fraktal · i, vii, ix, x, xi, xii, xiii, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13, 14, 16, 17, 22, 23, 25, 27, 33, 35, 36, 40, 41, 44, 45, 47, 48, 50, 51, 54, 55, 58, 61, 62, 63
 fraktal anten · 2, 23, 48, 63

G

geniş frekans · 1

H

Hilbert · 8

K

kendine benzerlik · 1, 5, 7
 kırılma indisi · i, vii, 19, 20, 21, 63

L

LHM · viii, 9

M

manyetik geçirgenlik · vii, 1, 9, 10, 19, 20, 21
 Maxwell denklemleri · 1
 minyatürleşme · i, 3
 multiband davranış · 1

N

normalize · xii, xiii, 55, 59, 62

S

S11 parametresi · 13, 16
 sağ elli malzemeler · 1
 SAR · 12
 Sierpinski Carpet · iv, 7, 64
 Sol elli malzemeler · 1
 SRR · viii, 4, 65

T

TEM · viii, 19

W

Wi-Fi · 5
 WLAN · viii, 4, 5

Y

yönlülük · viii, ix, 1, 23, 24, 25, 26, 28, 30, 32, 36, 51, 63



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

