

Metamalzeme Yapılarıyla Fraktal Anten Parametrelerinin İyileştirilmesi

Emin ÜNAL^{*1}, Ceren DOĞAN¹

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hatay

Geliş tarihi: 06.07.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

Öz

Bu çalışmada 5,47 GHz'de çalışan bir fraktal anten tasarımı yapılmış ve bu antenin yönlülüğünün, kazancının ve verimliliğinin Metamalzeme yapılar kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. FIT tabanlı simülasyon programı yardımıyla dairesel şekillerden oluşmuş ve her daire arasındaki oran sabit 0,65 olan bir fraktal anten tasarlanmıştır. Her biri 38 mm x 38 mm boyutunda, 2x4 birim hücreli eşkenar dörtgen yapılardan oluşmuş olan MTM yapısı yine aynı simülasyon programında tasarlanmıştır. MTM yapıların simülasyon sonucunda elde edilen S11 ve S21 parametre değerleri kullanılarak, yapının etkin dielektrik sabiti, etkin manyetik geçirgenliği ve kırılma indisi hesaplanmış ve hesaplanan bu değerlerin negatif olduğu görülmüştür. Metamalmesiz fraktal antenin S11 değeri 5,47 GHz'de -16,973 dB iken, 2 MTM yapısı ile bu değer -25,908 dB değerine kadar düşmüştür. Ayrıca, antenin yönlülüğü 6,65 dBi'den 9,67 dBi'ye, kazancı ise 1,19 dB'den 5,99 dB'ye yükselmiştir. Fraktal anten ve MTM'li yapının fabrikasyonları yapılmış olup, farklı sayılarda MTM yapısı anten üzerine 90 derece gelecek şekilde monte edilmiş ve ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Metamalzeme, Fraktal anten, Minyatürleşme, Ultra geniş bant

Improvement of Fractal Antenna Parameters with Metamaterial

Abstract

In this study, a fractal antenna operating at 5.47 GHz has been designed and it is aimed to improve the directivity, gain and efficiency of this antenna by using Metamaterials. With the help of a FIT-based simulation program, a fractal antenna consisting of circular shapes with a fixed ratio of 0.65 between each circle is designed. The MTM structure, which is composed of 2x4 unit cell rhombus structures, each of 38 mm x 38 mm, is designed in the same simulation program. Using the S11 and S21 parameter values obtained from the simulation of MTM structures, effective dielectric constant, effective magnetic permeability and refractive index of the structure are calculated and these values are found to be negative. While the S11 value of the fractal antenna without MTM is -16.973 dB at 5.47 GHz, it has decreased to -25.908 dB with 2 MTM structures. In addition, the antenna's directivity has increased from 6.65 dBi to

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Emin ÜNAL, emin.unal@iste.edu.tr

9.67 dBi and its gain has increased from 1.19 dB to 5.99 dB. Fractal antenna and MTM structure are fabricated, different numbers of MTM structure have been mounted on antenna at 90 degrees and measurement results are obtained. Measurement results and simulation results are compared and it is seen that the simulation results and the measurement results are in good agreement with each other.

Keywords: Metamaterial, Fractal antenna, Miniaturization, Ultra-wide band

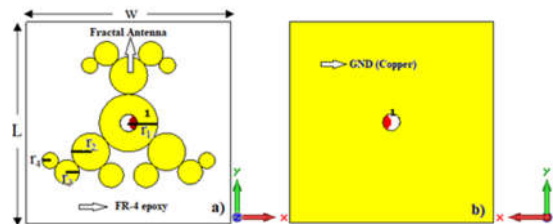
1. GİRİŞ

Fraktal kelimesi ilk olarak Polonya asıllı matematikçi Benoit Mandelbrot tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır [1]. Fraktal yapılar bir şeklin orantılı olarak küçültülmesi veya büyütülmesi ile elde edilen yapıların periyodik olarak tekrarlanmasıyla elde edilen karmaşık yapılardır. Fraktal şekillerin kullanım alanlarından birisi de antenlerdir. Fraktal anten geleneksel antenlere kıyasla daha fazla avantaja sahiptir. Düşük maliyetli olan bu antenler küçük kesit alanına, çoklu rezonans frekansına ve büyük bant genişliğine sahiptirler. Bu antenlerin bir başka avantajı ise empedans eşleştirmeye gerek duymamasıdır. Dezavantajları ise karmaşık yapıya sahiptir ve bazı durumlarda düşük kazançta neden olabilirler. Fraktal geometrilerin yineleme sayısı arttıkça rezonans frekansları arasındaki mesafe azalmaktadır [2]. Fraktal antenler boşluk doldurma özelliği sayesinde minyatürleşmeye neden olurken, kendine benzerlik özelliği ile de geniş bir frekans dizisine sahiptirler. Savunma, askeri, uzay iletişim sistemleri, Wi-Fi, kablosuz yerel ağı (WLAN), mobil iletişim sistemleri çoklu frekans bandında çalışabilmesi için geniş bantlı antenlere ihtiyaç duyar [3].

Fraktal antenlerin yineleme sayısı ile ilgili 2013 yılında Jena ve arkadaşları Sierpinski Halı geometrisine dayanan fraktal anten tasarımı yapmış ve simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda yineleme sayısı arttıkça antenin kazancında iyileşme meydana geldiği görülmüştür [4]. 2015 yılında yapılan diğer bir çalışmada ise fraktal tabanlı mikroserit yama anteni tasarlanmış ve bunun sonucunda çoklu rezonans elde edilmiştir. Tasarlanan antenin Ultra Geniş bant (UWB) uygulamaları için kullanışlı olduğu ifade edilmiştir [5]. Başka bir çalışmada ise Ultra geniş bant altıgen fraktal anten tasarımı,

üretimi, ölçümü yapılmıştır. Bu anten tasarımında fraktal geometrisi, kenarlarında Koch kar tanesi bulunan altıgen şekil kullanılarak elde edilmiştir. Antenin bant genişliğinin ve kazancının fraktal geometri sayesinde arttığı görülmüştür [6]. CPW beslemeli UWB Gosper adası altıgen monopol anten tasarımı yapılmış ve standart antene kıyasla bant genişliğinin arttığı görülmüştür [7]. Madhav ve arkadaşları 2018 yılında U ve W şeklinde fraktal anten tasarlamışlardır. U ve W şeklindeki yuvaların atırılması ile çok bantlı bir yapı elde edilmiştir [8]. Yong ve Shaobin, 2008 yılında yaptıkları çalışmada kare yapıların içerisinde, kare kenarlarının yarısına eşit yarıçaplı dairesel parçaları çıkartarak elde ettikleri yeni taç kare fraktal anten yapısını kullanmışlardır. Bu çalışmada, yineleme sayısı arttıkça rezonans sayısının arttığı not edilmiş ve ayrıca bant genişliğini kontrol etmenin mümkün olduğu ifade edilmiştir [9].

2. MATERYAL VE METOT



Şekil 1. Fraktal antenin görünümü; (a) ön, (b) arka

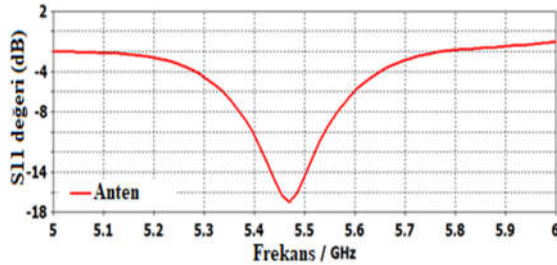
Şekil 1'de görülen fraktal antenin boyutları Çizelge 1'de verilmiştir. Fraktal antenin arka yüzeyinde kullanılan 35 mm x 35 mm bakır düzlemin kalınlığı 0,035mm ve elektriksel iletkenliği $5,8001 \times 10^7$ S/m'dir. Dielektrik malzeme olarak ise iyi performansa ve düşük maliyete sahip olan 1,6 mm kalınlığında, $\epsilon_r=4,4$, $\mu_r=1$ ve dielektrik kayıp tanjantı $\delta\epsilon=0,02$ olan FR4-epoxy malzemesi seçilmiştir. Besleme için en

büyük dairenin ortasından 1,5 mm yarıçapında oyuk açılmış ve fraktal şekil ile arkadaki metal düzleme temas edecek şekilde port atanmıştır.

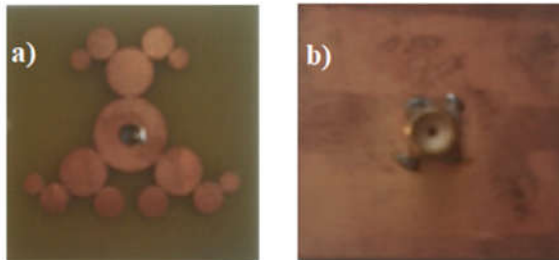
Çizelge 1. Fraktal antenin 5,47 GHz için boyutları

Anten parametreleri	Boyut
Frekans	5,47 GHz
Fraktal şekil, büyük daire (r_1)	5 mm
Fraktal şekil küçük daire (r_2)	5x0,65 mm
r_3	2,112 mm
r_4	1,373 mm
Plaka uzunluğu (L)	35 mm
Plaka genişliği (W)	35 mm
Plaka kalınlığı	1,635 mm

Tasarımı yapılan fraktal anten FIT tabanlı simülasyon programı kullanılarak analiz edilmiş ve yansımaya katsayısı (S11) Şekil 2’de görüldüğü gibi, 5,47 GHz’de -16,947 dB olarak elde edilmiştir. S11 grafiği aynı zamanda antenin bant genişliğinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Önerilen Fraktal antenin bant genişliği (S11<-10 dB) yaklaşık olarak 146 MHz’dir.

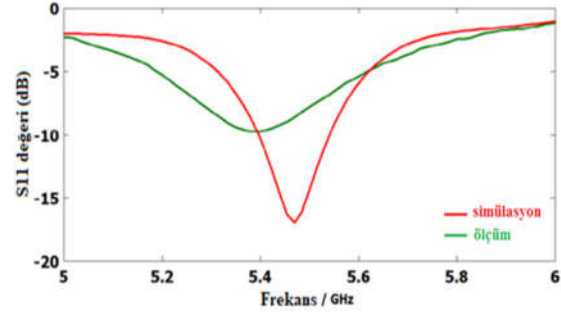


Şekil 1. Fraktal antenin sayısal olarak elde edilen S11 grafiği



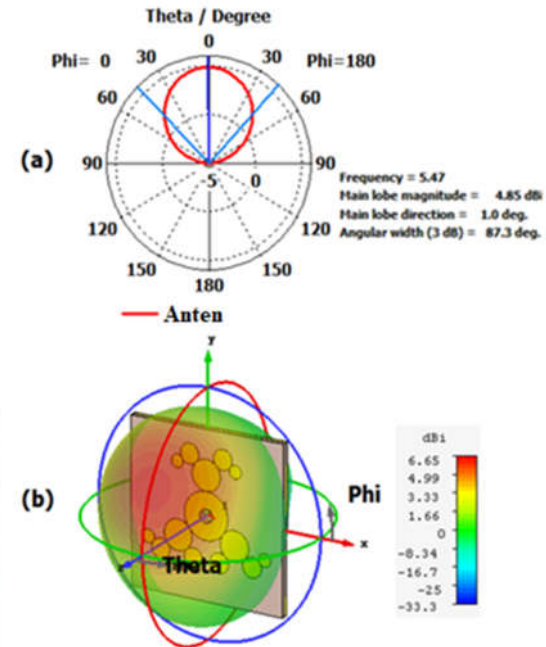
Şekil 2. Üretilen anten görünümü (a) ön, (b) arka

Üretimi gerçekleştirilen fraktal antenin ön ve arka yüzü Şekil 3’de görülmektedir. Önerilen fraktal anten için yansımaya katsayısının sayısal ve ölçüm sonuçları Şekil 4’te verilmiştir. Rezonans frekansındaki kayma üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. Fraktal antenin sayısal ve deneysel S11 grafiği

Antenin verimini, yönlülüğünü ve kazancını belirleyebilmek için antenin radyasyon örüntüsü de incelenmelidir. Şekil 5’de antenin 2 ve 3 boyutlu uzak alan ışınması verilmiştir.

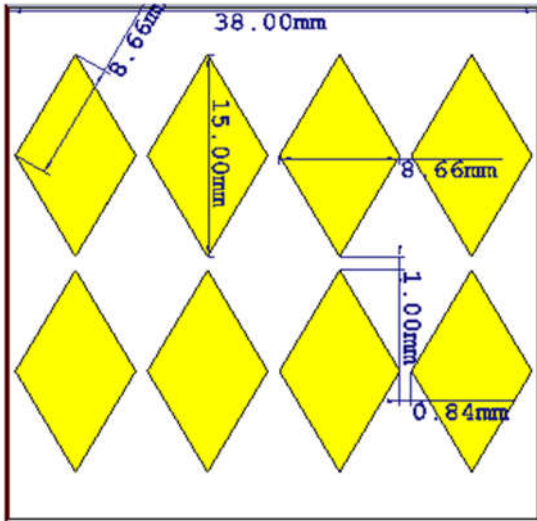


Şekil 5. Fraktal antenin Phi=0 derecede uzak alan ışınma eğrisi (a) 2 boyutlu (b) üç boyutlu

Şekil 5a incelendiğinde, antenin ana lobu için ışınma büyüklüğü, $\Phi = 0$ derecede, 4,85 dBi, hüzmeye açısı $87,3^\circ$ olarak görülmektedir, ancak yan loblarda ışınma görülmemektedir. Antenin yönlülüğü ise Şekil 5b'de görüldüğü gibi 6,65 dBi ve kazancı 1,19 dB'dir.

3. MTM TASARIMI

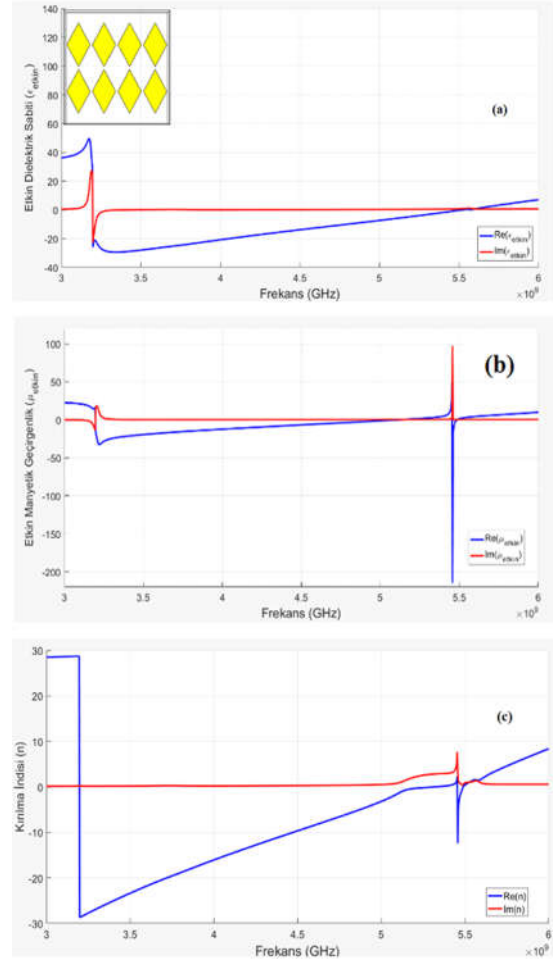
Metamalzeme (MTM); doğada bulunmayan, laboratuvar ortamında yapay olarak üretilen, periyodik yapılardan meydana gelen malzemelerdir. Elektrik alan vektörü (\vec{E}), manyetik alan vektörü (\vec{H}) ve dalga vektörü (\vec{k}) bu ortamda sol el kuralına uymaktadır. Bu yüzden bu malzemelere sol el yönlü malzemeler (LHM) denir. Bu yapay malzemeler eş zamanlı olarak negatif etkin dielektrik sabitine (ϵ), negatif manyetik geçirgenliğe (μ) ve negatif kırılma indisine (n) sahiptirler.



Şekil 6. Metamalzeme yapısının önden görünüşü

Dielektrik malzeme olarak 38mmx38mm boyutunda dielektrik geçirgenliği 4,3, manyetik geçirgenliği 1, dielektrik kayıp tanjant değeri 0,025 ve kalınlığı 1,6 mm olan FR4-epoxy seçilmiştir. FR4 malzemenin yüzeyi bakır olup kalınlığı 0,035 mm ve elektriksel iletkenliği ise $5,8001 \times 10^7$ S/m'dir. Tasarlanan MTM yapıları, Şekil 6'da görüldüğü gibi dielektrik yüzey üzerine 2x4

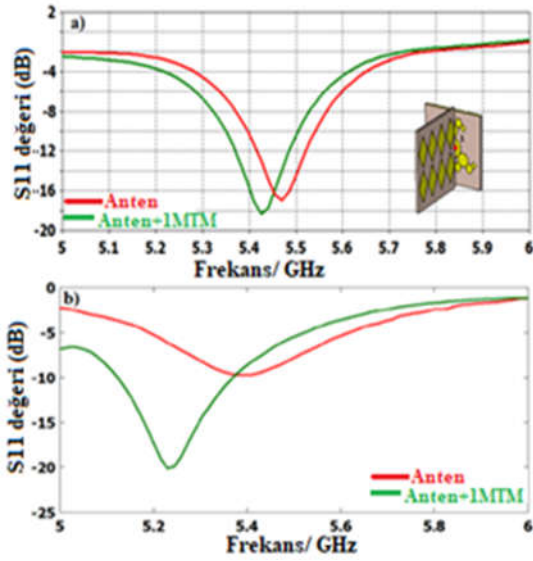
periyodik olarak birbirinin aynısı eşkenar dörtgen yapıların yerleştirilmesiyle oluşmuştur. Her bir eşkenar dörtgenin kenar uzunluğu 8,66 mm'dir.



Şekil 7. Eşkenar dörtgen MTM yapısının reel ve sanal (a) manyetik geçirgenlik, (b) dielektrik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi

Tasarlanan MTM yapısının sanal ve reel etkin manyetik geçirgenliği, etkin dielektrik sabiti, kırılma indisinin grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Sol-elli metamalzeme kullanılacak antenin çalışma frekansı 5,47 GHz'dir. MTM yapısının 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.

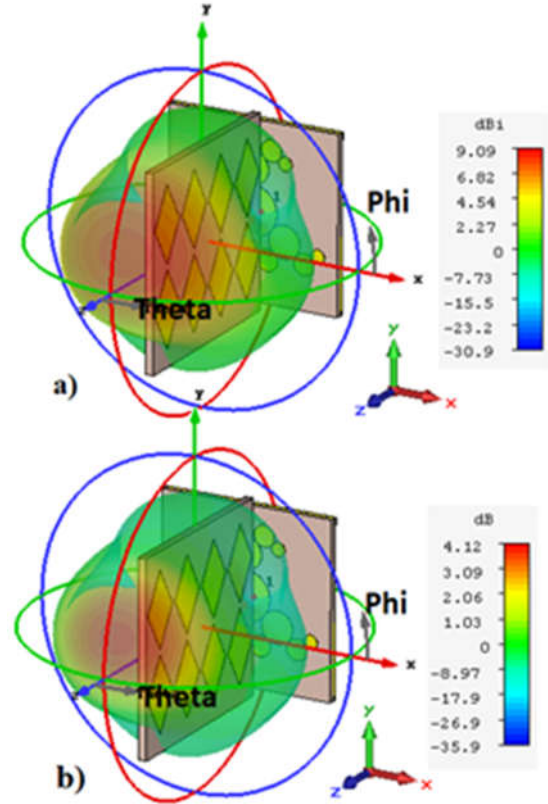
Tasarlanan MTM yapısı fraktal anten üzerine, anten yüzeyine 90 derece olacak şekilde farklı sayılarda ve farklı konumlarda yerleştirilmiş ve her bir konfigürasyon için sayısal ve ölçüm sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 8. Anten ve 1 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

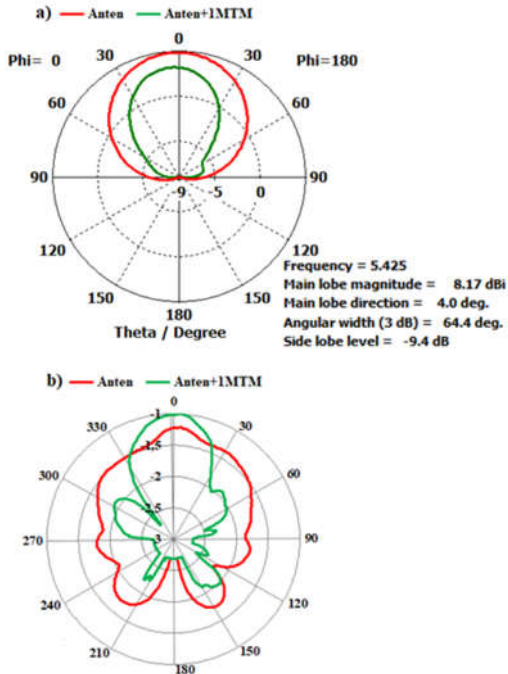
Şekil 8a incelendiğinde, antenin simülasyon sonucunda S11 değeri 5,47 GHz’de yaklaşık olarak -16,97 dB iken, MTM yapısı eklendikten sonra bu değer -18,31 dB’ye düştüğü görülmektedir. Ayrıca, antenin bant genişliği 146 MHz’den 153,5 MHz’e yükselmiştir. Üretimi yapılan anten ve üzerine yerleştirilen 1 MTM yapısının S11 değeri 5,23 GHz’de -20,11 dB olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, yönlülük, verim ve kazancın belirlenmesi için antenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışınma örüntüleri önemlidir.

Şekil 9’da anten ve 1 MTM yapısının üç boyutlu yönlülük ve kazanç ışınma eğrileri verilmiştir. Antenin, MTM olmadan yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB iken, 1 MTM eklendikten sonra yönlülüğü 9,09 dBi, kazancı 4,12 dB olmuştur. Böylece, MTM yapısı kullanılarak antenin yönlülüğü ve kazancı artırılmıştır. Ayrıca, anten ve 1MTM yapının tek yönde ışınma yaptığı görülmektedir.

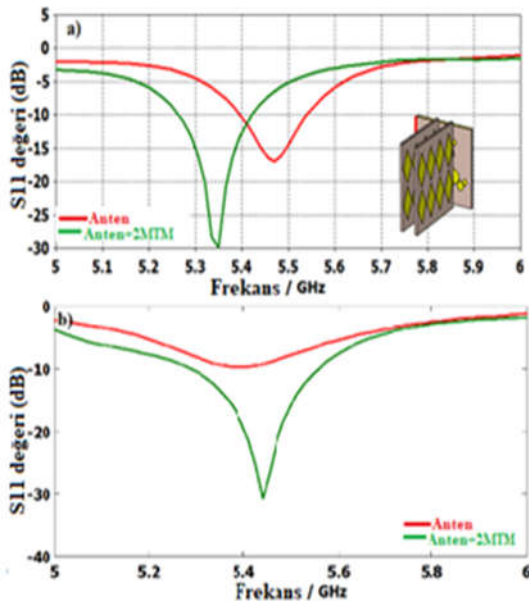


Şekil 9. Anten ve 1MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Şekil 10a’da üzerine 1 MTM yapısı eklenmiş antenin sayısal olarak elde edilmiş 2 boyutlu ışınma eğrisi görülmektedir. Antenin, $\Phi = 0$ derecede, MTM konulmadan ana loblardaki ışınma büyüklüğü 4,85 dBi, hüzmeye açısı 87,3 derecedir. Anten üzerine 1 MTM yapısı eklendikten sonra, ana lobundaki ışınma büyüklüğü 8,17 dBi, yan lobundaki ışınma büyüklüğü -9,4 dB ve hüzmeye açısı ise 64,4 derece olarak elde edilmiştir. Şekil 10b’de üzerine 1 MTM yapısının yerleştirilmiş antenin ölçülen 2 boyutlu ışınma eğrisi görülmektedir. Şekil 10b incelendiğinde, üzerine 1 MTM yapısının yerleştirilmiş antenin yan loblarının küçüldüğü, ana lob yönünde ışınmanın arttığı ve sonuç olarak MTM yapısının antenin yönlülüğünü ve kazancını arttırdığı görülmektedir. Ayrıca, sayısal olarak elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

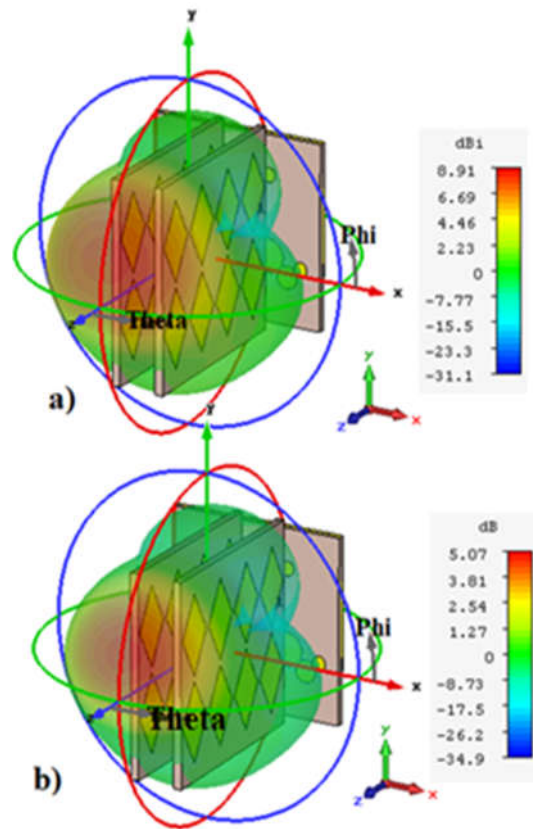


Şekil 10. Anten ve 1MTM yapının 2 boyutlu ışınma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)



Şekil 11. Anten ve 2 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

Anten üzerine 2 MTM yapı Şekil 11a'da görüldüğü gibi yerleştirilerek yansımaya katsayısının (S11) sayısal ve ölçüm grafikleri elde edilmiştir. Anten üzerine yerleştirilen 2 MTM arasındaki mesafe 7,40 mm olarak ayarlanmıştır. Yeni yapının S11 değeri 5,35 GHz'de -29,873 dB'ye düşmüş ve bant genişliği 156,3 MHz olmuştur. Üretimi gerçekleştirilen bu yapının 5,44 GHz'de ölçülen S11 değeri -30,749 dB olarak bulunmuştur.

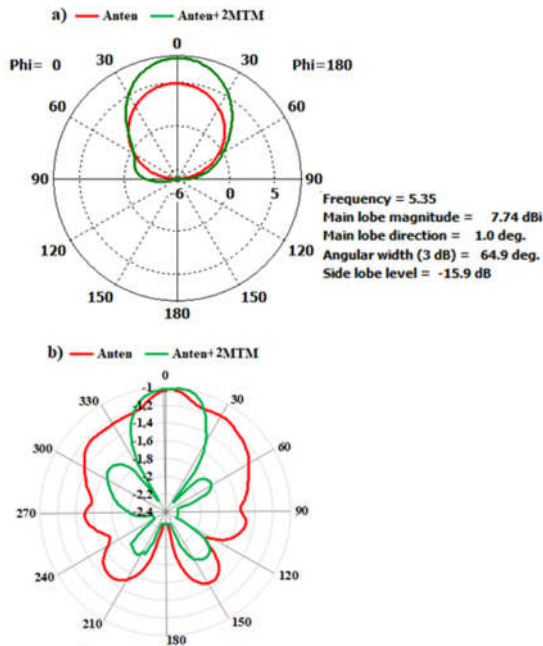


Şekil 12. Anten ve 2 MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

MTM olmadan antenin yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB olarak elde edilmişti, ancak antenin üzerine 2 MTM yapısı yerleştirildikten sonra kazancı 5,07 dB, yönlülüğü 8,91 dBi'ye yükselmiştir. 2 MTM yapısı yerleştirilmiş antenin üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiği Şekil 12'de

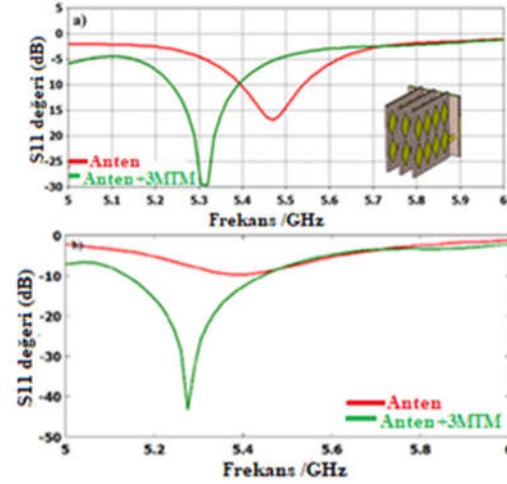
görülmektedir. Şekilde, yayılım beklendiği gibi tek yönde olduğu açıkça görülmektedir.

Üzerine 2MTM yapı eklenmiş antenin, 2 boyutlu ışınma örüntüsü Şekil 13'de verilmiştir. Şekil 13a'da görüldüğü gibi ana lobun ışınma büyüklüğü 7,74 dBi, yan lobun ışınma seviyesi -15,9 dB ve hüzmeye açısı 64,9 derecedir. Diğer taraftan, üretimi gerçekleştirilen bu yapının ölçülen 2 boyutlu ışınma örüntüsü Şekil 13b'de verilmiştir. Anten üzerine yerleştirilen 2 MTM yapının antenin ana lobundaki ışınma büyüklüğünü arttırdığı, yan loblardaki ışınma büyüklüğünü azalttığı, ayrıca antenin yönlülüğünü ve kazancını da arttırdığı görülmektedir.



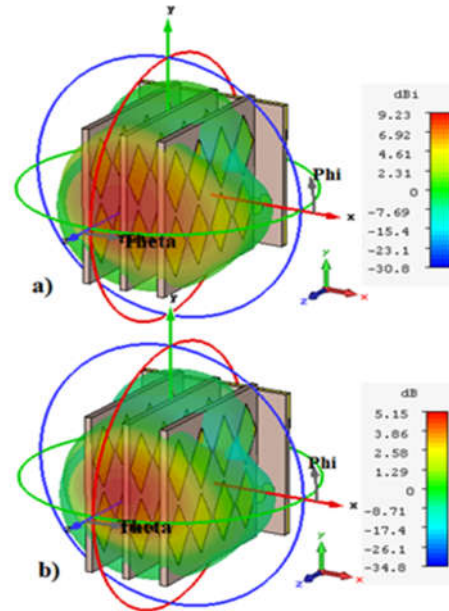
Şekil 13. Anten ve 2 MTM yapının 2 boyutlu ışınma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

Anten üzerine 7,40 mm aralıkla, 3MTM yapısı yerleştirildiğinde; sayısal olarak elde edilen S11 değeri 5,32 GHz'de -29,57 dB, bant genişliği ise 159,2 MHz olarak Şekil 14'de görülmektedir. Diğer taraftan, üretilen yeni yapının S11 değeri ise 5,275 GHz'de -43,119 dB ölçülmüştür.

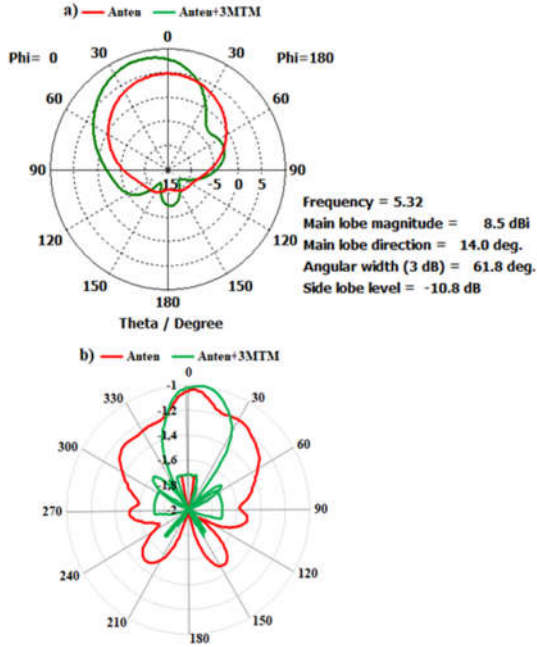


Şekil 14. Anten ve 3 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

Üzerine 3 MTM yapısı yerleştirilmiş antenin üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiği Şekil 15'de görülmektedir. MTM olmadan 1,19 dB olan anten kazancı, 3 MTM yapısı yerleştirildikten sonra 5,15 dB'ye, yönlülüğü ise 6,65 dBi'den 9,23 dBi'ye yükselmiştir.



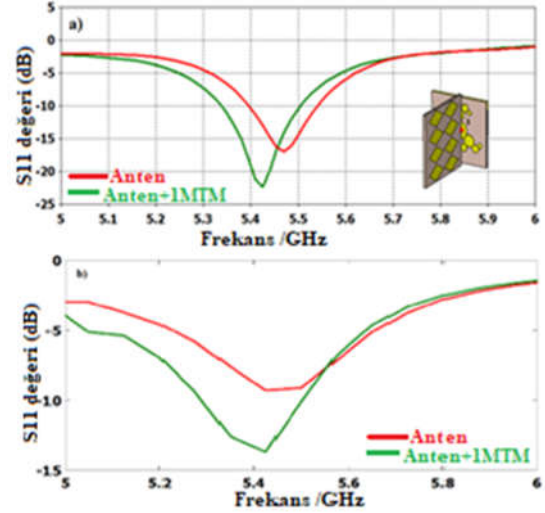
Şekil 15. Anten ve 3 MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç



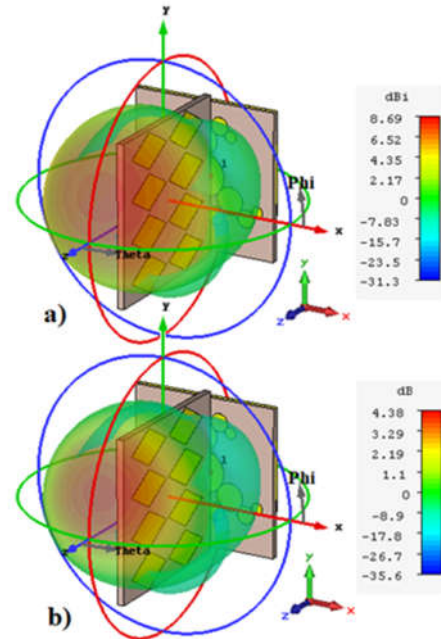
Şekil 16. Anten ve 3 MTM yapının 2 boyutlu ışınma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

Şekil 16'da görüldüğü gibi, $\Phi=0$ derecede ana lobdaki ışınma büyüklüğü 8,5 dBi, yan lobdaki ışınma -10,8 dB seviyesindedir. Ayrıca, hüzmeye açısı 87,3 dereceden 61,8 dereceye düşmüştür. Ölçüm sonucunda elde edilen 2 boyutlu ışınma örüntüsüne bakıldığında hem yönlülüğün, hem de kazancın önemli ölçüde artırdığı ve ışınmanın tek yönde olduğu görülmektedir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, üretim ve simülasyon sonuçları uyum içerisindedir.

Bu bölümde, anten üzerine yerleştirilen MTM yapısı, anten yüzeyine dik konumda kalacak şekilde 90 derece çevrilerek simülasyon ve ölçümler tekrarlanmıştır. MTM yapı Şekil 8'de verilen yapıya göre 90 derece döndürüldüğünde; 5,425 GHz'de yansıma katsayısının (S11) sayısal ve ölçüm değerleri sırasıyla -22,376 ve -13,678 olarak elde edilmiştir. Şekil 17'de, MTM yapının etkisiyle S11 değerinin önemli ölçüde azaldığı ve bant genişliğinin ise yaklaşık olarak 167,4 MHz olduğu görülmektedir.



Şekil 17. Anten ve 1 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

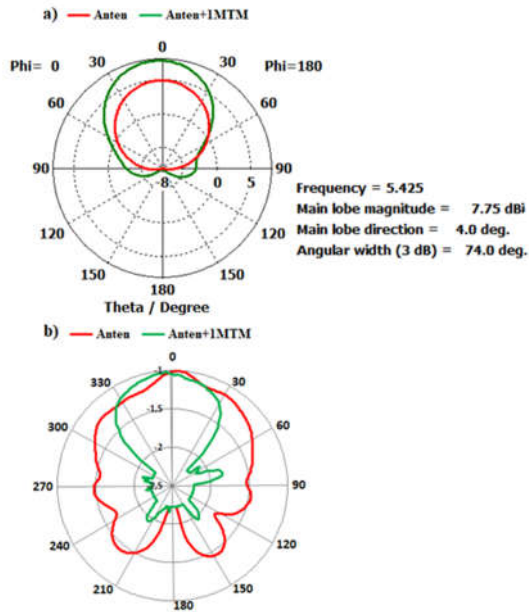


Şekil 18. Anten ve 1MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Şekil 18, üzerine 1 MTM yapısı yerleştirilmiş antenin üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiğini göstermektedir. Görüldüğü gibi, üzerinde MTM

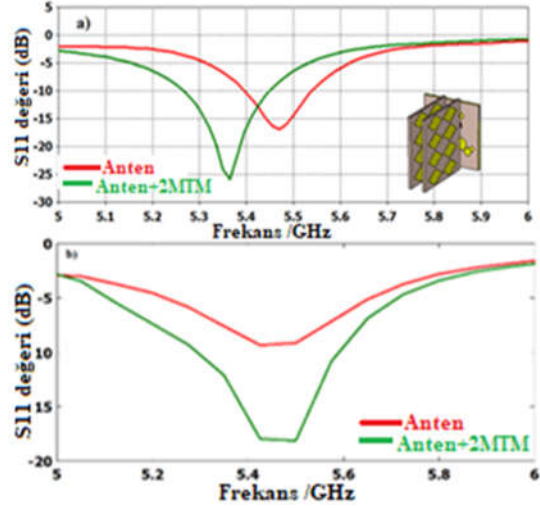
olmadan 1,19 dB olan anten kazancı, MTM yapısı yerleştirildikten sonra 4,38 dB'ye, yönlülüğü ise 6,65 dBi'den 8,69 dBi'ye çıkmıştır.

Üzerine MTM yerleştirilmiş fraktal antenin simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen 2 boyutlu ışınma eğrisi Şekil 19'da verilmiştir. Simülasyon sonucuna göre, $\Phi=0$ derecede ana lobdaki ışınma büyüklüğü 7,75 dB, hüzmeye açısı ise 74,0 derecedir ve yan loblarda ışınma görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre, MTM yapının antenin yan loblarını azalttığı ve ana lobundaki ışınmayı arttırdığı görülmektedir. Ayrıca, MTM yapının antenin yönlülüğünü ve kazancını da arttırdığı görülmektedir.

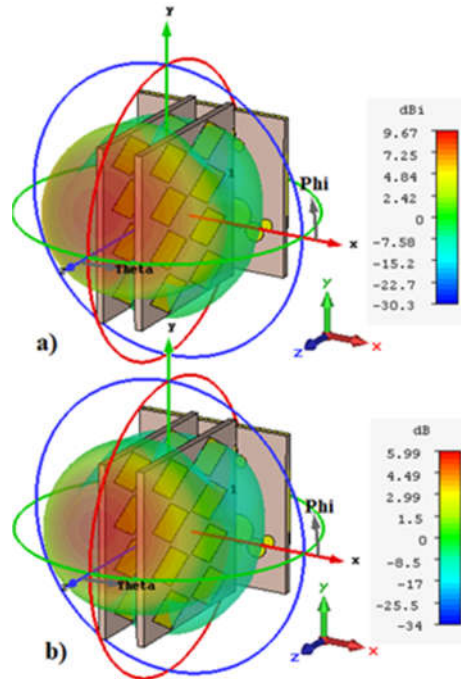


Şekil 19. Anten ve 1 MTM yapının 2 boyutlu ışınma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

2 adet MTM yapı anten üzerine Şekil 20'de görüldüğü gibi yerleştirildiğinde; Simülasyon sonuçlarına göre, 5,365 GHz'de S11 değeri -25,908 dB'ye düşmüş ve bant genişliği 183,5 MHz olarak gerçekleşmiştir. Üretilen yeni yapının ölçülen S11 değeri ise 5,5 GHz'de -18,134 dB olmuştur.



Şekil 20. Anten ve 2 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

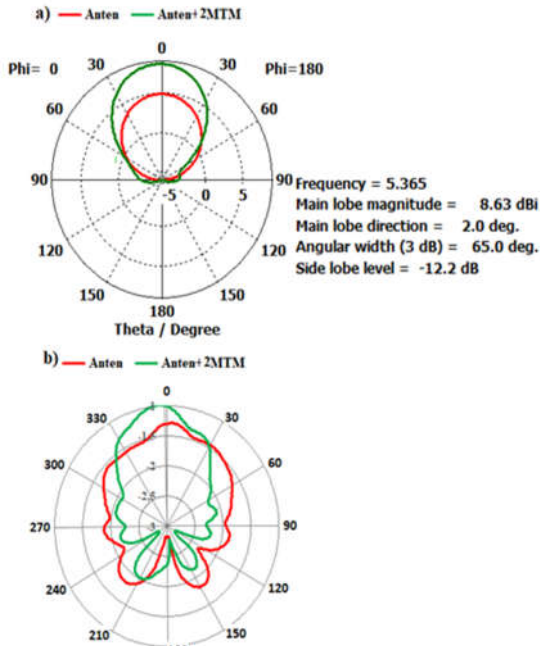


Şekil 21. Anten ve 2 MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Üzerine 2 adet MTM yapı yerleştirilmiş antenin üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiği Şekil 21'de görülmektedir. MTM olmadan 1,19 dB olan anten

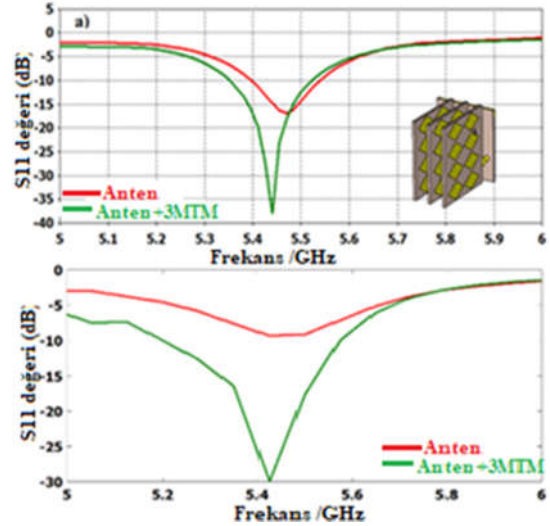
kazancı, 2 adet MTM yapı yerleştirildikten sonra 5,99 dB'ye, yönlülük ise 9,67 dBi'ye yükselmiştir ve ışıma beklendiği gibi tek yönde olmuştur.

Fraktal anten ve üzerine yerleştirilmiş 2 MTM yapının etkileşimi neticesinde elde edilen 2 boyutlu ışıma eğrisinin sayısal ve ölçüm sonuçları Şekil 22'de verilmiştir. Şekil 22 incelendiğinde, Phi=0 derecede, MTM olmadan 4,85 dBi olan ana lobun ışıma büyüklüğü, 2 adet MTM yapı yerleştirildikten sonra 8,63 dBi'ye yükseldiği, yan lobundaki ışıma miktarının ise -12,2 dB olduğu görülmektedir. Ayrıca, hüzmeye açısı 87,3 dereceden 65,0 dereceye düşmüştür.



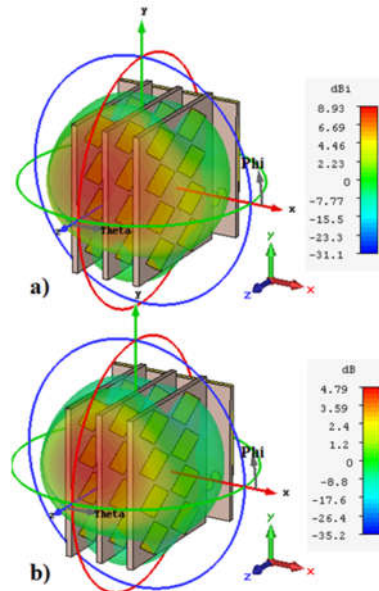
Şekil 22. Anten ve 2 MTM yapının 2 boyutlu ışıma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

Üç adet MTM yapı yerleştirilmiş anten için yansıma katsayısı (S11) Şekil 23'de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, 5,44 GHz'de S11 değeri -38,024 dB'ye düşmüş ve bant genişliği 172 MHz olarak gerçekleşmiştir. Üretilen yeni yapının ölçülen S11 değeri ise 5,425 GHz'de -29,923 dB olarak gerçekleşmiştir.



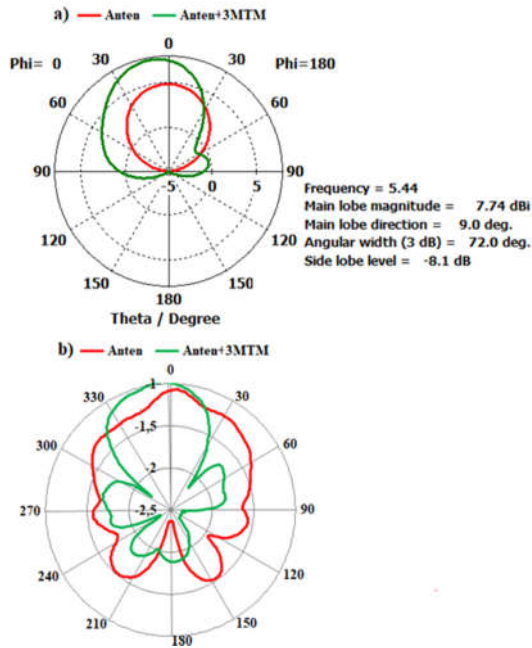
Şekil 23. Anten ve 3 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

Bu yeni konfigürasyonun üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiği Şekil 24'de görülmektedir. Şekil 24 incelendiğinde, MTM yapıları eklenerek antenin kazancı 1,19 dB'den 4,79 dB'ye yönlülüğü 6,65 dBi'den 8,93 dBi'ye yükselmiştir.



Şekil 24. Anten ve 3 MTM yapının üç boyutlu (3D) ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Fraktal anten ve MTM yapının sayısal ve ölçüm sonucunda elde edilen 2 boyutlu ışım eğrisi Şekil 25’de görülmektedir. Şekil 25’de görüldüğü gibi, $\Phi=0$ derecede ana lobdaki ışım büyüklüğü 7,74 dBi, yan lobdaki ışım -8,1 dB seviyesinde ve hüzme açısı ise 72 derecedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, MTM yapısının antenin yan loblarını azalttığı ve ana lobundaki ışımayı arttırdığı anlaşılmaktadır.










Şekil 25. Anten ve 3 MTM yapının 2 boyutlu ışım eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

4. SONUÇ

5,47 GHz’de çalışan 35 mm x 35 mm boyutlarında dairesel şekillerden oluşmuş bir fraktal anten tasarlanmıştır. MTM yapısı ise 38 mm x 38 mm boyutunda 2x4 periyodik olarak sıralanmış eşkenar dörtgenlerden oluşmaktadır. MTM yapılar anten üzerine 90 derece gelecek şekilde, farklı sayıda yerleştirilmiş ve analiz edilmiştir. Simülasyonu ve ölçümü yapılan konfigürasyonların hem yansım katsayısı (S11), hem de ışım örüntüleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada incelenen konfigürasyonların özet sonuçları

Çizelge 2’de listelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, MTM olmadan antenin yansım katsayısı, S11 değeri 5,47 GHz’de -16,947 dB, yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB, ana lobundaki ışım büyüklüğü 4,85 dBi olarak elde edilmiştir. 2 MTM yapı anten üzerine yerleştirildiğinde, simülasyon sonucunda elde edilen S11 değeri 5,365 GHz’de -25,908 dB, yönlülüğü 9,67 dBi, kazancı 5,99 dB, ana lobundaki ışım 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 kaymalar, MTM yapı ile anten arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2. Özet simülasyon sonuçları

ANTEN				
Görünüş	Frekans	Geri dönüş kaybı	Kazanç	Directivity
	5.47 GHz	-16.947 dB	1.19 dB	6.65 dBi
Üzerinde bir katman MTM bulunan fraktal anten parametreleri				
	5.425 GHz	-18.311 dB	4.12 dB	9.09 dBi
	5.425 GHz	-22.376 dB	4.38 dB	8.69 dBi
Üzerinde iki katman MTM bulunan fraktal anten parametreleri				
	5.35 GHz	-29.873 dB	5.07 dB	8.91 dBi
	5.365 GHz	-25.908 dB	5.99 dB	9.67 dBi
Üzerinde üç katman MTM bulunan fraktal anten parametreleri				
	5.32 GHz	-29.576 dB	5.15 dB	9.23 dBi
	5.44 GHz	-38.024 dB	4.79 dB	8.93 dBi

Ölçüm ve simülasyon sonuçları uyum içerisindedir. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen yapının antenin yönlülüğünü, kazancını ve verimliliğini artırdığı anlaşılmaktadır. Ölçüm ve

simülasyon sonuçları arasında gözlenen farklılıklar üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır.

Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 400-402.

5. KAYNAKLAR

1. Çelik, K., Kurt, E., 2018. Design and Simulation of the Antenna for RF Energy Harvesting Systems. 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), 148-150.
2. Hirway, H., Shaikh, T., 2018. Comparison of Low Profile Sierpinski and Koch Fractal Antenna for Wireless Application. Proceeding of 2018 IEEE Int. Conference on Current Trends Toward Converging Technologies, Coimbatore, India, 1-6.
3. Mete, C., 2011. Minkowski Fraktal Anten Tasarımı ve Yapay Sinir Ağı Modeli. Yıldız Teknik Üniversitesi, FBE, Yüksek Lisans Tezi, s75, İstanbul.
4. Jena, M., Mangaraj, B., Mishra, D., 2013. Bandwidth and Gain Enhancement of Multiband Fractal Antenna Based on the Sierpinski Carpet Geometry. ICTACT Journal on Communication Tech., 669-674.
5. Sivia, J., Bhatia, S., 2015. Design of Fractal Based Microstrip Rectangular Patch Antenna for Multiband Applications. 2015 IEEE Int. Advance Computing Conference (IACC), 712-715.
6. Gupta, M., Mathur, V., 2018. Hexagonal Fractal Antenna Using Koch for Wireless Applications, Frequenz 2018, 443-453.
7. Safia, O., Eleftheriades, G., 2018. A New Gosper Island Fractal UWB Monopole Antenna with Enhanced Bandwidth Characteristics. IEEE Int. Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 1043-1044.
8. 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.
9. Yong, W., Shaobin, L., 2008. A New Modified Crown Square Fractal Antenna. In 2008 Int.