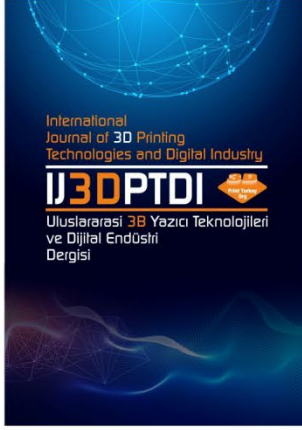




ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

OMEGA METAMATERİYAL YAPISININ PENTA YAMA ANTENİN PERFORMANSINA ETKİSİ

THE EFFECT OF OMEGA METAMATERIAL
STRUCTURE ON THE PERFORMANCE OF
PENTAGONAL PATCH ANTENNA

Yazarlar (Authors): Bülent Urul 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Urul B., “Omega Metamateryal Yapısının Penta Yama Antenin Performansına Etkisi” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 9(2): 155-163, (2025).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1598765

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

OMEGA METAMATERİYAL YAPISININ PENTA YAMA ANTENİN PERFORMANSINA ETKİSİ

Bülent Urul^a 

^aIsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: bulenturul@isparta.edu.tr

(Geliş/Received: 09.12.24; Düzeltilme/Revised: 10.03.25; Kabul/Accepted: 12.06.25)

ÖZ

Bu çalışma, omega metamateriyal yapılarının penta yama anten (PYA) performansına olan etkilerini incelemektedir. İlk olarak, 10.5 GHz merkez frekansı hedeflenerek PYA tasarlanmış ve CST yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Referans antenin kazancı 3.042 dBi olarak elde edilmiştir. Daha sonra, çift negatif özelliklere sahip bir omega metamateriyal tasarlanmış, elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerleri belirlenmiş ve 9-13 GHz frekans aralığında negatif kırınım indisi gözlemlenmiştir. Bu özelliklerin metamateriyalin etkin kullanımını mümkün kıldığı görülmüştür. Simülasyonlarda, omega metamateriyal ile tek ve çift katmanlı lens tabakaları tasarlanmıştır. Tek katmanlı omega lens ile anten kazancında %30.51 artış sağlanmış ve kazanç değeri 3.97 dBi'ye ulaşmıştır. Çift katmanlı lens kullanımında ise lensler arası mesafe optimize edilerek 5.14 dBi kazanç elde edilmiş, bu değer referans anten kazancından %68.97 daha yüksek olmuştur. Bu bulgular, omega metamateriyal yapılarının anten kazancını artırmada ve elektromanyetik yayılımın odaklanmasında önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma metamateriyal destekli anten tasarımında yenilikçi bir yaklaşım sunmakta ve uydu haberleşme gibi yüksek frekanslı uygulamalarda etkili çözümler önererek alanın ilerlemesine katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Penta Yama Anten, Metamateriyal, Anten Kazancı

THE EFFECT OF OMEGA METAMATERIAL STRUCTURE ON THE PERFORMANCE OF PENTAGONAL PATCH ANTENNA

ABSTRACT

This study investigates the effects of omega metamaterial structures on the performance of pentagonal patch antennas (PPA). Initially, a PPA was designed targeting a central frequency of 10.5 GHz and simulated using CST software. The reference antenna achieved a gain of 3.042 dBi. Subsequently, an omega metamaterial with double-negative properties was designed, with its electrical and magnetic permeability values determined. A negative refractive index was observed in the 9-13 GHz frequency range, demonstrating the effective utilization potential of the metamaterial. In the simulations, single- and double-layer omega metamaterial lenses were designed. The single-layer omega lens resulted in a 30.51% increase in antenna gain, reaching a gain value of 3.97 dBi. For the double-layer lens configuration, optimizing the inter-layer distance yielded a gain of 5.14 dBi, which is 68.97% higher than the reference antenna's gain. These findings demonstrate that omega metamaterial structures offer significant advantages in enhancing antenna gain and focusing electromagnetic radiation. In conclusion, this study presents an innovative approach to metamaterial-supported antenna design and provides effective solutions for high-frequency applications, such as satellite communications, contributing to advancements in the field.

Keywords: Pentagonal Patch Antenna, Metamaterial, Antenna Gain.

1. GİRİŞ

Son yıllarda haberleşme teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, daha etkili, yüksek performanslı ve kompakt antenlerin tasarımını zorunlu hale getirmiştir. Anten sistemlerinin performansını artırmak amacıyla kullanılan metamateriyaller, bu alanda önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Metamateriyaller, doğal malzemelerde görülmeyen elektromanyetik özelliklere sahip yapay yapılar olarak tanımlanır ve elektriksel (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) parametrelerinin negatif değerler alması gibi sıra dışı özellikler gösterebilirler. Bu özellikler, özellikle anten kazancı, yönlülük ve bant genişliği gibi performans metriklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir [1-4].

Metamalzemeler ise elektromanyetik alanındaki çalışmalarda anten performansını arttırmak için sıklıkla kullanılan doğada kendiliğinden bulunmayan yapay bir malzemedir [5]. Özellikle mikrodalga çalışmalarında kullanılan mükemmel manyetik özellik gösteren ya da çoklu dielektrik katmanlara sahip frekans seçici yüzeyler olarak kullanılmaktadır [6-7]. Tasarım prosedürlerinde birim hücre geometrisi, dielektrik katmanların kalınlığı, kullanılan malzemelerin elektriksel ve manyetik özellikleri gibi kriterler önemlidir. Bu kriterler kullanılarak tasarım yoluyla elde edilen katmanın belirli bir frekans aralığında elektriksel ve manyetik geçirgenliğinin negatif olmasına çalışılır. Elde edilen yapının elektriksel ve manyetik geçirgenliklerinden bir tanesi bile istenen aralıkta negatif özellik gösteriyorsa yapı metamateriyal bir yapı olarak adlandırılır [8-9].

Metamateriyaller, sahip oldukları elektromanyetik özelliklere göre farklı kategorilere ayrılmaktadır. Negatif kırılma indisine sahip metamateriyaller, elektromanyetik dalgaları olağan dışı yollarla yönlendirme yetenekleri nedeniyle anten ve dalga kılavuzu uygulamalarında kullanılır. Plazmonik metamateriyaller, özellikle optik frekanslarda çalışarak ışığın manipülasyonunda önemli rol oynar [10]. Elektromanyetik band boşluklu (EBG) metamateriyaller, belirli frekans bantlarında elektromanyetik dalgaların yayılmasını engelleyerek filtreleme ve gürültü azaltma uygulamalarında kullanılır [11]. Ayrıca, programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir metamateriyaller, dinamik

olarak ayarlanabilir özellikleriyle 5G ve IoT uygulamalarında giderek daha fazla kullanılmaktadır [12]. Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu yapıların yüksek kazançlı anten tasarımlarında ve elektromanyetik girişim azaltma uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Khan 2013'te antenin genel boyutunda azalma sağlayan bir Koch beşgen fraktal yapısı kullanarak yeni bir küçültülmüş boyutta üç bantlı Koch Pentagonal fraktal anten sunulmuştur [13]. Önerilen anten, temel fraktalizasyon için beşgen şekli kullanır ve ilk yinelemenin Koch fraktal deseniyle kazanmış iç tarafları ile birleştirerek antenin genel boyutunda küçülme sağlamıştır. Üçüncü yineleme önerilen fraktal anten için, ilk rezonans frekans bandında çalışan beşgen yama antenine kıyasla, ciddi bir oranda anten boyutunda küçültme elde etmiştir. Yine diğer bir çalışmada [14-15] fraktal yapılar için saçılma parametreleri incelenmiş ve Sierpinski yapısı için düşük geri saçılma parametresi elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

Ramya 2017'de metamateriyal ile ilgili çalışmasında, ultra ince ve ultra geniş bant özelliklere sahip bir mikrodalga metamateriyal emici tasarlamıştır. Bu yapı, 10.36–16.67 GHz arasında %85'in üzerinde absorpsiyon sağlayarak toplamda 6.31 GHz geniş bant absorpsiyon elde etmiştir. Asimetrik tasarım nedeniyle polarizasyon hassasiyeti gösterse de, geniş bant absorpsiyon normal ve eğik açılarda korunmuştur. Basit, kompakt ve yüksek performanslı bu tasarım, elektromanyetik girişim bastırma ve gizlilik uygulamaları için uygunluğunu, deneysel ve simülasyon sonuçları büyük ölçüde uyum göstererek ortaya koymuştur [16]. Yine 2017 yılında, Wu ve arkadaşları, ultra geniş bant (UWB) uygulamaları için bir metamaterial mikroşerit anten tasarlamış ve 2.9-33.7 GHz arasında %168.3 bant genişliği sağlamıştır. Anten, üstte düzensiz şekilli yuvalar ve altta ızgara desenli bir topraklama düzlemi kullanarak performansı artırmıştır. Ölçümler, maksimum %95.6 verimlilik ve 7.17 dB maksimum kazancı göstermiştir. Tasarım, yönlü radyasyon ve kompakt yapısıyla UWB kablosuz iletişim sistemleri için uygun bir aday olarak öne çıkmıştır [17].

Yapılan diğer bir çalışmada omega şekilli metamateriyal yapılarının mikroşerit anten performansı üzerindeki etkisi, Bilal Tütüncü ve arkadaşlarının çalışmasında kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Çalışmada, bir omega şekilli metamateriyal (OSM) lensin, Ku bandında çalışan referans bir mikroşerit anten üzerine yerleştirilmesiyle kazanç artışı sağlanmıştır. Tek katmanlı OSM lens kullanılarak 2.74 dB, çift katmanlı lens ile ise 4.08 dB kazanç artışı ölçülmüştür. Bu sonuçlar, metamateriyallerin negatif kırınım indisi özelliklerinden faydalanarak elektromanyetik dalgaların odaklanması ve yönlülüğünün artırılabilirliğini göstermektedir [18].

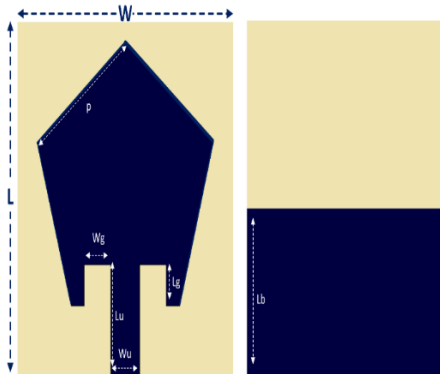
Bu çalışma ise penta fraktal yapısı kullanılarak elde edilen antenin önüne omega metamateriyal yapısı lens olarak kullanılarak anten kazancı üzerine etkisi incelemeyi hedeflemektedir. Sonuç olarak, metamateriyal teknolojisinin anten tasarımındaki potansiyeli, hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, anten performansının iyileştirilmesine yönelik yeni yaklaşımlar sunarak, haberleşme sistemlerinin daha verimli hale getirilmesine katkıda bulunmaktadır. Omega metamateriyal yapılarının gelecekteki anten tasarımlarında yaygın olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Anten Tasarımı ve Analizi

2.1.1 Penta Yama Anten Tasarımı

Bu çalışmada referans anten olarak Şekil 1'de görülen, tutarlı elektromanyetik yayılımı, tasarımının nispeten daha kolay olması nedeniyle penta yapısı (PYA) kullanılmıştır. Çalışma frekansı olarak, 10.5 GHz merkez frekansı hedeflenmiştir.



Şekil 1. Referans anten (PYA) ön ve arka görünüşü

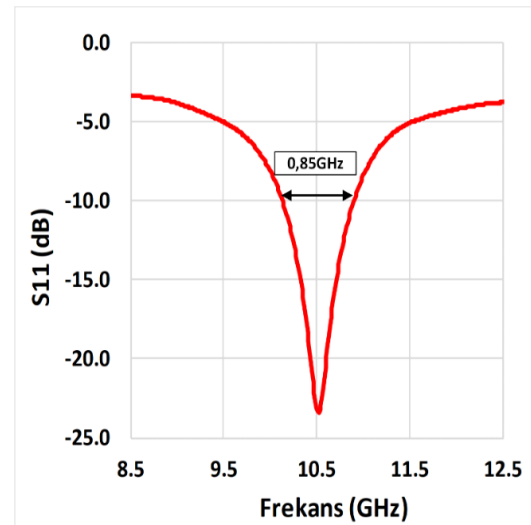
Tüm simülasyon işlemleri CST yazılımı kullanılarak yapılmıştır. PYA, FR4 madde özelliğine sahip bir alttaş üzerine tasarlanmıştır. Alttaşın boyutları 20 x 20 x 1.55 mm şeklindedir. FR4 alttaşın dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4.3$ ve tanjant kaybı $\tan \delta = 0.025$ olarak alınmıştır. Antenin tasarım parametreleri Çizelge 1'de açıkça verilmiştir. Burada antenin yama kısmı ve arka kısmındaki metal kısım için bakır tercih edilmiştir.

Çizelge 1. PYA referans anten parametreleri

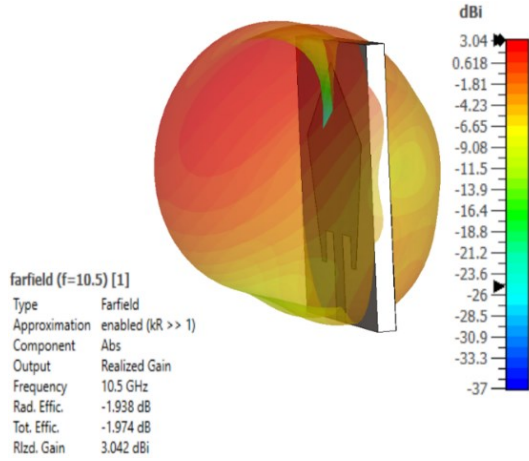
Parametreler	Değer(mm)
Anten Genişliği (W)	20
Anten Uzunluğu (L)	20
Penta Kenar uzunluğu (p)	9.41
Wg	2.3
Lu	6.3
Wu	2.5
Lg	2.27
Lb	9

Çizelge 1'deki anten parametrelerine göre elektromanyetik benzetim işlemleri elektromanyetik ölçüm programı olan CST programı ile 8.5 GHz ile 12.5 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon işleminin sonuçlarına göre, antenin S11 grafiği

Şekil 2'de gösterildiği gibi ve kazanç grafiği de Şekil 3'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 2'de CMA'nın 10,5 GHz rezonans frekansındaki değeri -23,45 dB olduğu ve Şekil 3'de 3D anten kazancının 3,042 dBi olduğu görülmektedir. Antenin -10dB'deki band genişliği ise 0,85 GHz olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Referans antenin S11 grafiği



Şekil 3. Referans antenin 3D kazanç grafiği

2.2. Omega Şekli ile Metamateryal ve Lens Tasarımı

Bir hücrenin metamateryal olup olmadığını belirlemek için kırılma indisinin ϵ ve μ bağılı olarak negatif olması gerekmektedir. Burada 3 durum vardır; 1. Durumda sadece ϵ 'nin belirlenen frekans aralığında negatif olma durumu, 2. durum μ 'nın negatif olma durumu ve 3. Durum ise her ikisinin de negatif olma durumudur. Bu üç durumdan birini sağlayan herhangi bir hücre için o hücrenin hangi frekans aralığında bu değerleri sağlıyorsa o frekans aralığı için metamateryal olduğu söylenebilmektedir. Bu ortam parametrelerinin hesaplanması için de literatürde Nicholson-Ross-Weir, Robust Metodu gibi birçok yöntem bulunmaktadır [19-20]. Genel olarak ortam parametreleri aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir.

Empedans (Z_e), kırılma indisi (N_e), S_{11} ve S_{21} arasındaki ilişki aşağıda verilen Denklem 1, 2, 3 ve 4 ile ifade edilebilir.

$$Z_e = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (1)$$

$$e^{jN_e k_0 d} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{Z_e - 1}{Z_e + 1}} \quad (2)$$

Burada d etkin kalınlık, k_0 ise dalga sayısıdır. Denklem 1'deki Z_e empedansı için limit şartları $Re(Z_e) \geq 0$ ve $Im(Z_e) \geq 0$ olarak tanımlanabilir. Kırılma indisinin reel ve imajiner kısımları ise Denklem 3 ve Denklem 4 ile tanımlanır.

$$n_e = \frac{\text{Im}[\ln(\frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{Z_e - 1}{Z_e + 1}})]}{k_0 d} + \frac{2m\pi}{k_0 d} \quad (3)$$

$$k_e = \frac{-\text{Re}[\ln(e^{jN_e k_0 d})]}{k_0 d} \quad (4)$$

Burada m , numunelerin etkin kalınlığına göre bir tam sayı olan faz periyodikliğini temsil eder ve m , bu makaledeki numune için 0 olarak alınabilir. Buna göre elektriksel ve manyetik geçirgenlik Denklem 5 ve 6'daki gibi ifade edilebilir [21].

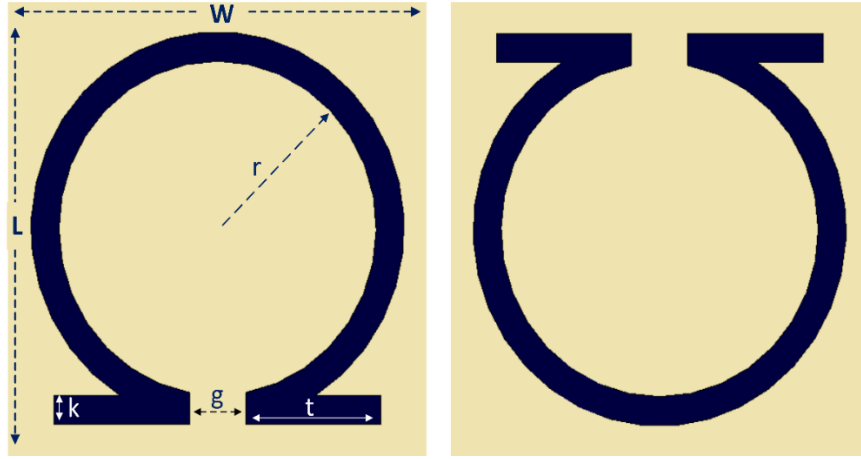
$$\mu_r = N_e Z_e \quad (5)$$

$$\epsilon_r = \frac{N_e}{Z_e} \quad (6)$$

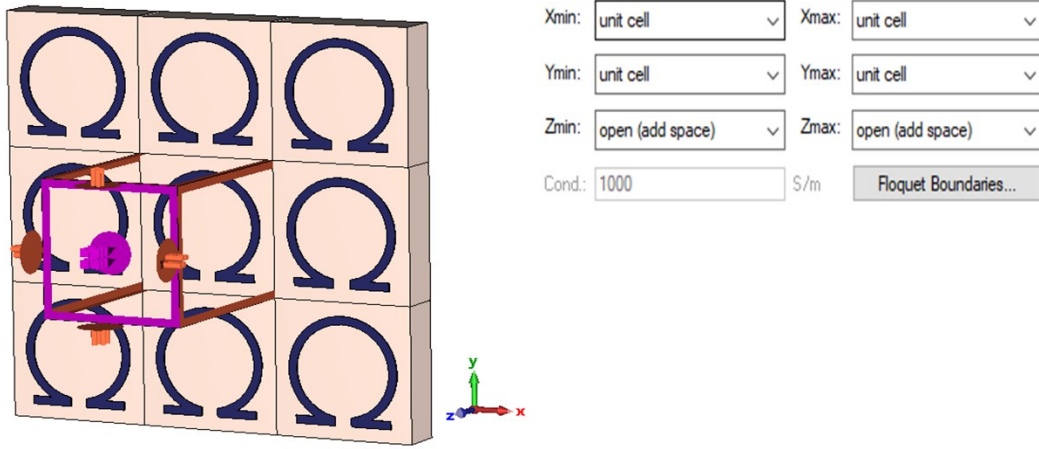
Bir hücrenin tasarım parametrelerine, kullanılan malzeme türüne göre şeklin ortam parametreleri belirlenebilmektedir. Bu amaçla Şekil 4'deki omega şekilli metamateryal hücresi tasarlanmıştır. Birim hücre oluşturmak için tasarım parametreleri Çizelge 2'de verildiği şekildedir. Birim hücre tasarımında periyodikliği sağlamak üzere sınır koşulları x ve y eksenleri için CST programında Şekil 5'de görüldüğü üzere unitcell olarak tercih edilmiştir. İstenilen frekans aralığında hücrenin negatif kırılma indeksine sahip olması için CST programının parameter sweep özelliği kullanılarak birçok denemeden sonra Şekil 6, 7 ve 8'de verilen sırasıyla μ , ϵ , ve n kırılma indisi grafikleri elde edilmiştir.

Çizelge 2. Omega metamateryal tasarım parametreleri

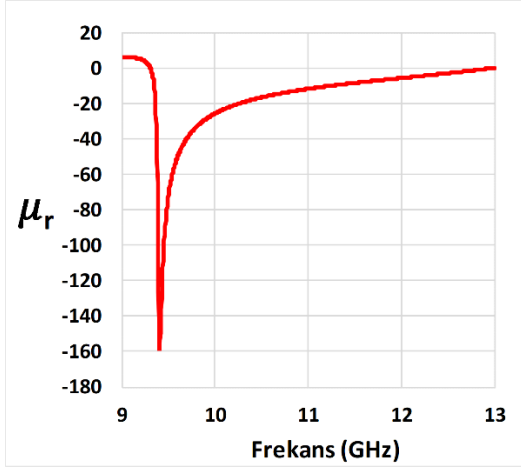
Parametreler	Değer(mm)
Alttaş Genişliği (W)	5
Alttaş Uzunluğu (L)	5
Yarıçap (r)	1.7
k	0.3
t	1.45
g	0.6



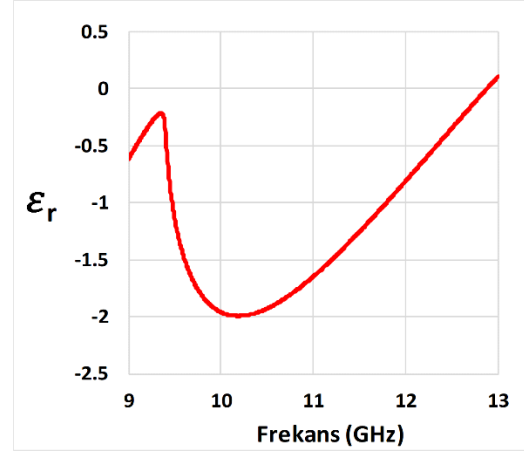
Şekil 4. Omega şekli metamateriyal ön ve arka görünüş



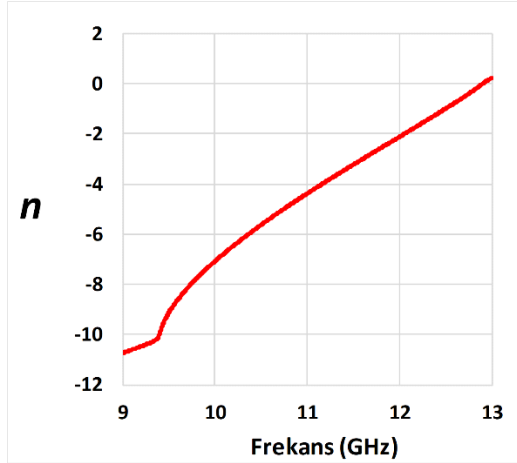
Şekil 5. Omega metamateriyal tasarımı sınır şartları



Şekil 6. Omega metamateriyalin manyetik geçirgenliği (μ_r)



Şekil 7. Omega metamateriyalin elektriksel geçirgenliği (ϵ_r)



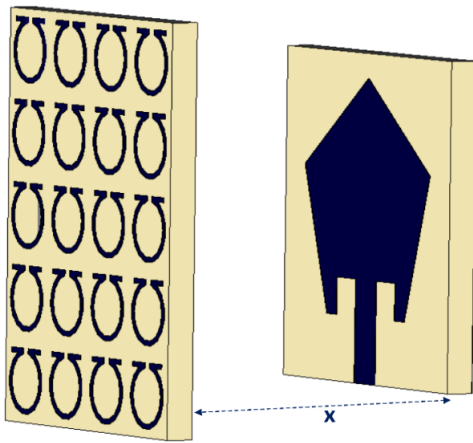
Şekil 8. Omega metamateriyalin kırılma indisi (n)

Şekil 6 incelendiğinde tasarlanan omega hücresinin manyetik geçirgenliğinin 9.31 GHz ile 13 GHz arasında negatif olduğu ve Şekil 7 incelendiğinde ise 9 GHz ile 12.88 GHz aralığında negatif elektriksel geçirgenliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu değerlere bağlı olarak ta Şekil 8’de görüldüğü üzere n kırılma indisinin 9-12.9 GHz aralığında negatif olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre 10.5 GHz merkez frekans olmak üzere omega birim hücresinin yaklaşık olarak 9-13 GHz aralığında double negatif metamaterial özelliği gösterdiği söylenebilir.

3. DENEYSEL BULGULAR

3.1. Omega Lens Tabakalarının Pya ile Kullanımı ve Sonuçları

Omega metamaterial yapısının PYA üzerine etkisini incelemek amacıyla 1.aşamada omega metamaterial yapısı 4x5’olmak üzere 20 adet olarak tek bir düzlem üzerinde antenin yayılım eksenini karşılamak üzere tasarlanmıştır. Daha sonra penta anteni önüne tek parça halinde eklenerek Şekil 9’daki yapı elde edilmiştir.



Şekil 9. Penta yama anten ve tek katman lens yapısı

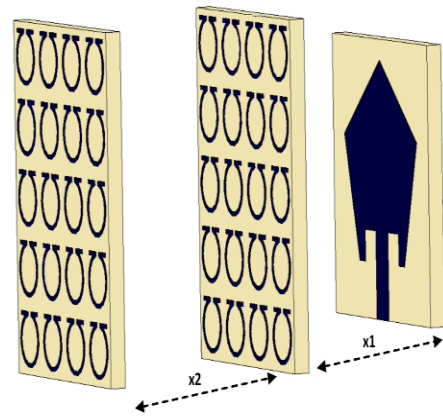
Daha sonra CST programı yardımıyla anten-lens arası mesafe(x) 6-36 mm arasında 3mm aralıklarla değiştirilerek mesafeye bağlı olarak omega dizi lens tabakasının anten kazancına olan etkisi incelenmiş ve Çizelge 3 elde edilmiştir.

Çizelge 3. Tek katmanlı lens tabakasının anten uzaklığına göre kazanç değerleri

x (mm)	Kazanç(dBi)	Kazanç Artışı
6	2.48	-18.47%
9	1.92	-36.88%
12	2.56	-15.84%
15	3.21	5.52%
18	3.97	30.51%
21	3.22	5.85%
24	3.23	6.18%
27	3.42	12.43%
30	3.64	19.66%
33	3.72	22.29%
36	3.59	18.01%

Çizelge 3 incelendiğinde en iyi kazancın 3.97 dBi le 18 mm mesafede elde edildiği görülmektedir. Bu mesafe için tekli 4x5 omega lens tabakası ile yama anten üzerinde 30.51%’lik bir kazanç artışı elde edildiği görülmektedir.

2.aşamada omega lens tabakasından bir tane de daha tasarlanarak anten önüne Şekil 10’da görüldüğü üzere yerleştirilmiştir. Burada hem 1.lens tabakasının antenden uzaklığı, hem 1.lens tabakasının 2. Lens tabakasından uzaklığı önem kazanmaktadır. Bu nedenle bu iki aralık için CST programındaki parameter sweep özelliği kullanılarak 100’den fazla deneme yapılmıştır. Bunun için 1.lens tabakasının antenden uzaklığı ve 2. Lens tabakasının 1.lens tabakasından uzaklığı değiştirilerek Çizelge 4’deki anten kazanç değerleri elde edilmiştir.

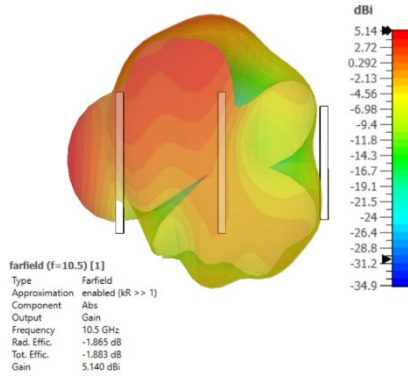


Şekil 10. Penta yama anten ve tek katman lens yapısı

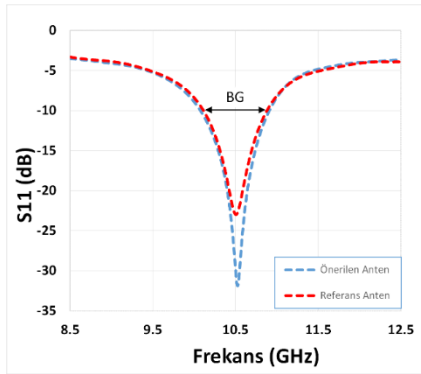
Çizelge 4. Çift katmanlı lens tabakasının anten uzaklığına göre kazanç değerleri

x1	x2	Kazanç	Kazanç	x1	x2	Kazanç	Kazanç	x1	x2	Kazanç	Kazanç
(mm)	(mm)	(dBi)	Artış	(mm)	(mm)	(dBi)	Artış	(mm)	(mm)	(dBi)	Artış
6	6	0.58	-80.93%	15	36	3.6	18.34%	27	24	3.27	7.50%
6	9	0.12	-96.06%	15	39	3.27	7.50%	27	27	3.18	4.54%
6	12	-0.21	-106.90%	15	42	3.24	6.51%	27	30	3.21	5.52%
6	15	0.18	-94.08%	15	45	3.16	3.88%	27	33	3.46	13.74%
6	18	0.22	-92.77%	18	6	3.95	29.85%	27	36	3.67	20.64%
6	21	0.14	-95.40%	18	9	4	31.49%	27	39	3.51	15.38%
6	24	0.18	-94.08%	18	12	3.89	27.88%	27	42	3.46	13.74%
6	27	0.23	-92.44%	18	15	3.97	30.51%	27	45	3.46	13.74%
6	30	-0.29	-109.53%	18	18	3.89	27.88%	30	6	3.86	26.89%
6	33	0.24	-92.11%	18	21	3.42	12.43%	30	9	3.74	22.95%
6	36	0.45	-85.21%	18	24	4.42	45.30%	30	12	3.62	19.00%
6	39	0.38	-87.51%	18	27	3.71	21.96%	30	15	3.48	14.40%
6	42	0.11	-96.38%	18	30	4.15	36.42%	30	18	4.01	31.82%
6	45	0.45	-85.21%	18	33	4.69	54.17%	30	21	3.5	15.06%
9	6	1.81	-40.50%	18	36	4.72	55.16%	30	24	3.51	15.38%
9	9	2.13	-29.98%	18	39	4.32	42.01%	30	27	3.44	13.08%
9	12	2.37	-22.09%	18	42	4.15	36.42%	30	30	3.47	14.07%
9	15	2.54	-16.50%	18	45	4.34	42.67%	30	33	3.66	20.32%
9	18	3.55	16.70%	21	6	3.94	29.52%	30	36	3.78	24.26%
9	21	3.43	12.75%	21	9	3.68	20.97%	30	39	3.82	25.58%
9	24	1.94	-36.23%	21	12	3.49	14.73%	30	42	3.77	23.93%
9	27	2.17	-28.67%	21	15	3.25	6.84%	30	45	3.74	22.95%
9	30	2.35	-22.75%	21	18	4.5	47.93%	33	6	4.16	36.75%
9	33	3.08	1.25%	21	21	5.14	68.97%	33	9	4.04	32.81%
9	36	3.41	12.10%	21	24	3.88	27.55%	33	12	3.88	27.55%
9	39	2.17	-28.67%	21	27	3.24	6.51%	33	15	3.62	19.00%
9	42	2.09	-31.30%	21	30	3.44	13.08%	33	18	4.12	35.44%
9	45	2.25	-26.04%	21	33	4.34	42.67%	33	21	3.73	22.62%
12	6	2.48	-18.47%	21	36	5.12	68.31%	33	24	3.67	20.64%
12	9	2.67	-12.23%	21	39	3.54	16.37%	33	27	3.53	16.04%
12	12	2.82	-7.30%	21	42	3.82	25.58%	33	30	3.48	14.40%
12	15	2.86	-5.98%	21	45	3.77	23.93%	33	33	3.91	28.53%
12	18	2.93	-3.68%	24	6	3.51	15.38%	33	36	4.02	32.15%
12	21	2.88	-5.33%	24	9	3.34	9.80%	33	39	4.11	35.11%
12	24	2.31	-24.06%	24	12	3.22	5.85%	33	42	3.96	30.18%
12	27	2.37	-22.09%	24	15	3.08	1.25%	33	45	3.84	26.23%
12	30	2.51	-17.49%	24	18	3.98	30.83%	36	6	4.18	37.41%
12	33	3.17	4.21%	24	21	4.12	35.44%	36	9	3.91	28.53%
12	36	3.13	2.89%	24	24	3.14	3.22%	36	12	3.76	23.60%
12	39	2.52	-17.16%	24	27	2.98	-2.04%	36	15	3.5	15.06%
12	42	2.58	-15.19%	24	30	3.02	-0.72%	36	18	3.94	29.52%
12	45	2.54	-16.50%	24	33	3.61	18.67%	36	21	4.11	35.11%
15	6	3.23	6.18%	24	36	4.15	36.42%	36	24	3.62	19.00%
15	9	3.34	9.80%	24	39	3.49	14.73%	36	27	3.45	13.41%
15	12	3.42	12.43%	24	42	3.28	7.82%	36	30	3.33	9.47%
15	15	3.34	9.80%	24	45	3.24	6.51%	36	33	3.78	24.26%
15	18	4.5	47.93%	27	6	3.57	17.36%	36	36	4.24	39.38%
15	21	3.23	6.18%	27	9	3.46	13.74%	36	39	3.93	29.19%
15	24	3.21	5.52%	27	12	3.35	10.12%	36	42	3.74	22.95%
15	27	3.2	5.19%	27	15	3.22	5.85%	36	45	3.64	19.66%
15	30	3.11	2.24%	27	18	3.84	26.23%				
15	33	3.93	29.19%	27	21	3.38	11.11%				

Çizelge 4 incelendiğinde en iyi uzaklık değerlerinin $x_1=21\text{mm}$ ve $x_2=21\text{mm}$ olduğu görülmektedir. Bu uzaklık değerleri için 10.5 GHz frekansındaki en yüksek kazanç değerinin 5.14 dBi olduğu ve bu değer referans antenin kazancına göre 68,97% daha yüksek olduğu görülmektedir. Yine bu uzaklık değerlerine göre omega lensleriyle elde edilen yapının 3D kazanç grafiği Şekil 11’de verildiği şekildedir. Ayrıca simülasyon sonuçlarına göre elde edilen referans ve önerilen antenin S11 karşılaştırma grafiği Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 12 incelendiğinde önerilen antenin rezonans frekansında çok az bir kayma ile rezonans frekansı 10.51 GHz olmuş ve bu frekanstaki S11 değeri gelişim sağlayarak 32 dB olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte referans antenin band genişliği 0.85 GHz iken önerilen antenin band genişliği 0.96 GHz’e yükselmiştir.



Şekil 11. Çift lensli anten yapısı 3D kazanç grafiği



Şekil 12. Önerilen ve referans anten S11 grafikleri

4. SONUÇ

Bu çalışmada omega metamateriyal yapısının penta yama antenin (PYA) üzerine etkisi incelenmiştir. Bunun için ilk olarak bir PYA' i elektromanyetik programı yardımıyla tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda anten kazancı bir uydu haberleşme frekansı olan 10.5 GHz için 3.042 dBi olarak elde edilmiştir. Daha sonra bir metamateriyal

yapısı olan omega yapısı tasarlanmış ve belirlenen frekans aralığında elektriksel ve manyetik geçirgenlikleri elde edilmiştir. Bu değerlere göre 10.5 GHz frekansı için omega yapısının kırılım indeksi negatif olarak elde edilmiş ve metamateriyal olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Daha sonra omega metamateriyal yapısıyla bir lens tabakası tasarlanmış ve PYA' i önüne eklenerek simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda 3.97 dBi anten kazancı elde edilerek referans antene göre anten kazancında 30.51% artış elde edilmiştir. Daha sonra ikinci bir lens tabakası yine omega metamateriyal yapısıyla tasarlanarak referans anten önüne 2 tabaka halinde konulmuştur. Burada lens tabakaları arası mesafe ve lens tabakalarının referans antene olan mesafeleri ayarlanarak 100'den fazla simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların sonucuna göre çift lens tabakalı antenin kazancı 5.14 dBi elde edilmiştir. Bu kazanç değeri referans anten kazancına göre 68.97% daha fazladır. Bununla birlikte antenin band genişliği 13% oranında artmıştır. Bu değerlere göre omega metamateriyal yapısının PYA yapısı ile birlikte kullanımında anten kazancında ciddi iyileştirmeler elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Veselago, V.G., "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", Usp. fiz. nauk, Vol. 92, Issue 3, Pages 517-526, 1967.
2. Smith, D.R., Pendry, J.B. and Wiltshire, M.C.K., "Metamaterials and negative refractive index", Science, Vol. 305, Issue 5685, Pages 788-792, 2004.
3. Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J. and Stewart, W. J., "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", IEEE transactions on microwave theory and techniques, Vol. 47, Issue 11, Pages 2075-2084, 1999.
4. Urul, B., "Fraktal yapılar ile yüksek kazançlı yansıtıcı dizi anten tasarımı", International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Vol. 6, Issue 3, Pages 408-415, 2020.
5. Urul, B., "Gain enhancement of microstrip antenna with a novel DNG material", Microwave and Optical Technology Letters", Vol. 62, Issue 4, Pages 1824-1829, 2020.

6. Lanuzza, L., Monorchio, A. and Manara, G., "Synthesis of high-impedance FSSs using genetic algorithms", IEEE Antennas Prop. Soc Int. Symp 4, Pages 364-367, 2002.
7. Yuan, Y., Chan, C. H., Man, K. F. and Luk, K. M., "Metamaterial surface design using the hierarchical genetic algorithm", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 39, Issue 3, Pages 226-230, 2003.
8. Chan, C.H., "Analysis of frequency selective surfaces, Ch. 2, in Frequency selective surface and grid array", Wiley Inter-Science, New York, Pages 27-85, 1995.
9. Manara, G., Monorchio, A. and Mittra, R., "Frequency selective surface design based on genetic algorithm", Electron Lett Vol. 36, Pages 1400 -1401, 1999.
10. Yılmaz M., "Nano Ölçekli Işık Manipülasyonu İçin Optik Nanoantenlerin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, 2022.
11. Alam, M. S., Islam, M. T. and Misran, N., "Electromagnetic Band Gap Structure for Microstrip Antenna Gain Enhancement at WLAN Band", IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), Pages 1-4, 2020.
12. Tian, J., Cao, W., "Reconfigurable flexible metasurfaces: from fundamentals towards biomedical applications", Photonix , Vol 5, Issue 2, 2024.
13. Khan, O. M., Islam, Z. U., Rashid, I., Bhatti, F. A. and Islam, Q. U., "Novel miniaturized Koch pentagonal fractal antenna for multiband wireless applications", Progress in Electromagnetics Research, Vol. 141, Pages 693-710, 2013.
14. Yu, Z.W., Wang, G.M., Gao, X.J. and Lu, K., "A novel small-size single patch microstrip antenna based on Koch and Sierpinski fractal-shapes", Progress in Electromagnetics Research Letters, Vol. 17, Pages 95-103, 2010.
15. Li, D. and Mao, J.F., "Koch-like sided Sierpinski gasket multifractal dipole antenna", Progress in Electromagnetics Research, Vol. 126, Pages 399-427, 2012.
16. Ramya, S. and Rao, I. S., "A compact ultra-thin ultra-wideband microwave metamaterial absorber", Microwave and Optical Technology Letters, Vol 59, Issue 8, Pages 1837-1845, 2017.
17. Wu, W., Yuan, B., Guan, B. and Xiang, T., "A bandwidth enhancement for metamaterial microstrip antenna", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 59, Issue 12, Pages 3076-3082, 2017.
18. Tutuncu, B., Torpi, H. and İmeci, S. T., "Directivity improvement of microstrip antenna by inverse refraction metamaterial", Journal of Engineering Research, Vol. 7, Issue 4, Pages 151-164, 2019.
19. Shi, Y., Hao, T., Li, L. and Liang, C.H., "An improved NRW method to extract electromagnetic parameters of metamaterials", Microwave Optical Technology Letters, Vol. 58, Issue 3, Pages 647-652, 2016.
20. Shi, Y., Li, Z.Y., Li, L. and Liang, C.H., "An electromagnetic parameters extraction method for metamaterials based on phase unwrapping technique", Waves Random Complex Medium, Vol. 26, Issue 4, Pages 417-433, 2016.
21. Hu, D., Zhao, R., Du, L. and Wang, Y., "Design, simulation and measurement of an omega metamaterial at X band", In 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP, IEEE, Pages 1-3, 2017.