

BHR Metamateryal Lens Tasarımı

Bilal TÜTÜNCÜ^{1*}

Bülent URUL²

ÖZET: Bu çalışmada Ku band mikroşerit yama anten yönlendirici kazanç iyileştirmesi için Bölünmüş Halka Rezonatör (BHR) metamateryal (MM) lens kullanımı gösterildi. Ku bandında odaklama elde edebilmek için aynı bantta negatif kırılma indisli bir BHR metamateryal lens tasarlanıp referans antenin ışınma doğrultusunda yarım dalga boyu uzaklığına yerleştirilerek benzetim ve ölçüm sonuçları ayrı ayrı elde edildi. Bu şekilde referans antenin yönlendirici kazancında ölçüm sonuçlarına göre 1.52 dBi'lık bir artış olduğu tespit edildi. Bu çalışmada, alt tabaka ve üst tabaka için aynı dielektrik malzemeler kullanılmış ve böylece MM lens tabakasının kazanç artırımına yararlı etkisi daha net olarak gösterilmiştir. Ayrıca düşük anten boyutu için MM lens katmanının toplam boyutu, referans antenin yama boyutuyla hemen hemen aynıdır. Bu çalışmayı literatürdeki benzer diğer çalışmalardan avantajlı kılan bir diğer husus, daha az sayıda metamateryal birim hücreden oluşan lens katmanı kullanılmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Metamateryal, BHR, Mikroşerit anten, Anten yönlendirici kazancı

SRR Metamaterial Lens Design

ABSTRACT: In this study, the use of Split Ring Resonator SRR metamaterial (MM) lens for Ku band micro-strip patch antenna directivity gain improvement is shown. In order to obtain the focus in the Ku band, a SRR metamaterial lens with a negative refractive index in the same band is designed and placed in the half-wavelength distance of the reference antenna in the radial direction, and the simulation and measurement results are obtained separately. Thus, a 1.52 dBi increase in the directivity gain of the reference antenna is shown according to measurement results. In this study, the same dielectric materials are used for the substrate and superstrate, so that the beneficial effect of the lens layer on the directivity gain improvement is shown more clearly. Moreover, for the low antenna profile, the total size of the MM lens layer is almost the same as the patch size of the reference antenna. Another advantage of this study over other similar studies in the literature is the use of a lens layer consisting of a smaller number of metamaterial unit cells.

Keywords: Metamaterial, SRR, Microstrip antenna, Antenna directivity gain

¹ Bilal TÜTÜNCÜ (Orcid ID: 0000-0002-7439-268X), İstanbul İl Sağlık Müdürlüğü, İstanbul, Türkiye

² Bülent URUL (Orcid ID: 0000-0003-2656-2450), Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Isparta, Türkiye

*Sorumlu yazar/Corresponding Author: Bilal TÜTÜNCÜ, e-mail: bilal1334@gmail.com

* Bu çalışma Bilal TÜTÜNCÜ'nün Doktora tezinin bir bölümüdür.

GİRİŞ

İlk olarak eşzamanlı negatif ϵ ve negatif μ 'nn bir malzemede bulunma olasılığı Rus bilim adamı Vesalago tarafından teorik olarak 1967'de ortaya atılmıştır (Veselago, 1968). Fakat bu fikir gizli bir define gibi yaklaşık kırk yıl sadece bir hayal olarak kalmıştır. 90'lı yıllarda Pendry ve arkadaşları tarafından negatif dielektrik geçirgenliğin ince metal tellerle (Pendry ve ark.,1996), negatif manyetik geçirgenliğin ise Bölünmüş Halka Rezonatör (BHR-SRR) adı verilen bir yapı ile suni olarak mümkün olduğu gösterilmiştir (Pendry ve ark.,1999).

2000 yılında D. R. Smith, Pendry'nin yaptığı çalışmalardan esinlenerek, daha önce Pendry tarafından gerçeklenmiş olan ince metaller ve dairesel halka rezonatörler ile elde ettiği yapıları tek boyutlu birleştirmiştir. Smith bu çalışmada çembersel halka rezonatörlerinin önüne ince metaller yerleştirmiş ve daha sonra bu yapıyı boyutlandırarak eř zamanlı bir şekilde belirli frekans aralıklarında negatif dielektrik sabiti ve negatif manyetik geçirgenliğin sağlanabileceğini söylemiştir (Smith, 2000). Shelby ve arkadaşları 2001 yılında, iki boyutlu olarak metamateryal (MM) yapısını ortaya çıkarılmıştır ve negatif $-\epsilon$ ve negatif $-\mu$ olayını yani negatif kırılmayı deneysel olarak ta kanıtlamıştır (Shelby, 2001). Daha sonraki yıllarda MM'lerin bu sıra dışı özelliklerinden faydalanılarak birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. MM'lerin geometrik olarak ölçeklendirilebilir olması geniş bir çalışma frekans aralığı da sunmaktadır, bundan dolayı çok geniş bir alanda çok farklı boyutlardaki yapılarla çalışmalar süregelmiştir (Bilal ve ark., 2018, Cui, 2010).

Bu alışmada MM'lerin odaklama özelliğinin Mikroşerit Yama Anteninin (MYA) yönlendirici kazancını artırmadaki etkisini inceledik. Bilindiği üzere elektromanyetik dalgalar yayılarak ilerlemekte ve bu olay dalganın alınmasında kazanç kaybına yol

açmaktadır. Elektromanyetik dalga yayılarak ilerlemek yerine, odaklanarak iletirse dalganın yönlülük noktasında artış sağlanacak ve dolayısıyla bu şekilde kazanç yönlülüğe bağlı olarak artacaktır. Bu çalışmada ise Ku bant (12GHz) için tasarladığımız referans MYA nın yönlendirici kazancını artırmak için yine Ku bantta MM karakteristiği gösterecek şekilde ayarlanan birim hücre BHR MM yapısı periyodik bir düz katman haline dönüştürülerek kullanıldı. Bu çalışmada daha önceki çalışmamıza (Bilal ve ark., 2018) ek olarak BHR lens katmanının iki kat olarak kullanımının etkisi, birim hücrelerin lens katmanı üzerindeki dağılım kombinasyonunun ayarlanması, lens katmanının referans MYA e optimum uzaklığının tesbiti ve BHR lens katmanının farklı aırlarla kullanımının benzetim ve ölçüm sonuçları ayrı ayrı gösterilmiştir.

Benzetim ve modellemeler CST programında, fabrikasyon ve ölçümler ise yıldız teknik niversitesi RF ve Mikrodalga laboratuvarında gerçekleştirildi. Referans anten yönlendirici kazancında ölçüm sonuçlarına göre 1.52 dB'lik bir artış gözlendi ve ayrıca Yarı Huzme Bant Genişliğinde (YHGB) ise 21° derecelik bir daralma tespit edildi.

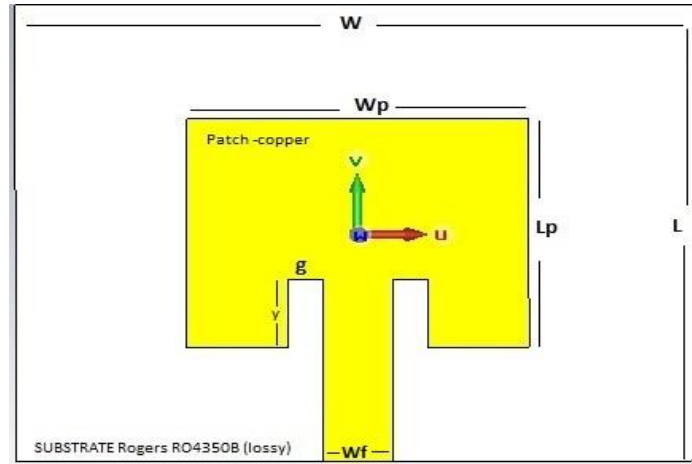
MATERYAL VE YÖNTEM

Ku Band Referans MYA Tasarım ve lmleri

MYA'ların rezonans frekanslarının ayarlanması için literatürde sunulan birçok çalışma ve algoritma vardır. Biz bu çalışmada klasik formülleri tercih ederek (Balanis, 2011) CST'de birçok deney ile sonuca ulaştık. Dielektrik alttaş olarak, Rogers RO4350B (www.rogerscorp.com) tercih edildi. Bağlı dielektrik sabiti $\epsilon_r=3.48$, kayıp tanjantı ($\tan\delta$) $=0.0037$ ve kalınlığı $h=0.762$ mm'dir. Alttaş kalınlığı $h = 0.762$ mm ve rezonans frekansı $f_r = 12$ GHz için; yama genişliği $W_p= 8.35$ mm ve yama uzunluğu $L_p= 6.38$ mm olarak hesaplandı. Alttaş dielektrik tabakanın genişliği $W=2.W_p$ ve

uzunluğu $L=2.L_p$ olarak alındı. Besleme hattı genişliği "wf" ise giriş empedans değerini yaklaşık olarak 50Ω 'a ayarlamak için CST programının "makrolar" menüsündeki "empedans hesapla" özelliği ile 1.7 mm olarak hesaplandı. MYA empedans eşleştirmesi için iki paralel yarık metodu kullanıldı ve bu yarık

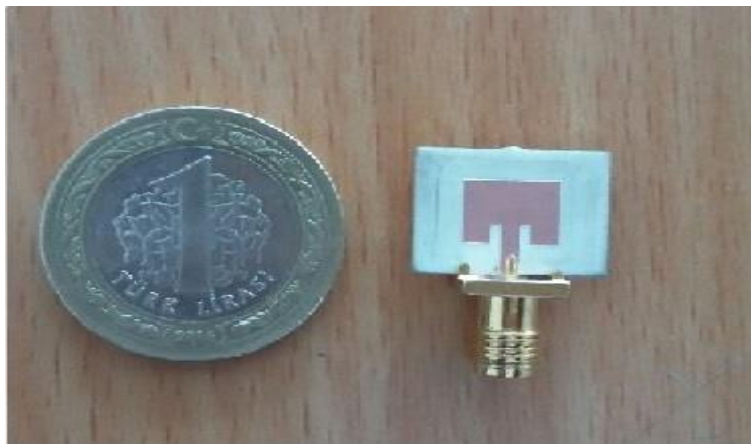
uzunluğu $y= 1.91$ mm olarak hesaplandı ve paralel yarık boşluğu g ise, wf'nin yarısı olarak alındı ($g = wf / 2 = 0.85$ mm) (Balanis, 2011). Referans MYA anten şekli şekil 1'de gösterilmektedir. Referans MYA'yı uyarmak için besleme hattının hemen altına yerleştirilen bir dalga kılavuzu portu kullanılmıştır.



Şekil 1. Referans MYA modeli

CST'de modellenmesi yapılan ve iletim bandı Ku bant için ayarlanan MYA elde edilen ölçülerde baskı devre tekniği kullanılarak Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Bölümü RF ve Mikrodalga Laboratuvarında retildi (Şekil 2). Baskı devre makinası olarak LPKF ProtoMat S103 kullanıldı. Uyarım portu

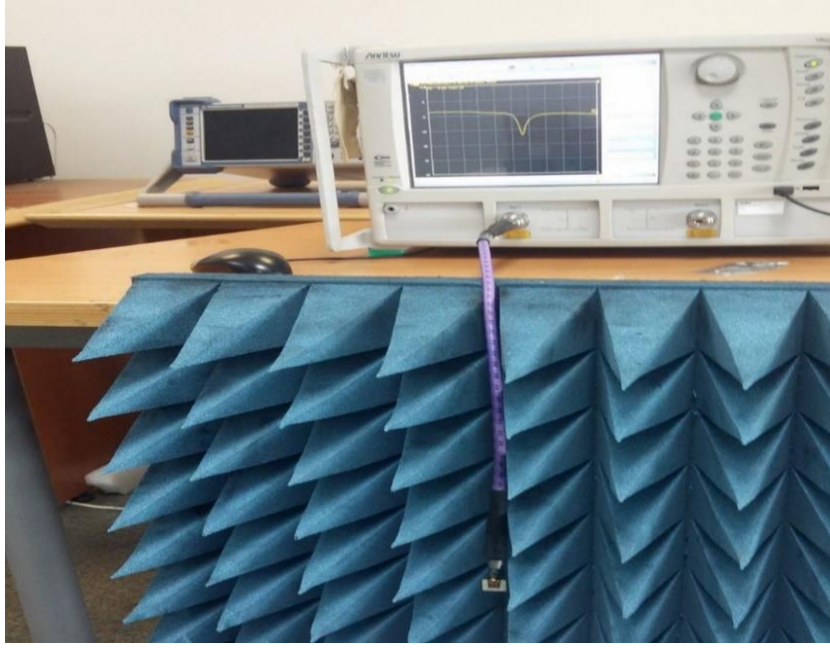
olarak SMA (SubMiniature version A) konektör kullanıldı. SMA konektörler, yarı hassas eř eksenli RF konektrleridir ve vidalı kuplaj mekanizmasına sahip eř-eksenli kablo için minimal bir konektör arabirimi olarak geliştirilmiştir.



Şekil 2. MYA prototipi (Bilal ve ark.,2018)

Laboratuvar ölçümleri ise RF ve Mikrodalga Laboratuvarında iki eř horn anten (A-INFO LB-8180- NF) ve 10 MHz ile 40 GHz arası ölçüm yapabilen Anritsu MS4644A vektör

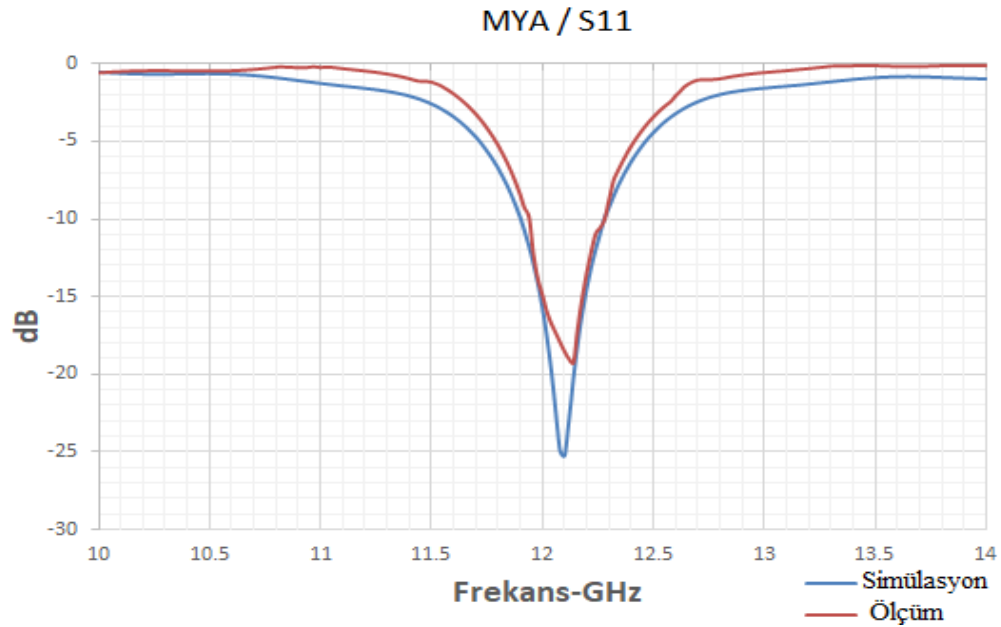
network analizör kullanılarak gerçekleştirildi. S11 için ölçüm düzeneği şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. MYA için ölçüm düzeneği

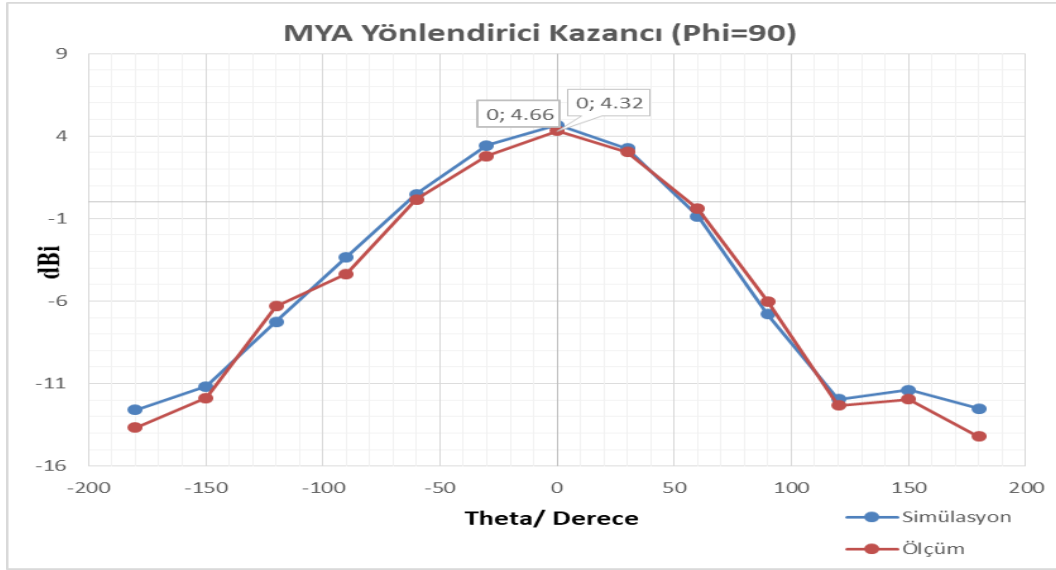
S11 geri dönüş kaybı eğrisi Şekil 4'te gösterildiği gibi benzetim ve ölçüm değerleri ayrı ayrı elde edilerek çizdirildi. lm

sonuçları benzetim sonuçlarından biraz farklıdır. Bu farkın ortam kaybı ve imalat hatalarına bağlı olduğu tahmin edilmektedir.

Şekil 4. Referans MYA S₁₁ eğrisi

Daha sonra MYA'nın 12 GHz'de uzak alan yönlendirici kazanç örüntüsü benzetim ve ölçüm

olarak ayrı ayrı elde edilip ortak bir grafikte Şekil 5.'te görüldüğü gibi çizdirildi.

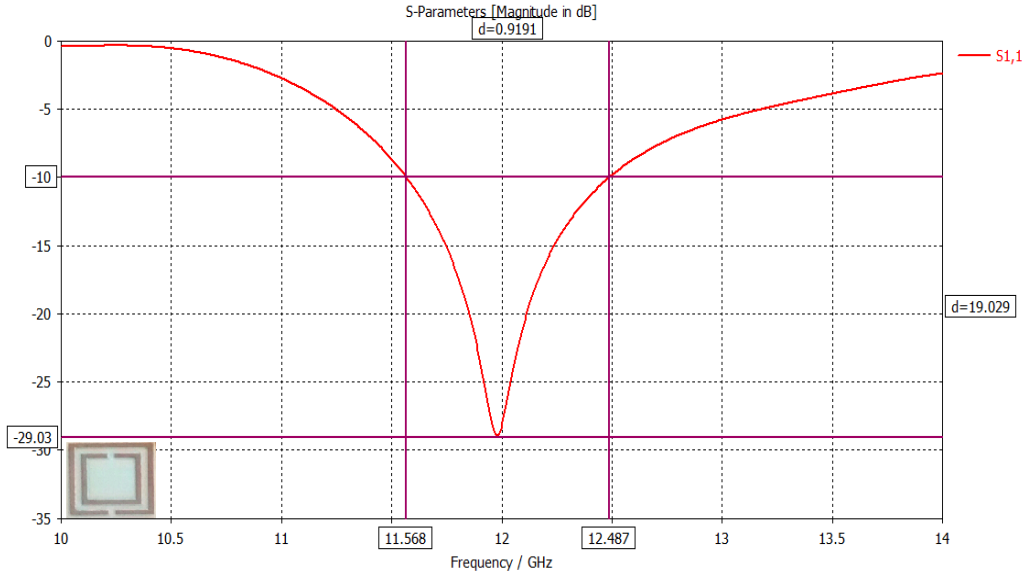
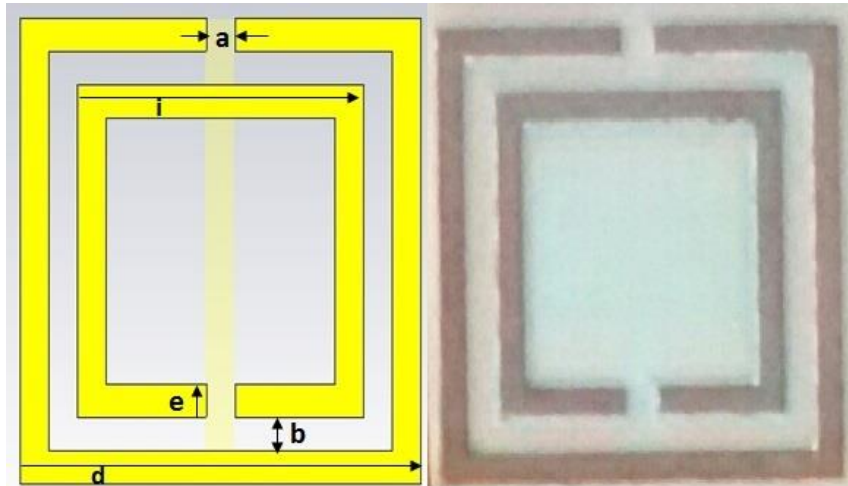


Şekil 5. Referans MYA'nın uzak alan yönlendirici kazanç örüntüsü (12 GHz)

Ku Band Birim Hücre BHR Tasarım ve Optimizasyonu

Bölünmüş Halka Rezonatör (BHR) yapıları güçlü manyetik rezonatörlerdir ve uyarılan elektromanyetik dalganın belirli bant genişliklerinde hem elektriksel hem de manyetik tepki verirler (Seetharaman ve ark., 2017). Bu yapının ön yüzünde, negatif μ elde etmek için birbirine simetrik boşluklar olan iki adet iç içe geçmiş kare halka vardır ve arka tarafta ise negatif ϵ elde etmek için bir bakır şerit bulunur. Bu yapıların manyetik rezonans karakteristikleri çok dar bantta geçerlidir ve ancak uygun polarizasyon ile uyarıldıklarında gelen dalganın manyetik bileşenine cevap vermektedirler. Ayrıca, periyodik olarak düzenlenmiş BHR dizisinin, BHR birim hücre yapısının manyetik rezonans frekansına (ω_m) yakın frekanslar için negatif manyetik geçirgenliği ($-\mu$) sergilediği gösterilmiştir. BHR'lerin manyetik ve elektriksel rezonanslarını inceleyen literatürde çeşitli analitik modeller bulunmaktadır. Tek bir BHR'yi bir L-C devresi sistemi olarak modellemek mümkündür. BHR sisteminin toplam kapasitansı esasen iki temel unsurdan kaynaklıdır; biri, yarıklar ve diğeri konsantrik halkalar arasındaki boşluklar. Endüktans ise iletken halkalar ve iç ve dış halkalar arasındaki boşluktan kaynaklanır

Bu çalışmada lens olarak kullanılacak BHR yapının fabrikasyonundan önce istenilen frekans bandında MM karakteristiğine ölçeklendirilmesi önem arz etmektedir. Çünkü MM'lerin ortam parametreleri frekansa göre değiştiğinden hangi frekans aralığında MM özellik gösterdiğinin tespiti için birçok deneme gereklidir ve bu denemelerin yapının fiziksel baskısı yapılarak gerçekleştirilmesi çok zor ve maliyetli olacağından bunun bir benzetim ve modelleme programı ile önceden yapılması gerekir. Modelleme, ölçeklendirme ve benzetim CST programı ile yapıldı. Benzetimin kurulumu, Z-ekseninde yayılım yapan bir dalga kılavuzu ortamında yerleştirilen materyale benzer şekildedir. Programın sınır koşulları ayarları X-ekseni boyunca mükemmel elektrik iletken (PEC) sınırı ve Y-ekseni boyunca mükemmel manyetik iletken (PMC) sınırı olacak şekilde ayarlandı. Bu sınır şartları nedeniyle malzemeye TEM dalgası uyarılmış oldu. Daha sonra BHR birim hücrenin S_{11} grafiği çizdirildi. Şekil 6'da görüldüğü gibi iletim bandı 11.568 MHz ile 12.487 GHz arasındadır. BHR birim hücrenin şekli ve prototipi ise Şekil 7'de görülmektedir. Burada $a=0.4$ mm, $b=0.3$ mm, $d=5.4$ mm, $e=0.4$ mm ve $i=4$ mm'dir. Yapının sırt tarafındaki iletken şeridin uzunluğu 5.6 mm ve genişliği ise 0.4 mm olarak alındı.

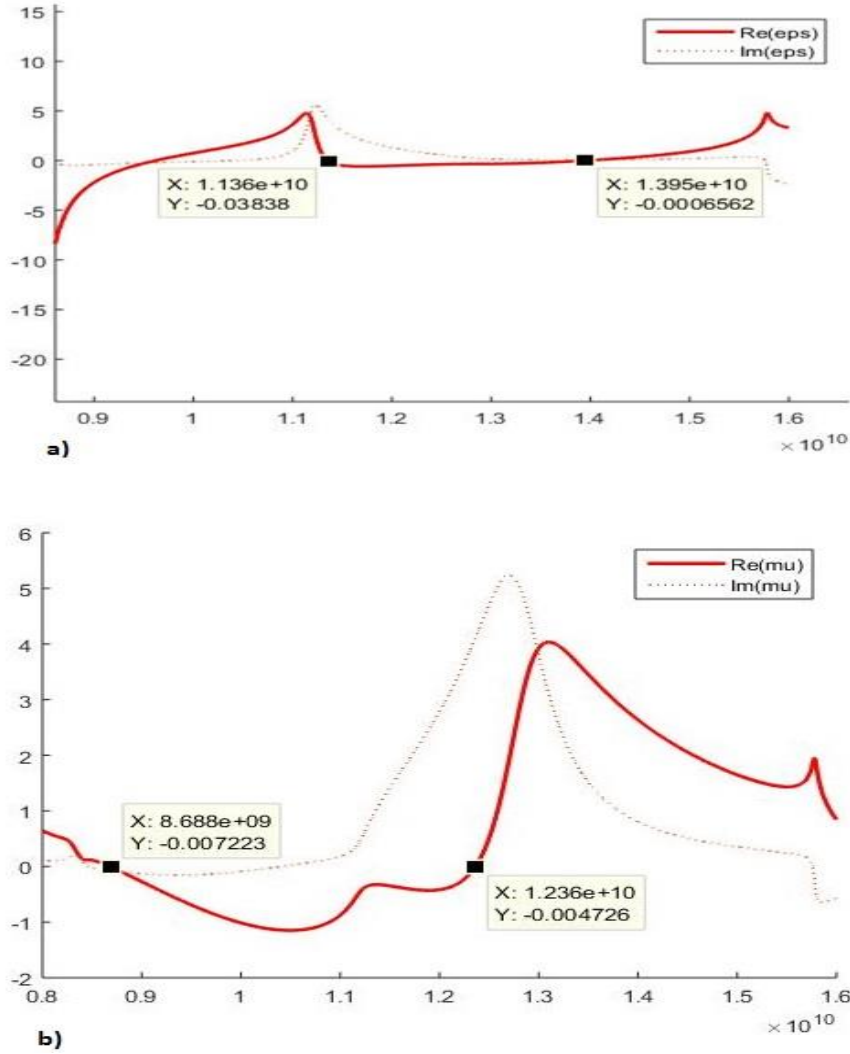
Şekil 6. BHR yapının S_{11} grafiği

Şekil 7. BHR birim hücrenin Şekli ve prototipi (Bilal ve ark., 2018)

Birim Hücrenin Ortam Parametrelerinin Elde Edilmesi

Ortam parametrelerini (ϵ ve μ) hesaplamada bugüne kadar bilinen yöntemler, bir MM birim hücre katmanına uygulanan dalganın “s” sağılma parametrelerinden hesaplanan kırılma indisi “n” ve ortam empedansı “z”i kullanır. Sağılma parametrelerinden ortam parametrelerini (ϵ ve μ) elde etmek için Nicholson-Ross-Weir (NRW) (Shi ve ark., 2016) ve Robust Metodu (Shi ve

ark., 2016) gibi birkaç farklı yöntem vardır. Bu çalışmada daha hızlı olmasa da daha güvenilir olmasından dolayı Robust Metodunu tercih ettik (Tütüncü ve Torpi, 2017) ve bu metotta verilen formüller vasıtasıyla sonuçları MATLAB’da izdirdik. Şekil 8’de BHR birim hücrenin ortam parametreleri ayrı ayrı verildi. Görüldüğü gibi 12 GHz’de hem ϵ ve hem de μ negatiftir dolayısıyla bu frekansta MM karakteristiği gösterdiği görülmektedir.



Şekil 8. BHR yapının a) ϵ , b) μ grafiği

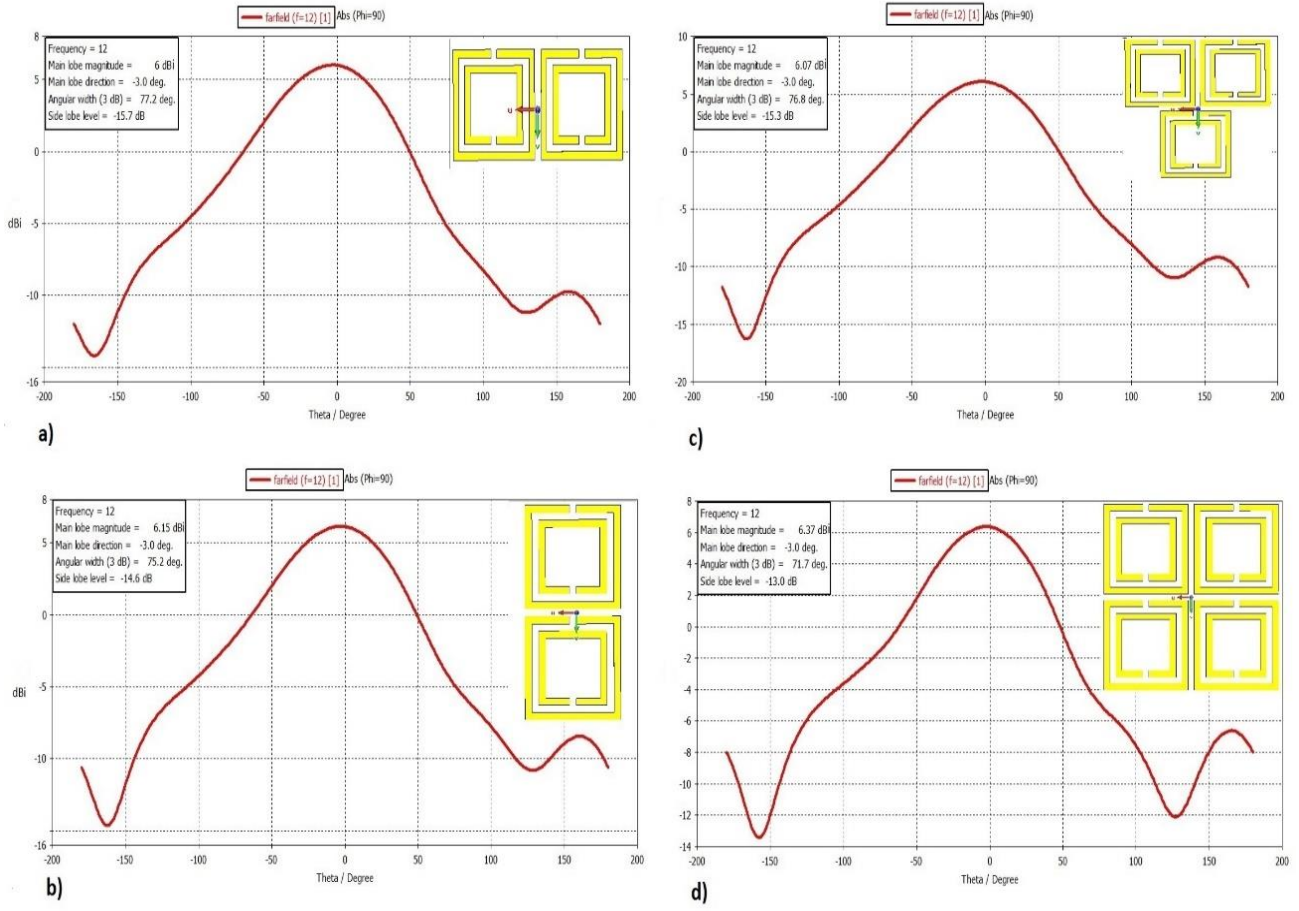
BULGULAR VE TARTIŞMA

BHR Yapının Lens Katmanı Olarak Tasarım ve Kullanımı

BHR' periyodik yapıya dönüştürürken kullanacağımız lens katman boyutunun MYA'nın zemin plaka boyutu ile yama boyutları arasında kalmasına dikkat edildi ve böylelikle birim hücre sayısını belirli sınırlarda tuttuk. Bu koşullarda birim hücre sayısı için ihtimaller 2,3 ve 4'dr. Bununla beraber MM'lerin lens katmanı üzerinde dağılım kombinasyonu da ayrı bir etkindir. Tüm bu olası durumlar BHR yapıda denenip en optimum sonuç elde edildi. Referans MYA ile lens katmanı arası mesafe yarım dalga boyu $\lambda_0/2 = 12.5$ mm alınıp birim hücre sayısı ve dağılımını 4 farklı durum için tek katman

kullanılarak CST'de analiz edildi ve sonuçlar Şekil 9 ve Çizelge 1'de verildi. En uygun sonuç 4 adet birim hücrenin 2x2 şeklinde dağılımıyla elde edildiği görülmektedir. Ayrıca yönlülüğün arttığına bir kanıt yarı huzme bant genişliğinin (YHBG) daralmasıdır. Çizelge 1'de de görüldüğü gibi en dar YHBG 71.7° aı ile yine 2x2 dağılımındadır.

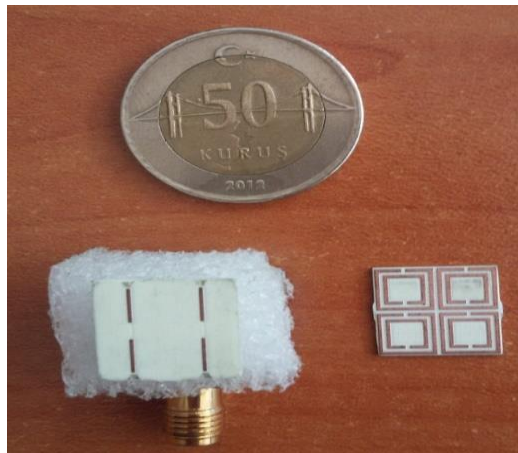
Bu sonuçlardan yola çıkararak tasarladığımız Ku band referans MYA için lens katmanında en uygun birim hücre MM dağılımının 2x2 olduğu görüldü. Dolayısıyla kullanacağımız 5 farklı MM lens katmanlarının üretimi de bu dağılıma göre yapıldı. retimler baskı devre tekniği kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 10) ve baskı devre makinası olarak LPKF ProtoMat S103 kullanıldı.



Şekil 9. BHR birim hücre dağılımına göre MYA ışınma örüntüleri

Çizelge 1. BHR birim hücre dağılımının MYA yönlendirici kazancına etkisi

BHR dağılımı	MYA Yönlendirici kazancı	Ana Lob Açısı	YHBG
1x1 X- düzlemi	6 dBi	-3°	77.2°
1x1 Y- düzlemi	6.15 dBi	-3°	75.2°
2x1	6.07 dBi	-3°	76.8°
2x2	6.37 dBi	-3°	71.7°



Şekil 10. BHR lens katmanının önden ve arkadan görünümü

Lens Katmanının Referans MYA ya Optimum Uzaklığının Tespiti

Kullanılacak BHR lens katmanının referans antene uzaklığı çeyrek dalga boyu $\lambda_0/4=6.25$ mm, yarım dalga boyu $\lambda_0/2=12.5$ mm, tam dalga boyu $\lambda_0=25$ mm ve 1.5 dalga

boyu $1.5*\lambda_0=37.5$ mm olmak üzere dört farklı durum için analiz edildi ve benzetim sonuçları izelge 2'de karşılaştırmalı olarak verildi. Yönlendirici kazancının iyileştirilmesinde en optimum sonucun yarım dalga boyu ($\lambda_0/2=12.5$ mm) mesafede olduğu görülmektedir.

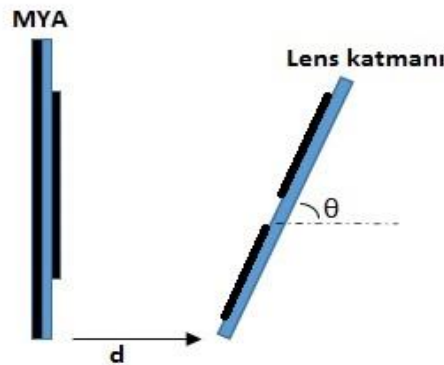
Çizelge 2. BHR Lens katmanının MYA ya uzaklığının etkisi

Uzaklık	MYA Yönlendirici kazancı	Ana Huzme Aı	YHBG
$\lambda_0/4$	5.66 dBi	-6°	70.1°
$\lambda_0/2$	6.37 dBi	-3°	71.7°
λ_0	5.94 dBi	-2°	64.3°
$1.5*\lambda_0$	5.92 dBi	-2°	61.9°

BHR Lens Katmanının Farklı Aılarla Kullanımı

Şekil 11'de gözüken ölçüm düzeneğinde $d= \lambda_0/2=12.5$ mm'de sabit tutularak lens katmanının merkez noktasının gelen dalga ile

yatayda yaptığı 4 farklı aı (θ) için 12 GHz'de işıma örüntüleri elde edildi ve izelge 3'de grldğu gibi en optimum değer yine 6.36 dBi ile $\theta=90^\circ$ de olduğu görüldü. Ayrıca YHBG için en uygun değer 71.7° ile yine $\theta=90^\circ$ 'dedir.



Şekil 11. BHR lens katmanının açıya göre ölçüm düzeneği

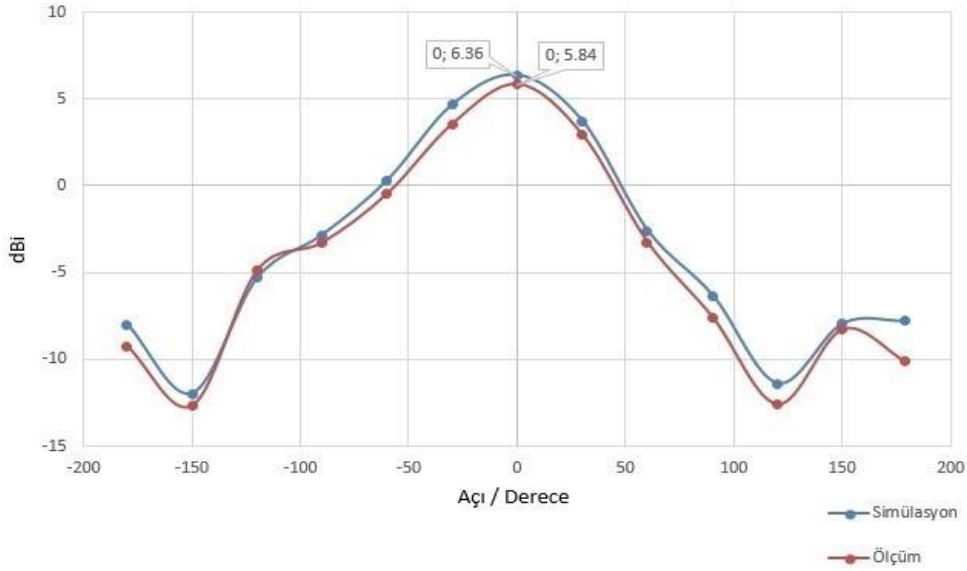
Çizelge 3. MYA+BHR lens katmanının gelen dalga ile yaptığı 4 farklı aı için sonuçlar

d-uzaklık	Yatay düzlemde yaptığı açı- θ	MYA+BHR Yönlendirici kazancı tepe değer	YHBG
$\lambda_0/2=12.5$ mm	0°	4.96 dBi	87.1°
$\lambda_0/2=12.5$ mm	30°	5.55 dBi	82.8°
$\lambda_0/2=12.5$ mm	60°	5.97 dBi	77.4°
$\lambda_0/2=12.5$ mm	90°	6.36 dBi	71.7°

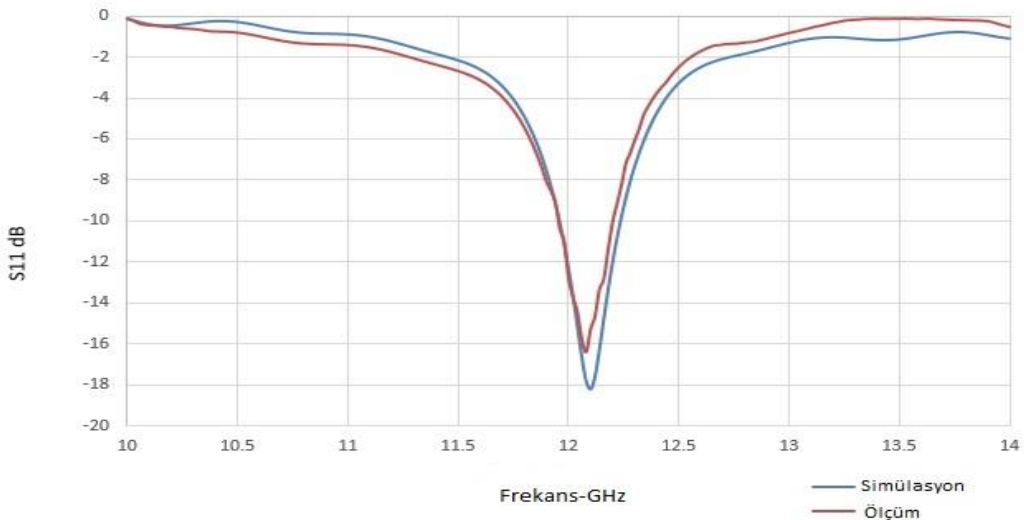
Optimum Değerler İçin BHR Lens Katmanı Benzetim ve limleri

CST programında benzetimler ile elde edilen bu optimum değerler baz alınarak laboratuvar ortamında limler yapıldı. lm için iki eę horn anten (A-INFO LB-8180- NF) ve 10 MHz ile 40 GHz arası ölçüm yapabilen Anritsu MS4644A vektör network analizör kullanıldı. 12 GHz'de yönlendirici kazanç ışıma rnts Şekil 12'de görüldüğü gibi benzetim ve ölçüm sonuçlarına göre çizdirildi ve Şekil 13'de ise S_{11} eğrisi verildi. Çizelge 4'de ise BHR lens

katmanını kullanarak elde edilen sonuçlar ile daha önce lens katmanını kullanmadan MYA ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verildi. Yönlendirici kazancında iyileşme görüldüğü gibi bant genişliğinde ise beklendiği gibi düşme olmuştur. Aynı zamanda YHBG deki daralma yönlendirici kazancındaki iyileşmenin de bir kanıtıdır. lm sonuçları benzetim sonuçlarından azda olsa biraz farklıdır. Bu farkın ortam kaybı ve imalat hatalarına bağlı olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 12. MYA+ BHR lens katmanının $\lambda/2=12.5$ mm ve $\theta=90^\circ$ için 12 GHz'de ışıma rntleri



Şekil 13. MYA+ BHR lens katmanının S_{11} eğrisi

Çizelge 4. MYA nın yönlendirici kazancı, YHBG ve bant genişliğindeki değişimi

	İsim	Yönlendirici Kazancı (dBi)	Bant Genişliği MHz	YHBG
MYA	Benzetim	4.66	340	93 °
	lçm	4.32	320	
MYA+BHR	Benzetim	6.36	260	72 °
	lçm	5.84	240	
Değişim	Benzetim	+1.7 dB	-80	-21
	ölçüm	+1.52 dB	-80	

İki Kat BHR Lens Katmanı Kullanımı

Bu bölümde, referans antene en optimum uzaklık yarım dalga boyu $\lambda_0/2=12.5$ mm ve en uygun birim hücre dağılımı ise 2x2 olarak tespit edilen lens katmanının iki kat olarak kullanmanın etkisini inceledik. İkinci lens katmanı, birinci katmana sırasıyla; $\lambda_0/4=6.25$ mm, $\lambda_0/2=12.5$ mm, $\lambda_0=25$ mm uzaklığa yerleştirilip üç ayrı durum için ölçüm ve benzetim sonuçları elde edildi. Çizelge 5’de

yönlendirici kazançlarının tepe değerleri karşılaştırılmalı olarak verildi ve görüldüğü gibi ikinci katmanın birinci katmana en uygun mesafesi çeyrek dalga boyundadır ($\lambda_0/4=6$ mm). MYA nın yönlendirici kazancı iki veya daha fazla lens tabakası kullanarak daha da artırılabilceği görülmektedir, ancak bu durumda anten sisteminin boyutu artacağından bu durum istenmemektedir.

Çizelge 5. İki katman BHR lens kullanım sonuçları

d_1 MYA ile ilk lens katmanı arası uzaklık	d_2 İki lens katmanı arası uzaklık	MYA+2 tane BHR lens	
		Yönlendirici kazancı tepe değeri Benzetim	lçm
$\lambda_0/2=12.5$ mm	$\lambda_0=25$ mm	6.85 dBi	6.32 dBi
$\lambda_0/2=12.5$ mm	$\lambda_0/2=12.5$ mm	6.64 dBi	6.08 dBi
$\lambda_0/2=12.5$ mm	$\lambda_0/4=\sim 6$ mm	7.68 dBi	7.42 dBi

SONUÇ

Bu çalışmanın amacı, metamateryal olgusunu, mikrodalga frekanslarındaki mikroşerit anten uygulamaları ile anlamaktır. Nümerik yöntemler kullanılarak BHR MM’in 12 GHz’de negatif manyetik geçirgenlik ve negatif dielektrik sabitinin doğrulanması gerçekteştirildi. Bu her iki parametrenin aynı frekansta negatif olmasıyla gerçekteşen odaklama olayı aynı rezonans frekansındaki mikroşerit antenin yönlendirici kazancını artırarak doğrulandı. Bunun için ilk olarak bir Ku band MYA tasarlanıp aynı bantta MM karakteristiği gösterecek şekilde bir BHR birim hücre yapısı modellendi. MM yapı CST Studio’da tasarlanıp

parametre tarayıcı kullanılarak Ku band için en ideal birim hücre yapı elde edilmeye çalışıldı ve S_{11} eğrisi çizdirildi. Daha sonra bu BHR birim hücre periyodik yapıya dönüştürüldü ve kullanacağımız lens katman boyutunun MYA nın zemin plaka boyutu ile yama boyutları arasında kalmasına dikkat edildi ve böylelikle birim hücre sayısı belirli sınırlarda tutuldu. Ayrıca referans antene olan uzaklık ve gelen dalganın lens katmanı ile yaptığı açıda bu şekilde BHR yapı için denenip elde edilen sonuçlar tablo halinde verildi. Ölçüm sonuçlarına göre en yüksek kazanç artımı (+3.1 dB) referans antene yarım dalga boyu uzaklıkta iki kat BHR lens katmanı kullanarak gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Balanis CA, 2011. Modern Antenna Handbook, John Wiley & Sons publication, Newyork-A.B.D.
- Cui TJ, 2010. Metamaterials, Springer, Boston-A.B.D.
- Pendry JB, Holden AJ, Robbins D J, 1996. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. Physical Review Letters, 76 (25): 4773-4776.
- Pendry JB, Holden AJ, Robbins DJ, 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47(11): 2075-2084.
- Seetharaman S, King G, Hooper IR, Barnes WL, 2017. Electromagnetic interactions in a pair of coupled split-ring resonators. Physical Review B, 96 (8): 1-8.
- Shelby RA, 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. Science, 292 (5514): 77-79.
- Shi Y, Hao T, Li L, Liang CH, 2016. An improved NRW method to extract electromagnetic parameters of metamaterials. Microwave Optical Technology Letters, 58 (3): 647-652.
- Shi Y, Li Z-Y, Li L, Liang C-H, 2016. An electromagnetic parameters extraction method for metamaterials based on phase unwrapping technique. Waves Random Complex Medium, 26 (4): 417-433.
- Smith DR, 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Physical Review Letters, 84 (18): 4184-4187.
- Ttnc B, Torpi H, Urul B, 2018. A comparative study on different types of metamaterials for enhancement of microstrip patch antenna directivity at the Ku-band (12 GHz). Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 26 (3): 1171-1179.
- Ttnc B, Torpi H, 2017. Omega-shaped metamaterial lens design for microstrip patch antenna performance optimization at 12 GHz. 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 1-2 Aralık 2017, Bursa
- Veselago VG, 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . Soviet physics uspekhi, 10 (4): 509-514.