

## Dairesel Balıkağı Metamalzemeler için Parametre Değişim Analizleri

Yusuf ÖZTÜRK\*, Asım Egemen YILMAZ  
Ankara Üniversitesi  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Ankara  
\*TÜBİTAK-ULAKBİM  
Ankara

[yusuf.ozturk@tubitak.gov.tr](mailto:yusuf.ozturk@tubitak.gov.tr), [ayilmaz@eng.ankara.edu.tr](mailto:ayilmaz@eng.ankara.edu.tr)

**Özet:** Bu çalışmada, dairesel balıkağı metamalzemeler (DB-MM) için serbest ortamda değişim parametreleri incelenmektedir. Değişim parametreleri olarak boşlukların birim hücre boyutuna oranı, kayıp-tanjant değeri, dielektrik tabaka kalınlığı ve dönme açısı seçilmiştir. Bu kapsamda benzetim sonuçları ve teorik açıklamalara ayrıntılı biçimde yer verilmektedir.

**Abstract:** In this study, the circular type fishnet metamaterials (CF-MM) are analyzed in accordance with parameter change in free space. As design parameters; aperture ratio, loss-tangent value, dielectric substrate thickness and rotate angle are chosen. In this context, the simulation results and theoretical explanations are given in detail.

### 1. GİRİŞ

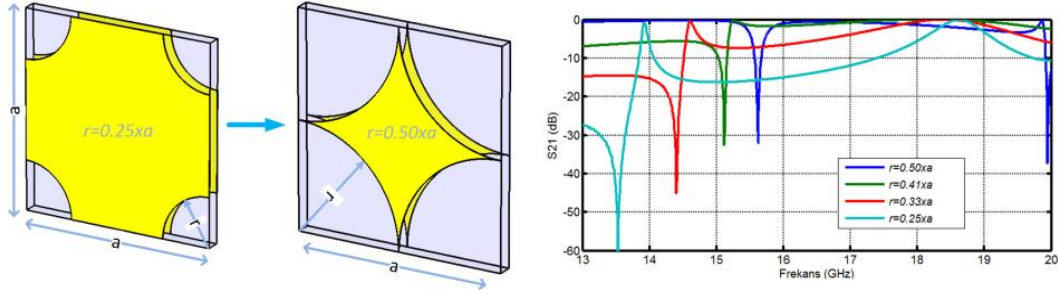
Elektromanyetik spektrumda; ışığın bir elektromanyetik dalga olarak davranışını betimleyen dalga vektörü  $\mathbf{k}$  ve kırılma indisi (refractive index)  $n$  değeri elektriksel geçirgenlik (elektriksel permittivite)  $\epsilon$  ve manyetik geçirgenlik (permeability)  $\mu$  parametreleriyle ile belirlenmektedir. Solak malzeme davranışının kavramsal temelini  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  ve  $\vec{k}$  vektör üçlüsünün  $\epsilon$  ve  $\mu$  ye göre değişimi oluşturmaktadır.  $\epsilon$  ve  $\mu$ 'den her ikisi de pozitif işaretliyse sağlak malzeme (right-handed), her ikisi negatif işaretli olması durumundaysa metamalzeme veya solak malzeme (left-handed) karakteristiği elde edilir. Yarık-halka rezonatörlerinin [1] teorik gösterimini takiben manyetik olmayan SRR'lar ve paralel tellerle tasarlanan bu kompozit yapılara ait ilk deneysel çalışmalar yapılmıştır [2]. Karesel tipte balık ağı metamalzemelere ait geri yayılım ve faz çalışmaları gerçekleştirilmiştir [3]. Dairesel tipte metamalzemelerin mikrodalga frekanslarda gerçellenmesi ve eşlenik devre analizlerinin yapılmasına [4] ilave olarak bu yapılan iletim hattı modellemesi ile saçınımlı (dispersive) karakteristiğe sahip olduğu gösterilmiştir [5]. Bu çalışmada ise dairesel metamalzemelerde parametre değişimlerinin tasarım ve sonuçlara etkisi irdelenecektir. Boşluk yarıçapı, kayıp-tanjant açısı, dielektrik tabaka kalınlığı ve dönme uyarım açısının belirli kısıtlar dahilinde değişimleri analiz edilmektedir. Birim hücre boyutunun diğer parametreler sabitken DB-MM yapısına etkisi ise incelenmeyecektir. Bunun nedeni efektif ortam teorisinden kaynaklı dalgaaltı boyutlarda çalışma zorunluluğunun getirdiği otomatik ölçeklenebilirlik olgusudur. Bu çalışmada yenilik boyutu olarak özellikle kayıp-tanjant parametre değişiminin metamalzeme davranışına doğrudan etkisi ve dögüsel metamalzeme tasarımı gösterilmektedir.

### 2. PARAMETRE ANALİZLERİ

#### *Yarıçap Değişiminin Rezonans Parametrelerine Etkisi:*

Bu bölümde primitif DB-MM mikroyapısına ait temel tasarım parametrelerinden birisi olan yarıçap değişim oranının ( $r/a$ ) rezonans frekansları üzerindeki etkisi incelenecektir. Dairesel metamalzemeler sadece bakır (Cu) ve dielektrik (FR4) olmak üzere iki malzeme kullanılarak üretilmektedir. Optiksel frekanslardaki davranışlardan farklı olarak bakır mikrodalga frekanslarda mükemmel elektriksel iletken (PEC) gibi davranır. Çift yüzü bakırda oluşturulan boşluk (aperture/void) yarıçaplarının değişimi endüktans ve kapasitans değerlerinde oluşan farklılıklar nedeniyle rezonans frekansında değişime neden olmaktadır. Teflon alt-tabaka (substrate) üzerinde bulunan Bakır plakası üzerindeki boşluk yarıçaplarının birim hücre boyutuna oranlarına ( $r/a$ ) bağlı olarak değişen transmisyon sonuçları Şekil 1'de yer almaktadır. Birim Hücre boyutu  $a_x=a_y=a$ , 14 mm olduğundan  $r=3,5$  mm değeri  $a/4$ 'e karşılık gelmektedir. Bu benzetimde  $r = 0.25 \times a$ ,  $r = 0.33 \times a$ ,  $r = 0.41 \times a$  ve  $r = 0.50 \times a$  olmak üzere incelenen parametre dört değer ile taranmaktadır.  $r = 0.50 \times a$  durumunda şekilde görüldüğü üzere yapı baklava (diamond) biçimini almakta ve tamamen transparan durumuna geçmektedir. Boşluk yarıçapı  $a/4$  en küçük değerinde rezonatör bileşeni işlevine yakın bir davranış sergilemektedir. Ulaşılan temel sonuç,

boşluk yarıçap oranı artırıldığında LHM bölgesi için Q-faktörü değerinde bir düşüş gözlemlenmesi ve iletim hattının dengeli (balanced) hale gelmesidir.



Şekil 1. Yarıçap değişim oranının şematik gösterimi ve parametre taraması sonucunda elde edilen logaritmik (dB) transmisyon değerleri

### Kayıp Tanjant Açısı (Tangent-Loss) Değişimi:

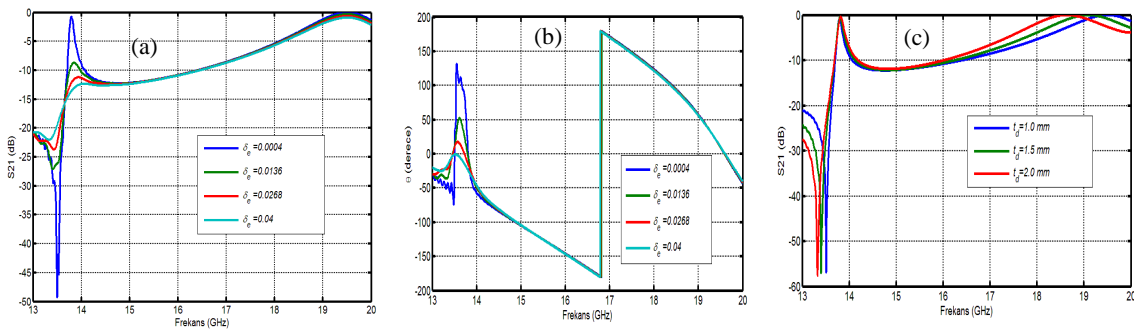
Yapılan nümerik çalışmalar kapsamında, metalmalzeme tasarımında dikkate alınması gereken bir diğer önemli değişkenin kullanılan dielektriklere ait bir değer olan kayıp tanjant (tangent-loss) parametresi  $\delta_e$  olduğu saptanmıştır. Kayıp tanjant değerinin DB-MM yapılara etkisini açıklayabilmek için öncelikle teorik bir çerçeve sunulacak ve bölümün sonunda elde edilen nümerik sonuçlar gösterilecektir. Bu kapsamda düşük iletkenliğe sahip malzemelerin mikrodalga davranışlarını incelemek üzere bir dielektrik malzemesinin kapasitör içine yerleştirildiği durum göz önüne alınmaktadır. Bu örneği modellemek üzere eşdeğer devre modeli ve kayıp tanjant açısının kavramsal tanımı kullanılacaktır [6]. Sonuç olarak kayıp tanjant (tangent loss) parametresi aşağıdaki formda tanımlanmaktadır. Ayrıca akım ile gerilim arasındaki bağıntılardan analogi kurularak yüzey akım yoğunluğu ile elektrik alan şiddeti arasında da benzer bağıntıların elde edildiği gösterilebilir. Bu ilişki takip eden Eşitlik (1), (2) ve (3)'de yer almaktadır.

$$\delta_e = \tan^{-1}(\epsilon_r''/\epsilon_r') \quad (1)$$

$$I = j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')\frac{C_0}{\epsilon_0}U = (j\omega\epsilon' + \omega\epsilon'')\frac{C_0}{\epsilon_0}U \quad (2)$$

$$J = (j\omega\epsilon' + \omega\epsilon'')E = \epsilon \frac{dE}{dt} \quad (3)$$

Burada  $I$  ve  $J$  sırası ile kazanç ve kayıp akımlarına karşılık gelmektedir. Düşük kayıplı teflon malzemesi için; benzetim programındaki malzeme kütüphanelerinde epsilon değeri 2.16 ve kayıp tanjant değeri 0.0004 olarak yer almaktadır. FR4 için bu değerler sırasıyla 4.9 ve 0.025 biçimindedir. Şekil 2.a ve 2.b aracılığıyla açık biçimde görüldüğü üzere teflondan FR4'e doğru büyüyünce ve en son 0.04 değerine ulaşacak biçimde kayıp tanjant açısı parametresi değiştirildiğinde LHM bölgesindeki iletim kaybolmakta, faz ilerlemesi azalmakta ve LHM bölgesinde yapı rezonansa girememektedir



Şekil 2. Dört farklı kayıp tanjant değeri için elde edilen transmisyon benzetim sonuçları (a), faz değişimi benzetim sonuçları (b), Teflon tabaka kalınlığına (mm cinsinden) bağlı transmisyon değerleri (c).

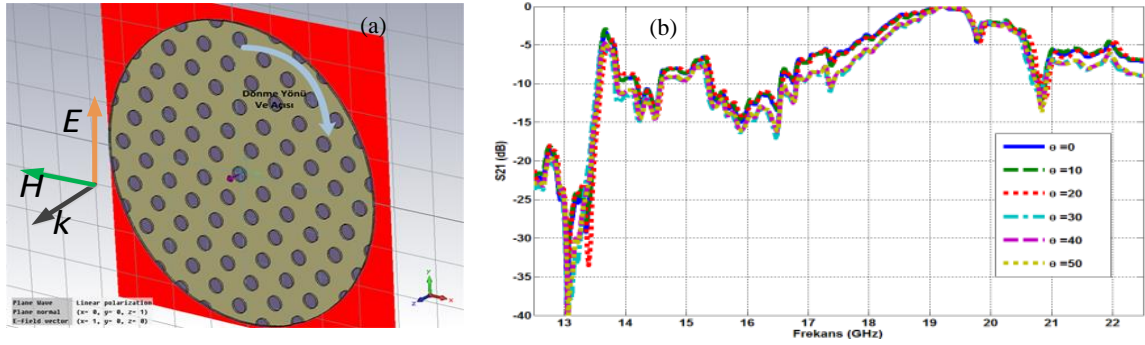
### Dielektrik Tabaka Kalınlık Değerinin Değişimi:

Gösterim kolaylığı açısından teflon tabaka kalınlığı  $t_d$ 'nin 1mm, 1.5 mm ve 2 mm olduğu durumlar için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.c'de üç farklı parametre değeri için hesaplanan transmisyon değerleri yer almaktadır. Yarıçap değişimine bağlı olarak görülen rezonans frekansı değişimi dielektrik kalınlığına bağlı olarak değişmemektedir. Devre teorisinden bilinen  $C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$  temel eşitliğe göre alanın sabit olduğu sabit birim hücre boyutu için farklı alt-tabaka kalınlıklarında kapasite ile dilim kalınlığı  $d$  (benzetimlerde  $t_d$  olarak

tanımlanmaktadır) arasında tersinir bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında farklı  $t_d$  parametresi değerleri için LHM bölgesinde herhangi ötelenme tespit edilememiştir. Ancak  $t_d$ 'nin 1mm olduğu durumda RHM rezonans değeri 19.5 GHz civarında seyrederken tabaka kalınlığı 2 mm'ye artırıldığında söz konusu rezonans değerinin yaklaşık 18.5 GHz'e indirildiği tespit edilmiştir. Tabaka Kalınlığını iki katına çıkarılarak kapasite değeri yarıya indirgenmiştir. Diğer taraftan yapıda yer alan bakır tabaka uzunluğu sabit olduğundan rezonans frekansında  $\sqrt{2}$  katı bir kayma olmaması fiziksel olarak bu temel eşitlik modelin bire bir karşılanmadığı, DB-MM için daha karmaşık bir model ortaya konulması ihtiyacı anlamına gelmektedir.

#### Dönme Uyarım Açısı Etkisi:

DB-MM tasarımında dielektrik olarak kullanılan teflon tabaka kalınlığı daha önce yapılan benzer çalışmalar ve Dairesel Balık ağı malzemelerin pratik kullanım alanları göz önüne alındığında geometrik yapısından kaynaklı en önemli avantajının döngüsel (rotational) uyarımlarda benzer karakteristik sergilemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Birim hücre benzetimleri gerçekleştirilirken periyodik sınır koşulları tanımlanmış ve TEM uyarımı gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar ve kaynakçada belirtilen çalışmalar dikkate alındığında benzetimdeki periyodik sınır koşulu pratikte 10x10 hücreden oluşan tabakalar ile sağlanabilmektedir. Bu bilgiden yararlanılarak simülasyon ortamında birim hücre yerine tüm yapının benzetiminin gerçekleştirilmesi ve sınır koşulları olarak periyodiklik yerine açık alan (open space) ayarlamaları sağlanmıştır. Bu amaçla Şekil 3.a.'da gösterildiği biçimde 10x10 birim hücreden oluşan dikdörtgen bir plaka dairesel olarak kesilerek yeni bir plaka tasarlanmıştır. Arkaplanda kırmızı renk ve merkezde elektik-manyetik alan bileşenleri mat biçimde gösterilen düzlemsel dalga yayılımı z yönünde gerçekleşmektedir.



Şekil 3. Döngüsel uyarımlar için tasarlanan DBMM tabaka (a), farklı dönme açıları için transmisyon değerleri (b).

Benzetimlerde kullanılan temel yaklaşım, sınır koşulları ve düzlemsel dalga sabit olmak koşuluyla tasarlanan yapının  $x$ - $y$  düzleminde saat yönünde dönme açısı (theta) oranında döndürülerek transmisyon ( $S_{21}$ ) parametrelerindeki değişimlerin analiz edilmesine dayanmaktadır. Şekil 3.b'de dönme açısı  $\theta$  için 10 derecelik adımlarla 0-50 derece aralığında parametre taraması sonuçları yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, 13.8 GHz'e karşılık gelen LHM bölgesinde deneysel sonuçlara [4] çok yakın -3 dB ile -5 dB arasında değişen LHM rezonansı tepe değerleri elde edilmektedir. Benzer biçimde RHM bölgesi 18.5-19.5 GHz olarak elde edilmektedir. Dönme açısı  $\theta$ 'nın 0 ve 10 dereceden daha büyük değerleri için LHM rezonansı tepe değerinde yaklaşık 1-2 dB'lik düşüş olmasına karşın yapının tamamen **döngüsel (rotational) metamalzeme** olarak sınıflandırılabilceği görülmektedir.

### 3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan parametre değişimi analizleri ile pratik uygulamaların gerektirdiği ölçeklenebilirlik gibi özelliklere uygun olarak dairesel balık ağı malzemelerin ayarlanabilir yapıda olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Tasarım parametreleri için ayrı ayrı kısıtların metamalzeme davranışını bozmayacak biçimde hesaba katılması gerekmektedir. Geometrik tasarım dışında malzemelerin fiziksel özellikleri ve benzetim kısıtlarının bir arada modellenmesi gerekmektedir.

#### Kaynaklar

- [1]. Pendry, John B., A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart (1999). "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena." *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 47, no. 11, 2075-2084.
- [2]. Smith, D. R., & Kroll, N. (2000). Negative refractive index in left-handed materials. *Physical Review Letters*, 85(14), 2933.

- [3]. Aydın, K., Li, Z., Sahin, L., & Ozbay, E. (2008). Negative phase advance in polarization independent, multi-layer negative-index metamaterials. *Optics express*, 16(12), 8835-8844.
- [4]. Öztürk, Y., Yılmaz, A.E., Çolak, E. and Özbay, E. (2012). Characterization, slab-pair modeling and phase analysis of circular fishnet metamaterials. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 10(4), pp.624-631.
- [5]. Öztürk, Y., Yılmaz, A.E., Özbay, E. (2016). 'Conversion from Constitutive Parameters to Dispersive Transmission Line Parameters for Multi-band Metamaterials', *Waves in Random and Complex Media*, Volume: 26, Issue: 02, pages 223 - 235.
- [6]. Chen, L. F., Ong, C. K., Neo, C. P., Varadan, V. V., & Varadan, V. K. (2004). *Microwave electronics: measurement and materials characterization*. John Wiley & Sons.