

# V-Şekilli Rezonatör ve İletken Çubuklar Kullanarak Oluşturulan Sol-Elli Yapının Benzetimi, Etkin Ortam Parametrelerinin Çıkarılması ve Rezonans Frekansının Kaydırılması

Evren Ekmekçi<sup>1</sup>

Gönül Turhan-Sayan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara  
<sup>1</sup> Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

<sup>1</sup>e-posta: eekmekci@metu.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: gtsayan@metu.edu.tr

## Özetçe

Bu bildiri V-şekilli manyetik rezonatörler ve iletken çubuklar kullanarak oluşturulan yapının HFSS yazılımı ile benzetimi yapılmış ve bu yapının aynı frekans bandında hem negatif etkin manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) hem de negatif etkin dielektrik sabitine ( $\epsilon$ ) sahip olabileceği gösterilmiştir. Etkin dielektrik sabiti ve etkin manyetik geçirgenlik değerleri yapının benzetim sonucunda elde edilen S-parametrelerinden çıkarılmıştır. Ayrıca kullanılan baskı devre plakentinin rezonans frekansına ve etkin manyetik geçirgenlik değerlerine olan etkisi incelenmiş ve plakentin dielektrik sabitinin artmasıyla hem negatif manyetik geçirgenliğin başladığı frekansın hem de rezonans frekansının azaldığı görülmüştür.

## 1. Giriş

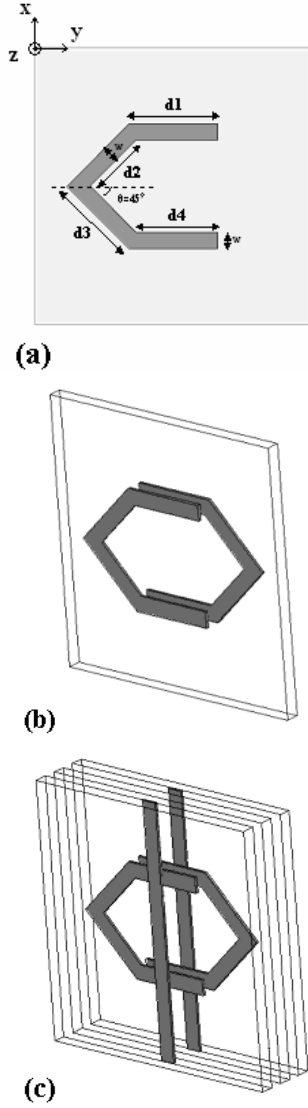
Veselago 1968 yılında, aynı frekans bandında negatif manyetik geçirgenlik ve negatif dielektrik sabitine sahip olan malzemelerin alışılmadık malzemelerin aksine negatif kırılma indisine, negatif Doppler etkisine ve negatif Vavilov-Cerenkov etkisine sahip olacağını önermiş ve bu özelliklere sahip malzemeleri sol-elli malzemeler olarak adlandırmıştır. Bu malzemelerinin sol-elli malzemeler olarak adlandırılmasındaki neden yayılma vektörü  $k$ , elektrik alan şiddet vektörü  $E$  ve manyetik alan şiddet vektörü  $H$ 'nin yönlerinin sol el kuralıyla tayin edilebilmesidir [1]. 2000 yılında Pendry, sol-elli malzeme kullanılarak yapılan lenslerle, bilinen lenslerin aksine, dalgaboyu altındaki seviyelerde bir çözünürlüğe ulaşılabileceğini kanıtlamış ve hatta gerekli koşulların sağlanması durumunda mükemmel lenslere ulaşılabileceğini önermiştir [2]. 2000 yılından sonra sol-elli yapılar üzerindeki çalışmalar hız kazanmış ve 2001 yılında Shelby ve arkadaşları tarafından deneysel olarak ilk defa ayrık halkalı rezonatörler (AHY) ve iletken çubuklardan oluşan negatif kırılma indisli hacimsel bir malzeme gerçekleştirilmişlerdir. Bu çalışmadaki ayrık halkalı yapılar negatif manyetik geçirgenlik, iletken çubuklar ise negatif dielektrik sabiti elde etmek için kullanılmıştır [3-5]. 2002 yılında Grbic ve arkadaşları, toprak düzlem üzerine LC iletim hattı kullanarak sol-elli yapıları iki boyutlu olarak gerçekleştirmişlerdir [6]. Bu yapılar ayrık halkalı yapılara göre daha geniş bir bantta sol-elli yapı özelliği göstermelerine karşın iki boyutlu olmaları, üç boyutlu uygulamalarda kullanılmalarını sınırlamaktadır. 2004 yılında Chen ve arkadaşları S-şekilli yapılar kullanarak, ayrık halkalı yapılarda

olan uygulamanın aksine iletken çubuklar kullanmadan, aynı frekans bandında hem negatif etkin dielektrik sabitine hem de negatif etkin manyetik geçirgenliğe sahip, hacimsel yapıda sol-elli bir materyal üretmiştir. Üstelik bu çalışmada elde edilen sol-elli bant, ayrık halkalı yapılarla elde edilene göre çok daha geniştir [7].

Bu bildiri V-şekilli yapılar ve iletken çubuklar kullanarak yeni bir sol-elli yapı önerilmiştir. Önerilen yapının HFSS yazılımı ile benzetimi yapılmış ve S-parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen S-parametreleri kullanılarak literatürde önerilen yöntemler yardımıyla etkin ortam parametreleri çıkarılmış ve aynı frekans bandında hem negatif etkin  $\epsilon$  hem de negatif etkin  $\mu$  elde edildiği gösterilmiştir [8]. Ayrıca yapının üzerine oluşturulduğu plakentin dielektrik sabiti değiştirilmiş ve bu değişimin rezonans frekansına ve etkin manyetik geçirgenlik değerine olan etkisi incelenmiştir.

## 2. Tasarım

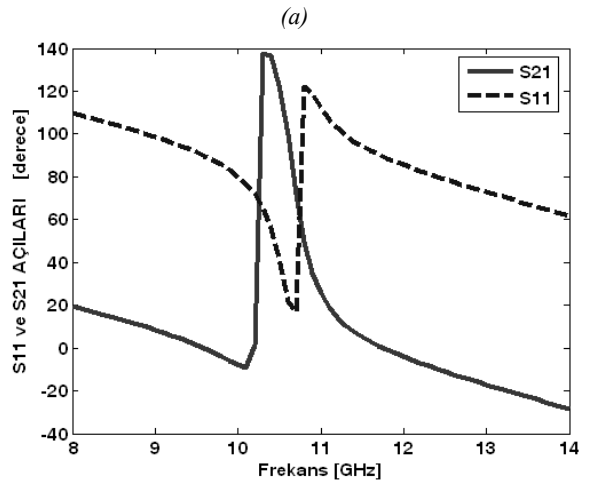
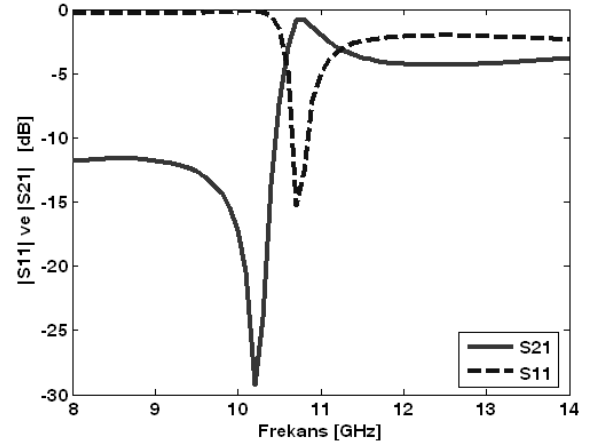
Bu bildiri önerilen yapı Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1(a)'da V-şekilli rezonatörün üstten görünüşü ve boyutları verilmektedir. V-şekilli yapı her biri 0.05 mm kalınlığındaki bakır hatlardan oluşturulup birim hücre boyutları;  $d_1=1.6$  mm,  $d_2=1.17573$  mm,  $d_3=1.6$  mm,  $d_4=1.47574$  mm,  $w=0.3$  mm,  $\theta=45^\circ$  olarak seçilmiştir. Şekil 1(b)'de ise aynı yapının açılı görünüşü verilmektedir. Burada, x yönü boyunca bakır hatların toplam uzunluğu 2.26274 mm ve y yönü boyunca da 3.84852 mm dir. Yine şekilde verilen yapının birbirine paralel ama ters yönde olacak şekilde dielektrik plaket üzerine konuşturıldığı görülmektedir. Dielektrik plakentin rezonans frekansına olan etkisini incelemek için benzetimler sırasında farklı dielektrik sabitli plaketter kullanılmıştır. Bunlar; Rogers RT/duroid 5870 (tm), Rogers Ultralam 1250 (tm) ve Rogers RO3003 (tm) dir ve kullanılan dielektrik plaketterin her birinin boyutu 5 mm  $\times$  5 mm  $\times$  0.25 mm olarak seçilmiştir. Bu malzemelerin özellikleri ayrıca sonuçlar kısmında verilecektir. Şekil 1(c)'de ise Şekil 1(b)'deki yapının her iki tarafına dielektrik plaketter üzerine basılmış, 5 mm uzunluğunda, 0.3 mm genişliğinde ve 0.05 mm kalınlığında bakır çubuklar yerleştirildiği görülmektedir. Bu iletken çubukların amacı yapıya geniş bir bantta negatif etkin dielektrik sabiti özelliği kazandırmaktır.



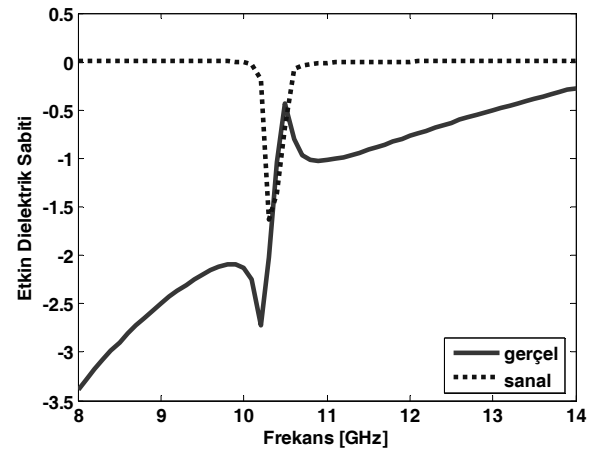
Şekil 1: (a) V-şekilli rezonatörün üstten görünüşü ve boyutları. Burada birim hücre boyutları:  $d1=1.6$  mm,  $d2=1.17573$  mm,  $d3=1.6$  mm,  $d4=1.47574$  mm,  $w=0.3$  mm,  $\theta=45^\circ$ . (b) Dielektrik plaket üzerine çift yönlü basılmış V-şekilli rezonatörün açılı görünüşü. (c) V-şekilli Rezonatör ve iletken tellerden oluşan sol-elli yapının açılı görünüşü.

### 3. Sonuçlar

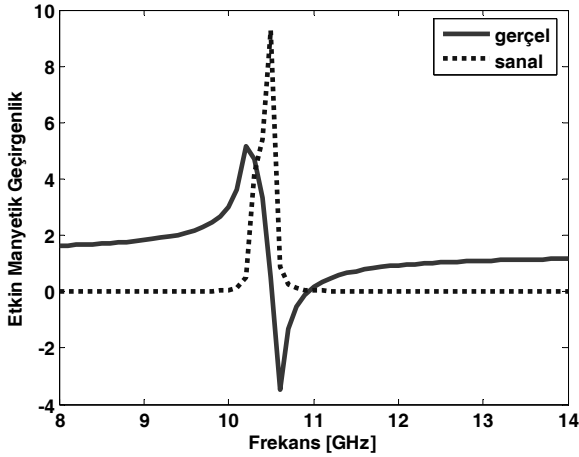
Şekil 1(c)'de görülen yapının dört farklı dielektrik plaket için HFSS yazılımı ile benzetimi yapılmış ve S-parametreleri elde edilmiştir. Örneğin,  $\epsilon_r=2.33$ ,  $\mu_r=1$  ve dielektrik kayıp tanjantı  $\delta_e=0.0012$  olan Rogers RT/duroid 5870 (tm) dielektrik plaka ile yapılan benzetim sonucunda elde edilen  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerlerinin büyüklük ve açı grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Elde edilen S-parametrelerinden etkin ortam parametrelerini çıkartmak için Ghodgaonkar ve arkadaşlarının 1990'da önerdiği yöntem kullanılmıştır [7]. Bu yöntemle elde edilen etkin dielektrik sabiti ve etkin manyetik geçirgenlik değerleri için elde edilen grafikler sırasıyla Şekil 3'te ve Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 2: (a)  $\epsilon_r=2.33$ ,  $\mu_r=1$  ve dielektrik kayıp tanjantı  $\delta_e=0.0012$  olan Rogers RT/duroid 5870 (tm) ile yapılan benzetim sonucunda elde edilen  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerlerinin dB cinsinden büyüklüğü. (b) Aynı  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerlerinin açısı.



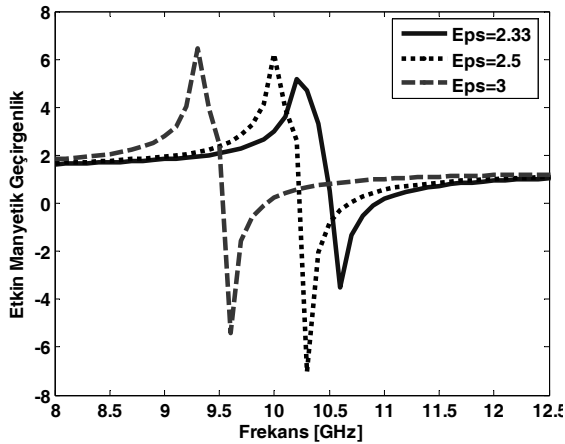
Şekil 3:  $\epsilon_r=2.33$ ,  $\mu_r=1$  ve dielektrik kayıp tanjantı  $\delta_e=0.0012$  olan Rogers RT/duroid 5870 (tm) ile yapılan benzetim sonucunda elde edilen etkin dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımları.



Şekil 4:  $\epsilon_r=2.33$ ,  $\mu_r=1$  ve dielektrik kayıp tanjantı  $\delta_\epsilon=0.0012$  olan Rogers RT/duroid 5870 (tm) ile yapılan benzetim sonucunda elde edilen etkin manyetik geçirgenliğin gerçek ve sanal kısımları.

Şekil 3'ten görüldüğü gibi 8-12 GHz arasında etkin dielektrik sabitinin gerçek kısmı negatiftir. Dolayısıyla sol-elli yapıya ulaşabilmek için bu frekans bandında manyetik geçirgenliğin gerçek kısmını negatif değere çekmek yeterli olacaktır. Şekil 4'ten görüldüğü gibi manyetik geçirgenliğin gerçek değeri 10.5-10.9 GHz arasında negatif değerler almaktadır. Böylelikle Rogers RT/duroid 5870 (tm) ile yapılan benzetim için Şekil 1(c)'deki yapı 10.5-10.9 GHz arasında sol-elli gibi davranır diyebiliriz.

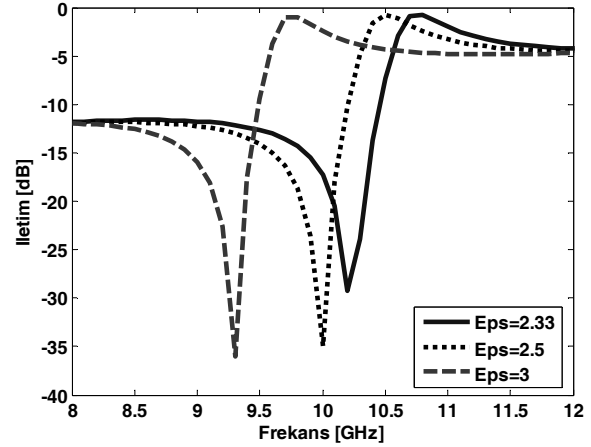
Dielektrik plaketin rezonans frekansına etkisini gözlemlemek için Rogers RT/duroid 5870 (tm) dışında, iki farklı plaket için daha aynı benzetimler yapılmış ve etkin ortam parametreleri bu benzetimlerle elde edilen S-parametrelerinden çıkartılmıştır. İki farklı plaket olarak  $\epsilon_r=3$ ,  $\mu_r=1$ , dielektrik kayıp tanjantı  $\delta_\epsilon=0.0013$  olan Rogers RO3003 (tm) ve  $\epsilon_r=2.5$ ,  $\mu_r=1$ , dielektrik kayıp tanjantı  $\delta_\epsilon=0.0015$  olan Rogers Ultralam 1250 (tm) kullanılmıştır.



Şekil 5: Rogers RT/duroid 5870 (tm) (sürekli çizgi), Rogers RO3003 (tm) (kesikli çizgi) ve Rogers Ultralam 1250 (tm) (noktalı çizgi) için etkin manyetik geçirgenlik değerleri.

Şekil 5'te farklı dielektrik sabitlerine sahip bu üç plaket için gerçek etkin manyetik geçirgenlik değerleri 8-12 GHz arası

için hesaplanmıştır. Şekilden de görüleceği gibi kullanılan plaketin dielektrik sabitinin artırılması V-şekilli yapıdaki sığa etkisini arttırmakta ve bu da manyetik rezonans frekansını azaltmaktadır. Azalan manyetik rezonans frekansıyla, Şekil 5'te gözlenen azalma birbirleriyle doğrudan ilişkilidir çünkü, etkin manyetik geçirgenliğin negatif değerlere ulaşmasını sağlayan aslında manyetik rezonansın başka bir şey değildir. Şekil 6'da da iletim karakteristiği dB cinsinden verilmiştir. Burada iletim minimumları rezonans frekanslarına denk gelmektedir. Şekilden de açıkça görüleceği gibi plaketin dielektrik sabitini arttırmak rezonans frekansını azaltmaktadır.



Şekil 6: Rogers RT/duroid 5870 (tm) (sürekli çizgi), Rogers RO3003 (tm) (kesikli çizgi) ve Rogers Ultralam 1250 (tm) (noktalı çizgi) için dB cinsinden iletim karakteristikleri.

#### 4. Vargı

Bu bildiriye V-şekilli rezonatör ve bakır çubuklar kullanılarak sol-elli bir yapı oluşturulabileceği HFSS yazılımı ile yapılan benzetimler sonucunda ortaya koyulmuştur. Ayrıca tasarımda kullanılan dielektrik plaketin rezonans frekansına olan etkisi incelenmiş, artan dielektrik sabitinin manyetik rezonans frekansını ve dolayısıyla negatif manyetik geçirgenliğe ulaşılacak frekans azalttığı gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, öngörülen sonuçlarla uyum içindedir.

#### 5. Kaynakça

- [1] V. G. Veselago, The Electrodynamics of Substances With Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ , Soviet Physics Uspekhi, Vol. 10, No. 4, 1968.
- [2] J. B. Pendry, Negative Refraction Makes Perfect Lens, Physical Review Letters, Vol. 85, No. 18, pp. 3966-3969, 2000.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, I. Youngs, Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostucture, Physical Review Letters, Vol. 76, No. 25, pp. 4773-4776, 1996.
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp. 2075-2084, 1999.
- [5] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser ve S. Schultz, Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity,

Physical Review Letters, Vol. 84, No. 11, pp. 4184-4187, 2000.

- [6] G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, P. C. Kremer, Planar Negative Index Media Using Periodically L-C Loaded Transmission Lines, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 50, No. 12, pp. 2702-2712, 2002.
- [7] H. Chen, L. Ran, J. Huangfu, X. Zhang, K. Chen, T. M. Grzegorzcyk and J. A. Kong, Left-Handed Materials Composed of Only S-Shaped Resonators, Physical Review E, Vol. 70, pp. 057605-1 – 057605-4, 2004.
- [8] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, V. K. Varadan, Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 39, No. 2, pp. 387-394, 1990.