

# Mikrodalga Bölgesinde Farklı Rezonatör Yapılarının Sensör Uygulamaları İçin Hassasiyet Analizi

## Sensitivity Analysis of Different Resonator Structure for Sensor Applications in Microwave Region

Özgür Ertan<sup>1</sup>, Umut Köse<sup>1</sup>, Alparslan Çınar<sup>1</sup>, Evren Ekmekçi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Süleyman Demirel Üniversitesi

ozgurertan0@gmail.com, umut.kose29@gmail.com, alparslancinar1992@hotmail.com, evrenekmekci@sdu.edu.tr

### Özet

*Bu çalışmada literatürde sensör uygulamalarında kullanımı mevcut olan çift taraflı ayırık halkalı rezonatör (ÇAHR) yapısına alternatif olarak kullanılabilecek çift taraflı elektrik-LC rezonatör yapısı (ÇELC) ve ÇELC yapısındaki karşılıklı sığa değerini arttırmak amacıyla tasarlanan çift taraflı asimetrik elektrik-LC (ÇAELC) rezonatör yapıları önerilmiştir. Önerilen tüm yapıların performans analizleri için; rezonans frekansının ara katman dielektrik sabitine olan hassasiyetleri nümerik olarak CST Microwave Studio (MWS) ortamında incelenmiştir. Bu analizlerde ara katman göreceli dielektrik sabiti 1 ile 5 arasında değiştirilmiştir. Çalışılan üç yapı içerisinde; ÇAELC yapısı dielektrik sabiti değişimlerine %20,107 ile en yüksek hassasiyeti göstererek literatürde daha önce sunulan ÇAHR yapısına iyi bir alternatif olabileceğini göstermiştir.*

### Abstract

*In this study, double sided electric-LC resonator (DELIC) and double sided asymmetric electric-LC resonator (DAELC), which is designed to improve the mutual capacitance in the DELIC, have been proposed as an alternative to double sided split ring resonator (DSRR) whose usage is available in sensor applications in literature. For the performance analyses of the proposed structures, the sensitivity of the resonance frequency to the interlayer dielectric constant is investigated numerically by CST Microwave Studio (MWS). In the analyses, interlayer dielectric constant is changed between 1 and 5. Among the studied three structures, DAELC demonstrates that it may be a good alternative to the already proposed DSRR structure by presenting highest sensitivity to the dielectric constant changes with 20.107%.*

### 1. Giriş

1968 yılında Veselego tarafından teorik olarak önerilen metamatzemeler, aynı frekans bandında negatif dielektrik sabiti, negatif manyetik geçirgenlik ve ters doppler etkisi gibi sıra dışı elektromanyetik özellikler gösterebilen yapılar

malzemelerdir [1] ve mikrodalga bölgesinde birçok uygulamada kullanım alanları mevcuttur [2-17]. Ayırık halkalı rezonatörler (AHR) [5-9, 15-17] ve elektrik-LC rezonatörler (ELC) [10-12] metamatzeme tasarımında yaygın olarak tercih edilen rezonatör yapılarındandır.

AHR ve ELC rezonatör literatürde sıklıkla LC rezonans devresi olarak modellenmektedir [10-13, 17]. Burada  $L$  ve  $C$  sırasıyla yapının gösterdiği toplam endüktans ve toplam sığa değerleridir.  $L$  değeri yapıyı oluşturan iletken hattın boyutuna ve şekline bağlıyken,  $C$  değeri iletken hattın yanı sıra, bu hattın üzerine basıldığı dielektrik plakentin kalınlığı ve dielektrik sabitine bağlıdır [14].

(1) numaralı denklemde görüldüğü üzere açılmalı rezonans frekans değeri devre modelinde kullanılan  $L$  ve  $C$  değerlerine bağlıdır [13].

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (1)$$

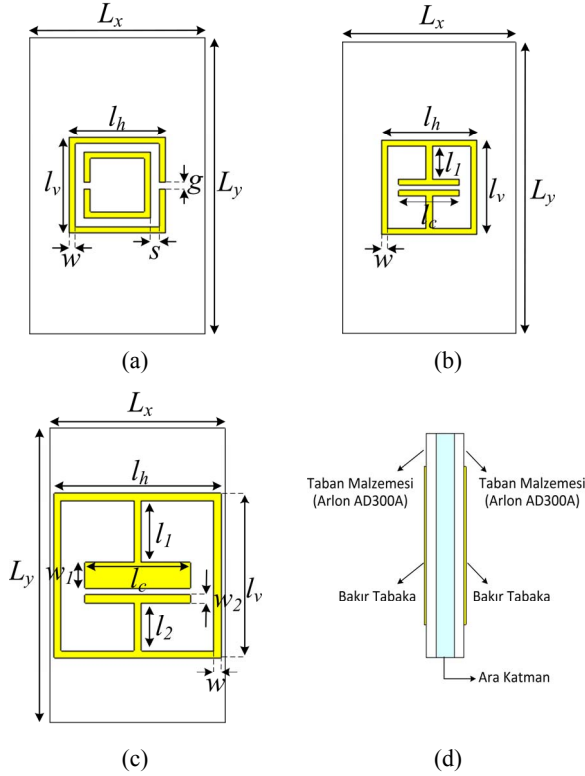
Metamatzeme yapılarının yaygın olarak kullanıldığı güncel uygulamalardan bir tanesi de sensör uygulamalarıdır [2, 4, 6-10, 15, 16]. Özel olarak, Ekmekçi v.d sunmuş olduğu çalışmalarda; çift taraflı rezonatör yapılarının sensör uygulamalarında kullanımlarının mümkün olduğunu [8, 15, 16] ve bu yapıların tek taraflı alternatiflerine kıyasla ortam dielektrik sabiti değişimlerine daha hassas olabileceği [15, 17] ortaya koymuştur ve böylelikle yapılarının sıcaklık, nem, yoğunluk, konsantrasyon ve basınç gibi çevresel değişimlerin algılanmaları için sensör uygulamalarında kullanılabileceği önerilmiştir [8].

Bu bildiri kapsamında literatürde daha önce çalışılan ÇAHR yapısına alternatif olarak ÇELC ve ÇAELC yapıları önerilmiş ve ara katman dielektrik sabiti değişimine gösterdikleri hassasiyet incelenmiştir. Çift taraflı rezonatör yapılarında, öz endüktans ve öz sığasının haricinde çift katmanlı yapı sayesinde oluşan ortak endüktans ve ortak sığa değeri de hassasiyette etkilidir [8]. Bu çalışmada tasarlanan ÇAELC rezonatör yapısı ile oluşan ortak sığa değeri artırılmış ve

böylece ara katman dielektrik sabiti değişimine hassasiyeti ÇAHR ve ÇELC yapılarına göre iyileştirilmiştir.

## 2. Tasarım

Bu çalışma kapsamında tasarlanan ÇAHR, ÇELC ve ÇAELC rezonatör yapılarına ait şematik görünüm ve tasarım parametreleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Çift taraflı yapının tasarlanmasındaki amaç; ortak sığayı artırarak yapının hassasiyetinin iyileştirmesini sağlamaktır [8, 17]. Ortak sığanın artırılması literatürde daha önce sunulan (2)-(4) denklemleri ile açıklanabilir [8]:



Şekil 1: Rezonatör yapılarının ön yüzden şematik görünümü (a) ÇAHR, (b) ÇELC, (c) ÇAELC, (d) Yan yüzden görünüm

$$C_{\text{sub}} = \frac{\epsilon_{\text{sub}} \times A}{d_{\text{sub}}} \quad (2)$$

$$C_{\text{int}} = \frac{\epsilon_{\text{int}} \times A}{d_{\text{int}}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{C_{\text{mut}}} = \frac{1}{C_{\text{sub}}} + \frac{1}{C_{\text{int}}} + \frac{1}{C_{\text{sub}}} \quad (4)$$

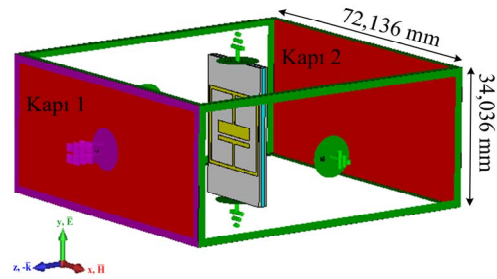
Burada  $C_{\text{sub}}$  taban malzemesinin sığası,  $C_{\text{int}}$  çift katmanlı yapıdan elde edilen ara katmanın sığası,  $C_{\text{mut}}$  ise tasarlanan yapının toplam sığasını göstermektedir.  $d_{\text{sub}}$  ve  $d_{\text{int}}$  sırasıyla taban malzemesi ve ara katman kalınlıklarıdır.  $\epsilon_{\text{int}}$  ve  $\epsilon_{\text{sub}}$  sırasıyla ara katman ve taban malzemesi göreceli dielektrik sabitleridir.  $A$  ise paralel plakaların yüzey alanı olarak tanımlanır. (4) numaralı denklemden görüldüğü üzere,

rezonatör yapılarını çift taraflı kullanarak ortak sığanın artırılabilceği gösterilmiştir [8, 17].

İkinci aşamada ÇAHR ve ÇELC rezonatör yapılarına ilave olarak, ÇELC yapısının geliştirilmiş hali olan ÇAELC rezonatör yapısı önerilmiş ve bu üç yapının ara katman dielektrik sabitine ( $\epsilon_{\text{int}}$ ) olan hassasiyeti incelenmiştir.

Çalışılan tüm yapılarda taban malzemesi 10 GHz’te dielektrik sabiti  $\epsilon_{\text{sub}} = 3$ , dielektrik kayıp tanjantı  $\tan \delta = 0,002$  olan Arlon AD300A kullanılmıştır. Bu taban malzemesi için boyutlar  $L_x = 20$  mm,  $L_y = 34$  mm ve taban malzemesi kalınlığı  $d_{\text{sub}} = 0,508$  mm olarak seçilmiştir. Bunun yanında Şekil 1(a)’da bulunan ÇAHR yapısı için bakır hat uzunlukları  $l_v = 11$  mm,  $l_h = 11$  mm, bakır hat kalınlığı  $w = 0,7$  mm, yan yana iki hat arasındaki mesafe  $g = 0,8$  mm, iç içe iki rezonatör arası mesafe  $s = 1$  mm’dir. Şekil 1(b)’de bulunan ÇELC rezonatör yapısı için bakır hat uzunlukları  $l_v = 11$  mm,  $l_h = 11$  mm,  $l_1 = 3,8$  mm,  $l_2 = 7$  mm, bakır hat kalınlığı  $w = 0,7$  mm’dir. Şekil 1(c)’de bulunan ÇAELC rezonatör yapısı için bakır hat uzunlukları  $l_v = 19$  mm,  $l_h = 19$  mm,  $l_1 = 7,2$  mm,  $l_2 = 5,5$  mm,  $l_3 = 12$  mm, bakır hat kalınlıkları  $w = 0,8$  mm,  $w_1 = 3$  mm,  $w_2 = 1$  mm’dir. ÇAHR ve ÇAELC yapılarında arka düzlemdeki rezonatör yapıları için, ön düzlemdeki rezonatör yapılarının, rezonatör ekseninde (Şekil 2’de gösterilen  $z$  eksen)  $180^\circ$  döndürülmüş hali kullanılmıştır. ÇELC yapısında bulunan arka düzlemdeki rezonatör için herhangi bir döndürme uygulanmamıştır. Tasarlanan tüm rezonatör yapıları için ara katmanın kalınlığı  $d_{\text{int}} = 1$  mm, kayıp tanjantı  $\tan \delta \approx 0$  ve ara katmanın dielektrik sabiti  $\epsilon_{\text{int}} = 1, 3, 5$  değerleri için değiştirilerek nümerik olarak rezonatör yapılarının yüzde hassasiyetleri incelenmiştir. Yüzde hassasiyet denklem (5)’de gösterildiği üzere;  $\epsilon_{\text{int}} = 1$  iken rezonans frekansı ( $f_1$ ) ve  $\epsilon_{\text{int}} = 5$  iken rezonans frekansı ( $f_5$ ) arasındaki yüzdelik değişim ile bulunur.

$$\text{Hassasiyet (\%)} = \left( \frac{f_1 - f_5}{f_1} \right) \times 100 \quad (5)$$



Şekil 2: Benzetim ortamının şematik görünümü

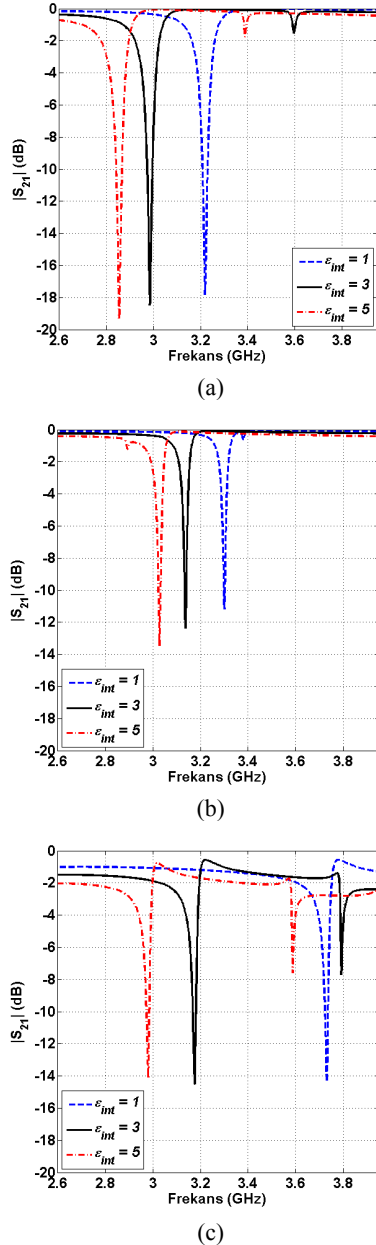
## 3. Benzetim

Bu çalışmada S bant mikrodalga frekans bölgesinde tasarlanan yapılar CST Microwave Studio (MWS) benzetim ortamında frekans bölgesi çözümleyicisi ile nümerik olarak çalışılmıştır. Rezonatörler uyarılırken yayılım vektörü  $k$ , elektrik alan vektörü  $E$  ve manyetik alan vektörü  $H$  sırasıyla  $-z$ ,  $y$  ve  $x$  boyunca değişmektedir. Şekil 2’de gösterilen benzetim ortamında CST MWS benzetim ortamında elektromanyetik dalgaın ilerleme yönünde olan duvarlar açık ekle (open-add)

seçilirken, elektromanyetik dalganın ilerleme yönünde olmayan duvarlar mükemmel elektriksel iletken ( $E_t = 0$ ) olarak seçilmiştir ve tüm yapılar temel mod olan  $TE_{10}$  modunda uyarılmıştır. Benzetim ortamında kapı 1 giriş kapısı, kapı 2 ise çıkış kapısı olarak kullanılmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Şekil 1’de tasarım parametreleri ve şematik görünüşleri verilen rezonatör yapılarının ara katmanlarının dielektrik sabiti  $\epsilon_{int} = 1$ ’den 5’e değiştirilmiştir. CST MWS ortamında elde edilen sonuçlar Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3: Rezonatör yapılarında ara katmanın dielektrik sabitine göre rezonans frekansının değişimi (a) ÇAHR yapısı için (b) ÇELC yapısı için (c) ÇAELC yapısı için

ÇAHR yapısında  $\epsilon_{int}$  değeri 1 den 5’e arttırılınca rezonans frekansı 3,220 GHz’ten 2,854 GHz’e düşmüştür ve hassasiyet değeri %11,366’dır. ÇELC yapısında  $\epsilon_{int}$  değeri 1 den 5’e arttırılınca rezonans frekansı 3,300 GHz’ten 3,028 GHz’e düşmüştür ve hassasiyet değeri %8,242’dir. ÇAELC yapısında ise  $\epsilon_{int}$  değeri yine 1 den 5’e arttırılınca rezonans frekansı 3,730 GHz’ten 2,980 GHz’e düşmüştür ve hassasiyet değeri %20,107’dir. Buradan elde edilen sonuçlara göre denklem (5) kullanılarak Çizelge 1 oluşturulmuş ve ÇAHR, ÇELC ve ÇAELC yapıları için yüzde hassasiyet karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki ÇAELC yapısı %20,107 ile çalışılan üç yapı içerisinde ara katman dielektrik sabiti değişimine en hassas yapıdır.

Çizelge 1: Rezonatör yapılarında ara katmanın dielektrik sabitine göre hassasiyet çizelgesi

| Tasarlanan Yapılar | Frekans (GHz)        |                      |                      | Hassasiyet (%) |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|
|                    | $\epsilon_{int} = 1$ | $\epsilon_{int} = 3$ | $\epsilon_{int} = 5$ |                |
| ÇAHR               | 3,220                | 2,984                | 2,854                | 11,366         |
| ÇELC               | 3,300                | 3,136                | 3,028                | 8,242          |
| ÇAELC              | 3,730                | 3,176                | 2,980                | 20,107         |

#### 5. Tartışma

Bu çalışma kapsamında literatürde mevcut bulunan çift taraflı AHR (ÇAHR) yapısına alternatif olabilecek çift taraflı ELC (ÇELC) ve çift taraflı asimetrik ELC (ÇAELC) yapıları önerilmiş ve ara katman dielektrik sabitine gösterdikleri hassasiyet incelenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, ÇELC yapısı %8,242 ile ÇAHR yapısına kıyasla daha düşük bir hassasiyet değerine sahipken, ÇELC yapısında karşılıklı sığa değeri arttırmak üzere tasarlanan ÇAELC yapısı %20,107 ile çalışılan üç yapı içerisinde en yüksek hassasiyete sahip olmuştur. Bu sonuçlara göre ÇAELC yapısı, hassasiyetin önemli olduğu sensör uygulamalarında ÇAHR yapısına bir alternatif konumundadır.

#### 6. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 113E632 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

#### 7. Kaynaklar

- [1] Veselago, V. G., “The Electrodynamics of Substances With Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ”, *Sov Phys Uspekhi*, 10 (4), s. 509-514, 1968.
- [2] Tao, H., Strikwerda, A. C., Liu, M., Mondia, J. P., Ekmekci, E., Fan, K., Kaplan, D. L., Padilla, W. J., Averitt, R. D. ve Omenetto, F. G., “Performance Enhancement of Terahertz Metamaterials on Ultrathin Substrates for Sensing Applications”, *Appl Phys Lett*, 97 (26), 2010.
- [3] Ekmekci, E. ve Demir, E., “On/Off Switching of Absorption Spectra by Layer Shifting for Double Layer Metamaterial Based Absorber”, *IEEE Antenn Wirel Pr*, 15, s. 532-535, 2016.
- [4] Singh, R., Cao, W., Al-Naib, I., Cong, L., Withayachumnankul, W. ve Zhang, W., “Ultrasensitive Terahertz Sensing With High-Q Fano Resonances in Metasurfaces”, *Appl Phys Lett*, 105 (17), 2014.

- [5] Alici, K. B. ve Ozbay, E., "Electrically Small Split Ring Resonator Antennas", *J Appl Phys*, 101 (8), 2007.
- [6] Naqui, J., Durán-Sindreu, M. ve Martin, F., "Novel Sensors Based On The Symmetry Properties of Split Ring Resonators (SRRs)", *Sensors*, 11 (8), s. 7545-7553, 2011.
- [7] Chen, T., Li, S. ve Sun, H., "Metamaterials Application In Sensing", *Sensors*, 12 (3), 2742-2765, 2012.
- [8] Ekmekci, E. ve Turhan-Sayan, G., "Multi-Functional Metamaterial Sensor Based on a Broad-Side Coupled SRR Topology with a Multi-Layer Substrate", *Appl Phys A-Mater*, 110 (1), s. 189-197, 2013.
- [9] Karim, H., Delfin, D., Ishtiaque, M. A., Chavez, L. A., Garcia, C. R., Barton, J. H., Gaytan, S. M., Cadena, M. A., Rumpf, R. C., Wicker, R. B., Lin, Y. ve Choudhuri, A., "Concept and Model of a Metamaterial-Based Passive Wireless Temperature Sensor for Harsh Environment Applications", *IEEE Sens J*, 15 (3), s. 1445-1452, 2015.
- [10] Naqui, J. ve Martin, F., "Transmission Lines Loaded with Bisymmetric Resonators and Their Application to Angular Displacement and Velocity Sensors", *IEEE T Microw Theory*, 61 (12), s. 4700-4713, 2013.
- [11] Withayachumnankul, W., Fumeaux, C. ve Abbott, D., "Compact Electric-LC Resonators for Metamaterials", *Opt Express*, 18 (25), s. 25912-25921, 2010.
- [12] Withayachumnankul, W., Fumeaux, C. ve Abbott, D., "Planar Array of Electric-LC Resonators with Broadband Tunability", *IEEE Antenn Wirel Pr*, 10, s. 577-580, 2011.
- [13] Baena, J. D., Marques, R. ve Medina, F., "Artificial Magnetic Metamaterial Design by Using Spiral Resonators", *Phys Rev B*, 69 (1), 2004.
- [14] Bilotti, F., Toscano, A., Vegni, L., Aydin, K., Alici, K. B., Ozbay, E., "Equivalent-Circuit Models for the Design of Metamaterials Based on Artificial Magnetic Inclusions", *IEEE T Microw Theory*, 55 (12), s. 2865-2873, 2007.
- [15] Ekmekçi, E. ve Turhan-Sayan, G., "Çift Taraflı Ayırık Halkalı Rezonatör Yapısının Metamateryal Sensör Uygulamaları", *IV. URSİ-Türkiye Bilimsel Kongresi*, 2008, s. 62-65.
- [16] Ekmekci, E. ve Turhan-Sayan, G., "Metamaterial Sensor Applications Based on Broadside-Coupled SRR and V-Shaped Resonator Structures", *IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation*, 2011, s. 1170-1172.
- [17] Ekmekci E. ve Turhan-Sayan, G., "Comparative Investigation of Resonance Characteristics and Electrical Size of The Double-Sided SRR, BC-SRR and Conventional SRR Type Metamaterials for Varying Substrate Parameters", *Prog Electromagn Res B*, 12, s. 35-62, 2009.