



## R-Bant Boşluk Rezonatörü ile Bazı Mikrodalga Malzemelerinin Karmaşık Dielektrik ve Manyetik Geçirgenliklerinin Belirlenmesi

### *Determining Complex Permittivity and Permeability of Some Microwave Materials with R-Band Cavity Resonator*

A. Oral SALMAN<sup>1,\*</sup> , Furkan ALPER<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>MİLTEK (Milimetre Dalga, Elektromanyetik ve Güvenlik Teknolojileri Lab.), Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-1708-6803

<sup>2</sup>MİLTEK (Milimetre Dalga, Elektromanyetik ve Güvenlik Teknolojileri Lab.), Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-4936-2032

#### Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 17/12/2022

Kabul Tarihi : 07/02/2023

#### Anahtar Kelimeler

Karmaşık Dielektrik ve Manyetik Geçirgenlikler,  
Malzemelerin Elektromanyetik Karakterizasyonu,  
Malzeme Sarsımı (Pertürbasyon) Yöntemi,  
R-Bant Boşluk Rezonatörü.

#### Research Paper

Received Date : 17/12/2022

Accepted Date : 07/02/2023

#### Keywords

Complex Permittivity and Permeability,  
Electromagnetic Characterization of Materials,  
Material Perturbation Method,  
R-Band Cavity Resonator.

#### Özet

Elektromanyetik yapıların analiz ve benzetimlerinde, ortamın ElektroManyetik (EM) parametreleri olan  $\epsilon$  elektriksel geçirgenliği,  $\mu$  manyetik geçirgenliği ve  $\sigma$  (elektrik) iletkenliği değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada, mikrodalga teknolojisinde kullanılmakta olan birkaç dielektrik ve manyetik malzemenin EM parametreleri bir R-bant (1.7 - 2.6 GHz) boşluk rezonatöründe, malzeme sarsımı (pertürbasyonu) yöntemiyle ve sadece benzetimleri yapılarak elde edilmiştir. Malzemelerin EM parametreleri laboratuvarımızda bu amaçla yazılmış olan bir MATLAB koduyla otomatik ve hızlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler, literatürdeki değerlerine yakın olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, hem dielektrik hem manyetik malzemelerin geçirgenliklerinin gerçek kısımları, sanal kısımlarına göre literatür değerlerine daha yakın çıkmıştır. Böylece deneyler öncesinde, benzetimler yardımıyla, dielektrik ve manyetik malzemelerin geçirgenliklerinin hesaplanmasında, malzeme sarsım yönteminin ve ayrıca malzemelerin seçilen şekilleri ve rezonatördeki konumlarının doğruluklarının test edilmesi amaçlanmıştır.

#### Abstract

In the analysis and simulations of electromagnetic structures, the ElectroMagnetic (EM) parameters of a medium, which are permittivity  $\epsilon$ , permeability  $\mu$ , and (electric) conductivity  $\sigma$  values, should be known. In this study, the EM parameters of several dielectric and magnetic materials used in microwave technology were obtained by material perturbation method and only by simulation, in an R-band (1.7 - 2.6 GHz) cavity resonator. The EM parameters of the materials were calculated automatically and quickly with a MATLAB code written for this purpose in our laboratory. These calculated values were obtained close to the values in the literature. According to the results obtained, the real parts of the permittivity of dielectric materials and permeability of magnetic materials are closer to the literature values than the imaginary parts of them. Thus, before the experiments, it is aimed to test the accuracy of the material perturbation method and chosen geometric shapes and positions of materials in resonator for the calculation of the permeability and permittivity of dielectric and magnetic materials with the help of simulations.

## 1. Giriş

Çeşitli anten tasarımları, Radar Kesit Alanı (RKA) veya ElektroManyetik Uyumluluk (EMU) hesaplamaları ve daha birçok ElektroManyetik (EM) yapının analizi, ortamın EM özellikleri olan  $\epsilon$ ,  $\mu$  ve  $\sigma$  değerlerinin

bilinmesine bağlıdır. Bu analiz ve tasarımların oluşturulması esnasında kullanılan analitik hesaplama ve benzetimlerde bu parametrelerin doğrudan kullanılması gerekmektedir [1, 2]. Malzemenin, boşluğun elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri olan  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$ 'a göre bağlı karmaşık elektrik ve manyetik geçirgenlikleri sırasıyla aşağıdaki gibi

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): oral.salman@kocaeli.edu.tr



$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad [\text{F/m}] \quad (1)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad [\text{H/m}]$$

verilir. Burada boşluğun elektrik geçirgenliği  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  [F/m] ve manyetik geçirgenliği  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  [H/m]'dir. Eş.(1)'deki sanal kısımlar kayıpların, gerçek kısımlar ise elektrik ve manyetik alanda depo edilen enerjilerin birer ölçüsüdür. Sanal kısımların gerçek kısımlara oranları elektrik ve manyetik kayıp tanjantları olarak tanımlanır ve sırasıyla aşağıdaki gibi,

$$\tan \delta_e = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' \quad (2)$$

$$\tan \delta_m = \mu_r'' / \mu_r'$$

verilir. Eğer malzemenin elektrik kayıp tanjantı,  $\tan \delta_e \ll 1$  ise malzeme dielektrik (az kayıplı),  $\tan \delta_e \approx 1$  ise yarı iletken,  $\tan \delta_e \gg 1$  ise de iletken (çok kayıplı)'dır. Malzemenin a.c. (alternatif akım) iletkenliği  $\sigma$  da frekansa bağlıdır ve aslında  $\varepsilon_r''$  elektrik geçirgenliğinin sanal (kayıp) kısmıyla aşağıdaki şekilde bağlantılıdır:

$$\sigma = \omega \varepsilon'' = \omega \varepsilon_r'' \varepsilon_0 = 2\pi f \varepsilon_r'' \varepsilon_0 \quad (3)$$

Yani  $\sigma$ ,  $\varepsilon_r''$  ve  $f$  frekans değerleri bilindiğinde bu eşitlikten hesaplanabilir. Manyetik malzemeler için de az kayıplı veya çok kayıplı olma durumları, manyetik kayıp tanjantlarının değerleri açısından benzerdir.

EM parametrelerinin değerleri çeşitli yöntemlerle ölçülebilmektedir ve bu yöntemler genel olarak rezonans yöntemleri ve rezonans olmayan yöntemler olarak adlandırılmaktadır [3]. Rezonans yöntemlerinde; boşluk sarsımı (pertürbasyonu), duvar kaybı sarsımı, malzeme sarsımı gibi üç farklı sarsım yöntemi bulunmaktadır. Rezonans olmayan yöntemlerde ise, yansıma ve iletim yöntemleri uygulanır [4]. Rezonans yöntemleri ile yalnızca bir veya birkaç frekansta ölçüm yapılarak, düşük kayıplı ve küçük hacimli örnekler için hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. Rezonans olmayan yöntemler vasıtasıyla da geniş bir frekans bandında, kayıplıdan kayıpsıza, büyük hacimli örnekler dahil olmak üzere sıvı ve yarı katıların ölçümünde hassas sonuçlar elde edilebilmektedir [5].

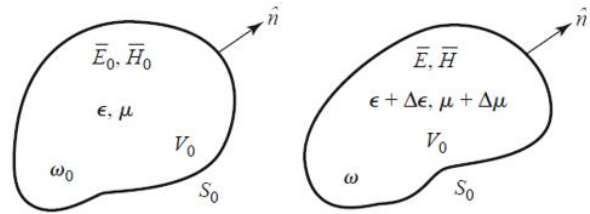
Bu çalışmada mikrodalga teknolojisinde kullanılan bazı malzemelerin EM parametreleri sadece benzetim yoluyla hesaplanacaktır. Bu hesaplamaların hızlı ve otomatik bir şekilde yapılabilmesi için daha önceden laboratuvarımızda (MİLTEK, Milimetre Dalga, Elektromanyetik ve Güvenlik Teknolojileri Lab.) yapılmış bir tezde oluşturulmuş olan bir MATLAB kodu, manyetik malzemelerin EM karakterizasyonu hesaplamalarını da içerecek şekilde revize edilmiştir [6]. Bu hesaplamaların tümü rezonatörde

malzeme sarsım yöntemine dayanmaktadır. Çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmış ve hata oranları belirlenmiştir.

## 2. Malzeme Sarsım (Pertürbasyon) Yöntemi

Malzeme sarsımı (pertürbasyonu) yöntemi rezonatörler vasıtasıyla EM parametrelerin belirlenmesinde sık kullanılan yöntemlerden biridir. Rezonans yöntemleri arasında bulunan bu yöntem ile kaybı yüksek olmayan ( $\tan \delta_{e,m} < 1$ ) malzemelerde daha doğru ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilir.

Şekil 1, boşluğu dolduran ortamın tamamında veya bir kısmında elektrik geçirgenlikte ( $\Delta\varepsilon$ ) veya manyetik geçirgenlikte ( $\Delta\mu$ ) yapılan değişikliklerle sarsıma uğramış bir boşluğu göstermektedir [4].



**Şekil 1.** Boşluk içindeki ortamın elektrik veya manyetik geçirgenliğindeki değişimle sarsım uygulanan bir rezonans boşluğu [4].

Eğer  $\vec{E}_0$  ve  $\vec{H}_0$  baştaki sarsımsız boşluğun içindeki zamanda uyumlu (harmonik) alanları,  $\vec{E}$  ve  $\vec{H}$  ise sarsıma uğramış alanları gösteriyorsa, Maxwell'in dönele eşitlikleri bu iki durum için alt alta

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_0 = -j\omega_0 \mu \vec{H}_0, \quad \vec{\nabla} \times \vec{H}_0 = j\omega_0 \varepsilon \vec{E}_0 \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega(\mu + \Delta\mu)\vec{H}, \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega(\varepsilon + \Delta\varepsilon)\vec{E}$$

şeklinde yazılabilir. Gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{-\int_{V_0} (\Delta\varepsilon \vec{E}_0^* \cdot \vec{E} + \Delta\mu \vec{H}_0^* \cdot \vec{H}) dv}{\int_{V_0} (\varepsilon \vec{E}_0^* \cdot \vec{E}_0 + \mu \vec{H}_0^* \cdot \vec{H}_0) dv} \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik malzeme sarsımından dolayı rezonans frekansındaki değişimi vermektedir.

Rezonans boşluğunu dolduran ortamın (i) kayıpsız olduğu, (ii) içindeki örneğin, boşluktan daha küçük hacimde ve homojen olduğu ve (iii) örneğin dışındaki EM alanın ise değişmez olduğu varsayımları kabul edilirse, Eş.(5)'in sağ tarafında paydaki integral, boşluk hacminin ( $V_0$ ) üzerinden değil, örnek hacminin ( $V_s$ ) üzerinden alınabilir [3]. Ayrıca  $\Delta\varepsilon$  ve  $\Delta\mu$  değerleri yeterince küçük kabul edildiğinde, sarsımdan önceki ve sonraki alanlar da

yaklaşık olarak eşit kabul edilebilir ( $\vec{E} \approx \vec{E}_0$ ,  $\vec{H} \approx \vec{H}_0$ ) ve Eş.(5)'in sağ tarafında paydadaki integralde uygulanabilir. Böylece Eş.(5) aşağıdaki gibi tekrar yazılır.

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \frac{-\int_{V_0} (\Delta \epsilon \vec{E}_0 \cdot \vec{E}_0^* + \Delta \mu \vec{H}_0 \cdot \vec{H}_0^*) dv}{\int_{V_0} (\epsilon |\vec{E}_0|^2 + \mu |\vec{H}_0|^2) dv} \quad (6)$$

Burada paydadaki iki terimin, birbirine eşit nicelikler olduğu gözlemlenmektedir. Ölçümde bağıl karmaşık dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) ölçümünün yapıldığı düşünülürse, i) manyetik geçirgenlikte bir değişim olmaz ( $\Delta \mu = 0$ ) ve ii)  $\epsilon |\vec{E}_0|^2 = \mu |\vec{H}_0|^2 = 2\epsilon |\vec{E}_0|^2$  olarak alınabilir. Tüm bu varsayımlar Eş.(6)'ya uygulanarak

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \frac{-\int_{V_0} (\Delta \epsilon \vec{E}_0 \cdot \vec{E}_0^*) dv}{2 \int_{V_0} \epsilon |\vec{E}_0|^2 dv} \quad (7)$$

elde edilir.  $\Delta \epsilon = \epsilon - \epsilon_0$  ve  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  olduğundan ifade

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{(\omega_r + j\omega_i) - (\omega_{r0} + j\omega_{i0})}{\omega_r + j\omega_i} \quad (8)$$

haline gelir.

Kayıplı bir rezonatörün açısal frekansının gerçek ve sanal kısımları  $\omega = \omega_r + j\omega_i$  cinsinden ifade edilebilir [3,7]. Burada  $\omega_r$ 'nin gerçek kısmı rezonans frekansı  $\omega_r = 2\pi f$ 'yi verir. Böylece Eş.(8)'in sol tarafı

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{(\omega_r + j\omega_i) - (\omega_{r0} + j\omega_{i0})}{\omega_r + j\omega_i} \quad (9)$$

olarak elde edilir.  $\omega_{r0} \approx \omega_r$  (küçük pertürbasyon) ve  $\omega_i \gg \omega_r$  (az kayıplı malzeme,  $Q \propto 1/\omega$ ) durumlarının geçerli olduğunu varsayarak, Eş.(9)

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \frac{(\omega_r - \omega_{r0}) + j(\omega_i - \omega_{i0})}{\omega_r (1 + j\frac{\omega_i}{\omega_r})} \quad (10)$$

haline gelir.

Rezonatörün kalite faktörü  $Q = \omega_r \cdot W/P_L$  ile verilir. Burada  $W$  rezonatörde depo edilen enerji,  $P_L$  ise ortalama güç kaybını göstermektedir.  $Q$  aynı zamanda gerçek ve sanal rezonans frekansları cinsinden  $Q = \omega_r/2\omega_i$  şeklinde de ifade edilebilir [7]. Bu ifadeyi Eş.(10)'da kullanarak

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \left[ \left( \frac{f - f_0}{f} \right) + j \left( \frac{1}{2Q} - \frac{1}{2Q_0} \right) \right] \times \left( 1 - j \frac{1}{2Q} \right) \quad (11)$$

elde edilir.  $Q \gg 1$  olarak kabul edilirse - ki bir rezonatör

için öyledir -,

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \approx \left[ \left( \frac{f - f_0}{f} \right) + j \left( \frac{1}{2Q} - \frac{1}{2Q_0} \right) \right] \quad (12)$$

olur. Eş.(8) ve Eş.(12) birleştirilirse

$$\left[ \left( \frac{f - f_0}{f} \right) + j \left( \frac{1}{2Q} - \frac{1}{2Q_0} \right) \right] = - \left( \frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) C \quad (13)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $C$  integrallerden oluşmuş bir katsayı olarak kabul edilebilir ve

$$C = \frac{\int_{V_0} \vec{E}_0 \cdot \vec{E} dv}{\int_{V_0} |\vec{E}_0|^2 dv} \quad (14)$$

şeklinde verilir. Bağıl elektrik geçirgenlik Eş.(1)'deki tanımı olan  $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$  kullanılarak Eş.(13) ifadesinin sağ ve solundaki gerçek ve sanal kısımlar birbirine eşitlenirse  $\epsilon_r'$  ve  $\epsilon_r''$  için aşağıdaki denklem takımı elde edilir.

$$2 \left( \frac{f - f_0}{f} \right) = (\epsilon_r' - 1) C \quad (15)$$

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = \epsilon_r'' C$$

Eş.(15)'deki ifadeler, daha sık kullanılan  $A$  ve  $B$  parametreleri cinsinden tekrar yazıldığında

$$\left( \frac{f - f_0}{f} \right) = A (\epsilon_r' - 1) \frac{V_s}{V_0} \quad (16)$$

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = B \epsilon_r'' \frac{V_s}{V_0}$$

denklem takımı elde edilir. Böylece karmaşık elektrik geçirgenliğinin gerçek ve sanal kısımlarının hesabı için kullanılabilecek sonuç denklem takımı elde edilmiş olur.  $C$  parametresine benzer olarak,  $A$  ve  $B$  parametreleri de boşluğun yapılandırması ve çalışma modu, örneğin şekli ve örneğin boşluktaki konumuna bağlıdır.  $A$  ve  $B$  parametrelerini analitik olarak hesaplamak zor olduğundan, parametreler genellikle elektriksel geçirgenliği bilinen bir malzemeyi referans olarak kullanıp bununla sistemin kalibrasyonu vasıtasıyla elde edilir. Burada rezonans frekansı  $f$  ve kalite faktörü  $Q$ , bir örnek rezonatöre koyulduğunda değiştiği için,  $A$  ve  $B$  katsayıları, Eş.(16) kullanılarak hesaplanabilir. Ancak, kalibrasyonda kullanılan referans malzemenin ölçülecek örneklere şekil ve hacim yönünden benzer şekilde olması gerektiği

unutulmamalıdır. Ancak bu böyle olduğunda hem referans hem de ölçülecek örnek malzeme aynı alan değerlerine maruz kalır ve böylece hata oranı azalır.

Eş.(16)'daki denklem takımı elektrik geçirgenlik deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu denklemlerin temel olarak üç varsayımdan kaynaklandığı unutulmamalıdır. Birincisi, boşluğun içindeki elektromanyetik alanlar, örneğin koyulmasından ve depolanmış enerjiden dolayı değişmez. İkincisi, örnekli ve örneksiz durumlardaki rezonatörün duvar kayıpları arasındaki fark göz ardı edilebilir. Üçüncü varsayım ise ilk iki varsayımın tam olarak yerine getirilmemesi durumunda bile, değerlerin yüksek doğrulukta deneysel olarak elde edilmesinin bir yolunu sunmaktadır.

Manyetik geçirgenlik ölçümü için de yine malzeme sarsımı yöntemi kullanılmaktadır. Yapılan yaklaşımlarla, manyetik malzemenin elektrik alanının minimum olduğu pozisyona yerleştirildiği veya örneğin elektrik geçirgenliğinin  $\epsilon_0$  olduğunu varsayarız. Böylece Eş.(16)'ya benzer bir denklem takımı (eşitliklerde basitçe  $\epsilon'_r$  ve  $\epsilon''_r$  yerine  $\mu'_r$  ve  $\mu''_r$  yazılarak) karmaşık manyetik geçirgenlik için de elde edilmiş olur.

$$\left(\frac{f - f_0}{f}\right) = A(\mu'_r - 1) \frac{V_s}{V_0} \quad (17)$$

$$\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} = B\mu''_r \frac{V_s}{V_0}$$

Eş.(16) ve Eş.(17) incelendiğinde incelenen örneklerin göreceli dielektrik sabitleri ( $\epsilon'_r$ ) veya manyetik geçirgenliğin gerçek kısımlarına ( $\mu'_r$ ) ait eşitliklerden, bu değerler değiştiğinde rezonans frekanslarının değiştiği görülmektedir. Ayrıca, geçirgenliklerin kayıp terimlerinin ( $\epsilon''_r$  ve  $\mu''_r$ )  $Q$  değerleriyle ters orantılı olmalarından dolayı, daha kayıplı malzemelerin  $Q$  kalite faktörlerinin, daha az kayıplı malzemelerinkine göre düşük olduğu yani  $S_{21}$  rezonans eğrilerinin daha düşük şiddette ve daha yayvan olması gerektiği sonucuna bizi götürür. Aslında, bu rezonatördeki enerjinin korunumundan da kaynaklanmaktadır.

Bir dalga kılavuzu parçasının içerisinde ilerleyen baskın  $TE_{10}$  modunda uyarılmış EM dalganın kılavuz dalga boyu

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (18)$$

ile verilir [1]. Burada  $\lambda$  serbest uzay dalga boyu,  $\lambda_c = 2a$ ,  $a$  ise dalga kılavuzunun uzun kenarıdır.

İçi hava dolu  $a \times b \times d$  boyutlarındaki dikdörtgen bir rezonatörün, uyarılmış  $TE_{101}$  modunda rezonans frekansı ise

$$f_{r_{101}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2} \quad (19)$$

ile verilir [1]. Bu mod için rezonatörde oluşan  $E$ - ve  $H$ -alan bileşenleri

$$E_y = D \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi z}{d}$$

$$H_x = \frac{-jD}{Z_{TE}} \sin \frac{\pi x}{a} \cos \frac{\pi z}{d} \quad (20)$$

$$H_z = \frac{j\pi D}{k\eta a} \cos \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi z}{d}$$

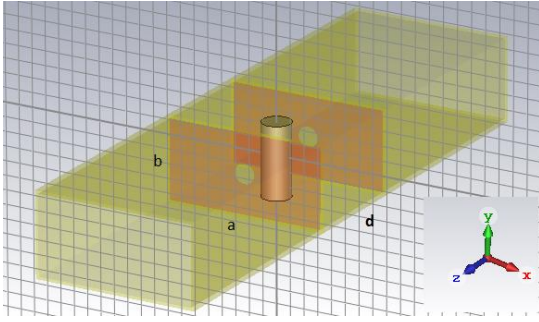
şeklinde yazılır [4]. Burada  $D$  sabit bir katsayıyı,  $Z_{TE}$   $TE$  modu için dalga empedansını ve  $\eta$  ise öz empedansı temsil etmektedir.

### 3. Benzetim

Bu çalışmada, önce tasarlanan  $R$ -bant boşluk rezonatörünün, karmaşık geçirgenliklerinin literatürdeki değerleri ve geometrileri benzetim programına girilmiştir. Çalışma frekans aralığı da 1,7 GHz - 2,6 GHz olarak seçilmiştir. Dielektrik malzemeler, çeşitli antenlerde, EM soğurucularının taban malzemeleri gibi yerlerde yaygın olarak kullanılan teflon, polietilen, poliamit ve kestamit olarak seçilmiştir. Manyetik malzemeler ise yine EMC bilezikler, sirkülatörler, Faraday faz kaydırıcıları gibi pasif elemanlarda yaygın olarak kullanılan;  $NiFe_2O_4$ ,  $LiZnFe_2O_3$ ,  $NiZnFe_2O_4$  gibi feritlerden seçilmiştir [8, 9]. Benzetimlerde demir, çelik gibi saf metalik manyetik malzemeler tercih edilmemiştir. Çünkü bunlar aynı zamanda çok iyi birer iletkenler ve üzerlerinde elektromanyetik dalgaların yayılması açısından çok kayıplı ortamlardır ve rezonatör yöntemi ile ölçümleri oldukça zor olmaktadır. Ancak feritler hem iyi birer dielektrik hem de manyetik yapılar ve aynı zamanda az kayıplı ortamlar olmalarından dolayı rezonatör içerisinde ölçülebilmektedirler.

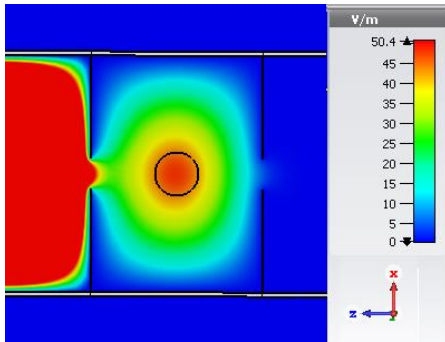
Benzetimlerde rezonatör, laboratuvarımızdaki başka bir tezde,  $R$ -bant boşluk rezonatörü için optimum açıklık değeri olarak bulunmuş olan 7 mm çaplı iki uyarım açıklığı ile uyarılmıştır (Şekil.2 ve Şekil.5) [10]. Açıklıklar ise, ortalama çalışma dalga boyu  $\lambda = 13,95$  için ( $f = 2,15$  GHz'e denk gelir)  $\ell = 10,6$  cm =  $0,6 \lambda_g$  uzunluğunda (burada  $\lambda_g$  kılavuz dalga boyudur ve Eş.(18)'den 18,12 cm olarak elde edilmiştir) seçilen birer  $TE_{10}$  modunda çalışan dalga kılavuzu parçasının ağızlarından dalga kılavuzu uyarımı yapılarak uyarılmıştır. Böyle bir yapılandırma rezonatörde  $TE_{101}$  modunu uyarır.

Rezonatörün boyutları  $a \times b \times d=10,922 \times 5,461 \times 7,92$  cm olacak şekildedir ve içi hava dolu (boş) rezonatörün rezonans frekansı 2332,8 MHz olarak Eş.(19)'dan faydalanılarak bulunur. Benzetimlerde kullanılacak olan dielektrik malzemeler Şekil 2'de gösterildiği gibi 20 mm çapında 50 mm uzunluğundaki ölçülerde silindirik birer malzeme olarak seçilmiş ve elektrik alana fazlaca maruz kalınması için Şekil 3'te görüldüğü üzere  $E$ -alan şiddetinin en fazla olduğu yere konumlandırılmıştır. Buna göre malzemenin konumu, rezonatörün  $x$ - $z$  düzleminin merkezi olan  $(x, y, z) = (a/2, y, d/2)$  koordinatlarındadır ve Eş.(20)'den bu konumdaki alan değerleri,  $E_y = D = E_{y_{max}}, H_x = 0, H_y = 0$  şeklinde hesaplanır. Bu yerleşimde TE<sub>101</sub> modunda örnek boyunca  $E$ -alan şiddetinin maksimum ve  $H$ -alan şiddetinin sıfır olduğu, hem alan hesabından hem de Şekil 3 ve Şekil 6'daki alan şiddeti dağılımlarından görülmektedir.

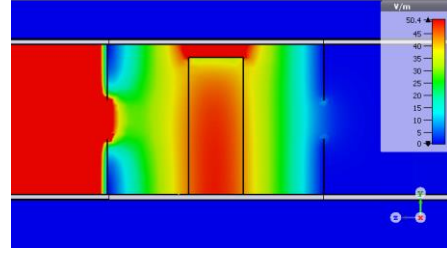


Şekil 2. Dielektrik malzeme için yapılan benzetimin bir görüntüsü.

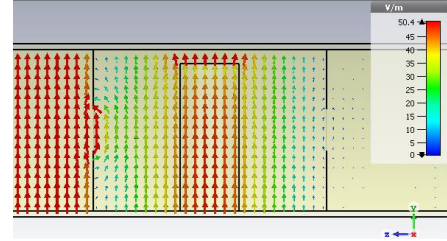
Benzetimler sırasında referans nokta sayısı olarak 9001 nokta alınmıştır. Bu sayede rezonans civarında daha fazla nokta olması sağlanmış ve sonuçların daha doğru olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Malzeme sarsımı yöntemiyle EM parametrelerin hesabında Eş.(16)'daki  $A$  ve  $B$  katsayılarının hesaplanabilmesi için gereken dielektrik referans malzemesi olarak da teflon seçilmiştir. Referans olarak seçilen malzemelerin hata oranları yöntemden dolayı tespit edilemeyeceği için kayıt altına alınmamıştır.



(a)



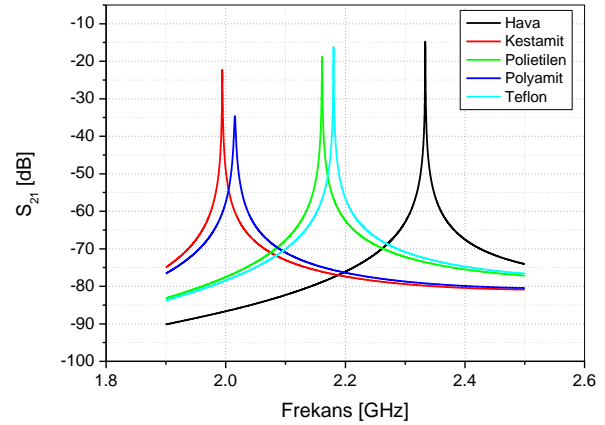
(b)



(c)

Şekil 3. Rezonatör içerisinde, a)  $x$ - $z$  düzlemindeki  $E$ -alan şiddeti, b)  $y$ - $z$  düzlemindeki  $E$ -alan şiddeti dağılımı ile c)  $y$ - $z$  düzlemindeki  $E$ -alan çizgileri.

Şekil 4'de benzetimi yapılan dielektrik malzemelerin  $S_{21}$  rezonans eğrileri verilmiştir.

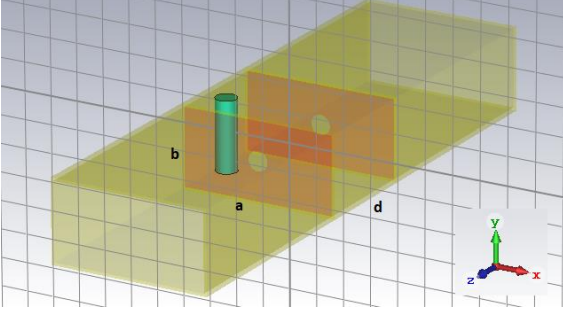


Şekil 4. Benzetimlerden elde edilen dielektrik malzemelerin  $S_{21}$  rezonans eğrileri.

Manyetik malzemelerin benzetimleri için ise Şekil 5'te gösterildiği gibi 15 mm çapında 50 mm uzunluğundaki ölçülerde silindirik malzemeler seçilmiş ve manyetik alana fazlaca maruz kalınması için Şekil 6'da görüldüğü üzere  $H$ -alan şiddetinin en fazla olduğu noktaya konumlandırılmıştır. Buna göre malzemenin konumu, rezonatörün  $y$ - $z$  düzleminin merkezinde sol yan duvarın hemen yanında  $(x, y, z) = (0, y, d/2)$  koordinatları olur ve Eş.(20)'den bu konumdaki alan değerleri,  $E_y = 0, H_x = 0, H_z = j\pi D/k\eta a = H_{z_{max}}$  şeklinde olmaktadır. Bu yerleşimde TE<sub>101</sub> modunda örnek boyunca  $H$ -alan şiddetinin maksimum ve  $E$ -alan şiddetinin sıfır olduğu,

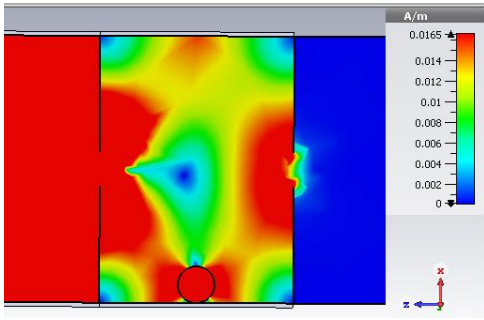


hem alan hesabından hem de Şekil 3 ve Şekil 6'daki alan şiddeti dağılımlarından görülmektedir [11]. Malzeme sarsımı yöntemiyle EM parametrelerin hesabında Eş.(17)'deki  $A$  ve  $B$  katsayılarının hesaplanabilmesi için de gereken manyetik referans malzemesi olarak da  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  yapısında bir ferit seçilmiştir.

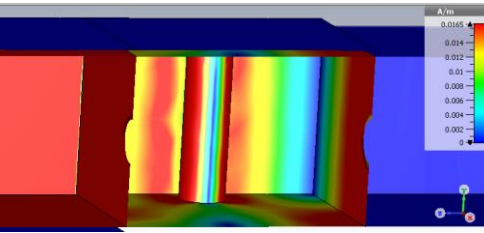


Şekil. 5. Manyetik malzeme için yapılan benzetimin bir görüntüsü.

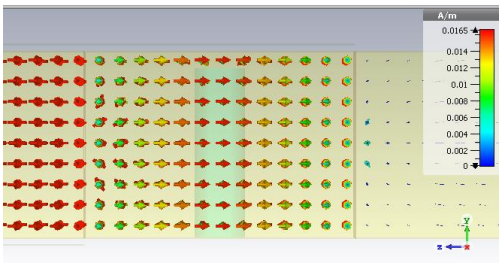
Şekil 7'de ise benzetimi yapılan manyetik malzemelerin  $S_{21}$  rezonans eğrileri verilmiştir.



(a)

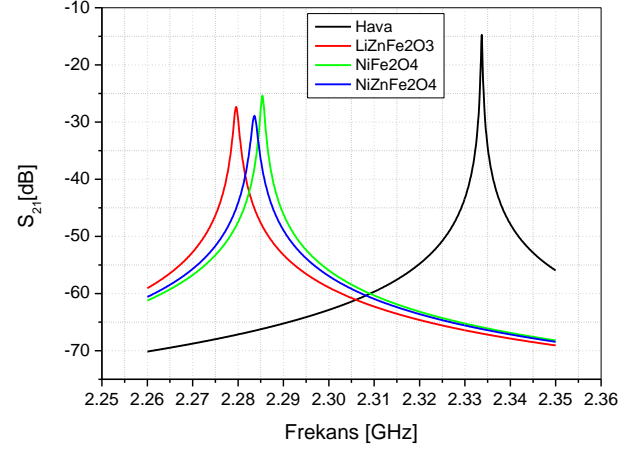


(b)



(c)

Şekil. 6. Rezonatör içerisinde, a)  $x$ - $z$  düzlemindeki  $H$ -alan şiddeti, b)  $y$ - $z$  düzlemindeki  $H$ -alan şiddeti dağılımı ile c)  $y$ - $z$  düzlemindeki  $H$ -alan çizgileri.



Şekil. 7. Benzetimlerden elde edilen manyetik malzemelerin  $S_{21}$  rezonans eğrileri.

#### 4. MATLAB Kodu ile Geçirgenliklerin Hesaplanması

Manyetik malzemelerin de EM parametrelerini hesaplayabilmesi için revize edilen MATLAB kodu ile elektrik ve manyetik geçirgenliklerin hesaplanması aşağıda anlatıldığı gibi yapılmaktadır. Öncelikle Şekil 8'de bu kodun bir hesaplama sırasındaki GUI arayüzünün görüntüsü gösterilmektedir. Hesaplama için ilk olarak referans ve örnek malzemenin, benzetimler sonrasında elde edilen frekansa karşı  $S_{21}$  eğrileri noktalarını içeren txt uzantılı data dosyaları ve referans ve örnek malzemenin geometrik ölçüleri MATLAB koduna girilir. Malzeme geometrisi için ekranın sol tarafında, malzemenin kesit şekli (silindir, dikdörtgen ve diğer) seçilebilmektedir. Malzeme silindir veya dikdörtgen kesit şekillerinden birine sahipse, seçildiklerinde çap ve yükseklik (silindir için) veya kenar uzunlukları ve yükseklik (dikdörtgen prizma için) olacak şekilde mm cinsinden geometrik ölçüleri istenmektedir. Eğer örnek başka bir şekildeyse doğrudan ekrana hacminin girilmesi istenmektedir. Kod, bu girişlerden sonra "plot" butonuna basılınca örneğe ait rezonans eğrisini ekranda çizer ve otomatik olarak yarı güç frekansları ( $f_0, f_1, f_2$ ), bant genişliği  $BW$  ve kalite faktörü  $Q$  değerlerini hesaplar ve ekranda gösterir. Aynı anda kod hesaplanan bu değerleri kullanarak da malzeme sarsımı yöntemi için dielektrik ölçümü ise Eş.(16)'dan, manyetik ölçüm ise Eş.(17)'den  $A$  ve  $B$  katsayılarını ve karmaşık geçirgenliklerin ( $\epsilon$  veya  $\mu$ ) bileşenlerini ve ayrıca kayıp tanjant ( $\tan \delta_e$  veya  $\tan \delta_m$ ) değerlerini ekranda gösterir. Böylece elle oldukça uzun vakit alacak olan bant genişliği  $BW$  ve  $Q$  değeri hesaplamaları ve diğer hesaplamalar hızlı, hatasız ve otomatik olarak yapılabilmektedir.

## 5. Sonuçlar ve Tartışma

Benzetimlerden elde edilen  $S_{21}$  rezonans eğri noktalarının ve malzeme boyutlarının MATLAB koduna girilmesi ve kodun çalıştırılmasıyla elde edilmiş olan geçirgenlik ve buradan hesaplanan kayıp tanjant  $\tan \delta$ , a.c. iletkenlik  $\sigma$  ve kalite faktörü  $Q$  değerleri, dielektrik malzemeler için Tablo.1, manyetik malzemeler için ise ( $\sigma$  değeri hariç olarak) Tablo.2’de sunulmuştur.

Tablo 1’de dielektrik malzemeler için elde edilen  $\epsilon_r'$ ,  $\epsilon_r''$ ,  $\tan \delta_e$  ve a.c.  $\sigma$  değerleri ile literatürdeki değerler birlikte verilerek karşılaştırma yapılmıştır. Her örnek için  $\sigma$  değerleri Eş.(3)’ten hesaplanmıştır, burada  $f$  frekans değerleri rezonans frekansı olarak alınmıştır. Tabloda ayrıca Eş.(21) ile verilen yüzde hata oranları da hesaplanarak eklenmiştir.

$$\% \text{Hata Oranı} = \frac{|\epsilon_r'_{\text{literatür}} - \epsilon_r'_{\text{ölçüm}}|}{\epsilon_r'_{\text{literatür}}} \times 100 \quad (21)$$

Eş.(21)  $\epsilon_r'$  hata oranı içindir ve diğer nicelikler için de aynı şekilde hata oranları hesaplanır.

Bu kapsamda yapılan benzetimler sonucunda elektrik geçirgenliğin gerçek kısmı  $\epsilon_r'$ lerin hata oranlarının %1’den az olduğu, sanal kısımları  $\epsilon_r''$  lerde (ve  $\sigma$ ’larda) hata oranlarının ise %21 ile %52 arasında değiştiği gözlenmektedir.

Tablo 2’de ise manyetik malzemelerin elde edilen  $\mu_r'$ ,  $\mu_r''$ ,  $\tan \delta_m$  değerleri ile literatürdeki değerleri birlikte verilmiştir. Manyetik malzemelerin gerçek kısımları  $\mu_r'$ lerde,  $\text{LiZnFe}_2\text{O}_3$  için %29,  $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$  için ise %12 oranında hata oluşmuştur. Sanal kısımlar  $\mu_r''$ lerde ise  $\text{LiZnFe}_2\text{O}_3$  için %1,3,  $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$  için ise %18 oranında hata oluşmuştur.

Ayrıca, boş rezonatörün benzetimle elde edilen rezonans frekans değeri 2331,8 MHz olarak bulunmuş olup Eş.(19) ile teorik olarak hesaplanan 2332,8 değerine, Eş.(21) ile hesaplanan % 0,043 hatayla çok yakın çıkmıştır.

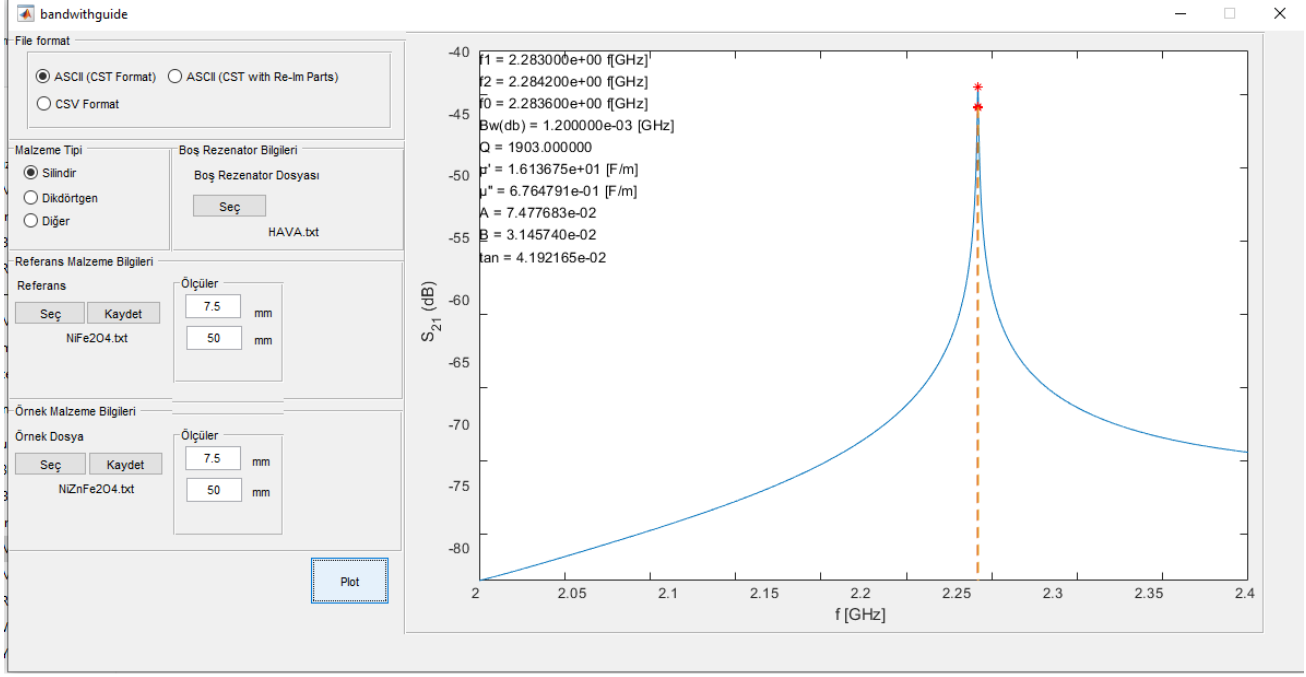
$R$ -bant boşluk rezonatöründe dielektrik malzemelerin  $E$ -alana, manyetik malzemelerin  $H$ -alana paralel konumlandırılmasıyla buna ek olarak dielektrik malzemelerin  $E$ -alan şiddetinin maksimum,  $H$ -alan şiddetinin minimum olduğu konumda, manyetik malzemelerin ise tersi durumun geçerli olduğu konumda benzetimlerin yapılmasıyla ilgili alan bileşenine malzemelerin en fazla etkileşmesi sağlanmıştır. Böylece bulunan karmaşık  $\epsilon$  ve  $\mu$ ’nün bileşenleri, kayıp tanjant ( $\tan \delta_e$  veya  $\tan \delta_m$ ) ve a.c. elektrik iletkenlik  $\sigma$  değerleri literatürdeki değerlere yakın çıkmıştır. Elde edilen  $\sigma$

değerleri, beklendiği gibi  $\epsilon_r''$  değerleri arttıkça artmakta,  $Q$  değerleri de buna bağlı olarak azalmaktadır. Tablo 1 ve 2’ye bakıldığında parametrelerin sanal kısımlarındaki hataların gerçek kısımlara göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum [4] ve [6]’da elde edilen sonuçlarla uyumludur. Hatanın sanal kısımlarında gerçek kısımlara göre fazla olmasının sebebi, sanal kısım değerlerinin gerçek kısma göre çok daha küçük olması ve sistem hassasiyetinin yetmemesi olabilir. Hatanın azaltılması rezonatör metoduyla pek mümkün görünmemekle beraber farklı bir metotla ölçümlerin yapılması sanal kısımlardaki hatanın az bulunmasına yardım edebilir.

Şekil 4 ve Şekil 7’deki, incelenen örnekler için  $S_{21}$  rezonans eğrileri ve Tablo 1 ve 2’de elde edilen değerler incelendiğinde, yöntem kısmının sonunda da belirtildiği gibi, daha kayıplı malzemelerin  $S_{21}$  eğrilerinin, beklendiği gibi daha düşük genlikli ve yayvan oldukları yani daha düşük  $Q$  değerine sahip oldukları gözlemlenmektedir. Daha az kayıplı malzemelerin  $S_{21}$  eğrileri ise tersine, yüksek genlikli ve keskin yani yüksek  $Q$  değerine sahiplerdir.

Daha önce bölümümüzde yapılan tezde sadece dielektrik malzemelerin benzetimleri incelenmiş ve zaman alanında (domeninde) benzetimler yapılmıştı [6]. Ancak bu çalışmada daha kararlı olan frekans alanında benzetimler yapılarak daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca [6]’da malzemeler geniş bir disk şeklindeydi ve  $E$ -alana en fazla olacak şekilde maruz kalamıyordu nedeni ise  $TE_{101}$  modunda  $E$ -alanının  $x$ -ekseninde sinusoidal bir dağılıma sahip olması ve merkezde maksimum olması,  $H$ -alanının ise merkezde sıfır ancak merkezden uzaklaştıkça artmasıdır yani kosinüsoidal bir dağılıma sahip olmasıdır (Şekil 3 ve Eş.20). Bu çalışmada malzeme geometrisi olarak uzun bir silindir seçilmiş ve rezonatörün merkezine yerleştirilmiştir. Dolayısıyla [6]’ya göre daha fazla  $E$ -alanına ve en az da  $H$ -alanına maruz kalmaktadır. Bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar [6]’dakilerle Tablo 3’de karşılaştırılmıştır ve görüldüğü gibi çoğu sonuçlarda iyileştirme sağlandığı gözlemlenmektedir.

Tüm elde edilen bu sonuçlar, deneyler öncesinde, benzetimler yardımıyla, dielektrik ve manyetik malzemelerin geçirgenliklerinin hesaplanmasında kullanılan malzeme sarsımı yönteminin çalıştığını ve malzeme şekillerinin ve rezonatörde yerleşim biçimlerinin doğru olarak seçildiğini göstermiştir.



Şekil 8. EM parametrelerin hesaplandığı MATLAB kodunun GUI arayüzü.

Tablo 1. Dielektrik malzemelerin benzetim ve literatür değerleri ile hata oranları.

	Benzetim Değerleri					Literatür Değerleri [12, 13]				Yüzde Hata Oranları			
	$Q$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\tan \delta_e$	$\sigma$ [S/m]	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\tan \delta_e$	$\sigma$ [S/m]	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\tan \delta_e$	$\sigma$ [S/m]
Polietilen	5402,5	2,25	0,00043	0,00019	$0,51 \times 10^{-4}$	2,25	0,00090	0,00040	$1,08 \times 10^{-4}$	% 0,0	% 52	% 52	% 52
Kestamit	3739,48	3,67	0,00106	0,00028	$1,17 \times 10^{-4}$	3,70	0,00148	0,00040	$1,64 \times 10^{-4}$	% 0,8	% 28	% 30	% 28
Polyamit	916,03	3,48	0,00730	0,00209	$8,25 \times 10^{-4}$	3,50	0,00945	0,00270	$10,58 \times 10^{-4}$	% 0,5	% 21	% 22	% 21

Tablo 2. Manyetik malzemelerin benzetim ve literatür değerleri ile hata oranları.

	Benzetim Değerleri				Literatür Değerleri [8, 9]			Yüzde Hata Oranları		
	$Q$	$\mu'_r$	$\mu''_r$	$\tan \delta_m$	$\mu'_r$	$\mu''_r$	$\tan \delta_m$	$\mu'_r$	$\mu''_r$	$\tan \delta_m$
LiZnFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2279,6	17,42	0,528	0,03033	24,62	0,521	0,02116	% 29	% 1,3	% 43
NiZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1903,00	16,13	0,676	0,04192	18,42	0,825	0,04478	% 12	% 18	% 6

Tablo 3. Dielektrik malzemelerin benzetimle elde edilen parametrelerinin, literatüre göre yüzde hata değerlerinin, [6]'daki değerlerle karşılaştırılması.

	Bu Çalışmada Elde Edilen Sonuçlar için % Hatalar		[6]'da Elde Edilen Sonuçlar için % Hatalar	
	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$
Polietilen	% 0,0	% 52	% 2	% 53
Kestamit	% 0,8	% 28	% 20	% 70
Polyamit	% 0,5	% 21	% 12	% 95



### Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

### Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

### Kaynaklar

- [1] Balanis C.A., 2020. Advanced Engineering Electromagnetics, 2nd ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [2] Balanis C.A., 1997. Antenna Theory Analysis and Design, 2nd ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [3] Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K., 2004. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization, 1st ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [4] Pozar D.M., 2012. Microwave Engineering, 4th ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [5] [https://academy.cba.mit.edu/classes/input\\_devices/meas.pdf](https://academy.cba.mit.edu/classes/input_devices/meas.pdf) (Erişim tarihi: 12 Kasım 2022)
- [6] Yıldırım, T. Ş., 2018. Mikrodalga Dielektrik Malzemelerin Dielektrik Geçirgenliklerinin R-Bant Dalga Kılavuzu Rezonatörü İle İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 535695.
- [7] Sucher M., Fox J., 1963. Handbook of Microwave Measurements, 3rd ed. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- [8] Raveendranath U., Mathew K.T., 1998. New Cavity Perturbation Technique for Measuring Complex Permeability of Ferrite Materials. Microwave and Optical Technology Letters, 18(4), 241-243.
- [9] Jha A.K., Akhtar M.J., 2015. Improved Resonator Method for Microwave Testing of Magnetic Composite Sheets. IEEE Transactions on Magnetics, 51(9), 1-9.
- [10] Durmuş, M., 2018. R-Bant Dikdörtgen Boşluk Rezonatörü İçin Uygun Uyarım Açıklık Yarıçapının Bulunması Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 522122.
- [11] Alhassoon K.A., Malallah Y., Daryoush A.S., Complex Permittivity and Permeability Extraction of Ferromagnetic Materials For Magnetically Tuned Microwave Circuits. IEEE Journal of Microwaves, 1(2), 639-645
- [12] <https://www.cst.com/> (Erişim tarihi: 12 Kasım 2022)
- [13] <http://www.polikim.com.tr/pdf/kestamid.pdf> (Erişim tarihi: 12 Kasım 2022)