

# Mikrodalga oyuklu rezonatörün gerçekleştirilmesi, analitik ve sayısal analizi

A. Sevinç AYDINLIK BECHTELER\*, Levent SEVGİ

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul

## Özet

*Bir yarı-simetrik oyuklu dalga kılavuzu rezonatörü 20 – 40 GHz frekans bandında kullanılmak üzere tasarlanmış ve duraleminyum kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rezonatör, biri düz diğeri ise dairesel oyuk içeren iki plakadan oluşmuştur. Uygun hareketli bir destek sistemine monte edilen rezonatörün, gerekli ölçüm düzeni de hazırlanarak, frekans spektrumu gözlenmiş, rezonans frekansları ve kalite faktörü ölçülmüştür. Oyuklu rezonatör, hem analitik ve hem de sayısal yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir. Kullanılan sayısal yöntem zamanda sonlu farklar (FDTD) yöntemidir. Ölçüm sonucu elde edilen rezonans frekansları, analitik ve sayısal yöntemlerden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Oyuklu dalga kılavuzu, oyuklu rezonatör, FDTD, mikrodalga, transfer rezonans metodu.

## Realization and analytical and numerical analysis of a groove type resonator at millimeter waves

### Abstract

*As an alternative to the classical waveguides, such as the H-waveguide and the rectangular waveguide, the Groove waveguide has been used at millimeter wavelengths for the last couple of decades. It has many advantages such as low-loss and higher power handling capacity. Here, in this study, a semi-symmetrical groove guide resonator based on groove waveguide structure is designed and fabricated. Instead of using the classical symmetrical shaped groove guide, a novel semi-symmetrical groove guide structure is presented for the first time. This semi-symmetrical structure was chosen because it is easier to fabricate and excite. The groove resonator which has one grooved plate and one plane plate, first analyzed analytically. Since exact solutions usually exist for idealized geometries, the closed resonator structure is taken into account first. The Green's function method is applied for different oriented line sources. Then the transverse resonance method is used for the open groove resonator. The numerical simulations are performed via the powerful time domain simulator FDTD (Finite Difference Time Domain). Both cartesian and cylindrical coordinate systems are used for FDTD calculations. Here, the purpose to use cylindrical coordinate is to calibrate cartesian coordinates for discretization. Then, a measurement setup which includes a movable support platform was established from 20 GHz to 40 GHz. The resonance frequencies and loaded quality factor are measured. Analytical and numerical results are compared with measurements and a good agreement was observed.*

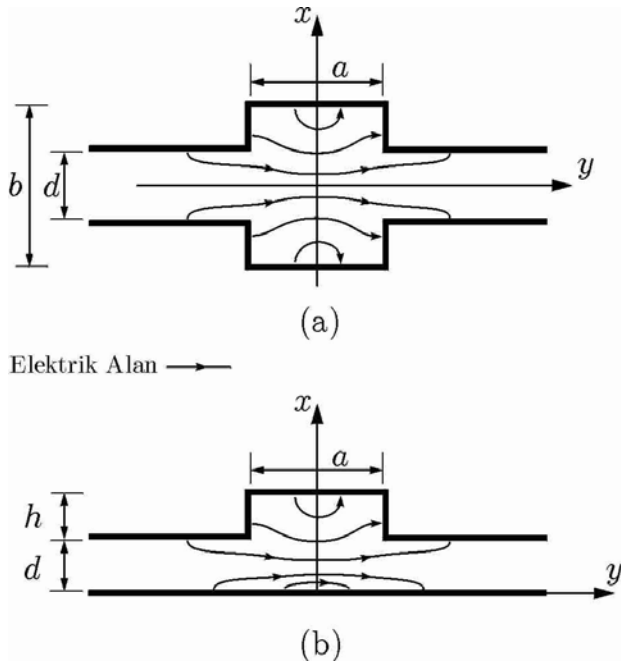
**Keywords:** Groove waveguide, groove resonator, FDTD, microwave, transverse resonance method.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Sevinç AYDINLIK BECHTELER. sevinc.a-b@gmx.de.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Design, simulation and experimentation of a semi-symmetrical groove guide resonator in millimeter wave band" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 18.07.2003 tarihinde dergiye ulaşılmış, 21.11.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.04.2004 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Tischer (1963) oyuklu dalga kılavuzunu H-dalga kılavuzu ve dikdörtgen dalga kılavuzu gibi klasik dalga kılavuzlarına bir alternatif olarak önermiştir. Bu kılavuzun oldukça düşük kayıp ve yüksek güç taşıma kapasitesi gibi önemli avantajları olup, bu özellik kılavuzun yan duvarlarının açık olması ve bu duvarlarda oluşan kayıpların azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu dalga kılavuzunda bulunan yarıklar elektromanyetik alanları oyuk içerisinde tutarak, kılavuzun açık kenarlarından dışarıya doğru sızmasını önlerler. Oyuklu dalga kılavuzu Şekil 1.a'da gösterildiği gibi iki paralel iletken plakanın simetrik olarak oyulmasından meydana gelmiştir. İki plaka arasında homojen bir dielektrik olan hava yer almaktadır. Şekil 1.b'de ise oyuklu rezonatörde kullanılan yarı-simetrik oyuklu dalga kılavuzu gösterilmektedir. Bu yapı ve tipik uygulama alanları literatürde yer alan çalışmalarda gösterilmiştir (Vertiy vd., 1996; Aydınlık vd., 1997).



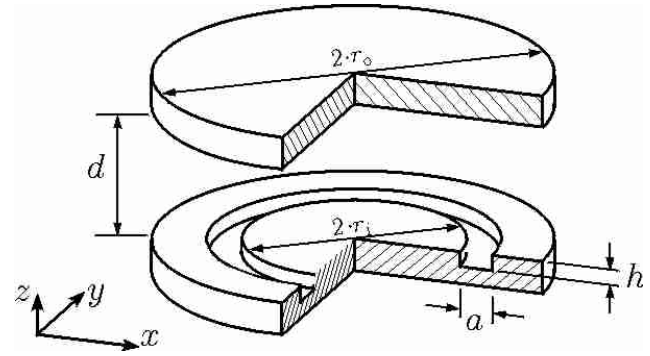
Şekil 1. (a) Simetrik oyuklu dalgakılavuzu kesiti  
(b) Yarı-simetrik oyuklu dalgakılavuzu kesiti

Bu tip yarı-simetrik yapının kullanılmasının ana nedeni, gerçekleşmesinde ve uyarımında getirdiği kolaylıklardır. Bu çalışmada, söz konusu yarı-simetrik oyuklu dalga kılavuzu yapısı temel alınarak gerçekleştirilen oyuklu rezonatör, analitik

ve sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca rezonans frekansları 20 – 40GHz frekans bandında ölçülmüştür.

## Oyuklu rezonatör yapısı

Pratik olarak gerçekleştirilen ve teorik olarak incelenen yarı-simetrik oyuklu rezonatör yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Dairesel yarı-simetrik oyuklu dalga kılavuzu rezonatörü: (üst) uyarma plakası, (alt) oyuklu plaka

20 – 40 GHz frekans bandında çalışmak üzere tasarlanan bu rezonatörün  $a$  genişliğinde ve  $h$  derinliğinde bir dairesel oyuğu vardır. Plakalar arası  $d$  mesafesi ayarlanabilir durumdadır. Böylelikle rezonatörün rezonans frekansı istenildiği gibi değiştirilebilir. Dairesellikten dolayı oluşacak radyasyon kayıplarını küçük tutmak için,  $2 \cdot r_i$  ve  $2 \cdot r_o$  çapları büyük tutulmuştur (Meissner, 1983). Oyuklu rezonatöre ait fiziksel parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Oyuklu rezonatör fiziksel parametreleri

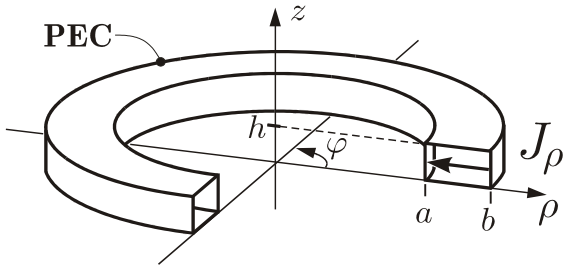
Parametreler	Değerleri (mm)	
oyuk derinliği ( $h$ )		3.65
oyuk genişliği ( $a$ )		7.10
iç çap ( $2 \cdot r_i$ )		42.0
dış çap ( $2 \cdot r_o$ )		80.0
plakalar arası mesafe ( $d$ )		ayarlanabilir

## Analitik hesaplamalar

Yarı-simetrik oyuklu rezonatörün teorik analizi rezonatörün iki ayrı durumu için aşağıda irdelenmiştir.

**(a) Kapalı rezonatör**

Yapının tam çözümü ancak rezonatör kapalı iken, (plakalar arası mesafe  $d = 0$  mm) elde edilebilmektedir. Bu durumda Green fonksiyonu yöntemi değişik kaynaklar için elde edilebilir. Burada diğer sayısal analiz ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırmanın yapılabilmesi açısından  $\rho$  doğrultusu boyunca yerleştirilmiş çizgisel kaynakla uyarım ele alınacaktır. Yarı-simetrik oyuklu rezonatör kapalı durumda iken Şekil 3’de gösterildiği gibi dikdörtgen kesitli dairesel bir rezonatör oluşturur.



Şekil 3. Kapalı durumda rezonatör yapısı

Dairesel rezonatör,  $\rho$  doğrultusunda  $a$  ve  $b$  noktalarında ( $a \leq \rho \leq b$ ),  $z$  doğrultusunda  $0$  ve  $h$  noktalarında ( $0 \leq z \leq h$ ) mükemmel iletken duvarlarla sınırlandırılmıştır.  $\varphi$  doğrultusunda ise  $0-2\pi$  arasında periyodiklik koşulu geçerlidir. Maxwell denklemlerinin silindirik koordinatlara uygulanması ve  $\rho$  doğrultusundaki çizgisel akım kaynağının:

$$\vec{J}_\rho = \vec{e}_\rho \cdot I_0 \delta(\varphi - \varphi_0) \delta(z - z_0) \quad (1)$$

uygulanması sonucunda iki boyutlu Green fonksiyonu:

$$\left[ \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right] G_\rho(\varphi, z; \varphi_0, z_0) = (\varphi - \varphi_0) \delta(z - z_0) \quad (2)$$

olarak elde edilir. Seçilen uyarım nedeni ile  $E_\varphi, E_z$  ve  $H_\rho$  sıfırdır. Böylelikle problem  $E_\rho, H_\varphi$  ve  $H_z$ ’in hesaplanmasına indirgenir. Sınır koşulları:

$$(i) \ z = 0 \ \text{ve} \ z = h \ \text{için} \quad G = 0$$

$$(ii) \ \rho = a \ \text{ve} \ \rho = b \ \text{için} \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} G = 0$$

$$(iii) \ G|_{\varphi=0} = G|_{\varphi=2\pi} \quad (\varphi \ \text{doğrultusunda}) \\ G'|_{\varphi=0} = G'|_{\varphi=2\pi} \quad \text{periyodiklik koşulu}$$

altında iki boyutlu Green fonksiyonu:

$$G(\varphi, z; \varphi_0, z_0) = G(\varphi, \varphi_0) \cdot G(z, z_0) \quad (3)$$

dönüşümü yapılarak değişkenlerine ayrılır.

$$\left[ \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + k_\varphi^2 \right] G_\rho(\varphi; \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0) \quad (4)$$

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_z^2 \right] G_z(z; z_0) = \delta(z - z_0)$$

Problem tek değişkenli iki Green fonksiyonu şeklinde çözülür. Sonuçta elde edilen öz fonksiyonlar:

$$F_1(\varphi, \varphi_0) = D \cdot \cos[\rho k_\varphi (\varphi - \varphi_0)] \\ F_2(z, z_0) = A \cdot \sin(k_z z) \quad (5)$$

şeklinindedir. Burada:

$$k_z = \frac{m\pi}{h} \ \text{ve} \ k_\varphi = \sqrt{k^2 - k_z^2} = \frac{n}{\rho} \quad (6)$$

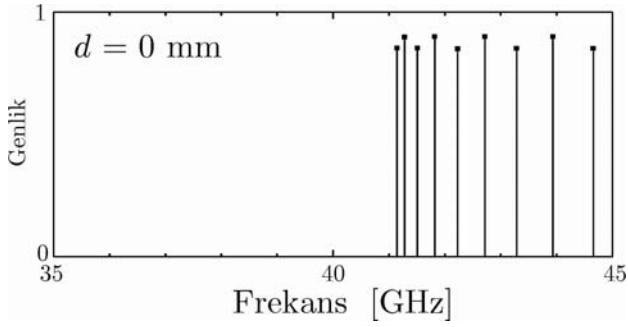
$z$  ve  $\varphi$  doğrultularındaki dalga sayılarıdır. Burada dalga yayılma doğrultusu  $\varphi$  doğrultusu olduğundan yayılma sabiti  $\beta = k_\varphi$ ’dir. Rezonatörün dominant modda ( $m=1$ ) rezonans frekanslarının bulunması:

$$\rho \cdot \beta = n \quad (7)$$

eşitliğini gerektirir. Bu durumda rezonans frekansları aşağıdaki denklem ile bulunur:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \left[ \left( \frac{n}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

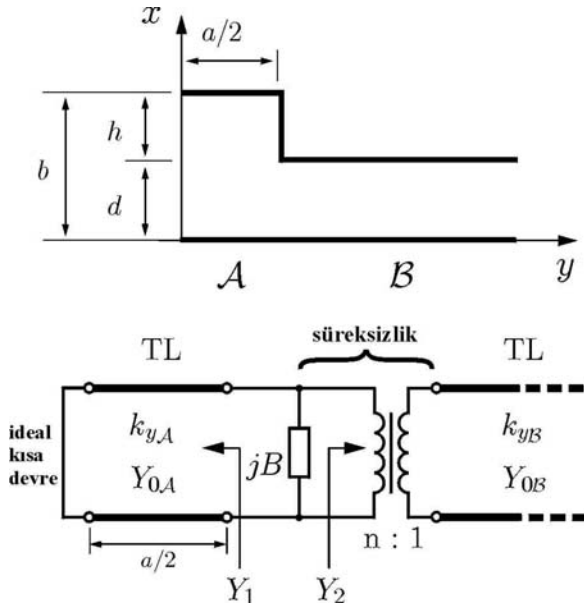
Yukarıdaki denklem kullanılarak elde edilen rezonans spektrumu Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Kapalı rezonatörün analitik olarak hesaplanan rezonans spektrumu

### (b) Açık rezonatör

Bu durumda rezonatörün analitik tam çözümü bulunamamıştır. Ancak bazı yaklaşıklıklarla çözüme varılabilir. Burada kullanılan yöntem, daha önceden simetrik oyuklu rezonatörün analizleri için kullanılan (Oliner ve Lampariello, 1985) transfer rezonans metodudur. Şekil 1.b'de  $z$  doğrultusunda  $xy$  kesiti verilen yarı-simetrik oyuklu dalga kılavuzu, aşağıdaki devre şeklinde modellenebilir.



Şekil 5. Yarı-simetrik oyuklu dalga kılavuzunun kesiti ve transfer rezonans eşdeğer devresi

Yarı-simetrik oyuklu dalga kılavuzu  $y=0$  noktasında  $x$  eksenine göre elektriksel olarak simetrik olup ( $E_x = 0$ ), Şekil 5'de yarı kesit gösterilmiştir. Kesitte görünen A ve B bölgeleri

paralel plakalı dalga kılavuzu olarak düşünülüp, eşdeğer devrede birer transmisyon hattı olarak gösterilmiştir. Bu transmisyon hatlarının karakteristik admitansları sırasıyla  $Y_{0A}$  ve  $Y_{0B}$ , dalga sayıları da  $k_{yA}$  ve  $k_{yB}$ 'dir. A ve B bölgeleri arasındaki süreksizlik  $n:1$  dönüşüm oranı olan bir transformatör ve buna paralel bir  $jB$  suseptansı ile modellenmiştir. Transfer rezonans koşulu devrede gösterilen üç paralel admitansın toplamının sıfıra eşitlenmesi ile elde edilir. Bu koşul sonuçta:

$$j \cot(k_{yA} \cdot a/2) = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{Y_{0B}}{Y_{0A}} + j \frac{B}{Y_{0A}} \quad (9)$$

olarak yazılır.  $Y_{0B}/Y_{0A}$ ,  $B/Y_{0A}$  ve  $n$  transformatör dönüştürme oranı bulunduğunda, yukarıdaki transfer rezonans eşitliği  $k_{yA}$  dalga sayısına bağlı olarak çözülebilir. Transmisyon hat denklemleri kullanılarak bu eşitlik:

$$\frac{Y_{0B}}{Y_{0A}} = j \frac{k_{yA}}{k_{yB}} \quad (10)$$

şeklinde bulunur. Dönüştürme oranı  $n$  ise, süreksizliğin her iki tarafındaki gerilimlerin bulunması ve oranlanması ile:

$$n = \frac{U_{0A}}{U_{0B}} = \left(\frac{d}{b}\right)^{3/2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi d}{2b}\right)}{1 - (d/b)^2} \quad (11)$$

elde edilir.  $B/Y_{0A}$  oranı daha önceki yazarların (Oliner ve Lampariello, 1985) empririk olarak ölçüm verilerinden elde ettiği:

$$\frac{B}{Y_{0A}} = 0.55 \cdot k_{yA} \cdot \frac{2b}{\pi} \cdot \cot^2\left(\frac{\pi d}{2b}\right) \quad (12)$$

şeklinde yarı-simetrik yapıda da kullanılabilir.

Yukarıdaki denklemler kullanılarak sonuç dispersiyon bağıntısı dalga sayıları  $k_{yA}$  ve  $k_{yB}$ 'ye bağlı olarak bulunur. Eğer dalga sayıları:

$$k_{yA}^2 = k_0^2 - \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \beta^2 \quad (13)$$

$$k_{yB}^2 = -k_0^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 + \beta^2 \quad (14)$$

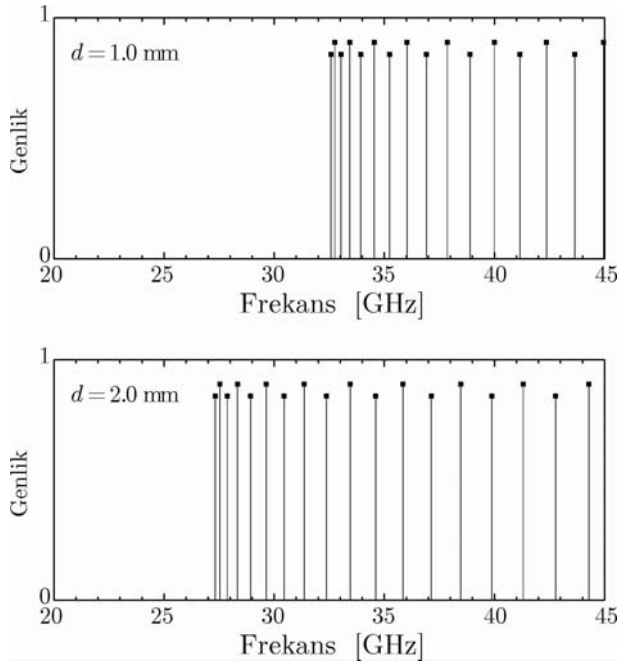
bulunan dağılım eşitliğinde yerlerine yerleştirilirse, frekansa bağlı olarak yayılım sabiti  $\beta(f)$ , plakalar arası mesafe  $d'$ 'ye bağlı olarak elde edilir.

### Rezonans koşulu

Dairesellikten dolayı açık rezonatörde oluşacak olası rezonansları belirleyen eşitlik:

$$2\pi r_{ort} = n \cdot \lambda = n \cdot \frac{2\pi}{\beta} \quad (15)$$

şeklinde kolayca verilebilir. Bu eşitlikte  $r_{ort}$ , dairesel yarığın ortalama yarıçapıdır. Bu rezonans koşulu kullanılarak,  $d = 1.0$  mm ve  $d = 2.0$  mm plaka mesafeleri için elde edilen rezonans spektrumları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Transfer rezonans metodu ile rezonatörün  $d = 1$  mm ve  $d = 2$  mm açıklıkları için hesaplanan rezonans spektrumları.

### Sayısal simülasyonlar

Burada kullanılan yöntem, elektromanyetik analizlerde yaygın olarak kullanılan Zamanda Sonlu Farklar (FDTD) yöntemidir. FDTD ile

geniş bantlı analizler tek bir simülasyon ile zaman domeninde elde edilebilir. Oyuklu rezonatörün sayısal simülasyonu, analitik analizde olduğu gibi kapalı ve açık rezonatör olarak iki kısımda yapılmıştır.

### Kapalı durum ( $d = 0.0$ mm)

Bu durumda FDTD simülasyonları kartezyen ve silindirik koordinat sistemlerinin her ikisinde de yapılmıştır. Silindirik koordinat sisteminin kullanılmasının nedeni, kartezyen koordinat sisteminde rezonatörü belirli bir hacime yerleştirirken yapılan ayrıklaşmayı kalibre etmektir. Sayısal analizde oyuklu rezonatörün kapalı durumu için kullanılan parametreler Tablo 2 ve Tablo 3'de kartezyen ve silindirik koordinatların her ikisi için sırasıyla verilmiştir.

Tablo 2. Kartezyen koordinat parametreleri

parametreler	değerleri
$\Delta x$ hücre genişliği	0.2 mm
$\Delta y$ hücre genişliği	0.2 mm
$\Delta z$ hücre genişliği	0.2 mm
N adım sayısı	50000 adım

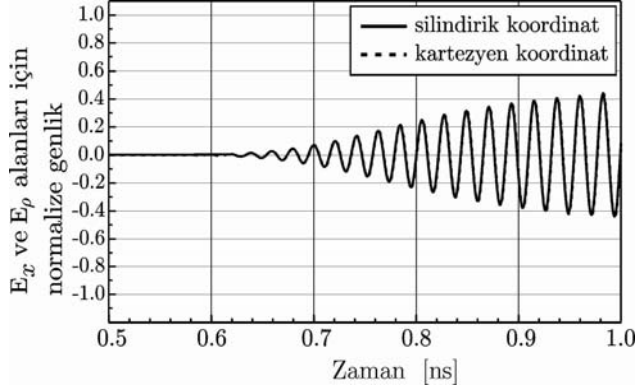
Tablo 3. Silindirik koordinat parametreleri

parametreler	değerleri
$\Delta \rho$ hücre genişliği	0.2 mm
$\Delta \varphi$ hücre genişliği	1°
$\Delta z$ hücre genişliği	0.2 mm
N adım sayısı	50000 adım

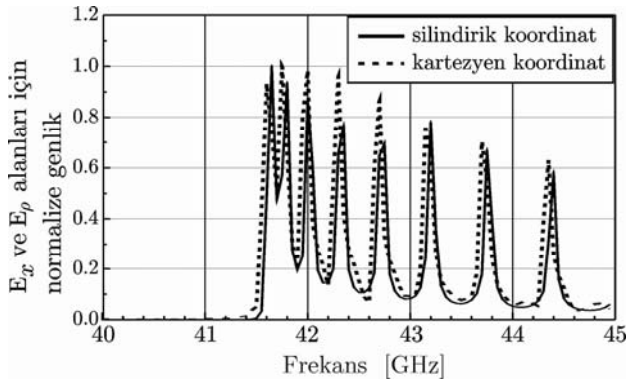
Yukarıdaki tablolarda birim hücre boyutları verilen rezonatör, ayrı ayrı bu koordinatlarda birer FDTD hacmi içerisinde tanımlanmıştır. Kullanılan kaynak her iki koordinatta da aynı olup, zamanda birinci türevi alınmış Gauss darbesidir ve  $E_\rho$  alan bileşeni şeklinde FDTD iteratif denklemlerine konumda  $z$  doğrultusu boyunca uygulanmıştır. Gözlem noktası, kaynak noktasından 180 derece ileride seçilerek yine  $E_\rho$  alan bileşeni şeklinde olması sağlanmıştır.

Hazırlanan programlar tablolarda da belirtildiği gibi 50000 adım boyunca koşturularak, frekans domeninde çözünürlüğün yaklaşık 50 MHz olması sağlanmıştır (Burada zaman adımı  $\Delta t = 0.385$  ps). Daha sonra elde edilen veriler

ayrık Fourier dönüşümü ile frekans domenine aktarılmıştır. Şekil 7 ve Şekil 8 sırası ile zaman ve frekans domeninde her iki koordinattan elde edilen sonuçları üstüste vermektedir.



Şekil 7. Zaman domeninde kapalı rezonatör simülasyon sonuçları



Şekil 8. Frekans domeninde kapalı rezonatör simülasyon sonuçları

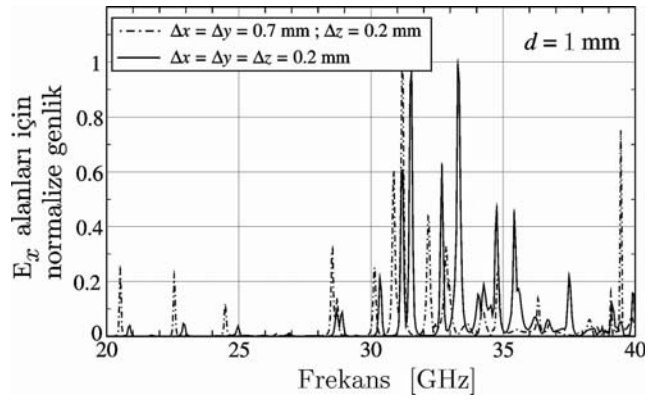
Şekil 7 ve Şekil 8'de görüldüğü gibi kartezyen koordinat simülasyon sonuçları silindirik koordinasyon simülasyon sonuçları ile oldukça iyi uyumaktadır. Bu durumda kartezyen koordinatlarda daha ileride açık rezonatör için yapılan simülasyonlarda Tablo 2'de kullanılan parametre değerleri kullanılabilir.

#### Açık durum ( $d \neq 0$ )

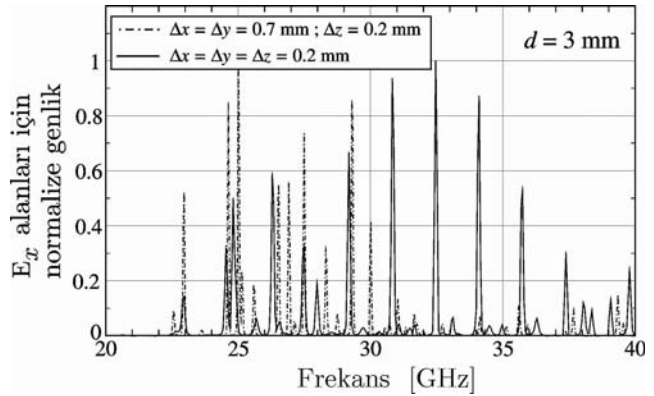
Oyuklu rezonatör plakaları arası mesafe değiştirilerek ( $z$  doğrultusundaki hücre sayısı artırılarak) kartezyen koordinat sisteminde simülasyonlar yapılmıştır. Kullanılan kaynak cinsi, kaynak ve gözlem yerleri kapalı durumda kullanılanlarla aynıdır.

Ayrıklaştırmadan dolayı oluşan hataların gözlenmesi için simülasyonlar  $\Delta x = \Delta y = 0.7$  mm ve  $\Delta z = 0.2$  mm hücre boyutunda tekrarlanmıştır. İki değişik ayrıklaştırma ile yapılan simülasyon sonuçları  $d = 1.0$  mm ve  $d = 3.0$  mm için frekans domeninde üst üste çizdirilmiştir.

Şekil 9 ve Şekil 10'da görüldüğü üzere, ayrıklaştırmada birim hücre boyutunun büyütülmesi sayısal analizde hataları arttırmaktadır. Ayrıca plakalar arası mesafenin artırılması ile rezonatör rezonans frekanslarının beklendiği gibi daha düşük frekanslara doğru kaydığı simülasyon sonuçlarından gözlenmektedir.



Şekil 9. Plakalar arası mesafe  $d = 1$  mm için simülasyon sonuçları

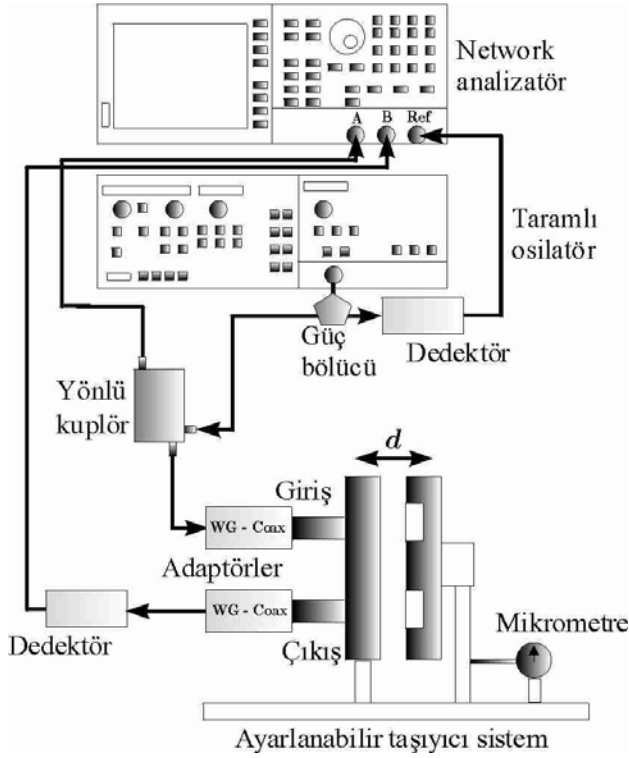


Şekil 10. Plakalar arası mesafe  $d = 3$  mm için simülasyon sonuçları

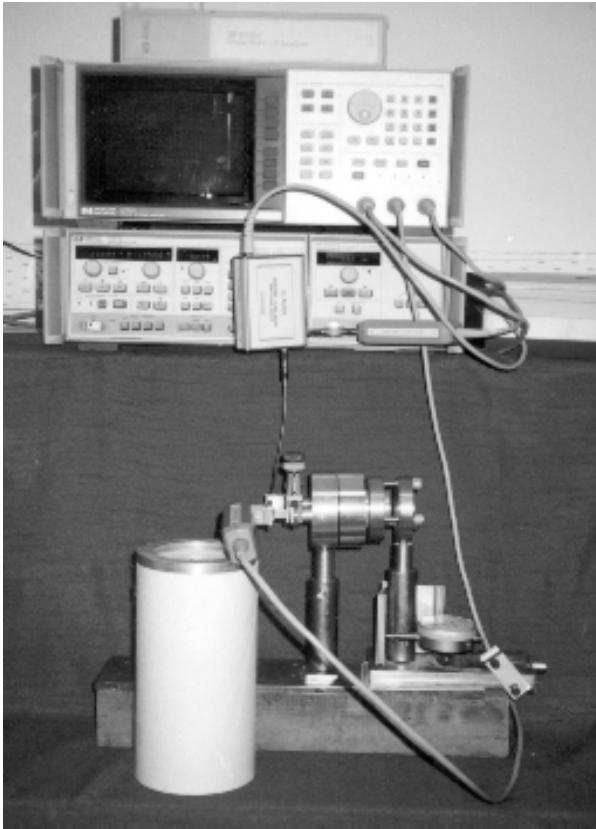
#### Oyuklu rezonatör ölçümleri

Oyuklu rezonatörün frekans spektrumunun gözlenmesi ve rezonans frekanslarının belirlenmesi amacı ile Şekil 11 ve 12'de gösterilen ölçüm düzeneği kurulmuştur.

*Mikrodalga oyuklu rezonatörün gerçekleştirilmesi.*

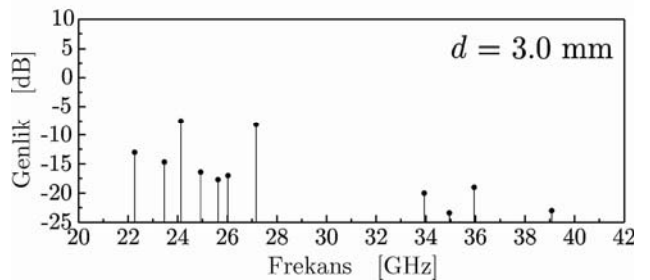
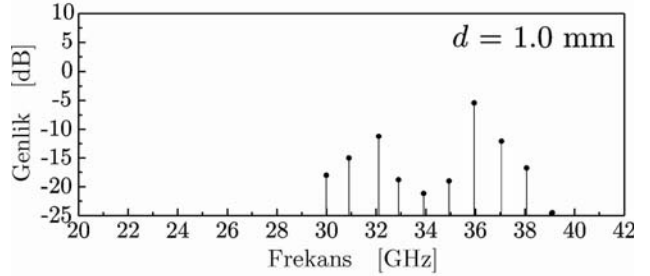
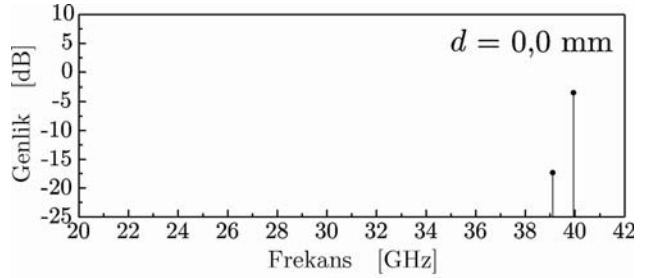


*Şekil 11. Şematik olarak ölçüm düzeneği*



*Şekil 12. Ölçüm düzeneğinin fotoğrafı*

Şekil 11 ve 12’de gösterilen ölçüm düzeneği 20 – 40 GHz frekans bandında çalışmaktadır. Oyuklu rezonatör plakaları yatay olarak hareket edebilir bir taşıyıcı sistem üzerine monte edilmiştir. Hareket miktarı sistem üzerine yerleştirilen bir mikrometre ile ölçül-mektedir. Sistem, rezonans frekansları ölçüm-lerinden önce yine aynı frekans bandında kalibre edilmiştir. Değişik plaka mesafeleri için ölçümler yapılmıştır. Şekil 13’de plakalar arası mesafe  $d = 0.0$  mm,  $d = 1.0$  mm ve  $d = 3.0$  mm için gözlenen rezonans spektrumları verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere plakalar arası mesafe arttırıldıkça rezonans frekansları daha düşük frekanslara doğru kaymaktadır.



*Şekil 13. Plakalar arası mesafe  $d = 0.0$  mm,  $d = 1.0$  mm ve  $d = 3.0$  mm iken ölçümle elde edilen rezonans spektrumları*

## Sonuçlar

Bu çalışmada oyuklu dalga kılavuzundan hareket edilerek, söz konusu kılavuzu temel alan yeni bir mikrodalga rezonatörü, dairesel oyuklu rezonatör gerçekleştirilmiştir (Aydınlik- Bechteler ve Sevgi, 2003). Rezonatörün plakalar arası mesafesi sıfır iken analitik çözümleri tam olarak elde edilebilmektedir. Bu durumda dairesel oyuklu rezonatör, dikdörtgen kesitli dairesel rezonatöre dönüşmekte ve çözümler silindirik koordinatlarda Green fonksiyonunun yazılması ve sınır koşullarının uygulanması ile tam olarak elde edilmektedir. Oyuklu rezonatör plakaları açık durumda iken tam çözüm bulunamamaktadır. Bunun analitik çözümleri için bazı yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır. Burada transfer rezonans yöntemi oyuklu rezonatöre uygulanmıştır. Dalga yayılım doğrultusuna dik olan kesit için transmisyon hattı eşdeğer devresi elde edilmiştir. Bu kesitteki süreksizlik bir transformatör ve buna paralel bir admitansla modellenmiştir. Yapı, ayrıca sayısal olarak FDTD metodu kullanılarak incelenmiştir. Analitik yöntem ile elde edilen rezonans frekansları, sayısal ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırıldığında birbirleri ile uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Spektrum-larda oluşan frekans kaymaları ve uyumsuzlukların nedenlerinin yöntemlerdeki aşağıda belirtilen noktalardan kaynaklandığı düşünülmektedir:

1. *Analitik Yöntem:* Kullanılan transfer rezonans metodunda elde edilen çözüm, yaklaşık bir çözümdür.

2. *Sayısal Yöntem:* Dairesellikten dolayı kartezyen koordinatta yapıyı tanımlarken oluşan 0.1 mm'lik ayrıklaşma hatası, nümerik analizde rezonans frekanslarını yaklaşık 300 MHz kaydırmaktadır.

3. *Ölçümler:* Ölçüm sisteminin kalibrasyonunda uyarı yarıkları kalibrasyona dahil edilememiştir. Uyarı yarıklarını rezonatörün düz plakasına

yerleştirirken yapılabilecek mikronlar mertebesindeki kaymalar istenilen moddan başka karışık bir modun uyarılmasına neden olabilir. Bu da farklı frekanslarda rezonanslar ortaya çıkarabilir.

Rezonatör uygulama alanı olarak geniş bir frekans bandında seçilebilirlik gerektiren yerlerde kullanılabilir. Plakalar arası mesafeyi değiştirerek frekans bandında ve dolayısıyla rezonans frekanslarında ayarlamalar yapılabilir. Bununla ilgili bir Diplexer uygulaması (Aydınlik, Vertiy, Gavrilov ve Samedov, 1997) daha önceden gösterilmiştir.

## Kaynaklar

- Aydınlik-Bechteler, A. S. ve Sevgi, L., (2003). Design and Numerical Simulation of a Semi-Symmetrical Groove Type Resonator at Millimeter Waves, *IEEE EMC 2003 Symposium*, May 11-15, 2003, Istanbul, TURKEY.
- Aydınlik, A. S., Vertiy, A. A., Gavrilov, S. P., Samedov, S., (1997). Circular Groove Guide and it's Application for Groove Diplexer at mm Waveband, *ICECS'97, December 15-18, Cairo, Egypt*, 963-966.
- Kunz, K. S. ve Luebbers, R. J., (1993). *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press.
- Meissner, J., (1983). Radiation Losses of E-Plane Groove-Guide Bends, *Electronics Letters*, 19, 14, 527-528.
- Oliner, A. A. ve Lampariello, P., (1985). The Dominant Mode Properties of Open Groove Guide: An Improved Solution, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 33, 9, 755-763.
- Tischer, F. J., (1963). The Groove Guide, a Low-Loss Waveguide for Millimeter Waves, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, September, 291-296.
- Vertiy, A. A., Gavrilov, S. P., Aydınlik, A. S., Samedov, S., (1996). Circular Groove Shaped Resonator for Millimeter Waves, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 17, 10, 1613-1637.