



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ



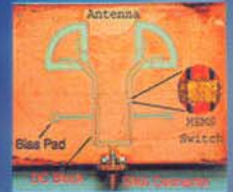
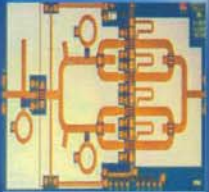
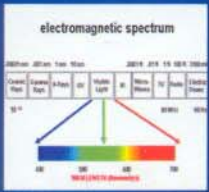
TÜBİTAK

# URSI-TÜRKİYE 2006

UNION RADIO SCIENTIFIQUE  
INTERNATIONALE

TÜRKİYE ULUSAL KOMİTESİ

3. BİLİMSEL KONGRESİ



6-8 EYLÜL 2006  
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
BEYTEPE YERLEŞKESİ  
ANKARA



## DESTEKLEYEN KURULUŐLAR



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ



TÜBİTAK



SİSTAŐ Sayısal İletişim  
Sanayi ve Ticaret



DEĞERLİ KATKI VE DESTEKLERİNİZE TEŐEKKÜR EDERİZ.

# Dairesel Dalga Kılavuzlarının 2 Boyutlu FDTD Yöntemi İle Modellenmesi

Yavuz EROL, Hasan H. BALIK  
Fırat Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
23119 Elazığ  
[yerol@firat.edu.tr](mailto:yerol@firat.edu.tr), [hasanbalik@gmail.com](mailto:hasanbalik@gmail.com)

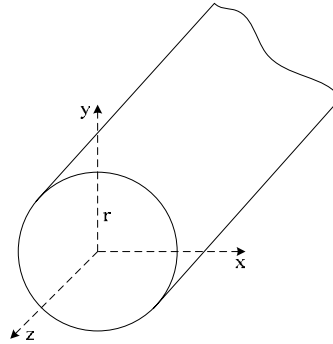
**Özet:** Bu çalışmada 2 boyutlu FDTD yöntemi ile WC-94 adlı dairese dalga kılavuzunun modellenmesi gerçekleştirilmiştir. TM ve TE modu için ayrı ayrı yapılan simülasyonlar ile kılavuzun zaman ve frekans cevapları elde edilmiştir. Problem uzayı büyük ve küçük hücrelerden oluşan ızgaralara bölünerek mod kesim frekanslarının doğrulukları karşılaştırılmıştır.

## 1. Giriş

Elektromanyetik problemlerin çözümü için sayısal yöntemler geli tirmek ve mevcut yöntemlerin doğruluklarını iyile tirmek önemli bir çalışma konusudur. FDTD yöntemi üzerinde yapılan iyile tirmelerden en önemlisi ızgaralama teknikleri ile ilgilidir. Literatürde büyük, küçük ve alt ızgaralama konusunda pek çok çalışma bulunmaktadır [1-2]. Özellikle dikdörtgen ve dairese kesitli dalga kılavuzlarına ait modellemeler, geliştirilen FDTD algoritmalarının doğruluğunun test edilmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

## 2. Dairesel dalga kılavuzu

Şekil 1’de görülen dairese kesitli dalga kılavuzu mikrodalga bandında pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Bir dairese dalga kılavuzunun analizi, kılavuzun dairese kesitinde kutupsal koordinatlarda iki boyutlu Helmholtz denkleminin çözümünü gerektirir. Çözüm, Bessel fonksiyonlarını ve köklerini içerir. TM modu için kesim frekansları  $k_{nr}$  ile, TE modu için  $k_{nr}$  ile orantılıdır [3].



Şekil 1. Dairesel kesitli silindirik dalga kılavuzu

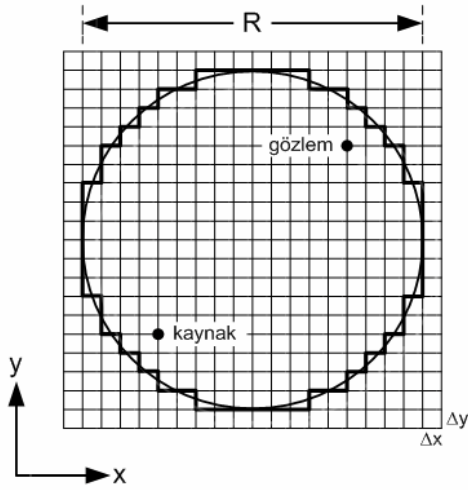
Denklem 1’den görüldü ü gibi, kılavuzda iletilebilecek elektromanyetik dalgaların mod kesim frekansları, kılavuzun yarıçapına,  $k_{nr}$  ve  $k_{nr}$  katsayılarına ba lıdır.

$$f_{c,TE} \approx \frac{c}{2\phi} \sqrt{k_{nr}^2 - \frac{1}{r^2}}, \quad f_{c,TM} \approx \frac{c}{2\phi} \sqrt{k_{nr}^2} \quad (1)$$

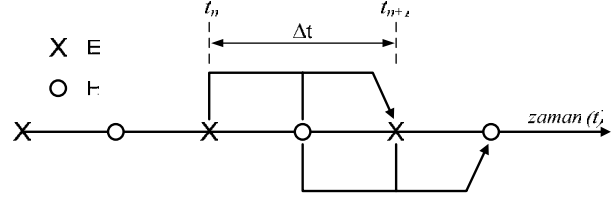
## 3. FDTD Simülasyonu

2 boyutlu FDTD simülasyonu için öncelikle modelleneyecek yapının boyutlarına uygun bir problem uzayı seçilir.

Şekil 2’den görüldü ü gibi yapı, birim Yee hücrelerinden oluşan çok sayıda ızgaraya bölünür. Kaynak olarak, darbe süresi maksimum frekansa göre ayarlanmış Gauss darbesi kullanılır. Gauss darbesi kılavuz içerisinde bir noktaya uygulanır ve gözlem noktası olarak seçilen başka bir noktadan ilgilenilen alan bile eni de erleri simülasyon süresi boyunca kaydedilir. FDTD döngüsü içerisinde sınır artları da dikkate alınarak elektrik ve manyetik alan bile enleri Şekil 3’deki zaman akı diyagramına göre iteratif olarak hesaplanır. Simülasyon süresi, hızlı Fourier dönü ümünde yeterli frekans çözünürlü ünü sağlayacak kadar uzun tutulur. Zaman cevabının Fourier dönü ümü alınarak dairese dalga kılavuzunun frekans cevabı elde edilir.



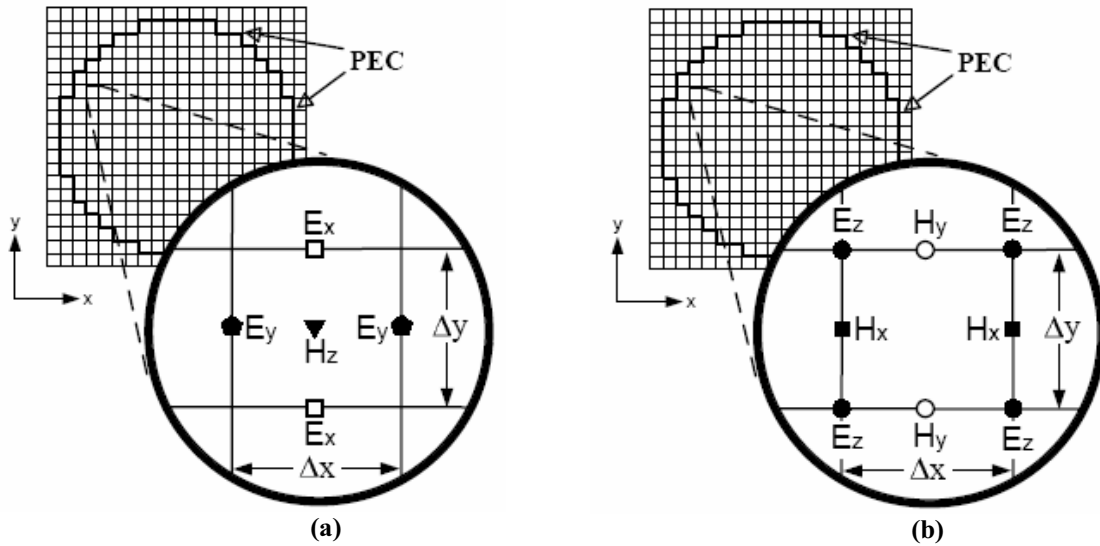
Şekil 2. FDTD problem uzayı



Şekil 3. FDTD zaman akı diyagramı

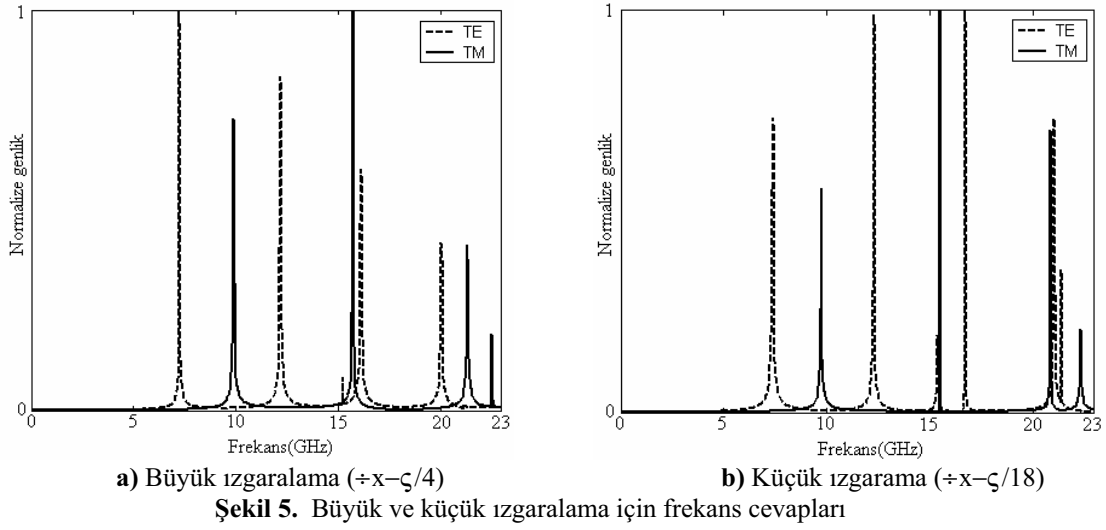
Bu çalışmada, yarıçapı 11.915mm olan WC-94 adlı dairesel dalga kılavuzunun 2 boyutlu modellemesi gerçekleştirilmiştir. Kılavuz, X bandında (8-12 GHz) kullanılmakta olup kılavuzun dominant modu 7.377 GHz frekanslı  $TE_{11}$  modudur. Modelleme sırasında sayısal dispersiyona neden olmamak için hücre boyutu ( $\Delta x$ ) ile en küçük dalga boyu arasındaki oranı uygun şekilde seçmek gerekir. Bu oran, problem uzayının tamamen büyük ızgaralara bölündüğü durumda da istenen artırılmalıdır. Ayrıca, zaman adımı ( $\Delta t$ ), Courant kararlılık artışı gerektiren şekilde seçilmelidir [4].

2 boyutlu modellemede alan bileşenlerinin yerleşimi TE ve TM modları için farklıdır. Bu durum şekil 4'de görülmektedir. Dairesel kılavuzun dış kenarlarında uygun sınır şartları tanımlayarak elektrik alanın teğetsel bileşenini sıfıra eşitlemek gerekir. Böylece kılavuzun dış duvarları mükemmel iletken tabaka (PEC) ile kaplanmıştır.



Şekil 4. a) TE modu bileşenleri  
b) TM modu bileşenleri

Problem uzayının  $20 \times 20$  hücreden oluştuğu büyük ızgaralama durumu için FDTD simülasyonuna ait parametreler şöyle seçilmiştir: Gauss darbesinin genişliği 66 ps,  $\Delta x = \Delta y = 1.3238$  mm,  $\Delta t = 2.206$  ps ve simülasyon süresi  $10000 \Delta t$ . Şekil 5a'da TM ve TE modu için elde edilen frekans cevapları görülmektedir. Şekil 5b'de ise  $80 \times 80$  hücreden oluşan küçük ızgaralama durumu için frekans cevapları görülmektedir. İkinci simülasyonda kullanılan parametreler şöyledir:  $\Delta x = \Delta y = 0.3309$  mm,  $\Delta t = 0.551$  ps ve simülasyon süresi  $40000 \Delta t$ .



#### 4. Sonuçlar

Tablo 1 ve 2’de FDTD simülasyonuna ait sonuçlar görülmektedir. Hücre boyutunun en küçük dalga boyunun yakla ık 4’de birine e it oldu u büyük ızgaralama durumunda FDTD sonuçları analitik sonuçlara yakın elde edilmiştir. Hücre boyutunun en küçük dalga boyunun yakla ık 18’de birine e it oldu u küçük ızgaralama durumunda ise dairenin e risel kısımları daha hassas modellendi inden çok daha do ru sonuçlar elde etmek mümkün olmu tur. Örne in, kılavuzun dominant modu olan  $TE_{11}$  modu için kesim frekansı büyük ızgaralama ile %1.7 hatalı hesaplanırken, küçük ızgaralama ile hata oranı %0.135 gibi dü ük seviyelerde kalmı tır.

TE modları	$k_{nr}$	Mod kesim frekansı (GHz) (Analitik)	Rezonans frekansı (GHz)	
			Büyük ızgaralama $\pm x - \zeta/4$	Küçük ızgaralama $\pm x - \zeta/18$
$TE_{11}$	1.841	7.377	7.251	7.387
$TE_{21}$	3.054	12.238	12.191	12.282
$TE_{01}$	3.832	15.355	15.228	15.364
$TE_{31}$	4.201	16.834	16.134	16.723
$TE_{41}$	5.317	21.306	20.032	21.029
$TE_{12}$	5.331	21.362	21.120	21.392

**Tablo 1.** TE modu için simülasyon sonuçları

TM modları	$k_{nr}$	Mod kesim frekansı (GHz) (Analitik)	Rezonans frekansı (GHz)	
			Büyük ızgaralama $\pm x - \zeta/4$	Küçük ızgaralama $\pm x - \zeta/18$
$TM_{01}$	2.405	9.637	9.880	9.744
$TM_{11}$	3.832	15.355	15.726	15.500
$TM_{21}$	5.136	20.581	21.301	20.848
$TM_{02}$	5.520	22.120	22.525	22.343

**Tablo 2.** TM modu için simülasyon sonuçları

#### Kaynaklar

- [1]. Epp L.W., Hoppe D.J. ve Kelley D.T., “A TE/TM modal solution for rectangular hard waveguides”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 54(3), s.1048-1054, 2006.
- [2]. Denecker B., Olyslager F., Knockaert L. and Zutter D. D., “Generation of FDTD subcell equations by means of reduced order modeling”, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 51(8), s.1806-1817, 2003.
- [3]. Inan U.S. ve Inan A.S., Electromagnetic Waves, Printice Hall, A.B.D., 2000.
- [4]. Taflove A., Computational Electrodynamics the Finite-Difference Time-Domain Method, Boston, 1995.