

DAİRESEL DALGA KILAVUZLARININ OPTİMİZE EDİLMİŞ İLETİM HATTI MATRİS MODELİ İLE TAM DALGA ANALİZİ

Ayhan AKBAL¹
Hasan H. BALIK²

Özet

Düşük frekanslarda kullanılan yaklaşımlar yüksek frekanslarda geçerli olmadığından analizde tam-dalga yöntemlerinin kullanılması bir zorunluluktur. İletim Hattı Matrisi Modeli (TLM) bir tam-dalga analiz yöntemi olup literatürde elektromanyetik olayların analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu modelde sınır şartlarından kaynaklanan yansıma, aşma, üst üste binme, bozulma, sinyal bütünlüğünün bozulması gibi çeşitli problemler ile karşılaşmaktadır. Bu çalışmada TLM yönteminde sınır şartlarının kolay uygulanabilmesi için optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyonun başarısını göstermek içinde örnek olarak analizi daha kompleks olan dairesel dalga klavusu kullanılmıştır. Bu yayında X bandında (8-12 GHz) kullanılan WC-94 adlı dairesel dalga kılavuzu TE ve TM modu için ayrı ayrı, optimize edilmiş TLM yöntemi ile analiz edilmiştir. Sonuçların doğruluğu ve sunulan optimizasyon yönteminin başarısı ayrıntıları ile sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *TLM, İletim Hattı, Dairesel Dalga Kılavuzu, Sınır Şartı*

¹ Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.

² İstanbul Arel Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.

1.GİRİŞ

İletim Hattı Matrisi (TLM) yöntemi elektromanyetik dalga analizlerinde oldukça sık kullanılan zaman domeni tekniklerinden biridir. TLM yöntemi doğrudan zaman-domeni cevabı vermesine rağmen furier analizi yardımı ile frekans domeni cevabı da kolaylıkla elde edile bilmektedir. Tekniğin bu avantajı nedeniyle bir çok problemin analizinde kullanılmaktadır^{1 2}. TLM analizlerinin sorunları sınır şartları, simülasyon süresi ve gerekli donanım (cpu, ram v.b.) ihtiyacıdır³. Sınır şartları yüksek frekanslarda yansıma, aşma, sınırlarda bozulma, sinyal bütünlüğü gibi bir çok problemi beraberinde getirmektedir. Bu nedenle sınır şartlarının uygulanması ve hesaplanmasında optimizasyonlar yapılarak simülasyon süresinin kısa olması ve daha doğru sonuç vermesi amaçlanmaktadır⁴

Bu çalışmada sınır şartlarında meydana gelen bozulmaları ve yansımaların etkisini yok etmek için optimizasyon yapılmıştır. Optimize edilmiş TLM yönteminin doğruluğunu ve hassasiyetini araştırmak için dairesel dalga kılavuzlarının tam dalga analizi yapılmıştır. Dairesel dalga kılavuzlarında TE ve TM modunda elektromanyetik dalgalar yayılabilmektedir. Dalga kılavuzları yüksek geçiren filtre gibi davranırlar. Yani belirli frekansın altındaki işaretleri iletmezler. Bu alt frekans, kesim frekansı (f_c) olarak adlandırılır ve değeri, kılavuz boyutlarına ve iletilecek moda göre belirlenir. Dalga kılavuzlarında f_c kesim frekansından daha yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar iki farklı moda sahip olabilir. Bunlar enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) modlarıdır. Kılavuzda, her biri farklı mod kesim frekansına sahip sonsuz sayıda

¹ J., J., Jokovic , B., D., Milovanovic , N.,S., Doncov, “TLM Analysis of a Cylindrical Metallic Cavity Excited with a Real-Feed Probe, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2005

² Q., Tang, Y., Wang, C., Christopoulos,” Simulation of the Transmission Line Effects Based on TLM Method”, IEEE, 2008

³ M., Panitz, J., Paul, ” A Fractional Boundary Placement Model Using the Transmission-Line Modeling (TLM) Method”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 57, no. 3, March 2009

⁴ J. Paul, C. Christopoulos, and D. W. P. Thomas, “Correction to “Timedomain modeling of electromagnetic wave interaction with thin-wiresusing TLM”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 50, no. 2, pp.450–451, May 2008

mod bulunur. Ancak mod kesim frekansının altında yüksek dereceli modlar oluşmaz. Uygulamada genellikle dalga kılavuzları tek bir modu iletecek şekilde tasarlanırlar. Bunun için

dairesel dalga kılavuzunun boyutlarının uygun şekilde seçilmesi ve iletilecek moda uygun bir uyarım yapılması gerekir. Dairesel dalga kılavuzlarının kesim frekansları bazı kabuller yaparak düşük frekanslar için her ne kadar analitik çözümleri yapılabilse de günümüzde kullanılan yüksek frekanslarda tam dalga analizleri yapılması gereklidir. Kullanılan yüksek frekanslarda hızlı ve kesin sonuç veren bir tekniğin kullanılması üretim verimliliğini arttıracaktır. Bu amaçla TLM'de optimizasyon yapılmış ve hızlı ve güvenilir bir yöntem oluşturulmaya çalışılmıştır. Yöntemin kesinliği ve doğruluğunu göstermek için boyutları belirli bir dairese dalga kılavuzu örnek alınmış, bu yöntemin tüm frekanslarda doğru sonuçlar vereceği gösterilmiştir.

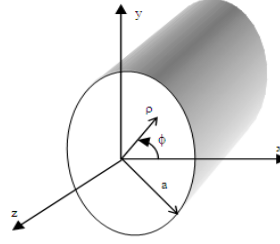
Örnek yapımız X bandında kullanılan ve baskın modu 7,377 GHz, yarıçapı 11.915mm olan WC-94 adlı dairese dalga kılavuzudur ve tam dalga analizi optimize edilmiş TLM yöntemi ile yapılmıştır. Dairesel dalga kılavuzları 3 boyutlu yapılardır ve kullanılan frekans bandına göre ölçüleri değişmektedir. Ancak kılavuzda iletilebilecek modun derecesini kılavuzun dik kesitinin ölçüleri belirlediği için iki boyutlu TLM yöntemi kullanılacaktır. Elde edilen sonuçlar ve çeşitli kabuller ile çözülmüş analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.DAİRESEL DALGA KILAVUZU

Şekil 1'de görülen dairese kesitli dalga kılavuzları elektromanyetik dalgaların kullanımının artmasına bağlı olarak pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Dairesel kesitli silindirik dalga kılavuzlarının analizleri silindirik koordinatlarda yapılması Kartezyen koordinatlara göre avantaj sağlamaktadır⁵. Bu nedenle kartezyen koordinatlarda çözümü gerçekleştirilen maxwell denklemleri silindirik koordinatlarda çözülmesi gerekmektedir. (1),

⁵ D., J., Griffiths(Çeviri: E., Bayraktar), "Elektromanyetik Teori", Gazi Kitabevi, ISBN: 9799758640828, 2005

(2), (3), (4) eşitliklerinde silindirik koordinatlarda maxwell denklemleri görülmektedir.



Şekil 1- Dairesel kesitli silindirik dalga kılavuzu

$$H_{\rho} = \frac{j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \quad (1)$$

$$H_{\phi} = \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial \rho} - \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad (2)$$

$$E_{\rho} = \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} - \frac{\omega \mu}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad (3)$$

$$E_{\phi} = \frac{-j}{k_c^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \quad (4)$$

Burada k , dalga numarası, β , faz sabitini göstermek üzere, $k_c^2 = k^2 - \beta^2$ dir. Silindirik koordinatlardaki Maxwell denklemleri, TE ve TM mod için ayrı ayrı çözülmesi gerekmektedir. Çözüm, Bessel fonksiyonlarını ve köklerini içermektedir.

TE mod için , H_z ifadesi (5)'de verilmiştir.

$$H_z(\rho, \phi, z) = [A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)] J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \quad (5)$$

TM mod için, E_z ifadesi (6)'da verilmiştir.

$$E_z(\rho, \phi, z) = [A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)] J_n(k_c \rho) e^{-jBz} \quad (6)$$

Dairesel kesitli silindirik dalga kılavuzlarının mod kesim frekanslarının hesaplanması için sınır şartlarının doğru uygulanması gerekmektedir.

TE modun da sınır şartı olarak $E_\phi(\rho, \phi, z) = 0$ ve $\rho = a$ olmalıdır. E_ϕ ifadesi (7) eşitliğinde verilmiştir.

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \quad (7)$$

(7) eşitliğine göre E_ϕ yeniden düzenlenirse (8) deki gibi Bessel fonksiyonları cinsinden ifadesi görülmektedir.

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} [A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)] k_c J_n'(k_c \rho) e^{-jBz} \quad (8)$$

TE mod için mod kesim frekansı, $f_{c,TE}$, (9)'daki gibidir.

$$f_{c,TE} = \frac{c}{2\pi} \cdot \frac{k_{nr}'}{a} \quad (9)$$

TM modu, mod kesim frekansının hesaplanması için kılavuzda sınır şartı olarak $E_z(\rho, \phi, z) = 0$ ve $J_n(k_c a) = 0$ olmalıdır. Sınır şartları uygulandığında TM mod için mod kesim frekansı, $f_{c,TM}$, (10)'daki gibidir.

$$f_{c,TM} = \frac{c}{2\pi} \cdot \frac{k_{nr}}{a} \quad (10)$$

(9) ve (10) denklemlerinden görüldüğü gibi kılavuzda iletilebilecek dalgaların TE ve TM modu, mod kesim frekansları k_{nr}' , k_{nr} ile kılavuzun yarıçapı ile orantılıdır. Sonuç olarak kesim frekanslarının hesabı dalga numaralarının hesabına bağlıdır ve bu hesap yüksek frekanslarda tam dalga analizi gerektirir.

3. İLETİM HATTI MATRİS MODELİ

İletim Hattı Matris Modeli (Transmission Line Modeling Method (TLM)) hemen hemen her türlü elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan en önemli zaman domeni tekniklerinden biridir⁶. TLM yöntemi temel olarak devre mantığına dayanmaktadır ve üç boyutlu fiziksel problem uzayını çok sayıda küçük hücrelerin toplamı şeklinde ele almaktadır⁷. Bu hücreler yapısal olarak özdeşdir. Her bir hücre bir iletim hattı gibi düşünülür ve hücrelerin bir araya seri veya paralel bağlanarak ilişkilendirilmesi ile çözüme gidilir⁸. İletim hatlarının hat akımı ve gerilimleri cinsinden hat diferansiyel denklemleri çıkarılarak maxwell denklemleri ile eşleştirilerek maxwell denklemleri ile iletim hatları diferansiyel denklemleri arasındaki ilişki kurulmaktadır⁹. (11),(12)'de iki boyutu TLM hücresinin gerilim ve akım bağıntıları görülmektedir.

$$\frac{\partial V_y}{\partial x} = -L \frac{\partial I_x}{\partial t}, \quad \frac{\partial V_y}{\partial z} = -L \frac{\partial I_z}{\partial t} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} = 2LC \frac{\partial^2 V_y}{\partial t^2} \quad (12)$$

⁶ M., O., Özyalçın, L., Sevgi, E., Topuz, " İletim Hattı Matrisi yöntemi ile ekranlama etkinliği ve özgül soğurma oranı hesabı", İTÜ_ Mühendislik Dergisi, Cilt:2, Sayı:2,pp.15-27, İstanbul,2003

⁷ G.E.Mariki and C.Yeh, "Dynamic three- dimensional TLM analysis of microstriplines on anisotropic substrate,IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-33, p.789-799, Sept. 1998

⁸ Q., Tang, Y., Wang, C., Christopoulos, " Simulation of the Transmission Line Effects Based on TLM Method", IEEE, 2008

⁹ W.J.R.Hoefler, " The transmission line matrix (TLM) method in Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-wave Passive Structure,(ed. Tatsuo Itoh), New York, Johns Wiley & Sons, Inc., 1989

İki boyutlu maxwell denklemleri yazılırsa,

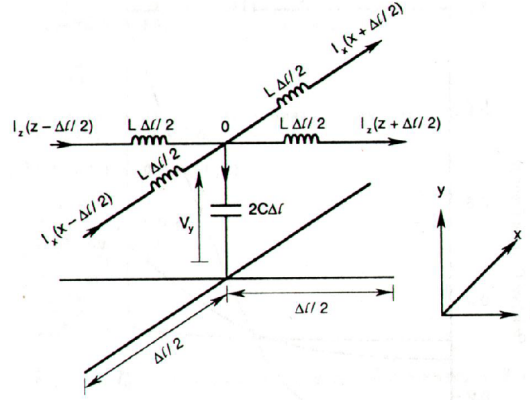
$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (14)$$

(11),(12) ve (13),(14) denklemleri birbirine benzediği görülmektedir. (11),(12) ve (13),(14) denklemleri arasında geçiş bağıntıları (15) elde edilmektedir.

$$E_y \equiv V_y, \quad H_z \equiv I_x, \quad H_x \equiv -I_z, \quad \mu = L, \quad \varepsilon = 2C \quad (15)$$

Şekil 2' de iki boyutlu TLM hücresine ait iletim hattı modeli görülmektedir.



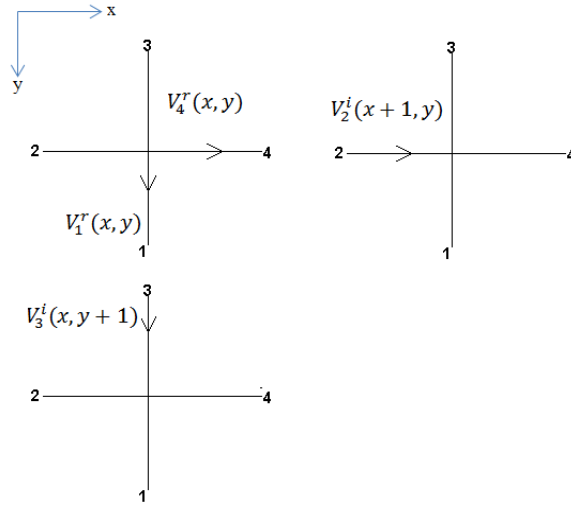
Şekil 2- İki boyutlu TLM hücresi [0]

TLM yöntemi iletim hattı modellemesine dayandığı için TE modunda ve TM modunda hücrelerin bir birleri ile bağlantıları farklılık gösterir. TE modu analizi yapabilmek için hücre bağlantıları seri olarak yapılırken TM modunda hücreler paralel bağlanarak devre çözümü gerçekleştirilir. İki boyutlu TLM hücresi diğer hücreler ile dört adet bağlantı noktası bulunmaktadır. İki boyutlu TLM hücresinin boyutları Δx , Δy dir. Hücre sayısı ise N_x , N_y olmaktadır. Her bir kol üzerindeki kola gelen gerilim darbeleri ile koldan yansıyan gerilim darbeleri hesaplanarak problemin çözümüne gidilir.

4.SINIR ŞARTLARI OPTİMİZASYONU

Problem uzayı belirlendikten sonra sınırların belirlenmesi ve bu sınırlar içerisinde analizin gerçekleştirilmesi oldukça önem taşımaktadır. Bu nedenle problem uzayında istenen yapının analizi yapılmadan önce analiz yapılacak hücreler ile analiz yapılamayacak hücreler birbirinden ayrılır. Analiz yapılacak hücrelerin analizden önce birbirinden ayrılması, analiz süresini oldukça kısaltmakta ve işlemleri kolaylaştırmaktadır.

Bu amaçla problem uzayında analiz yapılacak yapı istenen hücre sayısına bölündükten sonra analize başlanmadan önce yapı içerisinde kalan hücrelere “1” yapı dışarısında kalan hücrelere “0” değeri verilir. Böylece aslında problem uzayında yapı tanımlanmış olur. Daha sonra analiz sırasında sadece hücrelerin “0” olup olmadığına bakılarak sınıra gelinip gelinmediği takip edilir. Sınıra gelindiğinde bağlantı denklemleri devreye alınarak analiz tamamlanır. Şekil 3’de 2 boyutlu TLM hücresinin bağlantıları görülmektedir.



Şekil 3- İki boyutlu TLM hücrelerinin bağlantıları

Bu çalışmada sunulan optimize edilmiş İki boyutlu TLM analizinde mükemmel iletken ile kaplanmış sınırdaki geçiş ifadeleri (16) ve (17)' de verilmiştir.

$${}_{k-1}V_4^i = {}_kV_2^r \quad {}_{k+1}V_1^i = {}_kV_3^r \quad (16)$$

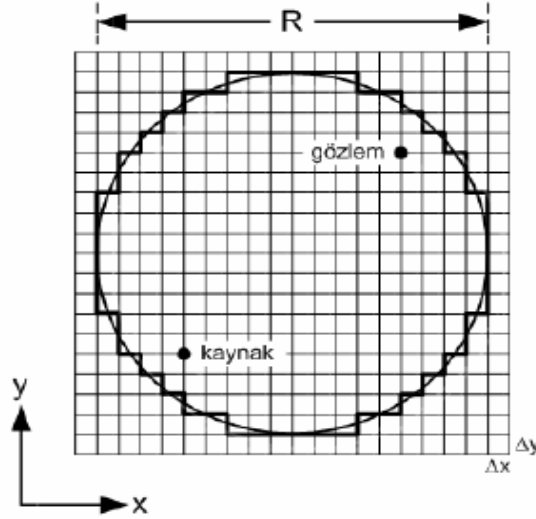
$${}_{k-1}V_3^i = {}_kV_1^r \quad {}_{k+1}V_2^i = {}_kV_4^r$$

$$V_4^i(x-1, y) = V_2^r(x, y) \quad V_1^i(x, y+1) = V_3^r(x, y) \quad (17)$$

$$V_3^i(x, y+1) = V_1^r(x, y) \quad V_2^i(x+1, y) = V_4^r(x, y)$$

5.SİMULASYON

Yapılan optimizasyonun doğru sonuçlar verdiğini sınamak için yarıçapı 11.915mm olan WC-94 adlı dairesel kesitli silindirik dalga kılavuzu kullanılmıştır. Kılavuzun TE ve TM mod analizi için dairesel yapının hücelere bölünmesi ve yapının sınır şartlarının oluşturulması gerekmektedir^{10 11}. Problem uzayı hücre boyutu $\Delta x = \Delta y$ olmak üzere 80x80 hücreye ayrılmıştır.



Şekil 4- TLM Problem Uzayı

¹⁰ Erol Y., Balık H. H., Dairesel Dalga Kılavuzlarının 2 Boyutlu FDTD Yöntemi İle Modellenmesi, 3. URSI-TÜRKİYE 2006 BİLİMSEL KONGRESİ, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 6-8 Eylül 2006
¹¹ Benson, F.A., Benson, T.M., 1991, Fields, Waves and Transmission Lines, USA.

bilgi sağlamaktadır. (18)' da gauss darbesinin fonksiyonu görülmektedir ve ifadede ki T , gauss darbesinin genişliğini tanımlamaktadır.

$$f(t) = e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \quad (18)$$

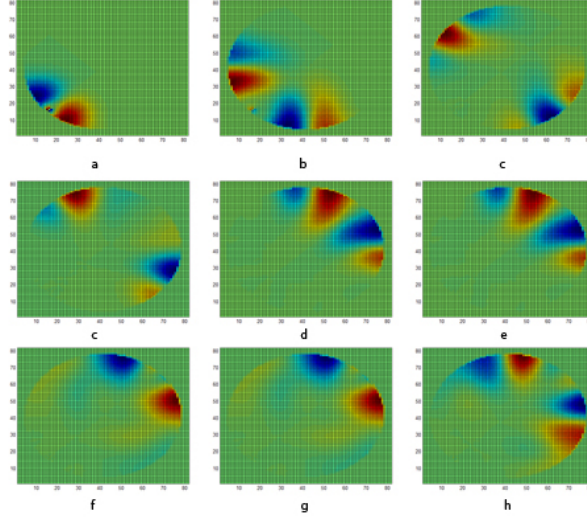
Gauss darbesinin bant genişliği, uygulanma süresine bağlıdır. Bu nedenle analiz edilecek en yüksek frekans için uygun darbe süresi seçilmiştir. Yapılan bu çalışmada en yüksek frekans bileşeni ile darbe süresi arasındaki bağıntı (19) deki gibi seçilmiştir.

$$f_{\max} = \frac{0.66}{T} \quad (19)$$

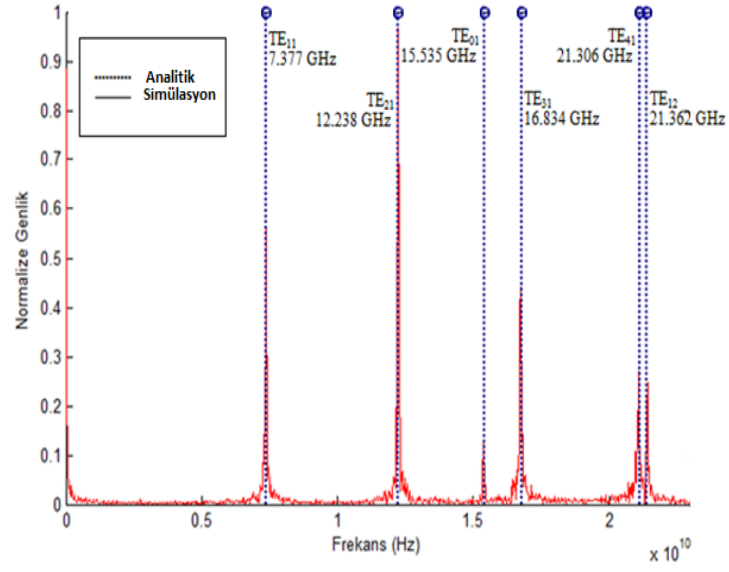
Darbe süresi maksimum frekansa göre ayarlanmış Gauss darbesi kullanılmıştır. Gauss darbesi kılavuz içerisinde bir noktaya uygulanır ve gözlem noktası olarak seçilen başka bir noktadan ilgilenilen alan bileşeni değerleri simülasyon süresi boyunca kaydedilmiştir.

Simülasyonuna ait parametreler; Gauss darbesinin genişliği 66 ps, $\Delta x = \Delta y = 0,3309$ mm, $\Delta t = 0,7667$ ps ve simülasyon süresi $10000\Delta t$, kaynağın uygulandığı hücre $(x,y)=(16,16)$, gözlem noktası $(x,y)=(64,64)$ dür.

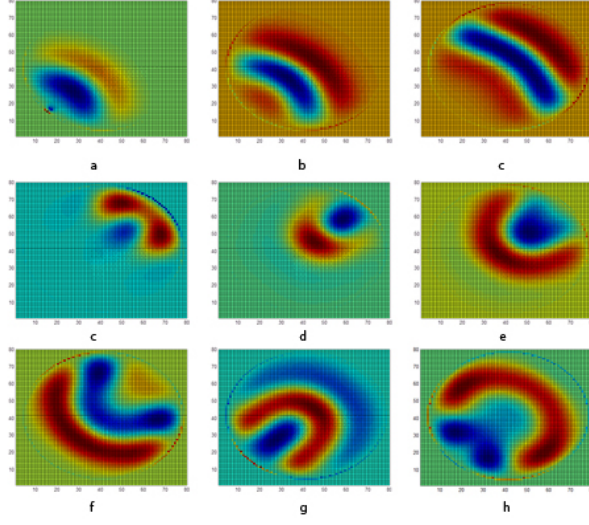
Şekil 6 ve 8'de TE ve TM modu dalga yayılımlarının zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Dairesel dalga kılavuzunun gözlem noktasından (64,64) örnekler alınmıştır. Daha sonra alınan örneklerin hızlı furier dönüşümü(FFT) yardımıyla dalga kılavuzunun frekans cevabı elde edilmiştir. Şekil 7 ve 9' da TE ve TM modu için elde edilen frekans cevapları görülmektedir.



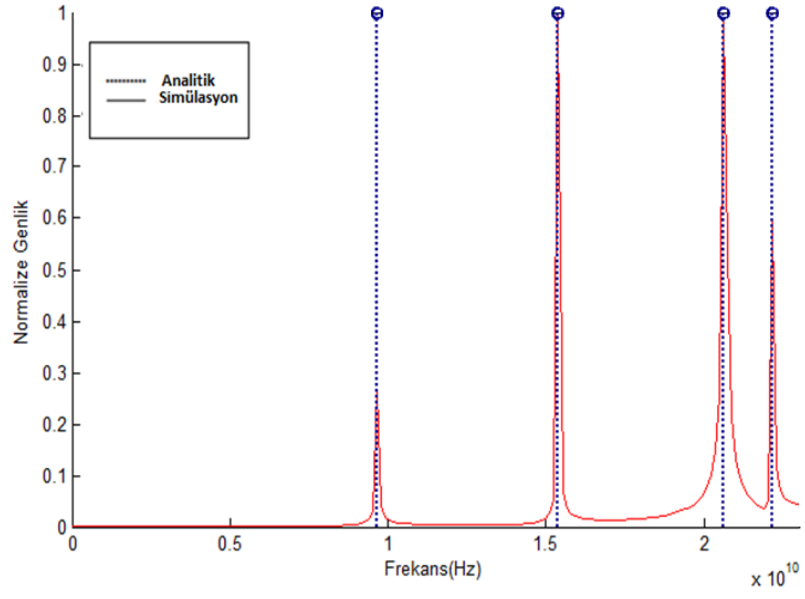
Şekil 6- Analiz sonucu TE Mod Dalga Yayılımının zamana bağlı değişimi
(Problem Uzayı 80x80)



Şekil 7 -WC-94 Dairesel Dalga Kılavuzu TE Mod Frekans Cevabı



Şekil 8- Analiz sonucu TM Mod Dalga Yayılımı zamana bağlı değişimi
(Problem Uzayı 80x80)



Şekil 9 -WC-94 Dairesel Dalga Kılavuzu TM Mod Frekans Cevabı

6.SONUÇ

Bu çalışmada dairesel dalga kılavuzunun optimize edilmiş İletim Hattı Matris Modeli ile tam dalga analizi gerçekleştirilmiştir. Düşük frekanslarda analitik çözümler yapılırken bazı kabuller yapılmaktadır. Frekans yükseldikçe bu kabuller yapılamamakta ve analitik çözüm imkansız hale gelmektedir. Optimize edilmiş İletim Hattı Matris Modeli sayısal çözümlerle tam dalga analizi gerçekleştirdiği için tüm frekanslarda ve tüm boyutlarda dalga kılavuzu analizinde kullanılabilmesi gösterilmiştir. Bu amaçla pratikte kullanılan WC-94 dairesel kesitli dalga kılavuzu analiz edilmiştir. WC-94 dairesel kesitli dalga kılavuzunun TE ve TM mod analizi sonucu Tablo1 ve Tablo2 deki sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde optimize edilmiş TLM yöntemi ile yapılan analizlerde sınır şartlarının kolayca uygulandığı, hata oranının oldukça düşük olduğu ve tüm frekanslara rahatlıkla uygulanabileceği gösterilmiştir.

7.KAYNAKÇA

- J., J., Jokovic , B., D., Milovanovic , N.,S., Doncov, “TLM Analysis of a Cylindrical Metallic Cavity Excited with a Real-Feed Probe, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2005
- Q., Tang, Y., Wang, C., Christopoulos,” Simulation of the Transmission Line Effects Based on TLM Method”, IEEE, 2008
- M., Panitz, J., Paul, ” A Fractional Boundary Placement Model Using theTransmission-Line Modeling (TLM) Method”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 57, no. 3, March 2009
- J. Paul, C. Christopoulos, and D. W. P. Thomas, “Correction to “Timedomain modeling of electromagnetic wave interaction with thin-wiresusing TLM”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 50, no. 2, pp.450–451, May 2008
- N. Pena and M. M. Ney, “Absorbing-boundary conditions using perfectly matched-layer (PML)technique for three-dimensional TLM simulations,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp. 1749–1755, Oct. 1997
- U., S., İnan, A., Inan,” Electromagnetic Waves”, Prentice Hall, Isbn: 0201361795, 1999
- D., J., Griffiths(Çeviri: E., Bayraktar), “Elektromanyetik Teori”, Gazi Kitabevi, ISBN: 9799758640828, 2005
- W.J.R.Hoefer, " The transmission line matrix (TLM) method in Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-wave Passive Structure,(ed. Tatsuo Itoh), New York, Johns Wiley & Sons, Inc., 1989
- M., O., Özyalçın, L., Sevgi, E., Topuz,” İletim Hattı Matrisi yöntemi ile ekranlama etkinliği ve özgül soğurma oranı hesabı”, İTÜ_ Mühendislik Dersigis, Cilt:2, Sayı:2,pp.15-27, İstanbul,2003
- G.E.Mariki and C.Yeh, "Dynamic three- dimensional TLM analysis of microstriplines on anisotropic substrate,IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-33, p.789-799, Sept. 1998

Ayhan AKBAL
Hasan H.BALIK

Erol Y., Balık H. H., Dairesel Dalga Kılavuzlarının 2 Boyutlu FDTD Yöntemi İle Modellenmesi, 3. URSI-TÜRKİYE 2006 BİLİMSEL KONGRESİ, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 6-8 Eylül 2006

Benson, F.A., Benson, T.M., 1991, Fields, Waves and Transmission Lines, USA.