

itüdergisi/d**mühendislik**

Cilt:2, Sayı:2, 15-27

Nisan 2003

İletim Hattı Matrisi yöntemi ile ekranlama etkinliği ve özgül soğurma oranı hesabı

M. Orhan ÖZYALÇIN*, Levent SEVGİ, Ercan TOPUZ*İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul***Özet**

İletim Hattı Matrisi (İHM) yöntemi günümüzde sıkça kullanılmaya başlanan zaman-domeni tekniklerden birisidir. Bu çalışmada, söz konusu teknik öncelikle analitik çözümleri mevcut olan problemlere uygulanarak kalibre edilmiş ve geçerliliği gösterilmiş, analitik çözümün henüz mevcut olmadığı problemlerde ise diğer bir zaman-domeni yöntemi olan Zamanda Sonlu Farklar (ZSF) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Ele alınan iki önemli problem, ekranlama etkinliği (EE) ve özgül soğurma oranı (ÖSO)'dur. Bu problemlerin ortaya çıktığı yapıların modellenmeleri hayli karmaşık ve zor olduğu gibi bu büyüklüklerin deneysel olarak belirlenmesi de çoğu kez olanaksızdır. Bu nedenle her iki problemin çözümünde de sayısal yöntemler en yaygın ve etkili yaklaşımı oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İletim hatları, İHM yöntemi, ZSF yöntemi, ekranlama etkinliği, özgül soğurma oranı.

Calculation of shielding effectiveness and specific absorption rate via Transmission Line Matrix method

Abstract

Transmission Line Matrix (TLM) method is a very effective time-domain method, which has been extensively used in the past two decades for solving various electromagnetic (EM) problems. This method is not only used in the solution of EM problems but also in that of different types of problems such as diffusion and viscosity in the literature because of its nature. In this work, TLM is applied for determining solutions of two complex EM problems which have not been addressed via TLM. These two problems are the calculation of shielding effectiveness (SE) and specific absorption rate (SAR), which are very important in the daily life. These two areas present difficult modeling and simulation problems which may require excessive computer resources. However, since the determination of SE and particularly of SAR experimentally via measurements is often not possible numerical techniques play a dominant role in such applications. Analytical verification of the results have also been performed by comparing Green's function solution of a PEC resonator with TLM results. And also radiation from an aperture is used for the same purpose in this study. Very satisfactory results are obtained via these validations. These results have shown that TLM method can safely be applied for solving two complex problems which are calculation of SE and SAR.

Keywords: Transmission lines, TLM method, FDTD method, shielding effectiveness, specific absorption rate.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: M. Orhan ÖZYALÇIN. oozyalcin@ieee.org; Tel: (212) 662 06 70.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi'nde tamamlanmış "Modeling and simulation of electromagnetic problems via transmission line matrix method" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 22.10.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 30.10.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

İletim Hattı Matrisi (İHM) (Johns ve Beurle, 1971) ve Zamanda Sonlu Farklar (FDTD) (Yee, 1966) yöntemleri hemen hemen her türlü elektromanyetik (EM) problemin çözümünde kullanılan en önemli iki zaman-domeni sayısal tekniğidir. İlk ortaya atıldıklarından bu yana çok çeşitli alanlarda uygulanma imkanları bulmuşlardır. Bu iki yöntemin en önemli özelliği, darbe şeklindeki uyarımlarla çalışmaya uygun olmaları ve bu nedenle algoritmaları bir defa koşturmak suretiyle elde edilen zaman-domeni verilerine ayrık Fourier dönüşümü (AFD) uygulayarak sistemin frekans yanıtını geniş bir band içinde elde etme imkanı sunmasıdır.

Ancak burada vurgulanması gereken en önemli faktör İHM yönteminin devre mantığına, ZSF yönteminin ise alan mantığına dayanmasıdır. ZSF yöntemi Maxwell denklemlerinin zaman ve konumda ayrıklaştırılmasına, İHM yöntemi ise tüm uzayın seri veya paralel bağlı iletim hatları ile modellenmesi esasına dayanır. İletim hatlarının akım ve gerilimleri cinsinden hat diferansiyel denklemleri çıkarılır ve Maxwell denklemleri ile eşleştirilir. Bu eşleştirme sonucu iletim hattına ait parametreler ile EM probleme ait parametreler arasındaki geçiş bağıntıları belirlenir. Böylece hat gerilim ve akımları belirlendiğinde, EM problemdeki elektrik ve manyetik alan bileşenleri de bulunmuş olur. Ayrıca iletim hattı modelindeki birim uzunluk başına verilen endüktans ve kapasiteler yine EM problemdeki dielektrik malzemeye ait olan permittivite ve manyetik permeabilitenin bulunmasını sağlar.

Bu makalede temel teknik olarak ele alınan İHM yöntemi bir sonraki bölümde daha detaylı olarak anlatılacaktır. Ancak öncelikle bu yöntemin uygulanacağı iki temel problem olan ekranlama etkinliği (EE) ve özgül soğurma oranına (ÖSO) değinmek uygun olacaktır. Herhangi bir cihazın EM olarak dış dünyadan ne ölçüde izole edilmiş olduğunun ölçüsü olan EE özellikle günümüzde yaygınlaşan elektronik cihaz kullanımı ile ortaya çıkan karşılıklı etkileşimler sonucu daha önemli bir parametre

durumuna gelmiştir. Ayrıca EE'nin doğrudan ölçülmesi çok güç ve bazı zamanlar da olanaksız olduğu için, İHM yöntemi gibi sayısal teknikler EE hesaplamalarında önemli bir araç durumuna gelmiştir. EE, cihaz ve sistem tasarımlarında dikkate alınması gereken önemli bir mühendislik parametresidir. İyi bir izolasyon için EE'nin 100-120dB arasında olması istenir. Ancak genelde 70-80dB kabul edilebilir değerlerdir. Fakat yapılan simülasyon sonuçları göstermiştir ki, tasarımda gerekli önlemler alınmazsa test edilen yapı ve ölçüm yapılan yere göre EE kolaylıkla standartların çok altına inebilmekte, 30-40dB gibi ve hatta daha düşük değerler alabilmektedir.

Bu çalışmada ele alınan ikinci problem insan vücudundaki dokular ile EM ışınımların etkileşiminin bir ölçüsü olan ÖSO'dur. Bu problem, son yıllarda mobil telefonların yaygın kullanımı nedeniyle toplumun gündeminde önem kazanmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucu *International Committee on Non-Ionising Radiation Protection* (ICNIRP) gibi uluslararası geçerliliği olan kuruluşlar bir takım sınırlama ve kurallar konmasını sağlamışlardır. 1998 yılında ICNIRP'nin yayınladığı rehberde analitik, sayısal ve deneysel tüm çalışma sonuçları ortaya konmuştur. Buna göre 900MHz ve 1800MHz'de insanların yaşadığı herhangi bir yerdeki elektrik alan şiddeti sırasıyla 42V/m ve 59V/m'yi aşmamalıdır. Diğer taraftan, ölçmeler telefon anteninden 2.2cm uzakta, 900MHz ve 2W çıkış gücü için 400V/m; 1800MHz ve 1W çıkış gücü için 200V/m mertebesinde yani sınır değerlerin çok üzerinde alan değerlerinin mevcut olabileceğini göstermiştir.

Diğer taraftan, baz istasyonlarından dolayı maruz kalınan radyasyon için konulan sınır değerleri, cep telefonlarının kendisinden kaynaklanan ışınım sonucu maruz kalınan değerler için belirlenen sınırlardan daha düşüktür. Bunun nedeni, kişilerin cep telefonlarını kendi istekleri ile alıp kullanma veya kullanmama olanakları olduğu halde, baz istasyonlarının tamamen onların iradesi dışında yerleştirilmesi ve sürekli ışınım yapmalarıdır.

Bütün bu gerçekler maruz kalınan radyasyon miktarlarının toplum sağlığı açısından önemini göstermektedir. Bunun somut miktarını göstermek için ise ÖSO en önemli parametre durumundadır. Aynı EE gibi, ÖSO'da doğrudan ölçülemediğinden, ancak laboratuvar deneyleri ve bilgisayar simülasyonları ile tespit edilebilir.

Biz bu çalışmada oldukça gerçekçi yapılar ele alarak hem EE, hem de ÖSO parametrelerinin modellenmesini ve belirlenmesini simetrik sıkıştırılmış düğüm (SSD) İHM yöntemi ile nasıl gerçekleştirdiğimizi göstereceğiz. Ayrıca analitik formülasyonlar ile kullandığımız algoritmanın kalibrasyonunu yapacak ve yöntemin geçerliliğini göstermek için analitik çözümü bilinen test problemlerinden yararlanacağız. Analitik geçerliliğin analitik çözümler yardımıyla gösterilemediği yerlerde ise ZSF yöntemi karşılaştırma amaçlı olarak kullanılacaktır. Bu nedenle, bir sonraki bölümde İHM ve ZSF yöntemlerinin temel özellikleri verilecektir.

Kullanılan zaman-domeni yöntemler

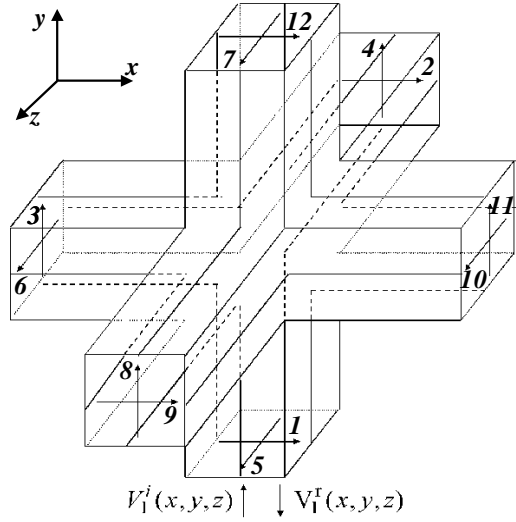
Analitik testler ve sayısal simülasyonlar ile ilgilenmeden önce SSD-İHM ve ZSF yöntemleri hakkında temel özelliklerin verilmesi faydalı olacaktır.

Simetrik sıkıştırılmış düğüm iletim hattı matrisi (SSD-İHM, SCN-TLM) yöntemi

İHM, esas olarak Maxwell denklemleri ile belirlenen EM alan bileşenleri ile iletim hat denklemleri arasındaki benzeştirmeye (analoji) dayanmaktadır. SSD-İHM ise, İHM'nin diğer çeşitleri arasında en çok kullanılan ve en avantajlı olanıdır. Bu yöntemin temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- İHM yöntemi, gerilim darbelerinin bağımsız parametreler olarak ele alındığı devre teorisi mantığına dayanır.
- Fiziksel ortam, Şekil 1'de yapısı verilen birim hücrelere bölünür. Her bir hücrenin uzaydaki konumu (i,j,k) etiketi ile belirlenir. Ayrıca n , hesaplamaların yapıldığı zaman adımını gösteren bir parametredir. (i,j,k,n) parametrelerinin tümü tamsayıdır.

Yani $V(x,y,z,t)$ fonksiyonu, $V(i,j,k,n)$ şeklinde ayrıklaştırılır. Burada $x=i\Delta x$, $y=j\Delta y$, $z=k\Delta z$ ve $t=n\Delta t$ 'dir.



Şekil 1. Üç-boyutlu (3B) simetrik sıkıştırılmış düğüm hücresi. Hücre koordinatları (x,y,z) 'dir. 1 numaralı girişe gelen ve yansıyan gerilim darbeleri şekil üzerinde görülmektedir.

- Toplam hesap uzayı $(0,0,0)$ 'dan başlayıp (X,Y,Z) 'ye kadar uzanır. Bu hesap uzayının $N_x \times N_y \times N_z$ hücreden oluşması anlamına gelir. Burada $\Delta x = X/N_x$, $\Delta y = Y/N_y$ ve $\Delta z = Z/N_z$ 'dir.
- İHM yönteminde, EM alan bileşenleri birim hücreden yansıyan ve komşu hücreler arasında ilişkilendirilen gerilim darbeleri cinsinden ifade edilirler.
- SSD-İHM hücresi, her bir kapısında iki değişik (yatay ve düşey) polarizasyonda gerilim darbelerinin bulunduğu 6-kapılı bir yapı olarak düşünülebilir.
- Her bir yöndeki dalga yayılımı birbiriyle fiziksel olarak herhangi bir bağlantısı olmayan iki çift iletim hattı ile gerçekleşir.
- Her bir hücrede, zaman-domeni yayılımı gelen ve yansıyan gerilim darbelerinin "saçılma matrisi, S" ile ilişkilendirilmesi ile sağlanır. ${}_n V_h^i(i,j,k)$ notasyonu, İHM gerilim darbelerini göstermek için kullanılır. Burada, i indisi gelen (r, yansıyan) gerilim darbesini; h indisi ise bu darbenin mümkün 12 gerilim darbesinden hangisi olduğunu gösterir.
- Saçılma matrisi S, yansıyan ve gelen gerilim darbelerini:

$$Vr = S \times Vi \quad (1)$$

şeklinde ilişkilendirir. Burada S , 12×12 boyutlu bir matristir. Ancak ortam serbest uzay değil de herhangi bir kayıpsız dielektrik malzemeyi içeriyorsa S , 18×18 boyutunda olur (Christopoulos, 1995). Elektriksel kayıpların olduğu bir ortam ise 21×18 boyutunda bir matris ile modellenir.

- Ortam parametreleri olan ϵ_r ve μ_r sırasıyla $\Delta\ell/2$ ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta\ell$) uzunluğunda sonu açık ve kısa devre edilmiş yan hatlar ile modellenir. Buna karşılık iletkenlik, σ , uygun sonlandırılmış bir yan hat ile modellenir.

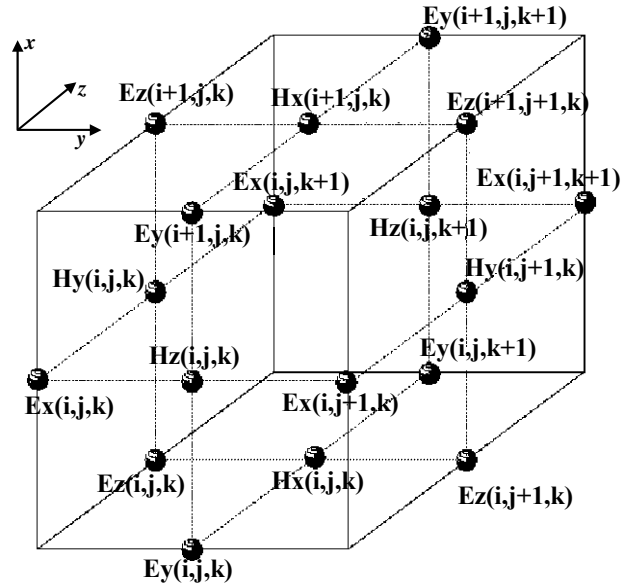
SSD-İHM yönteminde birim hücre analizi tamamen güç veya yükün korunumu prensibine göre yapılır. Her hücre saçılma matrisi, S ile modellenir. Bu SSD-İHM yöntemine sayısal bir yük getirir. Buna karşılık hücrenin simetrik yapısı sonucu, her bir zaman adımında 6 alan bileşeninin tek bir noktada (hücre merkezinde) gerilim darbeleri cinsinden ifade edilebilmesi bu yöntemin önemli bir avantajıdır. Bu nedenle, İHM, günümüzde EM problemlerin çözümünde sıkça kullanılmaya başlanan zaman-domeni yöntemlerden birisi olmuştur. Halen, farklı hücre yapıları ortaya atılarak, yöntemi geliştirme çalışmaları da devam etmektedir.

Zamanda sonlu farklar (ZSF, FDTD) yöntemi

Bu yöntem Maxwell denklemlerinin zamanda ve konumda ayrıştırılması esasına dayanır. Hesap uzayı Şekil 2' de görülen ve Yee hücresi (Yee, 1966) adı verilen birim hücrelere bölünür. Yöntem ile ilgili bazı temel özellikler aşağıda verildiği gibidir:

- Her bir Yee hücresinde (i,j,k) ile etiketlenmiş 3 elektrik ve 3 manyetik alan bileşeni bulunmaktadır. Δx , Δy , Δz ve Δt sırasıyla x , y ve z boyutundaki konum ve zaman ayrıklaştırma parametreleridir.
- Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin konumları birim hücrede (i,j,k) ile gösterilmesine rağmen, gerçek anlamda hücredeki konumları farklıdır.

- Konumları farklı olan elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin arasında ayrıca $\Delta t/2$ zaman farkında bulunmaktadır. Buna göre manyetik alan bileşenleri $t = \Delta t/2, 3\Delta t/2, 5\Delta t/2, \dots$ zaman adımlarında hesap edilirken, elektrik alan bileşenleri $t = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ zaman adımlarında hesaplanır.
- İHM yönteminin önemli avantajlarından biri olan bütün alan bileşenlerinin hücrenin merkezinde ifade edilebilme özelliğini, ZSF yönteminde de elde edebilmek için ara işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.
- Ortam parametreleri olan ϵ_r , μ_r ve σ , ayrıştırılmış Maxwell denklemleri yardımıyla ZSF yönteminde kolayca sisteme dahil edilir. İlave bir işleme ihtiyaç duyulmaz.



Şekil 2. Zamanda sonlu farklar yönteminde kullanılan Yee hücresi. Hücre içinde görülen tüm elektrik ve manyetik alan bileşen konumlarının farklı olduğu görülmektedir.

Hem SSD-İHM hem de ZSF yöntemlerinin iteratif tekniklere dayanması nedeniyle, gerekli önlemler alınmadığı takdirde kararsızlık problemi ile karşılaşılır. Bunun önüne geçmek için Courant kararlılık kriteri şartının sağlanması gerekir (Choi ve Hofer, 1986). Ayrıca ilgilenilen en yüksek frekans bileşeni (yani en düşük dalga boyu, λ_{min}) ile birim hücre boyu, $\Delta\ell$ arasındaki oranın uygun seçilmesi de

sayısal dispersiyonun olmaması için uyulması gereken bir kuraldır (Russer, 1997). Eldeki probleme bağlı olarak $\lambda_{min}/\Delta\ell$ oranının 10 ile 100 arasında seçilmesi uygun olacaktır (Özyalçın ve Sevgi, 1998).

Kanonik testler ve algoritmik kalibrasyon

İHM yöntemini referans çözümü bulunmayan karmaşık EM problemlere uygulamadan önce, kullanılacak algoritmaların geçerliliğini göstermek ve kalibre etmek amacıyla, analitik referans çözümü bulunan iki ayrı problem ile test edeceğiz. Bu amaçla, mükemmel iletken (Mİ) dikdörtgen prizma şeklinde bir rezonatör ve bir Mİ üzerinde bulunan yarıktan ışınım problemleri ele alınacak ve çözümleri SSD-İHM yöntemi sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

Green fonksiyonu gösterimi ile mükemmel iletken bir kutudaki TE_{10p} modu çözümlerinin elde edilmesi

x , y , z eksenleri boyunca kenar uzunlukları, sırasıyla, a , b , d olan dikdörtgen kesitli bir silindirik rezonatörün TE_{10p} modunu göze alalım. İlgilendiğimiz probleme ilişkin çözümleri gereken diferansiyel denklem ve sınır koşulları aşağıda verilmiştir:

$$\nabla^2 E_y + k^2 E_y = -j\omega\mu J_y \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E_y(0,0 \leq y \leq b, 0 \leq z \leq d) &= E_y(a, 0 \leq y \leq b, 0 \leq z \leq d) = 0 \\ E_y(0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, 0) &= E_y(0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, d) = 0 \quad (3) \\ \frac{\partial E_y(0 \leq x \leq a, 0 \leq z \leq d)}{\partial y} &= \frac{\partial E_y(0 \leq x \leq a, b, 0 \leq z \leq d)}{\partial y} = 0 \end{aligned}$$

Burada kaynak fonksiyonu J_y , TE_{10p} modunu uyuracak şekilde seçilir:

$$J_y(x', y', z') = \text{Sin}\left(\frac{\pi}{a} x'\right) \delta(z - z') \quad (4)$$

İlk olarak:

$$\nabla^2 G + k^2 G = -\delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z') \quad (5)$$

Green fonksiyonu probleminin (3) ile verilen sınır koşulları altında çözümünü ele alınsın. Bu taktirde (4) ile verilen kaynak dağılımının oluşturacağı alan:

$$\begin{aligned} E_y(x, y, z) &= j\omega\mu \int_0^a \int_0^b \int_0^d J_y(x', y', z') \quad (6) \\ G(x, y, z, x', y', z') &dx' dy' dz' \end{aligned}$$

süperpozisyon integrali ile elde edilebilir. Standart işlemlerden sonra aranan E_y alanı:

$$\begin{aligned} E_y(x, y, z, z') &= -\frac{4}{d} j\omega\mu_o \text{Sin}\left(\frac{\pi}{a} x\right) \quad (7) \\ \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\text{Sin}\left(\frac{p\pi}{d} z\right) \text{Sin}\left(\frac{p\pi}{d} z'\right)}{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \end{aligned}$$

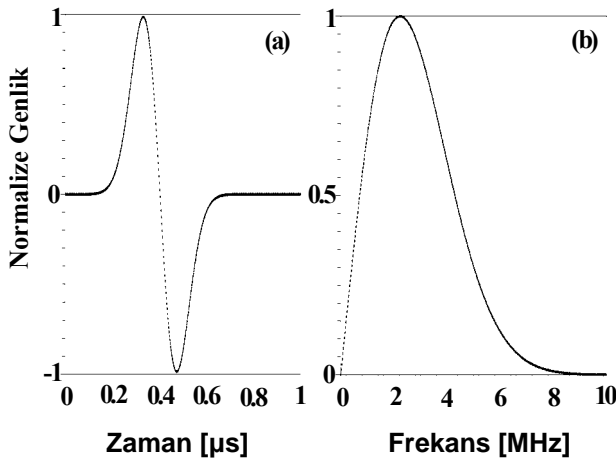
şeklinde bulunur. Burada k dalga sayısıdır ve m , n ve p rezonatördeki modlara ait öz çözümleri gösteren tamsayılardır (örneğin, TE_{10p} modu için $m=1$, $n=0$). (7) bağıntısı paydayı sıfır yapan rezonans frekansları için geçerli değildir. Bu tekillikler ortama küçük bir kayıp terimi ilave edilerek kaldırılabilir. Bu durumda k dalga sayısı:

$$k = \frac{\omega}{c} \left[\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_o} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

olarak ifade edilir.

Burada bilinmesi gereken nokta, (7) bağıntısından da hemen görüleceği gibi, elde edilen seri gösteriliminin yavaş yakınsayan bir karakterde olduğu; özellikle gözlem noktasının kaynak düzlemine ve/veya işaret frekansının rezonans frekanslarından birine yaklaşması durumunda sayısal problemlerin ortaya çıkacağıdır. Seride tutulacak terim sayısına (p) bağlı olarak elde edilecek doğruluğu belirlemek üzere yapılan testler sonucu p için rezonansdan uzak bir frekans değerinde virgülden sonra 3 hane doğruluk için yaklaşık 100, 6 hane doğruluk için ise yaklaşık 5000 değeri vermek gerektiği görülmüştür. Kaynak ile gözlem noktaları birbirine çok yaklaştırılacak olursa gerekli terim sayısı hızla artmaktadır.

İHM yöntemi ile analitik çözümleri karşılaştırmak için içi, $\epsilon_r=1.1$ ve $\sigma=10^{-5}$ S/m parametreleri olan kayıplı dielektrik malzeme ile doldurulmuş Mİ $100\text{m}\times 100\text{m}\times 100\text{m}$ boyutundaki bir rezonator ele alınacaktır. Ayırıklaştırmada birim hücre boyutu, $\Delta\ell=1\text{m}$ alınmıştır. Bu seçim, hesap uzayının İHM yönteminde $100\times 100\times 100$, ZSF yönteminde ise, Yee hücresinin Mİ duvara komşu kenarlarının kapatılarak her iki yöntemde de aynı boyutlu Mİ rezonatörü incelemek için, fazladan bir hücre kullanma zorunluluğu sebebiyle $101\times 101\times 101$ hücre olması anlamına gelmektedir. Sistemi uyarmak için Gauss fonksiyonunun birinci türevi şeklinde, 20dB band genişliği 6 MHz olan sınırlı band genişlikli bir uyarma seçilmiştir (Şekil 3).



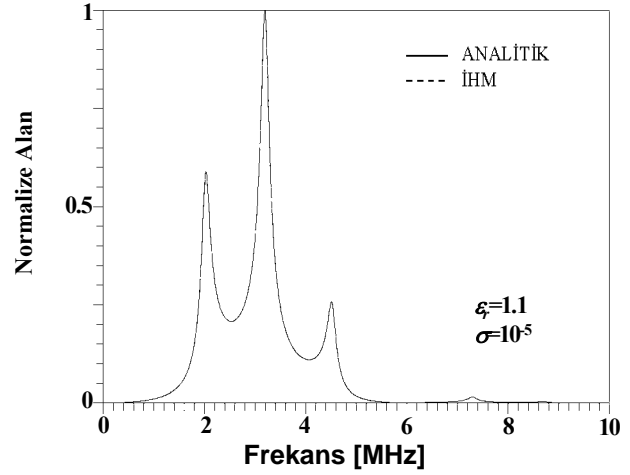
Şekil 3. Gauss fonksiyonunun birinci türevi şeklindeki kaynağın a) zaman, b) frekans domeni değişimi

Bu test yapısının seçilmesi aşağıda verilen bazı avantajları sağlar:

- Hesap uzayı herhangi bir yaklaşıklık ve ilave ayırıklaştırma hatası olmadan belirlenebilir,
- Açık sınır koşulu (ASK) kullanılmaması nedeniyle, tüm hatalar sadece yöntemlerin kendisinden kaynaklanan ayırıklaştırma hataları olacak, ASK'dan kaynaklanan yansımaların getirdiği hatalar bulunmayacaktır,
- Kaynağın (4)'teki gibi seçilmesi ve zaman/frekans değişiminin Şekil 3'teki gibi olması ve dolayısıyla sadece TE_{10p} modunu uyarması nedeniyle, ilgilenilen band içindeki rezonans frekansları, Şekil 4'te görüldüğü

gibi, 2.02MHz, 3.2MHz ve 4.52MHz ile sınırlandırılmaktadır,

- Ayrıca ilgilenilen moda ilişkin olarak sadece E_y bileşeninin mevcut olup, E_x ve E_z bileşenlerinin bulunmaması sayısal yöntemlerin hatalarının kontrolü için ilave bir olanak vermektedir.

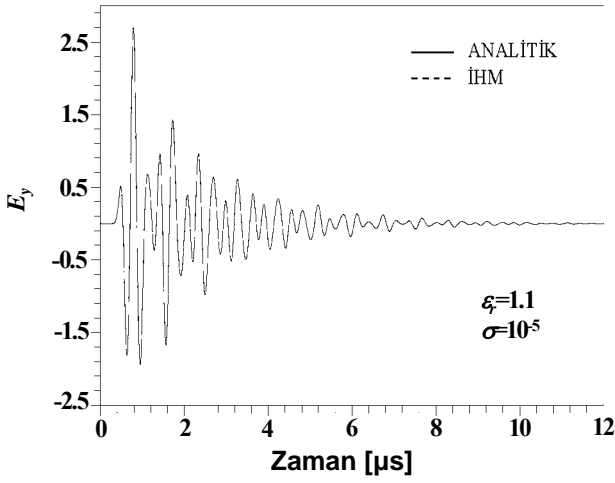


Şekil 4. İçi dielektrik malzeme ile doldurulmuş rezonatördeki frekans spektrumu

Test ve karşılaştırmalar hem ZD hem de FD' de gerçekleştirilmiştir. Verilen kaynak ve gözlem noktaları için (7) yardımıyla doğrudan FD sonuçları elde edilebilir. Ancak İHM zaman domeni yöntemi olduğundan FD analizi dolaylı olarak AFD ile yapılacaktır. Benzer şekilde, (7) yardımıyla ZD cevaplarının elde edilmesi de dolaylı bir işlemdir: FD verilerinin Ters Fourier Dönüşümü (TFD) alınarak zaman domeninde İHM ve ZSF yöntemleri sonuçları ile karşılaştırılır.

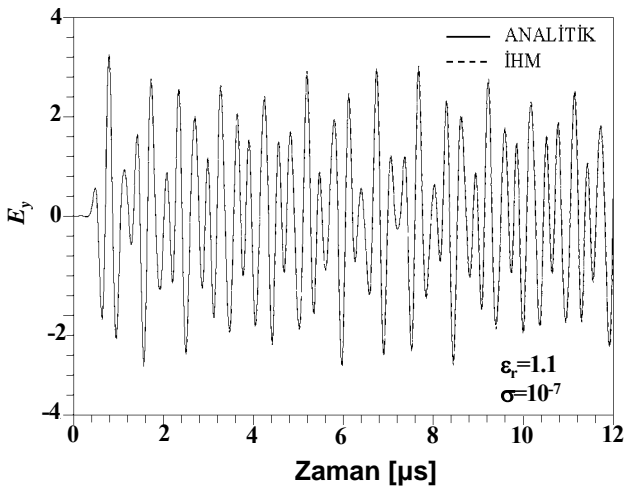
Kaynak düzlemi $z=25$ ve gözlem noktası ise (50,50,75) alındığında elde edilen frekans ve zaman domeni sonuçları Şekil 4 ve 5'de verilmiştir. Şekil 5'den görüleceği gibi gözlem noktasındaki alan, kayıplar nedeniyle yaklaşık olarak 8-10 mikrosaniyede sönmektedir. Bu durum FD analizi yapabilmek için İHM yönteminde seçilmiş olan 12 mikrosaniyelik simülasyon zamanının uygun olduğunu da göstermektedir. Bu nedenle, hem zaman hem de frekans domeni sonuçları için elde edilen değerler, analitik sonuçlar ile çok iyi uyuşmakta

ve şekillerin duyarlılığı içinde birbirleri ile üstüste çakışmaktadır.



Şekil 5. Gözlem noktasında E_y 'nin zamana göre değişimi

Aynı analizi parametreleri $\epsilon_r=1.1$ ve $\sigma=10^{-7}$ S/m olan dielektrik malzeme ile doldurulmuş iken, diğer parametreleri aynı kalmak koşuluyla tekrarlandığında zaman domeninde elde edilen sonuçlar Şekil 6'da görülmektedir. Sayısal hesaplamalarda, bu analiz için kullanılan parametreler sonuçların frekans duyarlılığı 1KHz olacak şekilde belirlenmiştir. Şekilden görüleceği gibi, sönümün küçük olması nedeniyle duvarlardan çok sayıda yansımanın etkili olmasına rağmen İHM yönteminin sonuçları analitik sonuçlarla mükemmel uyum içindedir.

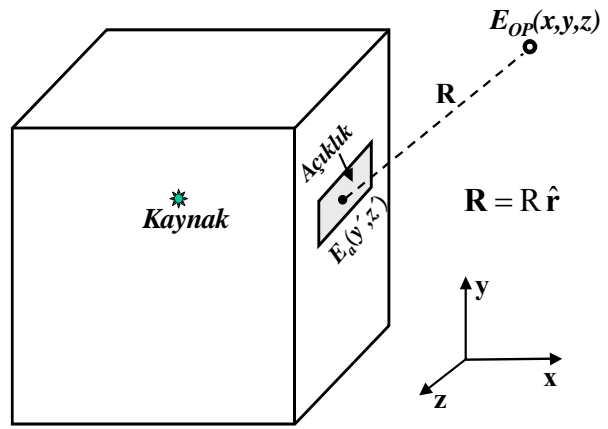


Şekil 6. Gözlem noktasında E_y 'nin zamana göre değişimi. $\epsilon_r=1.1$, $\sigma=10^{-7}$ S/m ve frekans duyarlılığı 1KHz alınmıştır.

Yukarıdaki sonuçların elde edilmesi için İHM'de kullanılan hücre boyutları, zaman adımı ve gözlem süresi gibi parametrelerin ele alınan yapıya ve problemin incelenmek istendiği çözünürlük/doğruluk düzeyine bağlı olarak seçilmesi, yani algoritmanın kalibrasyonu gereklidir.

Yarıktan yayınım problemi

Algoritmanın kalibrasyonu için incelenen ikinci test problemi üzerinde yarık bulunan dikdörtgen şeklindeki Mİ kutudan ışınım olacaktır (Şekil 7) (Sullivan, 2000).



Şekil 7. Yarık üzerindeki alan bileşeni $E_a(y,z)$ yardımıyla gözlem noktasındaki alan bileşeni $E_{OP}(x,y,z)$ hesaplanacaktır. Yarık y - z düzleminde yer almakta olup, $1.25\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ boyutundadır. Birim hücre boyutu 0.25cm 'dir.

Yarık üzerindeki y doğrultusunda E_y^a alan dağılımı varsayıldığında, kutunun dışındaki bir gözlem noktasındaki E_y alan değişimi:

$$E_y = \frac{1}{2\pi} \iint_{\text{aper.}} r_x E_a^y \left[jk + \frac{1}{R} \right] \frac{e^{-jkR}}{R} dS' \quad (9)$$

şeklinde elde edilir. (9) yarık üzerindeki alan değerinden, gözlem noktasındaki alanların bulunmasını sağlar. Burada $r_x \hat{r}$ birim vektörünün (bkz. Şekil 7) x bileşenidir. Kaynağımızın y bileşenli olması nedeniyle baskın bileşen E_y olacaktır. Bu denklem ayrıştırıldığında birtakım ara işlemlerden sonra (Sullivan, 2000):

$$E_y(i, j, k; n) = \frac{1}{\pi} \sum_{j'k'} \frac{r_x}{R_\Delta} \left[\Delta E_a^y(j', k'; n - 2R_\Delta) + \frac{E_a^y(j', k'; n - 2R_\Delta)}{2R_\Delta} \right] \quad (10)$$

elde edilir.

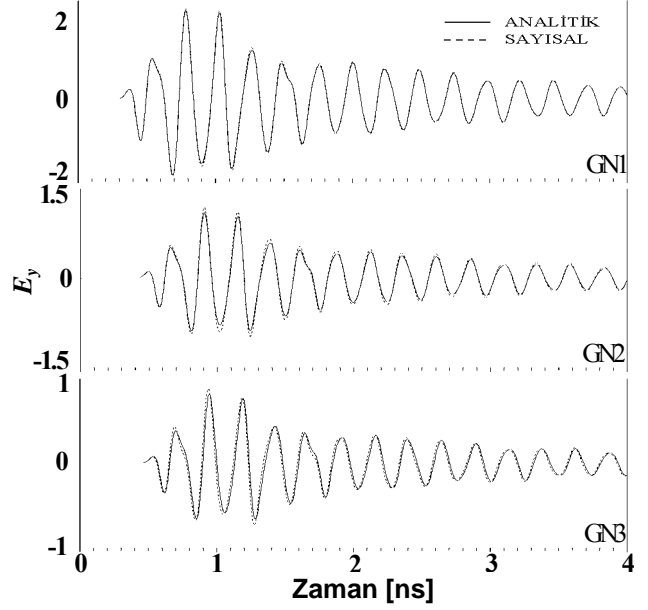
Burada, j' ve k' yarıktaki noktaları, n zaman adımını, R_Δ yarıktaki noktaların gözlem noktasına olan uzaklığını, (i, j, k) ise gözlem noktasının ayrıklaştırılmış koordinatlarını göstermektedir ve:

$$\Delta E_a^y(j', k'; n - 2R_\Delta) = E_a^y(j', k'; n - 2R_\Delta) - E_a^y(j', k'; n - 2R_\Delta - 1) \quad (11)$$

olarak tanımlanmıştır.

Şekil 8'de verilen sonuçlar için kullanılan parametreler aşağıda sıralanmıştır: Kaynak, 9GHz band genişlikli Gauss fonksiyonunun birinci türevi şeklinde olup (25,38,38) noktasında E_y bileşenini uyarmaktadır. Birim hücre boyutu, $\Delta\ell=0.25\text{cm}$ ve Mİ kutu boyutları $20 \times 20 \times 20$ hücredir. Hesap uzayı $87 \times 87 \times 87$ hücre alınmış ve olup, 6-hücreli PML-ASK kullanarak sonlandırılmıştır. Boyutları 5×10 hücre olan yarık Şekil 7'de gösterilen şekilde $y-z$ düzlemine yerleştirilmiştir. Üç değişik gözlem noktası seçilmiştir: GN1(50,38,38), GN2(65,38,38) ve GN3(65,55,38).

Şekil 8'de yarığa göre değişik konumlarda (yakın/uzak karşısında ve çaprazında) olan bu noktalarda İHM ile elde edilen sonuçlar analitik çözümlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekillerde açıklık alanında ve dolayısıyla ışınım alanında rezonatör içindeki çınlama etkilerinin ve dalganın farklı gözlem noktalarına farklı gecikmelerle gelişlerinin İHM hesaplamalarında doğru olarak ortaya konulduğu açıkça görülmektedir. Algoritmaların test ve kalibrasyonu böylece tamamlandıktan sonra, İHM yöntemi analitik çözümü olmayan iki karmaşık problemin çözümüne uygulanacaktır.



Şekil 8. (10) ile elde edilen analitik sonuçlar ile İHM yöntemi sonuçlarının 3 farklı gözlem noktasında karşılaştırılması. Sürekli çizgi analitik, kesik çizgi İHM sonuçlarını göstermektedir.

Sayısal uygulamalar

Bu bölümde İHM'nin ekranlama etkinliği (EE) ve özgül soğurma oranı (ÖSO) hesaplamalarına uygulaması ele alınacaktır.

Ekranlama etkinliği hesabı

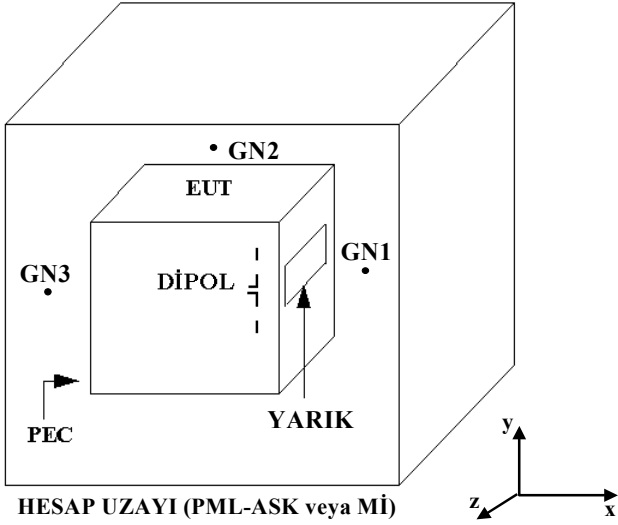
EM uyumluluk (EMU) genel olarak ekranlama ve filtreleme gibi önemli problemleri içerir. Ekranlama bir cihazdan içeri (veya dışarı) doğru giren (çıkan) kaçak alanların azaltılması amacıyla kullanılır. EE ise ekranlamanın ne derece etkili olduğunu gösteren bir parametredir. EE, genellikle desibel olarak ifade edilir ve

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \frac{E_{\text{önce}}}{E_{\text{sonra}}} \quad (12)$$

şeklinde belirlenir. Burada "önce" ve "sonra" alt indisleri, ekranlama kalkını yokken ve varken aynı noktada ölçülen elektrik alan genliğini ifade etmektedir.

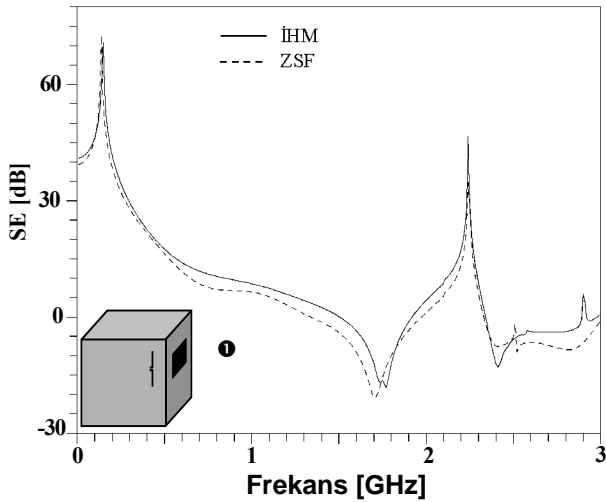
Test edilen yapı ve hesap uzayının şekli ve boyutları Şekil 9'da verilmiştir. Sistem y -ekseni doğrultusunda (30,22,22) noktasından beslenen 6.6cm'lik bir dipol anten ile 3GHz band

genişlikli darbe ile uyarılmaktadır. Hesap uzayı PML-ASK ile sonlandırılmıştır.



Şekil 9. EE hesabında kullanılan test yapısı. Hesap uzayı $60 \times 45 \times 45$, test yapısı $15 \times 15 \times 15$, yarık ise 4×6 hücreden oluşmaktadır. Birim hücre boyutu 0.667 cm 'dir.

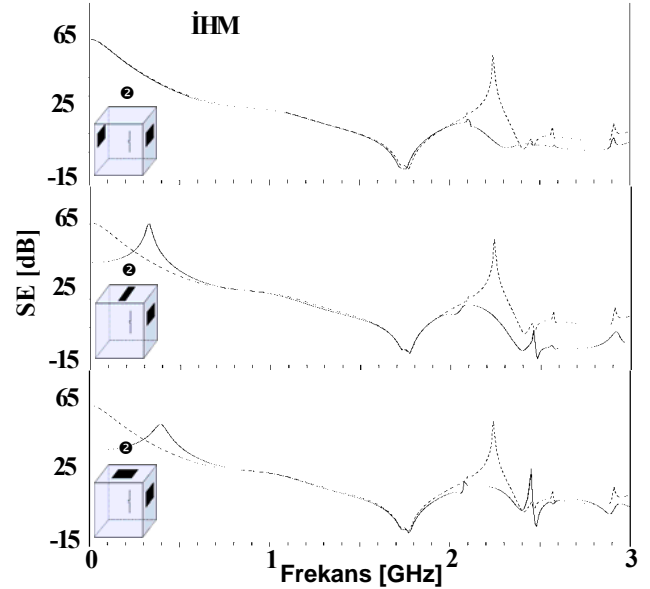
1 numaralı gözlem noktası GN1(41,22,22)'de hem İHM hem de ZSF yöntemleri ile elde edilen EE sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Frekansa göre EE'nin test yapısı için değişimi

Görüldüğü gibi İHM ve ZSF yöntemleri problemi oldukça iyi modellemektedirler. Ayrıca EE bazı frekanslarda oldukça düşük olmakta, yapının açıklığın tam karşısında seçilmiş olan GN1 gözlem noktasına (bkz. Şekil 9)

adeta anten gibi ışınım yapması nedeniyle ekranlama etkinliğinin negatif değerler alabildiği görülmektedir. Bu nedenle yapı ile birlikte hangi gözlem noktaları ve hangi frekansların ele alınacağı da belirtilmelidir. Aynı analiz sadece İHM yöntemi ile üzerinde değişik yüzeylerde ve polarizasyonlarda yarık bulunan test yapısı için tekrarlanmıştır. Sonuçlar Şekil 11'de verilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği gibi, yarıkların yeri ve konumu da EE davranışını çok etkilemektedir. Bu nedenle, ekranlama düzenleri tasarlanırken tüm sistemi göz önüne alan, ilgilenilen tüm frekans bandını ve gözlem noktalarını kapsayan ayrıntılı bir simülasyon çalışmasına gerek vardır.



Şekil 11. Üzerinde birden fazla yarık bulunan test yapısı ile tek yarıklı test yapısının frekansa göre EE davranışı. EE hesapları (30,38,22)'deki gözlem noktası için bulunmuştur. Kesikli çizgiler, tek yarıklı yapıya ait EE'yi göstermektedir.

Özgül soğurma oranı modellenmesi

ÖSO ölçülemeyen, dolaylı yoldan hesaplanabilen önemli bir parametredir. Tanım olarak, kütle başına yutulan güçtür. Birimi W/kg 'dir. ÖSO iki şekilde belirlenebilir:

- Laboratuvarlarda fantom denilen içi insan dokusunun özelliklerine yakın elektrolitik sıvılar ile doldurulmuş test robotlarında yapılan ölçümler ile (Kuster v. diğ., 1997),

- Bilgisayar simülasyonları ile yapılan hesaplamalar yardımıyla (Özyalçın v. diğ., 2001).

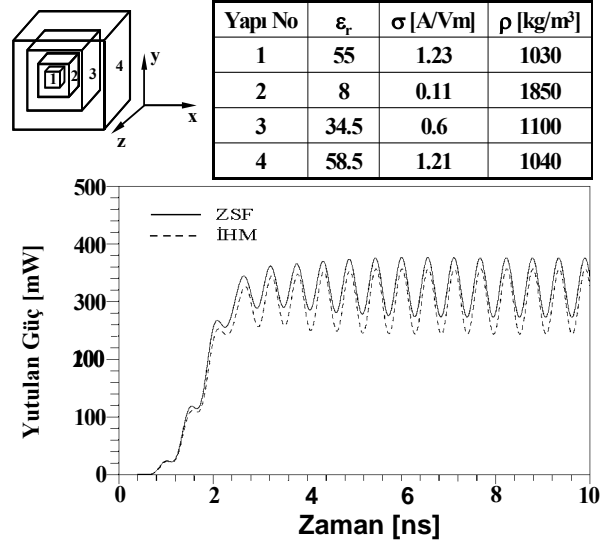
Hiç şüphesiz ikinci yol çok daha ucuz ve risksizdir. ÖSO, mobil telefon gibi dış kaynaklı bir cihazdan yayılan ve doku içinde hesaplanan elektrik alan şiddetinin karesi ile orantılıdır, ve,

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (13)$$

şeklinde tanımlanan bir nokta büyüklüğüdür. Burada, E [V/m], σ [S/m] ve ρ [kg/m³] ilgililenen noktaya ait, sırasıyla elektrik alan şiddeti, iletkenlik ve doku yoğunluklarını göstermektedir. En çok bilinen EM radyasyona maruz kalma standardı tüm vücut üzerinde ortalaması alınmış ÖSO (SAR_{WB})'dır. Bu değer genel güvenlik sınırları konulması için kullanılır. 4W/kg tüm dünyada genel bir üst sınır olarak kabul edilmekle birlikte, insanların yaşadığı yerlerde 0.08W/kg değeri limit olarak alınır. Ancak bazen SAR_{WB} düşük olmasına rağmen, bölgesel olarak ÖSO değerleri yüksek olabilir. Örneğin, bir cep telefonu kullanıcısının antene yakın bölgedeki kafa dokuları gibi. Bu nedenle 1gram veya 10gram'lık doku kütleleri için ortalama ÖSO (SAR_{1g} veya SAR_{10g}) hesaplanır. Bunlar içinde konulmuş olan sınır değerler de 1.6W/kg (1g) ve 2W/kg (10g)'dır.

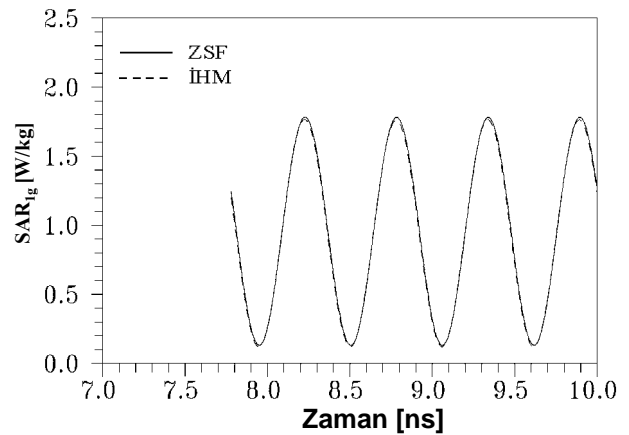
ÖSO hesaplamalarına ilk örnek olarak küp şeklinde içiçe geçmiş kayıplı dielektrik malzemeler ile doldurulmuş olan basit şekilli bir yapı ele alınacaktır. Şekil 12'de hem yapı, hem malzeme özellikleri ve hem de iki yöntem ile hesaplanmış yutulan güçler verilmektedir. Bu örnekte, 900MHz frekanslı sinusoidal bir uyarma kullanılmıştır. Anten ortalama çıkış güçleri 600mW olarak alınmıştır.

Şekilden yutulan gücün beklenildiği gibi, zamanla periyodik bir değişim göstererek sürekli hal değerine doğru yakınsadığı görülmektedir. ZSF ve İHM sonuçları arasındaki farklar ayırıklaştırma hatalarından kaynaklanmaktadır. Hesap uzayı 86×86×86 hücreden oluşmaktadır.



Şekil 12. Kübik test yapısında yutulan güç

İkinci bir test olarak aynı yapıda merkezdeki 1gram'lık doku üzerinde ortalama SAR hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 13'de verilmiştir. Görüleceği gibi İHM ve ZSF yöntemleri birbirleri ile uygun sonuçlar vermektedir. Sonuçlar arasındaki farklar ayırıklaştırma hatalarının (diğer bir deyişle sayısal dispersiyon etkilerinin) İHM ve ZSF yöntemlerinde farklı biçimlerde ortaya çıkmalarından kaynaklanmaktadır. Ancak, birim hücre boyutunu küçültmek suretiyle bu hatalar azaltılabilir.



Şekil 13 Merkez 1gramlık hücrede SAR_{1g}

Yutulan gücün zamanda ve uzayda sinusoidal uyarıya uygun bir periyodiklik göstereceği açık olmakla beraber hem yapıyı oluşturan farklı ortamları tanımlayan parametreler birbirinden hayli farklı olduğundan, hem de

yansımalar sonucu oluşan kısmi duran dalgaların etkisi nedeniyle bu değişimin doğru olarak kestirilmesi genelde mümkün değildir. Bu nedenle, yutulan gücün yapı içinde zamanla değişimini gösteren şekiller özellikle tıp uygulamaları açısından önem taşır. Bu tür gösterimlere birkaç örnek verilecektir. İlk olarak Şekil 14 ele alınsın. Şekil 14a'da aynı zaman adımıyla ancak farklı yatay kesitlerde gözlenen ve geçici durum sona erdikten sonra elde edilen anlık ÖSO değerleri verilmiştir. Her bir şeklin üzerinde bulunan rakamlar, o anda o kesitteki maksimum anlık ÖSO değerini W/kg olarak göstermektedir. Aynı analiz yapının dikey kesitleri için yapılmış ve sonuçları Şekil 14b'de verilmiştir. Şekil 14'te uyarıcı dipol kaynağın konumu da belirtilmiştir. Bekleneceği gibi, hem yatay hem de dikey kesitlerde antene yakın ve/veya kayıpları büyük olan bölgelerde daha yüksek ÖSO değerleri oluşmaktadır.

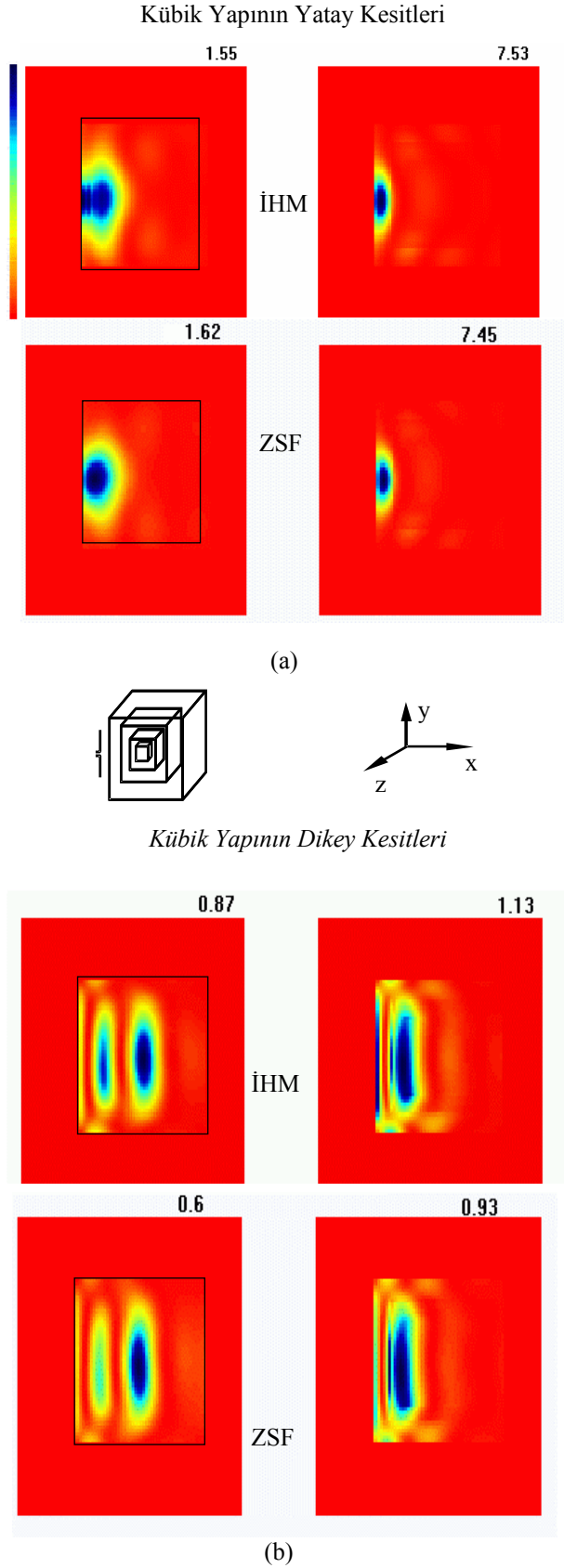
Bu çalışmada, son olarak, İHM yöntemi ile insane kafası modeli kullanılarak yapılan ÖSO hesaplamalarına birkaç örnek verilecektir. Ele aldığımız insan kafası modeli 7 farklı doku içermektedir ve dokuların elektriksel özellikleri ve uzayda dağılımı manyetik rezonans ölçümleri yardımıyla gerçekçi biçimde belirlenmiştir (Özyalçın, 2002). Bu model ile yapılan hesaplamalara iki örnek olarak yatay ve dikey kesitlerde elde edilen anlık ÖSO görüntüleri Şekil 15'te verilmiştir.

Bu şekiller analiz edilirse, bekleneceği gibi, antene yakın veya iletkenliğin yüksek olduğu dokularda anlık ÖSO değerlerinin yüksek çıkmakta olduğu görülecektir (Özyalçın, 2002).

Sonuçlar

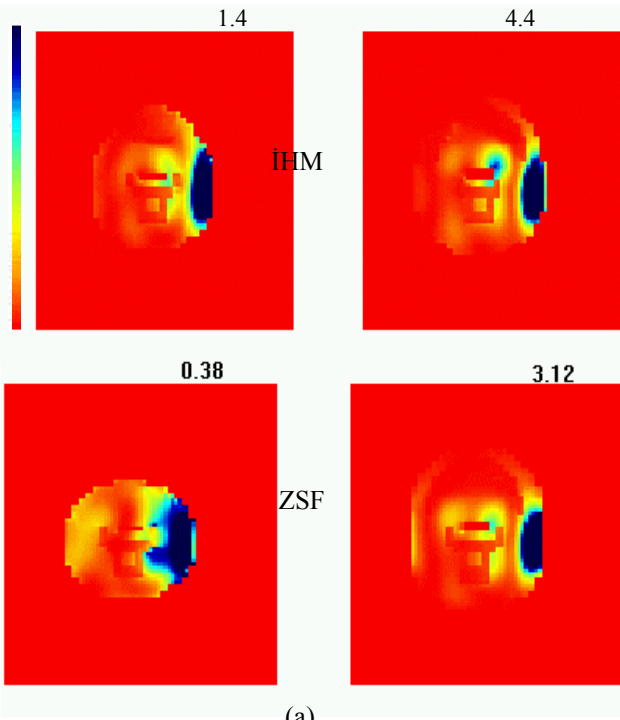
Bu çalışmada güçlü bir ZD teknik olan İHM yönteminin iki karmaşık elektromanyetik problemin çözümüne uygulanışı ele alınmıştır.

Çeşitli yapılarda EE ve ÖSO büyüklüklerinin hesaplamalarına ilişkin bu problemlere ancak sayısal yöntemlerle yaklaşılabilmektedir. EE ve ÖSO'nun analitik veya deneysel olarak belirlenmesi genelde olanaksızdır.

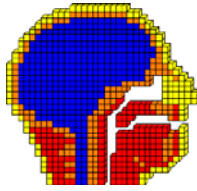


Şekil 14. (a) Yatay ve (b) dikey kesitlerde anlık ÖSO görüntüsü

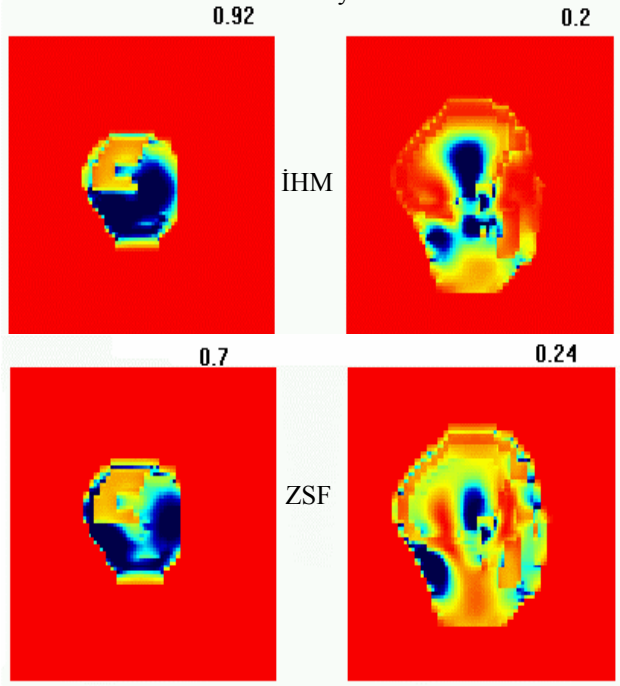
Kafanın Yatay Kesitleri



(a)



Kafanın Dikey Kesitleri



(b)

Şekil 15. Kafaya ait (a) yatay ve (b) dikey kesitlerde anlık ÖSO değişimi

Bir problemin çözümü için tek alternatif sadece sayısal bir yöntem olunca bu yöntem ile elde edilen sonuçların güvenilirlik sınırlarının belirlenmesi için iki olanak vardır: (i) Yöntemin analitik/deneysel sonuçları bilinen problemlere uygulanarak burada elde edilen doğruluk derecesinin ve bunun çeşitli parametrelere nasıl bağlı olduğunun belirlenmesi ve (ii) Analitik/deneysel sonuçları bilinmeyen problemlerde yöntem ile elde edilen sonuçların ayırıklaştırma duyarlılığı arttırıldıkça ne şekilde yakınsadığının ve/veya bu sonuçların bağımsız başka bir salt sayısal yöntem ile elde edilen sonuçlarla ne ölçüde uyduğunun incelenmesi.

Bu çalışmada EE ve ÖSO hesaplamaları öncesi ve sırasında yukarıda belirtilen her iki yöntem de kullanılarak geliştirilmiş olan algoritmanın kalibrasyonu ve validasyonu yapılmıştır. Algoritmanın kalibrasyonu modelleme ve ayırıklaştırmada kullanılan parametrelerin ele alınan probleme, hesaplamalarda istenen doğruluk derecesine, mevcut bilgisayar olanaklarına ve hedeflenen hesaplama sürelerine bağlı olarak en uygun biçimde seçimini içerir. Bu seçimi yönlendiren temel parametreler şöyle özetlenebilir:

- Uygun band genişliğine sahip ve ilgilenilen frekans bölgesini kapsayan bir kaynak tipi seçilmelidir,
- İstenen frekans duyarlılığına bağlı olarak yeterince uzun bir gözlem süresi alınmalıdır,
- Courant kriteri koşullarını sağlayan zaman adımı seçilmelidir,
- Ayırıklaştırma hatalarının (sayısal dispersiyon) ilgilenilen en büyük frekans (en küçük dalgaboyu, λ_{\min}) ile birim hücre boyutu arasındaki oran çok büyük önem kazanır. Normal şartlarda eldeki problem ve yapının basitliğine göre $\lambda_{\min}/\Delta\ell$ oranının 10-12 mertebesinde olması yeterlidir. Ancak yapılar karmaşıktıkça ve genlikten ziyade faz ile de ilgilenilmesi durumunda bu oranın 100-150 mertebelerine ulaşması gerekebilir,
- Hesaplamalar için gerekli bilgisayar kapasitesi ve zamanı $\lambda_{\min}/\Delta\ell$ oranının yaklaşık üçüncü kuvveti ile orantılı olarak artar. Bu nedenle, en uygun oranın belirlenmesinde, birbiriyle

çelişen, “eldeki bilgisayar olanakları” ile “beklenen doğruluk” faktörlerinin dengelenmesi gerekir.

Bu çalışma ile, yukarıda sıralanan kalibrasyon ve kanonik test problemlerinin bilinen sonuçlarıyla ve ZSF yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak gerçekleştirilen validasyon aşamaları sonucu geliştirilen İHM yönteminin uygulama alanının, çeşitli karmaşık yapılarda, yeterli doğruluk ve güvenilirlikle, EE ve ÖSO büyüklüklerinin hesaplanmasını içerecek şekilde genişletilebileceği gösterilmiş olmaktadır.

Kaynaklar

- Choi, D. H., Hofer, W. J. R. (1986). The Finite Difference Time Domain Method and its Applications to Eigenvalue Problems, *IEEE Trans. Microwave Theo. and Tech.*, **4**, 34, 1464-1469.
- Christopoulos, C. (1995) *The Transmission-Line Modeling Method*, Oxford University Press, Oxford.
- Johns, P. B. ve Beurle, R. L. (1971). Numerical Solution of Two-Dimensional Scattering Problems using TLM, *Proc. IEE*, **118**, 1203-1208.
- Kuster, N., Kastle, R., Schmid, T. (1997). Dosimetric Evaluation of Mobile Communications Equipment with Known Precision, *IEICE Trans. Communications*, E80-B, **5**, 645-652.
- Özyalçın, M. O. ve Sevgi, L. (1998). Comparisons of FDTD and TLM Methods in EMC-Shielding Effectiveness Analysis, *The Eighth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC'98*, Tucson-Arizona, USA, June 1-3.
- Özyalçın, M.O., Akleman, F. ve Sevgi, L. (2001). Numerical Modelling, Validation & Verification In Biomedical Engineering: SAR Calculations Caused By Cellular Phones, *ICECOM'01, 16th Int. Conf. on Applied Electromagnetics and Comm.*, Dubrovnik, Croatia, October 1-3.
- Russer, P. (1997). The Transmission Line Matrix Method: Fundamentals and Applications, Presented in *NATO Advanced Study Institute*, Samos, Greece, July 26-August 5.
- Sullivan, D. M. (2000). *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*, New York: IEEE Press, USA.
- Yee, K. S. (1966). Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **3**,14, 302-307.