

AÇIKLIĞA SAHİP YÜKLÜ EKLANLAMA KUTULARININ HİBRİT MOM/FEM KULLANILARAK ELEKTROMANYETİK ANALİZİ

*Sibel YENİKAYA**

Özet : Açıklığa sahip bir rezonatorün içerisindeki alan dağılımını hesaplamak için moment metodu(MoM) ile vektörel sonlu elemanlar metodunu (FEM) birleştiren hibrit bir formülasyon sunuldu. Rezonatörün içerisindeki elektromanyetik alanlar sonlu elemanlar metodu ile hesaplandı ve açıklıktaki sınır koşulundan elde edilen integral denklem moment metodu ile çözüldü. Hibrit metot yüklü ve yüksüz durumdaki bir rezonatöre uygulandı. Sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldı ve aralarında uyum olduğu görüldü. Daha sonra farklı açıklık ve rezonatör konfigürasyonları için ekranlama etkinliği, depolanan elektriksel enerji ve kayıp güç yoğunluğu incelendi.

Anahtar Sözcükler: Ekranlama etkinliği, sonlu elemanlar metodu, moment metodu.

Electromagnetic Analysis of Loaded Shielding Enclosures with Aperture with Using Hybrid MOM/FEM

Abstract: In this paper, a hybrid technique combining the vector finite element method(FEM) and the method of moments(MoM) is presented to calculate electromagnetic analysis in rectangular enclosures with aperture. The interior and exterior regions of the enclosure are analyzed separately by employing the field equivalence principle. While FEM is used for solving EM fields inside the enclosure, MoM is used for solving the surface integrals related with the aperture field components using equivalent surface currents. The hybrid method is applied to an empty and loaded enclosure. Results are compared with literature and good agreement is reported. Then, for different configurations of aperture and enclosure, shielding effectiveness, stored electrical energy ratio and dissipated power are examined.

Keywords: Shielding effectiveness, finite element method, method of moments.

1. GİRİŞ

Elektronik sistemler tasarlanırken elektromanyetik uyumluluk (EMC) sınırlarının hesaba katılması gereklidir. Zararın önlenmesi yada elektromanyetik korumanın sağlanması için elektronik sistemler iletken bir koruyucu içerisine yerleştirilirler. Bu koruyucu kutu üzerinde, içerisindeki elemanlar ile dış ortamda varolan alanlar arasında kublaja neden olan açıklıklar bulunmaktadır. Bu açıklıklar giriş-çıkış bağlantıları, kontrol panelleri ve havalandırma gibi nedenlerden dolayı zorunlu olarak açılmaktadır. Açıklıklardan içeriye giren alanlarla iletken kutu içerisindeki bir PCB, devre vb. ile etkileşim gerçekleşir. Bu etkileşimin bulunması için yapıdaki elektromanyetik alanların hesaplanması gerekir.

Ekranlama etkinliği (SE), ekran varken gözlemlenen alanların ekran yokken aynı noktada gözlemlenen alanlara oranı türünden tanımlanan, cihazların elektromanyetik uyumluluğunu yansıtan önemli bir parametredir (Thomas ve diğ., 1999). EMC uygulamalarında, ekranlama etkinliğinin tahmini, cihaz tasarım aşamasında oldukça önemlidir. Boş bir ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini hesaplayan analitik formülasyon Robinson ve diğ. (1998) tarafından sunulmuştur. Ancak bu formülasyon sadece dikdörtgen kutulara uygulanabilir ve kutunun temel moduyla sınırlıdır. Karmaşık kutu konfigürasyonları için, ekranlama etkinliğini analitik olarak bulmak oldukça zordur. Bundan dolayı nümerik metotların kullanımı söz konusudur. Son zamanlarda çeşitli metotlar, duvarlarında açıklıklar bulunan metalik kutuların ekranlama etkinliğini tahmin etmek için kullanılmıştır. Li ve diğ. (2000) tarafından ekranlama kutularındaki açıklık ve yarıklardan elektromanyetik ışığa hem deneysel olarak

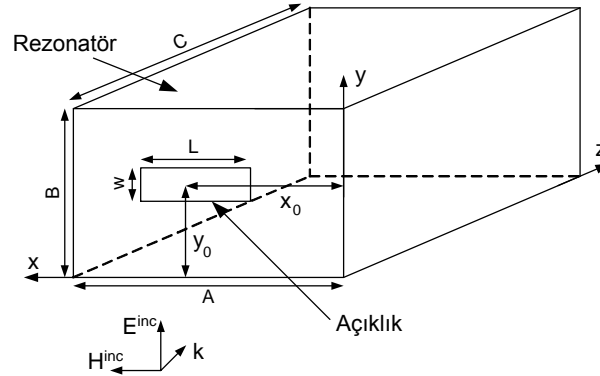
* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü, 16059 Görükle, Bursa.

hemde FDTD tekniğini kullanılarak bulunmuştur. Kutuların ekranlama etkinliği deneysel olarak ve moment metoduna dayanan elektromanyetik bir simulator vasıtasıyla nümerik olarak elde edilmiştir (Olysgar ve diğ., 1999). Sadece dikdörtgen açıklıklı dikdörtgen rezonatörlerin ekranlama etkinliğini hesaplayan Modal/MoM hibrit metodunu açıklıklı boş bir rezonator üzerinde sunmuşlardır (Ben-hassine ve diğ., 2002). Zaman domenli sonlu eleman tekniği kullanarak açıklıklı yüksüz bir kutu çalışması Deshpande (2000) tarafından araştırılmıştır. Duvarlarında açıklık bulunan dikdörtgen kutunun SE hesaplaması problemini formüle etmişlerdir. Bu formülasyonda, açıklıkları eşdeğer manyetik akım kaynakları olarak değiştirmişler ve bu kaynaklar tarafından ışılan alanları cavity Green fonksiyonları ile ifade etmişlerdir (Rajamani ve Bunting, 2006). Wallyn et al., metalik dikdörtgen kutuların ekranlama etkinliğini elde etmek için potansiyel integral denklemini çözen yeni bir MoM tekniği kullanmışlardır (Wallyn ve diğ., 2002).

Burada sunulan formülasyonda, rezonatör içerisindeki alan dağılımını bulmak için frekans domeninde MoM/FEM uygulanmıştır. Bu yaklaşımda elektrik alan, rezonatörün içerisinde FEM'in kullanılmasıyla rezonatörün dışarısında ise serbest uzayın Green fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. FEM'in sadece rezonatörün içerisine uygulanmasıyla, FEM çözüm uzayı daraltılmış ve yutucu sınır koşullarının kullanılması engellenmiştir. Hibrit metot, tek başına FEM'in kullanılması durumunda ihtiyaç duyulan işlem hacminden daha az işlem hacmi oluşturmuştur. Bu çalışmada, dielektrik malzeme ile yüklü rezonatörün içerisindeki alanların nümerik olarak hesaplanması amaçlanmıştır. Çözümde elde edilen elektrik alan dağılımı yardımıyla rezonatörün ekranlama etkinliği, rezonatör içerisinde depolanan elektriksel enerji ve dielektrik madde üzerindeki kayıp güç yoğunluğu hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve bu parametrelerin tasarım ve optimizasyonda kullanılmaları amaçlanmıştır.

2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU

Dikdörtgen açıklıklı dikdörtgen bir rezonatörün geometrisi, Şekil 1'de gösterilmiştir. Rezonatörün boyutu $A \times B \times C$ dir. Açıklığın boyutu $L \times w$ 'dir. Rezonatörün duvarlarının ince ve mükemmel iletken olduğu farz edilmiştir. Rezonatörün açıklık bulunan yüzeyine, y polarizasyonlu bir düzlemsel dalga dik olarak düşürülmüştür.



Şekil 1:

Açıklıklı dikdörtgen rezonatörün geometrisi

Rezonatörün açıklık bulunan yüzeyi sonsuz geniş mükemmel iletken yer düzlemi olarak alındığında, bu problem, Schelkunoff eşdeğerlik prensibine göre iki bölgeye ayrılabilir (Rao ve diğ., 1982). Birinci bölge rezonatörün iç hacmi ve ikinci bölge ise yer düzlemiyle sınırlandırılmış serbest yarı uzaydır.

Eşdeğer alan teoremine göre, mükemmel iletken levha üzerine açılmış bir yarı manyetik akım dağılımına eşdeğerdir.

$$\vec{J}_m = -\hat{n} \times \vec{E}_a \quad (1)$$

burada \vec{E}_a açıklıktaki elektrik alandır. Açıklıktan hem serbest uzaya hem de rezonator içerisine olan elektromanyetik ışımaya, bu manyetik akım kaynağının yaptığı ışımaya eşdeğerdir.

2.1. FEM Formülasyonu

Rezonatörün içindeki elektrik alan dağılımının hesaplanmasında eleman kenarları yöntemi (Whitney-1 Form) olarak da adlandırılan vektör sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılacaktır. FEM formülasyonuna, elektrik alana ait vektör dalga denklemiyle başlanır.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} - k_0^2 \vec{E} = 0 \quad (2)$$

Burada, \vec{E} rezonatörün içerisindeki elektrik alan dağılımı ve $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ serbest uzayın dalga sayısıdır. Bu denkleme, \vec{w} test fonksiyonu olmak üzere Galerkin metodu uygulanır. (2) ifadesi test fonksiyonu ile iç çarpıma tabii tutulup, rezonatörün V hacmi üzerinden entegre edilirse,

$$\int_V \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) \cdot \vec{w} dV - k_0^2 \int_V \vec{E} \cdot \vec{w} dV = 0 \quad (3)$$

denklemleri elde edilir. (3) denkleminin birinci vektör Green özdeşliği uygulanırsa,

$$\int_V (\nabla \times \vec{E}) \cdot (\nabla \times \vec{w}) dV - k_0^2 \int_V \vec{E} \cdot \vec{w} dV = \oint_S (\hat{n} \times \vec{H}) \cdot \vec{w} dS \quad (4)$$

eşitliğine ulaşılır. Formülasyonda bir sonraki adım, konum ayrıklaştırmasıdır. Bunun için rezonatörün iç bölgesi dört yüzüzlü elemanlara parçalanır. Elektrik alan,

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N e_i \vec{w}_i \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada e_i ve \vec{w}_i , oluşturulan örgüdeki i. nci kenar ile ilişkili bilinmeyen katsayı ve çatı fonksiyonudur. N ise serbestlik derecesidir. Galerkin metodu, bu çatı fonksiyonu ile test fonksiyonu aynı tipte olmasını gerektirir.

(4) denkleminde, sol taraftaki terim uygun sınır koşulları için kullanılır. Mükemmel iletken sınırlar üzerinde teğetsel elektrik alan sıfır olduğu için bu terim, rezonator duvarları üzerinde sıfır olarak alınır. Bu integralin açıklık üzerindeki değeri hesaplanmalıdır. Bunun için, açıklık üzerindeki teğetsel manyetik alanın bilinmesi gerekir. Açıklık üzerindeki teğetsel manyetik alan,

$$\hat{n} \times \vec{H} = \sum_{i=1}^{N_A} \alpha_i \vec{f}_i \quad (6)$$

olarak ifade edilebilir. Burada α_i ve \vec{f}_i sırasıyla açıklıktaki i. kenar ile ilişkili bilinmeyen katsayı ve çatı fonksiyonudur. N_A ise açıklıktaki toplam kenar sayısıdır.

(5) ve (6) eşitlikleri, (4) eşitliğinde yerine konulursa aşağıdaki matris denklemi elde edilir:

$$\{[S] - k_0^2 [T]\} e = j\omega\mu_0 [B] \alpha \quad (7)$$

Eleman matrislerinin açık ifadesi şu şekildedir:

$$[S]_{ij} = \int_{V_e} \nabla \times \vec{w}_i \cdot \nabla \times \vec{w}_j dV \quad (7a)$$

$$[T]_{ij} = \int_{V_e} \bar{w}_i \cdot \bar{w}_j dV \quad (7b)$$

$$[B]_{ij} = \oint_{S_a} \bar{f}_i \cdot \bar{w}_j dS \quad (7c)$$

(7) eşitliği yeniden düzenlenirse,

$$[A]e = j\omega\mu_0[B]\alpha \quad (8)$$

matris denklemi elde edilir. Burada $[A]=[S]-k_0^2[T]$ dir. $[S]$, $[T]$ ve $[B]$ sonlu eleman matrisleridir. e ve α ise bilinmeyen katsayı vektörleridir. Bu bilinmeyen katsayıları ikiye ayırmak mümkündür. Açıklık üzerindeki kenarlarla ilişkili bilinmeyen katsayılar bir grubu oluştururken diğer bölgedeki kenarlara ait katsayılar ise diğer grubu oluşturur.

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_a \end{bmatrix} \quad e = \begin{bmatrix} e_i \\ e_a \end{bmatrix} \quad (9)$$

Burada a ve i alt indisleri, sonlu eleman hacminin açıklık ve iç bölgesini ifade etmektedir. Bu durumda, (8) eşitliğindeki $[A]$ ve $[B]$ matris elemanları da iç ve açıklık kenarlarına bağlı olarak parçalanabilir:

$$\begin{bmatrix} A_{ii} & A_{ia} \\ A_{ai} & A_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_i \\ e_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \alpha_a \end{Bmatrix} \quad (10)$$

2.2. Moment Metodu (MoM)

FEM formülasyonu açıklık üzerindeki manyetik alanın bilinmesini gerektirir. Açıklık üzerindeki teğetsel manyetik alan, sınır koşullarının uygulanmasıyla bulunur. Açıklıkta teğetsel manyetik alan sürekli olmalıdır. Buna göre açıklık üzerindeki sınır koşulu

$$\hat{n} \times \bar{H}^{inc} + \hat{n} \times \bar{H}^{ext} = \hat{n} \times \bar{H}^{int} = \hat{n} \times \bar{H}^a \quad (11)$$

şeklinde ifade edilir. H^{inc} uygulanan düzlemsel dalganın manyetik alanıdır. H^{ext} açıklık üzerinde oluşan J_m 'in dış ortama yaydığı ışımın manyetik alanıdır ve bu alan serbest uzayın Green fonksiyonu kullanılarak bulunur. H^{int} , J_m 'in rezonatör içerisine ışıdığı alanın açıklık üzerindeki değeridir ve aynı zamanda açıklığın manyetik alanına (H^a) eşittir. H^{int} , FEM formülasyonunun ihtiyaç duyduğu manyetik alandır ve formülasyonumuzda önemli bir yer teşkil eder, hibritizasyon bununla sağlanır.

Açıklıktan serbest uzaya ışıyan alanların bulunmasında elektrik vektör potansiyel \bar{F} ' e ait dyadik Green fonksiyonu kullanılabilir. Buna göre elektrik vektör potansiyel \bar{F} ,

$$\bar{F} = \varepsilon_0 \iint_{S_a} \bar{\bar{G}}(r/r') \cdot \bar{J}_m(r') dS' \quad (12)$$

integralinin çözümü ile bulunur. Burada $\bar{\bar{G}}(r/r')$, r' kaynak noktası ve r alan noktası olmak üzere serbest uzayın elektrik vektör potansiyeline ait dyadik Green fonksiyonudur. S_a ise açıklığın alanıdır. (1) eşitliğinde verilen manyetik akım yoğunluğu ve serbest uzayın dyadik Green fonksiyonu (12) eşitliğinde yerine konulursa,

$$\vec{F}(r) = \varepsilon_0 \iint_{S_a} \frac{e^{-jk_0 R}}{R} \vec{I} \cdot (-\hat{n} \times \vec{E}_a) dS' \quad (13)$$

elde edilir. Burada E_a açıklıktaki elektrik alanıdır ve FEM ile hesaplanan rezonatör içindeki elektrik alanının açıklık üzerindeki değerine eşittir. Bu yüzden (5) eşitliğinde bulunacak olan elektrik alan katsayıları yardımıyla elde edilir. (13) eşitliğindeki elektrik vektör potansiyeli yardımıyla, serbest yarı uzaya ışıyan manyetik alan,

$$\vec{H}^{ext}(r) = \frac{1}{j\omega\mu_0\varepsilon_0} \left[k_0^2 \vec{F}(r) + \nabla\nabla \cdot \vec{F}(r) \right] \quad (14)$$

şeklinde tanımlanır. H^{int} , kutu içerisindeki manyetik akımın teğetsel bileşeninin açıklıktaki değeri, (6) eşitliği ile ifade edilir. (11) eşitliğine Galerkin metodu uygulanmasıyla elde edilen integral denklem aşağıdaki matris forma dönüşür:

$$\left[h^{inc} \right] + \left[Y^{ext} \right] \{ e_a \} = \left[Y^{int} \right] \{ \alpha_a \} \quad (15)$$

burada $\{ e_a \}$ açıklıktaki elektrik alanına ait bilinmeyen katsayıların vektörüdür.

$\left[h^{inc} \right]$, $\left[Y^{ext} \right]$ ve $\left[Y^{int} \right]$ ise açıklıktaki manyetik alanların iç çarpıma tabi tutulmasıyla elde edilen matrislerdir. (15) eşitliği, açıklık ve iç kenar ayrımı gözönüne alınırsa

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ \alpha_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \left[Y^{int} \right]^{-1} \left[Y^{ext} \right] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ e_a \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \left[Y^{int} \right]^{-1} \left[h^{inc} \right] \end{Bmatrix} \quad (16)$$

ifadesi elde edilir. FEM formülasyonu neticesinde elde edilen (8) ifadesi ile MoM formülasyonundan elde edilen (15) ifadesi ortak bilinmeyenlere sahip olduğundan bu bilinmeyenler vasıtasıyla bu denklemler birleştirilebilir. (15) ifadesinden α_a ve e_a 'ya bağlı olarak tekrar düzenlenir ve (10) eşitliğinde yerine konularsa;

$$\begin{bmatrix} A_{ii} & A_{ia} \\ A_{ai} & A'_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_i \\ e_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ B'_{aa} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

elde edilir. Bu matris denklemde,

$$A'_{aa} = A_{aa} - B_{aa} \left[Y^{int} \right]^{-1} \left[Y^{ext} \right] \quad (17a)$$

$$B'_{aa} = B_{aa} \left[Y^{int} \right]^{-1} \left[h^{inc} \right] \quad (17b)$$

olarak yazılır. Bu denklemin çözümüyle, e_i ve e_a katsayıları elde edilir. Böylece hem rezonatör içindeki elektrik alan dağılımı hem de açıklıktaki manyetik akım yoğunluğu bulunur (Yenikaya ve Akman, 2009).

3. NÜMERİK SONUÇLAR

3.1. Açıklığa sahip yüksüz rezonatör

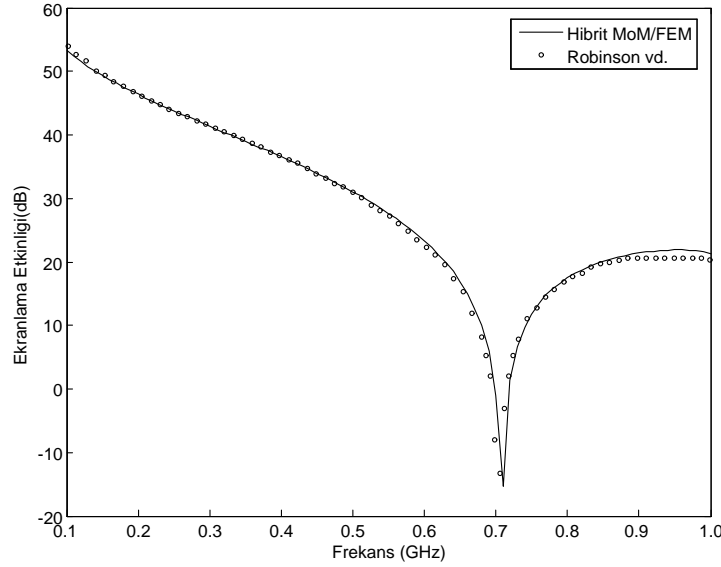
Bu bölümde, önceki bölümde tanımlanmış olan hibrit MoM/FEM kullanılarak elde edilen bazı nümerik sonuçlar sunulmuştur. Metodun etkinliğini göstermek için, açıklıklı boş bir rezonatör kullanılmıştır. Rezonatörün boyutları $A=30\text{cm}$, $B=12\text{cm}$ ve $C=30\text{cm}$ olarak seçilmiştir. $L=10\text{cm}$ uzunluğunda ve $w=0.5\text{cm}$ genişliğinde olan açıklık, $z=0$ düzleminde açıklık merkezi $x_0=15\text{cm}$ ve $y_0=6\text{cm}$ olacak şekilde konumlandırılmıştır. Rezonatörün açıklık bulunan yüzeyine, y polarizasyonlu bir

düzlemsel dalga dik olarak düşürülmüştür. Rezonatör x yönünde 7 y yönünde 3 ve z yönünde 6 hücreye bölünmüştür. Her hücre de beş adet dört yüzlü elemana bölünerek modellenmiştir. Rezonatördeki bilinmeyen sayısı 1015 dir. Sunulan MoM/FEM hibrit metodu ile rezonatörün içindeki elektrik alan dağılımı hesaplanmıştır. Rezonatörün merkezindeki elektrik alanın değeri (\vec{E}^o) ve rezonatör yok iken bu noktada uyaran düzlemsel dalganın elektrik alan değeri (\vec{E}^{inc}),

$$SE_{dB} = -20 \log_{10} \left(\frac{|\vec{E}^o|}{|\vec{E}^{inc}|} \right) \quad (18)$$

ifadesinde yerine konularak rezonatörün ekranlama etkinliği elde edilmiştir. Ekranlama etkinliğinin frekansla değişimi elde edilmiş ve bu değişim Robinson ve diğ. (1998)'in elde ettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 2).

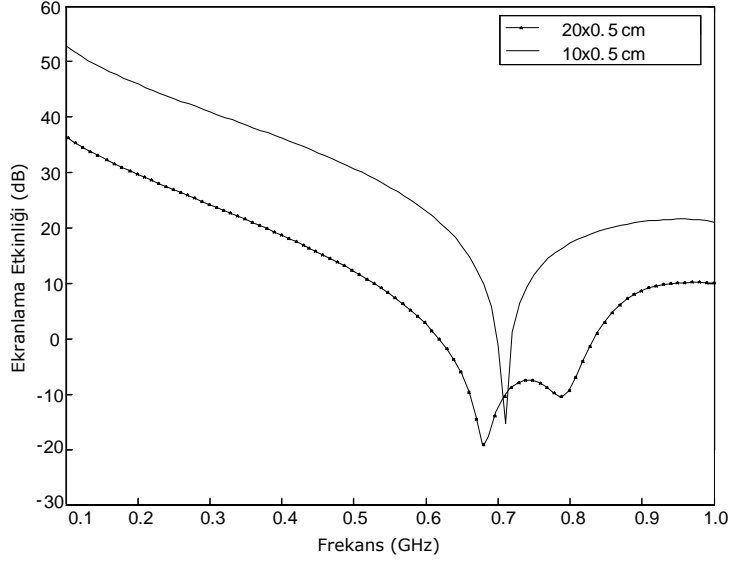
Burada sunulan yöntemden elde edilen sonuçlarla Robinson'un elde ettiği sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Şekilden yaklaşık 700MHz civarında bir çukur görülmektedir. Bu çukur, rezonatörün TE₁₀₁ moduyla ilişkili rezonans frekansıdır.



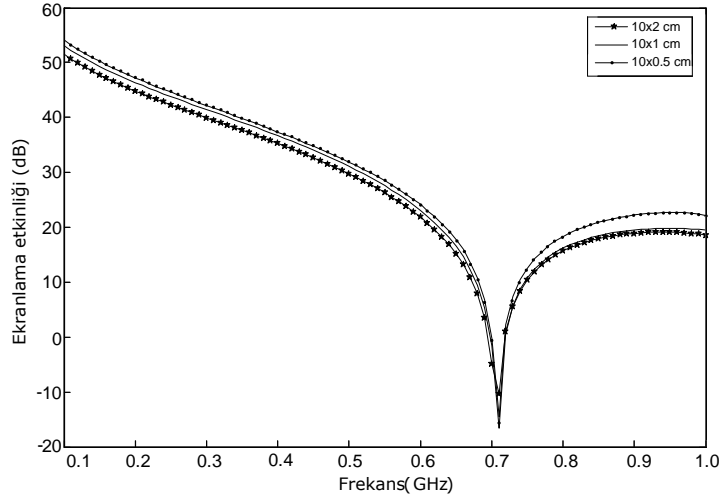
Şekil 2:

Açıklıklı rezonatörün merkezindeki ekranlama etkinliği için simülasyon sonuçları

Açıklık boyunun ekranlama etkinliği üzerine etkisini göstermek için, $w=0.5$ cm olan genişlik sabit tutularak, boyu $L=10$ cm ve 20 cm olacak şekilde seçilmiştir. Açıklığın merkezi rezonatör duvarının ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. 10 cm uzunluğundaki açıklığın rezonansı 1.5 GHz ve 20 cm uzunluğundaki açıklığın rezonansı 750 MHz dir. $30 \times 12 \times 30$ cm lik boş bir rezonatörün rezonans frekansı ise yaklaşık olarak 707 MHz dir. Burada Şekil 3'te görüleceği gibi 20×0.5 cm'lik açıklıktaki çukur, açıklık rezonansı ile rezonatörün rezonansının etkileşiminden dolayı oluşmuştur. 10×0.5 cm'lik açıklık için bu durum gözlenememiştir. Çünkü bu açıklığın rezonansı, rezonatörün rezonans frekansından oldukça uzaktır. Açıklığın boyunun artmasıyla, ekranlama etkinliğinin azaldığı görülmüştür. Açıklık genişliğinin ekranlama etkinliğine etkisi Şekil 4'te verilmiştir. Açıklığın genişliğinin artması ile ekranlama etkinliği çok az değişmektedir. Bunda da uygulanan düzlemsel dalganın polarizasyonu etkilidir. Özellikle rezonans frekansı civarında aynı ekranlama etkinliği değerine sahiptirler. Bu frekanstan uzaklaştıkça ekranlama etkinliği artmaktadır.



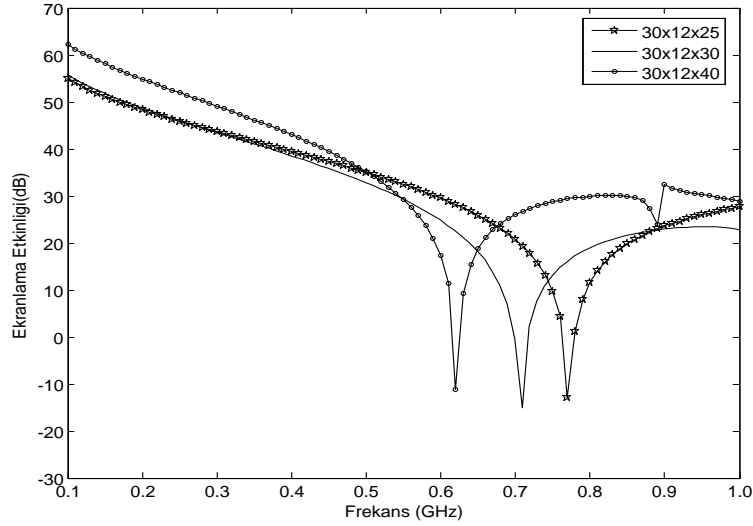
Şekil 3:
Farklı açıklık uzunlukları için, ekranlama etkinliğinin frekansla değişimi



Şekil 4:
Farklı açıklık genişliği için, ekranlama etkinliğinin frekansla değişimi

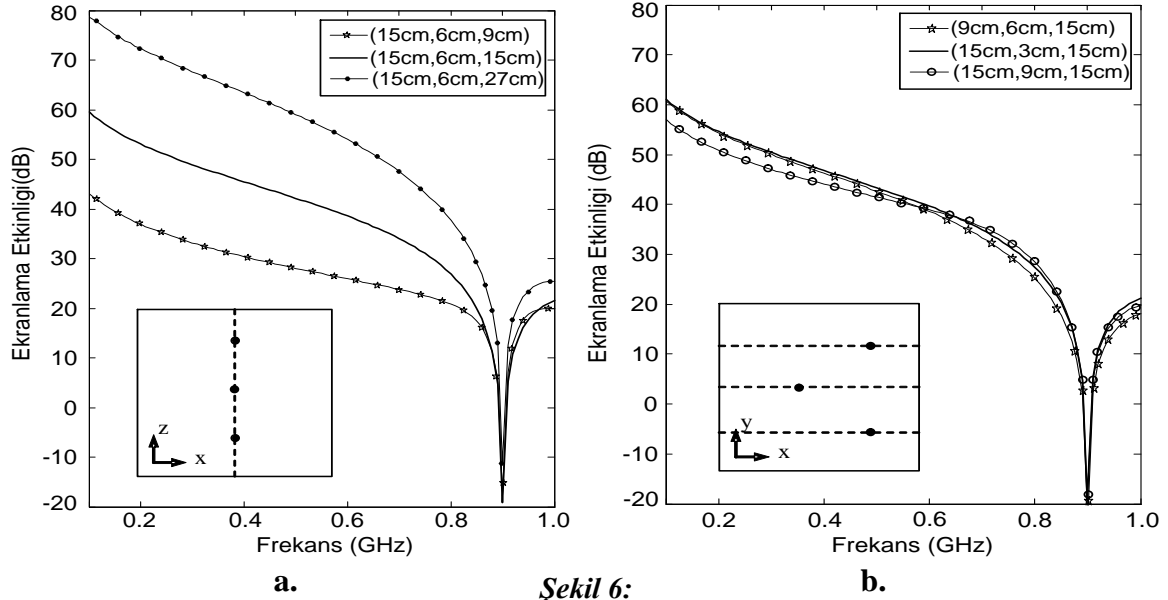
Rezonatör boyutunun ekranlama etkinliği üzerine etkisini göstermek için üç farklı rezonatör ele alınmıştır. Bu rezonatörlerin boyutları sırasıyla 30x12x25cm, 30x12x30cm ve 30x12x40cm olarak seçilmiştir. $L=10$ cm uzunluğunda ve $w=0.5$ cm genişliğinde olan açıklık, $z=0$ düzleminde açıklık merkezi $x_0=15$ cm ve $y_0=6$ cm olacak şekilde konumlandırılmıştır. Rezonatörler x yönünde 7, y yönünde 3 ve z yönünde ise sırasıyla 5, 6 ve 7 hücreye bölünmüştür. Rezonatörlerdeki bilinmeyen sayısı sırasıyla 858, 1015 ve 1329'dır. Ekranlama etkinliklerinin hesaplandığı nokta rezonatörlerin merkez noktaları olarak alınmıştır. Rezonatör boyutlarının ekranlama etkinliğine etkisi Şekil 5'te gösterilmiştir. Rezonatör boyutları değiştiğinden dolayı rezonans frekansları da değişmiştir. Ekranlama etkinliğindeki çukur bu rezonanslara karşı gelmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ekranlama etkinliği rezonatör boyutuyla değişmektedir. Böylece tasarım yapılırken, uygun ekranlama etkinliği değerleri elde etmek için rezonatör boyutu değiştirilebilir.

Şekil 6a ve b' de ise 20cmx12cmx30cm boyutlarına sahip rezonatörün tabanından $y=6$ cm yukarısına açılmış 10cmx0.5cm'lik açıklığın rezonatör içerisindeki farklı noktalarda hesaplanan ekranlama etkinliği değişimi gösterilmiştir. Açıklıktan z yönünde uzaklaştıkça ekranlama etkinliğinin rezonans frekansına kadar arttığı ve rezonans frekansından sonra artışın azaldığı görülmektedir. Gözlem noktalarının, xy kesitinin farklı noktalarında olması durumunda ise ekranlama etkinliği çok az değişmektedir.



Şekil 5:

Rezonatör boyutunun ekranlama etkinliğine etkisi

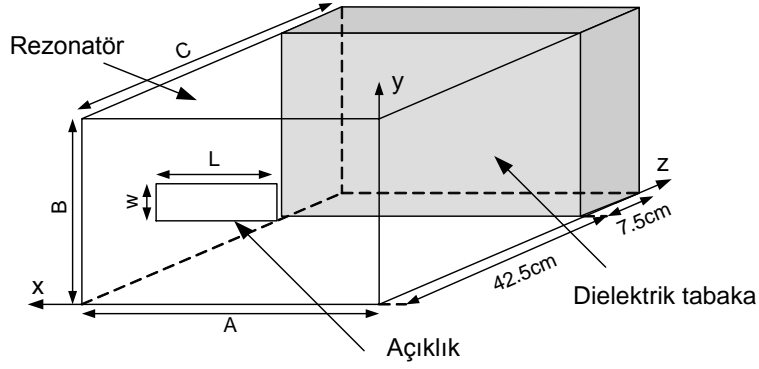


Şekil 6:

(a) *Rezonatörün ekranlama etkinliğinin xz düzlemindeki*
(b) *xy düzlemindeki üç farklı noktadaki değişimi*

3.2. Dielektrik tabaka ile yüklü rezonatör

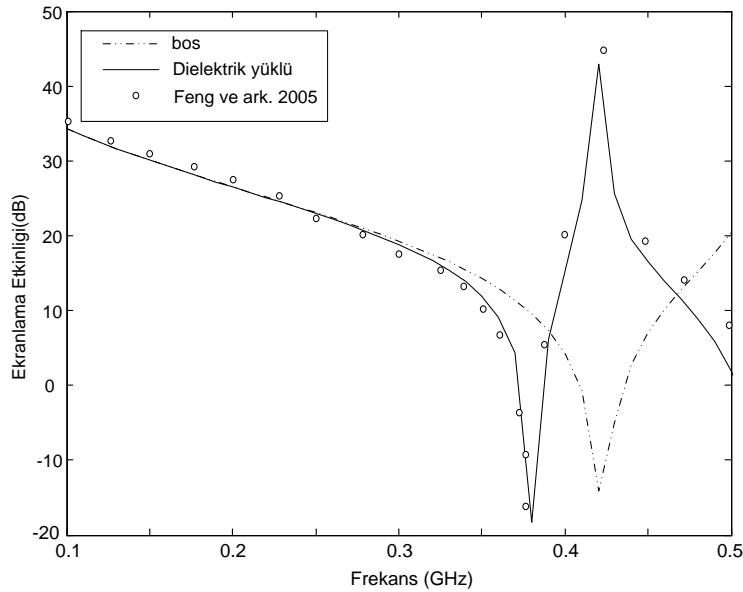
Yüklü durumda nümerik sonuçların etkinliğini elde etmek için Şekil 7'de geometrisi verilen dielektrik tabaka ile açıklığa sahip yüklü rezonatör gözönüne alınmıştır. Rezonatörün boyutları $A=50\text{cm}$, $B=50\text{cm}$ ve $C=50\text{cm}$ olarak alınmıştır. $L=20\text{cm}$ uzunluğunda ve $w=10\text{cm}$ genişliğinde olan açıklık, $z=0$ düzleminde açıklık merkezi $x_0=25\text{cm}$ ve $y_0=25\text{cm}$ olacak şekilde konumlandırılmıştır. Dielektrik tabaka xy düzleminde $t=42.5\text{cm}$ uzaklığa yerleştirilmiştir ve dielektrik tabakanın kalınlığı $d=7.5\text{cm}$ olarak seçilmiştir. Rezonatör içindeki dielektrik tabakanın, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 6$ olarak alınmıştır.



Şekil 7:

Dielektrik dilim ile yüklü açıklıklı rezonatör

Rezonatör x yönünde 10 y yönünde 10 ve z yönünde 11 hücreye bölünmüştür. Her hücre de beş adet dört yüzlü elemana bölünerek modellenmiştir. Rezonatördeki bilinmeyen sayısı 5689 dir. Sunulan MoM/FEM hibrit metodu ile rezonatörün içindeki elektrik alan dağılımı hesaplanmıştır. Rezonatörün içerisinde açıklıktan 20cm uzaklıktaki elektrik alan değerleri kullanılarak rezonatörün ekranlama etkinliği hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Feng ve Shen(2005)'in elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 8). Şekilden yaklaşık 0.37GHz civarında bir çukur görülmektedir. Bu çukur, dielektrik tabaka ile yüklü rezonatörün ilk rezonansına karşılık gelmektedir. 0.42GHz frekansı civarında ise, rezonatör içerisine açıklık arasından daha az elektromanyetik enerji kuple olmaktadır. Şekil 8'den beklendiği gibi, rezonatörün yüklü olması durumunda rezonans frekansının düşük frekanslara kaydığı gözlenmiştir.



Şekil 8:

Rezonatör içerisindeki dielektrik tabakanın ekranlama etkinliği üzerine etkisi

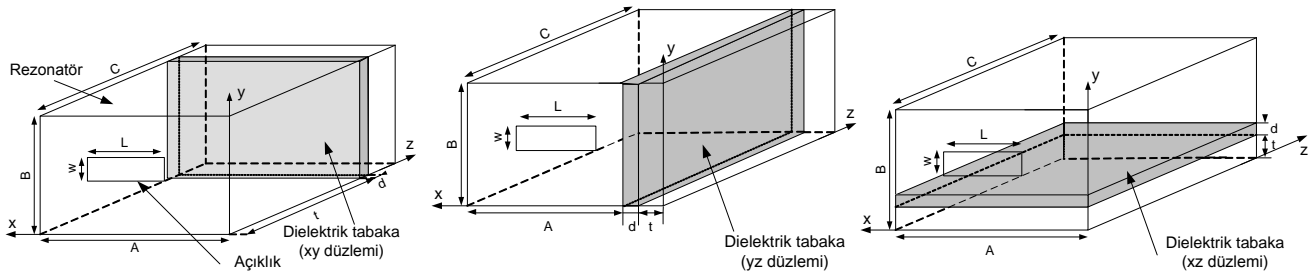
Ekranlama etkinliği(SE) noktasal bir sonuç ürettiğinden, rezonatör içerisindeki elektrik alan dağılımını temsil eden depolanan elektriksel enerji ve kayıp gücü birlikteliğinin de tasarım ve optimizasyon önerilerinde göz önünde bulundurulması gereklidir. MoM/FEM karma yöntemi ile depolanan elektriksel enerji ve kayıp güç yoğunluğu

$$\text{Depolanan Elektriksel enerji (dB)} = 10 \log \left(\frac{\iiint \varepsilon_0 \varepsilon_r |\vec{E}_{toplam}|^2 dV}{\iiint \varepsilon_0 \varepsilon_r |\vec{E}_{gelen}|^2 dV} \right) \quad (19)$$

$$\text{Kayıta güç yoğunluğu (dBm)} = \frac{\iiint \frac{1}{2} \sigma |\vec{E}_{toplam}|^2 dV}{1mW} \quad (20)$$

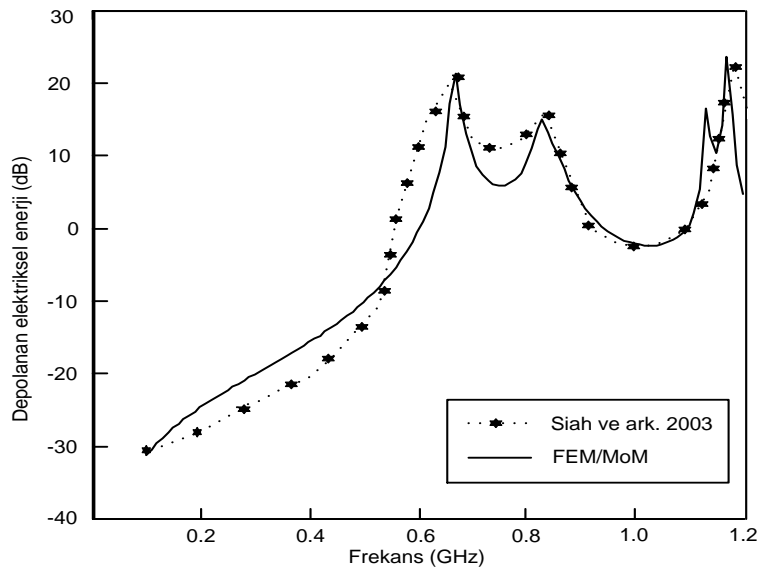
ifade edilerek hesaplanmıştır (Yenikaya, 2008). Burada, \vec{E}_{toplam} rezonatör içerisinde gözlem noktasındaki hesaplanmış toplam elektrik alan şiddetini göstermektedir. \vec{E}_{gelen} ise rezonatör yokken aynı noktada hesaplanmış olan gelen elektrik alan şiddetini ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılacak olan açıklığa sahip dielektrik tabaka ile yüklü rezonatörün geometrisi Şekil 9'da gösterilmiştir. Rezonatörün boyutları $A=30\text{cm}$, $B=12\text{cm}$ ve $C=30\text{cm}$ olarak seçilmiştir. Açıklık ön duvarın merkezine yerleştirilmiştir. Rezonatörün açıklık bulunan yüzeyine, y polarizasyonlu bir düzlemsel dalga dik olarak düşürülmüştür. Yük tabaka halinde 3 farklı düzleme yerleştirilerek oluşturulmuştur. Dielektrik tabaka bütün yerleştirmelerde iletken yüzeylerden 3cm uzaklığa yerleştirilmiş ve kalınlığı $d=1\text{cm}$ olarak seçilmiştir. Tabakanın dielektrik özellikleri $\varepsilon_r = 6$ ve $\sigma = 0.22$ olarak alınmıştır.



Şekil 9:

Açıklığa sahip yüklü rezonatör geometrisi (xy, yz ve xz düzlemi için)

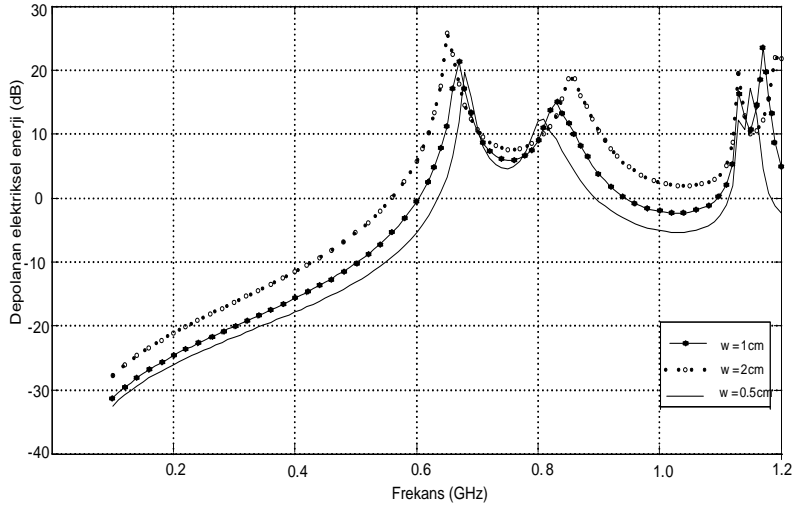


Şekil 10:

Açıklıklı yüksüz rezonatörde depolanan elektriksel enerjinin frekansla değişimi ($l=20\text{cm}$ ve $w=1\text{cm}$).

İlk olarak yüksüz durum incelenmiştir. Şekil 10, yüksüz haldeki açıklıklı rezonatörün içerisinde depo edilen elektriksel enerjinin frekansla değişimini göstermektedir. Rezonatör 20x1cm'lik açıklığa sahiptir ve açıklık rezonatörün ön yüzünün ortasında bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlar Siah ve ark. 2003'ün sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve aralarında uyum olduğu görülmektedir.

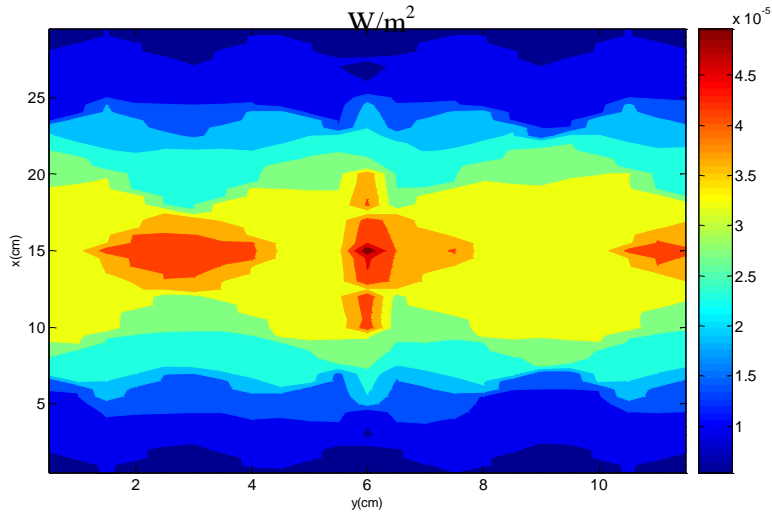
Yüksüz rezonatör üzerindeki açıklık genişliğinin değiştirilmesiyle, depolanan elektriksel enerjinin frekansla değişimi Şekil 11'de gösterilmiştir. Daha küçük genişliğine sahip açıklığın rezonatör hacmi içerisinde daha az elektriksel enerji depoladığı görülmektedir. Büyük açıklığın küçük açıklığa göre rezonatörün ekranlama performansını azalttığı ve aynı zamanda rezonatör içerisinde depo edilen elektriksel enerjiyi arttırdığını görülmektedir.



Şekil 11:

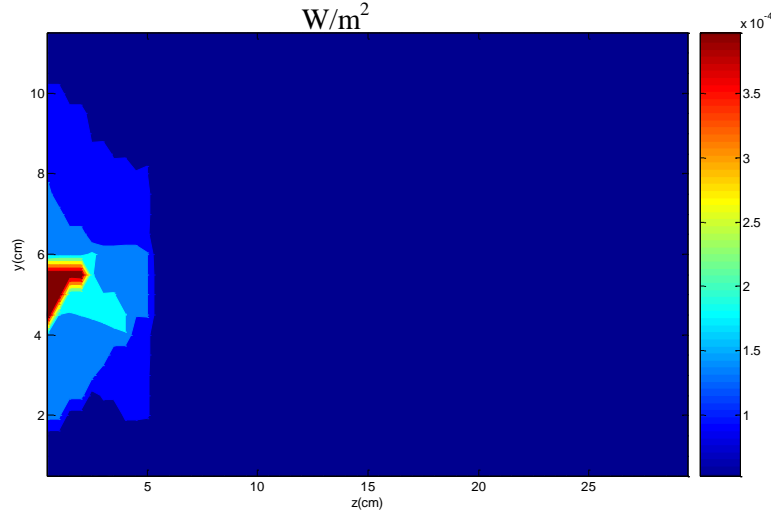
Açıklık genişliğinin depolanan elektriksel enerjiye etkisi

Son olarak, 900MHz frekansı için üç farklı düzleme yerleştirilmiş (Şekil 9) kayıplı dielektrik tabakadaki kayıp güç yoğunluğu hesaplanmıştır. Hesaplamalarda dielektrik tabakanın orta kesitindeki güç yoğunluğu hesaplanmıştır. Şekil 12a'da $f=900\text{MHz}$ için x-y düzleminde, Şekil 12b'de $f=900\text{MHz}$ için y-z düzleminde ve Şekil 12c'de de $f=900\text{MHz}$ için x-z düzleminde elde edilen güç yoğunluğu değişimi grafikleri verilmiştir.



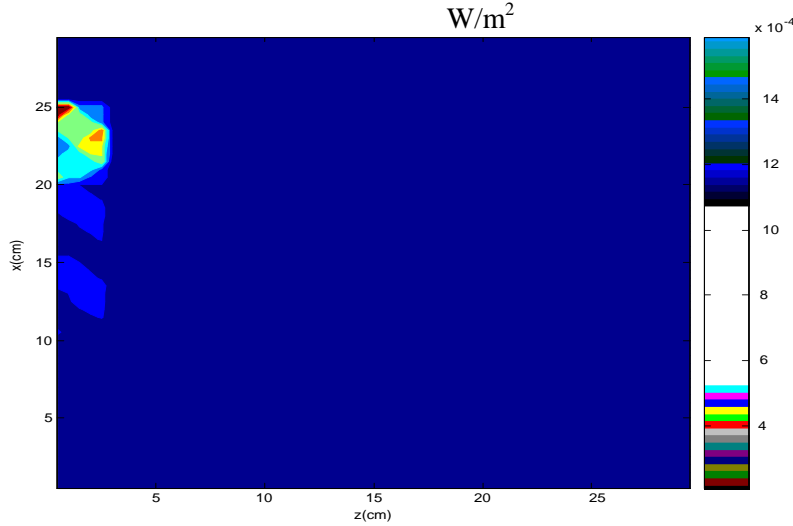
Şekil 12a:

f=900MHz için dielektrik tabaka içerisinde x-y düzleminde kayıp güç yoğunluğunun değişimi (L=20cm w=0.5cm d=1cm t= 3.5cm)



Şekil 12b:

f=900MHz için dielektrik tabaka içerisinde y-z düzleminde kayıp güç yoğunluğunun değişimi (L=20cm w=0.5cm d=1cm t= 3.5cm)



Şekil 12c:

f = 900MHz için dielektrik tabaka içerisinde x-z düzleminde kayıp güç yoğunluğunun değişimi (L=20cm w=0.5cm d=1cm t= 3.5cm)

Güç yoğunluğu değişimi incelendiğinde, f=900MHz frekansı için rezonatörün xy düzlemine dielektrik tabaka yerleştirilmesi durumunda kayıp gücün tabakanın ortasında daha fazla olduğu görülmektedir. xz ve yz düzlemlerinde ise açıklığın bulunduğu uçta yoğunlaştığı görülmektedir. Yani açıklığın bulunduğu bölgede diğer yerlere göre daha fazla yoğunlaşma olduğu görülmektedir. Dielektrik tabakadaki kayıp güç yoğunluğu xy düzleminde diğer düzlemlere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Üzerinde açıklık bulunan bir rezonatörün içerisindeki elektrik alan dağılımının hesaplanması için hibrit MoM/FEM formülasyonu geliştirilmiştir. Bu metodun EMC problemlerine uygulanmasında önemli avantajlar bulunmaktadır. Hem iç hem de dış bölge, aynı yazılım üzerinde modellenmiştir. Böylece hesap uzayının genişletilmesine gerek kalmadan, kutunun dışarısındaki bölge moment metodu kullanılarak modellenmiştir. Dolayısıyla işlem hacmi azaltılmıştır. Hibrit metod, sonlu eleman

metoduna göre daha az bilinmeyene sahip olduğundan dolayı daha az hafıza kullanılmasını sağlamıştır. Belli bir rezonatörün içindeki elektrik alan dağılımı bu yöntemle hesaplanarak rezonatörün etkinliği değerinin frekansla değişimi elde edilmiş ve literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile sunulan yöntemin etkinliği çıkarılmış ve sonuçların uyum içinde olduğu gözlenmiştir. EMC sistem tasarımı ve optimizasyonu için açıklığın boyutu ve rezonatörün boyutları ile ekranlama etkinliğinin değişimi izlenmiştir. Açıklığın genişliğinin değişimi, ekranlama etkinliğinin frekansla değişimini çok fazla etkilememiştir. Fakat açıklığın boyundaki değişimin ekranlama etkinliği üzerindeki etkisi daha fazla olmuştur. Özellikle açıklığın rezonans frekansının da işin içine girmesiyle ekranlama etkinliği azalmıştır. Rezonatörün boyutlarının değişmesi, rezonatör içerisinde uyarılan modun rezonans frekansını değiştirdiği için ekranlama etkinliğinin en düşük olduğu frekans değişmiştir. Açıklık boyutunun veya rezonatör boyutunun ayarlanmasıyla, düşük frekans ekranlama etkinliği karakteristiği kontrol edilebilir. Ekranlama etkinliği(SE) noktasal bir sonuç ürettiğinden, tüm rezonatör içerisindeki elektrik alan dağılımını temsil eden depolanan elektriksel enerji ve kayıp gücünün birliğinin de tasarım ve optimizasyon önerilerinde göz önünde bulundurulması gereklidir. Dielektrik tabakanın rezonatör içerisine yerleştirilme şeklinin rezonatör içerisinde depo edilen elektriksel enerji oranını ve kayıp gücünü etkilediği görülmüştür. Böylece rezonatör içerisine farklı yerleştirme düzeniyle en az enerji depo eden ve en az kayıplı güç absorbe eden durum elde edilerek EMC açısından en uygun konfigürasyon bulunabilir. Rezonatör içerisinde korunacak olan bir devrenin çalışma frekansı gözönüne alınarak rezonatörün boyutlarının, açıklığın boyut ve konumunun belirlenmesiyle EMC sisteminin tasarımı ve optimizasyonu mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Thomas, D.W.P., Denton, A., Konefal, T. ve diğ. (1999) *Characterisation of the shielding effectiveness of loaded equipment enclosures*, IEE EMC York 99 Conference Publication No.464, p.89-94.
2. Robinson, M.P., Benson, T.M., Christopoulos, C. ve diğ. (1998) *Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures*, IEEE Transactions on EMC, Vol. 40, No.3, p. 240-247.
3. Li, M., Nuebel, J., Drewniak, J.L. (2000) *EMI from enclosure modes of shielding enclosures FDTD modeling and measurements*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 42, No. 1, p. 29-37.
4. Olysager, F., Laermans, E., Zutter, D.D. ve diğ. (1999) *Numerical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure*, IEEE Electromagnetic Compatibility, Vol. 41, No. 3, p. 202-213.
5. Benhassine, S., Pichon, L. ve Tabbara, W. (2002) *An efficient finite-element time domain method for the analysis of the coupling between wave and shielded enclosure*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, p. 709-712.
6. Deshpande, M.D. (2000) *Electromagnetic Field Penetration Studies*, NASA/CR-2000-210297.
7. Rajamani, V. ve Bunting, C.F. (2006) *Validation of Modal/MoM in shielding effectiveness studies of rectangular enclosures with apertures*, IEEE Trans. On EMC, vol.48, No.2, p.348-353.
8. Wallyn, W., Zutter, D.D. ve Rogier, H. (2002) *Prediction of the Shielding and Resonant Behavior of Multi-section Enclosures Based on Magnetic Current Modeling*, IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, Vol.44, No.1, pp. 130-138.
9. Rao, S.M., Wilton, D.R. ve Glisson, A.W. (1982) *Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 30, No. 3, p. 409-418.
10. Yenikaya, S. ve Akman, A. (2009) *Hybrid MoM/FEM modelling of loaded enclosure with aperture in emc problems*, Int. Journal of RF and MW Computer Aided Journal, Vol.19, N. 2, p. 204-210.
11. Yenikaya, S. (2008) *Validation of MoM/FEM in Modelling Studies of Loaded Enclosures With Apertures*, IEEE, Int. EMC Symp. Detroit.

