

AÇIKLIĞA SAHİP METALİK KUTULARIN ZAMAN DOMENİ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ(TDFEM) İLE ANALİZİ

*Kübra KAŞ**
*Sibel YENİKAYA***
*Mesut TOZAN****

Alınma: 18.01.2018;düzeltilme: 10.09.2018; kabul: 27.10.2018

Öz: Bu çalışmada açıklığa sahip elektronik cihaz kutularının elektriksel ekranlama etkinliğini hesaplamak için zaman domeni vektör sonlu elemanlar metodu (TDFEM) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür. Açıklıklardan ışıyan alanlar, koruyucunun kalitesini düşürdüğü için istenmemektedir. Açıklık üzerine mükemmel iletken teller ve parça iletkenler yerleştirilerek ekranlama etkinliğindeki değişim incelenmiştir. 500-900 MHz arasında yaklaşık 20 dB' lik bir ekranlama artışı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Girişim, Ekranlama Etkinliği, Zaman Domeni Sonlu Elemanlar Yöntemi

Analysis of the Metallic Enclosure with Aperture Using Time Domain Finite Element Method(TDFEM)

Abstract: In this study, the time-domain vector finite element method (TDFEM) was used to calculate the electrical shielding effectiveness of electronic device boxes with aperture. The results obtained were compared with the literature and found to be compatible. With an effect of reducing the quality of the protectors, radiation fields from aperture are not desired. The change in shielding effectiveness has been investigated by inserting perfectly conductive wires and part conductors on the aperture. A boost of about 20 dB between 500-900 MHz has been achieved.

Keywords: Electromagnetic Interference (EMI), Shielding Effectiveness(SE), Time Domain Finite Element Method(TDFEM).

1. GİRİŞ

Son yıllarda, elektronik cihazlar günlük yaşamın vazgeçilmez parçası haline gelmiştir. Bundan dolayı, cihazların güvenilirlik, dayanıklılık ve kullanıcıya zarar vermemesi gibi bir takım temel özelliklere sahip olması gerekmektedir. Elektromanyetik uyumluluk; sistemlerin kendi elektromanyetik çevrelerindeki diğer cihazların ürettikleri olası sinyallerden etkilenmeden fonksiyonlarını doğru olarak kullanabilmesini kapsamaktadır. Elektromanyetik ortamda bulunan etkilerden korunmak için, elektronik cihazlar, ekranlama kutusu içine yerleştirilmelidir. Kutu

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

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

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

İletişim Yazarı: Sibel Yenikaya(sguler@uludag.edu.tr)

üzerinde cihazın çevreyle bağlantısına izin veren açıklıklar bulunmaktadır. Ekranlama kutusunun içerisinde oluşabilecek girişimin hesaplanması gerekmektedir. Fiziksel yapıya bağlı olarak analitik yöntemler kullanılabilir ancak yapı karmaşık hale geldiğinde çözüm zorlaşmaktadır. Bilgisayar ve yazılım sektörlerindeki gelişmeler, EMI problemlerinin nümerik yöntemler kullanılarak çözülmesini sağlamıştır.

Ekranlama etkinliği, belirli bir frekansta, elektromanyetik girişime karşı kutunun sağladığı korumanın bir ölçüsüdür. Açıklık problemleri için sıfır kalınlıklı ve sonsuz genişlikteki mükemmel iletken ekranlarda genelleştirilmiş formülasyonlar Butler (1978) ve Harrington (1982) tarafından sunulmuştur. Hill ve ark.(1994) yüklü kutuların ekranlama etkinliği için matematiksel bir model sunmuşlardır. Açıklıklardan ışınma problemini eşdeğerlik prensibini kullanarak moment yöntemi (MoM) yardımıyla çözmüşlerdir(Mendez,1978 ve Cerri,1992). Robbinson ve ark. (1998) tarafından içi boş ekranlama kutularının ekranlama etkinliği için analitik bir formülasyon önerilmiştir. Bu formülasyonda açıklığın yeri duvarın ortasında ve sabit olarak alınmıştır. Thomas ve ark.(1999) ise dielektrik tabaka ile yüklü rezonatörün ekranlama etkinliğini bulmak için aynı analitik formülasyonu kullanmışlardır. Nümerik metotlar kullanılarak modelin geometrisinde değişiklikler yapmak daha kolaydır. Açıklık sayısı ve rezonatöre çarpan elektromanyetik dalganın gelme açısının ekranlama üzerine etkisi Belokour ve ark. (2002) tarafından yapılmıştır. Li ve ark. (2000), Wang ve ark.(2002) açıklıklardan ışınan alanları FDTD ile modellemişlerdir. Özyalçın ve ark. (2003), Smedt ve ark.(2002) ise TLM kullanarak ekranlama etkinliğini hesaplamışlardır. Alanlar ve yapılar arasındaki girişimi değerlendirmede etkin olarak kullanılan bir diğer yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntem keyfi şekilli sınırların modellenmesini sağlayan düzgün olmayan bir örgüye olanak sağlamaktadır. Carpes ve ark. (2002), Yenikaya ve Akman(2009), Zdeněk Kubík ve ark.(2016), Başyigit ve ark. (2017), Kim ve Lee(2007), Erbaş ve Kent(2003) açıklığa sahip kutuların ekranlama etkinliğini hesaplama çalışmalarını yapmışlardır. Wang, H. ve ark. (2003), Siah, E.S. ve ark. (2003), Feng, C. ve Z. Shen.(2005), hibrit yöntemler kullanarak ekranlama etkinliğini hesaplamışlardır.

Bu çalışmada, açıklığa sahip ekranlama kutusu ile üzerine gelen düzlemsel dalganın etkileşimi ele alınmıştır. Ekranlama kutusunun mükemmel iletken bir rezonatör olduğu varsayımı yapılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde zaman domeni sonlu elemanlar yönteminin temel denklemleri elde edilmiştir. İkinci bölümde temel bir EMI problemi, zaman domeni sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenmiştir. Açıklıklardan içeriye ışınan elektromanyetik alanların analizi yapılarak elektrik alan değerleri elde edilmiş ve ekranlama etkinliği hesaplanmıştır. Son olarak, elektromanyetik bağlaşmayı azaltmak için açıklık üzerine mükemmel iletken teller ve parça iletkenler yerleştirilerek ekranlama etkinliğindeki değişim incelenmiştir.

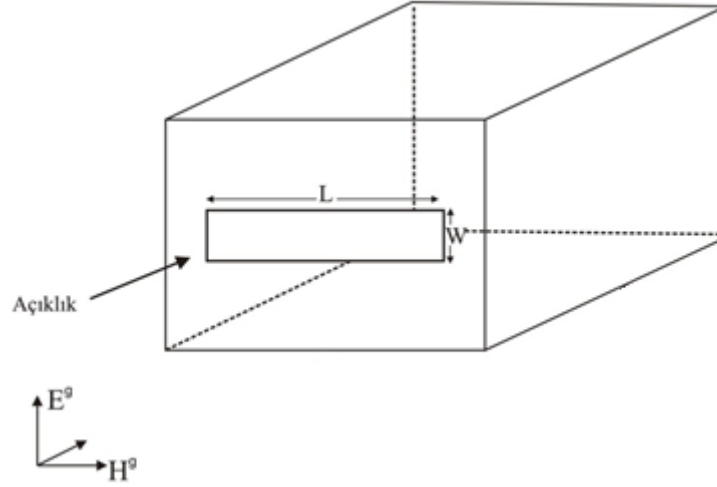
2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU

Şekil 1'de üzerinde açıklık bulunan ekranlama kutusu ve üzerine gelen düzlemsel dalga gösterilmiştir. Elektromanyetik alanların davranışı Maxwell denklemleriyle tanımlanır. Maxwell denklemlerini kullanarak elektrik alana ait vektör dalga denklemi

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu_0 \frac{\partial \vec{J}_k}{\partial t} \quad (1)$$

elde edilir. Sonlu eleman formülasyonunda birinci adım (1) eşitliğinin bir \vec{N} test fonksiyonuyla iç çarpımının yapılmasıdır.

$$\vec{N} \cdot \nabla (\nabla \times \vec{E}) + \mu_0 \sigma \vec{N} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{N} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\mu_0 \vec{N} \cdot \frac{\partial \vec{J}_k}{\partial t} \quad (2)$$



Şekil 1:
Açıklığa Sahip Kutunun Geometrisi

İkinci adım, eşitliğin her iki tarafının hacim üzerinden integralinin alınması ve sağ taraftaki terime diverjans teoreminin uygulanmasıdır.

$$\int_V \nabla \times \vec{E} \cdot \nabla \times \vec{N} dV + \mu_0 \int_V \sigma \vec{N} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} dV + \mu_0 \epsilon_0 \int_V \epsilon_r \vec{N} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} dV + \mu_0 \int_V \vec{N} \frac{\partial \vec{J}_k}{\partial t} dV \quad (3)$$

$$= - \oint_S \vec{N} \cdot [\vec{n} \times (\nabla \times \vec{E})] dS$$

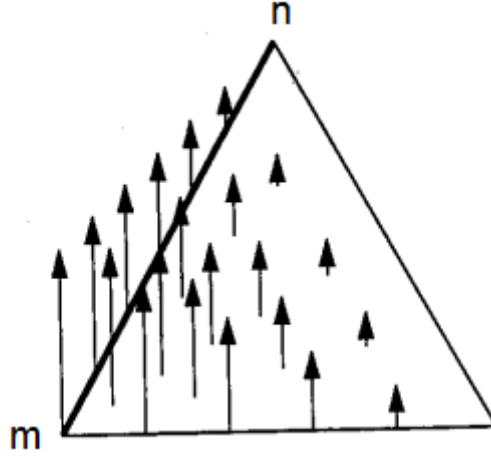
Üçüncü adım hesap uzayının ayrıklaştırılmasıdır. (3) denklemini çözmek için hesap uzayı dört yüzü elemanlar ile ayrıklaştırılır. Elektrik alan terimleri bilinen formdaki vektör açınım fonksiyonları ile bilinmeyen genliklerin üst üste bindirilmesiyle

$$\vec{E} = \sum_{j=1}^{nn} \vec{N}_j e_j \quad (4)$$

olarak elde edilir. Burada \vec{N}_j , j. inci açınım fonksiyonu, e_j bu açınım fonksiyonunun bilinmeyen genliği ve nn, kenar sayısıdır. Açınım fonksiyonları simplex koordinatlarına bağlı olarak ifade edilir. Whitney 1-formunun dört yüzü kenar elemanları için m düğümünden n düğümüne doğru i kenarı için vektör açınım fonksiyonu,

$$\vec{N}_j = \lambda_m \nabla \lambda_n - \lambda_n \nabla \lambda_m \quad (5)$$

olarak ifade edilir. Burada λ_m ise m. nci düğümüne ait simplex koordinatıdır. Şekil 2' de düzgün dört yüzü elemandaki j kenarıyla ilişkili \vec{N}_j vektör açınım fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 2:

Açınım Fonksiyonu (Jin, 1993)

Son adım, test ve açınım fonksiyonlarını aynı seçip, elektrik alan ifadesini (3) eşitliğinde yerine koyarak vektör dalga denkleminin aşağıdaki matris denkleme dönüşmesidir.

$$[A]e + [B_1] \frac{de}{dt} + [B_2] \frac{d^2e}{dt^2} = F \quad (6)$$

Burada e , bilinmeyen alan katsayıları vektörüdür. $[A]$, $[B_1]$ ve $[B_2]$ zamandan bağımsız matrisler ve F ise kaynak tarafından oluşturulan vektördür. Eleman matrislerinin açık ifadesi şu şekildedir (Güler, 2007).

$$[A]_{ij} = \iiint_e \nabla \times \vec{N}_i \cdot \nabla \times \vec{N}_j dV \quad (7)$$

$$[B_1]_{ij} = \iiint_e \mu_0 \sigma \vec{N}_i \cdot \vec{N}_j dV \quad (8)$$

$$[B_2]_{ij} = \iiint_e \epsilon_r \epsilon_0 \vec{N}_i \cdot \vec{N}_j dV \quad (9)$$

$$F_i = - \iiint_e \mu_0 \vec{N}_i \cdot \frac{\partial J_k}{\partial t} dV \quad (10)$$

Tel yarıçapı rezonatör boyutları ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan ayrıklaştırma işlemi sonunda büyük bir matris sistemi ortaya çıkmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için teller, örgü kenarlarının bir dizisi olarak modellenmiş ve matris denkleme ilave edilerek hesaba katılmıştır. Ayrıca, hesap uzayının içerisinde açık bölge simülasyonunun yapılabilmesi için Silver-Müller sınır koşulu da matris denkleme ilave edilmiştir.

$$n \times \nabla \times \vec{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (11)$$

Burada c ışık hızı, \vec{E}_t sınır yüzeyindeki teğetsel elektrik alanı ve \vec{n} yüzeye dik birim vektörünü ifade etmektedir (Carpes ve ark., 2000). Bu durumda $[B_1]$ eleman matrisi,

$$[B_1]_{ij} = \iiint_e \mu_0 \sigma \vec{N}_i \cdot \vec{N}_j dV + \int_{S_{a\text{ış}}} \frac{1}{c} \vec{N}_i \cdot \vec{N}_j dS \quad (12)$$

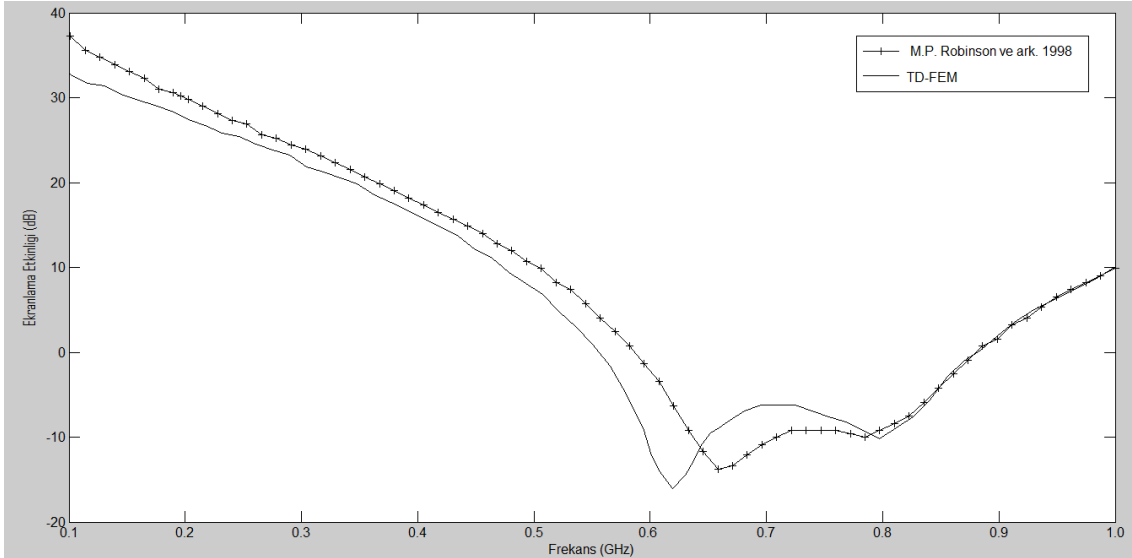
olarak yeniden düzenlenmiştir.

3. NÜMERİK SONUÇLAR

Ekranlama kutusunun boyutları 30cmx12cmx30cm ve açıklık boyutları L=20cm ve W=3cm olarak seçilmiştir. Açıklık kutu yüzeyinin ortasına yerleştirilmiştir. Kutu, eleman yoğunluğu değişen farklı örgüler kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Ayrıklaştırma işlemi, x yönünde Nx, y yönünde Ny ve z yönünde Nz adet hücreye bölünmesi ve her hücrenin de 5 adet dört yüzlü elemana bölünmesiyle gerçekleştirilmiştir. Sunulan zaman domeni sonlu elemanlar yöntemi ile kutu içerisindeki elektrik alan dağılımı hesaplanmıştır. Ekranlama kutusunun elektriksel ekranlama etkinliği aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Başyigit ve ark. 2011).

$$SE = 20 \log_{10} \frac{\vec{E}_1}{\vec{E}_2} \quad (dB) \quad (13)$$

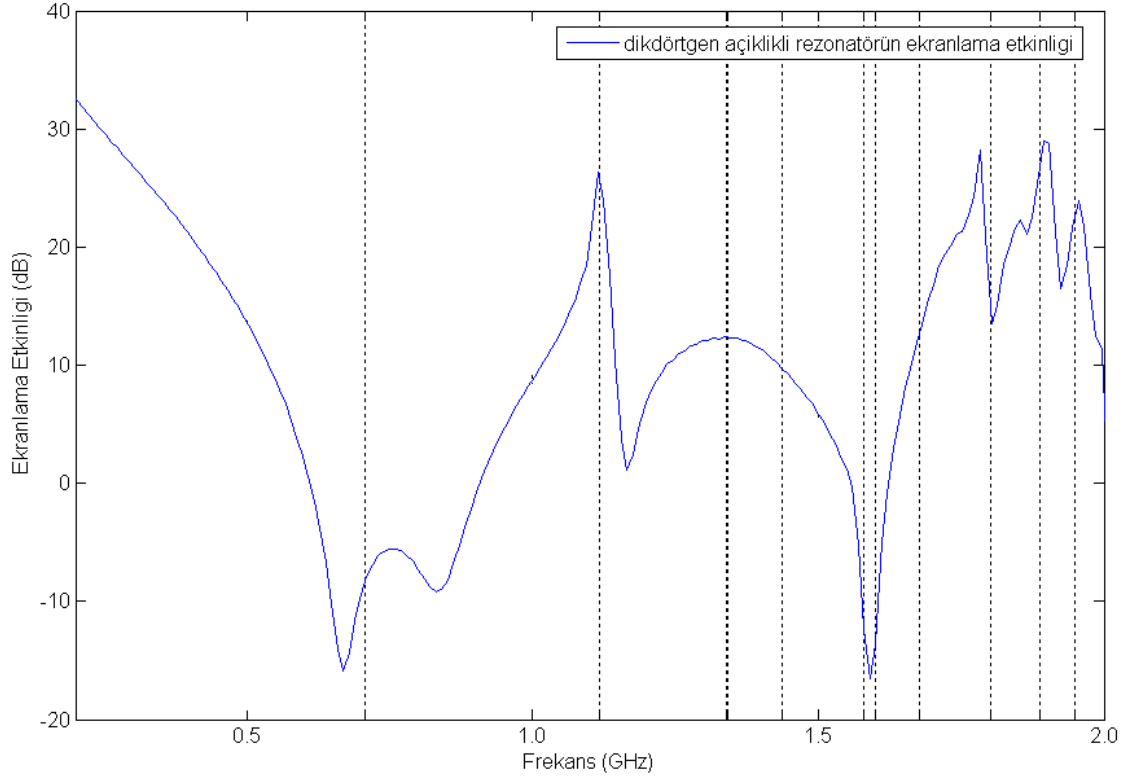
Burada \vec{E}_1 ekranlama kutusu yokken uyarıcı düzlemsel dalganın elektrik alan değerini, \vec{E}_2 ekranlama kutusu varken aynı noktadaki elektrik alan değerini ifade etmektedir. Yöntemin doğruluğunu göstermek için hesap uzayı Nx=8, Ny=7 ve Nz=8 seçilerek ayrıklaştırma işlemi yapılmıştır. Bilinmeyen sayısı 5664'dur. Açıklığa sahip boş rezonatörün merkez noktasındaki elektriksel ekranlama etkinliği hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır(Şekil 3).



Şekil 3:

Açıklıklı Ekranlama Kutusunun Elektriksel Ekranlama Etkinliğinin Frekansla Değişimi

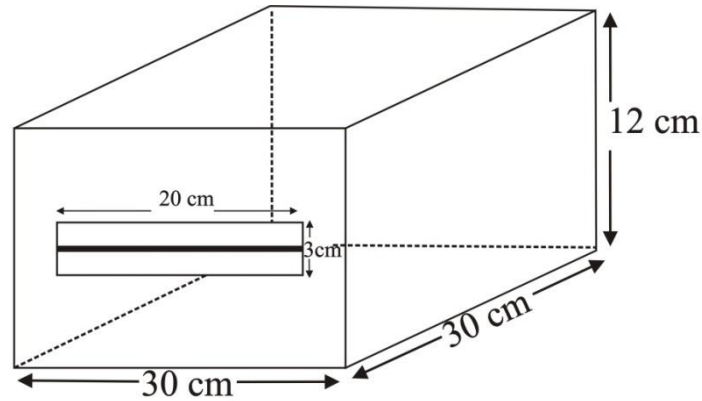
Ekranlama kutusu boş iken iki tür etkileşim olmaktadır. İlki rezonatörün ilk rezonans frekansı 707 MHz ve ikincisi açıklık rezonansı 750 MHz'dir (20 cm'lik uzunluğa sahip açıklığın rezonansı). Bu iki rezonansın etkileşiminden 500-900 MHz arasında bir çukur meydana gelir. Bu aralıkta ekranlama etkinliği çok zayıftır. Şekil 4'te dikdörtgen açıklıklı rezonatörün ekranlama etkinliğinin rezonatörün olası rezonans frekanslarına göre karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden yüksek frekanslarda yüksek dereceli modlar birbirine oldukça yakın bulunmaktadır ve sonuç olarak, ekranlama etkinliğinin hemen hemen her zaman zayıf olduğu görülmektedir. Ekranlama etkinliği; rezonatör ve açıklık rezonanslarıyla kontrol edilebilir. Açıklığın şekli ve boyutunun ayarlanmasıyla, düşük frekans ekranlama etkinliği kontrol edilebilir.



Şekil 4:

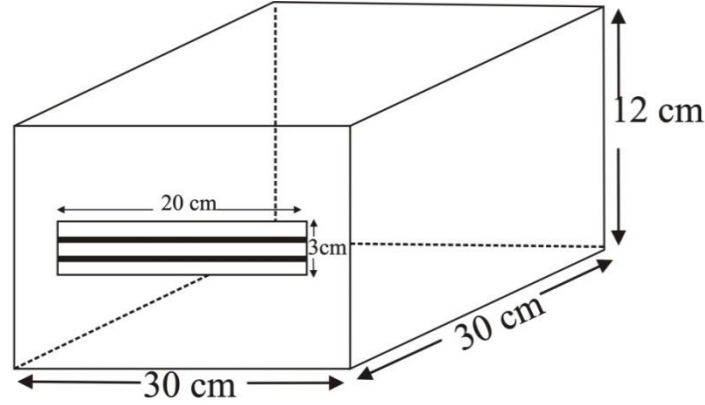
Dikdörtgen Açıklıklı Rezonatörün Ekranlama Etkinliğinin Rezonatörün Olası Rezonans Frekanslarına Göre Karşılaştırması

İçeriye ışıyan alanları azaltmak için açıklık üzerine iletken teller ve şeritler yerleştirilmiştir. İlk olarak boş rezonatörün açıklığına 20cm uzunluğundaki iletken teller yatay olarak yerleştirilmiştir. Şekil 5a ve Şekil 5b' de açıklığa yatay olarak farklı tel yerleştirme geometrisi verilmiştir. İlk olarak açıklığın ortasına tek tel yerleştirilmiştir.



Şekil 5a:

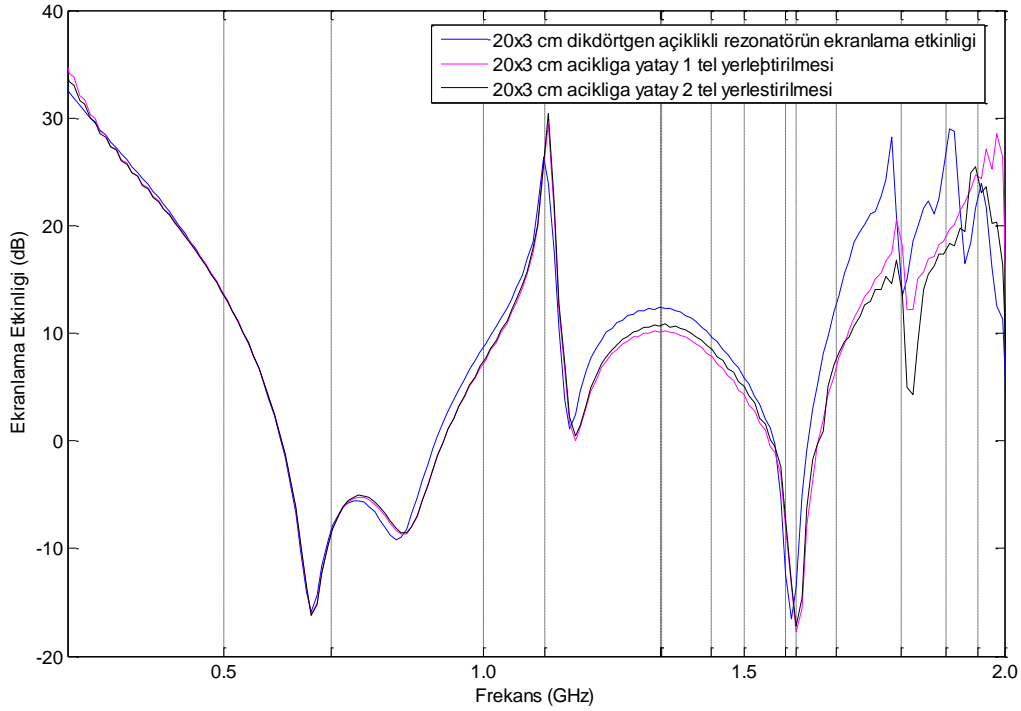
Açıklık Üzerine Yatay İletken Tek Telin Yerleştirilmesi



Şekil 5b:
Açıklık Üzerine Yatay İletken İki Telin Yerleştirilmesi

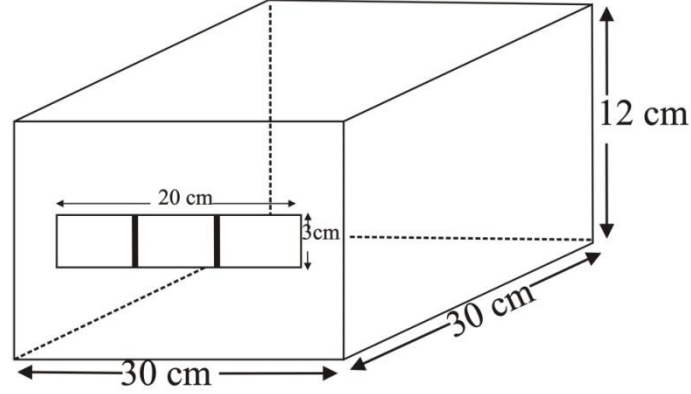
Rezonatör x yönünde 6, y yönünde 4 ve z yönünde 6 hücre ile ayrıştırılmıştır. Modellemeye düzgün olmayan örgüleme kullanılmıştır. Bilinmeyen sayısı 7321'dir. İkinci olarak açıklığa iki tel yerleştirilmiştir. Teller birbirleriyle eş uzaklığa yerleştirilmiştir. Rezonatör x yönünde 6, y yönüne 5 ve z yönünde 6 hücre ile modellenmiştir. Sistemin bilinmeyen sayısı 8234'dir.

Şekil 6'da açıklığa yatay olarak tel yerleştirilmesinin ekranlama etkinliğine etkisi gösterilmiştir. Kesikli çizgiler rezonatörün olası rezonans frekanslarıdır. Şekilden görüldüğü gibi yatay olarak tel yerleştirilmesi ekranlama etkinliğini çok az etkilemiştir.

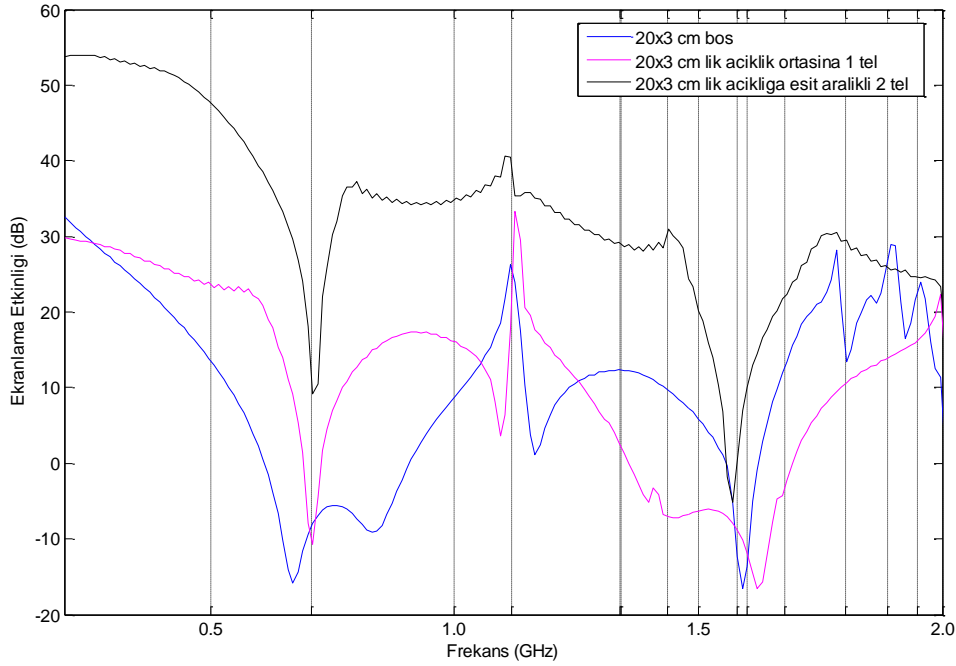


Şekil 6:
20x3cm' lik Açıklığa Yatay Olarak Tellerin Yerleştirilmesi Durumunda Ekranlama Etkinliğindeki Değişim

İkinci olarak, açıklığa düşey olarak iletken tel yerleştirilmiştir. Rezonatör geometrisi Şekil 7’de verilmiştir. Birinci durumda açıklığın ortasına tel yerleştirilmiştir. İkinci durumda eşit aralıkla iki tel yerleştirilmiştir.



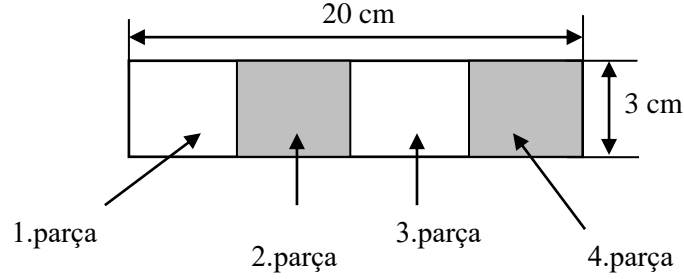
Şekil 7:
20x3cm' lik Açıklığa Düşey Olarak Tellerin Yerleştirilmesi



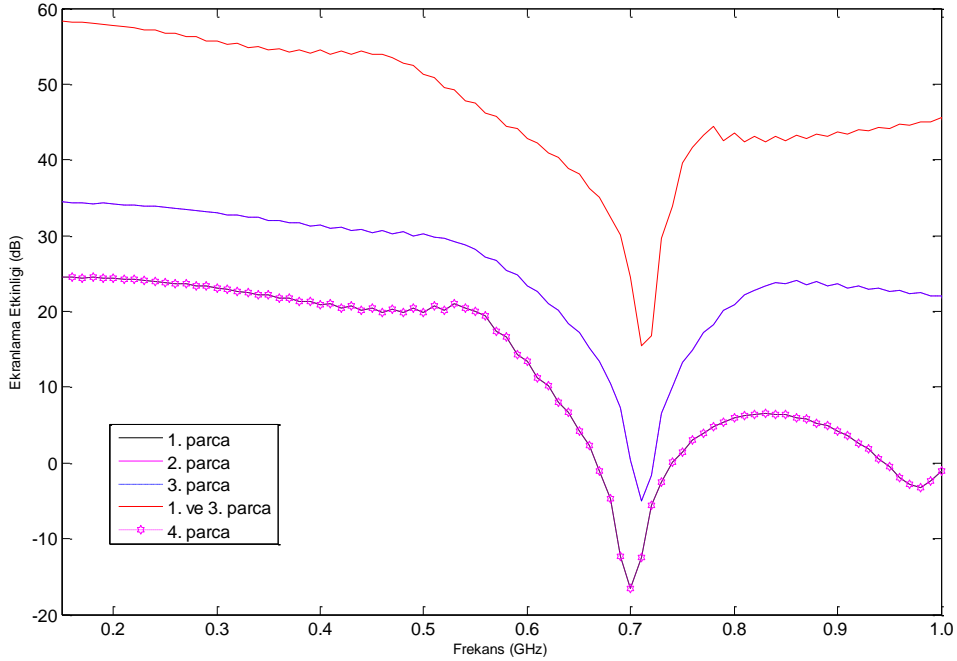
Şekil 8:
20x3cm' lik Açıklığa Düşey Tellerin Yerleştirilmesiyle Ekranlama Etkinliğindeki Değişim

Şekil 8’de üç farklı konfigürasyon için açıklıklı boş rezonatörün ekranlama etkinliği değişimi gösterilmiştir. Açıklığa tel yerleştirilmesiyle 500-900 MHz arasındaki açıklık-rezonatör etkileşimi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Tel sayısı arttıkça ekranlamanın da iyileştiği görülmektedir. Aynı zamanda daha dar bir frekansta rezonans meydana gelmekte yani sistem yüksek iyilik faktörüne sahip olmaktadır. Bu frekans bandında ekranlama etkinliği artmıştır. Burada sadece 707 MHz ‘deki rezonatörün ilk temel frekansı bulunmaktadır. 500-900 MHz arasında yaklaşık 10-20 dB’ lik bir ekranlamaya olanak vermektedir.

Üçüncü olarak açıklığa iletken parçalar yerleştirilmiştir. Geometrisi Şekil 9’da verilmiştir. Açıklığa bütün iletken parça yerleşiminin etkisi Şekil 10’da gösterilmiştir. Beklendiği gibi ekranlama etkinliği artmaktadır. 1. veya 4. parçaların yerleştirilmesinden sonra ekranlama etkinliğindeki 980MHz’deki çukur 15cm’ lik açıklığın açıklık rezonansından ileri gelmektedir. Çünkü 15cm’lik açıklığın açıklık rezonansı yarım dalga rezonansından dolayı 1GHz’dir. Parça iletkenlerin sayısının artmasıyla ekranlama etkinliği de artmaktadır. Beklendiği gibi içeriye ışıyan alanlar azalmaktadır.

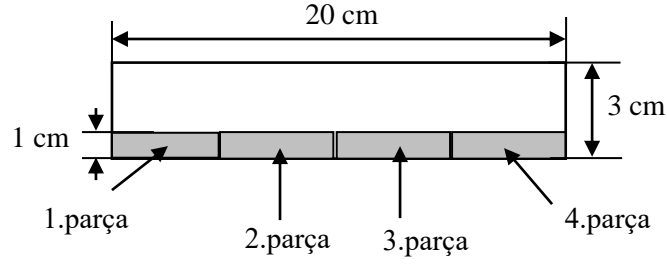


Şekil 9:
Açıklığa Bütün İletken Parçaların Yerleştirilmesi

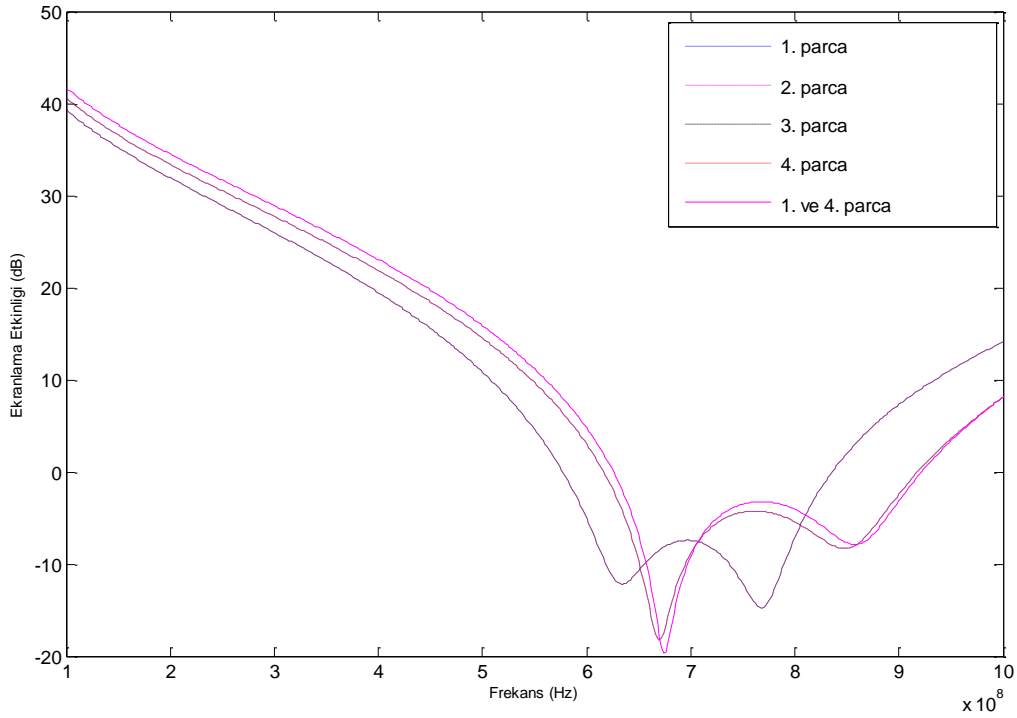


Şekil 10:
Farklı Konfigürasyondaki Parça Yerleşiminin SE Değişimi

Dördüncü olarak Şekil 11’de geometrisi verilen rezonatör açıklığına 1cm genişliğinde ve 5cm uzunluğunda 5cm²’lik iletken parçalar yerleştirilerek ekranlama etkinliği değişimi incelenmiştir. Parçaların yerleştirilme konumuna bakıldığında, 1. ve 4. parça aynı etkiyi yaparken benzer şekilde 2. ve 3. parçalar da birbirinin aynı etkiyi yapmışlardır. 1. ve 4. parçalar aynı anda yerleştirildiğinde ise ekranlama etkinliğinde bir artış ve rezonans frekansında bir kayma gözlemlenmektedir.



Şekil 11:
Açıklığa İletken Parçaların Yerleştirilmesi



Şekil 12:
Parça Şeritlerin Yerleştirilmesi

4. SONUÇ

Açıklığa sahip ekranlama kutusunun elektriksel ekranlama etkinliğini (SE) bulmak için zaman domeni vektör sonlu elemanlar metodu (TDFEM) sunulmuştur. Metodun doğruluğunu göstermek için literatür ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu gösterilmiştir. Elektronik cihazların elektromanyetik girişim problemlerinden korunması için ekranlama etkinliklerinin hesaplanması ve artırılması oldukça önemlidir. Açıklığa iletken tellerin yerleştirilmesiyle açıklık-rezonatör etkileşimi değiştirilmiş ve 500-900 MHz arasında yaklaşık 20 dB'lik bir ekranlama artışı sağlanmıştır. Açıklık üzerine yerleştirilen iletken parçalar açıklık alanını azalttığı için ekranlama etkinliği de etkilenmiştir. Ekranlama etkinliğinin; koruyucu kutunun açıklık şeklinin ve boyutunun ayarlanmasıyla kontrol edilebilir olduğu gösterilmiştir. Böylece en uygun optimizasyonla istenilen ekranlama etkinliği sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Başyigit, I. B., Tosun, P. D., Ozen, S. ve Helhel, S. (2011) An affect of the aperture length to aperture width ratio on broadband shielding effectiveness, URSI GASS 2011, Bursa, 1(1). doi:10.1109/URSIGASS.2011.6050756
2. Basyigit, I. B., Dogan, H. ve Helhel, S. (2017) Simulation of metallic enclosures with apertures on electrical shielding effectiveness, ELECO 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, 1(1), 1082-1084.
3. Belokour, I., LoVetri, J., ve Kashyap, S. (2000) Shielding effectiveness estimation of enclosures with apertures, IEEE International Symposium, 2, 855-860. doi:10.1109/ISEMC.2000.874734
4. Carpes, W.P. ve ark.(2000) TLM and FEM Methods applied in the Analysis of electromagnetic coupling, IEEE Transactions on Magnetics, 36(4), 982-985. doi:10.1109/20.877606
5. Carpes Jr, W. P., Pichon, L. ve Razek, A. (2000) A 3D finite element method for the modelling of bounded and unbounded electromagnetic problems in the time domain, International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 13(6), 527-540. doi:10.1002/1099-1204(200011/12)13:6<527::AID-JNM391>3.0.CO;2-V
6. Carpes, W. P., Pichon, L. ve Razek, A. (2002) Analysis of the coupling of an incident wave with a wire inside a cavity using an FEM in frequency and time domains, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 44(3), 470-475. doi:10.1109/TEMC.2002.801767
7. Cerri, G., De Leo, R. ve Primiani, V. M. (1992) Theoretical and experimental evaluation of the electromagnetic radiation from apertures in shielded enclosure, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 34(4), 423-432. doi:10.1109/15.179275
8. De Smedt, R. ve ark.(2002) Effect of a board on the shielding effectiveness of a Box, Emc Europe 2002 International Symposium On Electromagnetic Compatibility, Sorrento, 341-345.
9. Erbaş, C. ve Kent, S. (2003) Shielding effectiveness of a rectangular cavity with aperture between 1-3 GHz, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1,343-346. doi:10.1109/ICSMC2.2003.1428261
10. Feng, C. ve Shen, Z. (2005) A hybrid FD-MoM technique for predicting shielding effectiveness of metallic enclosures with apertures, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 47(3), 456-462. doi:10.1109/TEMC.2005.851726
11. Güler, S. (2007) Elektromanyetik uyumluluk tekniklerinde elektromanyetik ışımanın modellenmesi, Uludağ üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
12. Harrington, R. (1982) Resonant behavior of a small aperture backed by a conducting body, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 30(2), 205-212. doi:10.1109/TAP.1982.1142761
13. Hill, D.A. ve ark.(1994) Aperture excitation of electrically large, lossy cavities, IEEE Transactions on EMC, 36(3), 169-178. doi: 10.1109/15.305461
14. Jin, J.M.(1993) The Finite Element Method in Electromagnetics, Wiley.
15. Kim S. ve Lee J.(2007) Shielding effectiveness of an enclosure with a dielectric-backed aperture, Microwave Conference, Asia-Pacific,1-4. doi: 10.1109/APMC.2007.4554856

16. Kubík, Z. ve Skála, J. (2016) Shielding Effectiveness Simulation of Small Perforated Shielding Enclosures Using FEM, *Energies*, 9(3), 129. doi:10.3390/en9030129
17. Li, M. ve ark.(2000) EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modelling and measurements, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 42(1), 29-38. doi:10.1109/15.831702
18. Mendez, H. A. (1978) Shielding theory of enclosures with apertures, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2, 296-305. doi:10.1109/TEMC.1978.303722
19. Ozyalcin, M. O., Sevgi, L. ve Topuz, E. (2003) Validation Tests for transmission Line Matrix Method in EMC Calculations, *The 2003 IEEE Int. Symposium on EMC, İstanbul*, 2, 1277-1280. doi:10.1109/ICSMC2.2003.1429153
20. Robinson, M.P. ve ark.(1998) Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures, *IEEE Transactions on EMC*, 40(3), 240-247. doi:10.1109/15.709422
21. Siah, E.S. ve ark.(2003) Coupling studies and shielding techniques for electromagnetic penetration through apertures on complex cavities and vehicular platforms, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 45(2), 245-256. doi:10.1109/TEMC.2003.810814
22. Thomas, D.W.P. ve ark.(1999) Characterisation of the shielding effectiveness of loaded equipment enclosures, *IEE EMC York 99 Conference Publication*, 464, 89-94. doi:10.1049/cp:19990250
23. Wang,H. ve ark.(2003) Impedance boundary conditions in a hybrid FEM/MOM formulation, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 45(2), 198-206. doi:10.1109/TEMC.2003.810813
24. Wang, Y.J. ve ark.(2002) Electromagnetic coupling analysis of transient signal through slots or apertures perforated in a shielding metallic enclosure using FDTD Methodology, *Progress in Electromagnetics Research*, 36, 247-264. doi: 10.2528/PIER02021701
25. Yenikaya, S. ve Akman, A. (2009) Hybrid MoM/FEM modeling of loaded enclosure with aperture in EMC problems. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, *The University of Colorado, Boulder*, 19 (2), 204-210. doi:10.1002/mmce.20341