

## Grafen tabanlı çift katmanlı yapının ekranlama etkinliği üzerine parametrik çalışma

### Parametric study on shielding effectiveness of graphene based bilayer structure

Sunay GÜLER<sup>1\*</sup> , Sibel YENİKAYA<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>FEV Türkiye, İstanbul, Türkiye.

[guler\\_s@fev.com](mailto:guler_s@fev.com)

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.

[sguler@uludag.edu.tr](mailto:sguler@uludag.edu.tr)

Geliş Tarihi/Received: 08.03.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 29.06.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.60137

Kabul Tarihi/Accepted: 05.07.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

*Bu çalışmada elektromanyetik ekranların ekranlama etkinliğini grafen plakayla kaplayarak artırmak amaçlanmıştır. Öncelikle tek katmanlı grafen nümerik olarak modellenmiş ve analitik bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür. Sonra, bir alüminyum levhanın arka yüzüne grafen plaka kaplanarak oluşturulan çift katmanlı ekranın yansıma kaybı analitik ve nümerik olarak analiz edilmiştir. Son olarak, iç yüzeyleri grafen plaka kaplı bir ekranlama kutusu modellenmiş olup, grafen plakasının kimyasal potansiyel ve sıcaklık değerlerine göre ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğinin değişimi incelenmiştir. Sıcaklık parametresi sabit kalıp, grafen plakasının kimyasal potansiyeli artırıldığında, ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğinin azaldığı elde edilmiştir. Kimyasal potansiyel sabit kalıp, grafen plakasının sıcaklık parametresi artırıldığında ise 300 K ve üzeri sıcaklıklarda ekranlama etkinliği değerleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Elektromanyetik ekranlama, Ekranlama etkinliği, Çok katlı ekran, Grafen plaka.

#### Abstract

*In this study, it is aimed to increase shielding effectiveness of electromagnetic shields by coating with graphene sheet. Firstly, graphene monolayer is modeled numerically and it is observed that it is in good agreement with the analytical findings. Then, the reflection loss of bilayer screen that is formed by coating the back surface of an aluminum plate with graphene sheet, is analyzed analytically and numerically. Finally, a shielding enclosure in which inner surfaces are coated with graphene sheet is modeled and the change of shielding effectiveness of the shielding enclosure with respect to the chemical potential and temperature values of graphene sheet is investigated. It is obtained that shielding effectiveness of shielding enclosure decays depending on the increase of chemical potential of graphene sheet while the temperature parameter remains fixed. Shielding effectiveness values are obtained close to each other at the temperature 300 K and above depending on the increase of temperature of graphene sheet while the chemical potential remains fixed.*

**Keywords:** Electromagnetic shielding, Shielding effectiveness, Bilayer screen, Graphene sheet.

## 1 Giriş

Elektromanyetik ekranlama, elektronik devreleri dış elektromanyetik girişime (EMI) karşı korumak aynı zamanda bu devrelerin ürettiği elektromanyetik gürültünün çevreye yayılmasını önlemek için kullanılan zorunlu yapılardan biridir [1]. Bir elektromanyetik ekranın performansı genellikle ekranın varlığında ve yokluğunda ölçülen elektrik veya manyetik alan büyüklüklerinin birbirine oranı şeklinde tanımlanan ekranlama etkinliği (SE) ile ifade edilir [2]. Elektromanyetik ekran yapılarının üzerinde konnektör montajı, havalandırma deliği, kablo giriş/çıkışları için bazı açıklara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu açıklıklar EMI sızıntısına izin vererek ekranlama etkinliğinin azalmasına sebep olur. Dolayısıyla, EMI'den korunması amaçlanan elektronik devreler olumsuz etkilenir. Elektronik cihazların performansına etki eden çevresel EMI'den korunması için elektromanyetik ekranın SE analizleri yapılarak etkin bir biçimde tasarlanması gerekmektedir.

Elektromanyetik ekranlar minimum yer kaplayacak ve mümkün olduğu kadar hafif olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu durum, ekranın SE değerinin istenilen seviyelerin üstüne

çıkmasını güçleştirmektedir [2]. Metaller, mekanik özelliklerinden ve yüksek iletkenliklerinden dolayı elektromanyetik ekran üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte ağır olmaları, işleme zorlukları, meydana gelebilecek bir tasarım değişikliğinde yüksek maliyetlerin oluşması gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca, ekranlama kutusu içindeki elektronik devrelerin performansını etkileyecek keskin rezonanslar meydana gelebilmektedir [3].

Grafen, karbon atomlarının oluşturduğu altıgen yapıların, bal peteği şeklinde dizilmiş tek bir atomik katmandır. Grafenin atomik yapısı, ona olağanüstü elektriksel, optik, mekanik ve termal özellikler kazandırmaktadır. En çok ilgi çeken elektriksel özelliği ise yüksek elektron hareketliliği ve iyi iletkenliğidir [4]. Grafen, yarıiletken devre elemanı üretiminden radyo frekansı uygulamalarına, ince film elektrotlardan, sensör malzemelerine kadar birçok alanda kullanılabilir [5].

Altun ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, farklı grafen oranlarının uygulandığı grafen tabanlı polimer kompozitler birbirleriyle karşılaştırılmıştır [6]. Kompozit içindeki grafenin artışına bağlı olarak SE'de artış sağlandığı görülmüştür. Chen ve

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

diğ. tarafından yapılan çalışmada grafen kaplı ekranlama katmanının SE analizi hibrit nümerik yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir [7]. Lovat tarafından yapılan çalışmada, elektromanyetik alan ve ince bir grafen levha arasındaki etkileşimin analizi, THz aralığının altındaki frekanslarda geçerli olan ve grafen iletkenliğinin anizotropik eşdeğer devre modeline dayalı olarak türetilmiştir [8]. Dejband ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, grafen tabanlı bir elektromanyetik ekran tasarlanmış ve SE iletim hattı modeli kullanılarak hesaplanmıştır [9]. D'Aloia ve diğ. tarafından yapılan çalışmada bir grafen dielektrik laminat (GDL) aracılığıyla düşük THz mertebelerinde SE analizi gerçekleştirilmiştir [10]. Her grafen, dielektrik çifti tabakası homojen tek eksenli anizotropik bir ortamda eşdeğer tek katmanlı yapı olarak modellenmiştir. Cruciani ve diğ. tarafından yapılan çalışmada grafen düzlemsel levhaların ve ekranlama kutularının ekranlama etkinliği üzerine sayısal bir yöntem geliştirilmiştir [11]. FEM ve empedans ağ sınır koşulları tabanlı yöntem ile karmaşık geometriler, grafen levha duvarlarına sahip iki boyutlu ekranlar olarak modellenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde ekranlama etkinliği teorisi verilmiştir. Üçüncü bölümünde ise grafen iletkenliği analitik olarak incelenmiştir. Bir grafen tabakanın ekranlama etkinliği analitik ve CST Studio Suite 2019 üzerinde oluşturulan model ile nümerik olarak incelenmiştir. Dördüncü bölümde grafen tabakaların üst üste dizilmesiyle elde edilen grafen plakanın bir alüminyum levha yüzeyine kaplanması ve SE üzerindeki değişim analiz edilmiştir. Beşinci bölümde ise alüminyum ekranlama kutusunun iç yüzeylerine kaplanan grafen plakanın SE üzerindeki etkisi, grafenin kimyasal potansiyel ve sıcaklık parametrelerindeki değişimlere göre analiz edilmiştir. Son olarak yapılan çalışmalara ilişkin genel değerlendirme ve sonuçlar beşinci bölümde verilmiştir.

## 2 Ekranlama etkinliği

Elektronik devre ve sistemlerin, bulunduğu ortamdaki EMI'den etkilenmesini önlemek için ekranlama kutuları kullanılmaktadır. Ekranlama kutularının ekranlama etkinliği (SE), elektrik alanlar için aşağıdaki gibi ifade edilir [2].

$$SE = 20 \log \left| \frac{\vec{E}_{kutu\ yok}(p)}{\vec{E}_{kutu\ var}(p)} \right| \quad (dB) \quad (1)$$

Burada,  $\vec{E}_{kutu\ yok}(p)$ ,  $p$  gözlem noktasında ekranlama kutusu yokken ölçülen elektrik alan değerini  $\vec{E}_{kutu\ var}(p)$  ise kutu varken ölçülen elektrik alan değerini ifade etmektedir.

Ekranlama etkinliği, frekans, ekran geometrisi, ölçümlerin yapıldığı gözlem noktasının konumu, gelen dalganın açısı ve kutuplanması gibi birçok parametreye bağlı olarak değişebilmektedir [1]. Ekran malzemelerinin sağladığı ekranlama etkinliğini hesaplamak için ise ekran duvarının sonsuz büyüklükte düzlemsel yapıdan oluştuğu kabulü yapılmaktadır. Böylece gelen dalganın ortam değişimine gösterdiği tepki analitik ifadeler ile bulunabilir. Bir elektromanyetik ekran duvarı için SE değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$SE_T = SE_A + SE_R + SE_B \quad (2)$$

Burada  $SE_A$  soğrulma kaybını,  $SE_R$  yansımaya kaybını,  $SE_B$  ise ardışık yansımaya kayıplarını temsil etmektedir [12].

S parametreleri cinsinden  $SE_R$ ,  $SE_A$  ve  $SE_T$  ise sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [12].

$$SE_R = 10 \log \left( \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \right) \quad (3)$$

$$SE_A = 10 \log \left| 1 - \frac{|S_{11}|^2}{|S_{12}|^2} \right| \quad (4)$$

$$SE_T = 10 \log \frac{1}{|S_{12}|^2} = 10 \log \frac{1}{|S_{21}|^2} \quad (5)$$

Yansıma ve iletim katsayıları, S parametreleri cinsinden  $R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2$  ve  $T = |S_{12}|^2 = |S_{21}|^2$  olarak tanımlanır. Soğrulma katsayısı ise  $A + R + T = 1$  denkleminde elde edilmektedir [13].

## 3 Grafenin elektriksel iletkenliği

Bir karbon allotropu ve  $sp^2$  bağlı karbon atomlarının oluşturduğu 2 boyutlu bir karbon tabakası şeklinde olan grafen; ultra hafifliği, mükemmel mekanik esnekliği, güçlü yapısı ve iyi iletkenliği nedeniyle birçok farklı araştırma alanında popüler bir materyal haline gelmiştir [14]. İdealde tek bir grafen tabakanın kalınlığı 0.335 nm yani bir atom kalınlığı kadardır [4]. Pratikte ise grafen tabakaların üst üste dizilmesi ve aralarında zayıf Van Der Waals bağları oluşturulmasıyla elde edilen grafen plakalar kullanılmaktadır [10].

Grafen yüzey iletkenliği  $\sigma_{gr}$ , her iki taraftan iletken olan, son derece ince bir izotropik yüzey olarak modellenebilir. Kubo formülü kullanılarak grafenin yüzey iletkenliği  $\sigma_{gr}$  aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [11].

$$\sigma_{gr}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \sigma_{inter} + \sigma_{intra} \quad (6)$$

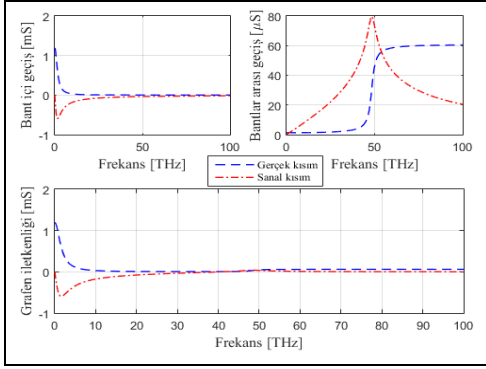
Burada,  $\sigma_{inter}$  bantlar arası geçiş ve  $\sigma_{intra}$  ise bant içi geçiş katkısını belirtmektedir. Bu iki ifade sırasıyla Denklem (7) ve Denklem (8)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\sigma_{inter}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left( \frac{2|\mu_c| - (\omega - 2j\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - 2j\Gamma)\hbar} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi\hbar^2 (\omega - 2j\Gamma)} \left[ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left( e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right] \quad (8)$$

Burada  $e = -1.602176 \times 10^{-19}$  C elektrik yükü,  $k_B = 1.3806488 \times 10^{-23}$  J/K Boltzman sabiti,  $T$  sıcaklık,  $\omega$  açısal frekans,  $\hbar$  Planck sabiti olmak üzere  $\hbar = h/2\pi = 1.0546 \times 10^{-34}$  J olarak ifade edilmektedir.  $\mu_c$ , kimyasal katkılama veya bias gerilimi ile kontrol edilebilen, elektron Volt (eV) cinsinden kimyasal potansiyeli;  $\Gamma$  ise saçılma oranını belirtmektedir [11]. CST programında tasarlanan grafen modelinde belirtilmesi gereken parametrelerden biri olan, fermi hızında birbirini izleyen iki çarpışma arasındaki elektron gevşeme süresi  $\tau$  ise  $\tau = \hbar/(2\Gamma) = 0.329/\Gamma$  tanımıyla saçılma oranı ile ilişkilendirilir [15].  $\Gamma$  meV,  $\tau$  ise ps cinsinden tanımlanır.

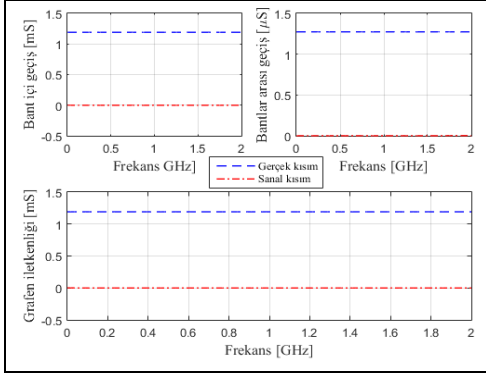
Grafen kimyasal potansiyeli  $\mu_c$ , mikrodalga frekanslarında 0.05-0.15 eV aralığında bir değer almaktadır [16]. Bu çalışma kapsamında, pratikte kullanılan grafen plaka ile uyumlu olacak şekilde  $\mu_c = 0.1$  eV,  $T = 300$  K,  $\tau = 0.1$  ps olarak tanımlanmıştır. Tek bir grafen tabakasının yüzey iletkenliğindeki bantlar arası ve bant içi geçiş katkılarının etkisi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Grafenin bant içi ve bantlar arası geçiş katkıları.

Figure 1. Intraband and interband contributions of graphene.

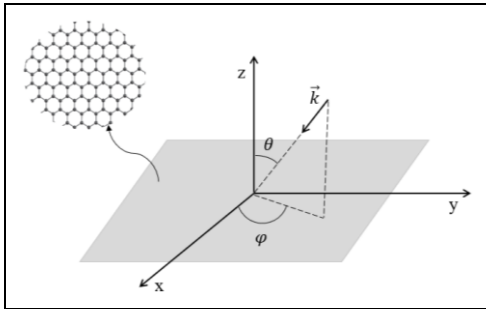
Şekil 1’de mikrodalga frekanslarından THz frekanslarına kadar olan geniş bir bantta grafen iletkenliği için bant içi geçiş katkısının önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında 0-2 GHz aralığında SE analizleri gerçekleştirildiğinden, grafen iletkenliğinin modellenmesinde bantlar arası geçiş katkısı ihmal edilmiştir. Şekil 2’de tek bir grafen tabakasının iletkenliği için bant içi ve bantlar arası geçiş katkılarının 0-2 GHz aralığındaki değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2. 0-2 GHz aralığı için grafenin bant içi ve bantlar arası geçiş katkıları.

Figure 2. Intraband and interband contributions of graphene for 0-2 GHz range.

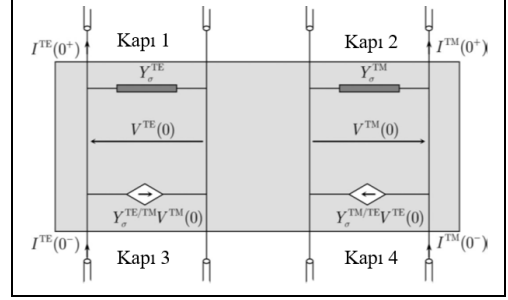
Şekil 2’de GHz mertebelerinde grafen iletkenliği için bant içi geçiş katkısının önemli ölçüde etkili olduğu, bantlar arası geçiş katkısının ise ihmal edilebilir seviyelerde olduğu görülmektedir. Grafenin elektriksel davranışının anlaşılması için Şekil 3’teki  $z = 0$  düzlemi üzerinde yer alan ve sonsuz incelikte olan iletken bir tabaka ele alınır.



Şekil 3. Bir grafen tabakasına gelen düzlem dalga.

Figure 3. Plane-wave incidence on a graphene layer.

Düzgün bir düzlem dalga Şekil 3’te gösterildiği gibi  $(\theta, \varphi)$  yönünde, dalga vektörü  $\vec{k} = \hat{a}_x k_x + \hat{a}_y k_y + \hat{a}_z k_z$   $z > 0$  yarım uzayında iletken yüzeye gelmektedir. Burada  $k_x = k_0 n_x$ ,  $k_y = k_0 n_y$  ve  $k_z = k_0 n_z$  olup  $n_x = -\cos \varphi \sin \theta$ ,  $n_y = -\sin \varphi \sin \theta$  ve  $n_z = -\cos \theta$  olarak tanımlanır [8].  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  serbest uzaydaki dalga sayısıdır. Grafen tabakanın eşdeğer devre modeli Şekil 4’teki gibi gösterilmiştir [8].



Şekil 4. Bir grafen tabakanın eşdeğer devresi [8].

Figure 4. Equivalent circuit of a graphene layer [8].

Eşdeğer devre modelini basitleştirmek için grafenin izotropik davranışı  $Y_\sigma^{TE} = Y_\sigma^{TM} = \sigma_{intra}$  ve  $Y_\sigma^{TE/TM} = -Y_\sigma^{TM/TE} = 0$  ifadeleriyle tanımlanır [8]. Bu durum sadece THz mertebesinde düşük frekanslardaki grafen davranışı için geçerlidir. Gelen düzlem dalga TE polarize olmuş ise Şekil 3’te kapı 1’e  $V^{inc}(z) = V_0^{inc} e^{jk_z z}$  şeklinde bir gelen gerilim mevcuttur. Sadeleşen eşdeğer devre elemanları sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Y_{tot}^{TE} = Y_0^{TE} + Y_\sigma^{TE} = Y_0^{TE} + \sigma_{intra} \quad (9)$$

TE polarizasyonu için gelen dalga denklemi,

$$\vec{E}_{TE}^{inc}(p) = T(x, y) V_0^{inc} e^{jk_z z} \vec{e}^{TE} \frac{2Y_0^{TE}}{Y_0^{TE} + Y_{tot}^{TE}} \quad (10)$$

şeklinde tanımlanır [8]. Gelen dalganın grafen tabakaya dik olması durumu  $(\theta = 0)$  için  $Y_0^{TE} = 1/\eta_0$  olmaktadır.  $\eta_0$  serbest uzayın dalga empedansıdır.  $T(p)$  iletim katsayısı,

$$T(p) = \frac{|E(p)|}{|E^{inc}(p)|} = \left| \frac{2Y_0^{TE}}{Y_0^{TE} + Y_{tot}^{TE}} \right| = \frac{2}{|2 + \sigma_{intra} \eta_0|} \quad (11)$$

olarak elde edilir. Grafen tabakanın SE değeri ise,

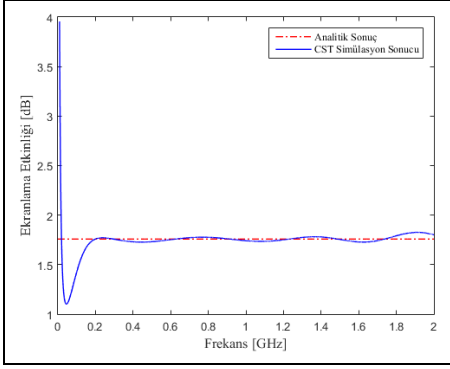
$$SE(p) = -20 \log T(p) \quad (12)$$

olarak tanımlanır [8].

Ekranlama kutusuna ilişkin nümerik model oluşturulmadan önce, 0.335 nm kalınlıkta bir grafen tabakanın ekranlama etkinliği davranışı Denklem (12)’de verilen analitik formülasyon ile CST simülasyon sonuçları karşılaştırılarak Şekil 5’teki gibi elde edilmiştir.

Analizler 0-2 GHz aralığında gerçekleştirilmiş olup CST’de 11853 adet hücreden (tetrahedron) oluşan bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde grafen tabakanın eni ve boyu 1 m olarak tanımlanmıştır. TE uyarımda grafen tabakaya bir Gauss geçici düzlem dalgası ( $\vec{k} = k \hat{a}_z$ ,  $\vec{E} = E_y \hat{a}_y$ ) uygulanmış ve elektrik alan için aşağıdaki denklemde belirtilen zamana bağlı Gauss darbesi uyarıma fonksiyonu kullanılmıştır.

$$E_y(t) = \exp[-\alpha (t - t_0)^2] \quad (13)$$



Şekil 5. Bir grafen tabakanın ekranlama etkinliği.

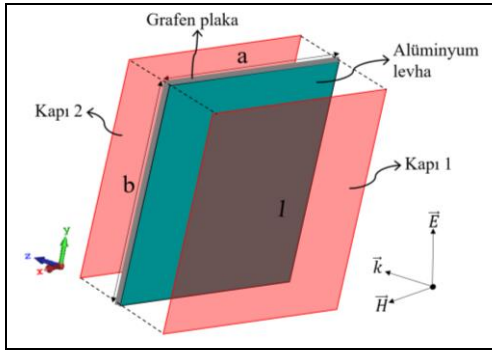
Figure 5. Shielding effectiveness of a graphene layer.

Burada  $\alpha = 1.72 \times 10^{10} \text{ s}^{-2}$ ,  $t_0 = 0.887 \times 10^{-9} \text{ s}$  olarak tanımlanmıştır.

0-2 GHz aralığında elde edilen analitik ve CST simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Sadece bir atom kalınlığında olan grafen tabakadan yaklaşık 1.8 dB ekranlama etkinliği elde edilmiştir. 0-100 MHz arasında oluşan fark, grafen tabakanın eni ve boyunun nümerik modelde 1 m olarak seçilmesi, analitik yöntemde ise sonsuz uzunlukta kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır.

#### 4 Çift katmanlı ekranın yansımaya kaybı

Bir ekran duvarının ekranlama etkinliği denklem (2)'de verildiği gibi  $SE_A$  soğrulma kaybı ve  $SE_R$  yansımaya kayıplarının toplamı şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 6'da  $t = 0.1 \text{ mm}$  kalınlığında,  $a = b = 1 \text{ m}$  boyutlarında alüminyum levhanın arka yüzeyi  $q = 35 \mu\text{m}$  kalınlığında grafen plaka ile kaplanarak bir çift katmanlı ekran yapısı tasarlanmıştır. Bu yapıya ait S parametrelerinin elde edilmesi için CST'de 2032 adet hücreden meydana gelen bir model oluşturulmuştur.



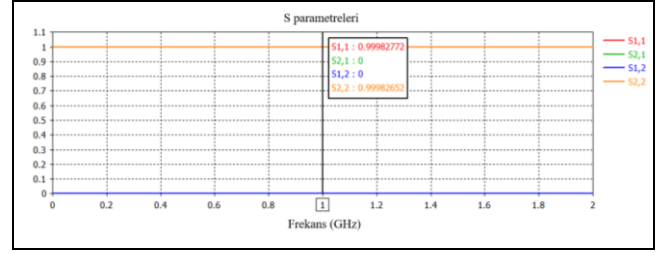
Şekil 6. Grafen plaka kaplı alüminyum levha.

Figure 6. Aluminum plate coated with graphene sheet.

Modele ilişkin S parametrelerinin elde edilmesinde kapı 1 ve kapı 2 kaynakları levhadan 30 cm uzakta konumlandırılmıştır [18]. Kapı 1 kaynağı ile levhaya uygulanan düzlem dalga  $\vec{k} = k\hat{a}_z$ ,  $\vec{E} = E_y\hat{a}_y$  olup kapı 2 kaynağı ile uygulanan düzlem dalga  $\vec{k} = -k\hat{a}_z$ ,  $\vec{E} = E_y\hat{a}_y$  şeklinde tanımlanmıştır. Elektrik alan için Denklem (13)'te belirtilen zamana bağlı Gauss darbesi uyarma fonksiyonu kullanılmıştır. CST simülasyonu ile elde edilen S parametreleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

Bu yapı için  $S_{12} = S_{21} = 0$  olduğundan soğrulma kaybı  $SE_A = \infty$  değerini almaktadır. Literatürde de benzer şekilde ince iletken tabakalar için  $> 10 \text{ MHz}$  üzerinde  $SE_A = \infty$  olduğu

belirtilmiştir [17]. Dolayısıyla, tasarlanan yapının ekranlama etkinliğindeki değişim için yansımaya kaybı  $SE_R$  değerini kıyaslamak gerekmektedir [18].



Şekil 7. CST'de elde edilen S parametreleri.

Figure 7. S parameters obtained in CST.

Şekil 6'da gösterilen  $t = 0.1 \text{ mm}$  kalınlığında,  $a = b = 1 \text{ m}$  boyutlarında alüminyum levhanın yansımaya kaybı  $SE_R$  değeri, analitik formülasyon ile elde edilmiş ve CST ile doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Sonra, alüminyum levhanın arka yüzeyi  $q = 35 \mu\text{m}$  kalınlığında grafen plaka ile kaplanarak  $SE_R$  üzerindeki değişim incelenmiştir. Analitik formülasyon için levhaya bir düzlem dalga ( $\vec{k} = k\hat{a}_z$ ,  $\vec{E} = E_y\hat{a}_y$ ) uygulanmıştır. Problem uzayında alüminyum levha için elektrik iletkenliği  $\sigma = 3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$ , dışında kalan yerler içinse  $\sigma = 0 \text{ S/m}$  serbest uzay olarak tanımlanmıştır. Serbest uzayın manyetik geçirgenliği  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  ve alüminyum için bağlı manyetik geçirgenlik  $\mu_r = 1$  olarak tanımlanmıştır.

Tek katlı alüminyum levhanın yansımaya kaybı

$$SE_R = 20 \log_{10} \frac{|Z_W|}{4|Z_S|} = 20 \log_{10} \frac{94.25}{|Z_{Al}|} \quad (14)$$

şeklinde elde edilir [17]. Burada  $Z_W = Z_0 = 377 \Omega$  serbest uzayın karakteristik empedansına eşittir. Alüminyum için iletkenlik  $\sigma = 3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$  ve bağlı manyetik geçirgenlik  $\mu_r = 1$  ifadeleri kullanılarak  $Z_{Al}$  empedansı

$$Z_{Al} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+j) = 3.30 \times 10^{-7} \sqrt{f}(1+j) \quad (15)$$

şeklinde tanımlanır.  $Z_{Al}$  empedansının Denklem (14)'te yerine yazılmasıyla yansımaya kaybı analitik olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$SE_R = 20 \log_{10} \frac{94.25}{|Z_S|} = 20 \log_{10} \left( \frac{20.05 \times 10^7}{\sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

Bir alüminyum levhanın arka yüzeyine grafen plaka kaplanarak oluşturulan çift katmanlı ekran için yansımaya kaybı  $SE_R$

$$SE_R = 20 \log_{10} \frac{\left| 1 + \frac{Z_{Al}}{Z_0} \right|}{2} + 20 \log_{10} \frac{\left| 1 + \frac{Z_{grafen}}{Z_{Al}} \right|}{2} + 20 \log_{10} \frac{\left| 1 + \frac{Z_0}{Z_{grafen}} \right|}{2} \quad (17)$$

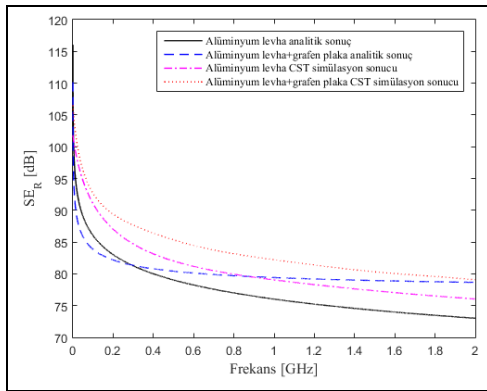
olarak tanımlanır [17]. Burada  $Z_0$  serbest uzayın karakteristik empedansı ve  $Z_{Al}$  alüminyum levhanın empedansı olup,  $Z_{grafen}$  ise



$$Z_{grafen} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r}{2\sigma_{intra}}}(1+j) \quad (18)$$

şeklinde tanımlanan grafen empedansını belirtmektedir. Burada, mikrodalga frekansları için  $\mu_r = 1$  olarak tanımlanmıştır.

$SE_R$ 'nin nümerik olarak elde edilmesi için CST'de  $t = 0,1$  mm kalınlığında,  $a = b = 1$  m bir alüminyum levha için 2032 adet hücreden oluşan bir model oluşturulmuştur (Şekil 6). CST simülasyonu ile elde edilen  $S_{11}$  parametresi Denklem (3) kullanılarak öncelikle tek katlı alüminyum levhanın yansıma kaybı  $SE_R$  elde edilmiştir. Sonra, alüminyum levhanın arka yüzeyi  $q = 35$   $\mu$ m kalınlığında grafen plaka ile kaplanmış ve oluşturulan iki katlı ekran için hem analitik formülasyon hem de CST simülasyonu ile  $SE_R$ , Şekil 8'deki gibi elde edilmiştir.



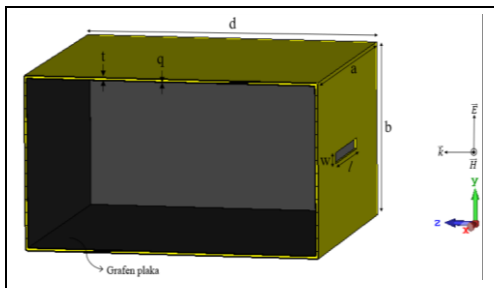
Şekil 8. Grafen plakasının yansıma kaybı üzerindeki etkisi.

Figure 8. The effect of graphene sheet on reflection loss.

Şekil 8'de elde edilen sonuçlara göre simülasyon sonucu ile analitik sonuç arasında yaklaşık 2-3 dB fark elde edilmiş olup birbirleriyle uyumlu oldukları görülmektedir. Alüminyum levhanın arka yüzeyine grafen plaka kaplanmasıyla birlikte  $SE_R$  üzerinde 7-8 dB aralığında değişen artışlar görülmektedir. Bu durum, ekranlama kutularının SE değerlerinin artırılmasında ince grafen plakaların kullanılabileceğini göstermektedir.

## 5 Grafen plaka kaplı ekranlama kutusu

CST'de oluşturulan nümerik ekranlama kutusu modelinde,  $q = 35$   $\mu$ m kalınlığında grafen plakalar kutu iç yüzeyini kaplayacak şekilde modellenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. İç yüzeyleri grafen plaka kaplı alüminyum kutu.

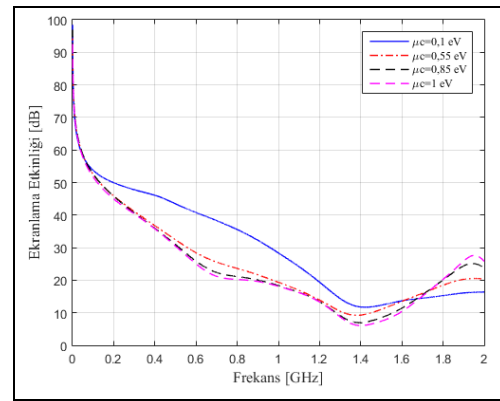
Figure 9. Aluminum enclosure in which inner surfaces are coated with graphene sheet.

Kutu boyutları  $a = 30$  cm kutu genişliği,  $b = 16$  cm kutu yüksekliği,  $d = 31$  cm kutu derinliği,  $t = 2.5$  mm kutu duvar kalınlığı olmak üzere Şekil 9'daki gibi tasarlanmıştır. Ön

yüzeyindeki açıklığın boyutları ise  $l = 100$  mm ve  $w = 10$  mm şeklinde belirlenmiştir. Oluşturulan model 5572 adet hücreden meydana gelmektedir. Elektrik alan için Denklem (13)'te belirtilen zamana bağlı Gauss darbesi uyarma fonksiyonu kullanılmıştır.

### 5.1 Grafen kimyasal potansiyelinin SE'ye etkisi

Grafen kimyasal potansiyelinin SE üzerindeki etkisini incelemek için sırasıyla  $\mu_c = 0.1$  eV,  $\mu_c = 0.55$  eV,  $\mu_c = 0.85$  eV,  $\mu_c = 1$  eV kimyasal potansiyellerine sahip dört farklı grafen plaka modellenmiştir. Tüm grafen plakalar için  $T = 300$  K olarak tanımlanmıştır. Şekil 8'de gösterilen iç yüzeyleri grafen plaka kaplı ekranlama kutusu için gerçekleştirilen simülasyonlarda kimyasal potansiyelin SE üzerindeki etkisi Şekil 10'daki gibi gösterilmiştir.



Şekil 10. Grafen kimyasal potansiyelinin SE'ye etkisi.

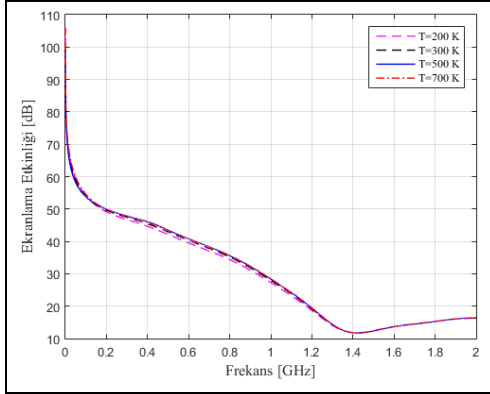
Figure 10. The effect of graphene chemical potential on SE.

Şekil 10'daki sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmektedir [19]. Elde edilen sonuçlara göre grafen plakaların kimyasal potansiyeli artırıldığında, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğinin 1.7 GHz civarına kadar azaldığı, 1.7 GHz üzerinde ise arttığı görülmektedir. Bu durum, Denklem (6)'da belirtilen grafen iletkenliğinde bant içi geçiş katkısının düşük GHz mertebelerinde baskın olmasından kaynaklanmaktadır. 1.7 GHz civarına kadar bant içi geçiş katkısının sanal kısmının etkisiyle, kimyasal potansiyelin artması grafen iletkenliğinde azalmalara sebep olmaktadır. Bu da grafenin kayıplı bir malzeme gibi davrandığını gösterir. Çünkü serbest taşıyıcıların saçılması bant içi geçiş sürecinde önemli ölçüde artmaktadır [20]. 1.7 GHz üzerinde ise bant içi geçiş katkısının gerçek kısmının etkisiyle, kimyasal potansiyelin artması grafen iletkenliğini artırmaktadır. Dolayısıyla, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun SE değeri 1.7 GHz'in üzerinde frekanslarda kimyasal potansiyeldeki artışa bağlı olarak iyileşmektedir. Düşük GHz mertebelerinde baskın olan grafen bant içi geçiş katkısının gerçek ve sanal kısımlarının kimyasal potansiyele bağlı olarak etkisi görülmektedir. Bantlar arası geçiş katkısı ise THz mertebelerinde etkisini gösterdiğinden 0-2 GHz aralığı için etkisi ihmal edilmektedir.

### 5.2 Grafen sıcaklık parametresinin SE'ye etkisi

Grafen sıcaklık parametresi  $T$  için 30-700 K gibi oldukça geniş bir aralıkta çalışmalar yapılmıştır [21]. Sıcaklık parametresinin SE üzerindeki etkisini incelemek için sırasıyla  $T = 100$  K,  $T = 300$  K,  $T = 500$  K,  $T = 700$  K değerlerine sahip dört farklı grafen plaka modellenmiştir. Tüm grafen plakalar için  $\mu_c = 0.1$  eV olarak tanımlanmıştır. Şekil 9'da gösterilen iç yüzeyleri

grafen plaka kaplı ekranlama kutusu için gerçekleştirilen simülasyonlarda sıcaklık parametresinin SE üzerindeki etkisi Şekil 11'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 11. Grafen sıcaklık parametresinin SE'ye etkisi.

Figure 11. The effect of graphene temperature parameter on SE.

Şekil 11'deki sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmektedir [19]. Elde edilen sonuçlara göre grafen sıcaklık parametresi değeri arttıkça iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğinin 0.5-1.5 dB aralığında arttığı elde edilmiştir. 300 K ve üzeri sıcaklıklar için iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğinin aynı olduğu görülmektedir. Bu durum, Denklem (6)'da belirtilen grafen iletkenliği için düşük GHz mertebelerinde bantlar arası geçiş katkısının ihmal edilebilir seviyede olması ve grafen iletkenliğinin belirlenmesinde bant içi geçiş katkısının baskın olmasıyla ilgilidir. Grafen bant içi geçiş katkısı, 300 K ve üzeri sıcaklıklar için yakın değerlerde elde edildiğinden iç yüzeyleri grafen kaplı ekranlama kutusunun SE değerleri de birbirine yakın olarak elde edilmiştir.

## 6 Sonuçlar

Bu çalışmada elektromanyetik ekranların SE değerini grafen plakayla kaplayarak artırmak amaçlanmıştır. Öncelikle tek katmanlı grafen CST'de nümerik olarak modellenmiş ve analitik bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür. Sadece bir atom kalınlığında olan grafen tabakadan 1.8 dB ekranlama etkinliği elde edilmiştir. Sonra, bir alüminyum levhanın arka yüzeyine grafen plaka kaplanarak oluşturulan çift katmanlı ekranın yansımaya kaybı analitik ve nümerik olarak elde edilmiştir. Alüminyum levhanın grafen plaka ile kaplanmasıyla yansımaya kaybı üzerinde 7-8 dB iyileştirme sağlanmıştır.

Son olarak, iç yüzeyleri grafen plaka kaplı bir ekranlama kutusu modellenmiş olup, grafen plakasının kimyasal potansiyel ve sıcaklık değerlerine göre ekranlama kutusunun SE değerinin değişimi incelenmiştir. Sıcaklık parametresi sabit kalıp, grafen plakasının kimyasal potansiyeli artırıldığında, ekranlama kutusunun SE değerinin 0-2 GHz aralığında azaldığı elde edilmiştir. Kimyasal potansiyel sabit kalıp, grafen plakasının sıcaklık parametresi artırıldığında ise 300 K ve üzeri sıcaklıklarda SE değerleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir. Elektronik devreleri dış elektromanyetik girişimden koruyan ekranlama kutularının ekranlama etkinliğini artırmak için grafen plakalar kullanılabilir.

## 7 Conclusions

In this study, it is aimed to increase SE value of electromagnetic shields by coating with graphene sheet. Firstly, graphene

monolayer is modeled numerically in CST and it is observed that it is in good agreement with the analytical findings. 1.8 dB shielding effectiveness is obtained with graphene monolayer, which has the thickness of a single atom. Then, the reflection loss of bilayer screen that is formed by coating the back surface of an aluminum plate with graphene sheet, is analyzed analytically and numerically. 7-8 dB improvement on the reflection loss is achieved after coating aluminum plate with graphene sheet.

Finally, a shielding enclosure in which inner surfaces are coated with graphene sheet is modeled and the change of SE value of the shielding enclosure with respect to the chemical potential and temperature values of graphene sheet is investigated. It is obtained that SE value of shielding enclosure decays in the range of 0-2 GHz depending on the increase of chemical potential of graphene sheet while the temperature parameter remains fixed. SE values are obtained close to each other at the temperature 300 K and above depending on the increase of temperature of graphene sheet while the chemical potential remains fixed. Graphene sheets can be used to increase the shielding effectiveness of shielding enclosures that protect electronic circuits against external electromagnetic interference.

## 8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Sunay GÜLER ve Sibel YENİKAYA fikrin oluşması, kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesinde; Sunay GÜLER literatür taraması, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların elde edilmesinde; Sibel YENİKAYA sonuçların incelenmesi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesinde katkı sunmuşlardır.

## 9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 10 Kaynaklar

- [1] Güler S, Yenikaya S, Yılmaz G. "Elektronik ekipman koruyucu kutusunun ekranlama etkinliği analizi". *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1445-1458, 2020.
- [2] Güler S, Yenikaya S. "Analysis of shielding effectiveness by optimizing aperture dimensions of a rectangular enclosure with genetic algorithm". *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 29(2), 1015-1028, 2021.
- [3] Obreja AC, Iordanescu S, Gavrilă R, Dinescu A, Comanescu, F, Matei A, Danila M, Dragoman M, Iovu H. "Flexible films based on graphene/polymer nanocomposite with improved electromagnetic interference shielding". *International Semiconductor Conference (CAS)*, Sinaia, Romania, 12-14 October 2015.
- [4] Geim AK, Novoselov KS. "The rise of graphene". *Nature Materials*, 6, 183-191, 2007.
- [5] Zhu Y, Murali S, Cai W, Li X, Suk JW, Potts JR, Ruoff RS. "Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications". *Advanced Materials*, 22(35), 3906-3924, 2010.
- [6] Altun M, Karteri İ, Güneş M. "A study on EMI shielding effectiveness of graphene based structure". *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Turkey, 16-17 September 2017.

- [7] Chen J, Guo J, Tian C. "Analyzing the shielding effectiveness of a graphene-coated shielding sheet by using the HIE-FDTD method". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(2), 362-367, 2018.
- [8] Lovat, G. "Equivalent circuit for electromagnetic intersection and transmission through graphene sheets". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(1), 101-109, 2012.
- [9] Dejbani E, Karami H, Hosseini M. "Tunable electromagnetic interference shield using periodic graphene-based structures in the terahertz regime". *International Conference on Circuits, Devices and Systems (ICCDs)*. Chengdu, China, 5-6 September 2017.
- [10] D'Aloia AG, D'Amore M, Sarto MS. "Low-terahertz modeling of graphene/dielectric multilayers using an equivalent single layer in reverberation environment". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(4), 849-857, 2018.
- [11] Cruciani S, Feliziani M, Maradei F. "Prediction of shielding effectiveness in graphene enclosures by FEM-INBC method". *T. Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Taipei, Taiwan, 26-29 May 2015.
- [12] Chhetri S, Samanta P, Murmu NC, Srivastava SK, Kuila T. "Electromagnetic interference shielding and thermal properties of non-covalently functionalized reduced graphene oxide/epoxy composites". *AIMS Material Science*, 4(1), 61-74, 2016.
- [13] Abdulla R, Delihanlar E, Abdulla FGK, Yuzer AH. "Electromagnetic shielding characterization of conductive knitted fabrics". *Progress In Electromagnetics Research M*, 56, 33-41, 2017.
- [14] Eswaraiyah V, Sankaranarayanan V, Mishra AK, Ramaprabhu S. "Electromagnetic interference (EMI) shielding of carbon nanostructured films". *ICCCE International Conference on Chemistry and Chemical Engineering, Proceedings*. Kyoto, Japan, 1-3 August 2010.
- [15] D'Aloia AG, D'Amore M, Sarto MS. "Terahertz shielding effectiveness of graphene-based multilayer screens controlled by electric field bias in a reverberating environment". *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 5(4), 628-636, 2015.
- [16] Bozzi M, Pierantoni L, Bellucci S. "Application of graphene at microwave frequencies". *Radioengineering*, 24(3), 661-669, 2015.
- [17] Ott HW. *"Electromagnetic compatibility Engineering"*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009.
- [18] Lee, YS, Malek Y, Cheng EM, Liu W, You KY, Wee FH, Zahid L, Rahim A. "Single layer microwave absorber based on rice husk-MWCNTs composites". *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(14), 8932-8937, 2016.
- [19] Güler S, Yenikaya S. "Analysing the shielding effectiveness of graphene sheet coated rectangular enclosure". *Electromagnetics*, 41(7), 469-485, 2021.
- [20] Wang D, Zhao WS, Gu X, Chen W, Yin WY. "Wideband modeling of graphene-based structures at different temperatures using hybrid FDTD method". *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 14(2), 250-258, 2015.
- [21] Wang R, Raju S, Chan M, Jiang LJ. "Low frequency behavior of CVD graphene from DC to 40 GHz". *Progress in Electromagnetics Research C*, 71, 1-7, 2017.