

FARKLI AÇIKLIK ŞEKİLLERİNE SAHİP EKRANLAMA KUTULARI İÇİN GRAFEN PLAKA KAPLAMANIN EKRANLAMA ETKİNLİĞİNE ETKİSİNİN ANALİZİ

Sunay GÜLER *
Sibel YENİKAYA **

Alınma: 04.02.2022; düzeltme: 13.04.2022; kabul: 04.07.2022

Öz: Elektromanyetik uyumluluk (EMC), özellikle son on yılda gelişmiş sürücü destek ve elektrikli tahrik sistemlerinin geleneksel araç mimarisine dahil edilmesiyle çok daha önemli hale gelmiştir. Elektromanyetik ekranlama, elektronik devreleri dış elektromanyetik girişimden (EMI) korumak için kullanılan iletken bir bariyerdir. Ekranlama etkinliği (SE), girişim yapan bir elektromanyetik kaynağa karşı ekranlama performansının ölçüsüdür. Elektrikli araçların (EV) içindeki tasarım sınırlamaları, ekranlama kutusu boyutlarını değiştirmeden SE'yi artırmayı araştırmaya zorlamaktadır. Grafen, iyi iletkenliği ve güçlü yapısı nedeniyle birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplanmış bir ekranlama kutusu için nümerik model tasarlanmıştır. Farklı açıklık şekillerinin SE üzerindeki etkisi, kutunun farklı iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanması durumlarına göre analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç, Elektromanyetik uyumluluk, Ekranlama etkinliği, Grafen plaka

Analysis of the Effect of Graphene Sheet Coating on Shielding Effectiveness for Shielding Enclosures with Different Aperture Shapes

Abstract: Electromagnetic compatibility (EMC) has become much more important especially over the last decade due to incorporating advanced driver assistance and electric propulsion systems into conventional vehicle architecture. Electromagnetic shielding is a conductive barrier used for protecting electronic circuits against external electromagnetic interference (EMI). Shielding effectiveness (SE) is a measure of shielding performance against an interfering electromagnetic source. Design limitations inside electric vehicles (EV) forces to investigate on increasing SE without changing the shielding enclosure dimensions. Graphene is widely used in many studies due to its good conductivity and strong structure. In this study, a numerical model for a shielding enclosure in which inner surfaces are coated with graphene sheets, is designed. The effect of different aperture shapes on SE is analyzed according to coating different inner surfaces of the enclosure with graphene sheets.

Keywords: Electric vehicle, Electromagnetic compatibility, Shielding effectiveness, Graphene sheet

* FEV Türkiye, İstanbul

** Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa
İletişim Yazarı: sguler@uludag.edu.tr

1. GİRİŞ

CO₂ salınımını sınırlamayı amaçlayan küresel düzenlemeler yakın gelecekte karayolu taşımacılığının çoğunlukla elektrikli araçlarla (EV) gerçekleşeceğini göstermektedir (“Electric surge”, 2019). EV, bir veya birden fazla elektrik makinesinden oluşan elektrikli tahrik sistemine sahip olabileceği gibi (Güler ve diğ., 2019), bir içten yanmalı motoru bir elektrik makinesiyle birleştiren hibrit elektrikli araç da olabilmektedir (Matallana ve diğ., 2019). Sürüş güvenliğini ve konforunu artırmaya yönelik olarak, gelişmiş sürücü destek sistemi (ADAS) ekipmanlarının araç içerisindeki sayıları artmaktadır. Bu artışa ilave olarak elektrikli tahrik sistemlerinin de araç elektroniği mimarisine dahil edilmesi, elektromanyetik uyumluluk (EMC) konusunu araç tasarımı sırasında dikkat edilmesi gereken kritik konulardan biri haline getirmiştir (Güler ve diğ., 2020). Elektromanyetik girişimin (EMI) yoğun olduğu bu tür araç mimarilerinde elektrik-elektronik devreleri dış elektromanyetik girişimlere karşı korumak ve bu devrelerden kaynaklanan gürültünün de çevreye yayılımını engellemek için elektromanyetik ekranlama kutularının kullanılması zorunludur.

Elektronik devrelerin EMI'ye karşı tam olarak korunabilmesi, üzerinde herhangi bir açıklık bulunmayan, yüksek iletkenliğe ve EMI sızıntısının olamayacağı kadar kalın duvarlara sahip bir elektromanyetik ekranlama kutusuna yerleştirilmesiyle mümkün olur. Pratikte ise elektronik devrelerin besleme girişleri ve diğer elektronik ünitelerle haberleşebilmeleri için konnektörlere, ısınan elektronik devre elemanlarının soğuyabilmesi için de havalandırma deliklerine ihtiyaç vardır. Bu sebeplerden dolayı ekranlama kutularında açıklıkların olması gerekmektedir. Bu açıklıklar, farklı boyutlarda ve şekillerde olup elektronik devreleri etkileyebilecek EMI sızıntısına izin verirler. Elektromanyetik ekranlama kutularının performansı, genellikle kutunun varlığında ve yokluğunda ölçülen elektrik veya manyetik alan büyüklüklerinin birbirine oranı olarak tanımlanan ekranlama etkinliği (SE) ile ifade edilir (Güler ve Yenikaya, 2021a). Elektronik devrelerin EMI'den zarar görmemesi için ekranlama kutularının SE analizlerinin yapılarak tasarlanması gerekmektedir. EV'lerde ekranlama kutusu boyutlarının sabit kaldığı ve açıklığın belli bir alana sahip olması gerektiği durumda, EMC gerekliliklerinin sağlanabilmesi ve SE'nin istenilen seviyelere çıkarılabilmesi için açıklık boyutlarının veya kutu malzemesinin değiştirilmesi gibi çalışmalar gerekmektedir.

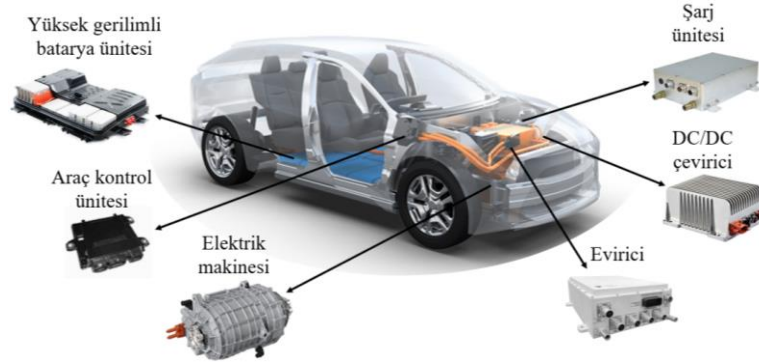
Literatürde, ekranlama etkinliği ile ilgili hem analitik hem de nümerik çözümler sunan çalışmalar mevcuttur. Fiziksel yapı karmaşıklaştıkça analitik yöntemler yerine nümerik yöntemlere olan ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Ilgar ve diğ. (2015) farklı açıklık şekillerinin metalik dikkörtgen kutunun ekranlama etkinliğine etkisini analiz etmişlerdir. D'Aloia ve diğ. (2015) grafen ve SiO₂ tabakalardan meydana gelen çok katmanlı bir ekran modeli oluşturmuşlardır. Önerilen çok katmanlı ekranın iyi performans göstermesinin, temel olarak içerisinde grafen oranının artmasıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir. Cruciani ve diğ. (2015) grafen plakaların ve ekranlama kutularının ekranlama etkinliği üzerine sayısal bir yöntem geliştirmişlerdir. Altun ve diğ. (2017) grafen esaslı polimer kompozitleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Bileşikteki grafenin artışına bağlı olarak ekranlama etkinliğinin iyileştiği elde edilmiştir. Dejband ve diğ. (2017) THz frekansları için grafen tabanlı elektromanyetik ekran tasarlamış ve SE'yi iletim hattı modeli kullanarak hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlar, CST (Computer Simulation Technology) simülasyonları ile yüksek oranda uyumluluk göstermiştir. D'Aloia ve diğ. (2018), bir grafen / dielektrik laminat (GDL) aracılığıyla düşük THz mertebelerinde SE analizi gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan model ile, farklı kimyasal katkılmalarda olan iki grafen örneği simüle edilmiştir. Farklı bir çalışmada ise, grafen kaplı ekranlama levhası için nümerik bir yöntem kullanılarak SE analizi gerçekleştirilmiştir (Chen ve diğ., 2018). Grafenin kimyasal potansiyelini kontrol ederek SE'nin artırılabilmesi ve grafenin bantlar arası iletkenliğinin THz mertebelerinde SE üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Güler ve diğ. (2020) ekranlama kutularında, konnektör montajı için açılan farklı geometrilerdeki açıklıkların SE'ye etkisini incelemişlerdir. Ayrıca açıklık şekillerine bağlı olarak meydana gelen kutu rezonanslarındaki değişimler analiz edilmiştir. Güler ve Yenikaya

(2021b) ön yüzeyinde dikdörtgen açıklık bulunan ekranlama kutusunun iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanması durumunda SE üzerindeki değişimleri analiz etmişlerdir.

Elektrikli araçların ekranlama kutularında farklı şekillerde açıklıklar kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ekranlama kutularının ön yüzeyinde farklı şekilde açıklık olması ve iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanması durumunda SE üzerindeki değişimlerin CST Studio Suite programında tasarlanan bir nümerik model ile analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ekranlama etkinliği problemine ilişkin kullanılan formülasyon ve grafen plakanın elektriksel iletkenliği verilmiştir. Üçüncü bölümde iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ve ön yüzeyinde farklı açıklık şekli olan ekranlama kutusu için bir nümerik model oluşturulmuştur. Dördüncü bölümde daire ve üçgen açıklık şekline sahip kutular içindeki her bir yüzeyin grafen plakalarla kaplanması durumunda SE'ye etkisi analiz edilmiştir ve literatürdeki dikdörtgen açıklıklı kutu sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Güler ve Yenikaya, 2021b). Son olarak yapılan çalışmalara ilişkin genel değerlendirme ve sonuçlar beşinci bölümde verilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Şekil 1'de bataryalı elektrikli aracın (BEV) elektrikli tahrik sistemine ilişkin elektrik elektronik ekipmanlar gösterilmiştir. Yüksek gerilimli (HV) batarya tarafından beslenen bir evirici aracılığıyla merkezi bir elektrik makinesi sürülmektedir. DC/DC çevirici ünitesi, HV bataryadan elde edilen gerilimi düşük gerilimle çalışan elektronik ekipmanların besleme seviyesine çekmektedir. Şarj ünitesi, HV batarya ünitesinin dışarıdan şarj edilmesinde kullanılmaktadır. Güç elektroniği tabanlı bu elektronik ekipmanların ekranlama kutuları genellikle alüminyum malzemeden üretilir. Ekranlama kutularında konnektör montajı, güç kablosu bağlantıları, havalandırma deliği vb. sebeplerle sıklıkla açıklıklara ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1:
BEV elektrikli tahrik sistemi

2.1. Ekranlama Etkinliği

Ekranlama, elektronik devrelerin elektromanyetik girişimin olduğu bir ortamdan izole edilebilmeleri için iletkenliği yüksek olan kutu içerisine yerleştirilmeleri işlemidir. Bir elektromanyetik ekranlama kutusunun performansı, genellikle kutunun varlığında ve yokluğunda ölçülen elektrik veya manyetik alan büyüklüklerinin birbirine oranı olarak tanımlanan ekranlama etkinliği (SE)

$$S_E = 20 \log_{10} \left| \frac{E_{kutu yok}(p)}{E_{kutu var}(p)} \right| \quad (1)$$

ile ifade edilir. 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 (Güler ve diğ., 2020).

Ekranlama etkinliği; frekansla, ekranlama kutusu ve üzerindeki açıklığın boyutlarıyla değişmektedir. Frekans arttıkça gelen elektromanyetik dalganın dalga boyu küçüleceğinden, açıklıktan kutu içerisine giren elektrik alanın genliği artmakta ve SE azalmaktadır. Ekranlama kutusu boyutları artırıldığında, açıklıktan kutu derinliğine ilerleyen elektromanyetik dalganın gücü mesafeyle birlikte azalacağından SE artmaktadır. Açıklık boyutları artırıldığında ise kutu içerisine nüfuz eden elektrik alanın genliği artacağından SE azalmaktadır (Güler ve diğ., 2020).

BEV içinde ekranlama kutusu boyutlarını değiştirmeyi kısıtlayan ve aynı zamanda kutu yüzeyinde konnektör montajı için belli bir açıklık alanına ihtiyaç duyulan durumlarda SE'yi ortalama seviyenin üzerinde tutmak gerekmektedir.

2.2. Grafen Plakanın Elektriksel İletkenliği

Yüksek iletkenlikleri, sağlam mekanik özellikleri nedeniyle metaller ekranlama kutusu üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte ağır olmaları, işlenme zorlukları ve herhangi bir değişiklikte yüksek üretim maliyetlerinin oluşması gibi önemli dezavantajları vardır. Ayrıca, ekranlama kutusu içindeki elektronik devrelerin performansını etkileyecek keskin rezonanslar meydana gelebilmektedir (Güler ve Yenikaya, 2021b).

Grafen, karbon atomlarının altıgenlerden oluşan bal peteği örgü yapısında sıralanmasından elde edilen tek katmanlı bir yapıdır (Geim ve Novoselov, 2007). 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. İdealde tek bir grafen katmanının kalınlığı 0,335 nm yani bir atom kalınlığı kadardır. Pratikte ise grafen katmanların üst üste dizilmesiyle elde edilen grafen plakalar kullanılmaktadır (D'Aloia ve diğ., 2018).

Bir grafen katmanının yüzey iletkenliği σ_{gr} , atom kalınlığı kadar ince bir izotropik yüzey olarak modellenir. Kubo formülü kullanılarak yüzey iletkenliği σ_{gr} aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Cruciani ve diğ., 2015).

$$\sigma_{gr}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \sigma_{intra} + \sigma_{inter} \quad (2)$$

Burada, σ_{intra} bant içi geçiş ve σ_{inter} ise bantlar arası geçiş katkısını belirtir. Bu iki ifade sırasıyla

$$\sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - 2j\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right] \quad (3)$$

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

şeklinde tanımlanır (Cruciani ve diğ., 2015). Burada, $e = -1,602176 \times 10^{-19}$ C elektrik yükü, $k_B = 1,3806488 \times 10^{-23}$ J/K Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık, \hbar Planck sabiti

olmak üzere $\hbar = h/2\pi = 1,0546 \times 10^{-34}$ J ve ω açısal frekans olarak ifade edilmektedir. μ_c , elektron Volt (eV) cinsinden kimyasal potansiyeli, Γ ise saçılma oranını belirtmektedir.

GHz mertebelerinde $\omega < 2\mu_c/\hbar$ olduğundan σ_{inter} ihmal edilip grafen yüzey iletkenliği, σ_{intra} cinsinden tanımlanmaktadır (Güler ve Yenikaya, 2021b). Grafen yüzey iletkenliği, DC grafen yüzey iletkenliği σ_0 , cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir (Cruciani ve diğ., 2015).

$$\sigma_{gr}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{\sigma_0}{1 + j\omega\tau} \quad (5)$$

Burada $\tau = \hbar/(2\Gamma) = 0,329/\Gamma$ olarak tanımlanmıştır (D'Aloia ve diğ., 2018). Γ meV, τ ise ps cinsinden ifade edilir. Bu durumda denklem (5) kullanılarak σ_0 aşağıdaki gibi elde edilir.

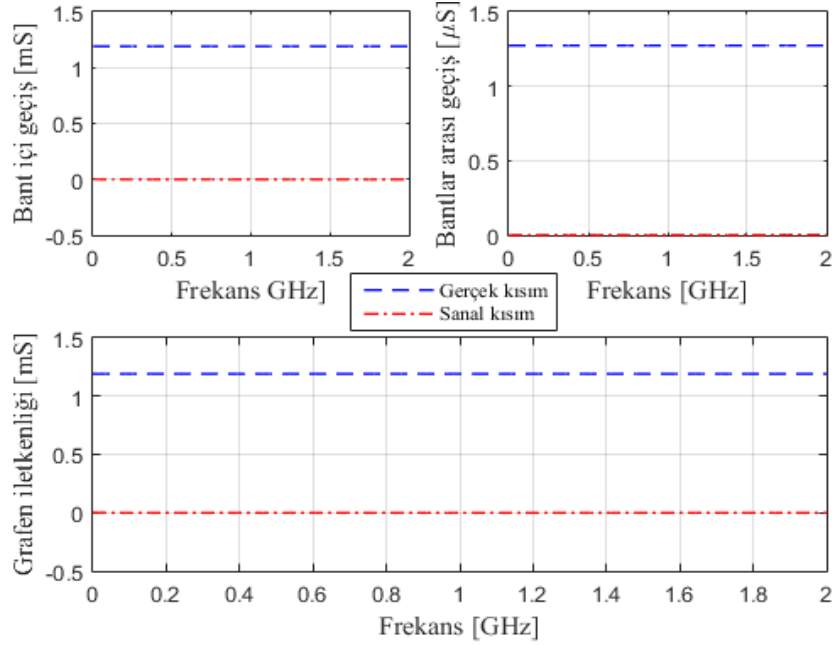
$$\sigma_0(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2 \tau k_B T}{\pi \hbar^2} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right] \quad (6)$$

Çok ince grafen plaka için basit bir RL dalından oluşan şönt admitansı Y_s

$$Y_s = \frac{1}{R + j\omega L} \quad (7)$$

gibi tanımlanır. Burada $R = 1/\sigma_0$ ve $L = \tau/\sigma_0$ olarak grafenin yüzey iletkenliğini modellemek üzere sayısal yöntemlerde kullanılabilir.

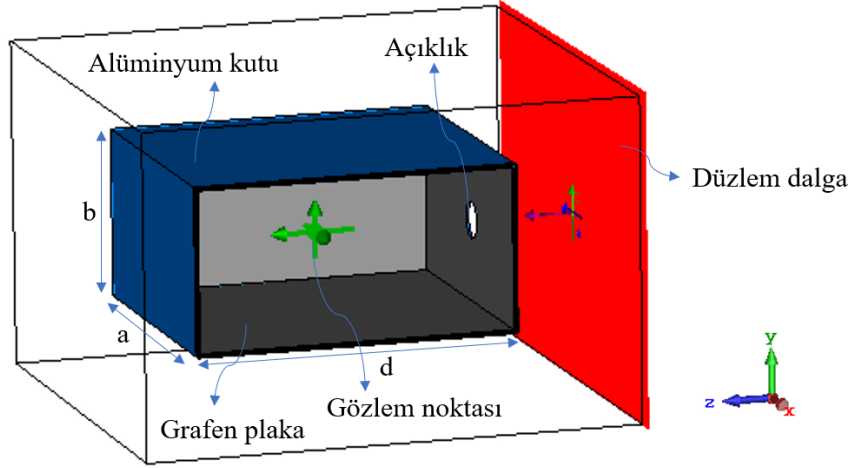
Grafen kimyasal potansiyeli μ_c , 0-1 eV aralığında bir değer almaktadır (Sharma ve Dominic, 2018). Mikrodalga frekanslarında ise μ_c 0,05-0,15 eV aralığında pratik uygulamalarla uyumlu olacak şekilde tanımlanır (Bozzi ve diğ., 2015). SE analizlerinde, $\mu_c = 0,1$ eV olarak tanımlanmıştır. Denklem (6)'da verilen grafen yüzey iletkenliğini modellemek üzere belirtilmesi gereken diğer parametreler ise sıcaklık $T = 300$ K, Fermi hızında birbirini izleyen iki çarpışma arasındaki elektron gevşeme süresi $\tau = 0,1$ ps olarak tanımlanmıştır (Zhang ve diğ., 2018). Grafenin yüzey iletkenliğindeki bantlar arası ve bant içi geçiş katkılarının etkisi 0-2 GHz aralığı için Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2:
Grafenin bant içi ve bantlar arası geçiş katkıları (0-2 GHz)

3. EKLANLAMA KUTUSU MODELİ

Ön yüzeyinde dikdörtgen açıklığı olan ve iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusuna ilişkin SE analizleri, kutu boyutlarının değiştirilemediği ve açıklığın belli bir alana sahip olması gereken durumlar için Güler ve Yenikaya (2021b) tarafından incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında ise aynı kutu boyutları kullanılarak, ön yüzeydeki açıklığın alanı sabit olup farklı şekillerde olması durumunda ekranlama etkinliğindeki değişimlerin edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 3'te farklı açıklık şekillerinin SE'ye etkisini incelemek üzere CST Studio Suite programında tasarlanan nümerik model gösterilmiştir. TE uyarımda ekranlama kutusuna uygulanan Gauss geçici düzlem dalgası ($\vec{k} = k\hat{a}_z$, $\vec{E} = E_y\hat{a}_y$), pozitif dikey eksen boyunca genliği zaman içinde basamak fonksiyonu olarak değişen elektrik alan polarizasyonuna sahiptir. Elektrik alan dağılımları, ekranlama kutusunun merkezine yerleştirilen gözlem noktasında hesaplanmıştır. Problem uzayında ekranlama kutusu duvarları için elektrik iletkenliği $\sigma = 3,56 \times 10^7$ S/m, kutu içi ve dışı için ise $\sigma = 0$ S/m serbest uzay olarak tanımlanmıştır.



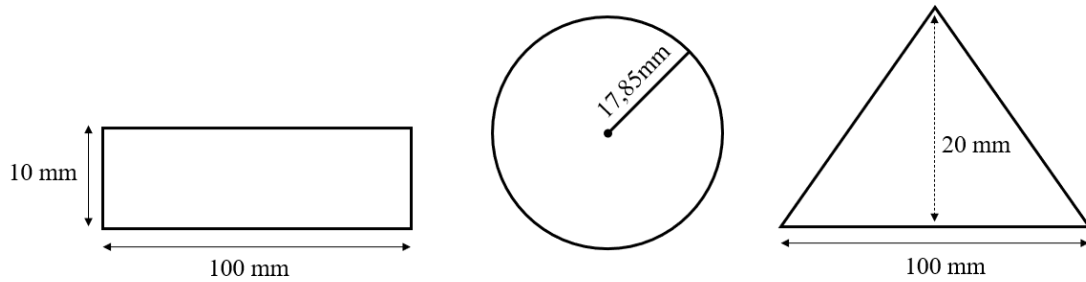
Şekil 3:
Ekranlama kutusu modelinin kesit görüntüsü

Elektrik alan için zamana bağlı Gauss darbesi uyarma fonksiyonu,

$$E_y(t) = \exp[-\alpha (t - t_0)^2] \quad (8)$$

şeklinde tanımlanır (Chen ve Wang, 2007). Burada $\alpha = 1,72 \times 10^{10} \text{ s}^{-2}$, $t_0 = 0,88710^{-9} \text{ s}$ olarak tanımlanmıştır. Bu sinyal ile 2 GHz'e kadar olan simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

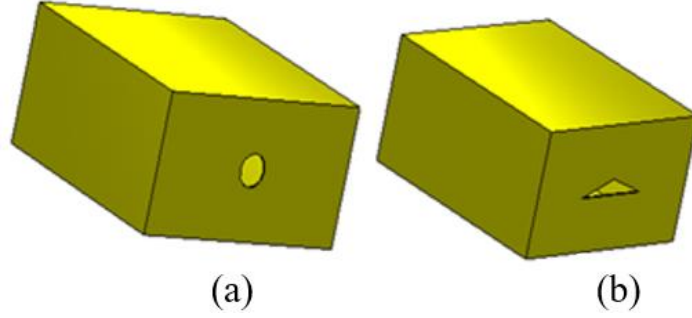
Otomotivde kullanılan elektronik ekipmanların ekranlama kutularında konnektör bağlantıları için sıklıkla dikdörtgen, daire ve üçgen şeklinde açıklıklar kullanılmaktadır. Ekranlama kutusu boyutları $a = 300 \text{ mm}$, $b = 160 \text{ mm}$, $d = 310 \text{ mm}$ olan modelde, kutu ön yüzeyinin merkezine yerleştirilmiş, aynı açıklık alanına sahip (1000 mm^2); fakat farklı şekillerdeki açıklıklar Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4:
1000 mm²'lik açıklığın farklı geometrilerde olması

Güler ve Yenikaya (2021b) tarafından yapılan çalışmada dikdörtgen açıklık olması durumu için SE analizleri yapılmış olup bu çalışmada daire ve üçgen açıklığın olduğu durumlar için sırasıyla 5831 ve 5427 adet hücreden oluşan modellerle SE analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Kutu boyutları için $a = 300 \text{ mm}$, $b = 160 \text{ mm}$, $d = 310 \text{ mm}$, $t = 2,5$ olarak tanımlanmıştır. Grafen plakaların modellenmesinde, grafen kimyasal potansiyeli $\mu_c = 0,1 \text{ eV}$, sıcaklık $T = 300 \text{ K}$, elektron gevşeme süresi $\tau = 0,1 \text{ ps}$ olarak tanımlanmıştır. İç yüzeyleri $q =$

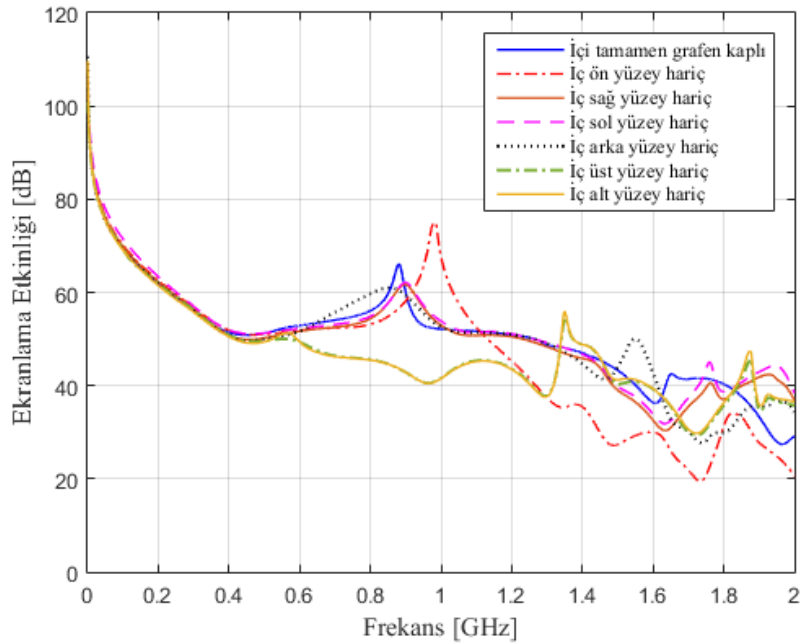
35 µm kalınlığında grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusu için ön yüzeyindeki açıklığın daire ve üçgen olmasına göre SE üzerindeki değişimler analiz edilmiştir. Her bir yüzeydeki grafen plakanın SE üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 5:
Modelde kullanılan açıklık şekilleri a) Daire b) Üçgen

4. BULGULAR

Şekil 6'da boyutları $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm, $t = 2,5$ mm ve kutu ön yüzeyinin merkezine yerleştirilmiş $r = 17,85$ mm yarıçapında bir daire açıklığı olan alüminyum kutunun iç yüzeylerinin $q = 35$ µm kalınlığında grafen plakalarla kaplanması durumunda SE üzerindeki değişim gösterilmiştir. Şekil 6'da kutu iç yüzeylerinden birindeki grafen plaka çıkarılıp diğer yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olarak bırakılmıştır.



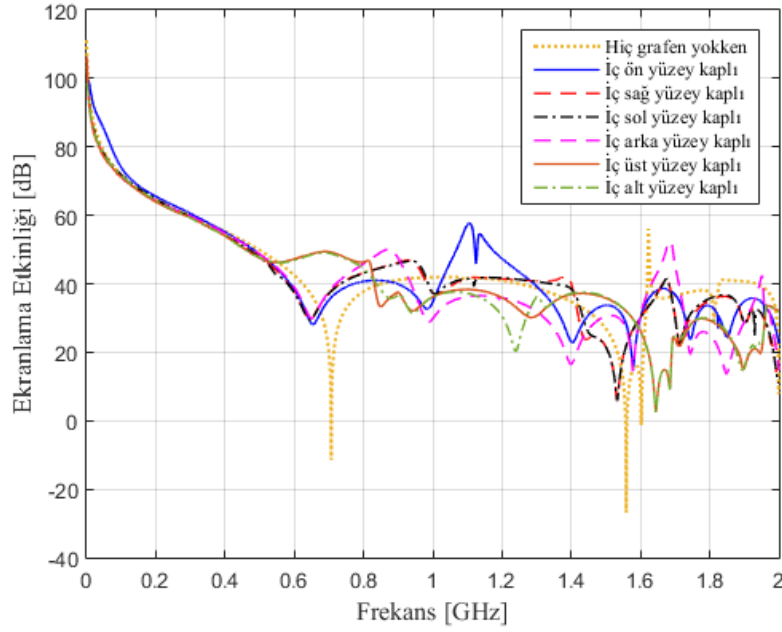
Şekil 6:
Bir yüzey hariç kutu iç yüzeylerini grafen plakayla kaplamanın SE'ye etkisi (daire açıklık)

Elde edilen sonuçlara göre iç sağ yüzey hariç ile iç sol yüzey hariç durumlarında SE değerleri neredeyse aynıdır. Aralarındaki fark 0-0,8 dB olarak hesaplanmıştır. İç arka yüzey hariç durumunda 1,4 GHz'e kadar yakın sonuçlar elde edilmiştir; fakat 1,5 GHz sonrasında 15 dB'ye kadar çıkan azalmalar görülmektedir. İç üst yüzey hariç ve iç alt yüzey hariç durumları için elde edilen SE değerleri de birbirleriyle uyumludur; fakat önceki üç sonuca kıyasla özellikle 1,6-2 GHz aralığında SE değerlerinde 13 dB'ye çıkan azalmalar görülmektedir. En kötü sonuç ise iç ön yüzeydeki grafen plakasının kaldırıldığı durumda görülmektedir. İç yüzeylerin komple grafen plakalarla kaplı olduğu duruma göre 1,2-2 GHz aralığında SE üzerinde 11-23 dB arasında değişen azalmalar elde edilmiştir. Tablo 1'de belirli frekanslarda elde edilen SE değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Bir yüzey hariç grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (daire açıklık)

İşlem Tanımı	SE (dB) 300 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 900 MHz	SE (dB) 1,2 GHz	SE (dB) 1,5 GHz	SE (dB) 1,8 GHz
Hiç grafen yokken	60,10	42,46	41,09	40,96	26,85	37,35
Komple grafen var	55,91	52,90	60,09	50,91	43,26	40,33
Ön yüzey hariç	56,74	51,88	58,14	45,25	27,36	31,24
Sağ yüzey hariç	56,39	51,67	61,63	50,48	39,00	37,06
Sol yüzey hariç	57,03	52,25	62,12	51,10	39,80	38,69
Arka yüzey hariç	56,18	51,66	59,42	50,97	43,92	29,88
Üst yüzey hariç	56,19	49,34	42,85	43,62	40,31	35,78
Alt yüzey hariç	55,76	49,37	42,86	43,46	41,24	36,33

Grafen plakalarla ilgili yapılan bir diğer incelemede ön yüzeyinde daire açıklık bulunan ekranlama kutusunun iç yüzeylerinden sadece birini grafen plakayla kaplayarak SE üzerindeki değişim incelenmiştir (Şekil 7). Kutu üzerindeki açıklık ön yüzeyde yer aldığından, iç ön yüzeyin grafen plakayla kaplanması, SE'yi en iyi iyileştiren adım olmuştur. Kutu iç üst veya alt yüzeyinin grafen plakayla kaplanması birbirine yakın sonuçlar vermiş olup, iç ön yüzeyin kaplanmasından sonra ikinci SE iyileştirme adımı olarak uygulanabilir. Kutu iç sağ veya sol yüzeyinin grafen plakayla kaplanması ise özellikle 0,8-1,45 GHz aralığında iç üst veya alt yüzeyin grafen plakayla kaplanması durumuna göre SE üzerinde daha çok iyileştirme sağlamıştır. İç arka yüzeyin grafen plakayla kaplanmasından daha iyi sonuç verdiği için üçüncü iyileştirme adımı olarak uygulanabilir. Tablo 2'de ön yüzeyinde daire açıklık bulunan kutunun iç yüzeylerinden sadece birinin grafen plaka ile kaplanması ve SE üzerindeki etkisi belirli frekanslar için hesaplanmıştır.



Şekil 7:

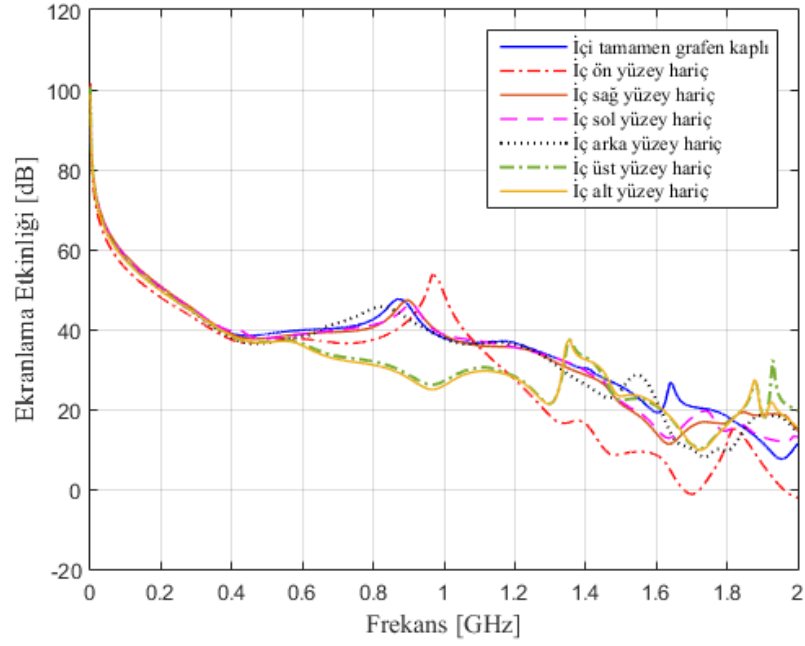
Kutu iç yüzeylerinden birini grafen plakayla kaplamanın SE'ye etkisi (daire açıklık)

Tablo 2. Bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (daire açıklık)

İşlem Tanımı	SE (dB) 300 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 900 MHz	SE (dB) 1,2 GHz	SE (dB) 1,5 GHz	SE (dB) 1,8 GHz
Hiç grafen yokken	60,10	42,46	41,09	40,96	26,85	37,35
İç ön yüzey kaplı	60,56	38,31	39,88	47,33	33,69	33,53
İç sağ yüzey kaplı	59,39	37,45	46,33	41,46	21,57	35,19
İç sol yüzey kaplı	59,45	37,30	45,95	41,67	21,49	35,70
İç arka yüzey kaplı	59,83	38,95	47,46	35,92	30,47	25,05
İç üst yüzey kaplı	59,28	47,23	37,52	35,91	35,78	29,28
İç alt yüzey kaplı	59,22	46,87	36,67	30,46	36,10	29,66

Şekil 6 ve Şekil 7'den elde edilen sonuçlardan biri de grafen plakasının iç yüzeylere kaplanmasıyla keskin kutu rezonanslarının önemli ölçüde önlenmesidir. İç yüzeylerden herhangi birinin grafen plaka ile kaplanması, ekranlama etkinliği üzerinde iyileşme sağlamaktadır.

Boyutları $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm, $t = 2,5$ mm olan ekranlama kutusunun ön yüzeyinde $h = 20$ mm yüksekliğinde, $l = 100$ mm taban uzunluğuna sahip bir üçgen açıklık olması durumunda grafen plakaların SE üzerindeki etkisi Şekil 8'de incelenmiştir. Şekil 8'de ön yüzeyinde üçgen açıklık bulunan ekranlama kutusunun iç yüzeylerinden birindeki grafen plaka çıkarılıp diğer yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olarak bırakılmıştır. Tablo 3'te belirli frekanslarda elde edilen SE değerleri verilmiştir.

**Şekil 8:**

Bir yüzey hariç kutu iç yüzeylerini grafen plakayla kaplamanın SE'ye etkisi (üçgen açıklık)

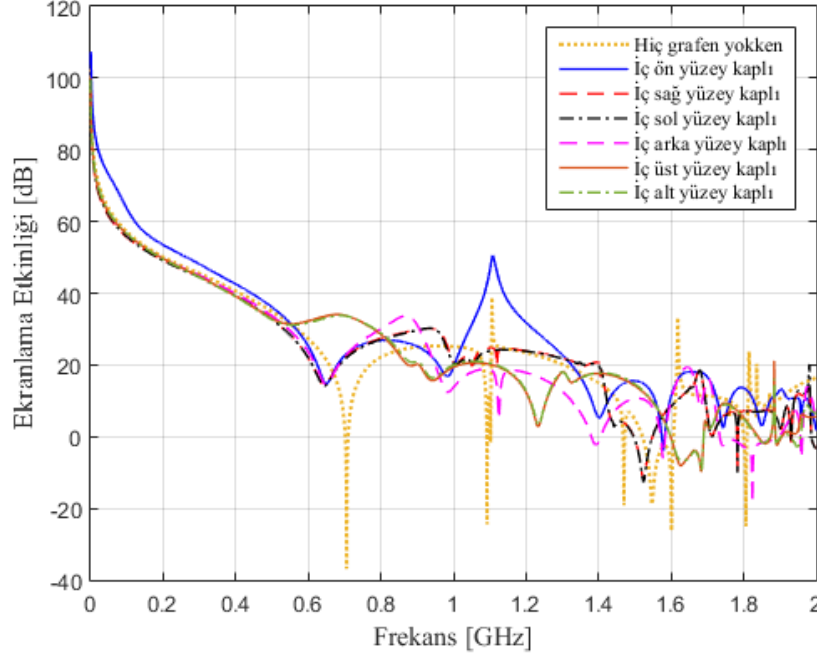
Tablo 3. Bir yüzey hariç grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (üçgen açıklık)

İşlem Tanımı	SE (dB) 300 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 900 MHz	SE (dB) 1,2 GHz	SE (dB) 1,5 GHz	SE (dB) 1,8 GHz
Hiç grafen yokken	45,52	27,29	24,98	23,41	4,78	0,06
Komple grafen var	43,74	39,81	45,93	36,58	25,70	18,15
Ön yüzey hariç	42,46	37,62	42,31	27,38	8,72	11,61
Sağ yüzey hariç	44,47	38,86	47,20	35,48	21,33	16,74
Sol yüzey hariç	44,39	38,80	46,08	35,50	21,92	14,66
Arka yüzey hariç	43,69	38,35	42,55	36,20	24,83	9,60
Üst yüzey hariç	43,86	36,42	28,62	28,16	22,23	16,33
Alt yüzey hariç	43,84	35,91	27,74	27,81	23,26	16,13

Elde edilen sonuçlara göre iç sağ yüzey hariç ile iç sol yüzey hariç durumlarında SE değerleri neredeyse aynıdır. Aralarındaki fark 1-2 dB olarak hesaplanmıştır. İç arka yüzey hariç durumunda 1,3 GHz'e kadar yakın sonuçlar elde edilmiştir; fakat 1,3 GHz sonrasında 10 dB'ye kadar çıkan azalmalar görülmektedir. İç üst yüzey hariç ve iç alt yüzey hariç durumları için elde edilen SE değerleri de birbirleriyle uyumludur; fakat önceki üç sonuca kıyasla 0,6 GHz'ten itibaren SE değerlerinde 20 dB'ye çıkan azalmalar görülmektedir. Bu durum, h üçgen yüksekliğinden kaynaklı olarak frekans arttıkça kutu içerisine daha çok EMI girmesinden kaynaklanmaktadır. En kötü sonuç ise iç ön yüzeydeki grafen plakanın kaldırıldığı durumda

elde edilmiştir. İç yüzeylerin komple grafen plakalarla kaplı olduğu duruma göre 1,2-2 GHz aralığında SE üzerinde 22 dB'ye çıkan azalmalar elde edilmiştir.

Grafen plakalarla ilgili yapılan son incelemede ise ön yüzeyinde üçgen açıklık bulunan ekranlama kutusunun iç yüzeylerinden sadece birini grafen plakayla kaplayarak SE üzerindeki değişim incelenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9:

Kutu iç yüzeylerinden birini grafen plakayla kaplamanın SE'ye etkisi (üçgen açıklık)

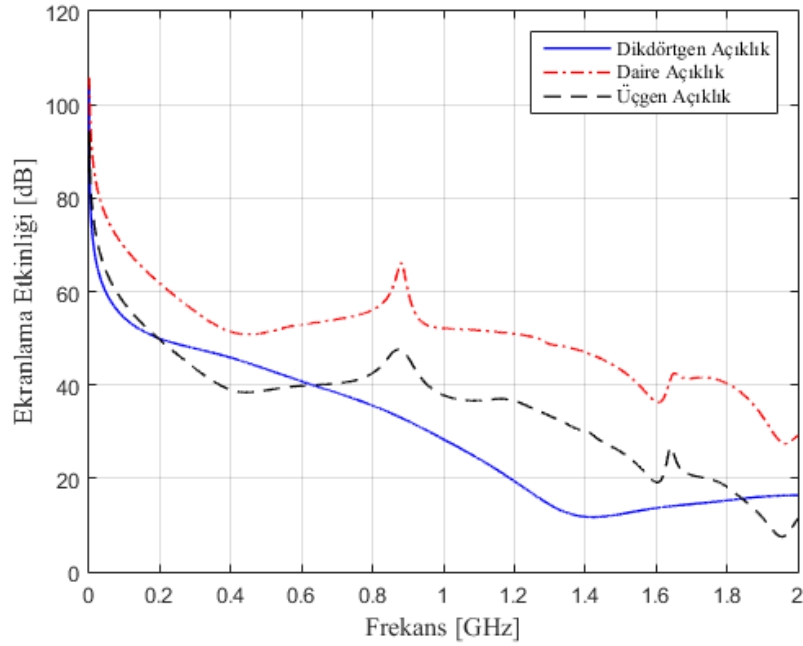
Şekil 9'dan elde edilen sonuçlara göre kutu üzerindeki açıklık ön yüzeyde yer aldığından, iç ön yüzeyin grafen plakayla kaplanması Şekil 7'deki sonuçlarla uyumlu olarak SE'yi en iyi iyileştiren adım olmuştur. Kutu iç üst veya alt yüzeyinin grafen plakayla kaplanması birbirine yakın sonuçlar vermiş olup, iç ön yüzeyin kaplanmasından sonra ikinci SE iyileştirme adımı olarak uygulanabilir. Kutu iç sağ veya sol yüzeyinin grafen plakayla kaplanması ise özellikle 0,8-1,4 GHz aralığında iç üst veya alt yüzeyin grafen plakayla kaplanmasına göre SE üzerinde daha çok iyileştirme sağlamıştır. İç arka yüzeyin grafen plakayla kaplanmasından daha iyi sonuç verdiği için üçüncü iyileştirme adımı olarak uygulanabilir. Tablo 4'te ekranlama kutusu iç yüzeylerinden sadece birinin grafen plaka ile kaplanması ve SE'ye etkisi belirli frekanslar için hesaplanmıştır.

Tablo 4. Bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (üçgen açıklık)

İşlem Tanımı	SE (dB) 300 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 900 MHz	SE (dB) 1,2 GHz	SE (dB) 1,5 GHz	SE (dB) 1,8 GHz
Hiç grafen yokken	45,52	27,29	24,98	23,41	4,78	0,06
İç ön yüzey kaplı	48,15	25,22	25,15	31,81	15,56	13,56
İç sağ yüzey kaplı	44,50	21,94	29,76	23,94	-0,85	7,17
İç sol yüzey kaplı	44,43	21,89	29,65	23,81	-0,97	6,85
İç arka yüzey kaplı	44,99	23,58	31,11	17,81	10,59	-2,79
İç üst yüzey kaplı	44,68	32,26	20,26	12,37	14,18	5,31
İç alt yüzey kaplı	44,48	31,77	20,93	12,80	14,63	4,97

Şekil 8 ve Şekil 9'dan elde edilen sonuçlardan biri de önceki sonuçlarla uyumu olarak grafen plakanın iç yüzeylere kaplanmasıyla keskin kutu rezonanslarının önemli ölçüde önlenmesidir. Kutu iç yüzeylerinden herhangi birinin grafen plaka ile kaplanması, ekranlama etkinliği üzerinde iyileşme sağlamaktadır.

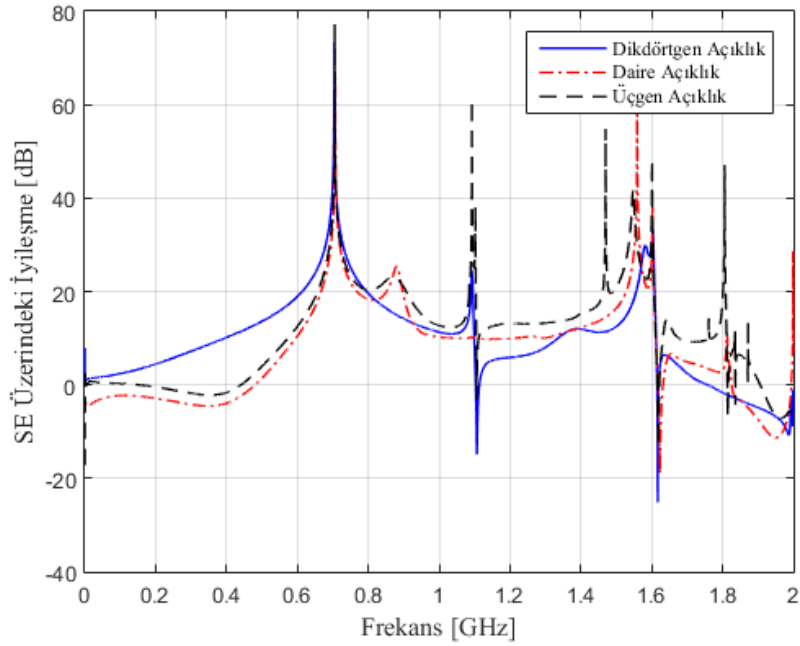
Ekranlama kutusu ve ön yüzeyindeki açıklık için EMC gerekliliklerini, belli bir tasarım aralığında sağlamak oldukça zordur. Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplandığı farklı konfigürasyonlardan elde edilen simülasyon sonuçları, kutu boyutlarını değiştirmeden SE'yi arttıracak bir çözüm sunmaktadır. İç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı, aynı boyutlara sahip; ama ön yüzeyindeki açıklık geometrileri farklı olan ekranlama kutuları için SE üzerindeki değişim Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10:
Grafen plaka kaplı kutuda farklı şekilde açıklık olması durumunda SE

Elde edilen sonuçlara göre ekranlama kutusunun ön yüzündeki açıklık geometrisinin değişimi, iç yüzeyleri grafen plaka kaplı olmayan kutular için Güler ve diğ. (2020) tarafından gerçekleştirilen SE analizleriyle uyumlu sonuçlar vermiş olup daire açıklık olması durumunda en büyük SE değerlerine erişilmiştir. En düşük SE değerleri ise ön yüzeyde dikdörtgen açıklık olması durumunda elde edilmiştir. Gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni pozitif dikey eksen boyunca polarize olduğundan açıklık uzunluğu artırıldığında daha büyük genlikli elektrik alan kutu içerisine nüfuz etmektedir. Aynı açıklık alanına sahip açıklıklar için daire açıklık olması durumunda açıklık uzunluğu daha küçük olduğundan en iyi SE değerleri daire açıklıkta gözlenmektedir.

Farklı açıklık geometrilerine sahip kutularda iç yüzeylerin grafen plakalarla kaplanmasının frekansa bağlı olarak SE üzerinde sağladığı iyileşmeler ise Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11:

İç yüzeylerin komple grafen plakalarla kaplanmasının SE'ye etkisi

Elde edilen sonuçlara göre kutuların iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanması, ortalama 10-15 dB arasında SE üzerinde iyileşmeler sağlamıştır. Bununla birlikte, ön yüzeyinde dikdörtgen açıklık bulunan kutu ile 0-0,8 GHz aralığında SE üzerinde en büyük iyileşme elde edilmiştir. Bu durum, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olmayan kutularda 0-0,8 GHz aralığı için en düşük SE değerlerinin dikdörtgen açıklık ile elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. İç yüzeylerin grafen plakalarla kaplanmasıyla birlikte dikdörtgen açıklığa sahip ekranlama kutusu ile 0,8 GHz'e kadar SE üzerinde fazla iyileşme sağlanmıştır. Daire ve üçgen şeklinde açıklıkları olan kutular için 1,2 GHz'e kadar SE üzerinde birbirine yakın iyileşmeler sağlanmıştır. 1,2 GHz'ten sonra ise ön yüzeyinde üçgen açıklık olan ve iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplanan ekranlama kutusunun ekranlama etkinliği daha çok artmıştır. Bu durum, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olmayan kutularda 1,2 GHz sonrasında en düşük SE değerlerinin üçgen açıklık olması durumunda elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. İç yüzeylerin grafen plakalarla kaplanmasıyla birlikte üçgen açıklığa sahip ekranlama kutusu için 1,2 GHz üzerinde daha fazla iyileşme sağlanmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir alüminyum ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklık şeklinin daire veya üçgen olması durumunda iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanmasının SE üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplı olması durumu çeşitli konfigürasyonlarla incelenmiştir. Kutu iç yüzeylerinden birindeki grafen plakayı çıkarıp diğer yüzeylerin grafen plakalarla kaplandığı konfigürasyonda, en iyi SE iyileştirmeleri iç sağ yüzey veya iç sol yüzeyde grafen plaka olmaması durumları için elde edilmiştir. SE için en düşük iyileştirme ise iç ön yüzeydeki grafen plakanın kaldırılması durumunda görülmüştür. Kutu iç yüzeylerinden sadece birinin grafen plakayla kaplandığı konfigürasyonda ise, açıklığın kutu ön yüzeyinde yer almasından dolayı iç ön yüzeyin grafen plakayla kaplanması SE'yi belirgin bir şekilde iyileştirmiştir. Kutu iç üst veya alt yüzeyinin grafen plakayla kaplanması birbirine yakın sonuçlar vermiş olup, iç ön yüzeyin kaplanmasından sonra ikinci SE iyileştirme adımı olarak uygulanabilir. Kutu iç sağ veya sol yüzeyinin grafen plakayla kaplanması ise iç arka yüzeyin grafen plakayla kaplanmasından daha iyi sonuç vermiş olup üçüncü iyileştirme adımı olarak değerlendirilebilir.

Farklı açıklık geometrilerine sahip kutular için iç yüzeylerin grafen plakalarla kaplanması, frekansa bağlı olarak SE üzerinde ortalama 10-15 dB arasında iyileşmeler sağlamıştır. Bununla birlikte, ön yüzeyde dikdörtgen açıklık olması durumunda 0-1,2 GHz aralığında SE üzerinde en büyük iyileşme elde edilmiştir. Bu durum, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olmayan kutularda en düşük SE değerlerinin dikdörtgen açıklık ile elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Daire ve üçgen açıklık olması durumlarında 1,2 GHz'e kadar SE üzerinde birbirine benzer iyileşme sağlanmıştır. 1,2 GHz'ten sonra ön yüzeyinde üçgen açıklık olan ekranlama kutusunun ekranlama etkinliği daha çok artmıştır. Bu durum, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olmayan kutularda 1,2 GHz sonrasında en düşük SE değerlerinin üçgen açıklık olması durumunda elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Sunay Güler ve Sibel Yenikaya çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetiminde; Sunay Güler veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların elde edilmesinde; Sibel Yenikaya sonuçların incelenmesi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesinde katkı sunmuşlardır. Çalışmanın son onay ve tam sorumluluğunu tüm yazarlar üstlenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje kodu: FGA-2021-307) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Altun, M. ve diğ. (2017) A study on EMI shielding effectiveness of graphene based structure. *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*. IEEE, Malatya. doi: 10.1109/IDAP.2017.8090166
2. Bozzi, M. ve diğ. (2015) Application of graphene at microwave frequencies. *Radioengineering*, 24(3): 661-669. doi: 10.13164/re.2015.0661
3. Chen, J. ve diğ. (2018) 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. doi: 10.1109/TEMC.2016.2621884
4. Chen, J. ve Wang, J. (2007) A three-dimensional semi-implicit FDTD scheme for calculation of shielding effectiveness of enclosure with thin slots. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49(2): 354-360. doi: 10.1109/TEMC.2007.893329
5. Cruciani, S. ve diğ. (2015) Prediction of shielding effectiveness in graphene enclosures by FEM-INBC method. T. Wu ve diğ. (Ed.), *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, Taipei. 376-379. doi: 10.1109/APEMC.2015.7175374
6. D'Aloia, A.G. ve diğ. (2018) Low-terahertz modeling of graphene/dielectric multilayers using an equivalent single layer in reverberation environment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(4): 849-857. doi: 10.1109/TEMC.2017.2750112
7. D'Aloia, A.G. ve diğ. (2015) 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. doi: 10.1109/TTHZ.2015.2440100
8. Dassault Systemes Simulia (2019) CST Studio Suite (Sürüm: 2019 Research Base Pack). Tedarik edilebileceği adres: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
9. Dejband, E. ve diğ. (2017) Tunable electromagnetic interference shield using periodic graphene-based structures in the terahertz regime. *International Conference on Circuits, Devices and Systems (ICCDs)*. IEEE, Chengdu. 34-37. doi: 10.1109/ICCDs.2017.8120446
10. Electric surge: Carmakers' electric car plans across Europe 2019-2025. (2019). Erişim adresi: <https://www.transportenvironment.org/publications/electric-surge-carmakers-electric-car-plans-across-europe-2019-2025>
11. Geim, A.K. ve Novoselov, K.S. (2007) The rise of graphene. *Nature Materials*, 6: 183-191. doi: 10.1038/nmat1849
12. Güler, S. ve diğ. (2020). Elektronik ekipman koruyucu kutusunun ekranlama etkinliği analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(3): 1445-1458. doi: 10.17482/uumfd.749570
13. Güler, S. ve diğ. (2019) EMC Design for Battery Electric Vehicle (BEV) Propulsion System, *11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, IEEE, Bursa. 286-289. doi:10.23919/ELECO47770.2019.8990410
14. Güler, S. ve Yenikaya, S. (2021a). 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. doi: 10.3906/elk-2005-113

15. Güler, S. ve Yenikaya, S. (2021b) Analysing the shielding effectiveness of graphene sheet coated rectangular enclosure. *Electromagnetics*, 41(7): 469-485. doi: 10.1080/02726343.2021.2012938
16. Ilgar, T. ve diğ. (2015) Shielding effectiveness for metallic enclosures with various aperture shapes. *1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC)*. Las Palmas, Spain: IEEE. doi: 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7303047
17. Matallana ve diğ. (2019) Power module Electronics in HEV/EV applications: New trends in wide-bandgap semiconductor technologies and design aspects, *Renewable and sustainable energy reviews*, 113(1), 109264.
18. Mathworks Software (2019) Matlab (Sürüm: R2019b). Tedarik edilebileceği adres: <http://www.figes.com.tr/>
19. Sevgi, L. (2019). Tasarımdan piyasaya elektromanyetik uyumluluk. İstanbul: İstanbul Okan Üniversitesi.
20. Zhang, B. ve diğ. (2018) Equivalent resonant circuit modeling of a graphene-based bowtie antenna. *Electronics*, 7(11): 285. doi: 10.3390/electronics7110285

