



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GRAFEN TABANLI
ELEKTROMANYETİK EKLAN MODELLENMESİ**

Sunay GÜLER



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GRAFEN TABANLI ELEKTROMANYETİK
EKKRAN MODELLENMESİ**

Sunay GÜLER
0000-0003-3851-3357

Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GRAFEN TABANLI ELEKTROMANYETİK EKKRAN MODELLENMESİ

Sunay GÜLER

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA

Araç içi elektroniğinin artışına ilave olarak, elektrikli tahrik sistemlerinin geleneksel araç elektroniği mimarisine dahil edilmesi, elektromanyetik uyumluluk (EMC) konusunu elektrikli araç tasarımı sırasındaki önemli konulardan biri haline getirmiştir. Elektromanyetik ekranlama, elektronik devreleri harici elektromanyetik girişime (EMI) karşı korumak için kullanılan zorunlu önlemlerden biridir. Bununla birlikte, ekranlama kutularındaki açıklıklar elektronik devrelere etki edecek şekilde EMI sızıntısına izin vererek ekranlama etkinliğini (SE) düşürürler. Elektrikli araçlarda 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 optimizasyonu ve / veya kutu malzemesinin değiştirilmesi gibi çalışmalar gerekmektedir.

Bu çalışmada, ekranlama kutusunun iç yüzeylerinin grafen plakalar ile kaplandığı bir nümerik model tasarlanmıştır. Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplı olması durumu, tek bir yüzeyin grafen plaka ile kaplı olması veya bir yüzey hariç diğer yüzeylerin grafen plakalarla kaplı olması gibi çeşitli konfigürasyonlarda incelenmiştir. Farklı açıklık geometrilerine sahip kutular içindeki her bir yüzeyin grafen plakayla kaplanmasının etkisi analiz edilmiştir. Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanmasının SE'yi iyileştirdiği ve ayrıca keskin kutu rezonanslarını azalttığı görülmüştür. Ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklık boyutlarını değiştirerek SE'yi iyileştiren bir genetik algoritma (GA) tasarlanmıştır. Dikdörtgen açıklık boyutlarının GA ile belirlendiği bir kutuda iç yüzeylerin grafen plakalarla kaplanmasıyla elde edilen SE simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, evirici, elektromanyetik uyumluluk, elektromanyetik ekranlama, ekranlama etkinliği, grafen, genetik algoritma

2022, x + 124 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

GRAPHENE BASED ELECTROMAGNETIC SHIELDING MODELING FOR ELECTRIC VEHICLES

Sunay GÜLER

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Sibel YENİKAYA

In addition to the increase of in-vehicle electronics, incorporating electric propulsion system into conventional vehicle electronic architecture makes electromagnetic compatibility (EMC) become one of the most important issues during electric vehicle design. Electromagnetic shielding is one of the compulsory preventions to protect electronic circuits against electromagnetic interference (EMI). However, apertures of the shielding enclosure attenuate shielding effectiveness (SE) by permitting EMI leakage to affect the electronic circuits. When the dimensions of shielding enclosure remain fixed and the aperture is to have a particular area, studies such as optimization of the aperture dimensions and / or changing the enclosure's material are required in order to fulfill EMC requirements and increase SE to desired levels.

In this study, a numerical model in which inner surfaces of the enclosure are coated with graphene sheets, is designed. Coating inner surfaces of the enclosure with graphene sheets is investigated for various coating configurations such as coating a single surface with graphene sheet or coating all inner surfaces with graphene sheets except one. The effect of coating each surface with graphene sheet in the enclosures with different aperture shapes is analyzed. It is observed that coating inner surfaces of the enclosure with graphene sheets improves SE and also reduces sharp resonances. A genetic algorithm (GA) is designed, which improves SE by changing aperture dimensions on the front surface of the shielding enclosure. SE simulation results obtained by coating inner surfaces with graphene sheets in an enclosure in which the rectangular aperture dimensions are determined by GA, are compared with measurement results. It is observed that simulation results are in good agreement with measurement results.

Key words: Electric vehicles, inverter, electromagnetic compatibility, electromagnetic shielding, shielding effectiveness, graphene, genetic algorithm

2022, x + 124 pages.

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce sevgili aileme; eşim, babam, annem ve kardeşime çok teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde çok büyük emek, fedakarlık göstermiş olan canım anneme ve babama, hayatım boyunca verdikleri destek ve cesaretlendirmelerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi, minnetlerimi sunarım. Bugün olduğum kişi olabilmemde, hayallerimin ve hedeflerimin peşinden gitmemde rolleri kelimelerin ötesinde. Canım kardeşime, hayat boyu sağladığı kardeşlik, arkadaşlık ve fedakarlığı için teşekkürlerimi sunarım. Her daim desteğini, anlayışını, sabrını esirgemeyerek bana güç veren sevgili eşim, yol arkadaşım Yeşim GÜLER'e sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Bu çalışma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA'ya, bilimsel anlamda kendimi geliştirmemde sağladığı desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Doktora eğitimim boyunca değerli vakitlerini ayırıp her daim sağladıkları destek ve yönlendirmelerinden dolayı değerli hocam Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a ve eğitim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

İş hayatındaki çalışmalarına elektrikli araçlar alanında devam etmeme vesile olan, bu alanda her daim desteğini ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Mustafa ŞİMŞEK'e, bu çalışmadaki katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmaları kapsamında konferanslara katılım ve yayın konularında sağladığı finansal destekten dolayı TOFAŞ Arge Merkezi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, son yıllarda popülerliği gittikçe artan ve geleceğin karayolu taşımacılığında önemli bir yer sahibi olacak olan elektrikli araçlar için grafen tabanlı elektromanyetik ekran modellenmesi ile ilgilidir. Bu çalışma ile, ekranlama kutusu boyutlarının sabit kaldığı ve üzerindeki açıklığın belli bir alana sahip olması gerektiği durumda, ekranlama etkinliğini artıracak çözüm yollarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Tez danışmanım tarafından yürütülen ve benim de araştırmacı olarak yer aldığım (*BAP proje kodu: FGA-2021-307*) proje kapsamında çalışmalarımıza maddi destek sağlayan üniversiteme teşekkürlerimi sunarım.

Sunay GÜLER
25/01/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	14
3.1. Elektrikli Araçlarda Elektromanyetik Uyumluluk (EMC).....	14
3.2. Ekranlama.....	16
3.3. Problemin Tanımlanması.....	17
3.4. Maxwell Denklemleri.....	19
3.4.1. Malzeme özellikleri.....	20
3.4.2. Kayıplı ortamda düzlem dalgalar.....	24
3.5. SE Formülasyonu.....	26
3.5.1. Soğrulma kayıpları.....	27
3.5.2. Yansıma kayıpları.....	28
3.5.3. Ardışık yansıma kayıpları.....	29
3.5.4. Tek katlı ekran.....	30
3.5.5. Çok katlı ekran.....	31
3.6. Saçılma Parametreleri ile SE Formülasyonu.....	33
3.7. Grafen Plakanın Modellenmesi ve SE Formülasyonu.....	35
3.7.1. Grafen ve özellikleri.....	35
3.7.2. Grafen plakanın modellenmesi.....	36
3.7.3. Grafen plaka kaplı alüminyum levhanın modellenmesi.....	45
3.8. Ekranlama Kutuları için Analitik SE Formülasyonu.....	48
3.8.1. İletim hattı teorisi yaklaşımı.....	49
3.8.2. Ekranlama etkinliği formülasyonu.....	51
3.9. Ekranlama Kutuları için Nümerik SE Modeli.....	53
3.9.1. Farklı açıklık şekillerinin modele eklenmesi.....	54
3.9.2. Grafen plaka kaplı ekranlama kutusunun modellenmesi.....	55
3.10. Sezgisel Algoritmalar.....	56
3.11. Genetik Algoritma ile Açıklık Boyutlarını Belirleme.....	57
3.11.1. Problemin genetik olarak kodlanması.....	60
3.11.2. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması.....	62
3.11.3. Uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi.....	63
3.11.4. Seçim.....	64
3.11.5. Çaprazlama.....	65
3.11.6. Mutasyon.....	66
3.11.7. Döngünün durdurulması.....	67
3.11.8. Tasarlanan GA için akış şeması.....	68
3.11.9. GA'nın ekranlama kutularına uygulanması.....	69
3.12. SE Ölçümleri.....	70
3.12.1. Prototip kutu tasarımı.....	70
3.12.2. Ölçüm düzeneği.....	71

4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	74
4.1. Analitik Yöntem ile SE Bulguları.....	74
4.2. Nümerik Model ile SE Bulguları.....	76
4.2.1. Farklı açıklık şekillerinin SE'ye etkisi.....	78
4.2.2. Grafen plakaların SE'ye etkisi.....	80
4.2.3. Grafen kimyasal potansiyelinin SE'ye etkisi.....	94
4.3. Genetik Algoritma ile SE Bulguları.....	96
4.3.1. Tasarlanan GA ile açıklık boyutlarının belirlenmesi.....	96
4.3.2. GA ile açıklık boyutları belirlenen kutunun grafen plakalarla kaplanması.....	99
4.4. Ölçümler ile SE Bulguları.....	101
5. SONUÇ.....	104
KAYNAKLAR.....	108
EKLER.....	116
EK 1 Grafen İletkenliği MATLAB Kodları.....	117
EK 2 Yansıma Kaybı Hesaplaması için MATLAB Kodları.....	118
EK 3 GA için MATLAB Kodları.....	119
EK 4 GA Yineleme Adımları Sırasında SE Değişimleri.....	121
EK 5 SE Ölçümlerinde Kullanılan Antenler.....	123

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
\vec{B}	Manyetik akı yoğunluğu [Wb/m ²]
c	Işık hızı [m/s]
c_i	i. kromozoma ilişkin birikimli olasılık değeri
\vec{D}	Elektriksel akı yoğunluğu [C/m ²]
\vec{E}	Elektrik alan şiddeti [V/m]
\vec{E}_0	Gelen elektrik alan şiddeti [V/m]
\vec{E}_r	Hat sonundaki alan şiddeti [V/m]
f	Frekans [Hz]
f_i	i. kromozomun uygunluk değeri
f_{mnp}	Ekranlama kutusu rezonans frekansı [Hz]
\vec{H}	Manyetik alan şiddeti [A/m]
\vec{H}_0	Gelen manyetik alan şiddeti [A/m]
i_p	P noktasındaki akım [A]
k_0	Serbest uzayın dalga sayısı [rad/m]
k_g	Yayılm sabiti
l	Açıklığın boyu [mm]
\vec{J}	Akım yoğunluğu [A/m ²]
\vec{M}	Manyetik kutuplanma vektörü [A/m]
\vec{P}	Elektriksel polarizasyon vektörü [C/m ²]
P_i	i. kromozoma ilişkin olasılık değeri
r	Kaynaktan itibaren ölçülen mesafe [m]
SE_A	Soğrulma kaybı [dB]
SE_R	Yansıma kaybı [dB]
t	Kalınlık [mm]
V_0	Kaynak gerilimi [V]
$V_{1,2}$	Eşdeğer gerilim [V]
V_P	P noktasındaki gerilim [V]
w	Açıklığın genişliği [mm]
X_e	Elektrik hassasiyeti
X_m	Manyetik hassasiyeti
Z_0	Kaynak empedansı [Ω]
Z_{ap}	Açıklık empedansı [Ω]
δ	Deri kalınlığı [mm]
ε	Dielektrik sabiti [F/m]
ε_0	Serbest uzayın dielektrik geçirgenliği [F/m]
ε_r	Bağıl dielektrik geçirgenlik
λ	Dalga boyu [m]
λ_0	Serbest uzaydaki dalga boyu [m]
μ	Manyetik geçirgenlik sabiti [H/m]
μ_0	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği [H/m]

μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
η_0	Serbest uzayın dalga empedansı
σ	İletkenlik [S/m]
σ_{inter}	Grafenin bantlar arası geçiş katkısı [S/m]
σ_{intra}	Grafenin bant içi geçiş katkısı [S/m]
ω	Açısal frekans [rad/s]
$\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$	Kartezyen koordinatlar sisteminin birim vektörleri

Kısaltmalar Açıklama

ADAS	Gelişmiş sürücü destek sistemleri
AC	Alternatif akım
BEV	Bataryalı elektrikli araç
DC	Doğru akım
DGA	Diferansiyel gelişim algoritması
EMC	Elektromanyetik uyumluluk
EMI	Elektromanyetik girişim
EV	Elektrikli araç
FDTD	Zaman domeninde sonlu farklar yöntemi
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
FIT	Sonlu entegrasyon yöntemi
GA	Genetik algoritma
HV	Yüksek gerilim
HFSS	Yüksek frekanslı yapı simülatörü
IEC	Uluslararası elektroteknik komisyonu
IEEE	Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü
IGBT	Yalıtımlı kapı bipolar transistör
ISO	Uluslararası standartlar organizasyonu
MoM	Moment yöntemi
PCB	Baskı devre kartı
PHEV	Prize takılan hibrit elektrikli araç
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
SE	Ekranlama etkinliği
TLM	İletim hattı matris yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Elektrikli araçlardaki EMC problemleri	15
Şekil 3.2. Bir EV içindeki elektrikli tahrik sistemi ve evirici ekranlama kutusu.....	17
Şekil 3.3. Bir ekran duvarında iletilen ve yansıyan elektrik alanlar	28
Şekil 3.4. İki katlı ekran yapısı	32
Şekil 3.5. İki kapılı mikrodalga devresi	33
Şekil 3.6. Grafenin diğer malzemeler ile kıyaslanması.....	36
Şekil 3.7. Grafen plaka.....	36
Şekil 3.8. a) Grafen konfigürasyonu b) Grafen eşdeğer devresi	38
Şekil 3.9. Grafenin bant içi ve bantlar arası geçiş katkıları	39
Şekil 3.10. Bir grafen tabakasına gelen düzlem dalga	40
Şekil 3.11. Grafen eşdeğer devre modeli	42
Şekil 3.12. Gauss darbesi uyarma sinyali	44
Şekil 3.13. 0,335 nm kalınlığında grafen tabakanın ekranlama etkinliği.....	44
Şekil 3.14. Grafen plaka kaplı alüminyum levha.....	46
Şekil 3.15. Grafen plakanın yansıma kaybı üzerindeki etkisi.....	48
Şekil 3.16. Üzerinde açıklık bulunan ekranlama kutusu.....	50
Şekil 3.17. Üzerinde açıklık bulunan ekranlama kutusunun eşdeğer devresi	50
Şekil 3.18. Nümerik model ve TE uyarımda uygulanan düzlem dalga	54
Şekil 3.19. 1000 mm ² 'lik açıklığın farklı geometrilerde olması.....	55
Şekil 3.20. Modelde kullanılan açıklık şekilleri a) Dikdörtgen b) Daire c) Üçgen	55
Şekil 3.21. İçi grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun kesit görüntüsü	56
Şekil 3.22. GA popülasyon yapısı.....	58
Şekil 3.23. GA işlem basamakları.....	59
Şekil 3.24. Problem için örnek kromozom kodlaması ve GA blok diyagramı	61
Şekil 3.25. Popülasyondaki kromozomların özgülük oranı	63
Şekil 3.26. Rulet çarkı seçim olasılığı.....	64
Şekil 3.27. Tek noktalı çaprazlama	66
Şekil 3.28. Mutasyon operatörünün tek gene uygulanması	66
Şekil 3.29. SE'yi başlangıç durumuna göre artıran açıklık boyutları için GA	68
Şekil 3.30. a) Siemens NX programındaki tasarım b) Prototip ekranlama kutusu	71
Şekil 3.31. Ölçüm düzeneği blok diyagramı	72
Şekil 3.32. Ölçüm düzeneği kurulumu ve ekipmanları.....	73
Şekil 4.1. Açıklık boyutunun SE'ye etkisi (kutu boyutu: 300x160x310 mm).....	74
Şekil 4.2. Kutu boyutunun SE'ye etkisi (açıklık boyutu: $l=100$ mm, $w=10$ mm)	75
Şekil 4.3. 80x80 mm ² bir alanda birden fazla açıklık olması durumu	76
Şekil 4.4. Analitik model ile nümerik modelin karşılaştırılması	77
Şekil 4.5. Aynı açıklık alanına sahip (1000 mm ²) farklı açıklık geometrileri için SE....	78
Şekil 4.6. Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanmasının SE'ye etkisi.....	81
Şekil 4.7. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (dikdörtgen açıklık)	82
Şekil 4.8. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (dikdörtgen açıklık)	84
Şekil 4.9. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (daire açıklık).....	86
Şekil 4.10. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (daire açıklık).....	88
Şekil 4.11. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (üçgen açıklık).....	89
Şekil 4.12. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (üçgen açıklık)	91
Şekil 4.13. Grafen plaka kaplı kutuda farklı şekilde açıklık olması durumunda SE	93
Şekil 4.14. İç yüzeylerin komple grafen plakalarla kaplanmasının SE'ye etkisi.....	94

Şekil 4.15. Grafen kimyasal potansiyelinin SE'ye etkisi.....	95
Şekil 4.16. K1 kutusuna GA uygulanması sonucu elde edilen SE	97
Şekil 4.17. GA yineleme adımları sırasında SE üzerindeki değişim	97
Şekil 4.18. GA yineleme adımları sırasında açıklık boyutlarındaki değişim.....	98
Şekil 4.19. GA yineleme adımları sırasında açıklık alanındaki değişim	98
Şekil 4.20. GA yineleme adımları sırasında açıklık boyutlarındaki değişim.....	99
Şekil 4.21. GA yineleme adımları sırasında açıklık alanındaki değişim	100
Şekil 4.22. GA ve grafen plakaların K2 kutusunun SE değerine etkisi	101
Şekil 4.23. K2+Grafen plaka için simülasyon ve ölçüm sonuçları	102
Şekil 4.24. K2+GA+Grafen plaka için simülasyon ve ölçüm sonuçları	103
Ek Şekil 1.1. Grafen iletkenliği için sabitlerin tanımlanması	117
Ek Şekil 1.2. Grafen iletkenliğinin frekansa bağlı olarak elde edilmesi.....	117
Ek Şekil 1.3. Grafenin bant içi ve bantlar arası geçiş katkıları (0-2 GHz)	117
Ek Şekil 2.1. Tek katlı alüminyum levhanın yansıma kaybı hesabı	118
Ek Şekil 2.2. İki katlı ekran yapısı için sabitlerin tanımlanması.....	118
Ek Şekil 2.3. İki katlı ekran yapısının yansıma kaybı hesabı.....	118
Ek Şekil 3.1. SE analitik hesaplama fonksiyonu.....	119
Ek Şekil 3.2. GA için sabitlerin tanımlanması.....	119
Ek Şekil 3.3. GA için popülasyonun oluşturulması	119
Ek Şekil 3.4. GA doğal seçim operatörü.....	119
Ek Şekil 3.5. GA çaprazlama operatörü.....	120
Ek Şekil 3.6. GA mutasyon operatörü	120
Ek Şekil 5.1. IEEE 299 standardında SE ölçüm düzeneği.....	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Malzeme iletkenliği	16
Çizelge 3.2. EV'lerdeki evirici ekranlama kutuları	18
Çizelge 3.3. Grafen plakanın teknik özellikleri	37
Çizelge 3.4. Açıklık boyutlarının GA ile belirlenmesinde kullanılan kutular	70
Çizelge 3.5. Prototip kutu ölçüleri	70
Çizelge 4.1. Açıklık geometrisinin SE'ye etkisi (0-900 MHz).....	79
Çizelge 4.2. Açıklık geometrisinin SE'ye etkisi (1-2 GHz).....	79
Çizelge 4.3. Rezonans hesaplamaları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması	80
Çizelge 4.4. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (dikdörtgen açıklık)	83
Çizelge 4.5. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (dikdörtgen açıklık)	85
Çizelge 4.6. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (daire açıklık).....	87
Çizelge 4.7. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (daire açıklık).....	88
Çizelge 4.8. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (üçgen açıklık).....	90
Çizelge 4.9. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (üçgen açıklık).....	92
Çizelge 4.10. K1 kutusuna GA uygulanması sonucu SE üzerindeki değişim	96
Çizelge 4.11. Belirli frekanslar için K2 kutusunun SE değerindeki değişimler	101
Ek Çizelge 4.1. GA yineleme adımları sırasında K1 kutusunun SE değerisi	121
Ek Çizelge 4.2. GA yineleme adımları sırasında K2 kutusunun SE değerisi	122
Ek Çizelge 5.1. IEEE 299 standart ölçüm frekansları ve kullanılan antenler	123
Ek Çizelge 5.2. Ölçümlerde kullanılan antenler ve modelleri	123
Ek Çizelge 5.3. N tipi pin anten özellikleri	124

1. GİRİŞ

Araçların CO₂ salınımını sınırlayan katı küresel düzenlemeler nedeniyle mevcut karayolu taşımacılığı ve altyapısı önemli ölçüde yeni bir döneme girmiştir. Mevcut eğilimler, gelecekteki karayolu ulaşımının çoğunlukla elektrikli araçlara (EV) dayalı olacağını göstermektedir. EV, sadece elektrik makinelerinden oluşan elektrikli tahrik sistemine sahip olabileceği gibi, bir içten yanmalı motoru bir elektrik makinesiyle birleştiren hibrit elektrikli araç da olabilmektedir (Güler, Yenikaya ve Şimşek, 2019; Quing-yu, Xiaodong, Lei ve Xi, 2007). Araçlardaki elektrik-elektronik ekipman sayıları, son yirmi yılda genellikle ilgili fonksiyonların ve gelişmiş sürücü destek sistemlerinin (ADAS) araçlara dahil edilmesi nedeniyle hızla artmıştır. Araç içi elektroniğinin gelişimine ve artışına ek olarak, yüksek gerilimlerle çalışan elektrikli tahrik sistemlerinin geleneksel araç elektroniği mimarisine dahil edilmesi, elektromanyetik uyumluluk (EMC) konusunu EV tasarımı sırasında önemli konulardan biri haline getirmiştir. Elektrikli tahrik sistemleri temelde en az bir elektrik makinesi, yüksek gerilimli (HV) batarya, evirici ve DC / DC çevirici gibi güç elektroniği ekipmanlarından oluşmaktadır. Evirici, düşük gerilimle çalışan mikrodenetleyici ünitesini ve HV batarya ile beslenen transistörleri aynı elektromanyetik ekranlama kutusu içinde barındırmaktadır. Bu yüzden, önemli elektromanyetik girişim (EMI) kaynaklarından biri ve ayrıca potansiyel EMI kurbanıdır.

Elektromanyetik ekranlama, elektrik-elektronik devreleri harici EMI'ye karşı korumak ve bu devrelerde oluşan elektromanyetik gürültünün çevreye yayılmasını engellemek için kullanılan zorunlu önlemlerden biridir. İdeal olarak, elektronik ekipmanların EMI'ye karşı tam koruma sağlayabilmesi, üzerinde herhangi bir açıklık bulunmayan ve yüksek iletkenlikte bir malzemeden oluşan ekranlama kutusuna yerleştirilmesiyle mümkündür. Bununla birlikte, ekranlama kutularında güç kabloları, havalandırma deliği, haberleşme kabloları, konnektör montajı vb. sebeplerden dolayı açıklıklara ihtiyaç vardır. Bu açıklıklar, farklı şekil ve boyutlara sahip olup elektronik devrelere etki edecek şekilde EMI sızıntısına izin vererek ekranlama kutularının performansını düşürür. Bir elektromanyetik ekranlama kutusunun performansı, genellikle kutunun varlığında ve yokluğunda ölçülen elektrik veya manyetik alan büyüklüklerinin birbirine oranı olarak tanımlanan ekranlama etkinliği (SE) ile ifade edilir. Elektronik ekipmanların

performansına etki eden çevresel elektromanyetik girişimlerden korunması için ekranlama kutularının SE analizleri yapılarak tasarlanması gerekmektedir.

SE analizi ile ilgili hem analitik hem de nümerik çözümler sunan birçok çalışma mevcuttur. Fiziksel yapı basit olduğu sürece bu tür problemlerin analitik yöntemler ile çözümü mümkünken, fiziksel yapı karmaşıklıktıkça EMC problemlerini çözmeye nümerik yöntemlere olan ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Yazılım ve bilgisayar sektöründeki hızlı ilerleme, EMC problemlerinin nümerik yöntemlerle modellenerek çözümlenebilmesine olanak sağlamıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), zaman domeni sonlu farklar yöntemi (FDTD), iletim hattı matrisi yöntemi (TLM) ve moment yöntemi (MoM) en çok kullanılan ve üzerinde yoğun çalışmaların devam ettiği yöntemlerdir (Güler, 2007).

EV'lerde kullanılan elektronik ekipmanların ekranlama kutuları, EMC gerekliliklerini sağlayacak ve de minimum yer kaplayacak şekilde tasarlanmaktadır. Aksi durumda tedarikçi firmalardan temin edilen ekranlama kutularının ilave yer ihtiyacı sebebiyle araç geometrisinin değiştirilmesine kadar gidebilecek çalışmalar gerekmektedir. Bu yüzden, ana sanayi firmaları kutu tasarımlarının belli boyutlarda kalmasını talep etmektedir. Dolayısıyla, EV'lerdeki elektronik ekipmanların ekranlama kutuları için SE analizlerinin yapılması ve ekranlama kutusu üzerindeki açıklıkların EMC gerekliliklerini sağlayacak şekilde tasarlanması oldukça önemlidir. Tez çalışmasında, kutu boyutlarının sabit kaldığı ve üzerindeki açıklığın konektör montajı için belli bir alana sahip olması gerektiği durumda, ekranlama etkinliğini artırabilecek çözüm yollarının üretilmesi amaçlanmaktadır. Ana sanayi firmalarından gelen ekranlama kutusu boyutlarındaki kısıtlamalar, EMC gerekliliklerinin sağlanabilmesi ve SE'nin istenilen seviyelere çıkarılabilmesi için mevcut açıklığın optimizasyonu ve / veya kutu malzemesinin değiştirilmesi gibi çalışmalar gerektirmektedir.

Yapay zeka araştırmalarının önemli bir dalı olan genetik algoritma (GA), bilgisayar bilimi, makine öğrenimi ve yapay sinir ağlarında optimizasyon çalışmaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. GA, doğal seçim ve genetik mekanizmaya benzeyen, en güçlü olanın hayatta kalması fikrine dayanan ve rastlantısal arama tekniklerini kullanan bir

yapıdadır. GA, büyük ölçekli problemleri verimli bir şekilde çözmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Deterministik algoritmalar ise en uygun çözüme erişmek için daha uzun hesaplama süresine ihtiyaç duyar. Problemin iç matematiksel denklemleriyle uğraşmadan çözümü araması nedeniyle GA'nın uygulanması nispeten basit olup, bu özelliği ile farklı problemlere kolayca adapte edilebilmektedir (Lan ve Lin, 2016). Bu tez çalışması ile elektrikli araçlardaki ekranlama kutularının üzerindeki açıklık boyutlarını, GA ile belirleyerek SE'yi artırmak amaçlanmıştır.

Metaller, yüksek iletkenlikleri ve mekanik özellikleri nedeniyle uzun yıllardır ekranlama kutusu üretmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte ağır olmaları, işleme zorlukları, herhangi bir tasarım değişikliği için yüksek maliyetlerin oluşması gibi önemli dezavantajları vardır. Grafen ultra hafifliği, mükemmel mekanik esnekliği, güçlü yapısı ve iyi iletkenliği nedeniyle son on yılda birçok farklı alanda popüler bir malzeme haline gelmiştir. EV'lerdeki elektrik-elektronik ekipmanların ekranlama kutuları çoğunlukla alüminyum malzemedен üretilmektedir. Alüminyum ekranlama kutusu içerisinde, elektronik devrelerin performansını etkileyen keskin rezonanslar oluşabilmektedir. Bu çalışma ile, EV'lerdeki ekranlama kutularına ilişkin gerçek mekanik ve malzeme özellikleri kullanılıp, ekranlama kutusu iç yüzeylerine kaplanan grafen plakalar ile SE'yi artırmak amaçlanmıştır.

EV'lerde ileri teknoloji ekipmanlarının kullanılması, kablosuz haberleşme ve yüksek kalite veri haberleşmesi (Flexray, Ethernet) gereksinimlerinin artması, literatürde incelenen 0-1 GHz aralığındaki SE çalışmalarını daha geniş bantlara taşımayı gerektirmiştir. Tez çalışması kapsamında, CST Studio Suite® 2019 programında ekranlama kutusu nümerik modeli oluşturulmuş olup 0-2 GHz aralığındaki SE değişimleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen SE simülasyonlarından sonra, aynı kutu boyutları dikkate alınarak ekranlama kutusu prototipleri tasarlanmıştır. EMC test laboratuvarında yapılan SE ölçümleri ile nümerik modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde literatürde benzer konularda yapılan çalışmalar verilecektir. Tezin üçüncü bölümünde ele alınan ekranlama etkinliği problemine ilişkin

analitik formülasyonlar, oluşturulan ekranlama kutusu nümerik modeli, ekranlama kutusunun ön yüzündeki açıklığın boyutlarını belirleyerek SE'yi iyileştirmek için tasarlanan GA ve son olarak prototip ekranlama kutuları ile gerçekleştirilen ölçümler verilecektir. Tez sürecinde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler dördüncü bölüm olan bulgular ve tartışma kısmında incelenecektir. Beşinci bölümde ise yapılan çalışmalara ilişkin genel değerlendirmeler ve sonuçlar verilecektir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektromanyetik ekranlama, elektronik ekipman ve sistemleri çevresel EMI'den koruyan aynı zamanda çevreyi de bu ekipman ve sistemlerin yaydığı alan etkilerine karşı koruyan bir yapı olarak tanımlanmaktadır (Robinson ve diğerleri, 1998). Bu tip koruyucu yapıların tasarımında önemli bir parametre ise ekranlama etkinliğidir. Ekranlama etkinliği, bir noktada ekranlama yapısı yokken ölçülen alan (elektrik veya manyetik) büyüklüğünün, aynı nokta için ekranlama yapısı varken ölçülen alan büyüklüğüne oranı olarak ifade edilmektedir (Robinson ve diğerleri, 1998).

Literatürde, ekranlama etkinliği ile ilgili hem analitik hem de nümerik çözümler sunan birçok çalışma mevcuttur. Fiziksel yapı basit olduğu sürece bu tür problemlerin analitik yöntemler ile çözümü mümkünken, fiziksel yapı karmaşıktıkça, problemleri çözmeye nümerik yöntemlere olan ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Yazılım ve bilgisayar sektöründeki hızlı ilerleme, EMC problemlerinin nümerik yöntemlerle modellenerek çözümlenebilmesine olanak sağlamıştır. FEM, FDTD, MoM vb. nümerik yöntemler kullanılarak, tasarım aşamasındaki bir fiziksel sistem hakkında elektromanyetik analiz ve simülasyon yoluyla gerekli bilgilerin elde edilmesi mümkündür.

Robinson ve diğerleri (1998), üzerinde bir açıklık bulunan dikdörtgen ekranlama kutusunun ekranlama etkinliği için analitik bir formülasyon geliştirmişlerdir. Elektrik ve manyetik ekranlamanın, frekansın, kutu boyutlarının, açıklık boyut ve konumunun bir fonksiyonu olarak hesaplanabildiğini göstermişlerdir. Teorik hesaplamaların ölçümlerle uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Belokour, Lo Vetri ve Kashyap (2000), açıklıkların SE üzerinde etkilerini TLM ve FDTD yöntemlerini kullanarak 0,1-1 GHz frekans aralığında karşılaştırmışlardır. Açıklık sayısı ve rezonatöre çarpan elektromanyetik dalganın gelme açısının SE üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmanın, tasarım aşamasında SE tahminleri için yararlı olduğu gösterilmiştir.

Oktem ve Saka (2001), dairesel kesite sahip sonsuz uzunlukta çok katmanlı silindirik ekran tasarımını genetik algoritma yaklaşımına dayalı bir yöntem ile gerçekleştirmişlerdir. Eğik olarak gelen bir düzlem dalga durumunda, homojen katmanlardan oluşan silindirik bir ekranın SE hesaplaması için analitik bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemden yararlanılarak, çok katmanlı silindirik ekranların tasarımı sırasında belirli bir frekans bandı veya düzlem dalga geliş açısına bağlı olarak SE'yi elde etmek amacıyla GA uygulanmıştır.

Fan, Du, Gong ve Li (2003), ekranlama kutusu üzerindeki açıklığın uzunluğu ve genişliğine göre SE değişimini incelemek için FDTD yöntemini kullanmışlardır. Ekranlama etkinliğinin açıklık uzunluğu ve genişliğine göre değişimi analiz edilmiştir. Açıklığın uzunluğu değiştiğinde rezonansın meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Feng ve Shen (2005), FDTD ve MoM teknikleriyle hibrit bir yöntem oluşturarak, üzerinde açıklık bulunan dikdörtgen kutunun ekranlama etkinliğini hesaplamışlardır. Dikdörtgen bir açıklığa sahip ekranlama kutusu için hibrit bir teknikle SE elde edilmiş ve deneysel verilerle karşılaştırılarak sunulmuştur. Çalışmanın sonunda, kutu yüzeyindeki açıklık şekillerinin farklı olması ve dielektrik yüküne bağlı olarak uygulama alanının genişletilebileceği belirtilmiştir.

Jiao, Cui, Li ve Li (2006), SE analizinde FDTD yöntemini dahil etmek için bir alt hücre modeli oluşturmuşlardır. Bu model, üzerinde bir açıklık olan çok katmanlı ve ince duvarlı ekranlama kutusunun SE analizi için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, analitik sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, FDTD sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Dan, Yougang ve Yuanmao (2007), açıklık şekillerinin SE üzerindeki etkisini TLM ile hesaplayarak analiz etmişlerdir. Metal bir plakanın ekranlama etkinliğini analiz etmek için düzgün olmayan iletim hattının ağ parametre matrisi kullanılmıştır. Düzgün olmayan iletim hattının süreksizliği nedeniyle, plakalar arasındaki yansımadan bağımsız olarak çok katmanlı yapıları modellemeye uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Çift ve dört katmanlı yapılar için SE analizi yapılmış ve diğer analitik yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Ciccomancini Scogna, Antonini ve Orlandi (2007), CST Microwave Studio programında sonlu entegrasyon yöntemi (FIT) ile yakın alan ve uzak alan olarak hesapladıkları ekranlama etkinliğini, daha sonra yansız odada gerçekleştirdikleri ölçümlerle doğrulamışlardır.

Wang, Gao, Shen ve Ruan (2007), 0,1-1 GHz aralığında açıklık şekillerinin ve açıklık arası mesafenin SE üzerindeki etkisini TLM yöntemi ile analiz etmişlerdir. Metalik dikdörtgen bir kutu yüzeyindeki açıklık alanı aynı kalacak şekilde 1, 4 ve 8 adet açıklık olması durumlarında SE hesaplamaları yapılmıştır. Çalışma, açıklıkların daire şeklinde olduğu durum için tekrarlanmıştır. En iyi SE değeri, daire açıklıkların olduğu ve aynı açıklık alanına 8 adet küçük açıklığın yerleştirildiği durum için elde edilmiştir.

Zheng ve Zhongxiang (2008), üzerinde açıklık bulunan silindirik kutunun ekranlama etkinliğini tahmin etmek için, açıklık yüzeyi boyunca teğet olan manyetik alandan elde edilen bir nümerik yöntem sunmuşlardır. Dalga kılavuzu bağlantısının yansıma katsayısı, mod eşleştirme yöntemi ile hesaplanmış ve dış bölgedeki manyetik alan, bir potansiyel integral denklemi kullanılarak modellenmiştir. Elektromanyetik alanın bilinmeyen katsayıları, teğet manyetik alanın açıklık yüzeyi boyunca eşleştirilmesiyle elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek frekanslı yapı simülatörü (HFSS) ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Araneo ve Lovat (2008), sonlu kalınlıktaki açıklıkların, dikdörtgen metal kutunun ekranlama etkinliği üzerindeki etkilerini MoM yöntemiyle analiz etmişlerdir. Alan kaynağı olarak gelişigüzel polarizasyona ve geliş açısına sahip bir gelen düzlem dalga varsayılmıştır. Düşük frekanslarda sonlu bir açıklık kalınlığı etkilerinin genellikle ihmal edilebileceği gösterilmiştir.

Herlemann ve Koch (2008), bir elektronik kabinetin geçici ekranlama etkinliğini yansız ve yansız odalarda ölçmüşlerdir. Nümerik yöntemde Cocept2 ve Comsol Multiphysics araçları kullanılarak hesaplanan SE'nin deneysel ölçüm ile elde edilen SE değerlerine yakın olduğu görülmüştür.

Keshtkar, Maghoul, Kalantarnia ve Hashempour (2009), paramanyetik, ferromanyetik ve diyamanyetik malzemeler kullanarak manyetik ekranlama etkinliklerini karşılaştırmış ve iki boyutlu FEM ile açıklık sayılarındaki değişimin SE üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Yenikaya ve Akman (2009) yüklü bir ekranlama kutusu içindeki elektromanyetik alan dağılımını tahmin etmek için, MoM ve FEM yöntemlerinin bir hibrit formülasyonunu sunmuşlardır. Yöntemin etkinliğini tahmin etmek için boş bir ekranlama kutusunun SE analizi, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra yöntem, tek açıklıklı dielektrik levha yüklü ekranlama kutusuna uygulanmış ve SE analizi gerçekleştirilmiştir.

Mao ve Du (2010), üzerinde açıklık bulunan dikdörtgen ekranlama kutusuna ait eşdeğer devre modelini, ekranlama kutusunun iki duvarında açıklık olması durumu için hesaplayarak geliştirmişlerdir. İki farklı duvarda, kare ve daire şeklinde açıklıklar için SE analizi gerçekleştirilmiştir. Açıklık sayısının birden fazla olduğu kutularda düşük ve yüksek uyarımlar için SE hesaplanmış ve uyarımlar arttıkça rezonans frekanslarının 50 MHz ile 2 GHz aralığında arttığı gözlemlenmiştir.

Shim, Kam, Kwon ve Kim (2010), üzerinde açıklık bulunan dikdörtgen ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini, gelen düzlem dalganın geliş ve polarizasyon açılarını değiştirerek 400 MHz ile 2 GHz aralığında eşdeğer devre modelini kullanarak incelemişlerdir. Açıklık sayısı, açıklığın bulunduğu kutu yüzeyi ve açıklık uyarımlarına göre SE analizi yapılmış olup rezonans frekansı ve çözüm sürelerinin değişimi gözlemlenmiştir. Sonuçlar, CST Microwave Studio ve deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Yenikaya (2011), açıklığa sahip bir rezonatorün içerisindeki alan dağılımını hesaplamak için MoM ile FEM yöntemlerini birleştiren hibrit bir formülasyon sunmuştur. Rezonatörün içerisindeki elektromanyetik alanlar sonlu elemanlar metodu ile hesaplanmış ve açıklıktaki sınır koşulundan elde edilen integral denklem MoM ile çözülmüştür. Hibrit metot, yüklü ve yüksüz durumdaki bir rezonatöre uygulanmış ve elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir. Daha sonra, farklı

açıklık ve rezonatör konfigürasyonları için SE, depolanan elektriksel enerji ve kayıp güç yoğunluğuna göre incelenmiştir.

Belkacem ve diğerleri (2011), Robinson ve diğerleri (1998) tarafından geliştirilen analitik formülasyonu TLM yöntemi ile birleştirerek yeni bir analitik yöntem elde etmişlerdir. Bu yöntemin farkı ise birden fazla açıklığın olduğu, gelen düzlem dalganın polarizasyon ve geliş açılarının değiştirildiği durumlar için de geçerli olmasıdır. CST simülasyon sonuçları ve yarı yansız odada gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları karşılaştırılmış ve benzer sonuçların çok kısa süre içinde elde edildiği görülmüştür.

Wang, Cheng ve Zhaoming (2011), ön yüzeyinde dikdörtgen bir açıklık bulunan küçük küp şeklindeki metalik bir ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini yansız odada ölçmüş ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Ekranlama kutusu içindeki elektronik devrelerin maruz kalabileceği olası maksimum alanı belirlemek için kutu içindeki gözlem noktasının konumu ve yönü değiştirilerek SE analizleri yapılmıştır.

Dehhoda, Tavakoli ve Azadifar (2012), üzerinde açıklık bulunan dikdörtgen ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini MoM yöntemi ile analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, FEKO simülasyon sonuçları ve deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Düzlem dalganın geliş açısı, polarizasyon açıları; kutu malzemesinin kalınlığı ve üzerindeki açıklık sayıları değiştirilerek en uygun SE elde edilmeye çalışılmıştır.

Preault, Corcolle, Daniel ve Pichon (2013), elektromanyetik ekranlama çalışmalarında, kompozit malzemelerinin kullanılması ve havacılık sektöründe yapı hafifletme çalışmalarına katkısını incelemişlerdir.

Gifuni (2013), ekranlama etkinliği ile ekranlama kutusu malzemesi arasındaki ilişkiyi tek tip, izotropik alan koşulları altında incelemiştir. Ekranlama etkinliğinin, ekranlama kutusunun iç duvarlarının yansıtma özelliği, kutu duvar kayıpları ve yük kayıplarıyla ilişkili olduğu elde edilmiştir.

Kim, Wonzoo ve Lee (2013), iki ekranlama duvarına sahip metalik kutu için SE analizi gerçekleştirmişlerdir. İki duvara da küçük açıklıklar yerleştirilmiştir. MoM yöntemi ile iki duvar arası mesafe, uygulanan frekansın dalga boyu türüne göre değiştirilmiş ve SE hesaplanmıştır. SE'nin, $\lambda/10$ 'dan küçük olduğu durumlarda negatif olduğu ve $\lambda/2$ 'den büyük olduğunda aniden yükseldiği belirlenmiştir.

Yu ve Li (2013), yüksek performanslı bir elektromanyetik ekranlama tabakası olarak bir grafen levha ile nümerik SE analizi gerçekleştirmişlerdir. Sonsuz derecede ince bir karbon levhayı simüle etmek için ince tabakalı FDTD modeli geliştirilmiş ve ardından grafenin ekranlama özelliklerini incelemek için kullanılmıştır.

Hao ve Li (2014), TLM yöntemini kullanarak yan yüzeylerinde açıklığı olan kutunun ekranlama etkinliğini, TE uyarımında kutu üzerine gönderilen düzlem dalganın geliş ve polarizasyon açılarını değiştirerek analiz etmişlerdir. Sonuçlar, CST simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Açıklıklar arası mesafenin artmasıyla SE'nin yükseldiği gözlemlenmiştir.

Liu, Du, Liu ve Ren (2014), Robinson ve diğerleri (1998) tarafından oluşturulan analitik formülü kullanarak gözlem noktası mesafesinin SE üzerindeki etkisini dikdörtgen metalik kutular için incelemiştir. Elde edilen sonuçları, TLM ve FEM birleşiminden oluşan hibrit bir yöntemle kıyaslamışlardır.

Ilgar, Bulut ve Saka (2015), farklı açıklık şekillerinin, metalik dikdörtgen kutunun ekranlama etkinliğine etkisini analiz etmişlerdir. Oluşturulan nümerik model ile dikdörtgen, kare, beşgen, altıgen ve daire gibi çeşitli açıklıklar için SE değeri hesaplanmıştır.

D'Aloia, D'Amore ve Sarto (2015), bir cam tabaka üzerine ilave olarak SiO₂ içeren lamine grafen levhalardan yapılan çok katmanlı kutuları, THz mertebelerinde elektriksel olarak ayarlanabilir elektromanyetik ekran olarak önermişlerdir. Grafen / SiO₂ laminatın (GL) yeni bir eşdeğer tek katmanlı modeli oluşturulmuştur. Grafen kutular gerçekçi çalışma koşullarını temsil eden ortamda EMC açısından incelenmiştir. Önerilen

ekranlama tabakasının iyi performans göstermesinin, temel olarak içerisinde grafen oranının artmasıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Aqeeli ve diğerleri (2015), grafen laminatın elektromanyetik girişimden korunmak için kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. $0,43 \times 10^5$ S/m iletkenliğe sahip bir grafen laminat oluşturmak için grafen iletken yapı sıkıştırılmıştır. Grafen laminatın kalınlığı sadece 7,7 μm olmasına rağmen ekranlama etkinliği deneysel olarak 12 ve 18 GHz arasında 32 dB'nin üzerinde ölçülmüştür. Grafenin hafif, düşük maliyetli, esnek ve çevre dostu koruyucu malzemeler sunmada büyük potansiyele sahip olduğu kanıtlanmıştır.

Cruciani, Feliziani ve Maradei (2015), grafen düzlemsel levhaların ve ekranlama kutularının ekranlama etkinliği üzerine nümerik bir yöntem geliştirmişlerdir. FEM ve empedans ağ sınır koşulları (INBC) tabanlı yöntem ile karmaşık geometrileri, grafen levha duvarlarına sahip iki boyutlu ekranlar olarak modellemişlerdir.

Akiyama ve diğerleri (2016), elektrikli araçlardaki evirici için bakır ve polietilen tereftalat (PET) malzemelerinden oluşan çok katmanlı bir yapının elektromanyetik girişimlere karşı ekranlama etkinliğini analiz etmişlerdir. Üç bakır film ve iki PET filminin, bakır / PET / bakır / PET / bakır dizilmesiyle oluşan yapının ekranlama etkinliği, üç bakır filmden oluşan katmanlı yapının ekranlama etkinliğinden 100 MHz'ten daha düşük frekans bantlarında 20 dB daha büyük olduğu elde edilmiştir.

Bachir, Abdechafik ve Mecheri (2016), oluşturdukları matematiksel model ile öncelikle tek katmanlı bakır tabakanın elektromanyetik ekranlama etkinliğini analiz etmişlerdir. Sonra, oluşturdukları alüminyum ve nikel katmanlardan meydana gelen bir iletken tabakanın ekranlama etkinliğini analiz etmişlerdir. Önerilen çok katmanlı yapı, iletken filmler ve hava arasındaki uyumsuzluk empedansı nedeniyle tekli bakır katmandan daha fazla elektromanyetik dalgayı azalttığı ve ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini artırmaya katkıda bulunduğu gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen katman yapısı kullanılarak çok katmanlı ekranlama kutusunun duvar kalınlığı azaltılabilmektedir.

Bir karbon allotropu ve sp^2 bağı karbon atomlarının oluşturduğu 2 boyutlu bir karbon katmanı şeklinde olan grafen, ultra hafifliği, mükemmel mekanik esnekliği, güçlü yapısı ve iyi iletkenliği nedeniyle son on yılda birçok farklı araştırma alanında popüler bir materyal haline gelmiştir. Altun ve diğerleri (2017), farklı grafen oranlarının uygulandığı grafen esaslı polimer kompozitleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Bileşikteki grafenin artışına bağlı olarak ekranlama etkinliğinin arttığı görülmüştür.

Son zamanlarda, ultra hızlı yanıtlar elde etmek için THz ve optik frekanslarda elektronik devrelerin tasarımı ve uygulamaları gittikçe artmaktadır. Elektromanyetik ekranlama kutuları, elektronik devreler için komşu elektronik ekipman ve sistemlerin yaydığı EMI'yi önlemede hayati önem taşımaktadır. Dejband, Karami ve Hosseini (2017), THz rejimi için grafen tabanlı elektromanyetik ekran tasarlamış ve SE'yi iletim hattı modeli kullanarak hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlar, CST simülasyonları ile yüksek oranda uyumluluk göstermektedir.

D'Aloia, D'Amore ve Sarto (2018), bir grafen / dielektrik laminat (GDL) aracılığıyla düşük THz mertebelerinde SE analizi gerçekleştirmişlerdir. Her grafen / dielektrik çifti tabakası homojen, tek eksenli, anizotropik bir ortamda eşdeğer tek katmanlı bir yapı olarak modellenmiştir. Oluşturulan model ile, farklı kimyasal katkılamlarda olan iki grafen örneği simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre grafen / dielektrik çiftine ait tek katmanlı yapı modelinin yüksek doğruluğu kanıtlanmıştır.

Chen, Guo ve Tian (2018), grafen kaplı bir ekranlama tabakasının ekranlama etkinliğini simüle etmek için FDTD tabanlı hibrit bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde, grafenin bant içi iletkenliği doğrudan bir yardımcı fark denklemi ile ele alınmış ve zaman adımı boyutu, grafen plakadaki ince uzaysal hücrelerle ilişkili olmadığından geleneksel FDTD yönteminden çok daha yüksek hesaplama etkinliğine sahip olduğu gösterilmiştir. Nümerik sonuçlar, grafenin kimyasal potansiyelini kontrol ederek SE'nin iyileştirilebileceğini ve grafenin bantlar arası iletkenliğinin, özellikle 10 THz'ten daha büyük frekans bandında SE üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Basyigit ve Dogan (2019), 0-1 GHz frekans aralığında üzerinde bir açıklık bulunan metalik ekranlama kutusunun SE analizini çok katmanlı algılayıcı (MLP) olan yapay sinir ağları (YSA) yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, ekranlama kutusu yüzeyindeki açıklık geometrisi açısından deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. SE analizinde tek açıklığın geometrisi kareden dikdörtgene değişirken açıklığın alanı sabit tutulmuştur. YSA ile modellemede MLP ağ yapısının, hata ve verilerin örtüşmesi anlamında daha az nöron ile modellendiği görülmüştür.

Hussain, Majid ve Cao (2020), üzerinde açıklık bulunan dikdörtgen ekranlama kutusunun SE analizini, kutu içerisine metal direkler yerleştirerek gerçekleştirmişlerdir. Yerleştirilen direkler ile SE'nin arttırıldığı ve rezonans frekansının ötelendiği görülmüştür.

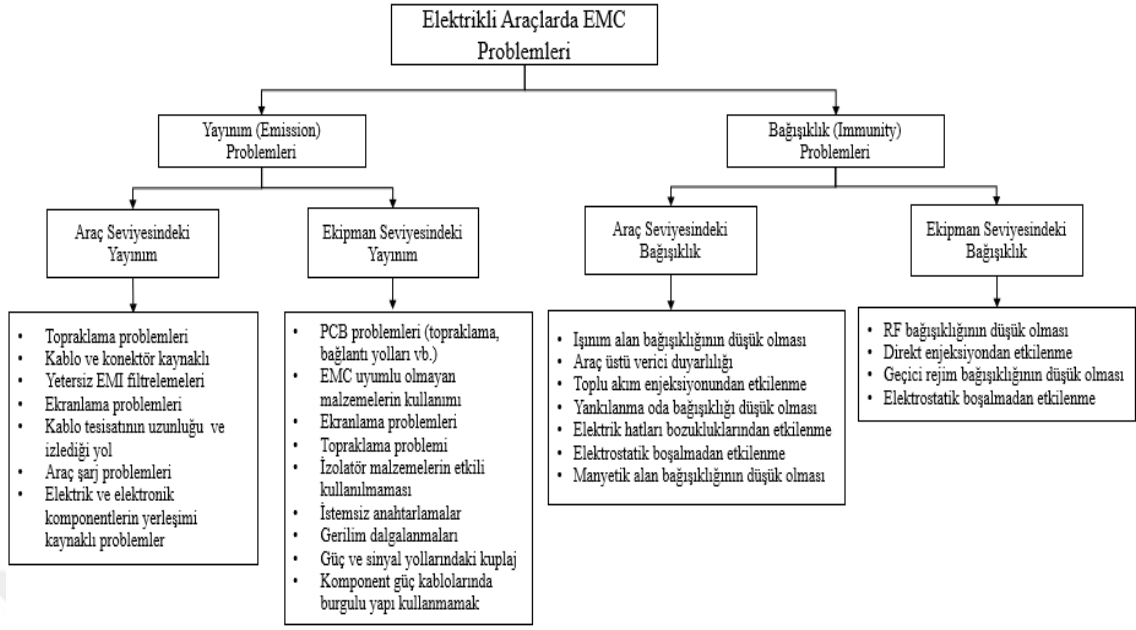
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Elektrikli Araçlarda Elektromanyetik Uyumluluk (EMC)

Uluslararası Elektronik Komisyonu (IEC) EMC'yi, "Bir cihaz veya sistemin içinde bulunduğu elektromanyetik ortamda, telafi edilemez bir elektromanyetik bozulma yapmaksızın fonksiyonlarını yerine getirebilme yeteneği" şeklinde tanımlamaktadır (Tihanyi, 1995). Bir EMC problemi üç ana unsur üzerinde değerlendirilir. Bunlar, elektromanyetik gürültüyü yayan kaynak, bu gürültüden dolayı uygun çalışmayan kurban, kaynak ile kurban arasındaki girişimin olduğu kuplaj mekanizmasıdır (Clayton, 2006).

Elektrikli araçlarda EMC problemlerine ilişkin çalışmaların çoğunlukla yüksek anahtarlama hızlarına sahip evirici özelinde olduğu görülmektedir (Carlsson ve Carlberg, 2014). Evirici, elektrikli araçlarda üç fazlı elektrik makinesini sürmek, döndürmek için kullanılan güç elektroniği tabanlı bir yapıdan oluşmaktadır. Düşük ve yüksek gerilimli batarya ünitelerindeki gerilim dalgalanmaları sonucu eviricinin IGBT (Yalıtımlı Kapı Bipolar Transistör) katındaki transistörlerde istenmeyen anahtarlama oluşması, IGBT katındaki hızlı anahtarlama evirici içindeki ve dışındaki diğer elektronik devrelerde oluşturduğu EMI en çok karşılaşılan problemler arasındadır.

Elektrikli araçlarda 12 V akü ile çalışan elektronik sistemlere ilave olarak yüksek gerilimli bataryalar ile çalışan ekipman ve sistemlerin araca nüfuz etmesi sonucu bu karmaşık araç elektroniğinde topraklama kaynaklı EMC problemleri oluşabilmektedir (Güler, Yenikaya ve Yılmaz, 2020). Elektromanyetik kuplaj, kapasitif ve endüktif kuplajı azaltmak için kablo korumaları da topraklanmalıdır (Carlsson ve Carlberg, 2014). Elektronik ekipmanlar içinde yer alan analog, sayısal devreler birbirlerine karşılıklı olarak müdahale eder, yolları arasında kapasitif ve endüktif kuplajlar bulunur. Baskı devre kartı (PCB) tasarımında güç, sinyal ve devrenin özelliği gibi faktörlere göre konumlandırma ve kablolama yapılmazsa PCB kaynaklı EMC problemleri meydana gelebilir (Güler ve diğerleri, 2020). Elektrikli araçlarda görülen EMC problemleri Şekil 3.1'deki gibi ana hatlarıyla sınıflandırılmıştır. Buna göre hem araç hem de elektronik ekipman seviyesinde incelenmesi gereken farklı EMC problemleri bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Elektrikli araçlardaki EMC problemleri (Güler ve diğerleri, 2020)

Araç üreticileri, tedarikçi firmalardan temin ettikleri elektronik ekipman ve sistemlerin, ekipman bazında EMC standartlarını sağlamalarını beklemektedir. Buradaki amaç, ekipmanların araç içindeki yoğun EMI'ye rağmen kendi fonksiyonelliklerini yerine getirdiklerinden emin olunmasıdır. Nihai EMC onayları ise tüm ekipman ve sistemlerin araç üzerine entegre edildiği araç seviyesindeki testler sonrası verilir. Bu testler için her araç üreticisinin test laboratuvarı bulunmamakla birlikte, araç seviyesindeki EMC testleri oldukça maliyetli testlerdir. Dahası, testlerden negatif sonuç alınması, bitmiş bir araç projesinde soruna ilişkin kök sebebin tespiti için tedarikçi firmaların da dahil edilmesini gerektirecek ciddi zaman ve para kayıplarına sebep olabilmektedir.

Teknolojideki gelişmelere paralel olarak mevcut standartları güncelleme ve yeni standartlar geliştirme ihtiyacı devam etmektedir. Örneğin: Elektrik-elektronik ekipman ve sistemlerin yerleştirildiği ekranlama kutularının ekranlama etkinliği ile ilgili ilk standart 1956 yılında yayınlanan MIL-STD 285 askeri standardına dayanmaktadır. Daha sonra, IEC 61000 standardı ile ekranlama kutularının ekranlama etkinliğine ilişkin genel standartlar geliştirilmiştir (Celozzi, Araneo ve Lovat, 2008). Günümüzde ise ekranlama etkinliği standartlarının belirlenmesinde IEEE (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) özel çalışma grubu görev almaktadır. Bu grubun yayınladığı IEEE 299

standartı ile ekranlama kutularının ekranlama etkinliği testleri gerçekleştirilmektedir (IEEE Standard 299, 2012).

3.2. Ekranlama

Ekranlama, elektronik devrelerin bulunduğu ortamdan izole edilebilmeleri için iletkenliği yüksek olan bir kutu içerisine yerleştirilmesi işlemidir. Ekranlamanın amacı, elektromanyetik girişimin kutu içerisine girmesini engellemek ya da kutu içerisinde meydana gelen elektromanyetik enerjinin ortama yayılmasını önlemektir. Bir elektromanyetik ekranlama kutusunun performansı, kutunun varlığında ve yokluğunda belli bir gözlem noktasında ölçülen alan büyüklüklerinin (elektrik veya manyetik) birbirine oranı olarak tanımlanan ekranlama etkinliği (SE) ile ifade edilir (Bahadorzadeh ve Moghaddasi, 2006).

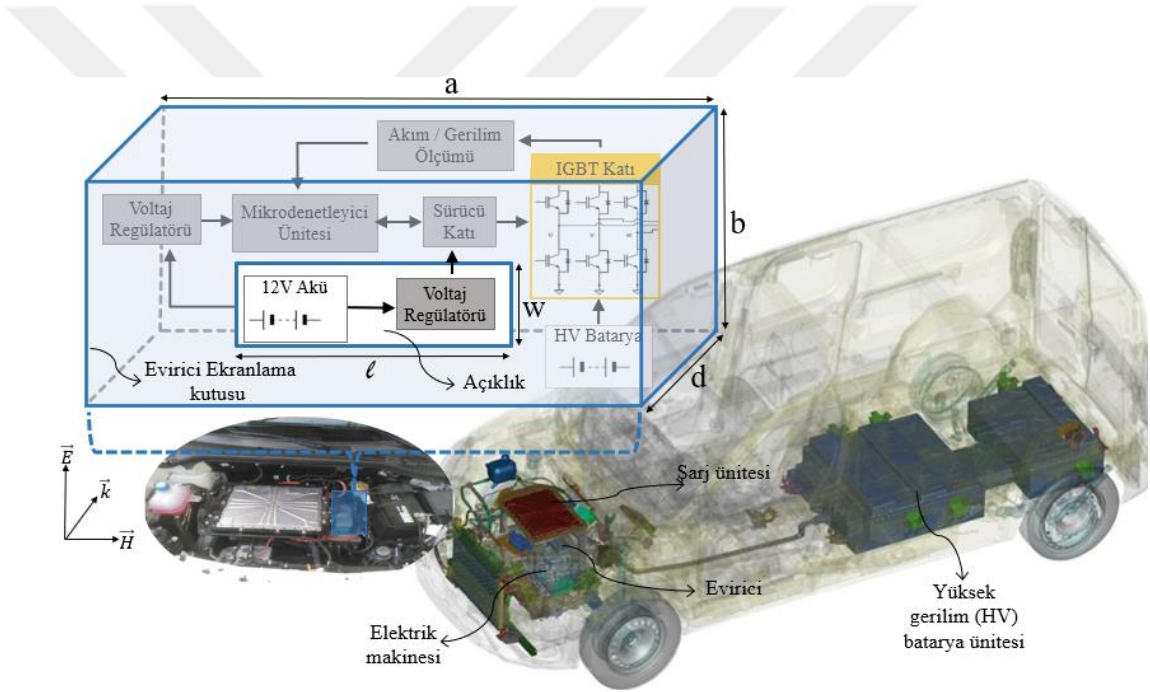
Elektronik ekipmanları EMI'den korumak için tasarlanan ekranlama kutuları, iletkenliği yüksek malzemelerden üretilmelidir. Alüminyum, ekranlama kutusu üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek SE değerlerinin elde edilmesi gereken, güvenlik açısından riskli ekipmanlarda bakırdan yapılmış kutulara da rastlanabilmektedir. Çizelge 3.1'de bazı malzemelerin iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Malzeme iletkenliği (zen ve Arı, 2008)

Malzeme adı	İletkenlik (Mega S/m)
Gümüş	62
Bakır	59
Altın	43
Alüminyum	36
Çinko	16
Demir	9,5
Titanyum	2,4
Paslanmaz elik	1,11
Karbon	0,03

3.3. Problemin Tanımlanması

Bu çalışma, Şekil 3.2’de gösterilen bir EV içindeki elektrikli tahrik sisteminin evirici ekipmanına ait ekranlama kutusunun ekranlama etkinliği hesaplamasını konu almaktadır. Elektrikli tahrik sisteminde merkezi bir elektrik makinesi, HV batarya ünitesi tarafından beslenen ve yüksek gerilimlerde IGBT anahtarlamalarının meydana geldiği evirici ile kontrol edilmektedir. Evirici içerisinde IGBT katının yanı sıra 12 V akü ile beslenen düşük gerilim kontrol ünitesi de yer almaktadır. Bu nedenle evirici tüm aracı etkileyebilecek, kritik güvenlik sorunlarına neden olabilecek bir EMI kaynağı ve aynı zamanda mikrodenetleyici tabanlı IGBT sürücü katı nedeniyle olası bir EMI kurbanı durumundadır.



Şekil 3.2. Bir EV içindeki elektrikli tahrik sistemi ve evirici ekranlama kutusu

Ekranlama kutularında konnektör montajı, güç kablosu bağlantıları, havalandırma deliği vb. sebeplerle sıklıkla açıklıklara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu açıklıklar, dikkatli bir şekilde tasarlanmadıkları sürece ekranlama performansını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Metaller yüksek iletkenlikleri, mekanik özellikleri nedeniyle uzun yıllardır ekranlama kutusu üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ağır olmaları, işlenme zorlukları, esnekliklerinin düşük olması, yüksek üretim maliyetleri gibi önemli dezavantajları vardır.

Ayrıca, ekranlama kutusu içindeki elektronik devrelerin performansını etkileyecek keskin rezonanslar meydana gelebilmektedir (Obreja ve diğerleri, 2015). Hafiflik ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle kompozit malzemelerden yapılmış ekranlama kutuları özellikle EV’lerde kullanılmaya başlanmıştır. Çizelge 3.2’de EV’lerdeki evirici ekipmanına ilişkin araç modeli bazında kıyaslama çalışması verilmiştir. Tez çalışması kapsamında, Audi E-tron aracındaki evirici ekranlama kutusu boyutları ve malzemesi kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. EV’lerdeki evirici ekranlama kutuları

Tip	Yıl	Model	Evirici Tedarikçisi	Evirici Boyutları (mm)	Evirici Ağırlığı	Malzeme
BEV	2019	Audi E-tron	Hitachi	300x160x310	7,986 kg	Alüminyum
PHEV	2014	BMW i3 R.E.	Bosch	202x367x128	5,081 kg	Kompozit
BEV	2018	Jaguar I-Pace	Continental	275x90x435	8,134 kg	Alüminyum
BEV	2018	Renault Kangoo Z.E.	Continental	490x240x350	19,221 kg	Alüminyum
BEV	2013	Renault Zoe	Continental	450x200x260	10,108 kg	Alüminyum
BEV	2018	Hyundai Kona	Mobis	370x120x400	9,193 kg	Alüminyum
BEV	2017	Opel Ampera	Delphi	245x147x405	9,373 kg	Alüminyum

Elektrikli araçlarda kullanılan ekranlama kutularının mümkün olduğunca hafif ve SE değerlerini sağlayacak elektriksel özelliklerde olması gerekmektedir. Büyük, metal ekranlama kutularının fazla kullanımı araç geometrisinin değişimini gerektirecek çalışmaları tetikleyebilir. Dahası, araç ağırlığının artması araç menzilini olumsuz etkilemektedir (Güler ve diğerleri, 2020).

3.4. Maxwell Denklemleri

Elektromanyetik dalgaları oluşturan elektrik ve manyetik alanların özellikleri Maxwell denklemleri olarak bilinen denklemlerle ifade edilmektedir. Bu denklemler elektrik ve manyetik alanların birbirini nasıl etkilediğini ve arasındaki bağıntıları göstermektedir. Zamanla değişen Maxwell denklemlerinin genel formu aşağıda verilmiştir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_i + \vec{J}_c \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

Buradaki büyüklükler uzayın koordinatlarına ve zamana bağlı olup MKSA sistemindeki birimleri aşağıdaki gibidir (Güler, 2007):

- \vec{E} : Elektrik alan vektörü (V/m)
- \vec{D} : Elektrik akı yoğunluğu vektörü (C/m²)
- \vec{H} : Manyetik alan vektörü (A/m)
- \vec{B} : Manyetik akı yoğunluğu vektörü (Wb/m²)
- \vec{J}_i : Ortamdaki iletkenlikten kaynaklı elektriksel akım yoğunluğu vektörü (A/m²)
- \vec{J}_c : Ortamdaki sürücü (uyarıcı) kaynaklara ilişkin elektriksel akım yoğunluğu vektörü (A/m²)
- ρ_v : Hacimsel yük yoğunluğu (C/m³)

3.4.1. Malzeme özellikleri

Dielektrikler, elektrik akımını taşıyabilecek serbest elektronları olmayan maddelerdir. Elektrik alanın etkisiyle bir molekül içindeki pozitif ve negatif yükler birbirinden uzaklaşarak elektrik dipolü oluşturur. Böylece, dielektrik polarize olur.

Aralarında d mesafesi bulunan iki paralel levhanın arasına, yarısına kadar dielektrik malzeme konulduğu, kalan yarısının ise boşluk olduğu varsayalım ve bir dış gerilim kaynağı bu levhalara bağlı olsun. Paralel levhalar arasındaki boşlukta elektriksel akı yoğunluğu \vec{D} (C/m^2), ortamın doğrusal, homojen ve izotropik olması durumunda

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (3.5)$$

olarak elde edilir. Burada \vec{E} (V/m) levhalara uygulanan elektrik alanı, ϵ_0 ise boşluğun dielektrik geçirgenliğini ifade etmektedir (Özen ve Arı, 2008).

Dielektrik malzemenin olduğu ortamda ise elektriksel akı yoğunluğu \vec{D} (C/m^2), ortamın dielektrik sabitine ϵ bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

Polarize olmuş dielektriğin birim hacimdeki bileşke dipol momenti, elektrik polarizasyon vektörü \vec{P} (C/m^2)

$$\vec{P} = \epsilon_0 X_e \vec{E} \quad (3.7)$$

ile ifade edilmektedir (Özen ve Arı, 2008). X_e boyutsuz olup, elektriksel polarizasyon duyarlılığı veya hassasiyeti olarak adlandırılır. Denklem (3.6)'ya dielektrik malzemenin etkisi dahil edilirse elektriksel akı yoğunluğu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (3.8)$$

Denklem (3.7)'de verilen \vec{P} ifadesi denklem (3.8)'de yerine yazılırsa, elektriksel akı yoğunluğu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\vec{D} = \epsilon_0(1 + X_e)\vec{E} \quad (3.9)$$

Dielektrik ve bağıl dielektrik sabitleri ise sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır (Özen ve Arı, 2008).

$$\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r \quad (3.10)$$

$$\epsilon_r = (1 + X_e) \quad (3.11)$$

Manyetik malzemeler, manyetik alana maruz kaldıklarında, manyetik polarizasyon sergiler. Doğrusal, homojen ve izotropik ortamlar için manyetik akı yoğunluğu \vec{B} (Wb/m²) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.12)$$

Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini, \vec{H} (A/m) manyetik alan şiddetini, \vec{M} (A/m) manyetik polarizasyon vektörünü ifade etmektedir (Cheng, 2006). Uygulanan alan içindeki manyetik dipollerin katkısını gösteren manyetik polarizasyon vektörü \vec{M} aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\vec{M} = X_m\vec{H} \quad (3.13)$$

Burada X_m manyetik polarizasyon duyarlılığı veya hassasiyeti olarak adlandırılır. \vec{H} manyetik alan şiddetini ifade etmektedir (Cheng, 2006). Denklem (3.13), denklem (3.12) içinde kullanılırsa manyetik akı yoğunluğu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{B} = \mu_0(1 + X_m)\vec{H} \quad (3.14)$$

Manyetik geçirgenlik ve bağıl manyetik geçirgenlik sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3.15)$$

$$\mu_r = (1 + X_m) \quad (3.16)$$

Elektrik alan uygulanan bir iletkende, elektronlar elektrik alana ters yönde ve sürüklenme hızı \vec{v} ile yavaş yavaş sürüklenir (Kasap, Koughia ve Ruda, 2017). Uygulanan elektrik alan \vec{E} ile elektronların sürüklenme hızı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\vec{v} = -\mu_e \vec{E} \quad (3.17)$$

Burada μ_e , elektronların hareket yeteneğidir. Elektronların, rastgele ve \vec{E} ile zıt yönde olan akışı, ağır iyonlarla çarpışarak önlenir. Böylece, maddedeki elektrik enerjisi ısı enerjisine dönüşür. Bu durumda akım yoğunluğu \vec{J} aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{J} = -n_e \vec{v} \quad (3.18)$$

Burada n_e elektron yük yoğunluğunu belirtmektedir (Kasap ve diğerleri, 2017). Denklem (3.17) içinde yer alan \vec{v} , denklem (3.18)'de yerine konursa akım yoğunluğu aşağıdaki halini alır.

$$\vec{J} = n_e \mu_e \vec{E} \quad (3.19)$$

Ohm kanununa göre bir malzemenin iletkenliği σ (S/m), $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ denklemi içinde tanımlanır. Bu durumda malzeme iletkenliğinin, elektronların hareket yeteneği μ_e ve elektron yük yoğunluğu n_e ile ilişkili olduğunu gösteren aşağıdaki denklem elde edilir (Kasap ve diğerleri, 2017).

$$\sigma = n_e \mu_e \quad (3.20)$$

σ iletkenliği, bir başka ifadeyle bir ortamdaki serbest elektron yoğunluğunu karakterize eden bir parametredir. Dielektrik (yalıtkan) malzemelerin iletkenliği çok düşük olup ideal dielektriklerin iletkenlikleri sıfırdır. Denklem (3.20)'de belirtilen iletkenlik statik iletkenlik olarak adlandırılır.

Kayıplı ortama sahip malzemelere zamanla değişen alanlar uygulandığında elektrik polarizasyon vektörü \vec{P} ve manyetik polarizasyon vektörü \vec{M} , bu alanlardan etkilenir ve frekansın bir fonksiyonu olur. Boyle bir durumda dielektrik katsayısı aşağıdaki gibi kompleks olarak tanımlanır (Cheng, 2006).

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.21)$$

Bağıl dielektrik sabiti ise denklem (3.10) kullanılarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (3.22)$$

Dielektrik ve bağıl dielektrik sabitleri kompleks olduklarından Maxwell Amper denklemi fazor formda aşağıdaki gibi yazılır (zen ve Arı, 2008).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_i + \vec{J}_c + j\omega\epsilon\vec{E} = \vec{J}_i + \sigma_s\vec{E} + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')\vec{E} \quad (3.23)$$

Burada σ_s statik iletkenlik olarak ifade edilir. Malzemenin efektif akım yoğunluğu $\vec{J}_{ce} = \sigma_e\vec{E} = (\sigma_s + \sigma_a)\vec{E}$ şeklinde tanımlanmaktadır. $\sigma_a = \omega\epsilon''$ değişken iletkenlik olarak tanımlanır. Efektif yer değiştirme akım yoğunluğu $\vec{J}_{de} = j\omega\epsilon'\vec{E}$ olarak ifade edilir. Bu tanımlamaların denklem (3.23) içinde kullanılmasıyla, toplam elektriksel akım yoğunluğu \vec{J}_t aşağıdaki denklemler ile elde edilir (zen ve Arı, 2008).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_i + (\sigma_s + \omega\epsilon'')\vec{E} + j\omega\epsilon'\vec{E} = \vec{J}_i + \sigma_e\vec{E} + j\omega\epsilon'\vec{E} \quad (3.24)$$

$$\vec{J}_t = \vec{J}_i + \sigma_e\vec{E} + j\omega\epsilon'\vec{E} = \vec{J}_i + j\omega\epsilon' \left(1 - j\frac{\sigma_e}{\omega\epsilon'}\right)\vec{E} = j\omega\epsilon'(1 - j\tan\delta_e)\vec{E} \quad (3.25)$$

Burada $\tan\delta_e$, efektif elektriksel kayıp tanjantı olup aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\tan\delta_e = \frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon'} = \frac{\sigma_s}{\omega\varepsilon'} + \frac{\sigma_a}{\omega\varepsilon'} = \frac{\sigma_s}{\omega\varepsilon'} + \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \tan\delta_s + \tan\delta_a \quad (3.26)$$

$\tan\delta_s$ statik elektriksel kayıp tanjantı ve $\tan\delta_a$ ise değişken elektriksel kayıp tanjantı olarak tanımlanır (Başyigit, 2016).

İyi dielektrik malzemeler için $\tan\delta_e \ll 1$ olup bu tip malzemeler için yer değiştirme akım yoğunluğu, iletkenlik akım yoğunluğundan çok daha büyük olmaktadır ve yaklaşık olarak toplam akım yoğunluğuna eşittir. Kayıpsız bir ortam için $\sigma = 0$ olarak tanımlanır. İyi iletken malzemeler için ise $\tan\delta_e \gg 1$ olup bu malzemeler için iletimsel akım yoğunluğu, yer değiştirme akım yoğunluğundan çok daha büyüktür ve yaklaşık olarak toplam akım yoğunluğuna eşittir. Mükemmel iletken bir malzeme için $\sigma \rightarrow \infty$ olarak tanımlanır.

3.4.2. Kayıplı ortamda düzlem dalgalar

x eksenini doğrultusunda polarize olmuş, kayıplı bir ortamda z yönünde yayılan düzlem dalga için elektrik alan

$$\vec{E}(z) = \hat{a}_x(E_0^+ e^{-\gamma z} + E_0^- e^{+\gamma z}) \quad (3.27)$$

şeklinde ifade edilir (Cheng, 2006). Burada $\gamma = \alpha + j\beta$ kompleks yayılma sabitini göstermektedir. α (Np/m) sönümlenme sabiti, β (rad/m) ise faz sabitini ifade etmektedir. Yayılma sabiti, iletim hattı teorisi kullanılarak

$$\gamma = \alpha + j\beta = jk_c = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon_c} \quad (3.28)$$

tanımlanır (Cheng, 2006). Burada sırasıyla k_c kompleks dalga sayısı ve ε_c kompleks dielektrik sabitidir. $\varepsilon_c = \varepsilon - j\sigma/\omega$ (F/m) olarak tanımlanır. Bu durumda yayılma sabiti denklem (3.29)'daki gibi elde edilir.

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon_c} = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (3.29)$$

Denklem (3.29) kullanılarak, sönümlenme ve faz sabitleri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} - 1 \right)} \quad (3.30)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} + 1 \right)} \quad (3.31)$$

x ekseninde polarize olmuş elektrik alan için manyetik alan aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\vec{H} = -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \vec{E}(z) = -\hat{a}_y \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} = +\hat{a}_y \frac{\gamma}{j\omega\mu} (E_0^+ e^{-\gamma z} \pm E_0^- e^{+\gamma z}) \quad (3.32)$$

Denklem (3.29)'daki yayılma sabiti, denklem (3.32) içinde kullanılarak, manyetik alan aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\vec{H} = +\hat{a}_y \frac{\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}}{j\omega\mu} (E_0^+ e^{-\gamma z} - E_0^- e^{+\gamma z}) \quad (3.33)$$

$$\vec{H} = +\hat{a}_y \frac{1}{\eta_w} (E_0^+ e^{-\gamma z} - E_0^- e^{+\gamma z}) \quad (3.34)$$

Buradaki η_w kayıplı ortamın öz empedansıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanır (Cheng, 2006).

$$\eta_w = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (3.35)$$

Kayıplı ortamda ilerleyen dalga için genliğin başlangıçtaki değerinin $e^{-1} = 0,368$ yani %36,8'ine düştüğü mesafeye deri kalınlığı δ (m) denir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} - 1 \right)}} \quad (3.36)$$

Burada μ ortamın manyetik geçirgenliği, σ ortamın iletkenliği olup $\omega = 2\pi f$ açısal frekanstır. Deri kalınlığı, iletkenlik σ veya frekans f arttıkça küçülmektedir. Bu durum iletkenler içinde elektromanyetik dalgaların hızlı bir şekilde zayıfladığını göstermektedir. $\sigma/\omega\epsilon$ oranına bakılarak denklem (3.36) daha basit hale indirgenebilir. İyi dielektrik ortamlar için $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ olup iyi iletken ortamlar için $\sigma/\omega\epsilon \gg 1$ geçerlidir. Bu durumda iyi dielektrik ve iyi iletken ortamlar için deri kalınlığı sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\delta = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.37)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.38)$$

3.5. SE Formülasyonu

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 (Bahadorzadeh ve Moghaddasi, 2006).

$$SE = 20 \log \left| \frac{\vec{E}_{kutu\ yok}(p)}{\vec{E}_{kutu\ var}(p)} \right| \quad (dB) \quad (3.39)$$

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 (Özkan, 2018). 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 aşığıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$SE = A + R + B \text{ [dB]} \quad (3.40)$$

Burada A soğrulma kaybını, R yansıma kaybını, B ise ardışık yansıma kayıplarını temsil etmektedir (Dursun, 2006).

3.5.1. Soğrulma kayıpları

Elektromanyetik dalga bir ortamdan geçtiğinde omik ve termal kayıplardan dolayı genliğinde azalmalar meydana gelir. Elektromanyetik dalgada oluşan zayıflamalar

$$E_1 = E_0 e^{-t/\delta} \quad (3.41)$$

$$H_1 = H_0 e^{-t/\delta} \quad (3.42)$$

şeklinde gelen alanların genliklerini zayıflatacak biçimde ortaya çıkar. Burada E_0 ve H_0 ekrana gelen dalganın alan şiddetini, E_1 ve H_1 ise ekran içinde t mesafesindeki dalganın alan şiddetini belirtir. Deri kalınlığı δ , iyi iletkenler için denklem (3.38)'deki gibi tanımlanır.

Bir ekran duvarı boyunca soğrulma kaybı, aşığıdaki gibi ifade edilir (Ott, 2009).

$$A = 20 \log_{10} \frac{E_0}{E_1} = 20 \log_{10} e^{\frac{t}{\delta}} = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log_{10}(e) = 8,69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad (3.43)$$

Ekranın bir deri kalınlığında soğurma kaybı yaklaşık olarak 9 dB kadardır. Soğurma kaybı alan özelliklerinden bağımsız olarak ekran kalınlığına ve ortamın özelliklerine bağlıdır. Ekran duvarını iki katına çıkarmak dB kaybını da iki katına çıkaracaktır.

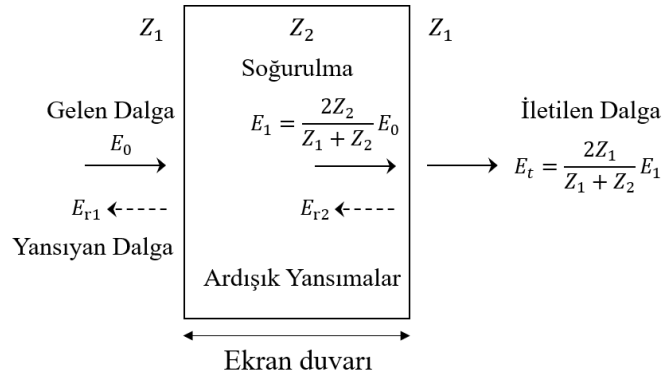
3.5.2. Yansıma kayıpları

İki ortam arasındaki arayüzde meydana gelen yansıma kaybı, bu iki ortamın karakteristik empedanslarına bağlıdır. Z_1 empedansına sahip bir ortamdan Z_2 empedanslı bir ortama gönderilen dalga şiddeti

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad (3.44)$$

$$H_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0 \quad (3.45)$$

olarak tanımlanmıştır (Ott, 2009). Burada E_0 ve H_0 ekrana gelen dalganın alan şiddetini, E_1 ve H_1 ise ekrana giren dalganın alan şiddetini belirtir. Şekil 3.3'te bir ekran duvarında iletilen ve yansıyan elektrik alanlar gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Bir ekran duvarında iletilen ve yansıyan elektrik alanlar

Ekran duvarından geçip iletilen elektrik alan şiddeti E_t aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$E_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad (3.46)$$

Ekran duvar kalınlığı t , deri kalınlığından çok büyükse iletilen elektrik alan şiddeti

$$E_t = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_0 \quad (3.47)$$

olarak elde edilir. Bu formülde Z_1 yerine dalga empedansı $Z_W = \vec{E}/\vec{H}$ ve Z_2 yerine ekran empedansı Z_S yerleştirilirse çoklu yansımanın ihmal edildiği durum için yansıma kaybı

$$R = 20\log_{10} \frac{E_0}{E_1} = 20\log_{10} \frac{Z_1}{4Z_2} = 20\log_{10} \frac{|Z_W|}{4|Z_S|} \quad (3.48)$$

şeklinde tanımlanır (Ott, 2009). Burada Z_S , iyi iletken malzemeler için ($\sigma \gg j\omega\varepsilon$) denklem (3.35) kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Z_S = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} (1 + j) \quad (3.49)$$

Bir düzlem dalga serbest uzayda, uzak alan durumunda ise dalga empedansı $Z_W = Z_0 = 377 \Omega$ serbest uzayın karakteristik empedansına eşittir. Bu durumda yansıma kaybı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$R = 20\log_{10} \frac{|Z_W|}{4|Z_S|} = 20\log_{10} \frac{94,25}{|Z_S|} \quad (3.50)$$

3.5.3. Ardışık yansıma kayıpları

İnce bir ekran için ikinci sınırdan gelen yansıyan dalga, birinci sınırdan tekrar geri yansır ve daha sonra tekrar yansıyacağı ikinci sınıra döner. Bu durum soğrulma kaybı yüksek olduğu için kalın bir ekran duvarı için ihmal edilebilir. Dalga ikinci kez ikinci sınıra ulaştığı zaman, ekran kalınlığından üç kez geçtiğinden dolayı genliği ihmal edilebilmektedir. Elektrik alan için birincil zayıflama, ekranın birinci yüzeyinden gelen yansıma kayıpları ile sağlanır. Bu nedenle, elektrik alan için ekran içinde çoklu

yansımalar ihmal edilebilir. Manyetik alan için ise gelen dalganın çoğu ekran içine geçmektedir. Bu nedenle, ekran içindeki çoklu yansımaların etkisi düşünülmelidir. Kalınlığı t ve deri kalınlığı δ olan bir ekranda manyetik alanların çoklu yansımaları aşağıdaki formülle ifade edilir (Özkan, 2018).

$$B = 20\log_{10}(1 + e^{-2t/\delta}) \quad (3.51)$$

3.5.4. Tek katlı ekran

Optik frekansların altında tek katlı bir ekrana herhangi bir θ_i açısında gelen bir elektromanyetik dalga için yansımaya kaybı,

$$R = -20\log_{10}|T| = -20\log_{10} \frac{|1 - \xi|^2}{4|\xi|} \quad (3.52)$$

şeklinde ifade edilir. Burada T ekranlama boyunca net iletim katsayısıdır. $\xi = Z_0/Z_S$ olacak şekilde Z_0 gelen dalga empedansının, Z_S ekran malzeme empedansına oranını ifade eder.

Kalınlığı t olan bir ekran duvarından geçen elektromanyetik dalga için soğrulma ve ardışık yansımaya kayıpları sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır (Ott, 2009).

$$A = 8,69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad (3.53)$$

$$B = 20\log_{10}|T| = 20\log_{10} \left| 1 - \frac{(\xi - 1)^2}{(\xi + 1)^2} e^{-2t(1+j)\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \right| \quad (3.54)$$

Soğrulma kaybı 15 dB üzerinde olduğunda çoklu yansımaya kayıpları ihmal edilebilir ve tek katlı ekran için SE, yansımaya ve soğrulma kayıplarının toplamı olarak ifade edilir.

3.5.5. Çok katlı ekran

Çok katlı ekran modelinde empedansları Zm_1, Zm_2, \dots, Zm_n olan n sayıda katman yer almaktadır. Böyle bir yapıda toplam yansıma kayıpları

$$R = 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Zm_1}{Z_0}\right|}{2} + 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Zm_2}{Zm_1}\right|}{2} + 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Z_0}{Zm_{n-1}}\right|}{2} \quad (3.55)$$

her yüzeydeki yansıma kayıplarının toplamı olarak ifade edilir (Özkan, 2018).

Çok katlı ekran modelinde toplam soğrulma kaybı ise, aşağıdaki gibi n sayıda ekran katmanının soğrulma kayıplarının toplamı şeklindedir.

$$A = 8,686 \left(\frac{t_1}{\delta_1} + \frac{t_2}{\delta_2} + \dots + \frac{t_n}{\delta_n} \right) \quad (3.56)$$

Ardışık yansıma kaybı ise aşağıdaki gibi tanımlanır (Ott, 2009).

$$B = 20\log_{10} |1 - \xi_1 e^{-2K_1 t_1}| + 20\log_{10} |1 - \xi_2 e^{-2K_2 t_2}| + \dots \\ + 20\log_{10} |1 - \xi_n e^{-2K_n t_n}| \quad (3.57)$$

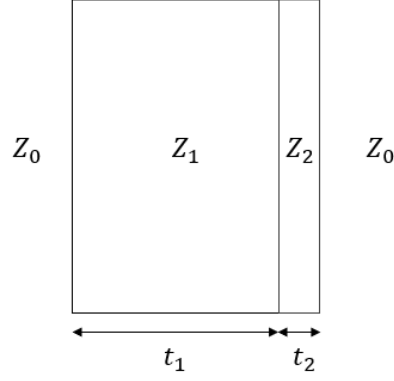
ξ_n, K_n sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\xi_n = \frac{(Zm_n - Zm_{n-1})(Zm_n - Zm_{tn})}{(Zm_n + Zm_{n-1})(Zm_n + Zm_{tn})} \quad (3.58)$$

$$K_n = (1 + j)\sqrt{\pi f \mu_n \sigma_n} \quad (3.59)$$

Burada Zm_{tn} her bir katmanın sağından bakıldığındaki empedansı ifade etmektedir.

İki farklı iletken malzemeden oluşan, farklı duvar kalınlıklarına ve yüzey empedanslarına sahip iki katlı ekran yapısı Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. İki katlı ekran yapısı

Bu yapı için R yansımaya, A soğrulma ve B ardışık yansımaya kayıpları sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R = 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Z_1}{Z_0}\right|}{2} + 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right|}{2} + 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Z_0}{Z_2}\right|}{2} \quad (3.60)$$

$$A = 8,686 \left(\frac{t_1}{\delta_1} + \frac{t_2}{\delta_2} \right) \quad (3.61)$$

$$B = 20\log_{10} \left| \left(1 - \frac{(Z_1 - Z_0)(Z_1 - Z_{in2})}{(Z_1 + Z_0)(Z_1 + Z_{in2})} e^{-2(1+j)\sqrt{\pi f \mu_1 \sigma_1} t_1} \right) \right| \quad (3.62)$$

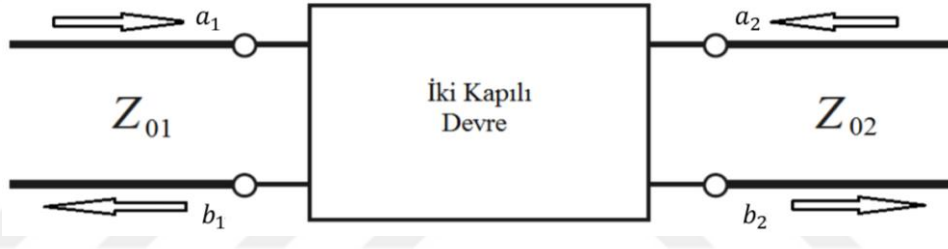
$$+ 20\log_{10} \left| \left(1 - \frac{(Z_2 - Z_1)(Z_2 - Z_0)}{(Z_2 + Z_1)(Z_2 + Z_0)} e^{-2(1+j)\sqrt{\pi f \mu_2 \sigma_2} t_2} \right) \right|$$

Burada $Z_0 = 377 \Omega$ serbest uzayın karakteristik empedansını, Z_1 birinci ortamın empedansını, Z_2 ikinci ortamın empedansını, Z_{in2} ise denklem (3.63)'te tanımlandığı gibi ikinci ortamın giriş empedansını ifade etmektedir. δ_1 birinci malzemenin deri kalınlığını, δ_2 ikinci malzemenin deri kalınlığını, t_1 birinci malzemenin duvar kalınlığını ve t_2 ikinci malzemenin duvar kalınlığını belirtmektedir.

$$Z_{in2} = Z_2 \frac{Z_0 \cosh\left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} t_2\right) + Z_2 \sinh\left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} t_2\right)}{Z_2 \cosh\left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} t_2\right) + Z_0 \sinh\left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} t_2\right)} \quad (3.63)$$

3.6. Saçılma Parametreleri ile SE Formülasyonu

Bir pasif, doğrusal devrenin seçilen kapı referans düzlemleri için hesaplanan S parametreleri devrenin bu kapıları arasındaki davranışını belirtir. Devreye ait saçılma parametreleri, devrenin resiprok, kayıpsız veya yansız bir devre olup olmadığı gibi bilgilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Şekil 3.5'te verilen iki kapılı devrenin S parametrelerinden oluşan saçılma matrisinden faydalanarak, elektromanyetik ekranlama simülasyon sonuçlarından SE değerleri elde edilebilmektedir.



Şekil 3.5. İki kapılı mikrodalga devresi

İki kapılı bir devre için genelleştirilmiş saçılma matrisi,

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

şeklinde verilir (Abdulla, 2016). Saçılma matrisinin parametreleri ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.65)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (3.66)$$

S_{11} ikinci kapı uygun empedansla sonlandırıldığında ($a_2 = 0$), birinci kapıda görülen giriş yansımaya katsayısıdır. S_{22} ise birinci kapı uygun empedansla sonlandırıldığında ($a_1 = 0$), ikinci kapıda görülen giriş yansımaya katsayısıdır. S_{21} ikinci kapı uygun empedansla sonlandırıldığında, birinci kapıdan ikinci kapıya iletim katsayısı olup S_{12} ise birinci kapı uygun empedansla sonlandırıldığı durumda elde edilen ikinci kapıdan birinci kapıya iletim katsayısıdır.

Bir malzeme için ekranlama etkinliği, yansımaya kaybı SE_R , soğrulma kaybı SE_A ve ardışık yansımaya kaybı SE_B toplamı olacak şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir. P_I , P_T sırasıyla gelen ve iletilen elektromanyetik güçtür.

$$SE_T = 10 \log \left(\frac{P_I}{P_T} \right) = SE_R + SE_A + SE_B \quad (dB) \quad (3.67)$$

Yansımaya ve iletim katsayıları, S parametreleri cinsinden sırasıyla $R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2$ ve $T = |S_{12}|^2 = |S_{21}|^2$ olarak tanımlanır. Soğrulma katsayısı ise $A + R + T = 1$ denkleminde elde edilmektedir (Abdulla, 2016). SE_R , SE_A ve SE_T S parametreleri cinsinden sırasıyla

$$SE_R = 10 \log \left(\frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \right) \quad (3.68)$$

$$SE_A = 10 \log \left| 1 - \frac{|S_{11}|^2}{|S_{12}|^2} \right| \quad (3.69)$$

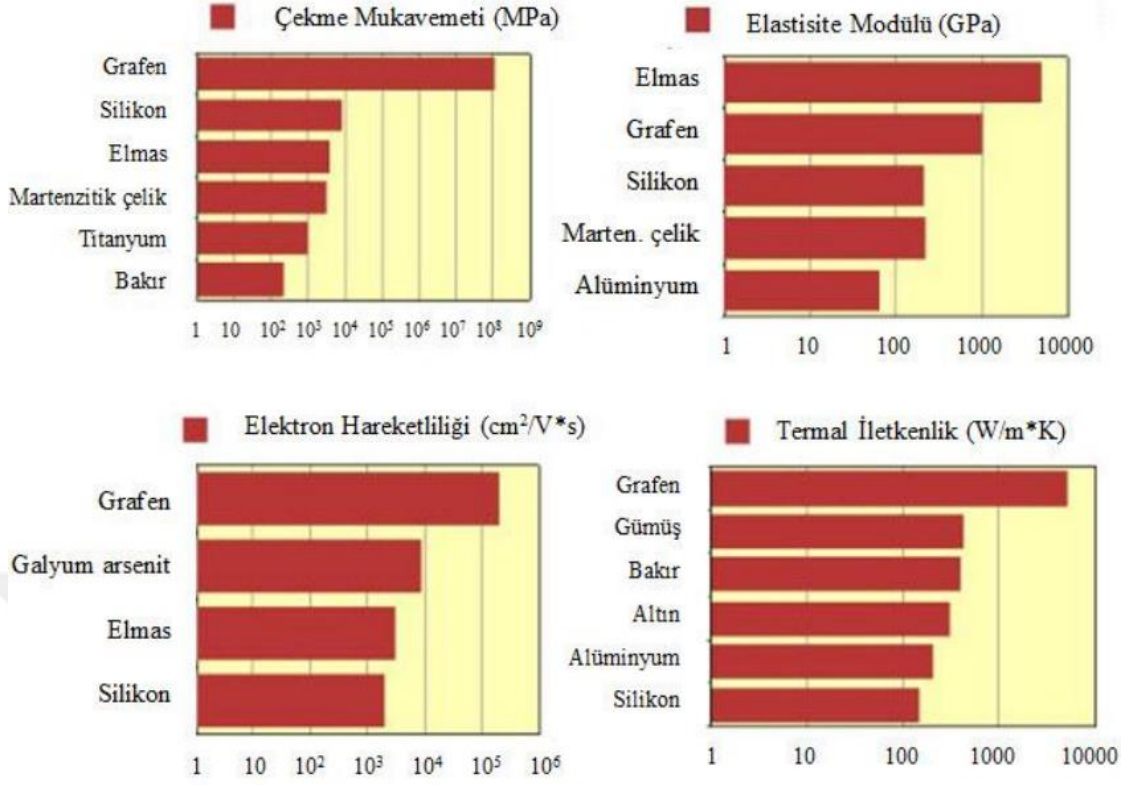
$$SE_T = 10 \log \frac{1}{|S_{12}|^2} = 10 \log \frac{1}{|S_{21}|^2} \quad (3.70)$$

olarak elde edilir (Chhetri, Samanta, Murmu, Srivastava ve Kuila, 2016).

3.7. Grafen Plakanın Modellenmesi ve SE Formülasyonu

3.7.1. Grafen ve özellikleri

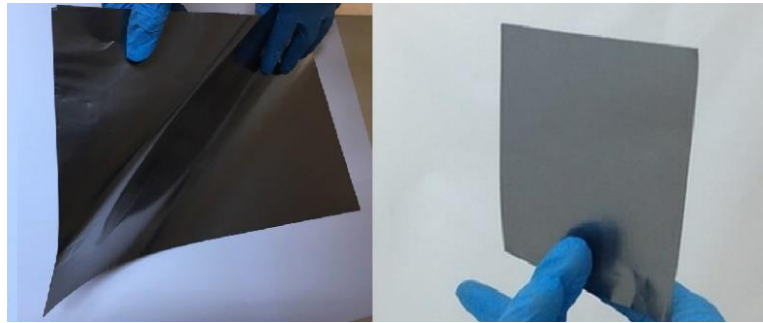
Grafen, karbon atomlarının altıgenlerden oluşan bal peteği örgü yapısında sıralanmasından elde edilen tek katmanlı bir yapıdır (Geim ve Novoselov, 2007). Grafenin atomik yapısı, ona olağanüstü elektriksel, optik, mekanik ve termal özellikler kazandırmaktadır. En çok ilgi çeken elektriksel özelliği ise yüksek elektron hareketliliği ve iyi iletkenliğidir. Grafene elektrik alan uygulanarak tüm elektron konsantrasyonu değiştirilip, tüm deşik ve elektronlar yük taşıyıcı olarak elde edilebilir (Geim ve Novoselov, 2007). Grafen; ultra hafifliği, mükemmel mekanik esnekliği, güçlü yapısı ve iyi iletkenliği nedeniyle son on yılda birçok farklı araştırma alanında popüler bir malzeme haline gelmiştir (Eswaraiah, Sankaranarayanan, Mishra ve Ramaprabhu, 2010). Grafen, yarıiletken devre elemanı üretiminden, radyo frekansı uygulamalarına; ince film elektrotlardan, sensör malzemelerine kadar birçok alanda kullanılabilir. Grafen, dijital teknolojide önemli bir noktada bulunan silisyum, grafen ile karşılaştırıldığında, elektronların silisyum içindeki hızlarının, grafen içindeki hızlarına göre 100 kat daha yavaş olduğu tespit edilmiştir. Grafenin elektrik özellikleri bu sıra dışı malzemenin tek olağanüstü özelliği değildir. Bilinen en ince malzeme olmasının yanında, güçlü karbon bağları, grafeni bilinen en güçlü malzeme yapmaktadır. Şekil 3.6'da verildiği üzere, grafenin elastisite modülü, çelikten yaklaşık 100 kat daha fazla olup, ısıyı iyi iletmediği düşünülen diğer bir karbon allotropu olan elmasan daha iyi bir ısı iletkenidir. Ayrıca grafen, kolayca esneyebilmekte ve değişik formlardaki birçok malzemenin yüzeyine kolayca kaplanabilmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı grafen, dünyada çok önemli değişikliklere sebep olabilecek bir malzeme olarak görülmektedir (Başçı, 2015).



Şekil 3.6. Grafenin diğer malzemeler ile kıyaslanması (Başçı, 2015)

3.7.2. Grafen plakanın modellenmesi

İdealde tek bir grafen tabakanın kalınlığı 0,335 nm yani bir atom kalınlığı kadardır (Geim ve Novoselov, 2007). Pratikte ise grafen tabakaların üst üste dizilmesiyle oluşturulan grafen plakalar kullanılmaktadır. Şekil 3.7’de piyasada satılan bir grafen plakaya ilişkin görseller yer almaktadır. Grafen plakanın teknik özellikleri ise Çizelge 3.3’te belirtilmiştir.



Şekil 3.7. Grafen plaka (“Grafen Plaka”, 2020)

Çizelge 3.3. Grafen plakanın teknik özellikleri (“Grafen Plaka”, 2020)

Parametre	Değer
Boyut (cm)	29 x 29
Kalınlık (μm)	35
Termal İletkenlik (W/mK)	580
Yoğunluk (gr/cm^3)	1,82
Çekme Direnci (MPa)	10,5
Elektrik İletkenliği (S/cm)	3750
Sıcaklık (K)	300

Grafen içinde, gelen fotonun enerjisine bağlı olarak iki tip bant geçişi mümkündür: Foton enerjisi $2E_F$ 'den düşük ise bant içi geçiş mümkün iken, $2E_F$ 'den büyükse bantlar arası geçiş baskındır. Bu geçişlerin etkileşimi grafenin optik tepkisini oluşturur (Yan ve diğerleri, 2017).

Grafenin yüzey iletkenliği σ_{gr} , her iki taraftan iletken olan, son derece ince bir izotropik yüzey olarak modellenebilir. Cruciani ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmada grafenin yüzey iletkenliği, Kubo formülü kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\sigma_{gr}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \sigma_{inter} + \sigma_{intra} \quad (3.71)$$

Burada σ_{inter} bantlar arası geçiş ve σ_{intra} ise bant içi geçiş katkısını belirtmektedir. Bu iki ifade sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\sigma_{inter}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left(\frac{2|\mu_c| - (\omega - 2j\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - 2j\Gamma)\hbar} \right) \quad (3.72)$$

$$\sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - 2j\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right] \quad (3.73)$$

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, ω açısal frekans, h Planck sabiti olmak üzere $\hbar = h/2\pi = 1,0546 \times 10^{-34}$ J olarak ifade edilmektedir. μ_c , kimyasal katkılama

veya bias gerilimi ile kontrol edilebilen, elektron Volt (eV) cinsinden kimyasal potansiyeli; Γ ise saçılma oranını belirtmektedir (Cruciani ve diğerleri, 2015).

Düşük THz frekanslarında $\omega < 2\mu_c/\hbar$ olduğundan σ_{inter} ihmal edilebilir ve grafen yüzey iletkenliği, σ_{intra} cinsinden tanımlanabilir (Cruciani ve diğerleri, 2015). Grafen yüzey iletkenliği, DC grafen yüzey iletkenliği σ_0 cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma_{gr}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{\sigma_0}{1 + j\omega\tau} \quad (3.74)$$

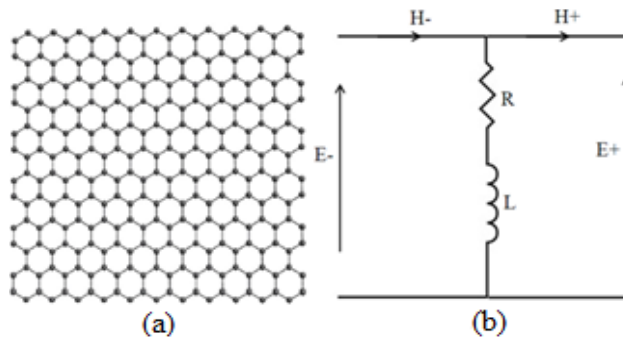
Burada $\tau = \hbar/(2\Gamma) = 0,329/\Gamma$ olarak tanımlanmıştır (D'Aloia ve diğerleri, 2015). Γ meV, τ ise ps cinsinden tanımlanır. Bu durumda denklem (3.73) kullanılarak σ_0 aşağıdaki gibi elde edilir (Cruciani ve diğerleri, 2015).

$$\sigma_0(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -j \frac{e^2 \tau k_B T}{\pi \hbar^2} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right] \quad (3.75)$$

Grafen, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi basit bir RL dalından oluşan şönt admitansı Y_s

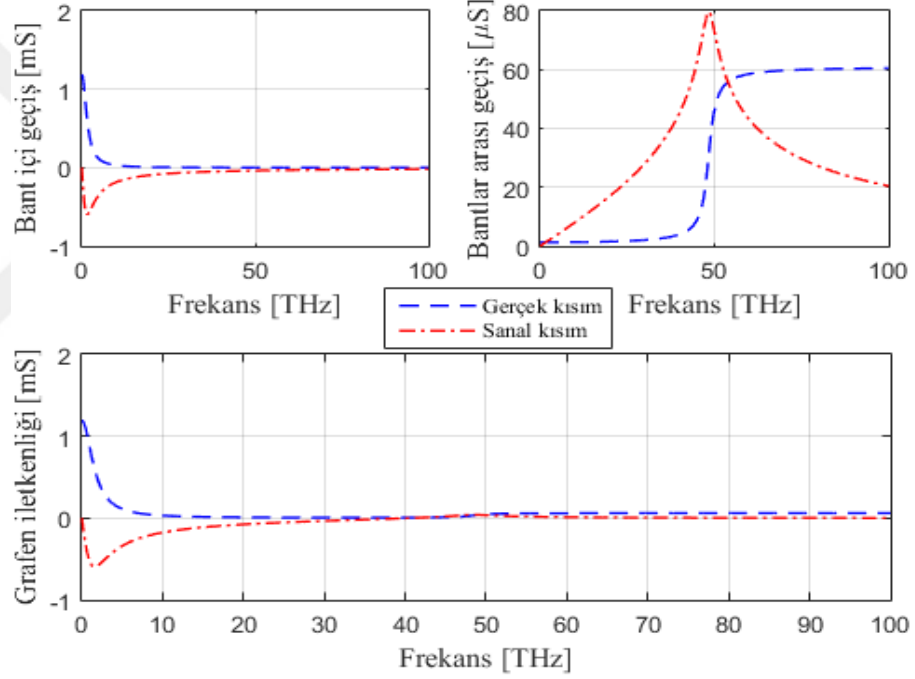
$$Y_s = \frac{1}{R + j\omega L} \quad (3.76)$$

gibi tanımlanabilir. Burada $R = 1/\sigma_0$ ve $L = \tau/\sigma_0$ olarak grafenin yüzey iletkenliğini modellemek için kullanılabilir.



Şekil 3.8. a) Grafen konfigürasyonu b) Grafen eşdeğer devresi

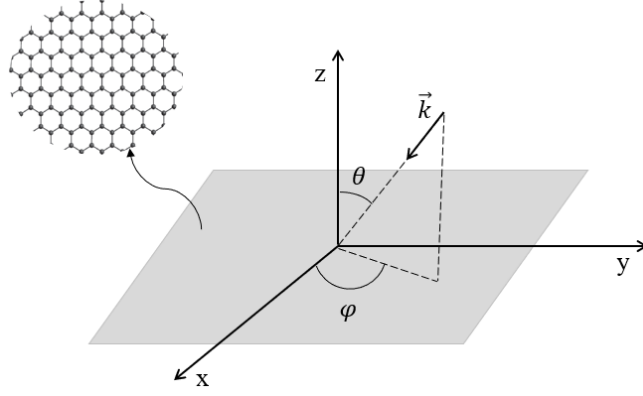
Grafen kimyasal potansiyeli μ_c , 0-1 eV aralığında bir değer almaktadır (Sharma ve Dominic, 2018). Mikrodalga frekanslarında ise μ_c 0,05-0,15 eV aralığında pratik uygulamalarla uyumlu olacak şekilde tanımlanır (Bozzi, Pierantoni ve Bellucci, 2015). Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, $\mu_c = 0,1$ eV olarak alınmıştır. Denklem (3.71)'de tanımlanan 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, Zhang, Chengguo, Wu ve He, 2018). Bu parametreler, pratikte kullanılan grafen plaka ile uyumlu olacak şekilde tanımlanmıştır. Grafenin yüzey iletkenliğindeki bantlar arası ve bant içi geçiş katkılarının etkisi Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Grafenin bant içi ve bantlar arası geçiş katkıları

Şekil 3.9'da mikrodalga frekanslarından THz frekanslarına kadar olan geniş bir bantta grafen iletkenliği için bant içi geçiş katkısının önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir. 10 THz'ten sonra grafenin bantlar arası geçiş katkısı grafen iletkenliğine etki etmektedir. Tez kapsamında 0-2 GHz aralığında çalışmalar gerçekleştirildiğinden, grafen bant içi geçiş katkısından faydalanılmıştır. EK 1'de grafen iletkenliğine ilişkin kaynak kodları ve 0-2 GHz aralığındaki grafen iletkenliği gösterilmiştir.

Grafenin elektriksel davranışının anlaşılması için denklem (3.77)'de verilen anizotropik iletkenlik $\underline{\sigma}$ ile iki hava bölgesini ayıran, $z = 0$ düzlemi üzerinde yer alan ve sonsuz incelikte olan iletken bir tabaka ele alınır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Bir grafen tabakasına gelen düzlem dalga

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Düzgün bir düzlem dalga Şekil 3.10'da gösterildiği gibi (θ, φ) 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 (Lovat, 2012). $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ serbest uzaydaki dalga sayısıdır. İletken tabakanın olduğu ortamda düzgülün düzlem dalga yayılımı ile düzgülün bir iletim hattı üzerinde gerilim ve akım dalgalarının yayılması arasındaki ilişki kullanılarak, temel TE_z ve TM_z polarizasyonları için ilgili teğetsel elektrik ve manyetik alanlar sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Celozzi ve diğerleri, 2008).

$$\vec{E}_\tau^{TE/TM}(x, y, z) = T(x, y) V^{TE/TM}(z) \vec{e}^{TE/TM} \quad (3.78)$$

$$\vec{H}_\tau^{TE/TM}(x, y, z) = T(x, y) I^{TE/TM}(z) \vec{h}^{TE/TM} \quad (3.79)$$

Burada $T(x, y) = e^{-j(k_x x + k_y y)}$ olup $V^{TE/TM}(z)$, $I^{TE/TM}(z)$ ise k_z yayılma sabiti ile TE ve TM iletim hattının çözümleridir.

TE ve TM çözümleri için karakteristik admistanlar,

$$Y_o^{TE} = \frac{n_z}{\eta_0} \quad (3.80)$$

$$Y_o^{TM} = \frac{1}{n_z \eta_0} \quad (3.81)$$

olarak tanımlanır (Celozzi ve diğerleri, 2008). Burada η_0 serbest uzayın dalga empedansıdır. $\vec{e}^{TE/TM}$ ve $\vec{h}^{TE/TM}$ vektörleri ise sırasıyla,

$$\vec{e}^{TE} = \frac{-n_y \hat{a}_x + n_x \hat{a}_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \quad (3.82)$$

$$\vec{h}^{TE} = \frac{-n_x \hat{a}_x + n_y \hat{a}_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \quad (3.83)$$

$$\vec{e}^{TM} = -n_z \frac{n_x \hat{a}_x + n_y \hat{a}_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \quad (3.84)$$

$$\vec{h}^{TM} = n_z \frac{n_y \hat{a}_x - n_x \hat{a}_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \quad (3.85)$$

şeklinde tanımlanır (Celozzi ve diğerleri, 2008).

Anizotropik iletken levhanın eşdeğer devresini türetmek için levhadaki sınır koşullarının aşağıdaki gibi sağlanması gerekmektedir.

$$\hat{a}_z \times [\vec{E}_\tau(x, y, 0^+)] = \hat{a}_z \times [\vec{E}_\tau(x, y, 0^-)] \quad (3.86)$$

$$[\vec{E}_\tau(x, y, 0^+)] = [\vec{E}_\tau(x, y, 0^-)] = [\vec{E}_\tau(x, y, 0)] \quad (3.87)$$

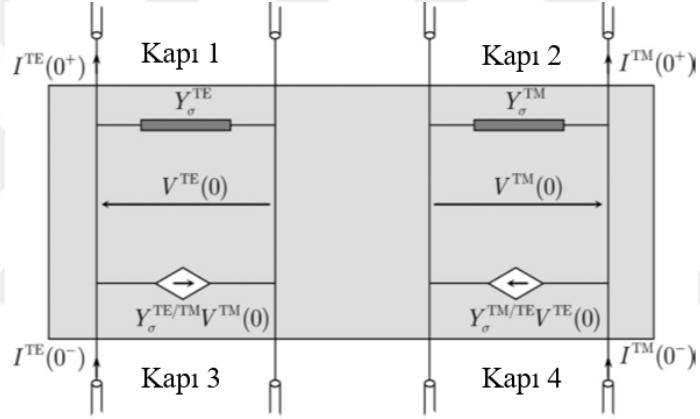
$$\hat{a}_z \times [\vec{H}_\tau(x, y, 0^+) - \vec{H}_\tau(x, y, 0^-)] = \underline{\sigma} \cdot \vec{E}_\tau(x, y, 0) \quad (3.88)$$

Denklem (3.77)'de verilen anizotropik iletkenlik $\underline{\sigma}$ denklem (3.88)'de yerine yazılırsa

$$\vec{H}_\tau(x, y, 0^+) - \vec{H}_\tau(x, y, 0^-) = \sigma_{xx} \cdot \vec{E}_x(x, y, 0) + \sigma_{xy} \cdot \vec{E}_y(x, y, 0) \quad (3.89)$$

$$\vec{H}_\tau(x, y, 0^+) - \vec{H}_\tau(x, y, 0^-) = \sigma_{yx} \cdot \vec{E}_x(x, y, 0) + \sigma_{yy} \cdot \vec{E}_y(x, y, 0) \quad (3.90)$$

elde edilir. Sınır koşullarının tanımlanması için elde edilen bu denklemler kullanılarak Şekil 3.11'de verilen grafen eşdeğer devre modelindeki gerilim ve akımlar elde edilebilir.



Şekil 3.11. Grafen eşdeğer devre modeli (Lovat, 2012)

Elde edilen eşdeğer devre modelini basitleştirmek için grafenin izotropik davranışı

$$Y_\sigma^{TE} = Y_\sigma^{TM} = \sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) \quad (3.91)$$

$$Y_\sigma^{TE/TM} = -Y_\sigma^{TM/TE} = 0 \quad (3.92)$$

denklemleriyle tanımlanır. Bu durum sadece THz mertebesinde düşük frekanslardaki grafen davranışı için geçerlidir. Gelen düzlem dalga TE polarize olmuş ise Şekil 3.11'de kapı 1'e $V^{inc}(z) = V_0^{inc} e^{jk_z z}$ şeklinde bir gelen gerilim mevcuttur. Sadeleşen eşdeğer devre elemanları sırasıyla denklem (3.93) ve (3.94)'teki gibi ifade edilir.

$$Y_{tot}^{TE} = Y_o^{TE} + Y_\sigma^{TE} = Y_o^{TE} + \sigma_{intra} \quad (3.93)$$

$$V^{TE}(0) = (1 + \Gamma^{TE})V^{inc} = \left(1 + \frac{Y_o^{TE} - Y_{tot}^{TE}}{Y_o^{TE} + Y_{tot}^{TE}}\right)V_0^{inc} = \frac{2Y_o^{TE}}{Y_o^{TE} + Y_{tot}^{TE}}V_0^{inc} \quad (3.94)$$

TE polarizasyonu için gelen dalga denklemi, aşağıdaki gibi tanımlanır (Lovat, 2012).

$$\vec{E}_{TE}^{inc}(r) = T(x, y)V_0^{inc} e^{jk_z z} \vec{e}^{TE} \frac{2Y_o^{TE}}{Y_o^{TE} + Y_{tot}^{TE}} \quad (3.95)$$

Gelen dalganın grafen tabakaya dik olması durumu ($\theta = 0$) için $Y_o^{TE} = 1/\eta_0$ olup $T(r)$ iletim katsayısı,

$$T(r) = \frac{|E(r)|}{|E^{inc}(r)|} = \left| \frac{2Y_o^{TE}}{Y_o^{TE} + Y_{tot}^{TE}} \right| = \frac{2}{|2 + \sigma_{intra}\eta_0|} \quad (3.96)$$

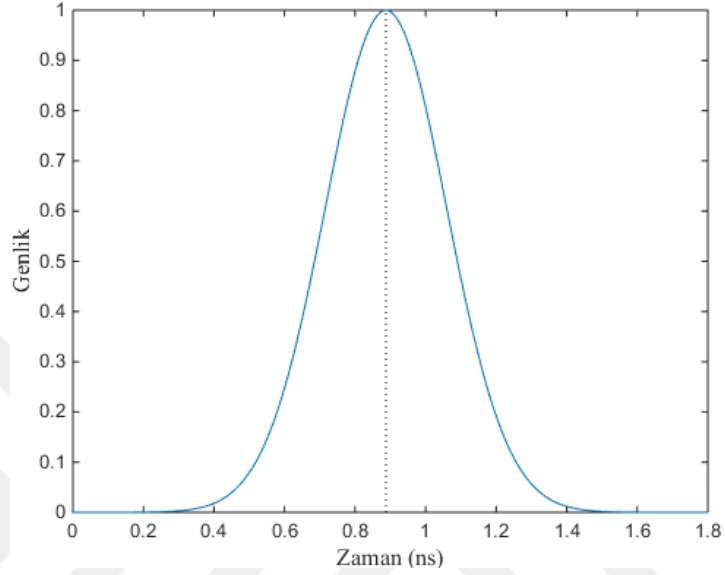
olarak elde edilir. Grafen tabakanın SE değeri ise aşağıdaki gibi tanımlanır (Lovat, 2012).

$$SE(r) = -20 \log T(r) \quad (3.97)$$

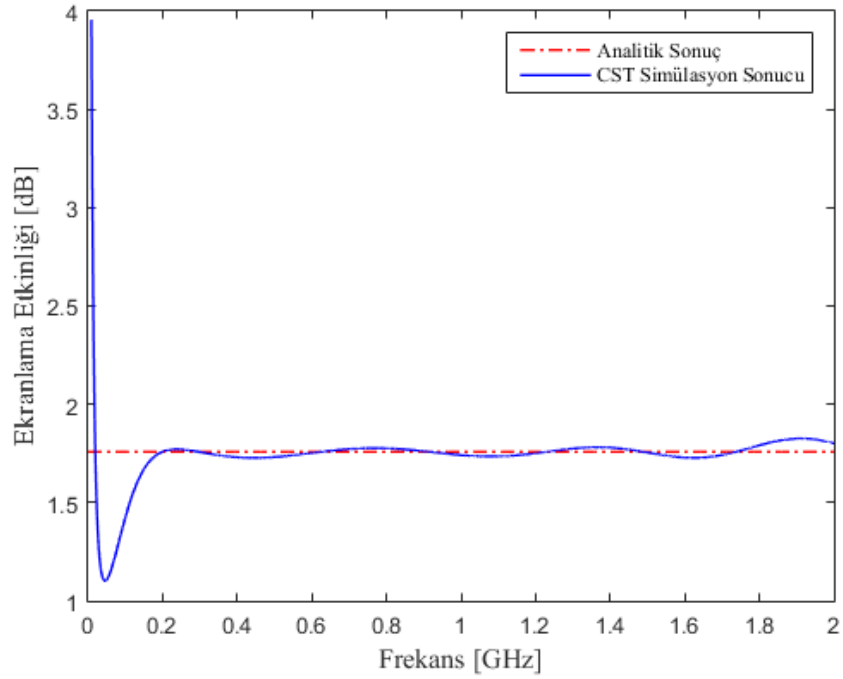
0,335 nm kalınlıkta bir grafen tabakanın ekranlama etkinliği davranışı için denklem (3.97)'de verilen analitik formülasyon ile CST simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 3.13). Analizler 0-2 GHz aralığında gerçekleştirilmiş olup CST'de 11853 adet hücreden (tetrahedron) oluşan bir model oluşturulmuştur. Problem uzayında grafen plakanın dışında kalan ortam $\sigma = 0$ S/m serbest uzay olarak tanımlanmıştır. Grafen tabakanın eni ve boyu 1 m olarak modellenmiştir. Analitik formülasyonda ise grafen tabakanın sonsuz büyüklükte düzlemsel yapıdan oluştuğu kabulü yapılmıştır. TE uyarımında grafen tabakaya bir Gauss geçici düzlem dalgası ($\vec{k} = k\hat{a}_z$, $\vec{E} = E_y\hat{a}_y$) uygulanmıştır. Gauss düzlem dalgası, pozitif dikey eksen boyunca genliği zaman içinde basamak fonksiyonu olarak değişen elektrik alan polarizasyonuna sahiptir. CST simülasyonunda elektrik alan için kullanılan, zamana bağlı Gauss darbesi uyarma fonksiyonu denklem (3.98)'de verilmiştir (Chen ve Wang, 2007).

$$E_y(t) = \exp[-\alpha (t - t_0)^2] \quad (3.98)$$

Burada $\alpha = 1,72 \times 10^{10} \text{ s}^{-2}$, $t_0 = 0,88710^{-9} \text{ s}$ olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.12’de Gauss darbesi uyarma sinyali gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Gauss darbesi uyarma sinyali



Şekil 3.13. 0,335 nm kalınlığında grafen tabakanın ekranlama etkinliği

Şekil 3.13'ten 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.

N adet tabakadan oluşan grafen plakalar için yüzey iletkenliğinde bant içi ve bantlar arası geçiş katkıları sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir (Du, Hao ve Li, 2014; Wang, Shi ve Liu, 2018).

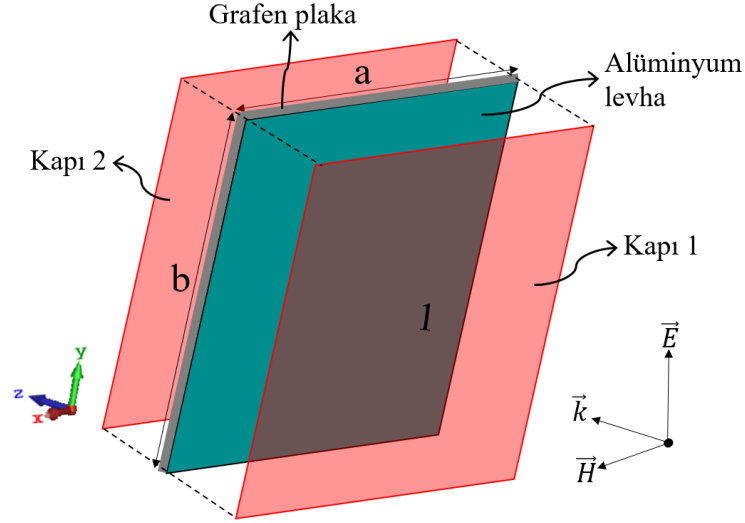
$$\sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -Nj \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - 2j\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right] \quad (3.99)$$

$$\sigma_{inter}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -Nj \frac{e^2}{4\pi \hbar} \ln \left(\frac{2|\mu_c| - (\omega - 2j\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - 2j\Gamma)\hbar} \right) \quad (3.100)$$

3.7.3. Grafen plaka kaplı alüminyum levhanın modellenmesi

Şekil 3.14'te $t = 0,1$ mm kalınlığında, $a = b = 1$ m boyutlarında alüminyum levhanın SE_R yansıma kaybı değeri analitik formülasyon ile elde edilmiş ve CST simülasyonu ile doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Sonra, alüminyum levhanın arka yüzeyi $q = 35$ μm kalınlığında grafen plaka ile kaplanarak SE_R üzerindeki değişim incelenmiştir.

Analitik formülasyon için levhaya uygulanan düzlem dalga ($\vec{k} = k\hat{a}_z$, $\vec{E} = E_y\hat{a}_y$) gösterilmiştir (Şekil 3.14). Problem uzayında alüminyum levha için elektrik iletkenliği $\sigma = 3,56 \times 10^7$ S/m, dışında kalan yerler için ise $\sigma = 0$ S/m serbest uzay olarak tanımlanmıştır. Serbest uzayın manyetik geçirgenliği $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m ve alüminyum için bağlı manyetik geçirgenlik $\mu_r = 1$ olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.14. Grafen plaka kaplı alüminyum levha

Tek katlı alüminyum levhanın yansımaya kaybı, denklem (3.50) kullanılarak

$$SE_R = 20 \log_{10} \frac{|Z_W|}{4|Z_S|} = 20 \log_{10} \frac{94,25}{|Z_{Al}|} \quad (3.101)$$

şeklinde elde edilir. Burada $Z_W = Z_0 = 377 \Omega$ serbest uzayın karakteristik empedansına eşittir. Z_{Al} empedansı, alüminyumun σ ve μ değerlerinin denklem (3.49) içinde kullanılmasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Z_{Al} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} (1 + j) = 3,30 \cdot 10^{-7} \sqrt{f} (1 + j) \quad (3.102)$$

Denklem (3.102)'nin, (3.101)'de yerine yazılmasıyla, yansımaya kaybı analitik olarak

$$SE_R = 20 \log_{10} \frac{94,25}{|Z_S|} = 20 \log_{10} \left(\frac{20,05 \cdot 10^7}{\sqrt{f}} \right) \quad (3.103)$$

şeklinde elde edilir.

Alüminyum levhanın arka yüzeyi $q = 35 \mu\text{m}$ kalınlığında grafen plaka ile kaplandığında, SE_R üzerindeki değişimin analitik olarak incelenmesi için denklem (3.60) kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$SE_R = 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Z_{Al}}{Z_0}\right|}{2} + 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Z_{grafen}}{Z_{Al}}\right|}{2} + 20\log_{10} \frac{\left|1 + \frac{Z_0}{Z_{grafen}}\right|}{2} \quad (3.104)$$

Z_{grafen} empedansı, grafenin σ ve μ değerlerinin denklem (3.49) içinde kullanılmasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır.

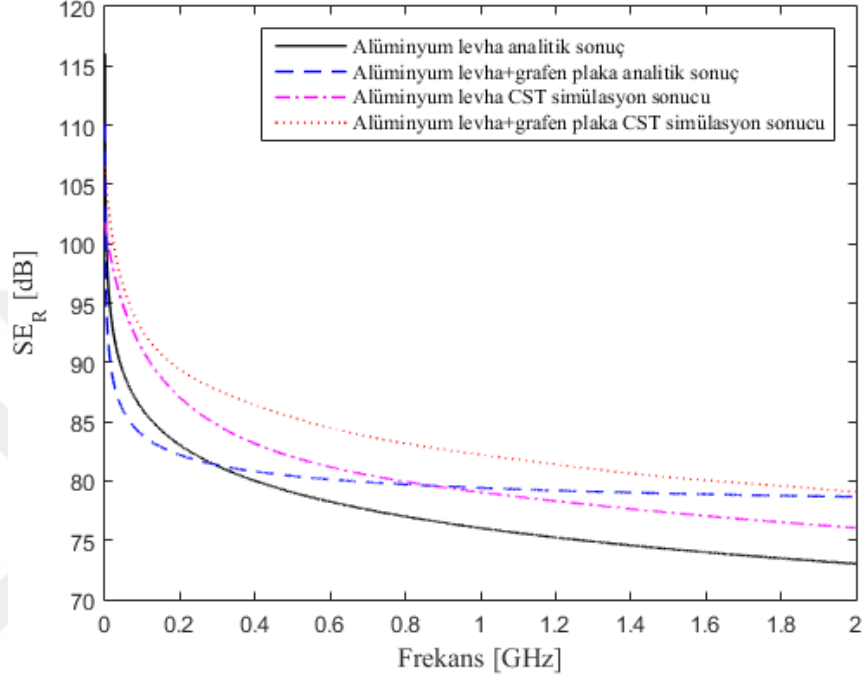
$$Z_{grafen} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r}{2\sigma_{intra}}} (1 + j) \quad (3.105)$$

Burada, grafen plakanın bağıl manyetik geçirgenliği $\mu_r = 1$ olarak tanımlanmıştır (Wang, Luo ve Zhao, 2013). 0-2 GHz frekans aralığı için denklem (3.73)'te verilen grafen bant içi geçiş katkısı σ_{intra} kullanılmıştır.

SE_R 'nin nümerik olarak elde edilmesi için CST'de $t = 0,1 \text{ mm}$ kalınlığında, $a = b = 1 \text{ m}$ boyutlarında ve 2032 adet hücreden oluşan bir alüminyum levha modeli oluşturulmuştur. Modele ilişkin S parametrelerinin elde edilmesi için kapı 1 ve kapı 2 kaynakları levhadan 30 cm uzakta konumlandırılmıştır (Lee ve diğerleri, 2016; Abdulla, 2016). 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 zamana bağlı Gauss darbesi uyarma fonksiyonu kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.12).

Tek katlı alüminyum levha için SE_R yansıma kaybı, analitik olarak denklem (3.103) ile elde edilmiştir. Bu yapı için gerçekleştirilen CST simülasyonu ile elde edilen S_{11} parametresinin, denklem (3.68) içinde kullanılmasıyla SE_R nümerik olarak elde edilmiş ve analitik sonuçla karşılaştırılmıştır (Şekil 3.15). Sonra, alüminyum levhanın arka yüzeyi $q = 35 \mu\text{m}$ kalınlığında grafen plaka ile kaplanmış ve oluşturulan iki katlı ekran için

SE_R denklem (3.104) ile analitik olarak elde edilmiştir. İki katlı ekran için CST simülasyonu ile elde edilen S_{11} parametresinin, denklem (3.68) içinde kullanılmasıyla SE_R nümerik olarak elde edilmiş ve Şekil 3.15'teki gibi analitik sonuçla karşılaştırılmıştır. SE_R hesaplaması için kullanılan kaynak kodlar EK 2'de verilmiştir.



Şekil 3.15. Grafen plakasının yansıma kaybı üzerindeki etkisi

Şekil 3.15'teki sonuçlara göre simülasyon sonucu ile analitik sonuç arasında yaklaşık 3-4 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 elde edilmiştir. Bu durum, ekranlama kutularının SE değerlerinin artırılmasında ince grafen plakaların kullanılabileceğini göstermektedir.

3.8. Ekranlama Kutuları için Analitik SE Formülasyonu

Elektrikli araçlardaki elektronik ekipmanların ekranlama kutularına ilişkin tasarım aşamasında, SE analizlerinde kullanılabilecek birçok analitik ve nümerik yöntem bulunmaktadır. FDTD, MoM, TLM ve hibrit yöntemler sıklıkla kullanılan nümerik yöntemlerdendir. Nümerik yöntemler, büyük miktarda veri kullandıkları için daha doğru

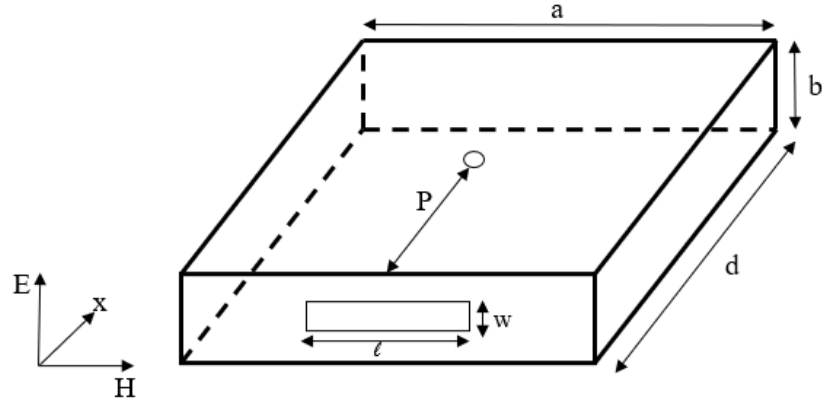
simülasyon sonuçları sağlayabilir. Bununla birlikte, büyük bellek maliyeti, daha uzun hesaplama süresi, ayrıntılı geometrik tanımlamalar gerektirmeleri gibi bazı dezavantajları vardır. Analitik yöntemler ise kısa bir süre içinde basit geometrilere uygulanabilirler; ancak fiziksel durum derinlemesine ele alınmadıkça kararlılık problemleri yaratabilecek çeşitli varsayımlar kullanırlar.

Bu bölümde öncelikle Robinson ve diğerleri (1998) tarafından önerilen analitik modelden faydalanarak, metalik dikdörtgen bir ekranlama kutusunun üzerinde açıklık olması durumu için SE analitik formülasyonu verilmiştir. Metalik kutu, TE_{10} yayılım uyarımına sahip dalga kılavuzu olarak kabul edilmiştir. Elektrik ekranlama etkinliği frekans, kutu boyutu, açıklık boyutu, kutu duvar kalınlığı, kutu uzaklık pozisyonu verilerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Kutu ve açıklık boyutlarının değişimiyle SE'nin değişimi ile ilgili sonuçlar tezin dördüncü bölümü olan bulgular ve tartışma kısmında incelenmiştir.

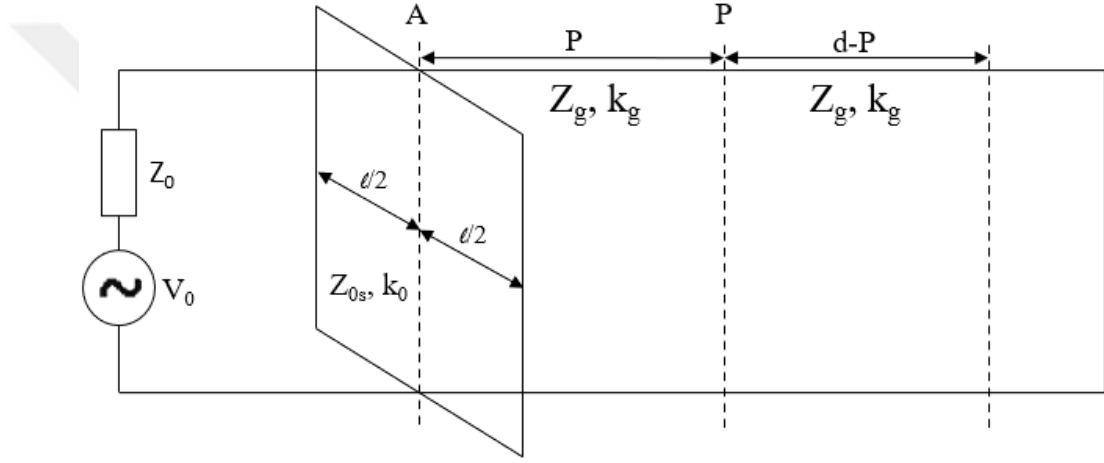
3.8.1. İletim hattı teorisi yaklaşımı

Elektronik ekipmanın ekranlama kutusu üzerinde kablo girişi, konnektör bağlantısı, havalandırma deliği gibi ihtiyaçlardan dolayı açıklık bulunmaktadır. Ekranlama kutusu yüzeyindeki açıklık alanının EMC gerekliliklerini sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bununla birlikte, konnektör ve kablo girişleri için kullanılacak açıklıkların pratikte kolay uygulanabilecek şekillere sahip olmaları önemlidir.

Üzerinde dikdörtgen açıklık bulunan ekranlama kutusu Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Dikdörtgen kutu mükemmel iletken olarak ele alınmış ve bir düzlem dalga ile uyarıldığı kabul edilmiştir. P noktası gözlem noktası olarak ele alınmıştır. Ekranlama kutusunun eşdeğer devre modeli ise Robinson ve diğerleri (1998) tarafından yapılan çalışma dikkate alınarak Şekil 3.17'deki gibi gösterilmiştir. P uzaklığındaki elektrik ekranlama etkinliği, eşdeğer devrede P noktasındaki gerilimden elde edilmektedir. Kaynağın etkisi V_0 gerilimi, $Z_0 = 377 \Omega$ empedansı ve $k_0 = 2\pi/\lambda$ yayılma sabiti ile gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Üzerinde açıklık bulunan ekranlama kutusu



Şekil 3.17. Üzerinde açıklık bulunan ekranlama kutusunun eşdeğer devresi

Ekranlama kutusuyla ilgili olarak, kısa devre olan dalga kılavuzuna ait karakteristik empedans Z_g ve yayılım sabiti k_g ile gösterilmektedir. Öncelikle açıklık için eşdeğer bir empedans bulunup, ardından P noktasındaki gerilimi ve empedansı hesaplamak için iletim hattı teorisinden faydalanılmıştır.

Analitik yöntemde açıklık, her iki uçta kısa devre olan bir düzlemsel şerit iletim hattının uzunluğu olarak temsil edilir. Bu durum, sadece ekranlama kutusunun ön yüzündeki iletim hattı akımlarının dikkate alınması gerektiği anlamına gelir. Açıklığa ait iletim hattı karakteristik empedansı Z_{0s} , denklem (3.106) takip edilerek elde edilmiştir (Gupta, Garg, Bahl ve Bhartia, 1979).

$$Z_{0S} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt[4]{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1} \quad (3.106)$$

Burada w_e açıklığın efektif uzunluğu olup, pratik uygulamalarda $w_e < b/\sqrt{2}$ yaklaşımı kabul edilir (Robinson ve diğerleri, 1998). Ekranlama kutusunun duvar kalınlığı t ile ifade edilir ve aşağıdaki gibi efektif açıklık uzunluğunu tanımlamada kullanılır.

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right) \quad (3.107)$$

A noktasındaki Z_{ap} açıklık empedansı ise, açıklığın merkezinden $l/2$ mesafede yer alan uçlarına kısa devre uygulanıp

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} j Z_0 \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (3.108)$$

olarak ifade edilmiştir (Robinson ve diğerleri, 1998).

3.8.2. Ekranlama etkinliği formülasyonu

Thevenin teoreminden yola çıkarak Z_0 , V_0 ve Z_{ap} bileşiminden V_1 eşdeğer gerilimi ve Z_1 kaynak empedansı sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir (Robinson ve diğerleri, 1998).

$$V_1 = V_0 \left(\frac{Z_{ap}}{Z_{ap} + Z_0} \right) \quad (3.109)$$

$$Z_1 = V_0 \left(\frac{Z_{ap} Z_0}{Z_{ap} + Z_0} \right) \quad (3.110)$$

TE₁₀ modu yayılma için, dalga kılavuzu karakteristik empedansı ve yayılma sabiti

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (3.111)$$

$$k_g = k_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (3.112)$$

olarak ifade edilir (Robinson ve diğerleri, 1998).

V_1 , Z_1 ve dalga kılavuzu sonu P noktasına kısa devre dönüşümü uygulandığında eşdeğer gerilim, kaynak empedansı ve yük empedansı da sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos k_g p + j(Z_1/Z_g) \sin k_g p} \quad (3.113)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \tan k_g p}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan k_g p} \quad (3.114)$$

$$Z_3 = jZ_g \tan k_g (d - p) \quad (3.115)$$

Elektronik ekipmanın ekranlama kutusunun olduğu hesaplamada P noktasındaki gerilim aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Robinson ve diğerleri, 1998).

$$V_p = V_2 \left(\frac{Z_3}{Z_3 + Z_2} \right) \quad (3.116)$$

Ekranlama kutusunun olmadığı durumda ise P noktasındaki yük empedansı Z_0 'a eşit olup P noktasındaki gerilim $V_p' = V_0/2$ 'dir. Bu durumda elektrik ekranlama etkinliği S_E

$$S_E = -20 \log_{10} \left| \frac{v_p}{v_p'} \right| = -20 \log_{10} \left| \frac{2v_p}{v_0} \right| \quad (3.117)$$

olarak tanımlanır (Robinson ve diğerleri, 1998).

Kutu yüzeyinde n tane benzer açıklığın olduğu durumda açıklık empedanslarının seri olarak toplamından, toplam açıklık empedansı denklem (3.118)'deki gibi elde edilir.

$$Z_{ap} = n \frac{1}{2} \frac{l}{a} j Z_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (3.118)$$

Açıklıkların birbirine çok yakın olmasından kaynaklanan karşılıklı kuplaj etkisini formüle etmek analitik hesaplamada mümkün olmadığından ihmal edilmiştir.

3.9. Ekranlama Kutuları için Nümerik SE Modeli

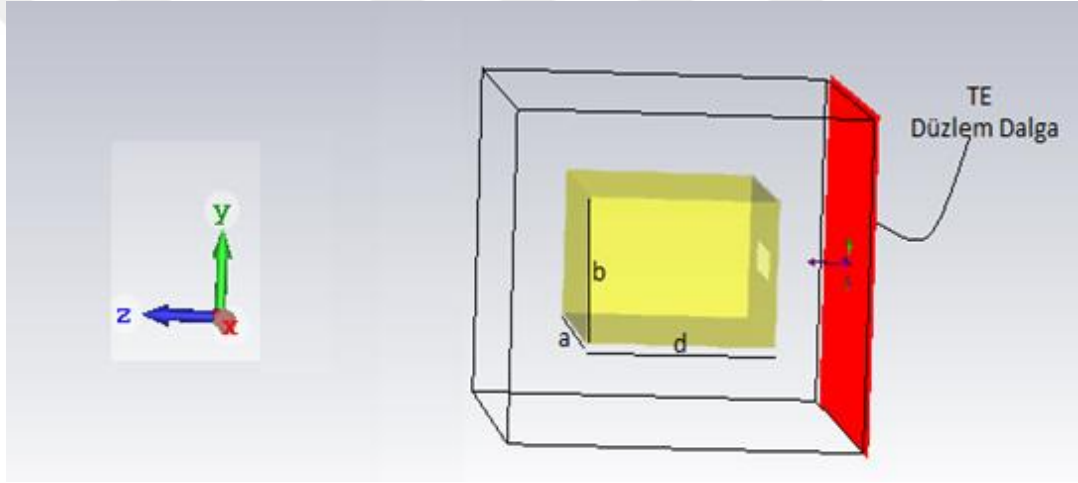
Fiziksel yapı basit olduğu sürece SE analizleri için analitik yöntemler kullanılabilir; fakat basit geometrilere dahi fiziksel durum derinlemesine ele alınmadığı takdirde çözüme ulaşmak oldukça güçleşebilir. Dahası, formülasyonu kısaltmaya yönelik yapılan bazı varsayımlar kararsızlık problemlerine sebep olabilmektedir. Bununla birlikte, ekranlama kutularına ilişkin profesyonel SE analizlerinde, yaygın olarak nümerik yöntem tabanlı ticari elektromanyetik çözücü programlarından faydalanılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında tasarlanan nümerik model için CST Studio Suite® 2019 programı kullanılmıştır. CST, FDTD yönteminin bir genellemesi olan ve Maxwell denklemlerinin uzamsal ızgaralar üzerinde ayrık gösterimi için tutarlı bir nümerik yöntem olarak belirtilen sonlu entegrasyon yöntemini (FIT) kullanarak simülasyonları gerçekleştirmektedir. FIT yöntemi, FEM yöntemiyle de benzerlik taşımaktadır (Er-ping, 2008). CST programında zaman domeni çözücüsü FDTD yöntemine, frekans domeni çözücüsü ise FEM yöntemine benzer şekilde çözümler gerçekleştirilmektedir.

CST'de ekranlama kutusu için 5526 adet hücreden (tetrahedron) oluşan bir nümerik model tasarlanmıştır. Nümerik modelde kutu boyutları $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm, ön yüzeyinin merkezine yerleştirilmiş dikdörtgen açıklığın boyutları ise $l = 100$ mm, $w = 10$ mm olarak tasarlanmıştır. Kutunun duvar kalınlığı $t = 2,5$ mm, kutu malzemesi alüminyum olarak alınmıştır. Nümerik modelde p gözlem noktası ekranlama kutusunun merkezine yerleştirilmiş olup SE değerini elde etmek için denklem (3.39)'da belirtildiği gibi kutu varken ve kutu yokken p noktasında hesaplanan elektrik alan değerleri kullanılmıştır.

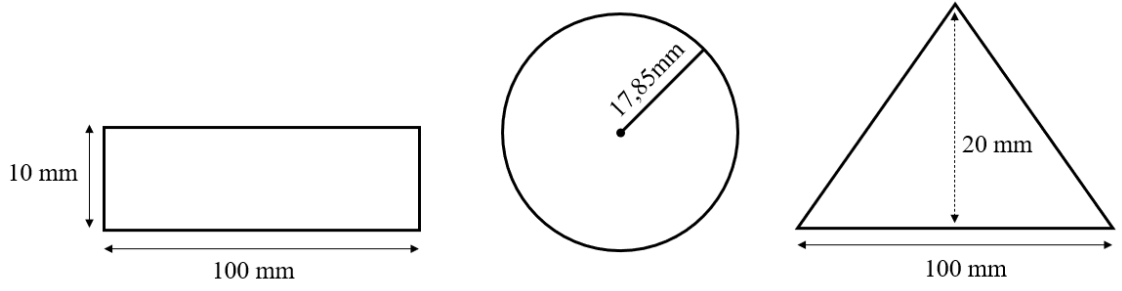
3.9.1. Farklı açıklık şekillerinin modele eklenmesi

Şekil 3.18’de farklı açıklık şekillerinin SE’ye etkisini incelemek üzere tasarlanan nümerik model ve TE uyarımda ekranlama kutusuna uygulanan Gauss geçici düzlem dalgası ($\vec{k} = k\hat{a}_z$, $\vec{E} = E_y\hat{a}_y$) gösterilmiştir. Gauss düzlem dalgası, pozitif dikey eksen boyunca genliği zaman içinde basamak fonksiyonu olarak değişen elektrik alan polarizasyonuna sahiptir. Elektrik alan için Gauss darbesi uyarma sinyali kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.12). Elektrik alan dağılımları, ekranlama kutusunun merkez 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.

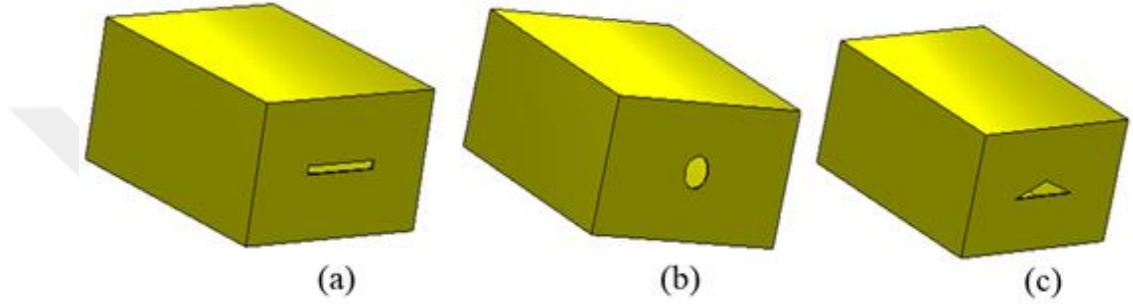


Şekil 3.18. Nümerik model ve TE uyarımda uygulanan düzlem dalgası

Otomotivde kullanılan elektronik ekipmanların ekranlama kutularında konnektör bağlantıları için sıklıkla dikdörtgen açıklık kullanılmaktadır. Bunun yanında daire ve üçgen şeklinde açıklık uygulamaları da vardır. Ekranlama kutusu boyutları $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm olan modelde, kutu ön yüzünün merkezine yerleştirilmiş, aynı açıklık alanına sahip (1000 mm^2); fakat farklı şekillerdeki açıklıklar Şekil 3.19’da gösterilmiştir. CST’de dikdörtgen, daire ve üçgen açıklığın olduğu durumlar sırasıyla 5526, 5831 ve 5427 adet hücreden oluşan modellerle analiz edilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.19. 1000 mm²'lik açıklığın farklı geometrilerde olması



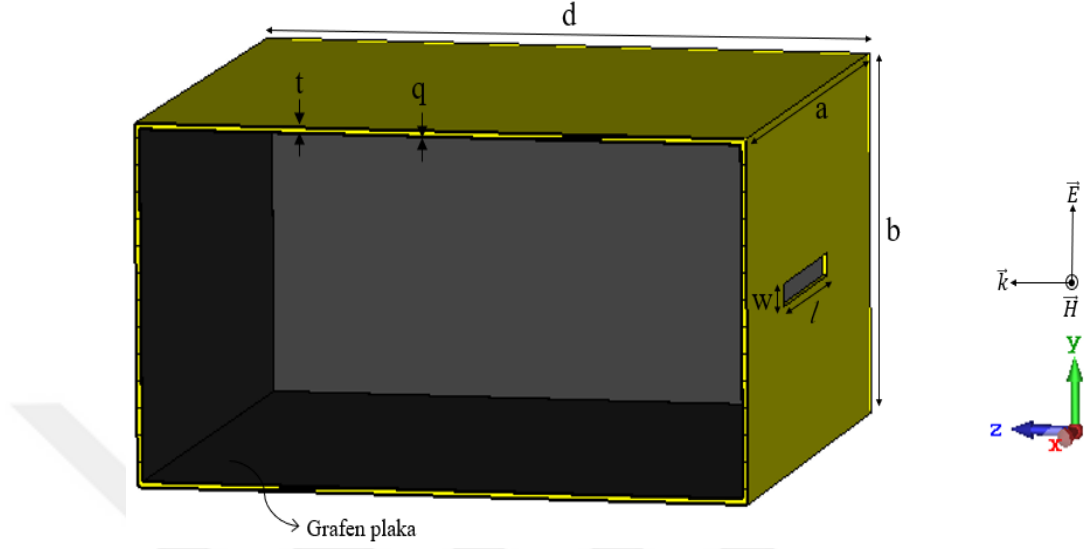
Şekil 3.20. Modelde kullanılan açıklık şekilleri a) Dikdörtgen b) Daire c) Üçgen

3.9.2. Grafen plaka kaplı ekranlama kutusunun modellenmesi

CST'de oluşturulan nümerik ekranlama kutusu modelinde (Şekil 3.21), Çizelge 3.3'te verilen değerler dikkate alınarak $q = 35 \mu\text{m}$ kalınlığında grafen plakalar kutu iç yüzeyini kaplayacak şekilde modellenmiştir. Grafen kimyasal potansiyeli μ_c , mikrodalga frekanslarında 0,05-0,15 eV aralığında pratik uygulamalarla uyumlu olacak şekilde tanımlanır (Bozzi ve diğerleri, 2015). Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, $\mu_c = 0,1 \text{ eV}$ olarak alınmıştır. Denklem (3.71)'de tanımlanan grafen yüzey iletkenliğini modellemek üzere belirtilmesi gereken diğer parametreler ise sıcaklık $T = 300 \text{ K}$, elektron gevşeme süresi $\tau = 0,1 \text{ ps}$ olarak tanımlanmıştır (Zhang ve diğerleri, 2018).

Şekil 3.21'de verilen ekranlama kutusu modelindeki boyutlar $a = 300 \text{ mm}$, $b = 160 \text{ mm}$, $d = 310 \text{ mm}$, $t = 2,5$ olarak tanımlanmıştır. İç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusu için ön yüzeyindeki açıklığın dikdörtgen, daire ve üçgen olmasına göre SE üzerindeki değişimler analiz edilmiştir. 1000 mm²'lik açıklık alanına sahip, farklı

geometrilereki açıklıklardan (Şekil 3.19) elde edilen bulgular Bölüm 4.2’de incelenmiştir.



Şekil 3.21. İçi grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun kesit görüntüsü

3.10. Sezgisel Algoritmalar

Yeni teknolojilerin ve ürünlerin geliştirilmesinde farklı disiplinlerin bir arada daha yakın çalışması gerekmektedir. Bu durum birçok parametreye ve farklı koşullara bağlı olan; matematiksel açıdan modellenmesi oldukça güç ve zaman alan yeni problemleri beraberinde getirir. Bu zor problemlerin iç matematiksel denklemleriyle uğraşmadan makul bir çözüm elde etmek için çeşitli yapay zeka ve sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Deterministik algoritmalar en uygun çözüme erişmek için uzun hesaplama sürelerine ihtiyaç duyduklarından, özellikle büyük ölçekli problemlerde kısa sürede kabul edilebilir bir sonuç elde etmek için rastlantısal arama tekniklerini içeren algoritmalarından faydalanılır. Sezgisel algoritmalarda kullanılan yaklaşımlar; sosyoloji, biyoloji, zooloji, fizik gibi bilimler temel alınarak türetilmiştir. Bu algoritmalarından en popüler olanları ise genetik algoritma (GA), diferansiyel gelişim algoritması (DGA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmasıdır (Öztürk, 2015).

GA, evrime dayalı biyolojik süreci modelleyen bir hesaplama tekniğiyle çözümleri elde eden bir algoritmadır. GA’lar türevsel bilgi gerektirmemesi, uygunluk fonksiyonunu

geniş bir aralıkta araştırması, birçok parametre ile aynı anda çalışmalar gerçekleştirilmesi gibi önemli avantajlara sahiptir (Güler ve Yenikaya, 2021).

DGA üreme, çaprazlama, mutasyon gibi GA ile aynı genetik operatörleri kullanmasına rağmen yapısı ve uygulanışı itibarıyla bazı farklılıklar göstermektedir. DGA özellikle sürekli değişkenlere sahip problemlerin çözümünde kullanılır. GA'dan farklı olarak tüm genetik operatörler popülasyon içindeki kromozomlara tek tek uygulanır ve yeni birey ile önceki bireyin hangisinin daha iyi olduğu belirlenerek sonraki nesle iyi olanın aktarılması sağlanır. DGA'da popülasyon $NP \times D$ dizi formunda tanımlanır. NP popülasyondaki amaç vektörlerinin sayısını, D ise bir amaç vektöründeki parametrelerin sayısını belirtmektedir (Öztürk, 2015).

PSO algoritması, kuşların sürü halinde toplanmasıyla ilişkilendirilmiş sosyolojik davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Başlangıç popülasyonunun rastgele belirlenmesi, uygun çözümü nesilleri güncelleyerek araştırmasından dolayı GA, DGA gibi sezgisel algoritmalarla benzerlikler taşımaktadır. Bununla birlikte çaprazlama ve mutasyon gibi operatörlerin uygulanmaması PSO'nun diğer algoritmalarından ayrılan özelliklerindedir. PSO'da parçacık popülasyonu, rastgele pozisyonlara yerleştirilmiş ve rastgele hızlarla başlatılmış bir popülasyon olarak oluşturulur. Her parçacık arama uzayında iki önemli etkene bağlı olarak değerlendirilir. Bunlardan biri parçacığın kendi en iyi pozisyonu, ikincisi ise tüm popülasyon içinde en iyi pozisyona sahip parçacığın pozisyonudur. Popülasyondaki tüm parçacıklar hız vektörleriyle en iyi pozisyona ulaşmaya çalışır (Öztürk, 2015).

3.11. Genetik Algoritma ile Açıklık Boyutlarını Belirleme

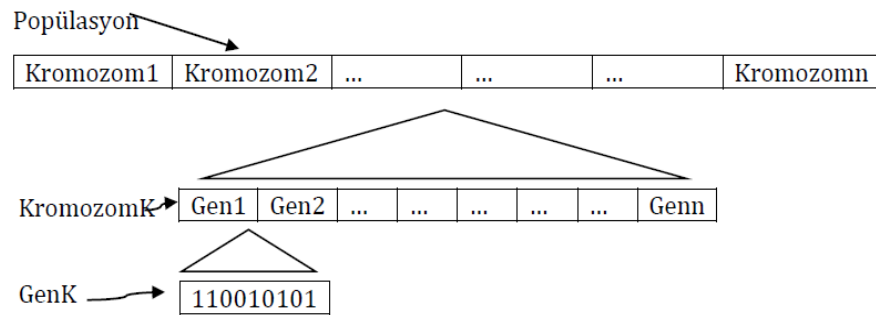
GA, popülasyon adı verilen ilk rastgele çözümler kümesinden, probleme ilişkin bir çözümü temsil eden kromozomların seçilmesiyle başlar. Üreme, çaprazlama, mutasyon gibi genetik operatörler uygulayarak kromozomların evrimleştiği birçok seçim süreci yinelemesinden sonra en iyi çözümü sunan kromozomu elde etmeyi amaçlamaktadır. Problemin iç matematiksel denklemleriyle uğraşmadan çözüme ulaşmasından dolayı GA'nın uygulanması, nispeten kolaydır (Güler ve Yenikaya, 2021). Matematiksel

denklem detayları üzerine kurgulanan bir algoritma olmadığından, GA farklı problemlere entegre edilebilir.

Tez çalışmasında, elektrikli araçlardaki evirici ekranlama kutusunun boyutları dikkate alınarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğinin artırılması ve aynı zamanda kutunun ön yüzeyinde yer alan açıklık alanının konnektör montajı gibi sebeplerle belli bir alandan büyük olmasını sağlayan GA tabanlı bir algoritma tasarlanmıştır.

GA'nın kromozom yapısındaki kendi başına birer genetik bilgi taşıyan en ufak yapı birimine gen adı verilir. Kısmi bilgiler taşıyan bu ufak yapıların bir araya gelmesiyle bütün bir çözüm kümesini oluşturan kromozom (dizi) meydana gelmektedir. Kromozomların bir araya gelmesiyle popülasyon oluşturulur. Kromozomlar, çözüme ait tüm bilgiyi taşıdıklarından GA içerisindeki en önemli birim olarak değerlendirilir ve bu yüzden iyi ifade edilmeleri gerekmektedir (Goldberg, 1989).

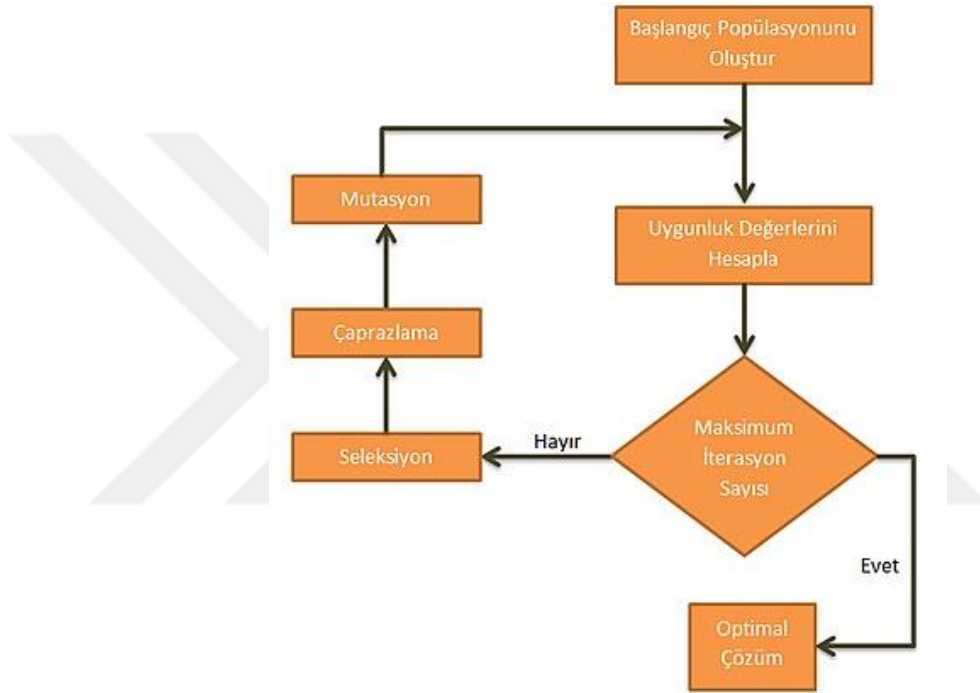
GA işlemleri sırasında, popülasyon içerisinde yer alan bazı kromozomlar yok olmakta ve yerlerine yeni kromozomlar oluşturularak popülasyon büyüklüğü sabitlenmektedir. Popülasyondaki fazla kromozom sayısı çözüm süresini uzatırken, az sayıda kromozom ise çözüm değerlerine ulaşılmamasına neden olabilir. GA'ya ilişkin gen, kromozom ve popülasyon yapıları Şekil 3.22'de gösterilmektedir.



Şekil 3.22. GA popülasyon yapısı (Dil, 2015)

Geleneksel olarak çözümlenmeler kromozom veya birey adı verilen gen zincirlerinden meydana gelir. Evrim, popülasyon içinde rastgele seçilen bireylerle başlar. Her nesilde

çeşitli bireyler mevcut popülasyondan seçilir, yeni bir popülasyon oluşturmaları için çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlere maruz kalır. Oluşturulan yeni popülasyon, algoritmanın bir sonraki tekrarında kullanılır. Hangi çözümün en iyisi olduğunu genetik algoritmaya bildirmek için bir uygunluk (amaç) fonksiyonu oluşturulması gerekmektedir. Problem değişkenlerinin kodlanmasıyla, her çeşit karmaşık problem genetik algoritmalar sayesinde çözüme ulaşabilir (Goldberg, 1989). Şekil 3.23'te genetik algoritmaya ait işlem basamakları görülmektedir.



Şekil 3.23. GA işlem basamakları

GA işlem adımları sırasıyla aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- Arama uzayındaki çözümlere ilişkin kromozomlar dizi olarak kodlanır.
- Her kromozomun çözüm için ne kadar iyi olduğu, uygunluk fonksiyonu ile belirlenir.
- Genetik algoritmalar doğada yaşamını sürdürebilme kuralına uygun olarak sürekli iyileşen yeni çözümler üretir.
- Belirlenmiş olan kromozomlar bir olasılık değerine göre rassal olarak çoğalma işlemine tabi tutulur.

- Seçilen kromozomlara, çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanır.
- Daha önce belirlenen adım sayısı boyunca veya hata belli bir ön tanımdan küçük olana kadar yukarıdaki işlemler sırasıyla sürdürülür.
- Adım sayısı, belirlenen nesil sayısına ulaşıncaya kadar sürer ve ulaşıldığında işlem sonlandırılır.
- Hedef fonksiyonuna en uygun olan birey seçilir.

3.11.1. Problemin genetik olarak kodlanması

Problemin genetik olarak kodlanması, probleme ilişkin çözümün genetik bir birey olarak sunulması işlemidir. Bir birey veya diğer adıyla kromozom genlerden oluşmaktadır. Kromozom içerisindeki genler, problemin çözümüne ulaşılmasını sağlayan bilgiler taşımaktadır. Tez kapsamında tasarlanan GA içinde ekranlama kutusunun SE analitik ifadesi olan denklem (3.117) kullanılmıştır. Ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklık için belirtilen bir tasarım aralığında SE'yi başlangıç durumuna göre artıran açıklık eni w ve açıklık boyu l değerlerinin GA ile elde edilmesi amaçlanmıştır. Bir ekranlama kutusunun p merkez noktası için S_E ekranlama etkinliği formülasyonu denklem (3.116) ve (3.117)'dan yararlanarak

$$S_E = -20 \log_{10} \left| \frac{v_p}{v'_p} \right| = -20 \log_{10} \left| \frac{2v_p}{v_0} \right| = -20 \log_{10} \left| \frac{2V_2 \left(\frac{Z_3}{Z_3 + Z_2} \right)}{v_0} \right| \quad (3.119)$$

olarak elde edilir. Burada, V_2 , Z_2 ve Z_3 sırasıyla p noktasına kısa devre dönüşümü uygulandığında elde edilen eşdeğer gerilim, kaynak empedansı ve yük empedansıdır. Denklem (3.114), (3.115) ve (3.116) kullanılarak S_E

$$S_E = -20 \log_{10} \left| \frac{2V_1/v_0}{\cos k_g p + j(Z_1/Z_g) \sin k_g p} \left(\frac{Z_3}{Z_3 + \frac{Z_1 + jZ_g \tan k_g p}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan k_g p}} \right) \right| \quad (3.120)$$

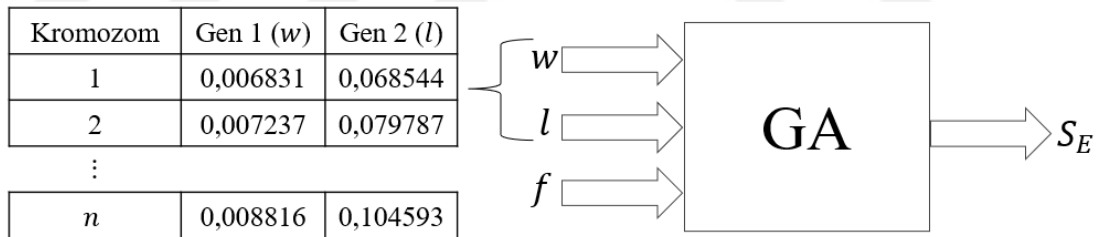
şeklinde tanımlanır. Burada, Z_1 denklem (3.108)'in (3.110) içinde kullanılmasıyla

$$Z_1 = V_0 \left(\frac{Z_{ap} Z_0}{Z_{ap} + Z_0} \right) = V_0 \left(\frac{jZ_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} Z_0}{jZ_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} + 2 \frac{a}{l} Z_0} \right) \quad (3.121)$$

olarak elde edilir. Açıklığa ait iletim hattı karakteristik empedansı Z_{0s} ise denklem (3.106) ve (3.107)'den yararlanarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Z_{0s} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - \left(w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right) / b \right)^2}}{1 - \sqrt{1 - \left(w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right) / b \right)^2}} \right) \right]^{-1} \quad (3.122)$$

Burada t ekranlama kutusunun duvar kalınlığıdır. Denklem (3.120) ve (3.122)'den görüldüğü gibi kutu boyutları sabit kaldığı durumda S_E 'yi elde etmek için tanımlanması gereken değişkenler, açıklık eni w ve açıklık boyu l olmaktadır. Dolayısıyla denklem (3.119)'da belirtilen problem denklemi için örnek kromozom kodlaması Şekil 3.24'teki gibi gerçekleştirilir. S_E hesaplaması için kaynak kodlar EK 3'te verilmiştir.



Şekil 3.24. Problem için örnek kromozom kodlaması ve GA blok diyagramı

Şekil 3.24'te açıklık eni w ve açıklık boyu l olmak üzere iki adet genden oluşan n sayıda kromozoma sahip bir popülasyon için tasarlanan GA blok diyagramı yer almaktadır. Burada f elektromanyetik dalganın frekans değerini, S_E ise ekranlama etkinliği değerini belirtmektedir. Kromozomların genetik olarak kodlanması için gerçek değerli sayıların kullanılabilirdiği gibi ikili sayılar da kullanılabilir. Bu durumda çaprazlama, mutasyon gibi genetik operatörler seçilen kodlama yapısına uygun olarak tanımlanmalıdır.

3.11.2. Başlangıç popülasyonun oluşturulması

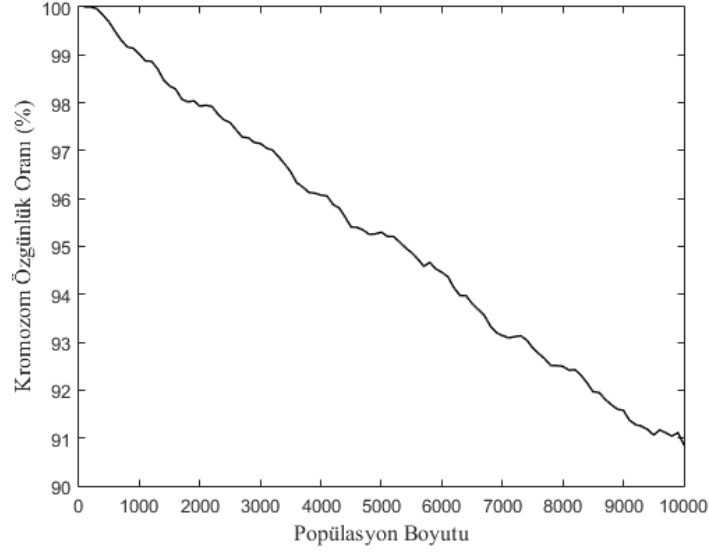
Genetik algoritmalar, rastgele oluşturulmuş kromozomlardan meydana gelen bir başlangıç popülasyonu ile işlemlerine başlar. Başlangıç popülasyonu boyutu p_{boyut} , her GA problemi için farklı optimum değerlere sahip olabilir. Algoritmaya özgü optimum değer ancak algoritmanın optimize edilmesi ile elde edilebilir. p_{boyut} değeri çok küçük seçilirse, popülasyon içinde yeterli genetik çeşitlilik sağlanamayacağından GA yerel bir çözüme takılabilmektedir. Diğer taraftan p_{boyut} değeri çok büyük seçilirse, genetik çeşitliliğin artmış olmasına rağmen, birbirinin aynısı olan kromozomlar başlangıç popülasyonu içinde oluşabilir ve algoritmanın sonuç verme süresini uzatabilir (Goldberg, 1989; Odetayo, 1993).

Başlangıç popülasyonunu oluşturmak için rassal sayı üreticisi kullanılmıştır. $[0,1]$ aralığında düzgün dağılmış rassal sayılar üretilip, $w_{min} \leq w \leq w_{maks}$, $l_{min} \leq l \leq l_{maks}$ olarak belirlenen probleme ilişkin tasarım aralığı kullanılarak başlangıç popülasyonuna ait kromozomların genleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$w_i = w_{min} + (w_{maks} - w_{min}) \cdot rs_i \quad (3.123)$$

$$l_i = l_{min} + (l_{maks} - l_{min}) \cdot rs_i \quad (3.124)$$

Burada rs_i i. kromozomun oluşturulmasında kullanılan, $[0,1]$ aralığında düzgün dağılmış rassal sayıyı belirtmektedir. Popülasyondaki kromozom sayısı p_{boyut} kadar olup, her bir kromozom içinde yer alan gen sayısı $d = 2$ olduğundan $p_{boyut} \times d$ olacak şekilde bir popülasyon matrisi oluşturulur. Şekil 3.25'te popülasyon boyutunun artmasıyla birlikte popülasyon içerisindeki kromozomların özgünlük oranları analiz edilmiştir.



Şekil 3.25. Popülasyondaki kromozomların özgünlük oranı

Şekil 3.25'ten elde edilen verilere göre $p_{boyut} = 1000$ sonrasında aynı kromozomların başlangıç popülasyonu içinde %1-2 oranında meydana geldiği görülmektedir. Dolayısıyla popülasyon boyutunu 1000'den fazla seçmek, aynı kromozomların başlangıç popülasyonuna dahil olmasına ve algoritmanın işlem süresinin uzamasına sebep olacaktır (Odetayo, 1993). Tez çalışmasında gerçekleştirilen GA analizlerinde $p_{boyut} = 1000$ olarak tanımlanmıştır. EK 3'te rassal sayılar ile üretilen başlangıç popülasyonuna ait kaynaklar kodlar verilmiştir.

3.11.3. Uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi

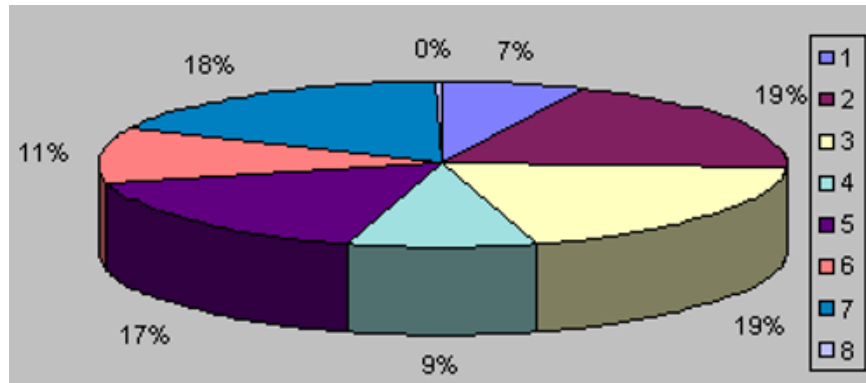
Uygunluk fonksiyonu bir kromozomun çözüme ne kadar yaklaştığını ölçmektedir. Çözüme en yakın kromozomun uygunluk değerinin en yüksek olması gerekir. Uygunluk fonksiyonunun verimli bir şekilde çalışması genetik algoritmanın başarısını doğrudan etkilemektedir. Verilen belirli bir kromozom için uygunluk fonksiyonu, o kromozomun temsil ettiği çözümün kullanımına ilişkin sayısal bir uygunluk değeri üretir. Bu uygunluk değeri ne kadar yüksekse, ilgili kromozomun yaşama ve çoğalma şansı o kadar yüksek olmaktadır. Dolayısıyla, kromozomun uygunluk değeri ne kadar yüksekse sonraki nesillerde temsil edilme oranı da o kadar yüksek olur.

Denklem (3.119)'da belirtilen problem denklemi için kromozomların uygunluk değerleri, ekranlama kutusun ön yüzündeki açıklık alanının başlangıç değerinden ($alan_{ref}$) büyük olduğu durumda ekranlama etkinliğini başlangıç durumuna göre artırmalarıyla orantılı olarak tanımlanmıştır.

3.11.4. Seçim

Seçim işlemi, genetik algoritmalarındaki önemli işlem basamaklarından biridir. Uygunluk değerlerinin hesaplanması adımından sonra, bir sonraki nesilde yavru üretmek için hangi ebeveynlerin yer alması gerektiğine karar verilmesi gerekmektedir. Bu durum, doğal seçimdeki en güçlünün yaşaması durumuna benzerdir. Bir kromozomun sonraki nesle yayılmasını sağlayan olasılık değeri uygunluk fonksiyonundan elde edilmektedir. GA'da seçim işleminin amacı da uygunluk değeri yüksek olanlara çoğalma fırsatı tanımaktır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler ise rulet çarkı, rank yöntemi, turnuva ve elitist seçim yöntemleridir.

Rulet çarkı seçimi olarak da bilinen uygunluk orantılı seçimi ile potansiyel yararlı kromozomlara yüksek seçilme şansları verilir. Uygunluk değeri orantılı seçimler için en yaygın yöntemdir. Her kromozoma, uygunluk değeriyle orantılı olarak dairesel bir rulet çarkından bir dilim verilir. Bu dilim ne kadar büyükse kromozomun seçilme şansı da o kadar yüksektir (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Rulet çarkı seçim olasılığı

Rulet çarkı yönteminde öncelikle her bir kromozom için olasılık değeri, uygunluk fonksiyonu değeriyle orantılı olacak şekilde

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{p_{boyut}} f_i} \quad (3.125)$$

olarak tanımlanır. Burada f_i , i . kromozomun uygunluk değerini, $\sum_{i=1}^{p_{boyut}} f_i$ ise toplam popülasyon uygunluk değerini belirtmektedir. Doğal seçimde kullanılmak üzere, her bir kromozom için birikimli olasılık değeri ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$c_i = \sum_{i=2}^{p_{boyut}} c_{i-1} + P_i \quad (3.126)$$

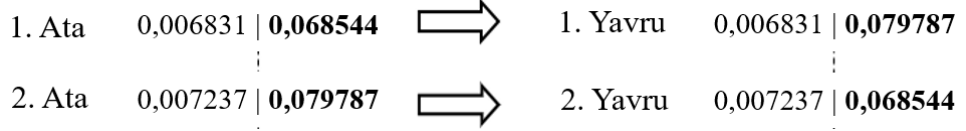
[0,1] aralığında düzgün dağılmış rastgele sayı rs_i , popülasyon boyutu p_{boyut} defa üretilir. Her seferinde kromozomların birikimli olasılıkları, $rs_i < c_1$ koşuluna göre kontrol edilir. Burada c_1 , rs_i değerinden büyük olan, en küçük birikimli olasılık değerine sahip kromozomu ifade etmektedir ve koşulu sağlayan ilk kromozom popülasyonda i . sıraya yerleştirilir. Bu işlem, rulet çarkı seçimi olarak adlandırılmaktadır. EK 3'te seçim işlemine ilişkin kaynak kodlar verilmiştir.

3.11.5. Çaprazlama

Genetik algorithmada belirli bir noktadan sonra nesil çeşitliliği olmadığı için çözüme ilişkin uygun bir sonucun elde edilmesi güçleşmektedir. Popülasyon içerisinde nesil çeşitliliği sağlanarak, GA en iyi sonuçlara ulaşabilmektedir. Popülasyon içinde bu çeşitliliği sağlayabilmek için kromozomlara, çaprazlama (cross over) ve mutasyon genetik operatörleri belirli yüzdelik oranlarla uygulanır (Goldberg, 1989).

Çaprazlama operatörü, popülasyondaki iki kromozomun bir araya gelerek karşılıklı gen yapılarının değişimi ile yeni kromozomların oluşmasını sağlamaktadır. Kromozomlara çaprazlama operatörü uygulanmadan önce, her biri için %50-%95 aralığında, çaprazlamaya tutulma olasılığı belirlenmelidir (Dil, 2015). Düşük çaprazlama oranı, GA'nın sonuca ulaşmasını yavaşlatırken, yüksek çaprazlama popülasyon çeşitliliğini

hızlı bir şekilde artırır. Çaprazlama işleminin en basit şekli ise rastgele bir çaprazlama noktası belirlenerek, bu noktadan önceki gen bilgilerini ilk kromozomdan, sonraki gen bilgilerini ise ikinci kromozomdan alıp birleştirerek yeni kromozomu oluşturmaktır (Şekil 3.27). Çaprazlama operatörü için tek noktalı, çok noktalı, sıraya dayalı, pozisyona dayalı vb. çeşitli çaprazlama türleri bulunmaktadır (Fırlıklı ve Engin, 2002).

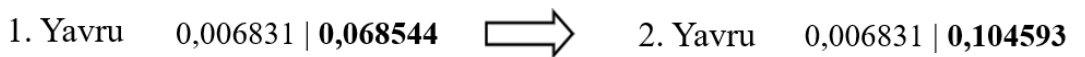


Şekil 3.27. Tek noktalı çaprazlama

Tasarlanan GA akışında, tek tip çaprazlama işlemi tüm kromozomlar için gerçekleştirilmez. Bu çalışmada, çaprazlama olasılığı $p_{\text{çapraz}} = 0,95$ olarak tanımlanmıştır. Bu durumda her bir kromozom çifti için üretilen düzgün dağılmış rastgele sayı rs_i için $rs_i < p_{\text{çapraz}}$ ise kromozomlara çaprazlama operatörü uygulanır. Aksi durumda ise kromozomlar oldukları gibi yeni popülasyona aktarılır. EK 3'te çaprazlama işlemine ilişkin kaynak kodlar verilmiştir.

3.11.6. Mutasyon

GA'da çaprazlama yapılmasına rağmen bir süre sonra kromozomlar birbirlerine giderek benzemektedir. Bu durum çözüm uzayının daralmasına sebep olmaktadır. Mutasyon operatörü ile kromozom içindeki genler rastgele değiştirilerek kromozom çeşitliğinin devamı sağlanmış olur (Şekil 3.28). Mutasyon oranı %0,1 ile %1 arasında seçilerek çözüm uzayının çok genişlemesi ve çözümünün kısıtlanması engellenir (Fırlıklı ve Engin, 2002). Mutasyon operatörünün, bir kromozom içinde komşu iki genin yer değiştirilmesi, bir kromozom içinde birden fazla genin değiştirilmesi ve keyfi olarak seçilen bir genin kromozom içinde rastgele kaydırılması şeklinde olan türleri de bulunmaktadır.



Şekil 3.28. Mutasyon operatörünün tek gene uygulanması

Mutasyon operatörü kromozom içindeki genleri düşük olasılıklara göre değiştirmektedir. Bu çalışmada, mutasyon olasılığı $p_{mutasyon} = 0,005$ olarak tanımlanmıştır. Her bir kromozom için $[0,1]$ aralığında düzgün dağılmış rastgele sayı rs_i üretilir ve $rs_i < p_{mutasyon}$ ise kromozoma mutasyon operatörü uygulanır. Aksi durumda ise kromozomlar mutasyona uğramadan yeni popülasyona aktarılır. Mutasyon operatörü ile kromozom içindeki genler rastgele değiştirilerek kromozom çeşitliğinin devamı sağlanmış olur. EK 3'te mutasyon işlemine ilişkin kaynak kodlar verilmiştir.

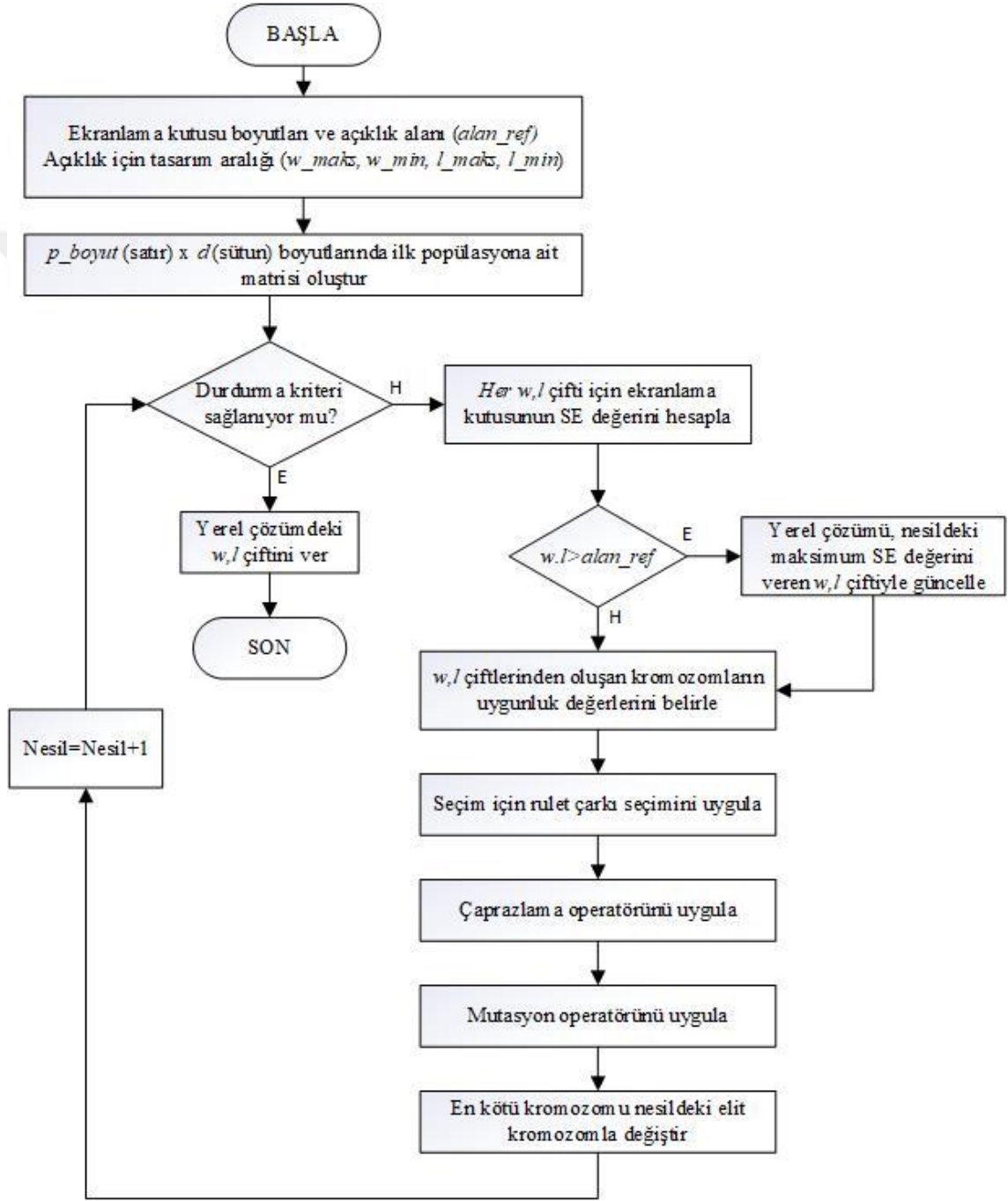
3.11.7. Döngünün durdurulması

GA, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörleri kullanarak daha iyi uygunluk değerlerine sahip kromozomları barındıran yeni bir popülasyon oluşturmayı amaçlar. Bu işlemi tekrar tekrar yaparak problem için bir çözüm bulmaya çalışır; fakat bu işlem sonsuza kadar devam edemez. Bu nedenle döngünün durdurulması için bir durma kriterine ihtiyaç duymaktadır. Farklı problemler için farklı durma kriterleri tanımlanabilmektedir. En yaygın kullanılan durma kriterleri; algoritmanın belirli bir adım sonrasında bulunduğu yerel çözümü çıkış olarak vermesi, belirlenen bir çözüm değerine ulaşılan kadar devam etmesi veya algoritmanın artık daha iyi bir yerel çözüme ulaşamaması durumunda algoritmanın sonlandırılmasıdır.

Genetik algoritma problemlerinde bulunan çözümler, yineleme adımları boyunca önce hızlı daha sonra yavaş yavaş değişim göstermektedir. Her nesilden elde edilen yerel çözümdeki iyileşme hızının giderek azalması ve sifıra yaklaşması, artık daha fazla iyileşme beklenmemesi gerektiğini belirtir. Çözüme harcanacak zaman ile çözümden beklenecek kalite arasında bir denge kurularak GA döngüsü sonlandırılabilir. Tez çalışması kapsamında, yerel çözümü veren w , l çifti için farklı değerlerin gözlenmediği ardışık 10 adet yineleme adımı sonrasında döngünün durdurulması ve elde edilen çözümün çıkış olarak verilmesi yöntemi kullanılmıştır (Yiğit ve Aydemir, 2018).

3.11.8. Tasarlanan GA için akış şeması

Şekil 3.29'da, ekranlama kutusu boyutlarının sabit kaldığı durumda, ön yüzeyindeki açıklık için belirtilen bir tasarım aralığında SE'yi başlangıç durumuna göre artıran açıklık eni w ve açıklık boyu l değerlerini sunan GA akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.29. SE'yi başlangıç durumuna göre artıran açıklık boyutları için GA

Tasarlanan algoritma, ekranlama kutusu boyutları, ön yüzeyindeki açıklık için $w_{min} \leq w \leq w_{maks}$, $l_{min} \leq l \leq l_{maks}$ şeklinde bir tasarım aralığı, başlangıçtaki açıklık alanı $alan_{ref}$, çaprazlama olasılığı $p_{çapraz}$, mutasyon olasılığı $p_{mutasyon}$ gibi giriş parametrelerine ihtiyaç duymaktadır. İlk adım olarak, belirtilen tasarım aralığı içinde rastgele seçilen açıklık eni w ve açıklık boyu l değerlerinden $p_{boyut} \times d$ boyutunda popülasyon matrisi oluşturulur. Bu çalışmada, $p_{boyut} = 1000$, $d = 2$ olarak alınmış olup sırasıyla popülasyon içerisindeki kromozom sayısını ve bir kromozomdaki gen sayısını belirtmektedir. Her bir w, l çifti için ekranlama kutusunun ekranlama etkinliği hesaplanır. Yerel çözümdeki w, l çifti için uygunluk kriteri ise $w.l > alan_{ref}$ koşulunu ve nesildeki maksimum SE değerinin elde edilmesini sağlamasıdır. Bu değeri sağlayan en iyi kromozom elit kromozom olarak adlandırılır ve her yineleme adımı için saklanır.

Çözümün bir yineleme adımı için elde edilmesinden sonra yeni nesli oluşturmak için popülasyon matrisine doğal seçim, çaprazlama, mutasyon gibi genetik operatörler uygulanır. Yeni nesil oluşturmadan önce mevcut nesildeki en kötü kromozom elit kromozomla değiştirilir (Belloufi, Assos ve Rezgui, 2013). Oluşturulan yeni nesilde her bir kromozom yani w, l çifti için SE tekrardan hesaplanır ve elde edilen uygunluk değerlerine göre sonraki neslin oluşturulması için seçilirler. Bu işlemler w, l çifti için ardışık 10 yineleme adımında aynı değerlerin elde edilmesine dek devam eder ve sonunda döngü durdurulup yerel çözümü sunan w, l çifti ile SE elde edilir.

3.11.9. GA'nın ekranlama kutularına uygulanması

Ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini başlangıç durumuna göre artıran açıklık boyutlarının belirlenmesi için tasarlanan GA, farklı boyutlarda iki kutuya uygulanmıştır. Öncelikle Çizelge 3.4'te özellikleri verilen K1 kutusu için GA'dan elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Sonra, K2 kutusunun ön yüzeyindeki açıklık boyutları GA ile belirlenmiş ve iç yüzeylerine grafen plaka kaplanarak SE üzerindeki değişimler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Açıklık boyutlarının GA ile belirlenmesinde kullanılan kutular

Kutu No	Kutu Boyutları (mm)	Kutu Malzemesi	Yüzeyindeki Açık Boyutları (mm)	Açıklık Tasarım Aralığı (mm)
K1	$a = 490, b = 240, d = 350, t = 2,5$	Alüminyum	$w = 5$ $l = 100$	$5 \leq w \leq 10,$ $50 \leq l \leq 150$
K2	$a = 300, b = 160, d = 310, t = 2,5$	Alüminyum	$w = 10$ $l = 100$	$7 \leq w \leq 15,$ $70 \leq l \leq 150$

3.12. SE Ölçümleri

3.12.1. Prototip kutu tasarımı

Nümerik sonuçlardan elde edilen verileri ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırmak için öncelikle prototip ekranlama kutusu tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.21’de yer alan nümerik model ile aynı kutu boyutlarına sahip iki adet ekranlama kutusu Siemens NX v.19 programı ile tasarlanmıştır. Kutulardan birinin ön yüzeyindeki açıklık boyutları $l = 100$ mm, $w = 10$ mm, diğerinin ise GA ile belirlenen $l = 72$ mm ve $w = 14,8$ mm değerlerinde olacak şekilde tasarlanmıştır (Çizelge 3.5). Tasarlanan kutular, $t = 2,5$ mm kalınlığında alüminyum malzemeden lazer kesim ile kesilerek sonrasında abkant pres ile bükülerek üretilmiştir (Şekil 3.30). Arka kapakları 4 adet vida ile sökülüp takılabilmektedir.

Çizelge 3.5. Prototip kutu ölçüleri

Kutu No	Kutu Boyutları (mm)	Açıklık boyutları	
		En (mm)	Boy (mm)
K2	$a = 300, b = 160, d = 310$	$w = 10$	$l = 100$
K2+GA	$a = 300, b = 160, d = 310$	$w = 14,8$	$l = 72$



(a)



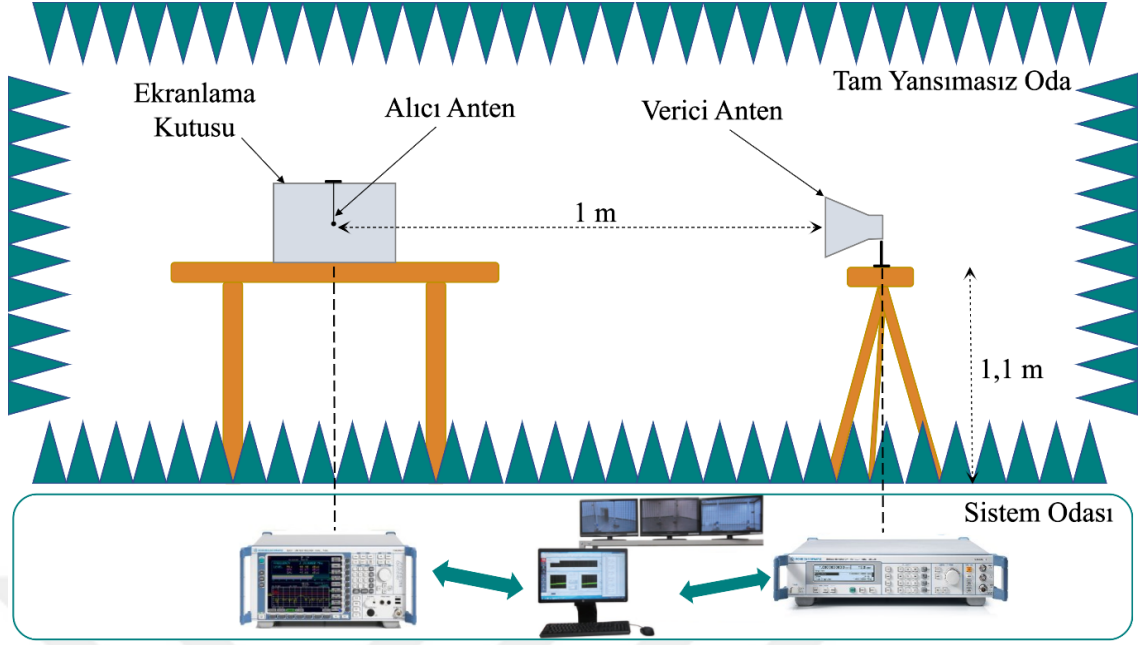
(b)

Şekil 3.30. a) Siemens NX programındaki tasarım b) Prototip ekranlama kutusu

Her kutunun iç yüzeyleri $q = 35 \mu\text{m}$ kalınlığında grafen plakalarla kaplanmıştır. Ölçümlerde kullanılan grafen plakanın özellikleri, nümerik modelde tanımlanan grafen plaka özellikleri ile aynı olacak şekilde seçilmiştir. Kutuların içerisindeki gözlem noktasına alıcı anten yerleştirmek için kutu üst yüzeylerinin merkez noktasına 4,2 mm çapında delikler açılmıştır.

3.12.2. Ölçüm düzeneği

SE ölçümleri $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 8\text{ m}$ boyutlarında yansısız bir odada gerçekleştirilmiştir. Sinyal üretici olarak 9 kHz-3,3 GHz frekans aralığında çalışabilen Rohde-Schwarz (SML-03) modeli, spektrum analizör olarak ise aynı frekans aralığında çalışabilen Rohde-Schwarz (ESCI) modeli kullanılmıştır. Kutu içine yerleştirilen alıcı anten için 17,9 mm uzunluğunda ve 4,1 mm çapında n-tipi pin terminal (Ürün No: PE4355) kullanılmıştır. Bu antenler DC-18 GHz frekans aralığında çalışabilmektedir. Verici anten olarak ise 100 MHz-300 MHz, 300 MHz-1 GHz, 1 GHz-2 GHz frekans aralıkları için sırasıyla bikonik, log periyodik ve horn antenler kullanılmıştır. Şekil 3.31’de düzenlenen ölçüm düzeneği blok diyagramı yer almaktadır. EK 5’te SE ölçümleri için kullanılan antenler ve modelleri belirtilmiştir.



Şekil 3.31. Ölçüm düzeneği blok diyagramı

Gerçekleştirilen ölçümlerde verici anten EMI kaynağı olarak; alıcı anten ise kutu merkezindeki gözlem noktasına yerleştirilen, elektrik alan ölçümlerinin yapıldığı ölçüm ucu olarak çalışmaktadır. Alıcı ve verici antenler yerden 1,1 m yukarıda, sırasıyla referans tahta masa ve sandalye üzerine konumlandırılmıştır. Antenler arası mesafe 1 m olarak ayarlanmıştır. SE ölçümleri, 100 MHz ile 2 GHz frekans aralığında 50 MHz artışlarla gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm, her örnekleme frekansı için 20 kez tekrarlanmış olup ölçüm hatalarını azaltmak için ortalama değerler kullanılmıştır. Bu çalışmada yapılan SE ölçümleri IEEE 299 standardına göre gerçekleştirilmiştir (IEEE Standard 299, 2012).

Ölçüm düzeneğinin kurulumu ve ekipmanları Şekil 3.32’de gösterilmiştir. İlk olarak, ekranlama kutusunun olmadığı durumda alıcı antende elektrik alan ölçümleri, verici anten yerine sırasıyla bikonik, log periyodik ve horn antenler kullanılarak elde edilir. Daha sonra, içi tamamen grafen plakalarla kaplı kutu için elektrik alan ölçümü benzer şekilde ilgili frekans aralıklarında uygun verici antenler kullanılarak gerçekleştirilir. SE, nümerik modeldeki hesaplamaya benzer şekilde denklem (3.39) ile elde edilir.



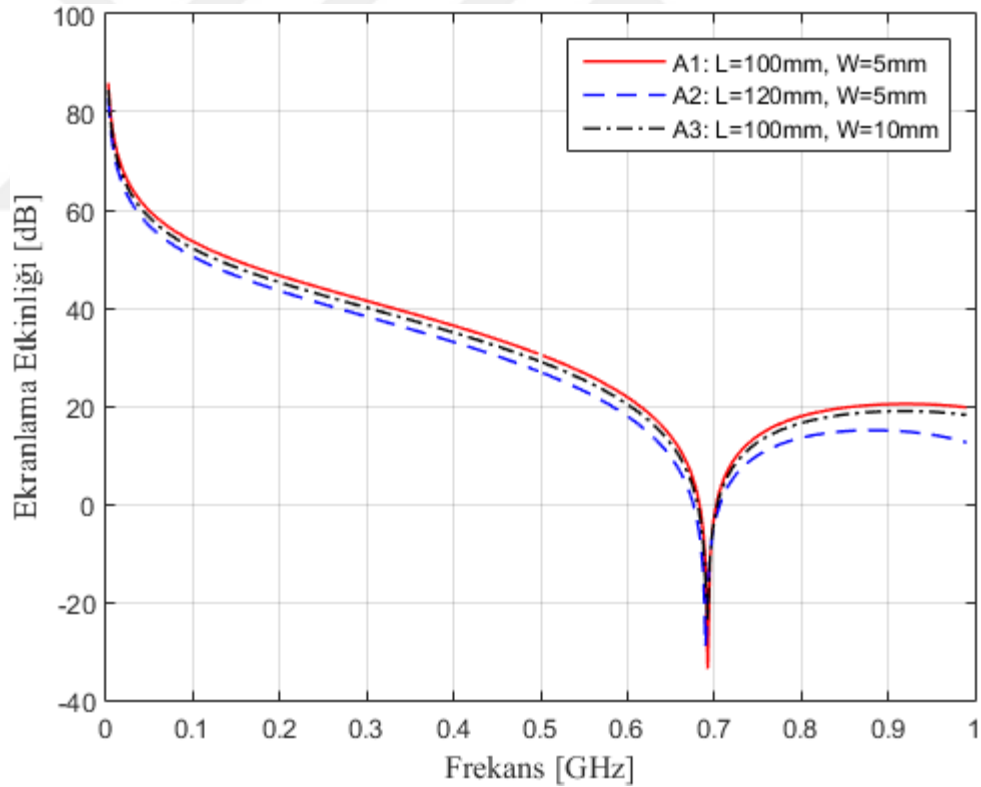
Şekil 3.32. Ölçüm düzeneği kurulumu ve ekipmanları.

a) Spektrum analizör b) Sinyal üretici ve yükselteçler c) Kutu yokken gerçekleştirilen ölçüm d) Bikonik verici anten e) Log periyodik verici anten f) Horn verici anten

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

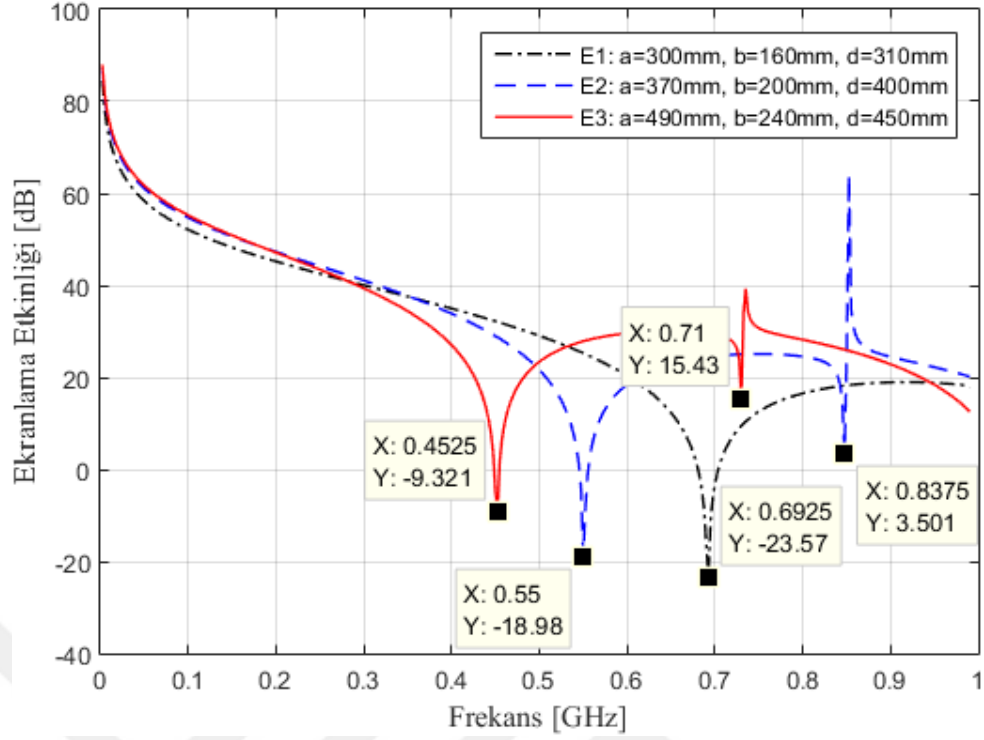
4.1. Analitik Yöntem ile SE Bulguları

Üzerinde dikdörtgen açıklık bulunan elektronik ekipmanın ekranlama kutusu için gerçekleştirilen analitik hesaplamalarda kutu ve açıklık boyutları değişiminin SE'ye etkisi incelenmiştir. Şekil 4.1'de açıklık boyutları l , w değerlerindeki değişiminin ekranlama kutusunun ekranlama etkinliği üzerindeki etkisi analitik olarak gösterilmiştir. Açıklık alanı küçüldükçe, kutu içerisine giren elektrik alanın genliği azalmaktadır. Bu eğilim, daha küçük açıklık boyutu ile ekranlama etkinliğinin büyük ölçüde artırıldığını göstermektedir. Bununla birlikte, A2'den A3'e olan açıklık alanı artışına rağmen SE'nin 2,12 dB iyileştiği elde edilmiştir. Şekilde 692 MHz frekansında bir çukur görülmektedir. Bu kutunun temel rezonans frekansıdır.



Şekil 4.1. Açıklık boyutunun SE'ye etkisi (kutu boyutu: 300x160x310 mm)

Şekil 4.2'de $l = 100$ mm ve $w = 10$ mm boyutlarında aynı açıklığa sahip üç farklı boyutta kutu için ekranlama etkinliği değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kutu boyutunun SE'ye etkisi (açıklık boyutu: $l=100$ mm, $w=10$ mm)

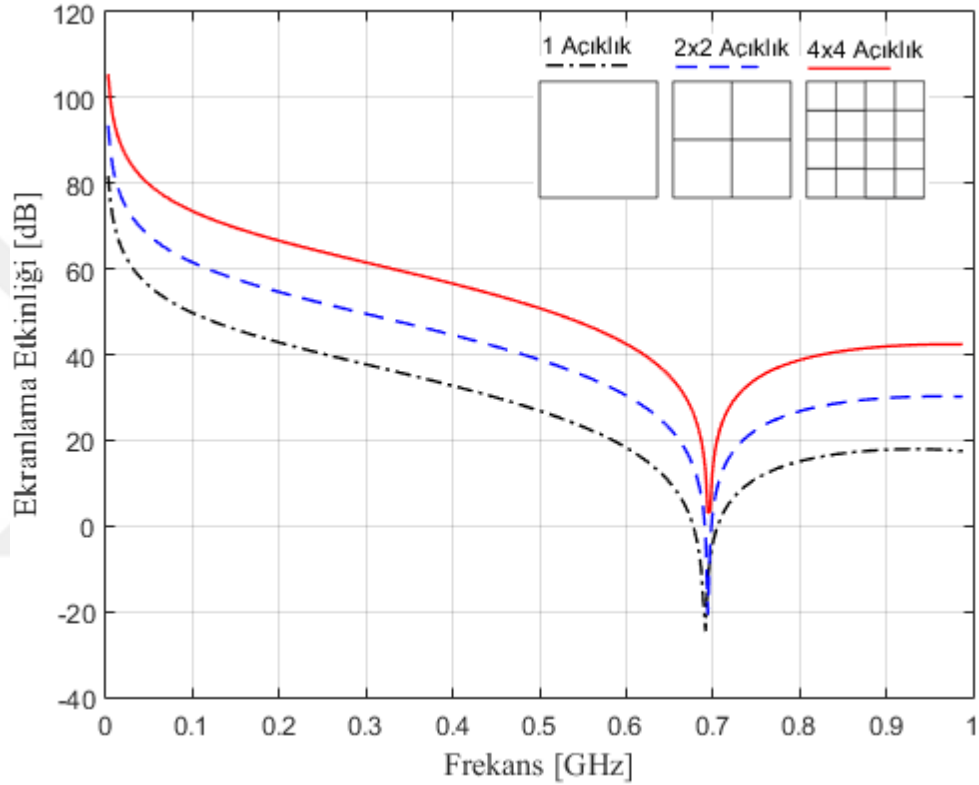
Elde edilen sonuçlara göre SE'nin büyük boyutlara sahip kutu için daha iyi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, beklendiği gibi kutu boyutu arttıkça kutu rezonansının düştüğü elde edilmiştir. Bu durum aşağıda verilen ekranlama kutusu rezonans frekansı denklemiyle ifade edilebilir.

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (4.1)$$

Burada m , n ve p tam sayıdır. a , b ve d ise kutu boyutlarıdır. μ_0 ve ϵ_0 ise sırasıyla kutu içindeki serbest uzayın manyetik ve elektrik geçirgenlikleridir. TE_{101} dominant modu için $m = 1$, $n = 0$ ve $p = 1$ olup, denklem (4.1) ile elde edilen kutu rezonans değerlerinin Şekil 4.2'deki verilerle uyumlu olduğu görülmektedir. Ekranlama kutuları E1, E2 ve E3 için TE_{101} modu rezonans frekansları sırasıyla 692 MHz, 550 MHz ve 452 MHz'tir. E2 ve E3 kutuları için 0-1 GHz aralığında ikinci rezonansların meydana geldiği görülmektedir. Birinci rezonanslara göre daha düşük seviyedeki bu rezonanslar TE_{011}

moduyla ilişkilidir. E2 ve E3 kutuları için TE_{011} modu rezonans frekansları sırayla 837 MHz, 710 MHz'tir.

Şekil 4.3'te toplam açıklık alanı aynı kalırken açıklık sayısının artırılmasının SE üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kutu boyutları $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm olarak seçilmiştir.



Şekil 4.3. 80x80 mm² bir alanda birden fazla açıklık olması durumu

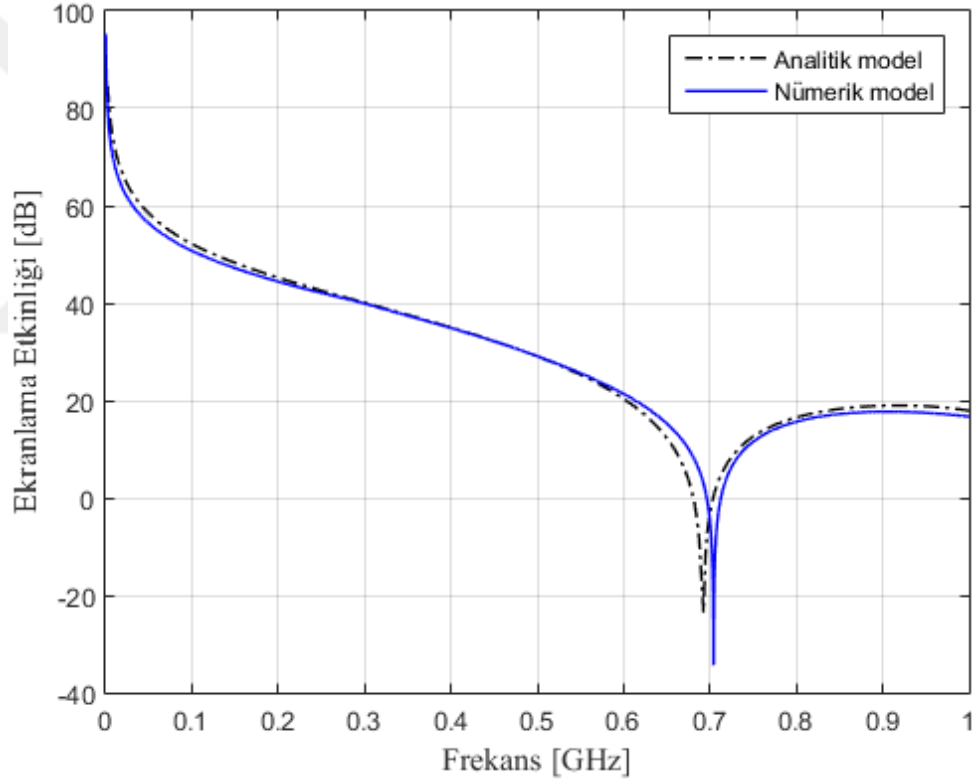
Elde edilen sonuçlara göre aynı alan için açıklık sayısı artırıldığında SE'nin de arttığı görülmektedir. Bir büyük açıklık kullanmak yerine aynı alana sahip küçük açıklıkların yerleştirilmesinin SE üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmektedir.

4.2. Nümerik Model ile SE Bulguları

Otomotivde elektronik ekipmanların ekranlama kutuları EMC gerekliliklerini sağlayacak ve de minimum yer kaplayacak şekilde tasarlanmaktadır. Açıklık boyutları sabit kalıp kutu boyutu artırıldığında ekranlama etkinliğinde iyileşmeler olduğu görülmektedir (bkz.

Şekil 4.2). Dolayısıyla, tedarikçi firmanın büyük kutu kullanmasının SE üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır. Diğer taraftan ise EMC gerekliliklerini yerine getirirken ekranlama kutusu boyutlarındaki kısıtlamalar zorlayıcı olabilmektedir. Bu çalışmada, kutu boyutlarının sabit kaldığı durumlarda, EV'deki elektronik ekipmanların ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini artırabilecek çözüm yolları incelenmiştir.

Şekil 4.4'te kutu boyutları $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm, $t = 2,5$ mm ve kutu ön yüzeyinin merkezine yerleştirilmiş, $l = 100$ mm, $w = 10$ mm boyutlarında bir açıklığın olması durumunda SE nümerik model sonuçları ile analitik model sonuçları karşılaştırılmıştır.



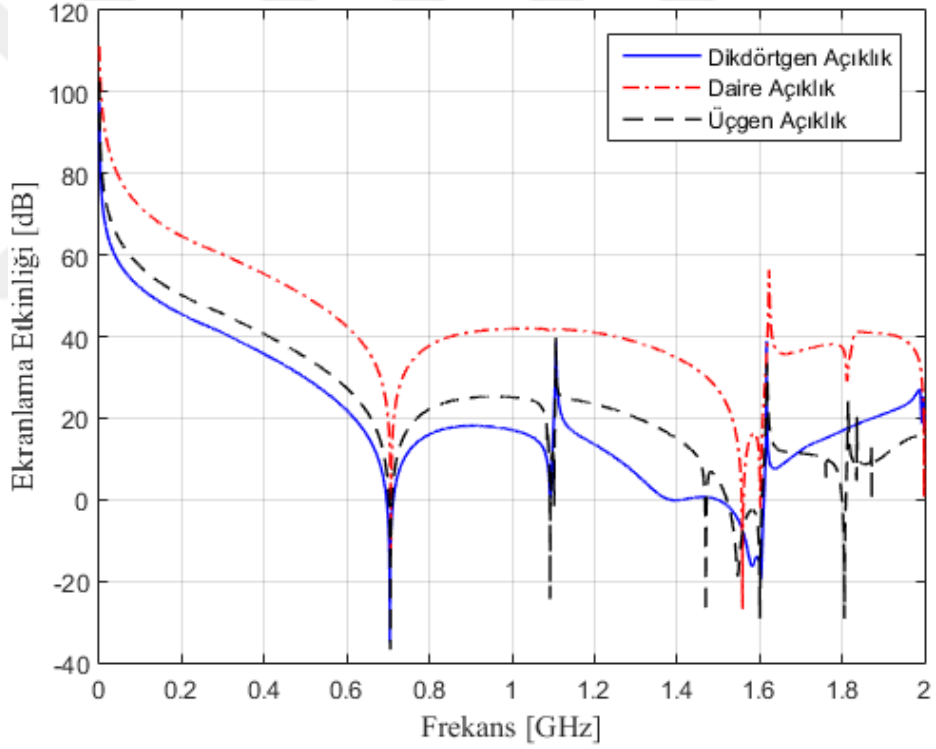
Şekil 4.4. Analitik model ile nümerik modelin karşılaştırılması

CST'de tasarlanan model 5526 adet hücreden oluşmaktadır. TE uyarımda ekranlama kutusuna Gauss geçici düzlem dalgası ($\vec{k} = k\hat{a}_z$, $\vec{E} = E_y\hat{a}_y$) uygulanmıştır (bkz. Şekil 3.12). Elektrik alan dağılımları, ekranlama kutusunun merkez noktasında hesaplanmıştır. Kaynak düzlemi açıklıktan 25 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Yayılan kaynağın gerilimi

$V_0 = 1$ V, kaynak empedansı $Z_0 = 377 \Omega$ ve yayılma sabiti $k_0 = 2\pi/\lambda$ olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.4'teki sonuçlara göre ekranlama etkinliği değerlerindeki fark maksimum 0,22 dB olarak hesaplanmıştır. Nümerik modelin, analitik yöntem ile uyumlu olduğu görülmektedir.

4.2.1. Farklı açıklık şekillerinin SE'ye etkisi

Aynı açıklık alanına sahip (1000 mm^2) farklı geometrilerdeki açıklıklar Bölüm 3.9'da gösterilmiştir (bkz. Şekil 3.19). Tasarlanan nümerik model kullanılarak açıklık alanı sabit kalıp açıklığın farklı geometrilerde olması durumunda SE üzerindeki değişim 0-2 GHz aralığında incelenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Aynı açıklık alanına sahip (1000 mm^2) farklı açıklık geometrileri için SE

Aynı açıklık alanına sahip farklı geometrilerdeki açıklıklardan elde edilen nümerik sonuçlar kullanılarak çeşitli frekanslardaki SE değerleri karşılaştırılmıştır. Daire şeklinde açıklık olması durumunda en iyi SE sonucu elde edilmiştir. Dikdörtgen açıklıktaki en kötü durum olan 1,5 GHz'teki SE değeri, daire açıklık kullanımında 26,97 dB

artırılmıştır. Bu durum, ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğinin yeterli bir koruma seviyesine çıkmasını sağlamaktadır. Aynı alana sahip farklı açıklık geometrileriyle yapılan SE analizlerinde, özellikle 1,47 GHz sonrasında SE'nin en zayıf olduğu durumun üçgen geometri ile elde edilmesi, açıklık eninin en büyük değere sahip olması ile ilgilidir. Açıklık boyutlarıyla SE'nin değişimine göre w değeri arttıkça daha büyük genlikli elektrik alan açıklıktan içeri sızmaktadır.

Çizelge 4.1. Açıklık geometrisinin SE'ye etkisi (0-900 MHz)

Açıklık Şekli	100 MHz	300 MHz	600 MHz	900 GHz
Dikdörtgen	51,94 dB	40,83	21,85	18,09 dB
Üçgen	57,15 dB	45,52 dB	27,29 dB	24,98 dB
Daire	71,72 dB	60,10 dB	42,46 dB	41,09 dB

Çizelge 4.2. Açıklık geometrisinin SE'ye etkisi (1-2 GHz)

Açıklık Şekli	1,2 GHz	1,5 GHz	1,8 GHz	2 GHz
Dikdörtgen	13,53 dB	-0,12 dB	16,89 dB	21,62 dB
Üçgen	23,41 dB	4,78 dB	0,06 dB	16,81 dB
Daire	40,96 dB	26,85 dB	37,35 dB	22,52 dB

Şekil 4.5'te 1 GHz'in altındaki frekanslarda her üç açıklık geometrisi için TE_{101} modu rezonansı 700 MHz'te oluşmaktadır. Bu durum, açıklık geometrisinin ekranlama kutusu rezonansını 1 GHz'in altında etkilemediğini göstermektedir.

1 GHz'in üzerinde ise açıklık geometrisine göre farklı frekans değerlerinde birden fazla rezonans meydana gelebilmektedir. Şekil 4.5'teki simülasyon sonuçlarına göre dikdörtgen ve üçgen açıklık olması durumlarında TE_{201} modu rezonans frekansı 1,11 GHz'te meydana gelmektedir. Üçgen açıklık olması durumunda, TE_{211} modu için rezonans 1,47 GHz'te oluşmaktadır. Daire açıklık olması durumunda ise, TE_{103} modu için rezonans 1,55 GHz'te oluşmaktadır. Üçgen ve dikdörtgen açıklık olması durumlarında, bir diğer rezonansın TE_{212} modu için 1,6 GHz'te meydana geldiği görülmektedir. Son

olarak, üçgen açıklık için TE_{311} modu rezonans frekansının 1,8 GHz’te olduğu görülmektedir.

Denklem (4.1) kullanılarak gerçekleştirilen kutu rezonans frekansı hesaplamaları ile Şekil 4.5’teki simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 4.3’te gösterilmiştir. Farklı açıklık şekillerine göre kutu rezonanslarının varlığı + ile belirtilmiştir. TE_{101} ve TE_{201} modları için hesaplamalar ile simülasyondan elde edilen sonuçlar uyumlu olduğundan 1 GHz’in altındaki rezonanslar Çizelge 4.3’te belirtilmemiştir. 1 GHz’in üzerindeki hesaplamalarda ise kutu rezonans frekanslarında kaymalar görülmektedir. Bu fark, açıklık-ekranlama kutusu (rezonatör) etkileşiminden kaynaklanmaktadır.

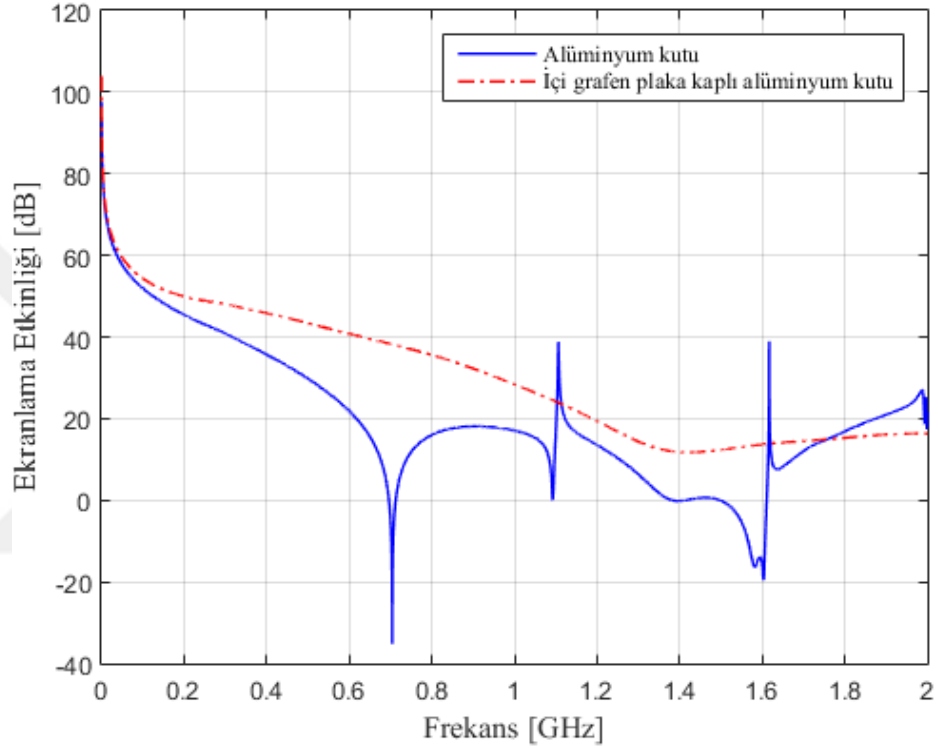
Çizelge 4.3. Rezonans hesaplamaları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Açıklık Şekli	TE_{211}		TE_{103}		TE_{212}		TE_{311}	
	Hesaplama	Fark	Hesaplama	Fark	Hesaplama	Fark	Hesaplama	Fark
		1,453 GHz	0,017	1,535 GHz	0,015	1,67 GHz	0,07	1,83 GHz
Dikdörtgen					+			
Üçgen	+				+		+	
Daire			+					

4.2.2. Grafen plakaların SE’ye etkisi

Ekranlama kutusu boyutlarının değiştirilemediği ve kutu yüzeyindeki açıklığın konnektör montajı sebebiyle belli bir alana sahip olması gerektiği durumlarda EMC gerekliliklerini sağlayacak SE değerlerini elde etmek güçleşmektedir. Kutu boyutlarını yeniden tasarlamak ve üretmek ciddi maliyet ve zaman kayıplarına sebep olmaktadır. Mevcut bir ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini artırabilecek çözüm yolu için kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanması ve SE üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kutu ön yüzeyindeki açıklığın dikdörtgen, daire ve üçgen olması durumlarına göre SE değişimleri analiz edilmiştir.

Şekil 4.6’da kutu boyutları $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm, $t = 2,5$ mm ve ön yüzeyinin merkezine yerleştirilmiş, $l = 100$ mm, $w = 10$ mm boyutlarında bir dikdörtgen açıklığı olan alüminyum kutunun iç yüzeylerinin $q = 35$ μm kalınlığında grafen plakalarla kaplanması durumunda SE üzerindeki değişim gösterilmiştir. Grafen yüzey iletkenliğini tanımlamak için grafen kimyasal potansiyeli $\mu_c = 0,1$ eV, grafen sıcaklık parametresi $T = 300$ K olarak tanımlanmıştır.



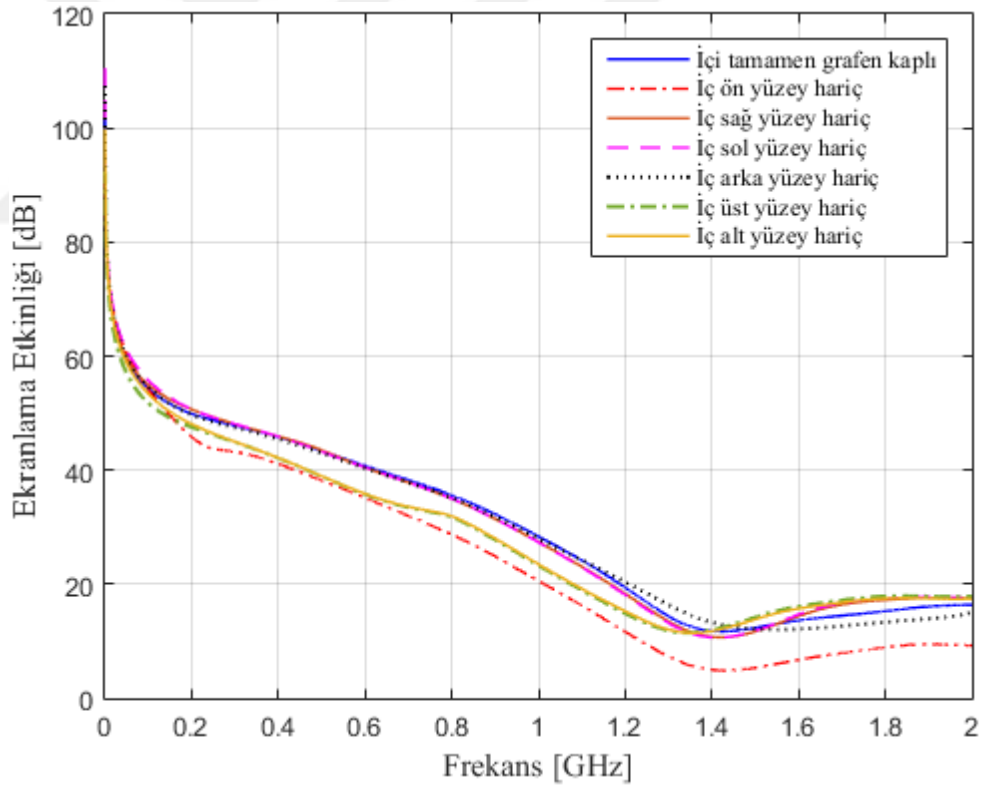
Şekil 4.6. Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanmasının SE’ye etkisi

Elde edilen sonuçlara göre ekranlama kutusunun iç yüzeylerini grafen plakalarla kaplamanın, ekranlama etkinliğini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca keskin kutu rezonanslarının grafen plaka uygulamasıyla birlikte önlendiği görülmüştür. TE₁₀₁ modu için kutu rezonansı 692 MHz’te oluşmaktadır ve bu noktada grafen plakaların ilavesiyle ekranlama etkinliğinde 44,61 dB iyileşme sağlanmıştır.

İç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusu ile grafen plaka kaplanmamış ekranlama kutusunun belirli frekanslarda SE değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.4’te

verilmiştir. Grafen plaka uygulamasıyla birlikte SE'nin, frekansa bağlı olarak $\geq 5,87$ dB iyileştiği elde edilmiştir.

Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalar ile kaplı olması durumu çeşitli konfigürasyonlarla incelenmiştir. Bunlardan birincisi, ön yüzeyinde dikdörtgen açıklık bulunan ekranlama kutusunun iç yüzeylerinden birindeki grafen plakayı çıkartıp diğer yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olarak bırakmaktır. İkincisi ise sadece tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamaktır. Şekil 4.7'de $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm, $t = 2,5$ mm boyutlarına sahip ve $l = 100$ mm, $w = 10$ mm boyutlarında bir açıklığı olan alüminyum kutunun, bir yüzeyi hariç diğer iç yüzeylerinin $q = 35$ μm kalınlığında grafen plakalarla kaplanması durumunda kutunun geometrik merkez noktasındaki ekranlama etkinliğinin frekansla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Yüzele grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (dikdörtgen açıklık)

Şekil 4.7'deki en iyi sonuç, iç arka yüzeyde grafen plakanın olmadığı ve diğer yüzeylerin grafen plakalarla kaplı olarak kaldığı durumda elde edilmiştir. En kötü sonuç ise diğer

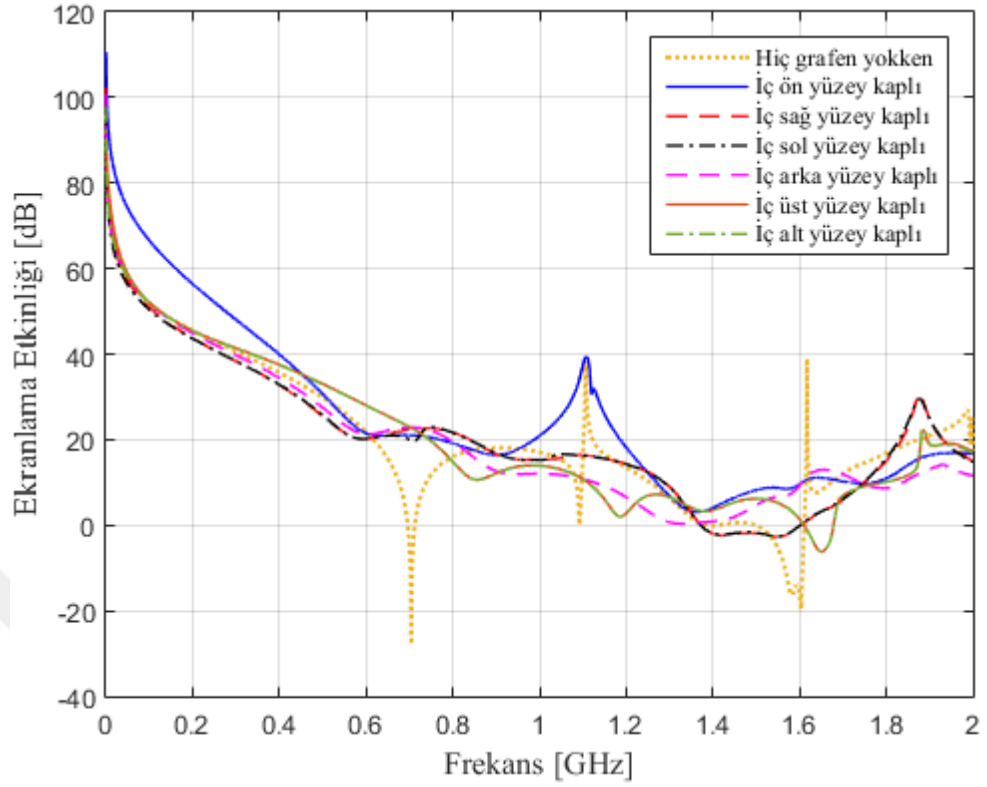
yüzeyler grafen plakalarla kaplıyken iç ön yüzeydeki grafen plakanın kaldırıldığı durumda elde edilmiştir; iç yüzeylerin komple grafen plakalarla kaplı olduğu duruma göre SE üzerinde 4-9 dB arasında azalmalar hesaplanmıştır. Şekil 4.7’den elde edilen SE üzerindeki değişimler, Çizelge 4.4’te 0-2 GHz aralığındaki çeşitli frekans değerleri için verilmiştir.

Çizelge 4.4. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE’ye etkisi (dikdörtgen 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	40,83	21,85	18,09	13,53	-0,12	16,89
Komple grafen var	48,03	40,77	32,26	19,40	12,34	15,28
Ön yüzey hariç	43,20	35,11	24,89	11,65	5,36	8,94
Sağ yüzey hariç	48,08	40,46	31,47	18,32	11,71	17,25
Sol yüzey hariç	48,09	40,49	31,44	18,11	11,82	17,51
Arka yüzey hariç	47,45	40,36	31,78	20,38	12,15	13,35
Üst yüzey hariç	44,93	35,77	27,80	14,91	14,19	17,88
Alt yüzey hariç	44,99	35,85	28,02	15,25	13,83	17,49

Şekil 4.7 ve Çizelge 4.4’ten elde edilen sonuçlara göre ön yüzeyinde açıklığı olan ekranlama kutusunun iç ön yüzeyinin grafen plakayla kaplanması, ekranlama etkinliğini önemli ölçüde artırmıştır. Bunun yanında, iç üst ve alt yüzeylerin grafen plakayla kaplanmasının ekranlama etkinliğini iyileştirmedeki etkisinin, iç sağ ve sol yüzeylerin grafen plakayla kaplanmasına göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Grafen plaka yerleşimiyle ilgili ikinci durumda ekranlama kutusu iç yüzeylerinden sadece birini grafen plakayla kaplayarak SE üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (dikdörtgen açıklık)

Kutu üzerindeki açıklık ön yüzeyde yer aldığından, iç ön yüzeyin grafen plakayla kaplanması SE'yi belirgin bir şekilde iyileştirmiştir. Bunun sebebi gelen dalganın kutu içerisine nüfuz etmeden önce ilk temas ettiği yüzeyin ön yüzey olmasıdır. Bu yüzeyin iletkenliği artırıcı bir yöntem olarak, grafen plaka ile kaplanması kutu içerisine sızan elektromanyetik alan gücünü zayıflatmaktadır. Dolayısıyla gözlem noktasında ölçülen elektromanyetik alan azalacağından ekranlama etkinliği iyileşmektedir.

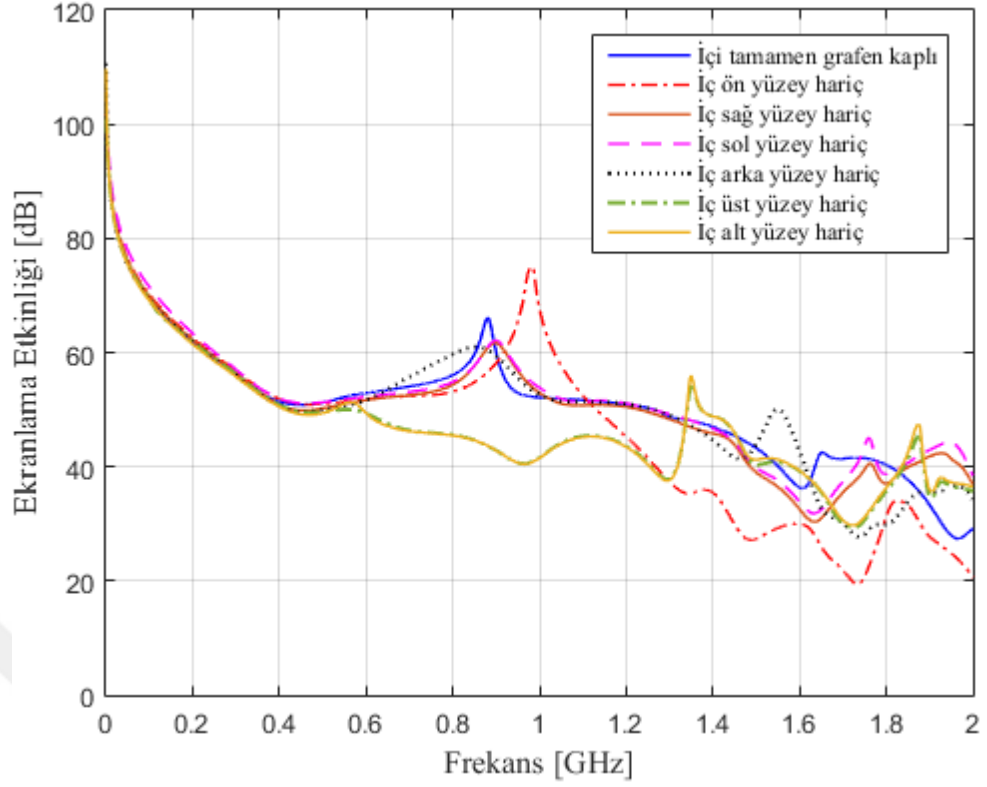
Kutu iç üst veya alt yüzeyinin grafen plakayla kaplanması birbirine yakın sonuçlar vermiş olup, iç ön yüzeyin kaplanmasından sonra ikinci SE iyileştirme adımı olarak uygulanabilir. Kutu iç sağ veya sol yüzeyinin grafen plakayla kaplanması ise iç arka yüzeyin grafen plakayla kaplanmasından daha iyi sonuç vermekle birlikte üçüncü iyileştirme adımı olarak değerlendirilebilir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'den elde edilen önemli sonuçlardan biri ise 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. Çizelge 4.5'te ekranlama kutusu iç yüzeylerinden sadece birinin grafen plaka ile kaplanması durumunda çeşitli frekanslarda hesaplanan SE değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (dikdörtgen 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	40,54	21,85	18,08	13,53	-0,13	19,18
İç ön yüzey kaplı	48,07	21,46	16,42	18,18	8,22	10,95
İç sağ yüzey kaplı	38,38	20,19	16,63	14,32	-1,91	15,05
İç sol yüzey kaplı	38,37	20,17	16,86	14,27	-1,80	15,61
İç arka yüzey kaplı	39,76	21,27	12,61	6,57	4,74	8,64
İç üst yüzey kaplı	41,41	28,05	12,14	2,74	6,17	10,13
İç alt yüzey kaplı	41,30	27,96	12,11	2,72	6,19	10,13

Şekil 4.9'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 4.9'da kutu iç yüzeylerinden birindeki grafen plaka çıkarılıp diğer yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olarak bırakılmıştır.



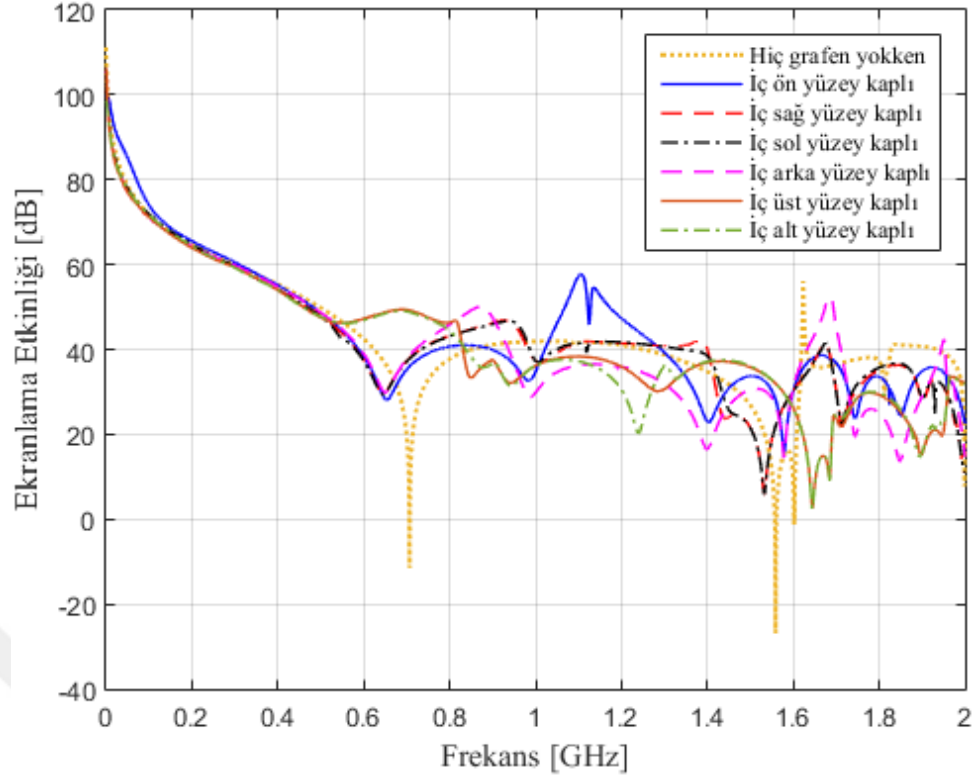
Şekil 4.9. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (daire açıklık)

Elde edilen sonuçlara göre iç sağ yüzey hariç ile iç sol yüzey hariç durumlarında SE değerleri neredeyse aynıdır. 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. Çizelge 4.6'da çeşitli frekanslarda elde edilen SE değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6. Yüzezlere 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 4.10). Kutu üzerindeki açıklık ön yüzeyde yer aldığından, iç ön yüzeyin grafen plakayla kaplanması Şekil 4.8'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 0,8-1,45 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. Çizelge 4.7'de ön yüzeyinde daire açıklık bulunan ekranlama kutusunun iç yüzeylerinden sadece birinin grafen plaka ile kaplanması ve SE üzerindeki etkisi çeşitli frekanslarda hesaplanmıştır.



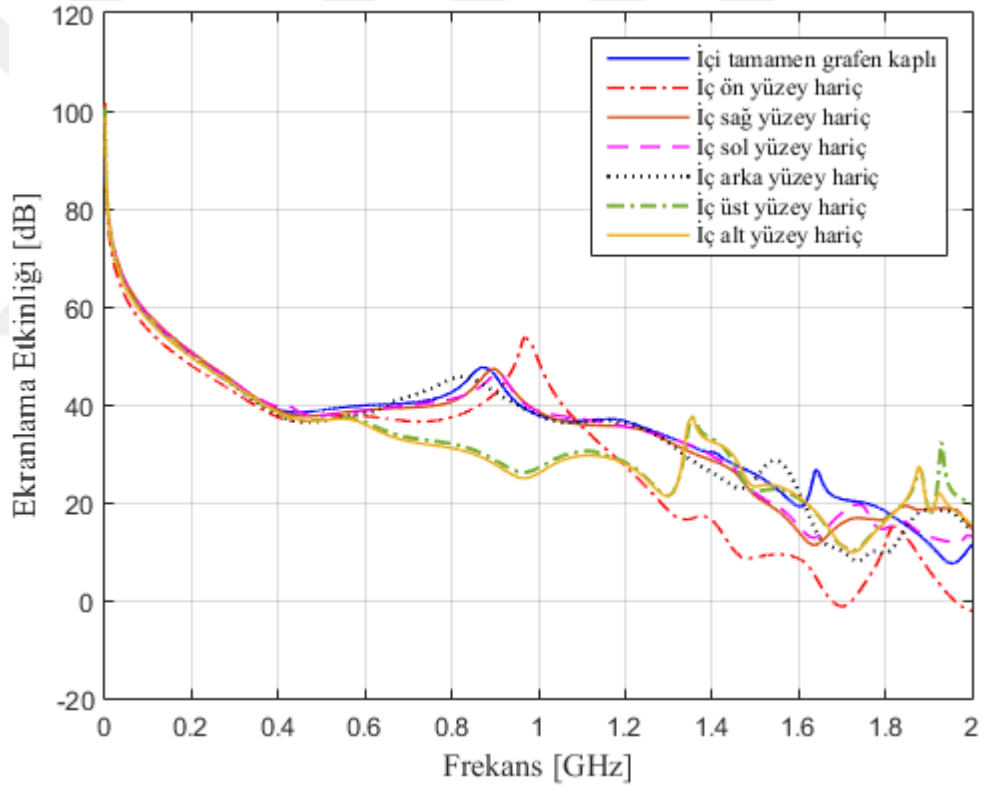
Şekil 4.10. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (daire açıklık)

Çizelge 4.7. Tek 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 4.9 ve Şekil 4.10'dan grafen plakanın iç yüzeylere kaplanmasıyla keskin kutu rezonanslarının önemli ölçüde önlendiği görülmektedir. Kutu iç yüzeylerinden herhangi birinin grafen plaka ile kaplanması, ekranlama etkinliği üzerinde iyileşme sağlamaktadır.

Son olarak, 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 incelenmiştir. Şekil 4.11'de ön yüzeyinde üçgen açıklık bulunan ekranlama kutusunun iç yüzeylerinden birindeki grafen plaka çıkarılıp diğer yüzeyleri grafen plakalarla kaplı olarak bırakılmıştır.



Şekil 4.11. Yüzeyle grafen plaka kaplamanın SE'ye etkisi (üçgen açıklık)

Elde edilen sonuçlara göre iç sağ yüzey hariç ile iç sol yüzey hariç durumlarında SE değerleri neredeyse aynıdır. 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

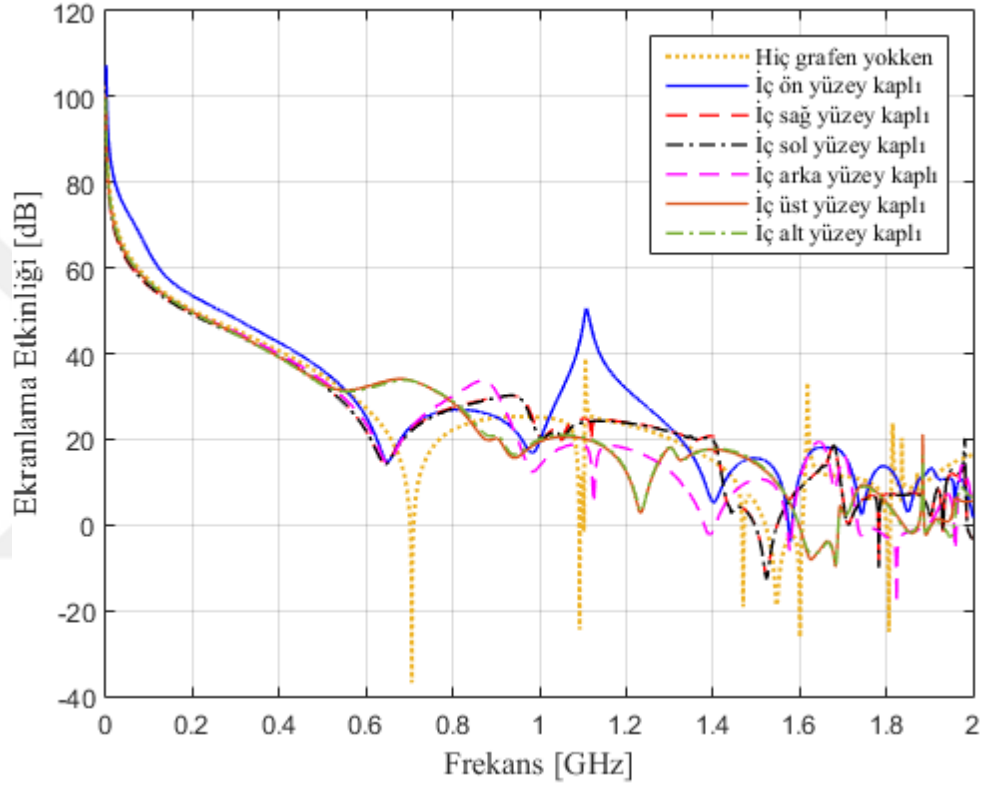
değerleri de birbirleriyle uyumludur; fakat önceki üç sonuca kıyasla 0,6 GHz'ten itibaren SE değerlerinde 20 dB'ye çıkan azalmalar görülmektedir. Bu durum, h üçgen yüksekliğinden kaynaklanmaktadır. En kötü sonuç ise iç ön yüzeydeki grafen plakasının kaldırıldığı durumda elde edilmiştir. İç yüzeylerin komple grafen plakalarla kaplı olduğu duruma göre 1,2-2 GHz aralığında SE üzerinde 22 dB'ye çıkan azalmalar elde edilmiştir. Çizelge 4.8'de çeşitli frekanslarda elde edilen SE değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.8. Yüzeyle 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

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 4.12). Kutu üzerindeki açıklık ön yüzeyde yer aldığından, iç ön yüzeyin grafen plakayla kaplanması Şekil 4.8 ve Şekil 4.10'daki 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. Çizelge 4.9’da ekranlama kutusu iç yüzeylerinden sadece birinin grafen plaka ile kaplanması durumunda çeşitli frekanslarda hesaplanan SE değerleri verilmiştir.



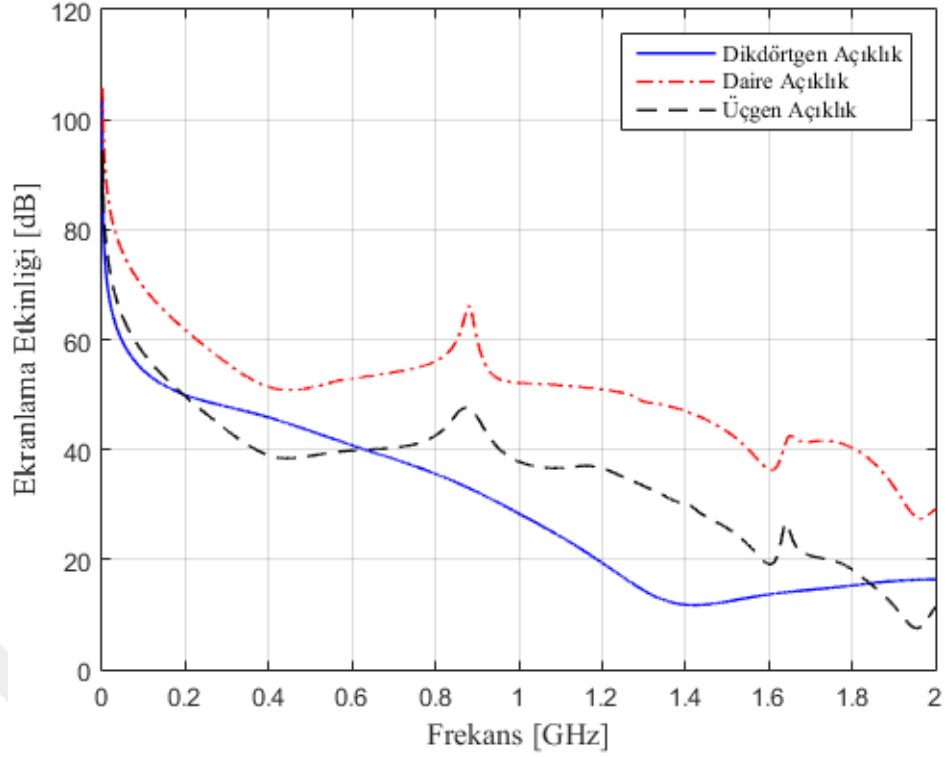
Şekil 4.12. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (üçgen açıklık)

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’den grafen plakanın iç yüzeylere kaplanmasıyla keskin kutu rezonanslarının önemli ölçüde önlendiği görülmektedir. Kutu iç yüzeylerinden herhangi birinin grafen plaka ile kaplanması, ekranlama etkinliği üzerinde iyileşme sağlamaktadır.

Çizelge 4.9. Tek bir yüzeyi grafen plakayla kaplamanın etkisi (üçgen açıklık)

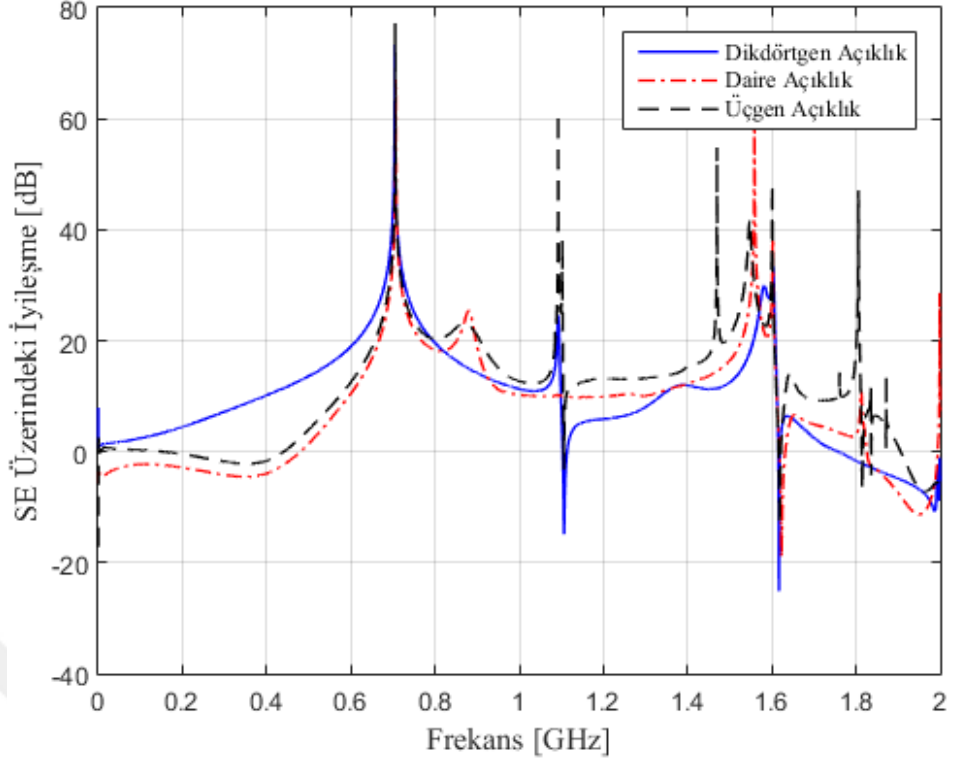
İşlem Tanımı	SE (dB) 300 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 900 MHz	SE (dB) 1,2 GHz	SE (dB) 1,5 GHz	SE (dB) 1,8 GHz
Hiç grafen yokken	45,52	27,29	24,98	23,41	4,78	0,06
İç ön yüzey kaplı	48,15	25,22	25,15	31,81	15,56	13,56
İç sağ yüzey kaplı	44,50	21,94	29,76	23,94	-0,85	7,17
İç sol yüzey kaplı	44,43	21,89	29,65	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

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 artırabilecek 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 4.13'te verilmiştir. Ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklık geometrisinin değişimi, iç yüzeyleri grafen plaka kaplı olmayan kutularda gerçekleştirilen SE analizleriyle uyumlu sonuçlar vermiş olup daire açıklık olması durumunda en büyük SE değerleri elde edilmiştir (bkz. Şekil 4.5). En düşük SE değerleri ise ön yüzeyde dikdörtgen açıklık olması durumunda elde edilmiştir.



Şekil 4.13. Grafen plaka kaplı kutuda farklı şekilde açıklık olması durumunda SE

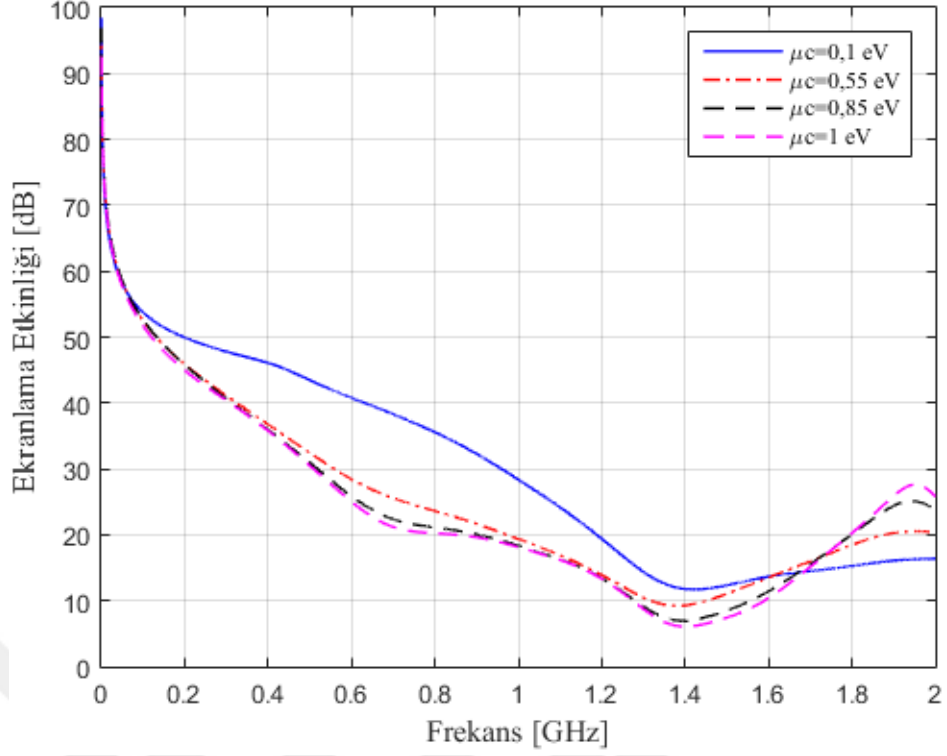
Farklı açıklık geometrilerine sahip kutularda iç yüzeylerin grafen plakalarla kaplanmasının frekansa bağlı olarak SE üzerinde sağladığı iyileşmeler ise Şekil 4.14'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kutuların iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanması, ortalama 10-15 dB arasında SE üzerinde iyileşmeler sağlamıştır. Bununla birlikte, ön yüzeyinde dikdörtgen açıklık bulunan kutu ile 0-0,8 GHz aralığında SE üzerinde en büyük iyileşme elde edilmiştir. 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.



Şekil 4.14. İç yüzeylerin komple grafen plakalarla kaplanmasının SE'ye etkisi

4.2.3. Grafen kimyasal potansiyelinin SE'ye etkisi

Grafen kimyasal potansiyeli μ_c , 0-1 eV aralığında tanımlanmaktadır (Sharma ve Dominic, 2018). Bölüm 4.2.2'de gerçekleştirilen simülasyonlarda $\mu_c = 0,1$ eV olarak alınmıştır. 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. $a = 300$ mm, $b = 160$ mm, $d = 310$ mm, $t = 2,5$ mm boyutlarına sahip ve $l = 100$ mm, $w = 10$ mm boyutlarında bir açıklığı olan alüminyum kutunun iç yüzeyleri $q = 35$ μm kalınlığında grafen plakalarla kaplanarak gerçekleştirilen simülasyonlarda kimyasal potansiyelin SE üzerindeki etkisi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Grafen kimyasal potansiyelinin SE'ye etkisi

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 (3.71)'de 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 (Wang, Raju, Chan ve Jiang, 2017). 1,7 GHz üzerinde ise bant içi geçiş katkısının gerçek kısmının etkisiyle, kimyasal potansiyelin artması grafenin iletkenliğini artırmaktadır. Dolayısıyla, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun SE değeri 1,7 GHz'in üzerindeki 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 (Yu ve Li, 2013).

4.3. Genetik Algoritma ile SE Bulguları

EV'deki eviricinin ekranlama kutusu için konnektör montajı, havalandırma deliği, ek kablolar vb. sebeplerden dolayı belli bir açıklık alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Tasarlanan GA ile ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklık için belirtilen bir tasarım aralığında, SE'yi başlangıç durumuna göre artıran açıklık eni w ve açıklık boyu l değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklık boyutlarının belirlenmesi için tasarlanan GA iki farklı kutuya uygulanmıştır. Öncelikle alüminyum malzemeden yapılmış, içi boş K1 kutusu üzerinde tasarlanan GA'nın sonuçları incelenmiştir. Sonra, alüminyum malzemeden yapılmış K2 kutusunun ön yüzeyindeki açıklık boyutları GA ile belirlenip, kutunun iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplanarak SE üzerindeki değişimler incelenmiştir.

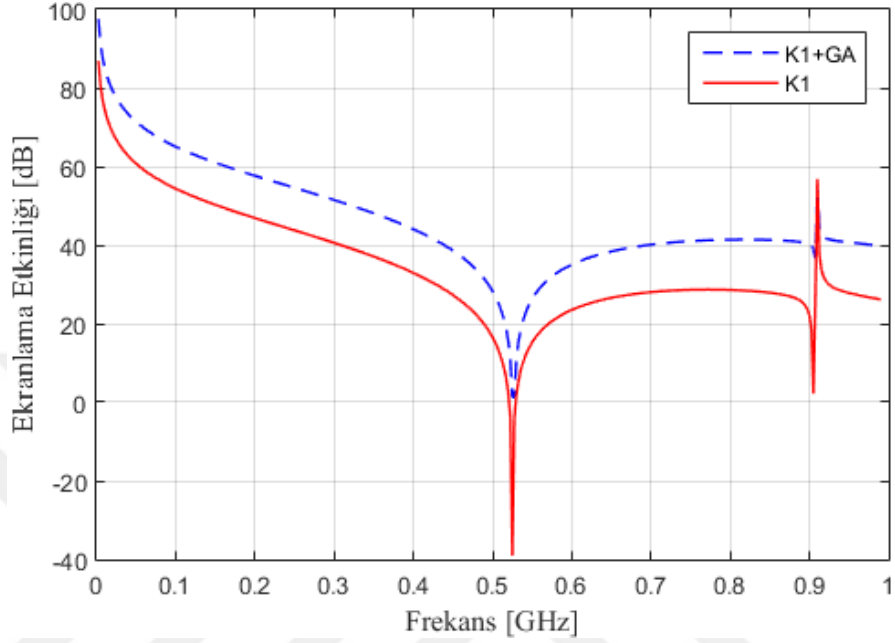
4.3.1. Tasarlanan GA ile açıklık boyutlarının belirlenmesi

$a = 490$ mm, $b = 240$ mm ve $d = 350$ mm boyutlarındaki K1 ekranlama kutusuna (bkz. Çizelge 3.4) tasarlanan GA uygulanarak, belirlenen bir tasarım aralığında SE değerini artıran açıklık boyutlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan GA'da popülasyon boyutu $p_{boyut}=1000$ olarak tanımlanmıştır. 10 ardışık yineleme adımı için yerel çözümde bir değişiklik olmaması durumunda çözümün çıkış olarak verilmesi yöntemi kullanılmıştır. Kutunun ön yüzeyindeki açıklık boyutları $w = 5$ mm, $l = 100$ mm olup, açıklık için tasarım aralığı $5 \leq w \leq 10$, $50 \leq l \leq 150$ olarak belirlenmiştir. GA ile elde edilen açıklık boyutları ve 0-1 GHz aralığında çeşitli frekanslardaki SE değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

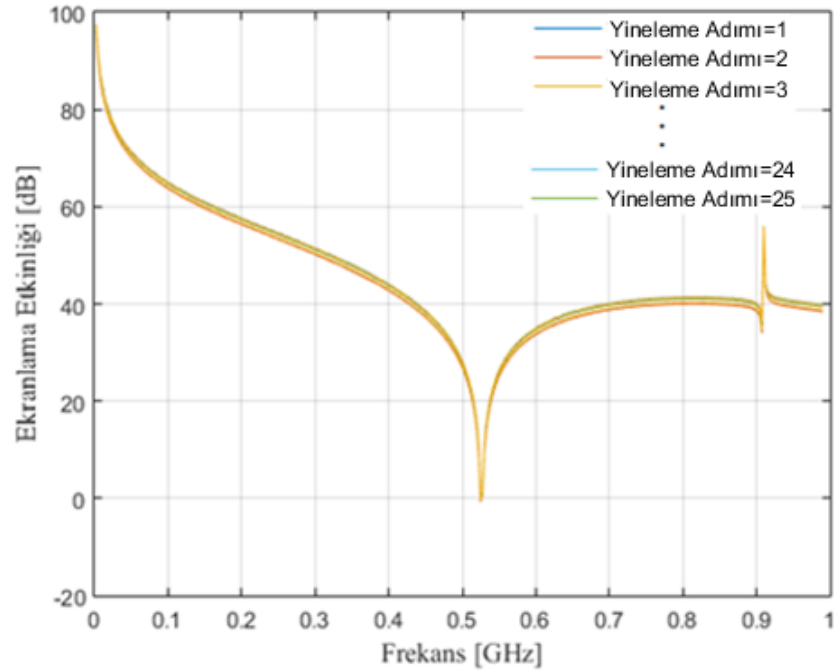
Çizelge 4.10. K1 kutusuna GA uygulanması sonucu SE üzerindeki değişim

Sonuç No.	En (mm)	Boy (mm)	Alan (mm ²)	SE (dB) 200 MHz	SE (dB) 400 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 800 MHz
K1	5	100	500	46,88	32,92	23,5	28,57
K1+GA	9,9	50,51	500,05	57,5	43,91	34,88	41,22

Şekil 4.16’da K1 kutusuna uygulanan GA ile elde edilen SE üzerindeki değişim gösterilmiştir. GA’nın uygulanması ile SE üzerinde $\geq +10,62$ dB iyileşme sağlanmıştır. Şekil 4.17’de ise her yineleme adımında SE üzerindeki değişim verilmiştir.

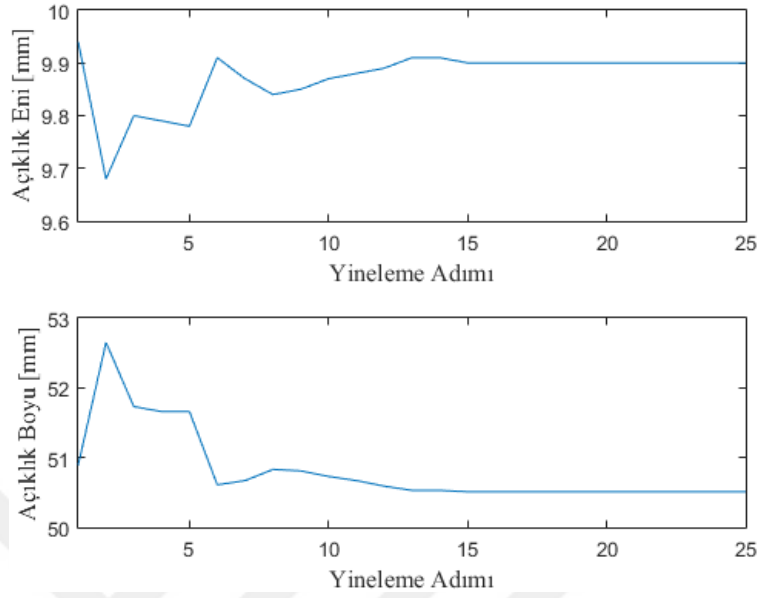


Şekil 4.16. K1 kutusuna GA uygulanması sonucu elde edilen SE



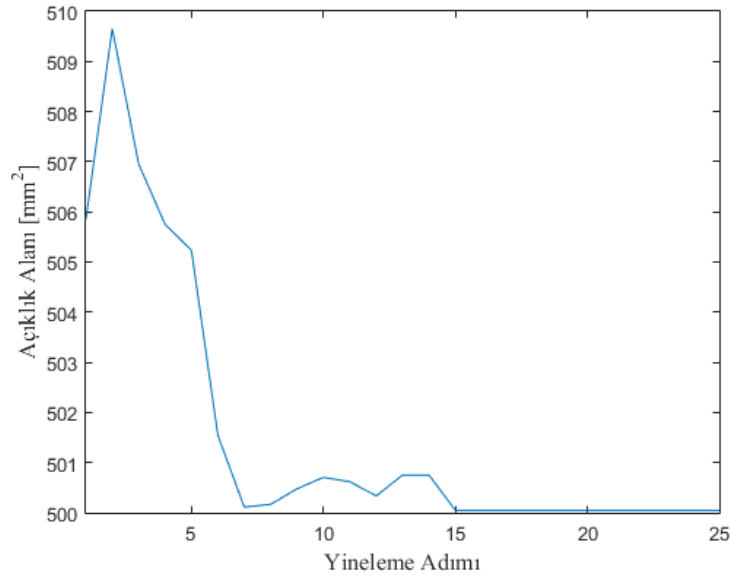
Şekil 4.17. GA yineleme adımları sırasında SE üzerindeki değişim

Şekil 4.18’de, yineleme adımları boyunca açıklık eni ve boyundaki değişimler verilmiştir.



Şekil 4.18. GA yineleme adımları sırasında açıklık boyutlarındaki değişim

Açıklık eni $w = 9,9$ mm ve açıklık boyu $l = 50,49$ mm değerleri, 15. yineleme adımında elde edilmiştir. 10 ardışık yineleme adımı boyunca w ve l çifti bu değerleri aldığından döngü sonlandırılmıştır. Şekil 4.19’da GA sonucuyla elde edilen açıklık alanının her yineleme adımı için değişimi gösterilmiştir.

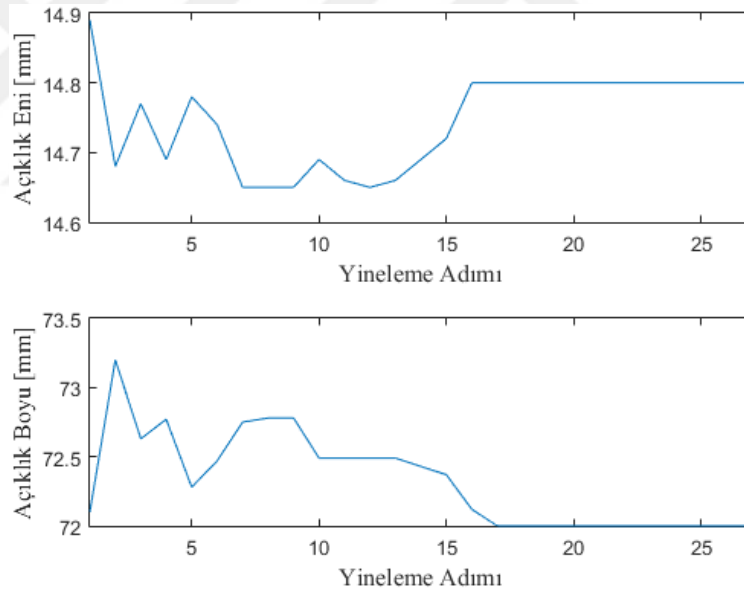


Şekil 4.19. GA yineleme adımları sırasında açıklık alanındaki değişim

Açıklık alanının 15. yineleme adımında sonra 500,05 mm² değerini aldığı elde edilmiştir. EK 4'te her yineleme adımı boyunca elde edilen açıklık boyutlarına göre SE üzerindeki değişimler çeşitli frekanslarda verilmiştir.

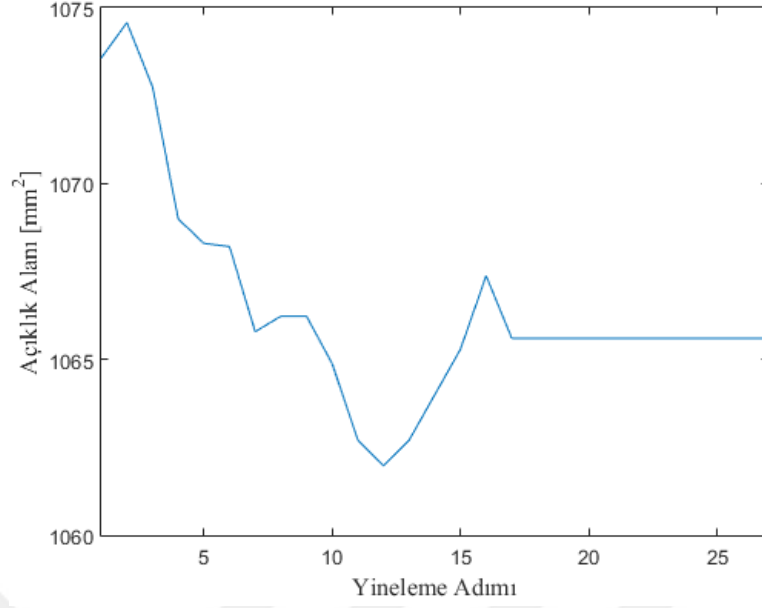
4.3.2. GA ile açıklık boyutları belirlenen kutunun grafen plakalarla kaplanması

K2 ekranlama kutusu için, tasarlanan GA ile kutunun ön yüzündeki açıklık boyutları belirlenmiş ve sonra iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplanarak 0-2 GHz aralığında ekranlama etkinliği incelenmiştir. Tasarlanan GA'da popülasyon sayısı $p_{boyut}=1000$ olarak belirlenmiştir. Başlangıçta kutunun ön yüzündeki açıklık boyutları $w = 10$ mm, $l = 100$ mm olup, açıklık boyutları için belirlenen tasarım aralığı $7 \leq w \leq 15$, $70 \leq l \leq 150$ olarak tanımlanmıştır. Her GA yineleme adımı için K2 kutusunun ön yüzünde yer alan açıklığın boyutlarındaki değişimler Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. GA yineleme adımları sırasında açıklık boyutlarındaki değişim

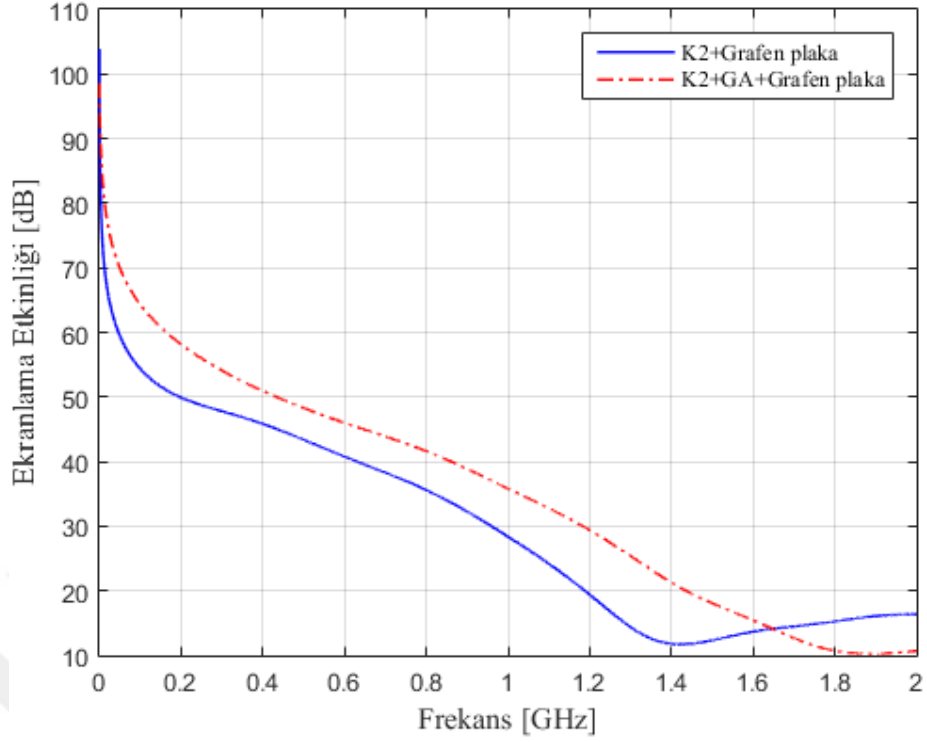
$w = 14,8$ mm ve $l = 72$ mm değerleri, 17. yineleme adımında elde edilmiştir. 10 ardışık yineleme adımı boyunca w ve l çifti bu değerleri aldığından döngü sonlandırılmıştır. Her GA yineleme adımı için K2 ekranlama kutusu yüzündeki açıklık alanının değişimi ise Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. GA yineleme adımları sırasında açıklık alanındaki değişim

17. yineleme adımından sonra açıklık alanı 1065,6 mm² olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun ekranlama etkinliği iyileştirilmiş olup aynı zamanda açıklık alanı da artırılmıştır. EK 4'te her yineleme adımı boyunca elde edilen açıklık boyutlarına göre SE üzerindeki değişimler çeşitli frekanslarda verilmiştir.

K2 kutusunun ön yüzeyindeki açıklık boyutları GA ile belirlendikten sonra kutunun iç yüzeyleri $q = 35 \mu\text{m}$ kalınlığında grafen plakalarla kaplanmıştır ve SE üzerindeki değişim elde edilmiştir. SE sonuçları, K2 kutusunun açıklık boyutlarınının $w = 10 \text{ mm}$, $l = 100 \text{ mm}$ olduğu yani GA uygulanmadan önceki durumda kutunun iç yüzeylerini grafen plakalarla kaplayarak elde edilen SE sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 4.22). Elde edilen sonuçların çeşitli frekanslarda kıyaslaması ise Çizelge 4.11'de verilmiştir. 0-2 GHz aralığında gerçekleştirilen simülasyonda 1,6 GHz'e kadar $SE \geq +5,23 \text{ dB}$ üzerinde iyileşmeler sağlandığı görülmektedir. 1,6 GHz'in üzerinde ise açıklık-ekranlama kutusu (rezonatör) etkileşiminden kaynaklı olarak azalmaların olduğu görülmektedir.



Şekil 4.22. GA ve grafen plakaların K2 kutusunun SE değerine etkisi

Çizelge 4.11. Belirli frekanslar için K2 kutusunun SE değerindeki değişimler

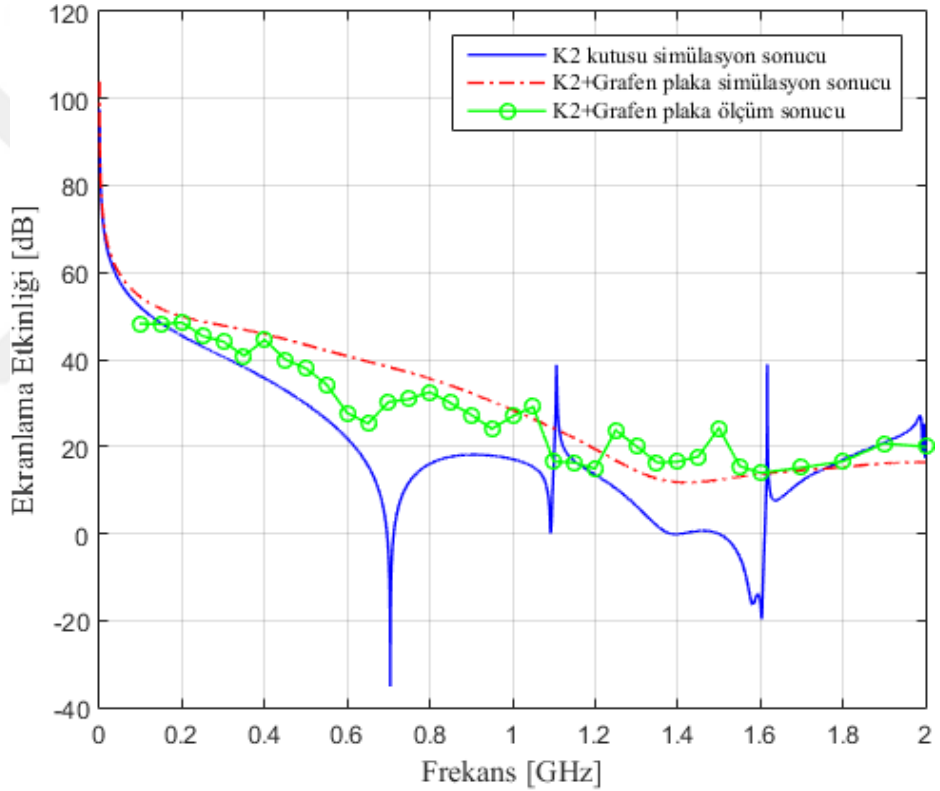
Sonuç No.	En (mm)	Boy (mm)	Alan (mm ²)	SE (dB) 200 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 1,2 GHz	SE (dB) 1,6 GHz
K2+Grafen	10	100	1000	49,91	40,77	19,4	13,65
K2+GA+Grafen	14,8	72	1065,6	58,15	46	29,36	15,41

4.4. Ölçümler ile SE Bulguları

100 MHz ile 2 GHz aralığında, 50 MHz artışlarla tam yansız odada gerçekleştirilen ölçümler için üç farklı tipte verici anten kullanılmıştır. Verici anten olarak 100 MHz-300 MHz, 300 MHz-1 GHz, 1 GHz-2 GHz frekans aralıkları için sırasıyla bikonik, log periyodik ve horn antenler kullanılmıştır. Alıcı anten olarak kutu üst yüzeyinden kutu merkezine yerleştirilen bir pin anten kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.31). EK 5'te SE ölçümleri için kullanılan antenler ve modelleri belirtilmiştir. Ölçümlerde alıcı ve verici antenler dikey polarizasyona göre ayarlanmıştır. Öncelikle ekranlama kutusunun olmadığı durumda alıcı anten üzerinden referans elektrik alan ölçümleri yapılmıştır.

Sonra, alıcı anten kutu merkezine yerleştirilerek aynı frekans noktaları için ölçümler tekrarlanmıştır. Her bir örnekleme frekansı için ölçümler 20 kez tekrarlanıp aktif güçte ortalamaları alınmıştır. Ölçümler için 40 noktadan daha az örnekleme frekansı kullanılmıştır ve elde edilen ortalama değerler ile SE elde edilmiştir.

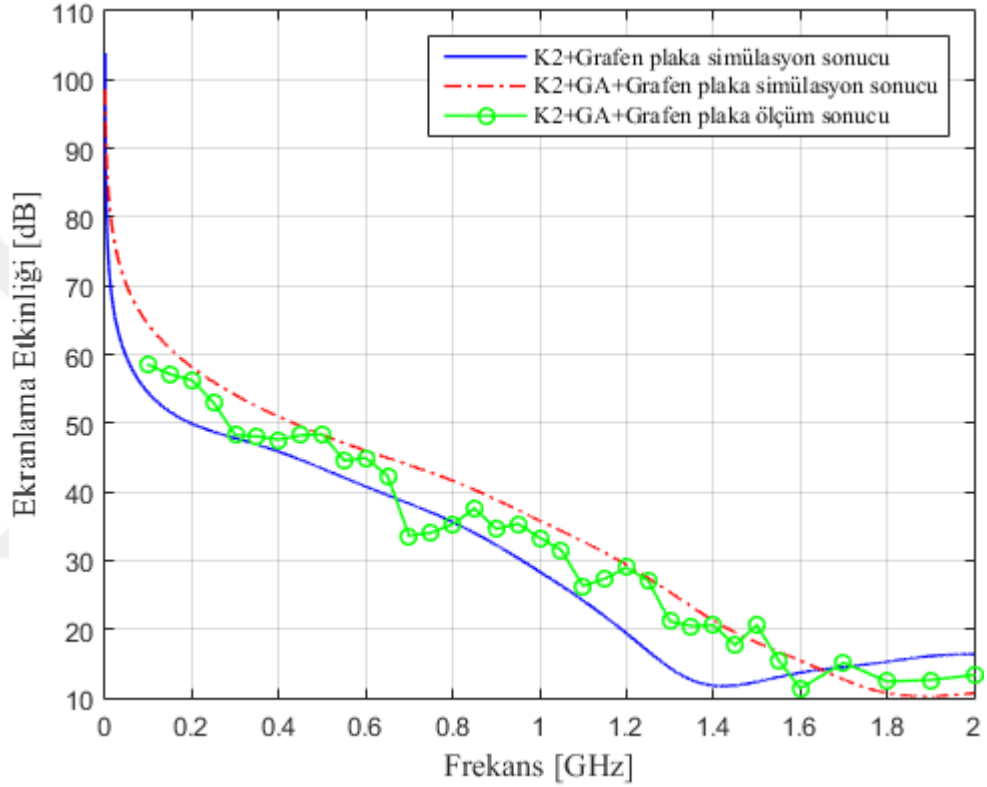
Simülasyon sonuçları, 5572 adet hücreden (tetrahedron) oluşan bir nümerik model kullanılarak elde edilmiştir. TE uyarımda ekranlama kutusuna uygulanan Gauss geçici düzlem dalgası ($\vec{k} = k\hat{a}_z, \vec{E} = E_y\hat{a}_y$) kullanılmıştır. İçi grafen plakalarla kaplı K2 kutusu için elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. K2+Grafen plaka için simülasyon ve ölçüm sonuçları

İçi grafen plakalarla kaplı K2 ekranlama kutusu için simülasyon ve ölçüm sonuçlarının genel olarak birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, özellikle kutu rezonans frekanslarına yakın ölçümlerde 5-10 dB seviyesinde farklar gözlemlenmiştir.

K2 ekranlama kutusun ön yüzeyindeki açıklık boyutları GA ile belirlenmiş ve sonra iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplanmıştır (bkz. Çizelge 4.11). Bu kutuya ilişkin ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.24'te verilmiş olup birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde rezonans frekanslarına yakın ölçümlerde 5-10 dB arasında farklar bulunurken, diğer frekans değerleri için 5 dB seviyesinden daha düşük farklar elde edilmiştir.



Şekil 4.24. K2+GA+Grafen plaka için simülasyon ve ölçüm sonuçları

Şekil 4.24'te simülasyon ve ölçüm sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar arasındaki farkın oluşmasında, verici anten ile ekranlama kutusu arasında meydana gelen kuplaj, 40 noktadan daha az örnekleme noktasının kullanılması, alıcı ve verici anten yönlerindeki farklılıklar gibi sebepler bulunmaktadır.

5. SONUÇ

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motora sahip araçlara göre daha karmaşık ve birbirine etkisi daha fazla olan elektronik ekipman ve sistemleri bünyesinde barındırmaktadır. 12 V akü beslemesiyle çalışan sistemler ile yüksek gerilimli batarya tarafından beslenen ekipman ve sistemlerin bir arada uyum içinde çalışabilmesi için dikkat edilmesi gereken önemli EMC konularından biri de ekranlama kutusu tasarımıdır.

Ekranlama kutuları üzerindeki açıklıklar, ekranlama etkinliğini önemli ölçüde zayıflatmaktadır. Elektrikli araçlar içinde ekranlama kutusu boyutlarının değiştirilemediği ve kutu yüzeyinde belli bir açıklık alanına ihtiyaç duyulan durumlarda, SE'yi belirli bir seviyenin üzerinde tutmak gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, kutu boyutlarının sabit kaldığı ve üzerindeki açıklığın belli bir alana sahip olması gerektiği durumda, ekranlama etkinliğini artıracak çözüm yolları incelenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen SE analizleri, EV'lerde kablosuz haberleşme ve yüksek kalite veri haberleşmesi gereksinimlerinin artması sebebiyle literatürde çoğunlukla çalışılan 0-1 GHz aralığından 0-2 GHz bandına taşınmıştır. Tez çalışmasında literatürdeki çalışmalardan farklı olarak incelenmiş üç durum bulunmaktadır. Birincisi: Elektrikli araçlardaki ekranlama kutularında, konnektör montajı için açılan farklı geometrilerdeki açıklıkların SE'ye etkisi incelenmiştir. Ayrıca açıklık şekillerine bağlı olarak meydana gelen kutu rezonanslarındaki değişimler analiz edilmiştir. İkincisi: Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanmasının ekranlama etkinliğine etkisi incelenmiştir. Böylece, SE'yi iyileştirmek için ekranlama kutusunun yeniden tasarlanmasını önleyen bir çözüm sunulmuştur. Farklı açıklık geometrilerine sahip kutular içindeki her bir yüzeyin grafen plakayla kaplanmasının SE'ye etkisi analiz edilmiştir. Üçüncüsü: Ekranlama kutusunun ekranlama etkinliğini başlangıç seviyesine göre artıran GA tabanlı bir algoritma tasarlanmıştır. Ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklık boyutları GA ile belirlenip, kutunun iç yüzeylerine grafen plakalar kaplandığı durumda SE üzerindeki değişimler incelenmiştir. Son olarak, laboratuvar ortamında yapılan SE ölçümleri ile tez kapsamında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bölüm 4.1'deki analitik yöntem ile SE bulgularına göre, kutu boyutu arttıkça SE'nin arttığı görülmektedir. 300 mm x 160 mm x 310 mm (E1) boyutları yerine 490 mm x 240 mm x 450 mm (E3) boyutlarında bir kutu kullanıldığında 400 MHz örnekleme frekansında SE üzerinde 8,13 dB iyileşme sağlanmıştır. Kutu rezonansları, beklendiği gibi E1 kutusu için 692 MHz ve E3 kutusu için 452 MHz'te elde edilmiştir. Kutu boyutu sabit kalıp üzerindeki açıklık alanının artması ise SE değerini düşürmektedir. Kutu ön yüzeyinde 1 tane açıklık yerine aynı alanı kullanarak birbirine eş, daha fazla açıklık oluşturmak SE'yi artırmaktadır. 80 x 80 mm² açıklık alanında 1 açıklık yerine 16 tane küçük açıklığın olması durumunda 500 MHz örnekleme frekansında SE üzerinde 11,3 dB iyileşme sağlanmıştır.

Bölüm 4.2.1'deki nümerik model ile SE bulgularında, tasarlanan nümerik modelin analitik yöntemle uyumlu olduğu gösterilmiştir. Kutu boyutları ve kutu yüzeyindeki açıklık alanı sabit kalacak şekilde açıklık geometrileri değiştirilerek SE üzerindeki etkisi incelenmiştir. Açıklığın dikdörtgen, üçgen ve daire şekillerinde olması durumlarında gerçekleştirilen SE analizlerine göre, açıklığın daire şeklinde olması dikdörtgen şeklinde olmasına kıyasla frekansa bağlı olarak SE üzerinde minimum 19,35 dB iyileşme sağladığı görülmüştür.

Bölüm 4.2.2'deki ekranlama kutusu iç yüzeylerine grafen plakalar kaplanmasıyla ilgili nümerik modelden elde edilen bulgularda ise, kutu boyutlarını değiştirmeden ekranlama etkinliğini iyileştirebilecek bir yöntem sunulmuştur. Kutu iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplandığı farklı konfigürasyonlardan elde edilen simülasyon sonuçları, keskin kutu rezonanslarının da grafen plaka uygulamasıyla birlikte önlendiğini göstermiştir. Ön yüzeyinde dikdörtgen açıklık bulunan ekranlama kutusunun tüm iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplandığı durumda, kutu rezonans frekansında ekranlama etkinliği 44,61 dB artırılmıştır. 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 arka yüzeyde grafen plaka olmaması durumunda 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.

İç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklığın dikdörtgen, daire ve üçgen gibi farklı şekillerde olması durumlarında SE üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. 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.

Bölüm 4.3.1'de tasarlanan genetik algoritma ile elde edilen SE bulgularında, ekranlama kutusunun ön yüzeyindeki açıklık boyutlarının GA ile belirlenerek ekranlama etkinliğinin başlangıç değerine göre artırılması amaçlanmıştır. Ön yüzeyinde 500 mm²'lik açıklık alanı bulunan alüminyum ekranlama kutusu için tasarlanan algoritma ile, her defasında başlangıç durumuna göre iyileştirilmiş SE değerleri ve 500 mm²'lik alandan daha büyük bir açıklık alanı sağlayacak açıklık boyutları elde edilmiştir. SE başlangıç değerlerinin, tasarlanan GA ile 30 dB üstüne çıkarıldığı görülmüştür.

Bölüm 4.3.2'de öncelikle bir alüminyum kutuya tasarlanan GA uygulanmıştır. SE üzerinde iyileşme sağlanırken aynı zamanda kutunun ön yüzeyindeki açıklık alanı, 1000 mm²'lik başlangıç alanından 1065,6 mm²'ye çıkarılmıştır. Sonra, açıklık boyutları GA ile

belirlenen alüminyum kutunun iç yüzeyleri grafen plaka ile kaplanarak SE üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 1000 mm²'lik açıklık alanına sahip referans kutunun iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplanarak karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonda, açıklık boyutları GA ile belirlenmiş ve iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplı ekranlama kutusu ile 1,6 GHz'e kadar $SE \geq +5,23$ dB üzerinde iyileşme elde edilmiştir.

Ekranlama etkinliğini artırmaya yönelik önerilen çözüm yöntemleri ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Birinci ölçümde, ekranlama kutusunun iç yüzeylerinin grafen plakalarla kaplanmasının SE üzerindeki etkisi incelenmiştir. İkinci ölçümde ise kutunun ön yüzeyindeki açıklık boyutları GA ile belirlenip, iç yüzeyleri grafen plakalarla kaplanarak SE üzerindeki değişim incelenmiştir. Nümerik modelden elde edilen simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının birbirleriyle uyumlu oldukları görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Abdulla, R. (2016). *Farklı yapı ve özelliklerdeki dokuma ve örgü kumaşların elektromanyetik ekranlama etkinliğinin araştırılması* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 470775).
- Akiyama, T., Sasaki, M., Shinagawa, M., Tanaka, K., Sato, K. ve Asahi, T. (2016). Shielding effectiveness of multi-layered Cu and PET thin films from electromagnetic interference. A. Ferrero ve diğerleri (Ed.), *International Instrumentation and Measurement Technology Conference* içinde. Taipei, Taiwan: IEEE.
- Altun, M., Karteri, İ. ve Güneş, M. (2017). A study on EMI shielding effectiveness of graphene based structure. *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)* içinde, Malatya, Turkey: IEEE. doi: 10.1109/IDAP.2017.8090166
- Aqeeli, M., Leng, T., Huang, X., Chen, J.C., Chang, K.H., Alburaihan A. ve Hu, Z. (2015). Electromagnetic interference shielding based on highly flexible and conductive graphene laminate. *Electronics Letters*, 51(17): 1350-1352. doi: 10.1049/el.2015.2299
- Araneo, R. ve Lovat, G. (2008). An efficient MoM formulation for the evaluation of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with thin and thick apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 50(2): 294-304. doi: 10.1109/TEMC.2008.919031
- Atasever, Ö. (2015). *Katmanlı grafenin elektronik özelliklerinin Monte Carlo yöntemi ile hesabi ve grafenin optik özellikleri* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 379765).
- Bachir, G., Abdechafik, H. ve Mecheri, K. (2016). Comparison electromagnetic shielding effectiveness between single layer and multilayer shields. C. Ferreira (Ed.), *51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)* içinde. Coimbra Portugal: IEEE. doi: 10.1109/UPEC.2016.8114106
- Bahadorzadeh, M. ve Moghaddasi, M.N. (2006). Improving shielding effectiveness of a rectangular metallic enclosure with aperture by using extra shielding wall. J. LoVetri ve R. Abhari (Ed.), *12th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and Canadian Radio Sciences Conference* içinde. Montreal, Canada: IEEE. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7864038/>
- Basyigit, I.B. ve Dogan, H. (2019). The analytical and artificial intelligence methods to investigate the effects of aperture dimension ratio on electrical shielding effectiveness. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 65(3): 359-365. doi: 10.24425/ijet.2019.126322
- Başçı, M. (2015). Geleceğin Malzemesi Grafen. *Bilişim Dergisi*, 177(22): 156-165.

Başıyigit, İ.B. (2016). *Metalik kutulama topolojisinin toplam elektromanyetik emisyon dağılımına etkisinin incelenmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 444853).

Belkacem, F.T., Bensetti, M., Boutar, A.G., Moussaoui, D., Djennah, M. ve Mazari, B. (2011). Combined model for shielding effectiveness estimation of a metallic enclosure with apertures. *IET Science, Measurement & Technology*, 5(3): 88-95. doi: 10.1049/iet-smt.2010.0040

Belloufi, A., Assas, M., Rezgui, I. (2013). Optimization of turning operations by using a hybrid genetic algorithm with sequential quadratic programming. *Journal of Applied Research and Technology (JART)*, 11(1):88-94. doi: 10.1016/S1665-6423(13)71517-7

Belokour, I., Lo Vetri, J. ve Kashyap, S. (2000). Shielding effectiveness estimation of enclosures with apertures. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (s. 855-860) içinde. DC, USA: IEEE. doi: 10.1109/isemc.2000.874734

Bollapragada, S., Cheng, H., Phillips, M., Garbiras, M., Scholes, M., Gibbs, T. ve Humphreys, M. (2002). NBC's Optimization Systems Increase Revenues and Productivity. *Interfaces*, 32: 47-60.

Bozzi, M., Pierantoni L. ve Bellucci, S. (2015). Application of graphene at microwave frequencies. *Radioengineering*, 24(3): 661-669. doi: 10.13164/re.2015.0661

Carlsson, J. ve Carlberg, U. (2014). On the radiation from common mode currents on cables placed over joined conducting planes commonly used in vehicles. M. Taki ve O. Wada (Ed.), *International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (s. 465-468) içinde. Tokyo, Japan: IEEE. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6997219>

Celozzi, S., Araneo, R. ve Lovat, G. (2008). *Electromagnetic shielding*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

Chen, J., Guo, J. ve Tian, C. (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/TEMPC.2016.2621884

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/TEMPC.2007.893329

Cheng, D.K. (2006). *Field and wave electromagnetics* (2. baskı). Hong Kong: Tsinghua University Press.

Chhetri, S., Samanta, P., Murmu, N.C., Srivastava, S.K. ve Kuila, T. (2016). Electromagnetic interference shielding and thermal properties of non-covalently functionalized reduced graphene oxide/epoxy composites. *AIMS Material Science*, 4(1): 61-74. doi: 10.3934/matricsci.2017.1.61

Ciccomancini Scogna, A., Antonini, G. ve Orlandi, A. (2007). Analysis of radiated emissions and shielding effectiveness for a metallic enclosure with shielding springs. J. O'Neil (Ed.), *International Symposium on Electromagnetic Compatibility* içinde. HI, USA: IEEE. doi: 10.1109/ISEMC.2007.70

Clayton, P.R. (2006). *Introduction to electromagnetic compatibility*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

Cruciani, S., Feliziani, M. ve Maradei, F. (2015). Prediction of shielding effectiveness in graphene enclosures by FEM-INBC method. T. Wu ve diğ erleri (Ed.), *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (s. 376-379) içinde. Taipei, Taiwan: IEEE. doi: 10.1109/APEMC.2015.7175374

D'Aloia, A.G., D'Amore, M., Sarto, M.S. (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

D'Aloia, A.G., D'Amore, M. ve Sarto, M.S. (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

Dan, S., Yougang, G. ve Yuanmao, S. (2007). Determination of shielding effectiveness of multilayer shield by making use of transmission line theory. *7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology* (s. 95-97) içinde. Saint-Petersburg, Russia: IEEE. doi:10.1109/EMCECO.2007.4371656

Dehkhoda, P., Tavakoli, A. ve Azadifar, M. (2012). Shielding effectiveness of an enclosure with finite wall thickness and perforated opposing walls at oblique incidence and arbitrary polarization by GMMoM. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(4): 792-805. doi: 10.1109/TEMC.2012.2188855

Dejband, E., Karami, H. ve Hosseini, M. (2017). Tunable electromagnetic interference shield using periodic graphene-based structures in the terahertz regime. *International Conference on Circuits, Devices and Systems (ICCDs)* (s. 34-37) içinde. Chengdu, China: IEEE. doi: 10.1109/ICCDs.2017.8120446

Dil, Y. (2015). *Yazılım projelerinin optimizasyon problemi olarak incelenmesi ve genetik algoritma ile çözümü* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 421355).

Du, W., Hao, R. ve Li, E.P. (2014). The study of few-layer graphene based Mach-Zehnder modulator. *Optics Communications*, 323(14): 49-53.

Dursun, E. (2006). *Elektrik Sistemlerinde Elektromanyetik Uyum* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 185219).

Er-ping, L. (2008). Computational electromagnetics for electromagnetic compatibility / signal integrity analysis. Erişim adresi: <http://web.mst.edu/~jfan/slides/Li2.pdf>

Eswaraiah, V., Sankaranarayanan, V., Mishra, A.K. ve Ramaprabhu, S. (2010). Electromagnetic interference (EMI) shielding of carbon nanostructured films. *ICCCE International Conference on Chemistry and Chemical Engineering, Proceedings* (s. 150-152) içinde. Kyoto, Japan: IEEE. doi: 10.1109/ICCCENG.2010.5560383

Fan, Y., Du, Z., Gong, K. ve Li, G. (2003). Analysis on shielding effectiveness of metallic enclosures with slot. *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics* s. (43-46) içinde. Hangzhou, China: IEEE. doi:10.1109/CEEM.2003.238480

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

Fiğlalı, A. ve Engin, O. (2002). Genetik Algoritmalarla Akış Tipi Çizelgelemede Üreme Yöntemi Optimizasyonu, *İTÜ Dergisi*, 1(1): 1-6.

Geim, A.K. ve Novoselov, K.S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6: 183-191. doi: 10.1038/nmat1849

Gifuni, A. (2013). Relation between the shielding effectiveness of an electrically large enclosure and the wall material under uniform and isotropic field conditions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 55(6): 1354-1357. doi: 10.1109/TEMC.2013.2265040

Goldberg, D. (1989). Genetic Algorithms in Search. *Optimization and Machine Learning*, 3: 95-99.

Grafen Plaka. (2020). Erişim adresi: <https://shop.nanografi.com.tr/grafen-plaka-boyut-29-cm-x-29-cm/>

Gupta, K.C., Garg, R., Bahl, I. ve Bhartia, P. (1979). *Microstrip Lines and Slotlines*. London: Artech House.

Güler, S. (2007). *Elektromanyetik Uyumluluk Tekniklerinde Elektromanyetik Işımanın Modellenmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 202332).

Güler, S. ve Yenikaya, S. (2021). 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

Güler, S., Yenikaya, S. ve Şimşek, M. (2019). EMC design for battery electric vehicle (BEV) propulsion system. O. Kalenderli ve diğerleri (Ed.), *11th International Conference*

on *Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (s. 286-289) içinde. Bursa, Turkey: IEEE. doi:10.23919/ELECO47770.2019.8990410

Güler, S., Yenikaya, S. ve Yılmaz, G. (2020). Elektrikli araçlardaki EMC problemlerinin analizi. *Academic Perspective Procedia*, 3(1): 98-104. doi: 10.33793/acperpro.03.01.26

Hao, C. ve Li, D. (2014). Simplified model of shielding effectiveness of a cavity with apertures on different sides. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(2): 335-342. doi: 10.1109/TEMC.2013.2280152

Herlemann, H. ve Koch, M. (2008). Measurement of the transient shielding effectiveness of the shielding cabinets. *Advances in Radio Science*, 6(12): 293-298. doi: 10.5194/ars-6-293-2008

Hussain, T., Majid, I. ve Cao, Q. (2020). Improved shielding effectiveness of enclosures using symmetrically placed metallic posts. *17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)* içinde. Islamabad, Pakistan: IEEE.

IEEE Standard 299. (2012). *Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures*. New York: IEEE.

Ilgar, T., Bulut, M. ve Saka, B. (2015). Shielding effectiveness for metallic enclosures with various aperture shapes. *1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC)* içinde. Las Palmas, Spain: IEEE. doi: 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7303047

Jiao, C., Cui, X., Li, L. ve Li, H. (2006). Improved subcell model of thin multilayer material sheet in FDTD method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(4): 935-938. doi: 10.1109/TMAG.2006.871668

Kasap, S., Koughia, C. ve Ruda, H.E. (2017). *Electrical conduction in metals and semiconductors*. S. Kasap ve P. Capper (Ed.), Handbook of electronic and photonic materials (s. 19-44) içinde. Saskatoon: Springer International Publishing.

Keshtkar, A., Maghoul, A., Kalantarnia, A. ve Hashempour, H. (2009). Simulation of shielding effectiveness in low frequencies for conductive enclosure. *2nd International Conference on Computer and Electrical Engineering* içinde. Dubai, United Arab Emirates: IEEE. doi: 10.1109/ICCEE.2009.250

Kim, K., Wonzoo, P. ve Lee, K. (2013). Shielding effectiveness through narrow slots in dual conducting screens. *IEICE Electronics Express*, 10(21): 1-8. doi: 10.1587/elex.10.20130750

Lan, S. ve Lin, W. (2016). Genetic algorithm optimization research based on simulated annealing. *17th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)* içinde. Shanghai, China: IEEE. doi: 10.1109/SNPD.2016.7515946

Lee, Y.S., Malek, F., Cheng, E.M., Liu, W., You, K.Y., Wee, F.H., Zahid, L. ve Rahim, A. (2016). Single layer microwave absorber based on rice husk-MWCNTs composites. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(14): 8932-8937.

Liu, E., Du, P., Liu, W. ve Ren, D. (2014). Accuracy analysis of shielding effectiveness of enclosures with apertures: a parametric study. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(6): 1396-1403. doi: 10.1109/TEMPC.2014.2333520

Lovat, G. (2012). Equivalent circuit for electromagnetic intersection and transmission through graphene sheets. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(1): 101-109. doi: 10.1109/TEMPC.2011.2169072

Mao, X. ve Du, P.A. (2010). An improved model of Robinson equivalent circuit analytical model. *Science China Technological Sciences*, 53(7): 1993-1999. doi: 10.1007/s11431-009-3244-9

Obreja, A.C., Iordanescu, S., Gavrilă, R., Dinescu, A., Comanescu, F., Matei, ...Iovu, H. (2015). Flexible films based on graphene/polymer nanocomposite with improved electromagnetic interference shielding. *International Semiconductor Conference (CAS)* içinde. Sinaia, Romania: IEEE. doi: 10.1109/SMICND.2015.7355156

Odetayo, M.O. (1993). Optimal population size for genetic algorithms: an investigation. *IEE Colloquium on Genetic Algorithms for Control Systems Engineering* içinde. London, UK: IEEE.

Oktem, M.H. ve Saka, B. (2001). Design of multilayered cylindrical shields using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 43(2): 170-176. doi: 10.1109/15.925537

Ott, H.W. (2009). *Electromagnetic compatibility engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Özen, Ş. ve Arı, N. (2008). *Elektromanyetik uyumluluk*. Ankara: Palme Yayıncılık.

Öztürk, N. (2015). *Resim iyileştirme tekniklerinin başarımının zeki optimizasyon yöntemleriyle artırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 398659).

Özkan, Y. (2018). *Elektromanyetik girişimden korunmada ekranlama ve malzemelerin ekranlama etkinliğinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No: 509237).

PE4355 pin anten. (2021). Erişim adresi: <https://www.pasternack.com/n-female-standard-pin-terminal-connector-pe4355-p.aspx>

Preault, V., Corcolle, R., Daniel, L. ve Pichon, L. (2013). Shielding effectiveness of composite materials: effect of inclusion shape. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5): 1941-1944. doi: 10.1109/TMAG.2013.2244865

Quing-yu, W., Xiao-dong, Z., Lei, W. ve Xi, Z. (2007). EMC design for HEV drive system. *International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications* içinde. Hangzhou, China: IEEE. doi: 10.1109/MAPE.2007.4393530

Robinson, M.P., Benson, T.M., Christopoulos, C., Dawson, J.F., Ganley, M.D., Marvin, A.C., ...Thomas, D.W.P. (1998). Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 40(3): 240-248. doi: 10.1109/15.709422

Sevgi, L. (2019). *Tasarımdan piyasaya elektromanyetik uyumluluk*. İstanbul: İstanbul Okan Üniversitesi.

Sharma, A.K. ve Dominic A. (2018). Coordinated tuning of graphene's chemical potential with NIR wavelength and temperature under kubo framework for enhanced performance of SPR-based chemical sensor. *IEEE Sensors Journal*, 18(22): 9207-9213.

Shim, J., Kam, D.G., Kwon, J.H. ve Kim, J. (2010). Circuit modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 52(3): 566-577. doi: 10.1109/TEMPC.2009.2039483

Tihanyi, L. (1995). *Electromagnetic compatibility in power electronics*. Oxford: Newnes.

Wang, D., Zhao, W.S., Gu, X., Chen, W. ve Yin, W.Y. (2015). Wideband modeling of graphene-based structures at different temperatures using hybrid FDTD method. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 14(2): 250-258. Doi: 10.1109/TNANO.2014.2387576

Wang, L., Gao, Y., Shen, Y. ve Ruan, F. (2007). Analysis of shielding effectiveness of aperture arrays with different spacing. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility* içinde. Qindao, China: IEEE. doi: 10.1109/ELMAGC.2007.4413498

Wang, Q., Cheng, E. ve Zhaoming, Q. (2011). On the shielding effectiveness of small-dimension enclosures using a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 53(3): 562-569. doi: 10.1109/TEMPC.2011.2157164

Wang, Q., Shi, L. ve Liu, H. (2018). Modeling of multilayer graphene at terahertz with vector fitting method. *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)* içinde. Nanjing, China: IEEE. doi: 10.1109/ICSAI.2018.8599309

Wang, R., Raju, S., Chan, M. ve Jiang, L.J. (2017). Low frequency behavior of CVD graphene from DC to 40 GHz. *Progress in Electromagnetics Research C*, 71: 1-7. doi: 10.2528/PIERC16111901

Wang, Z., Luo, J., Zhao, G. (2013). Dielectric and microwave attenuation properties of graphene nanoplatelet—epoxy composites. *AIP Advances*, 4(1): 017139-9. doi: 10.1063/1.4863687

Yan, X., Wang, T., Xiao, S., Liu, T., Hou, H., Cheng, L. ve Jiang, X. (2017). Dynamically controllable plasmon induced transparency based on hybrid metal-graphene metamaterials. *Scientific Reports*, 7(1): 13917. doi: 10.1038/s41598-017-14328-6

Yenikaya, S. (2011). Açıklığa sahip yüklü ekranlama kutularının hibrit MoM/FEM kullanılarak elektromanyetik analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, (16)1: 69-81.

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*, 19(2): 204-210. doi: 10.1002/mmce.20341

Yiğit, T. ve Aydemir, M. (2018). Paket döndürmeksizin genetik algoritma kullanarak konteyner yükleme problemi optimizasyonu. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1): 21-28. doi: 10.21923/jesd.318853

Yu, Y. ve Li, E. (2013). Numerical investigation of the graphene sheet as an efficient electromagnetic shielding layer. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)* içinde. Torino, Italy: IEEE. doi: 10.1109/ICEAA.2013.6632284

Zhang, B., Zhang, J., Chengguo, L., Wu, Z.P. ve He, D. (2018). Equivalent resonant circuit modeling of a graphene-based bowtie antenna. *Electronics*, 7(11): 285. doi: 10.3390/electronics7110285

Zheng, B. ve Zhongxiang, S. (2008). Shielding effectiveness of cylindrical enclosures with rectangular apertures. *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility* içinde. Singapore: IEEE. doi: 10.1109/APEMC.2008.4559974

EKLER

- EK 1** Grafen İletkenliği MATLAB Kodları
- EK 2** Yansıma Kaybı Hesaplaması için MATLAB Kodları
- EK 3** GA için MATLAB Kodları
- EK 4** GA Yineleme Adımları Sırasında SE Değişimleri
- EK 5** SE Ölçümlerinde Kullanılan Antenler



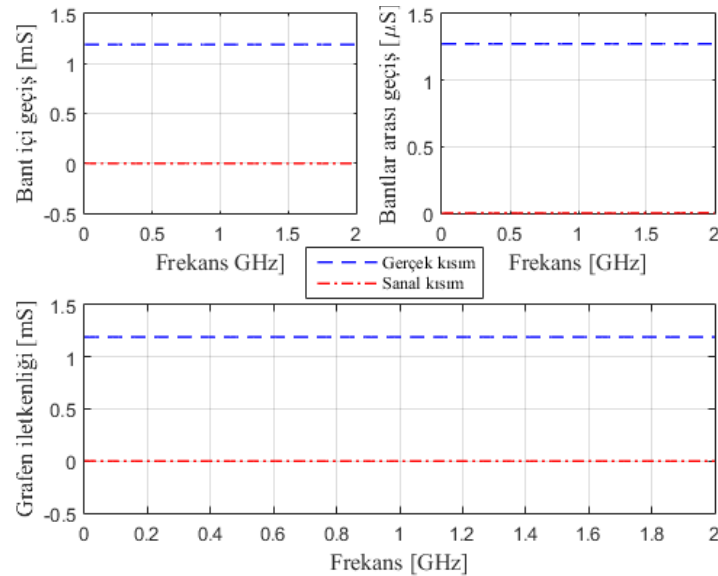
EK 1 Grafen İletkenliği MATLAB Kodları

```
e_const = 1.602176565e-19; % C
h_const = 6.62606957e-34; % J*sec
h_bar_const = h_const/2/pi;
kB_const = 1.3806488e-23; % J/K
T=300; % K
Ef=0.1; % eV
Ef_J = 1.60217657e-19*Ef;
kBT = T*kB_const;
Ts=0.1e-12; %ps
%Ts=3e9;
gamma=(0.329/Ts)*1e-12; % ps to mEV için
gamma=gamma*1e-3; % mEV to EV için
gamma=gamma*241799050402293;% EV to Hz cevrimi
gamma=gamma*2*pi; % rad*sec^-1
```

Ek Şekil 1.1. Grafen iletkenliği için sabitlerin tanımlanması

```
f_top=2e9;
inc=0.001e9;
a=0;
for freqs=0:inc:f_top; % frekans
    omega = 2*pi*freqs; % rad*sec^-1
    a=a+1;
    sig_intra(a) = -1j*e_const^2*kBT/pi/h_bar_const^2/(omega-2j*gamma)*(Ef_J/kBT+2*log(exp(-Ef_J/kBT)+1));
    sig_inter(a) = -1j*e_const^2/4/pi/h_bar_const*log((2*abs(Ef_J)-(omega-2j*gamma)*h_bar_const)/
    (2*abs(Ef_J)+(omega-2j*gamma)*h_bar_const));
    sig(a) = sig_intra(a)+sig_inter(a);
end
```

Ek Şekil 1.2. Grafen iletkenliğinin frekansa bağlı olarak elde edilmesi



Ek Şekil 1.3. Grafenin bant içi ve bantlar arası geçiş katkıları (0-2 GHz)

EK 2 Yansıma Kaybı Hesaplaması için MATLAB Kodları

```
#####  
%% tek katlı yapıların SE_r hesaplaması%%  
#####  
sigma3=sigmar1*sigma0; %Alüminyum iletkenlik sabiti [S/m]  
t1=0.1e-3; %Alüminyum ekran kısmının kalınlığı  
f=0:0.1e6:2e9; %Frekans [Hz]  
d3=1./sqrt(pi*mur0*sigma3.*f); %Deri derinliği  
j=sqrt(-1);  
  
%Alüminyum ortam empedansı  
Z1=sqrt((2*pi*mur0.*f)/(2*sigma3)).*(1+j);  
%Yansıma Kaybı [dB]  
SR2=20.*log10((z0/4)./abs(Z1));
```

Ek Şekil 2.1. Tek katlı alüminyum levhanın yansıma kaybı hesabı

```
#####  
%%Çift katlı yapıların SE_r hesaplaması%%  
#####  
mur0= 4*pi*10^-7; %Boşluğun manyetik geçirgenliği [H/m]  
eps0=8.854*10^-12; %Boşluğun elektrik geçirgenliği [F/m]  
sigma0=5.82*10^7; %Bakırın iletkenlik sabiti [S/m]  
murl=1; %Birinci ekranın manyetik geçirgenlik sabiti  
sigmar1=0.6116; %Birinci ekranın iletkenlik sabiti (Alüminyum)  
mur2=1; %İkinci ekranın manyetik geçirgenlik sabiti  
sigmar2_tot=10*sig_intra; %İkinci ekranın iletkenlik sabiti (Grafen)  
z0=377; %Boşluk empedansı [ohm]  
d1=0.1*10^-3; %Alüminyum ekran kısmının kalınlığı  
d2=35*10^-6; %Grafen ekran kısmının kalınlığı  
f=0:0.1e6:2e9; %Frekans [Hz] 0-2 GHz  
sd1=1./sqrt(pi*murl*mur0*sigmar1*sigma0.*f); %Alüminyum Deri derinliği
```

Ek Şekil 2.2. İki katlı ekran yapısı için sabitlerin tanımlanması

```
sd2=1./sqrt(pi*mur2*mur0.*abs(sigmar2_tot).*f); %Grafen Deri derinliği  
%Alüminyum ortam empedansı  
Z1=sqrt((2*pi*murl*mur0.*f)/(2*sigmar1*sigma0)).*(1+j);  
%Grafen ortam empedansı  
gr=0;  
for freqs=0:inc:f_top; % frekans  
gr=gr+1;  
Z2=sqrt((2*pi*mur2*mur0.*f)/(2.*sigmar2_tot(gr))).*(1+j);  
end  
%Yansıma Kaybı [dB]  
SR=20.*log10(0.5*abs(1+Z1./z0))+20.*log10(0.5*abs(1+Z2./Z1))+20.*log10(0.5*abs(1+z0./Z2));
```

Ek Şekil 2.3. İki katlı ekran yapısının yansıma kaybı hesabı

EK 3 GA için MATLAB Kodları

```

%SEHESAPLAMA
We1=w1-((5*t)/(4*pi))*(1+log(4*pi*w1/t)); %Açıklık efektif en uzunluğu
m1=sqrt(sqrt(1-(We1/b)^2));
Zos1=120*(pi^2)*(log(2*(1+m1)/(1-m1)))^(-1); %Açıklığa ait iletim hattı empedansı
dboyu=0.3./frekans; %Dalga boyu
Ko=(2*pi)./dboyu; %Sabit
Zap1=(1/2)*(11/a)*Zos1*tan(Ko.*(11/2)); %Açıklığın karakteristik empedansı (A noktasında)
V11=(Vo.*Zap1)./(Zo+Zap1); %Eşdeğer gerilim
Z11=(Zo.*Zap1)./(Zo+Zap1); %Kaynak empedansı
Zg=Zo./(sqrt(1-(dboyu./(2*a))^2)); %Dalga kılavuzunun karakteristik empedansı
Kg=Ko.*(sqrt(1-(dboyu./(2*a))^2)); %Dalga kılavuzunun yayılım sabiti
V21=V11./cos(Kg*p)+Z11./Zg.*sin(Kg*p); %Eşdeğer gerilim
Z21=(Z11+(Zg.*tan(Kg.*p)))./(1+(Z11./Zg).*tan(Kg.*p)); %Kaynak empedansı
Z31=Zg.*tan(Kg*(de-p)); %Yük empedansı
Vp1=(V21.*Z31)./(Z21+Z31); %P noktasındaki gerilim (Kutulu ölçüm)
Ip1=V21./(Z21+Z31); %P noktasındaki akım (Kutulu ölçüm)
Vpr1=Vo/2; %P noktasındaki gerilim (referans ölçüm)
Ipr1=Vo/(2*Zo); %P noktasındaki akım (referans ölçüm)
Sel=-20*log10(abs(2*(Vp1./Vo))); %Ekranlama Etkinliği

```

Ek Şekil 3.1. SE analitik hesaplama fonksiyonu

```

% Genetik Algoritma Deklerasyonlar
wus=0.01; %Açıklık eni üst sınır 15 mm
was=0.005; %Açıklık eni alt sınır 5 mm
lus=0.15; %Açıklık boyu üst sınır 150 mm
las=0.05; %Açıklık boyu alt sınır 50 mm
psize=1000; %kromozom sayısı/populasyondaki satır sayısı
d=2; %sütun sayısı/problemin boyutu
pcross=0.95; %çaprazlama parametresi
pmutation=0.005; %mutasyon parametresi
delta=0.05; %mutasyon parametresi için komşuluk yüzdesi

```

Ek Şekil 3.2. GA için sabitlerin tanımlanması

```

%Genetik Algoritma Populasyon Tanımı
populationw= round((was+(wus-was)*rand(psize,1),6); % rastsal sayı ile oluşturulan W gen matrisi
populationl= round((las+(lus-las)*rand(psize,1),6); % rastsal sayı ile oluşturulan L gen matrisi
mainpopulation= [populationw populationl]; % W ve L genlerinden oluşan kromozomların populasyon matrisi

```

Ek Şekil 3.3. GA için populasyonun oluşturulması

```

% Rulet Çarkı
rulet=coeff(:,3); % uygun değerleri matrisi
sumrulet=sum(rulet); % populasyondaki tüm uygunluk değerlerinin toplamı
probs=rulet/sumrulet; % her bir kromozoma ait olasılık değeri
cprobs=probs; % birikimli olasılıkları tutar

for i=2:psize
    cprobs(i)=cprobs(i-1)+probs(i); % kromozomların birikimli olasılık değerleri
end

rs=rand(psize,1); % populasyon boyutu kadar rs rassal sayı üretilir
arapop=[popp(:,1) popp(:,2)]; % arapopülasyon matrisi

for i=1:psize
    idx=find(rs(i)<cprobs,1); %rs sayılardan cprobs küçük olduğu ilk indeksi bul
    arapop(i,:)=popp(idx,1) popp(idx,2)]; % bu indekse karşılık gelen kromozomu ara populasyona dahil et ve i. sıraya taşı
end

end

```

Ek Şekil 3.4. GA doğal seçim operatörü

```

%Çaprazlama
pairs=randperm(psize);

for i=1:psize/2
    parent1idx=pairs(2*i-1);
    parent2idx=pairs(2*i);
    parent1=arapop(parent1idx,:);
    parent2=arapop(parent2idx,:);
    rs=rand(1);
    if(rs<pcross)
        cpoint=randi([1 d-1]);
        dummy=parent1(cpoint+1:end);
        parent1(cpoint+1:end)=parent2(cpoint+1:end);
        parent2(cpoint+1:end)=dummy;
        arapop(parent1idx,:)=parent1;
        arapop(parent2idx,:)=parent2;
    end
end

```

Ek Şekil 3.5. GA çaprazlama operatörü

```

%Mutasyon
rs=rand(psize,1);

for i=1:psize
    %for j=1:d
        if(rs(i,1)<pmutation)
            rs2=-1+2*rand(1);
            arapop(i,1)=arapop(i,1)+rs2*delta*(us-as);
        end
    end
end

```

Ek Şekil 3.6. GA mutasyon operatörü

EK 4 GA Yineleme Adımları Sırasında SE Değişimleri

Ek Çizelge 4.1. GA yineleme adımları sırasında K1 kutusunun SE değişimi

Yineleme Adımı	En (mm)	Boy (mm)	Alan (mm ²)	SE (dB) 200 MHz	SE (dB) 400 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 800 MHz
K1	5	100	500	46,88	32,92	23,5	28,57
1	9,94	50,89	505,85	+10,48	+10,85	+11,23	+12,50
2	9,68	52,65	509,65	+9,94	+10,30	+10,68	+11,92
3	9,8	51,73	506,95	+10,22	+10,58	+10,97	+12,22
4	9,79	51,66	505,75	+10,25	+10,61	+10,99	+12,25
5	9,78	51,66	505,23	+10,25	+10,61	+11,00	+12,25
6	9,91	50,61	501,55	+10,58	+10,95	+11,34	+12,61
7	9,87	50,67	500,11	+10,57	+10,94	+11,32	+12,60
8	9,84	50,83	500,17	+10,52	+10,89	+11,27	+12,54
9	9,85	50,81	500,48	+10,53	+10,89	+11,28	+12,55
10	9,87	50,73	500,71	+10,55	+10,92	+11,30	+12,57
11	9,88	50,67	500,62	+10,57	+10,93	+11,32	+12,59
12	9,89	50,59	500,34	+10,59	+10,96	+11,35	+12,62
13	9,91	50,53	502,37	+10,61	+10,98	+11,37	+12,64
14	9,91	50,53	502,27	+10,61	+10,98	+11,37	+12,64
15	9,9	50,51	500,05	+10,62	+10,99	+11,38	+12,65
16	9,9	50,51	500,05	+10,62	+10,99	+11,38	+12,65

⋮

23	9,9	50,51	500,05	+10,62	+10,99	+11,38	+12,65
24	9,9	50,51	500,05	+10,62	+10,99	+11,38	+12,65
25	9,9	50,51	500,05	+10,62	+10,99	+11,38	+12,65

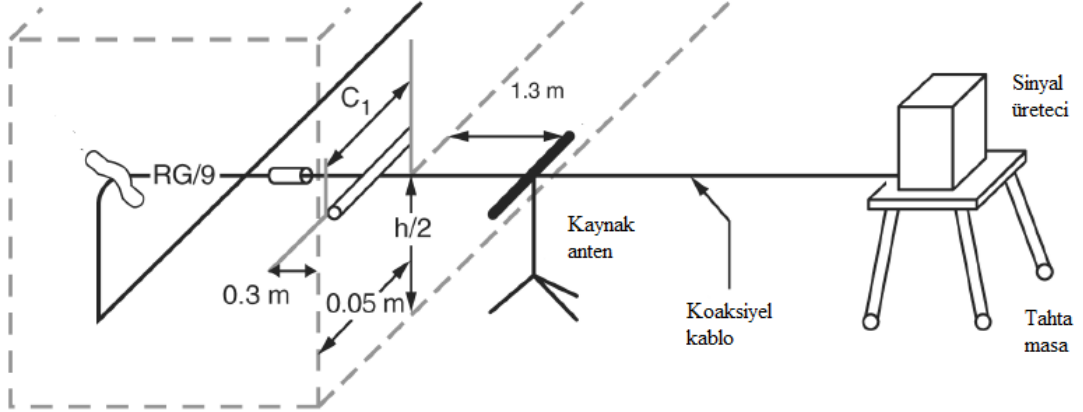
Ek Çizelge 4.2. GA yineleme adımları sırasında K2 kutusunun SE değişimi

Yineleme Adımı	En (mm)	Boy (mm)	Alan (mm ²)	SE (dB) 200 MHz	SE (dB) 400 MHz	SE (dB) 600 MHz	SE (dB) 800 MHz
K2	10	100	1000	45,22	34,99	20,33	16,52
1	14,89	72,1	1073,57	+4,72	+4,95	+5,47	+5,87
2	14,68	73,2	1074,58	+4,50	+4,71	+5,22	+5,61
3	14,77	72,63	1072,75	+4,62	+4,84	+5,35	+5,75
4	14,69	72,77	1068,99	+4,60	+4,82	+5,33	+5,73
5	14,78	72,28	1068,30	+4,70	+4,92	+5,44	+5,84
6	14,74	72,47	1068,21	+4,66	+4,88	+5,40	+5,80
7	14,65	72,75	1065,79	+4,61	+4,83	+5,34	+5,80
8	14,65	72,78	1066,23	+4,60	+4,82	+5,33	+5,74
9	14,65	72,78	1066,23	+4,60	+4,82	+5,33	+5,73
10	14,69	72,49	1064,88	+4,66	+4,88	+5,40	+5,73
11	14,66	72,49	1062,70	+4,67	+4,89	+5,40	+5,80
12	14,65	72,49	1061,98	+4,67	+4,89	+5,41	+5,81
13	14,66	72,49	1062,70	+4,67	+4,89	+5,40	+5,81
14	14,69	72,43	1064,00	+4,44	+4,66	+5,16	+5,81
15	14,72	72,4	1065,73	+4,69	+4,91	+5,43	+5,55
16	14,8	72,1	1067,08	+4,73	+4,96	+5,48	+5,83
17	14,8	72	1065,60	+4,76	+4,99	+5,51	+5,88
18	14,8	72	1065,60	+4,76	+4,99	+5,51	+5,88
19	14,8	72	1065,60	+4,76	+4,99	+5,51	+5,88

•
•
•

25	14,8	72	1065,60	+4,76	+4,99	+5,51	+5,88
26	14,8	72	1065,60	+4,76	+4,99	+5,51	+5,88
27	14,8	72	1065,60	+4,76	+4,99	+5,51	+5,88

EK 5 SE Ölçümlerinde Kullanılan Antenler



Ek Şekil 5.1. IEEE 299 standardında SE ölçüm düzeneği

Ek Çizelge 5.1. IEEE 299 standart ölçüm frekansları ve kullanılan antenler

Standard ölçüm frekansları	Anten tipi
9 kHz – 16 MHz	Döngü
20 MHz – 100 MHz	Bikonik
100 MHz – 1 GHz	Log periyodik
1 GHz – 18 GHz	Horn

Ek Çizelge 5.2. Ölçümlerde kullanılan antenler ve modelleri

Anten tipi	Modeli
N tipi pin anten (Alıcı)	PE4355
Bikonik anten (Verici)	BA30M300M
Log periyodik anten (Verici)	LA0201G
Horn anten (Verici)	HA0118G

Ek Çizelge 5.3. N tipi pin anten özellikleri (“PE4355 pin anten”, 2021)

Özellikler	Tanım
Model	PE4355
Konnektör tipi	Dişi
Standart	MIL-STD-348A
Uygulamalar	Genel amaçlı test
Frekans aralığı	DC – 18 GHz
Empedans	50 Ω
Duran dalga oranı (VSWR)	1,35:1
Çalışma gerilimi (AC)	1000 V _{rms}
Anten uzunluğu	17,9 mm
Anten genişliği / çapı	4,1 mm