

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAZMA TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ KATMANLI EKРАНLARIN
İNCELENMESİ

Pınar Deniz TOSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

2012

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAZMA TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ KATMANLI EKРАНLARIN
İNCELENMESİ

Pınar Deniz TOSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

2012

**PLAZMA TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ KATMANLI EKРАНLARIN
İNCELENMESİ**

Pınar Deniz TOSUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

2012

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAZMA TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ KATMANLI EKРАНLARIN
İNCELENMESİ

Pınar Deniz TOSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Bu tez .. / .. /2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından (.....) not takdir edilerek
Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Şükrü ÖZEN
(Danışman)
Doç. Dr. Selçuk HELHEL
Yrd. Doç. Dr. Ali Şükrü ONURAL

ÖZET

PLAZMA TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ KATMANLI EKРАНLARIN İNCELENMESİ

Pınar Deniz TOSUN

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Şükrü Özen

Haziran 2012, 79 Sayfa

Bu çalışmada elektronik aygıtlar üzerine olumsuz etkileri olan elektromanyetik girişimin engellenmesine yönelik, ekranlama ve ekranlama verimliliği konuları incelenmiştir.

Katmanlı ekran yapılarını oluşturan kaplanmış ekran malzemeleri, kaplanmış malzemelerin oluşturdukları ekran yapıları ve bu yapıların bilgisayar ortamında modellenmeleri gerçekleştirilmiştir. Modellemelerin sağlıklı yapılabilmesi için düzlemsel dalga ve ekranlar üzerindeki açıklıkların ekranlama verimliliği üzerine etkileri de incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Katmanlı ekran yapıları, ekranlama verimliliği, elektromanyetik girişim, elektromanyetik uyumluluk

JÜRİ: Doç. Dr. Şükrü ÖZEN

Doç. Dr. Selçuk HELHEL

Yrd. Doç. Dr. Ali Şükrü ONURAL

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE MULTI LAYERED SHIELDS COATED BY PLASMA TECHNIQUE

Pınar Deniz TOSUN

M. Sc. Thesis in Electrical & Electronics Engineering

Adviser: Assoc. Prof. Şükrü ÖZEN

June 2012, 79 Pages

In this work, shielding and shielding effectiveness subjects were investigated, for prevention of electromagnetic interference which has negative effects on electronic devices.

Coated shielding materials and shielding structures which are generated by coated shielding materials or combined shielding materials, form multi layered shielding structures. Computer modelling of these structures were also carried out. Subjects which are related to shielding effectiveness such as planar waves and apertures on shields were also investigated due to get better results during modelling and simulation process.

KEY WORDS: Multi layered shielding structures, shielding effectiveness, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Assoc. Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Assist. Prof. Dr. Ali Şükrü ONURAL

ÖNSÖZ

Günümüzde elektromanyetik uyumluluk (EMU/EMC) prensipleri çok geniş uygulama alanı bulmaktadır. Elektromanyetik alanların elektronik sistem ve donanımları üzerine etkileri göz ardı edilemeyecek bir noktaya gelmiştir. Elektromanyetik alanların bu olumsuz etkilerine karşı kullanılan yöntem elektromanyetik ekranlama yöntemi olmaktadır.

Tez çalışmasında elektromanyetik girişim ve elektromanyetik uyumluluk, elektromanyetik dalgalar ve ekranlama konuları sırasıyla sunulmuştur.

Ekranlama teorisi, tek ve katlı ekran yapıları incelenmiştir. Çeşitli ekranlama malzemelerine göre elektromanyetik dalgaların yayılımına, dolayısıyla ekranlama verimliliğinin yapılabildiği bir bilgisayar modeli geliştirilmiştir. Bu sayede farklı dielektrik sabitlerine sahip, değişik ekran malzemeleri ile kurulabilecek katlı ekran yapılarının verimlilik hesapları yapılabilecektir.

Yalnız tez çalışmalarımda ihtiyaç duyduğum her türlü bilgiye ulaşmamı değil ayrıca akademik kariyerimi oluşturmak yolunda sonsuz katkılarından ötürü değerli hocalarım Doç. Dr. Şükrü ÖZEN (Akdeniz Üni. Müh. Fak.), Doç. Dr. Selçuk HELHEL (Akdeniz Üni. Müh. Fak.), Yrd. Doç. Dr. Selim BÖREKÇİ (Akdeniz Üni. Müh. Fak.), Yrd. Doç. Dr. Ömer H. ÇOLAK (Akdeniz Üni. Müh. Fak.) ve Yrd. Doç. Dr. Süleyman BİLGİN'e (Akdeniz Üni. Müh. Fak.) teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI.....	4
2.1. Elektromanyetik Teori.....	7
2.1.1. Maxwell denklemleri.....	7
2.2. Düzlemsel Dalgalar.....	9
2.2.1. Dalga empedansı ve ortam sabitleri.....	11
2.2.2. Hava, gerçek metal ve gerçek yalıtkanların empedansı.....	12
2.3. Ekranlarda Et Kalınlığı.....	13
2.4. Ekranlama Teorisi.....	14
2.4.1. Yansıma ve iletim katsayıları.....	18
2.5. Plazma ve Polimerizasyon Teknikleri.....	19
2.5.1. Plazma parametreleri.....	21
2.5.2. Plazma polimerizasyonu.....	23

3. MATERYAL VE METOT.....	25
3.1. İnce Ekranlar Ve Yansıma Kaybı.....	25
3.2. Kalın Ekranlar Ve Soğurulma Kaybı.....	26
3.3. Katmanlı Ekranlar.....	27
3.3.1. Hava boşluklu katmanlı ekranlar.....	27
3.3.2. Cam üzerine altın kaplı ekranlar.....	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Ekranlama Verimliliği ve Yüzey Empedansı.....	33
4.2. Kaplı İletkenlerde Empedans.....	35
4.3. Kayıplı Ortamların Simülasyonu.....	36
4.4. Katmanlı Ekran Yapılarının Simülasyonu.....	41
5. SONUÇ.....	50
6. KAYNAKLAR.....	52
7. EKLER.....	54
EK-1 Düzlemsel dalganın kayıplı ortamda zayıflatılması ile ilgili MATLAB kodu.....	54
EK-2 Ekran üzerinde bulunan açıklıkların ekranlama verimliliği üzerindeki zayıflatma hesabını yapana MATLAB kodu.....	55
EK-3 Katmanlı ekran yapılarını ekranlama verimliliği hesabını yapmaya yarayan MATLAB kodu.....	56
EK-4 7.5x7.5cm'lik açıklık bulunan ekranda EA ve MA ekranlama verimliliği hesaplamasını yapan MATLAB kodu.....	58
EK-5 Çelik üzerine bakır, gümüş ve altın kaplamaların ekranlama verimliliklerini hesaplayan MATLAB kodu.....	60

EK-6	İletkenlik sabitleri belli olan gümüş, bakır ve alüminyum metallerinin et kalınlığı analizini yapan MATLAB kodu.....	63
EK-7	İnce ekranlar ve ekran kalınlığının yansıma kaybına etkilerinin analizini gerçekleştiren MATLAB kodu.....	64
EK-8	Ekranlama verimliliği ve yüzey empedansı karşılaştırması ve toplam kayıp ifadesinin hesaplamasını yapan MATLAB kodu.....	65

ÖZGEÇMİŞ

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler:

\vec{B}	Manyetik akı yoğunluğu
\vec{D}	Elektrik akı yoğunluğu
\vec{E}	Elektrik Alan
\vec{H}	Manyetik Alan
SE	Ekranlama verimliliği
k	Yayılm sabiti
\vec{J}	Akım yoğunluğu
\vec{M}	Manyetik polarizasyon vektörü
γ	Yayıma sabiti
β	Faz sabiti
α	Zayıflama sabiti
σ	İletkenlik sabiti
ε	Dielektrik sabiti
ε_0	Boşluğu dielektrik sabiti
μ	Manyetik geçirgenlik sabiti
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenlik sabiti
η	Empedans

η_0	Boşluğun karakteristik empedansı
ω	Açısal frekans
d	Ekranın et kalınlığı
E_{di}	Ekran içerisindeki elektrik alan değeri
E_i	Dalgaya bağlı oluşan ortamdaki elektrik alan değeri
E_t	Ekrandan iletilen elektrik alan değeri
R	Yansıma kaybı
A	Soğurulma kaybı

Kısaltmalar:

<i>MR</i>	Çoklu yansıma kaybı
<i>EM</i>	Elektromanyetik
<i>EA</i>	Elektrik Alan
<i>MA</i>	Manyetik Alan
<i>EMUMAM</i>	Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Araştırma ve Uygulama Merkezi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. C dış düzey sınırlı ve S yüzeyli kapalı cisimde Faraday Kanunu.....	8
Şekil 2.2. Homojen bir düzlemsel dalğanın gösterimi.....	9
Şekil 2.3. EM radyasyon kaynağı ve girişim alanlarının tanımı.....	10
Şekil 2.4. Gümüş, bakır ve alüminyum malzemelerinin et kalınlığı analizleri.....	14
Şekil 2.5. Ekran modeli.....	15
Şekil 2.6. Farklı et kalınlığı ve yüzey empedansına sahip malzemelerden oluşan iki katlı ekran yapısı.....	15
Şekil 2.7. Çift katlı ekran iletim hattı modeli.....	18
Şekil 2.8. Plazma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen yüzey modifikasyonları.....	20
Şekil 2.9. Plazma cihazının şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.10. Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Araştırma ve Uygulama Merkezi (EMUMAM)'daki mikrodalga plazma polimerizasyon sistemi.....	24
Şekil 3.1. Hava boşluklu ekranlar.....	27
Şekil 3.2. Cam katmanlı ekran.....	32
Şekil 4.1. 5Ω yüzey empedansı olan bakır ekranda yansıma, soğurulma ve çoklu yansıma kaybı.....	34
Şekil 4.2. Yüzey empedansının bir fonksiyonu olarak ekranda toplam kayıp.....	35
Şekil 4.3. Açıklıkların ekranlamaya etkilerini hesaplayan MATLAB kodu.....	37
Şekil 4.4. Düzlemsel dalğanın kayıplı ortamda zayıflatılması.....	37
Şekil 4.5. Ekran açıklığına bağlı zayıflama.....	38

Şekil 4.6. Açıklık bulunan ekran üzerinde EA ve MA ekranlama verimliliği.....	39
Şekil 4.7. Boşluğun çoklu yansıma kaybına etkilerini hesaplayan MATLAB kodu.....	40
Şekil 4.8. İki metal katmanı arasındaki boşluğun, metal ve boşluktaki dalga boylarının oranlarının kıyaslaması.....	40
Şekil 4.9. İnce ekranlar ve yansıma kaybının incelenmesi.....	41
Şekil 4.10. İki katmanlı bakır-çelik ekran modelinin ekranlama verimliliği.....	42
Şekil 4.11. Bakır-Çelik ve Gümüş-Çelik ekranlarda ekranlama verimliliği.....	43
Şekil 4.12. Bakır-Çelik ve Altın-Çelik ekranlarda ekranlama verimliliği.....	43
Şekil 4.13. Gümüş-Çelik ve Altın-Çelik ekranlarda ekranlama verimliliği.....	44
Şekil 4.14. Farklı kalınlıkta cam üzerine Al-Ni kaplamanın ekranlama verimliliği.....	45
Şekil 4.15. 1 cm cam üzerine farklı kalınlıklarda uygulanmış Al-Ni kaplamanının ekranlama verimliliği.....	45
Şekil 4.16. 2 cm cam üzerine farklı kalınlıklarda uygulanmış Al-Ni kaplamanının ekranlama verimliliği.....	46
Şekil 4.17. Cam üzerine teneke ve kurşun ekran modeli.....	47
Şekil 4.18. Cam üzerine pirinç ve altın modeli.....	47
Şekil 4.19. Cam üzerine çelik ve paslanmaz çelik ekran modeli.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Ortam Sabitleri.....	11
Çizelge 2. Ortam özelliklerine göre empedans.....	12
Çizelge 3. Bazı malzemelerin bağıl iletkenlik ve manyetik geçirgenlik sabitleri.....	12
Çizelge 4. IEEE'nin mikrodalga band isimleri ve frekans aralıkları.....	31
Çizelge 5. Altının yüzey direnci ve iletkenliği.....	32

1. GİRİŞ

Endüstrinin her alanında ve insan yaşamının her anında elektrik elektronik eleman ve cihazları ihtiva eden sistemlerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Cep telefonları, bilgisayarlar, beyaz eşyalar gibi cihazlar insan yaşamının vazgeçilmez araçları haline gelmiştir. Yine, sanayide kullanılan makina, sistem ve üretim araçlarının hemen hepsi ve tıpta kullanılan test ve tanı cihazlarının tamamı elektrik ve elektronik devreler içermektedir.

Elektrik-elektronik eleman ve devre ihtiva eden cihazların çevreye zarar vermeden güvenilir olarak çalışabilmesi için bazı temel özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. Elektromanyetik uyumluluk (EMC), genel tanım olarak, sistemlerin kendi elektromanyetik çevrelerindeki diğer cihazların ürettikleri olası sinyallerden etkilenmeden fonksiyonlarını doğru olarak kullanabilmesini kapsamaktadır. Elektromanyetik uyumluluk ile ilgili yönergeler ve kısıtlamalar, güvenilirliğin bir ölçütü olarak, elektronik tasarımcılarının üzerinde en yoğun çalıştığı konulardan birisidir. Cihazın içinde bulunduğu herhangi bir elektromanyetik ortamda oluşabilen veya cihazın kendisi tarafından oluşturulan elektromanyetik girişim, elektrostatik boşalma veya elektriksel hızlı geçiş darbesi gibi etkilerle, cihazların fonksiyonelliğine bozucu hasarlar verebilmektedir.

Elektromanyetik uyumluluk (EMU), (Electromagnetic Compatibility, EMC), uluslararası standartlarca "bir aygıt, donanım ve sistemin, bulunduğu elektromanyetik çevre içinde, bu çevreyi veya diğer donanımları rahatsız edecek düzeylerde elektromanyetik gürültü oluşturmadan ve ortamdaki diğer sistemlerin oluşturduğu girişimden etkilenmeden, kendisinden beklenen işlevlerini yerine getirme yeteneğidir." şeklinde tanımlanmaktadır (Arı ve Özen 2008). Tanımda da belirtildiği gibi EMU, elektromanyetik girişim (EMG), (Electromagnetic Interference, EMI) ile alakalı bir kavramdır.

Yaşadığımız çevrede herhangi bir elektrik alan (EA), (Electric Field, EF) veya manyetik alan (MA), (Magnetic Field, MF) kaynağı, potansiyel bir EMG kaynağı olmaktadır. Bu alan kaynakları; radyo, televizyon, bilgisayar ekranları, yazıcılar,

göstergeler, regülatörler vb. birçok cihaza girişim yapabilmektedirler. Bu alan etkilerinin tolare edilebilir veya kabul edilebilir olması durumunda da sistemler, elektromanyetik olarak uyumlu kabul edilmektedir (Kaiser 2005).

EMG kaynakları çok çeşitlidirler. Bunlar, endüstriyel gürültü kaynakları; endüstriyel çevrede bulunan motorlar, bilgisayarlar, kontrol üniteleri, indüksiyon ısıtıcıları vb. cihazlardan oluşmaktadır. Ofis gürültü kaynakları; yazıcılar, floresans lambaları, çağrı cihazları, cep telefonları vb. cihazlar, ev ortamındaki gürültü kaynakları; insan yapımı evlerde kullanılan EMG cihazlarıdır. Bunlar elektrikli süpürge, mikrodalga fırın, telsiz telefonlar olmaktadır. Doğal gürültü kaynakları; yıldırım, kozmik radyasyon, dünyanın kendi elektromanyetik alanı, güneş ışınlarından oluşmaktadır (Kaiser 2005).

Yukarıda açıklanan EMG kaynaklarından da anlaşılacağı üzere, bu kaynaklar doğal kaynaklar veya insan yapımı kaynaklar olup, kurban sisteme ya iletim ya da ışınım yolu ile girişimde bulunmaktadırlar.

Elektronik cihazlar elektromanyetik ortamda bulunan etkilerden korunmak için, metalik koruyucu ekran içine yerleştirilmektedir. Doğal olarak, bu koruyucuların, cihazın çevreyle bağlantısına izin verecek şekilde üzerlerinde bir takım delik veya yarıkları bulundurmaya ihtiyaçları vardır. Bu doğrultuda düzenlenen koruyucu kutunun içerisinde oluşabilecek girişimi saptayabilmek için elektromanyetik etkilerin hesaplanması gerekmektedir. Bu açıklıklardan içeriye ya da dışarıya doğru oluşan ışınım bir EMC problemidir. Genel olarak EMC' nin kapsamı, ortamda bulunan olası bozucu sinyallere karşı elektronik devre ve sistemlerin tepkilerini veya bu devre ve sistemlerin ortamda oluşturabileceği yayılımların zararını en düşük seviyeye indirebilecek tasarımları gerçekleştirebilmektir.

Fiziksel yapı basit olduğu sürece analitik yöntemler kullanılabilen, ancak fiziksel yapı karmaşık hale geldikçe EMC problemlerini çözmede bu yöntemlerin uygulanabilirliği zorlaşmaktadır. Bu noktada EMC analizlerini gerçekleştirebilmek ve istenen bilgileri öngörebilmek amacıyla sayısal yöntemlerin kullanılması gündeme gelmiştir. Bilgisayar ve yazılım sektörlerindeki hızlı ilerleme, EMC problemlerinin sayısal yöntemlerle modellenerek çözümlenebilmesine olanak vermiştir. Analitik olarak

özmlenmesi zor olan karmaşık yapıdaki elektromanyetik problemlerin, bilgisayar ortamında çözümlenebilmesi için kullanılabilir birçok yöntem vardır. Sonlu elemanlar yöntemi(Finite Element Method, FEM), zaman domeni sonlu farklar yöntemi(Finite-Difference Time Domain Method, FDTD), iletim hat matrisi yöntemi(Transmission Line Method, TLM) ve moment yöntemi en çok kullanılan ve üzerinde yoğun çalışmaların devam ettiği yöntemlerdir. Moment yöntemi, Green fonksiyonunun bilindiği veya sayısal olarak hesaplanabildiği problemlere uygulanabilmektedir. Bundan dolayı iletken yüzeyler içeren problemleri çözmede etkilidir. FEM ise karmaşık ve rastgele geometrili yapıları modellemede etkili bir yöntemdir. FEM’ de sınırlandırılmamış ortamlarda ışıyan alanları bulmak için örgülenmiş bölgenin dış yüzeyine yutucu sınırların konulması gereklidir. Bu da işlem hacminin artmasına neden olmaktadır ki yöntemin karma bir yaklaşımla aynı yazılımda elde edilmesi ve her yöntemin üstün olduğu kısımların kullanılmasına olanak verebilir.

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

Elektromanyetik ekranlama yapabilmek için bakır (Cu) ve nikel (Ni) parçacıklar eklenerek oluşturulmuş iletken kağıtların kullanımıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İyi iletken kağıtlar yapabilmek için selüloz hamuruna katılacak metal parçaların küçük yüzey dirençleri olması daha yüksek bir EMG ekranlaması sağlamaktadır. Aynı çalışmada ekranlama verimliliğinin iletken polyester kağıtların yüzey direnci ve metal olan kaplama kısmının kalınlığına bağlı olduğu belirtilmiştir. Cu ve Ni malzemeleri kullanılarak yapılan kaplamalar, bakırın yüzey direncinin düşük olması dolayısıyla daha iyi ekranlama malzemesi olmasına rağmen, pahalı ve oksidasyona son derece açık bir metal olması dolayısıyla nikelden daha az kullanım alanı bulunduğu vurgulanmıştır. Bunların dışında kaplama yönteminin de ekranlama verimliliği üzerinde etkisi olabileceği vurgulanmıştır (Shinagawa vd 1999).

Geleneksel EMG engelleyici materyaller genellikle metal tabanlı malzemeler olmaktadır. Bunlardan farklı olarak yapısal iletken polimerler olan, polyanilin, polypyrole ve polypidine ile kompozit iletken kaplamalar da kullanılmaktadır. Kompozit iletken kaplamalar içinse tipik olarak elektromanyetik soğurucu diye tabir edilebilen absorberlar seçilmektedir. Bunlar, ferromanyetik metal oksitler, karbon kabuklar ve silisyum karbürler olmaktadır. İncelenen çalışmada, yapısal iletken polimer ve kompozit iletken kaplamaların; oksitlenme, korozyona uğrama, sınırlı frekans değerlerini ekranlama, kalın ve ağır kaplama tabakaları oluşturma dezavantajları göz önüne alınarak karbon nanotüp kullanılan bir kaplama ile ekranlama verimliliği konusu çalışılmıştır. Çalışmada iki farklı kalınlıkta kaplama ile deneyler gerçekleştirilmiş ve kaplama kalınlığı ile ekranlama verimliliği arasında herhangi bir ilişkinin bulunmadığı belirtilmiştir (Li vd 2010).

Yapılan bir başka çalışmada ise MATLAB programı kullanılarak çeşitli malzemelerin ekranlama verimliliği üzerine etkileri araştırılmıştır. Çeşitli malzemelere ait önceden hesaplanmış dielektrik sabitleri kullanılarak, çalışmanın ana malzemesi olan kiral malzemelerin, dielektrik sabitleri bilinen diğer malzemelere göre karşılaştırılması da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada malzemenin ekranlama verimliliği analizi farklı

malzemeler için yazılmış frekans fonksiyonları ile elektrik, manyetik ve elektromanyetik alanlar için yapılmıştır. Kiral malzemeler, polimerik ve seramik matriks içeren son yıllarda daha da fazla kullanım alanı bulan malzemelerdir. Ekranlama verimliliği konusunun teorisinde, yansıma kaybı dalga empedansı ve ekranın yüzey empedansı arasındaki orana bağlı, soğurulma kaybı ise ekranın malzeme kalınlığını ifade eden et kalınlığına bağlı olmaktadır. Bu teori üzerinden yapılan deneyler göstermiştir ki, yansıma kaybı manyetik alana nazaran elektrik alanda yapılan ölçümlerde daha önemli olmaktadır. Çünkü ekranın yüzey empedansı analizleri etkilemektedir, dolayısıyla malzeme elektrik alan ekranlaması yapıldığı durumlarda önemli olmaktadır. Kaynak ve ekran arasındaki mesafede yine yansıma kaybı hesaplamalarında önem kazanmaktadır. Malzemelerin elektromanyetik alan ekranlaması için büyük bir etkisi olmadığı bildirilmiştir (Saadi ve Oussaid 2007).

Katmanlı karbon fiber kompozit malzemelerin ekranlama etkinliği analizinin yapıldığı bir diğer çalışmada, anizotropik eşdeğer modeldeki malzemenin nümerik ve deneysel sonuçları bildirilmiştir (Mehdipour vd). Buna göre, 1 GHz ve üzerindeki frekans değerleri için anizotropik seviyelerde fiber yapıları arasındaki kontrol edilemeyen kuplajlama dolayısıyla ortaya çıkan E_x ve E_y elektrik alan bileşenleri ile SE arasında 10dB'lik bir fark kaydedilmiştir. Bu fark hem nümerik olarak hem de deneysel olarak kanıtlanmıştır. Farkın sebebi ekranlama verimliliğinin yüksek frekans değerlerinde farklı polarizasyon açılarına göre değişiminden kaynaklanmıştır.

Elektromanyetik ekranlama için katmanlı tekstil ekranlama malzemesi geliştirilmesi ile ilgili bir diğer çalışmada malzemelerin ne tip özelliklerde ve neye göre seçilmesi gerektiği, buna ek olarak bu özelliklerin ekranlama verimliliğine etkileri ile ilgili sonuçlar sunulmuştur. Buna göre ana tekstil ürünlerine metal fiberlerin rastgele eklenmesinin, elektromanyetik radyasyonun elde edilen kaplamanın altına geçişini önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir. Fiberler ya çelik ya da gümüş fiberler olarak kullanılmıştır. İletken bir polimer olan polyanilininin aynı koşullarda daha da iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Polimer tarzı kompozit malzemeleri tekstil alanında hafifliği de göz önüne alınarak daha çok tercih edilmesi gerektiği bildirilmiştir (Brezezinski vd 2009).

Saydam cam üzeri kaplamadan düzlemsel dalgaların geçişi incelenmiştir. Kaplamanın kalınlığı, dielektrik sabitleri ve kaplamanın yüzey dirençleri dikkate alınarak teorik bir saydamlık derecesi oluşturulmuştur ve deney sonuçları ile teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, saydam kaplamalı cam, özellikle yüksek frekansta iyi elektrik alan ekranlaması gerçekleştirmiştir. Buna göre en yüksek tolere edilebilecek saydamlık sınırında 40 ila 60 dB'ye kadar azalma gerçekleşmiştir (Hawthorne 1954).

Bir diğer çalışmada, farklı özellikteki dört malzemeden elde edilmiş 11 metal parçanın farklı frekanslarda ekranlama verimliliği hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Ekranlama verimliliğinin metal parçasının boyutlarıyla ilişkili olduğu görülmüş ve büyük boyutlu parçaların küçük boyutlu parçalara nazaran daha iyi ekranlama sağladığı bildirilmiştir. Bunların yanı sıra, metal parçaları bir arada tutan aksamaların da ekranlama verimliliğine etkileri olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan özel tip bir yapıştırıcıyla yapılan deneyin sonuçları, ekranlama verimliliği konusunun teorisinde de vurgulandığı üzere; vidaların açıklık oluşturmaları dolayısıyla, vidalarla tutturulmuş parçalarla yapılan deneyden daha iyi sonuçlar vermiştir (Dichen ve Suqiao 2000).

Sentetik fiber malzemesi üzerine bakır ve nikel-demir kaplamalar yapılarak gerçekleştirilmiş bir çalışmada bakır elektromanyetik enerji engelleyici olarak, nikel-demir karışımı ise iletken ve ferromanyetik olması dolayısıyla ekranlama verimliliğini etkileyen malzeme olarak kullanılmıştır. 0.1 MHz ile 1 GHz ve 1.5 GHz ile 18 GHz arasında farklı deneyler gerçekleştirilmiş ve farklı nikel kaplama metodları karşılaştırılmıştır. 0.1 MHz ile 1 GHz arasında en iyi ekranlama verimliliği elde edilmiştir. 1.5 GHz ile 18 GHz frekans değerlerine çıkıldıkça ekranlama verimliliği azalırken, tek kat nikel tabakaların nikel-demir kaplamasına göre daha az ekranlama gerçekleştirdiği bildirilmiştir (Zhang vd 2002).

2.1. Elektromanyetik Teori

2.1.1. Maxwell denklemleri

Elektromanyetik girişime (Electromagnetic Interference, EMI) elektrik alanlar (E) ve manyetik alanlar (H) neden olmaktadır. 1864 yılında James Clark Maxwell elektromanyetik dalgaların varlığını teorik olarak kanıtlamıştır. 1888 yılında da Heinrich Hertz, Maxwell'in teorisini deneysel olarak doğrulamış ve elektromanyetik dalgayı ilk deneysel olarak bulan kişi olmuştur. Maxwell denklemleri elektromanyetik dalgayı E ve H bileşenleri olarak açıklamaktadır (Pozar 1998). En genel haliyle Maxwell denklemleri 2.1- 2.4 arasında sunulmuştur.

$$\Delta \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{M} \quad (2.1)$$

$$\Delta \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.2)$$

$$\Delta \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\Delta \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Burada;

E : Elektrik alan yoğunluğu (V/m)

H : Manyetik alan yoğunluğu (A/m)

D : Elektrik akı yoğunluğu (Coul/m²)

B : Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m²)

M : Manyetik akım yoğunluğu (A/m²)

J : Elektrik akım yoğunluğu (V/m²)

ρ : Elektriksel yük yoğunluğudur (Coul/m³).

Bu denklemlerde elektromanyetik alanın kaynağının M , J ve ρ değerleri olduğu bilinmektedir. Manyetik akım yoğunluğu aslında göreceli bir kavramdır. Çünkü manyetik monopollüklerin varlığı kanıtlanamamıştır ve dolayısıyla manyetik bir akımdan söz etmek mümkün değildir. Ancak elektrik akımı veya bir manyetik dipolün etkisi altında manyetik alan oluşacağından ötürü denklemlere eklenmesi gerekmektedir. Bunun yanında elektrik akımının, elektrik yükünün çevrimi olması dolayısıyla ρ değeri asıl elektromanyetik alan kaynağı olarak adlandırılabilir. Boşlukta elektrik alan, manyetik alan ve akı yoğunluklarının ilişkileri 2.5 ve 2.6 denklemlerinde verilmiştir.

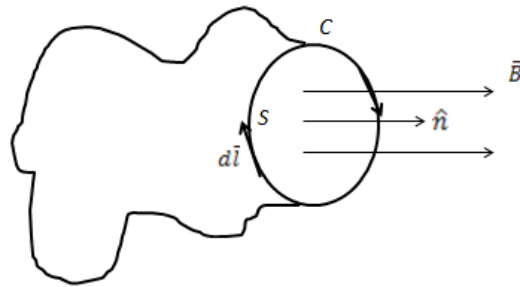
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.6)$$

Bu denklemlerde, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ henry/m boşluğun manyetik geçirgenliği ve $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ farad/m boşluğun elektriksel geçirgenliğini ifade etmektedir. Farklı ortamlarda bu sabitlerin değerleri değişmekte ve eşitliği etkilemektedir. Akım değerinin devamlı olduğu ve yükün korunduğu göz önüne alınarak denklemler düzenlendiğinde, yer değiştirme akım yoğunluğu ifadesinin de integral işlemi uygulanan denklemlere eklenmesi gerekmektedir. Bu ekleme ve varsayımlarla birlikte Stoke's Teoremi de kullanılarak V hacimli, kapalı yüzeyli cisimin toplam yükü hesaplanabilmektedir (2.7).

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s} + \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s} + I \quad (2.7)$$

Faraday Kanunu ve Kirchoff'un Gerilim Yasası denklemlerinden faydalanılarak Amper Yasasına yine Stoke's Teoremi kullanılarak varılabilmektedir.



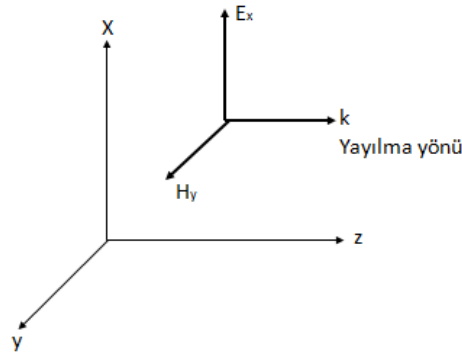
Şekil 2.1. C dış düzey sınırlı ve S yüzeyli kapalı cisimde Faraday Kanunu

2.2. Düzlemsel Dalgalar

Homojen düzlemsel dalga x-ekseni yönünde elektrik alan vektörü y-ekseni yönünde ise manyetik alan bileşenine sahiptir. Alan vektörünün x, y düzleminde homojen olması vektörlerin x ve y bileşenlerinden bağımsız olması anlamına gelmektedir. Buna göre vektörler yalnızca z değişkenine ve zamana bağlı olmaktadır. Bu sebeple E ve H vektörlerinin x ve y değişkenlerine göre türevleri sıfır değerini vermektedir. Bu durumda kaynak içermeyen basit ortamlar için Faraday ve Ampere yasaları dikkate alınarak (2.8) ve (2.9) denklemleri yazılabilmektedir (Kodali 2001).

$$\frac{\partial E_x(z,t)}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y(z,t)}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial H_y(z,t)}{\partial z} = -\sigma E_x(z,t) - \varepsilon \frac{\partial E_x(z,t)}{\partial t} \quad (2.9)$$



Şekil 2.2. Homojen bir düzlemsel dalganın gösterimi

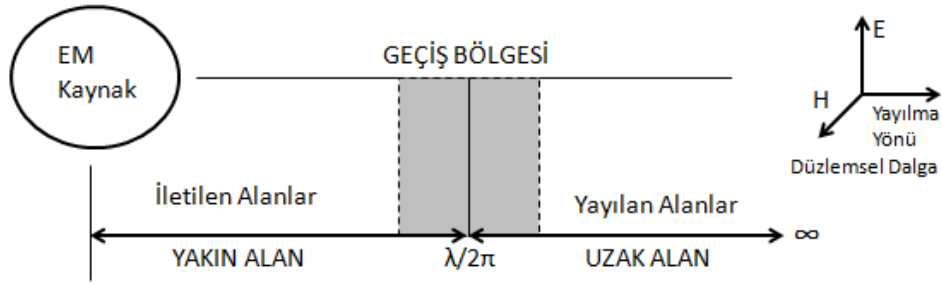
Sinüzoidal sürekli halde alan ifadeleri z değişkenine bağlı hale gelmektedir. İkinci derece diferansiyel işlemi uygulanılarak basit yapıda E_x ve H_y denklemleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir. Buna göre yayılma sabiti ifadesi α [Np/m] zayıflama sabiti ve β [rad/m] faz sabiti cinsinden yazılmaktadır.

$$\vec{E}_x = \vec{E}_m^+ \cdot e^{-\gamma z} + \vec{E}_m^- \cdot e^{+\gamma z} \quad (2.10)$$

$$\vec{H}_y = \frac{\vec{E}_m^+}{\hat{\eta}} \cdot e^{-\gamma z} - \frac{\vec{E}_m^-}{\hat{\eta}} \cdot e^{+\gamma z} \quad (2.11)$$

$$\vec{\gamma} = \sqrt{j\omega\mu \cdot (\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta \quad (2.12)$$

Düzlemsel dalgalar konusunda ayrıca belirtilmesi gereken bir hususta girişim problemlerinin çözümünde kullanılması gereken ortam empedansını etkileyen yakın alan ve uzak alan kavramları olmaktadır. Buna göre alıcı sistem EM kaynağa yakın ise, elektrik alan ve manyetik alan ayrı olarak ele alınır. Alıcı sistemin kaynağa uzak olduğu durumlarda ise EM ışınım, E ve H alanların birleşimi olarak yorumlanmaktadır. EM kaynağa göre $\lambda/2\pi$ mesafesi yakın alan, bu mesafeden uzak bölgeler ise uzak alan bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Elektrik alan ve manyetik alan oranı bize dalga empedansını verirken uzak alan için bu empedans ortamın karakteristik empedansı adını alır ve standart 377Ω olmaktadır.



Şekil 2.3. EM radyasyon kaynağı ve girişim alanlarının tanımı

Bir dalga herhangi bir elektromanyetik kaynaktan yeterli uzaklığa yerleştirildiğinde, bu mesafe uzak alan içerisindeyse alanın ekrana etkisi düzlemsel dalga olarak modellenmektedir (Kaiser 2005). Uzak alanda elektrik ve manyetik alan dalgaları birbirlerine ve yayılım yönüne diktir. Bu bölgede oluşan düzlemsel dalga ekrana çarptığında Lorentz'in kuvvet kanuna göre elektronlar ve diğer yüklü parçacıkların ekran etkileri incelenmelidir.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \mu_0\vec{H} \quad (2.13)$$

Burada; q, \vec{v} hızlı parçacıkların yükü olmak üzere, ekran içerisindeki parçacıklar elektrik ve manyetik alan dolayısıyla oluşan dalganın etkisiyle hareket etmektedirler. Bu hareket eden parçacıklar da ayrıca bir elektrik ve manyetik alan oluşturarak ekran

içerisindeki toplam alanı etkilemektedir. Yeni oluşan alanların ekran içerisinde oluşturduğu alana, indüklenmiş alan denir. Bir ekranın iyi ya da kötü olması ekran içerisinde oluşan toplam alanın ekrana ilk etkiyen alandan çok daha düşük olması durumunda belirlenmektedir. Bu, ekranın alan gücüne karşı oluşturduğu ters alanın zayıflatma etkisi ile alakalıdır.

Ekranın ortamdaki mevcut elektromanyetik alana karşı oluşturduğu alanın gücü ekranda kullanılan malzemenin elektriksel özelliklerine bağlıdır. Çünkü indüklenmiş akım yoğunluğu \vec{J} ekranın iletkenliğinin bir fonksiyonu olarak yazılabilmektedir.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.14)$$

Mükemmel iletkenler için indüklenen akım yalnızca yüzeyde kalmaktadır. Gerçek malzemeler için akım ve alan malzeme içerisine belli oranda girmektedir. Bu soğurulmayla alakalı derinlik, malzemenin et kalınlığı olarak ifade edilmekte ve iyi iletkenler için $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$ denklemiyle hesaplanmaktadır.

2.2.1. Dalga empedansı ve ortam sabitleri

Ortam empedansı, bir önceki bölümde de belirtildiği üzere ortamdaki elektrik ve manyetik alan değerlerinin bileşenlerinden bulunur. Elektromanyetik dalga yayılımında etkin ortam parametreleri, ortam özelliklerine göre empedans tanımları Çizelge 1 ve 2'de sunulmaktadır. Bu tanımlamalar uzak alan bölgesi için geçerlidir ve malzemelerin iletkenlikleri ile bağlantılı olarak empedans değerleri değişim göstermektedir. Bazı malzemelere ait bağıl iletkenlik ve manyetik geçirgenlik sabitleri ise Çizelge 3'te sunulmuştur (Arı ve Özen 2008).

Çizelge 1. Ortam Sabitleri (Arı ve Özen 2008)

Ortam Sabiti	Bağıntı	Açıklama
Dielektrik sabiti	$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ [F/m]	ε_r : Bağıl dielektrik sabiti
Manyetik geçirgenlik sabiti	$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ [H/m]	μ_r : Bağıl manyetik sabiti
İletkenlik sabiti	$\sigma = \sigma_r \cdot \sigma_0$ [S/m]	σ_r : Bakıra göre bağıl iletkenlik sabiti

Çizelge 2. Ortam özelliklerine göre empedans (Arı ve Özen 2008)

Ortam Empedansı (Ω)	
$\eta = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}$	
İletken Ortam	Yalıtkan Ortam
$\sigma \gg j\omega\epsilon$	$\sigma \ll j\omega\epsilon$
$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1+j) \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$ $ \eta = 3.68 \times 10^{-7} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} f$	$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$
Boşluk (Serbest Uzay)	
$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega$	

Çizelge 3. Bazı malzemelerin bağıl iletkenlik ve manyetik geçirgenlik sabitleri (Arı ve Özen 2008)

Malzeme	σ_r [S/m]	μ_r [H/m]
Gümüş	1,05	1
Bakır	1	1
Altın	0,7	1
Alüminyum	0,61	1
Pirinç	0,26	1
Bronz	0,18	1
Teneke	0,15	1
Kurşun	0,08	1
Nikel	0,2	1
Paslanmaz çelik (430)	0,02	500
Çelik (SAE 1045)	0,1	1000

2.2.2. Hava, gerçek metal ve gerçek yalıtkanların empedansı

Hava, gerçek metal ve gerçek yalıtkanların yalın empedansları aşağıdaki denklemden faydalanılarak hesaplanmaktadır.

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{0 + j\omega\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{8.854 \times 10^{-12}}} \approx 377\Omega \quad (2.15)$$

Havanın iletkenlik katsayısı σ çok küçük olduğundan sıfır kabul edilmektedir. Bununla beraber, ortamın iletkenliği arttığı durumlar için ortamın yalın empedansı azalmaktadır. Mükemmel ideal iletken malzemeler içinse iletkenlik sonsuz olduğundan yalın empedans değeri sıfır olmaktadır. Gerçek yalıtkanların empedans hesabı için bu teorem kullanılırken gerçek yalıtkanların dirençlerinin sonsuz ancak yalın empedanslarının sonsuz olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{0 + j\omega\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_r\mu_0}{\varepsilon_r\varepsilon_0}} \approx 377 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \Omega \quad (2.16)$$

Burada; μ_r bağıl manyetik geçirgenlik, ε_r ise bağıl elektriksel geçirgenliktir. Manyetik malzemeler için bağıl manyetik geçirgenliğin birden büyük olduğu durumlarda yalın empedans değeri 377Ω 'dan büyük olmaktadır.

2.3. Ekranlarda Et Kalınlığı

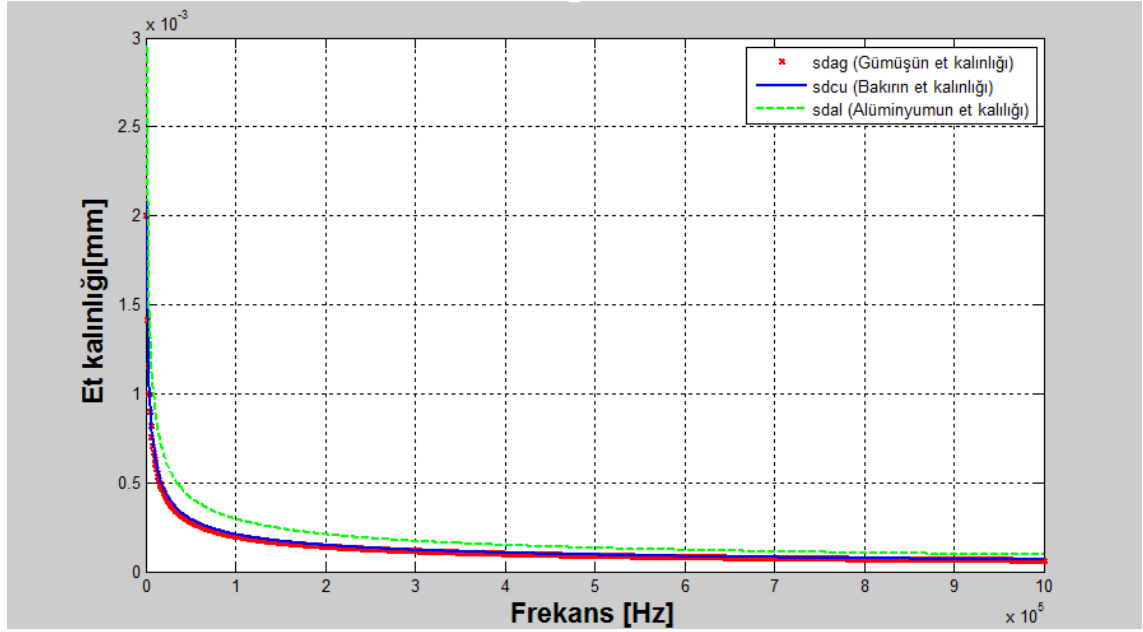
Bir düzlemsel dalga herhangi bir materyal içerisinden geçerken dalganın genliği materyalin et kalınlığının bir fonksiyonu olarak azalmaktadır. İyi iletken maddeler içerisinde 2.17'de verilen genel malzeme et kalınlığı denklemi düzlemsel dalgalar için de kullanılmaktadır.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.17)$$

Bir dalganın propagasyon sabiti 2.18 eşitliğinde sunulmuştur. Buna göre sabitin gerçel kısmı olan α zayıflatma katsayısı kısmı olmaktadır. E_0 dalganın ilk büyüklüğü olmak üzere düzlemsel dalga z yönünde ortamda bu katsayıya bağlı olarak üstel olarak zayıflamaktadır. Bu zayıflama, $E_0 e^{-\alpha z}$ şeklinde ifade edilmektedir.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (2.18)$$

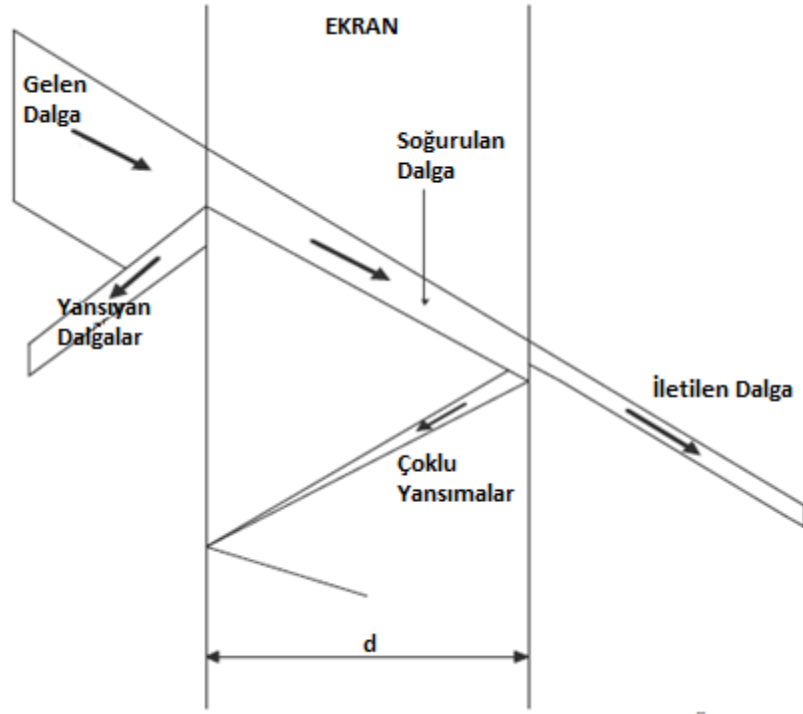
İletkenlik değerleri bilinen gümüş, bakır ve alüminyum malzemelerinin frekansa bağlı ideal et kalınlığı hesaplamaları ve analiz sonuçları Şekil 2.4'te sunulmuştur. Bu grafiklere ilişkin MATLAB kodu EK-7'de sunulmuştur. İletkenlikleri yüksek olan bakır ve gümüş metallerine nazaran daha düşük bir iletkenlik sabitine sahip alüminyum metalinin kullanıldığı ekranlarda et kalınlığı bu diğer iki metale göre daha kalın olmalıdır.



Şekil 2.4. Gümüş, bakır ve alüminyum malzemelerinin et kalınlığı analizleri

2.4. Ekranlama Teorisi

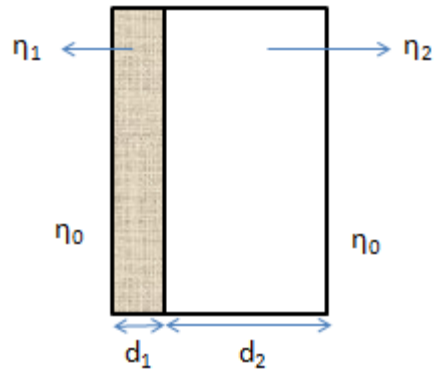
Ekranlama teorisine göre, bir düzlemsel dalganın bir metal ekran yapısı üzerindeki hareketi göz önünde bulundurulmalıdır. Buna göre, Şekil 2.5'te de gösterildiği üzere, bir metal ekrana gelen düzlemsel dalganın sahip olduğu güce bağlı olarak, belli bir kısmı yansırken, bir kısmı soğurulur ve bu soğurulmanın ardından bir miktarı da diğer ortama iletilir. Bunların dışında soğurulan dalganın bir kısmı geçiş ortamında çoklu yansımalara yol açmaktadır.



Şekil 2.5. Ekran modeli

Ekranlama teorisi yazılırken toplam kayıp (total loss- TOT) elektromanyetik dalgaların ekrana ulaştığındaki yansıma (reflection- R), soğurulma (absorption- A) ve çoklu yansıma (multiple reflection- MR) kayıplarının toplamına eşittir. Buna göre;

$$TOT_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + MR_{dB} \quad (2.19)$$



Şekil 2.6. Farklı et kalınlığı ve yüzey empedansına sahip malzemelerden oluşan iki katlı ekran yapısı

Yansımaya kaybı ifadesi, metal ve metal iki malzemedenden oluşan bir ekran yapısı için frekanstan bağımsız olarak yazılabilmektedir. Bununla beraber metal ve hava arasında yazılacak bir yansımaya kaybı ifadesi, havanın empedansının yapısal olarak sabit ve 377Ω olması dolayısıyla frekansa bağımlıdır. Genel yansımaya kaybı denklemi 2.20 denkleminde sunulmuştur.

$$R_{dB} = 20 \log \left(\frac{1}{2} + \left| 1 + \frac{\eta_1}{\eta_0} \right| \right) + 20 \log \left(\frac{1}{2} + \left| 1 + \frac{\eta_2}{\eta_1} \right| \right) + 20 \log \left(\frac{1}{2} + \left| 1 + \frac{\eta_0}{\eta_2} \right| \right) \quad (2.20)$$

Soğurulma kaybı her iki materyalin kayıplarının toplamı şeklinde ifade edilmektedir.

$$A_{dB} = 20 \log \left(e^{\frac{d}{\delta}} \right) = 8.69 \cdot \left(\frac{d_1}{\delta_1} + \frac{d_2}{\delta_2} \right) \quad (2.21)$$

Et kalınlığına (skin depth) bağlı olarak katmanın kalınlığının arttığı görülmektedir. Bu tip et kalınlığı fazla çok katmanlı ekran yapılarında soğurulma kaybı artmaktadır. Boş alanda soğurulma kaybı olmaz çünkü boşluğun, sağ veya sol tarafındaki malzeme katına herhangi bir etkisi bulunmamaktadır (Kaiser 2005). Buna göre çoklu yansımaya kaybı 2.22 denkleminde sunulmuştur.

$$MR_{dB} = MR_{1dB} + MR_{2dB} \quad (2.22)$$

$$MR_{dB} = 20 \log \left| 1 - \left(\frac{(\eta_1 - \eta_0) \cdot (\eta_2 - \eta_{in2})}{(\eta_1 + \eta_0) \cdot (\eta_1 + \eta_{in2})} \right) \cdot e^{-2 \left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{j\delta_1} \right) \cdot d_1} \right| + \quad (2.23)$$

$$20 \log \left| 1 - \left(\frac{(\eta_2 - \eta_1) \cdot (\eta_2 - \eta_0)}{(\eta_2 + \eta_1) \cdot (\eta_2 + \eta_0)} \right) \cdot e^{-2 \left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} \right) \cdot d_2} \right|$$

$$\eta_{in2} = \eta_2 \cdot \frac{\eta_0 \cosh \left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} d_2 \right) + n_2 \sinh \left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} d_2 \right)}{n_2 \cosh \left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} d_2 \right) + n_0 \sinh \left(\frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{j\delta_2} d_2 \right)} \quad (2.24)$$

Bu denklemlerde;

n_0 : Ortamın empedansı

n_1 : Birinci ortamın empedansı

n_2 : İkinci ortamın empedansı

n_{in2} : İkinci ortamın giriş empedansı

δ_1 : Birinci malzemenin soğurulma katsayısı

δ_2 : İkinci malzemenin soğurulma katsayısı

d_1 : Birinci malzemenin et kalınlığı

d_2 : İkinci malzemenin et kalınlığıdır.

ℓ_{th} uzunluklu ve kayıplı bir hat için giriş empedansının hesabı yapılmak istenirse yansıma ve soğurulma kaybı ifadelerinin 2.25'de verilen denkleme göre revize edilmesi gerekmektedir.

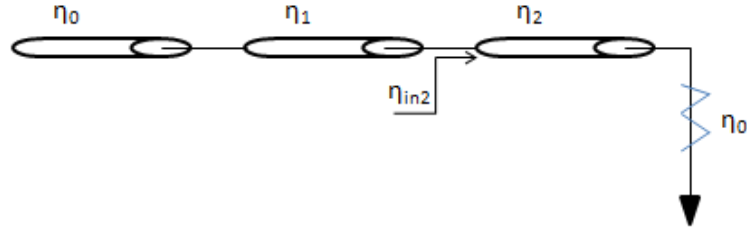
$$Z_{in} = Z_0 \cdot \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma \cdot \ell_{th})}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma \cdot \ell_{th})} \quad (2.25)$$

Z_0 : Hat empedansı (Ω)

Z_L : Yük empedansı (Ω)

Benzer şekilde, d kalınlıklı yapısal η_i empedansa sahip olan bir levha malzemenin yük empedansı η_L kabul edilerek yazılacak giriş empedansı denklemi 2.26'da verilmiştir. Çift katmanlı ekranlar için iletim hattı modeli Şekil 2.7'de sunulmuştur. Buna göre iyi iletkenler için propagasyon katsayısı γ , herhangi bir katman için et kalınlığı cinsinden yazılabilmektedir.

$$\eta_{in} = \eta_i \cdot \frac{\eta_L \cosh(\gamma \cdot d) + \eta_i \sinh(\gamma \cdot d)}{\eta_i \cosh(\gamma \cdot d) + \eta_L \sinh(\gamma \cdot d)} \quad (2.26)$$



Şekil 2.7. Çift katlı ekran iletim hattı modeli

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.27)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega\sigma\mu} \quad (2.28)$$

Ekranlı odaların performansları ele alınacak olursa bu ideal düz ekran yapısı, daha karmaşık olan ekranlı odaların performansını açıklamakta yetersiz kalmaktadır. İdeal olmayan açıklıklar ve bağlantı yerleri gibi faktörler performansta önemli rol oynamaktadır. Manyetik ekranlama da aynı konseptte açıklanmak isterse metal plakaların yerleşimleriyle alakalı olarak başka faktörler de hesaba katılmak zorundadır.

2.4.1. Yansıma ve iletim katsayıları

Yansıma ve iletim katsayılarını hesaplaması yapılırken iletim hattı modelinden faydalanılmaktadır. Gelen dalganın, objeye ya da ekrana direk geldiği durumda yansıma katsayısı iletim hattı modelindeki voltaj yansıma katsayısıyla aynı formda olmaktadır. İletim hattındaki voltaj yansıma katsayısı 2.29 denkleminde verildiği üzere hesaplanmaktadır.

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.29)$$

Bu denklemden faydalanılarak normal propagasyona sahip bir dalganın elektrik alan yansıma katsayısı aşağıda gösterildiği şekilde yazılabilmektedir. η_L malzeme ya da ekranın yalın empedansı, η_0 ise dalganın ilerlediği ortamın yalın empedansı olmaktadır.

$$\rho_L = \frac{\eta_L - \eta_0}{\eta_L + \eta_0} \quad (2.30)$$

İletim hattı modelinde voltaj iletim katsayısının hesabı ve bu hesaptan yola çıkılarak üretilmiş olan dalga elektrik alan iletim katsayısı hesabı aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak yapılır.

$$T = 1 + \rho_L = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_0} \quad (2.31)$$

$$T = 1 + \rho_L = \frac{2\eta_L}{\eta_L + \eta_0} \quad (2.32)$$

Bir ekranın verimliliği özellikle uzak alan bölgelerinde bu sabitlerle ilişkilidir. Manyetik alan yansımaya ve iletim katsayılarının bir düzlemsel dalga için hesaplaması yapılırken, yine iletim hattı modelinden faydalanılarak denklemler oluşturulmaktadır. Yansımaya katsayısının büyüklüğü ortamlar arasındaki empedans uyumluluğu ya da uyumsuzluğuna bağlı olarak bir ya da sıfır değerlerini almaktadır. Ortamlar arasında empedans uyumsuzluğu olduğu durumlarda yansımaya katsayısının değeri yaklaşık bir olmaktadır. İyi metallerde empedans değerleri arasındaki fark oldukça az olduğundan ortamlar arasındaki uyumsuzluk sorunu ortadan kalkmaktadır. Bir metal ekran kısa devre yükü olarak düşünülebilir. Elektrik enerjisi kısa devrenin yapısından dolayı direk bu yük direnci üzerinden aktarılacak ve enerjinin dağılımı olmayacaktır. İşte tam da bu sebepten ötürü metaller iyi yansıtıcı ekranları oluşturmaktadır.

Elektrik alan, yansımaya katsayısının düşük olduğu bu ortamlardan kolayca geçmektedir. Bu durumda dalganın verimli bir şekilde ekranlanabilmesi için ekran, yüksek soğurma kaybına sahip ya da çoklu yansıtıcı arayüzleri olan materyallerden seçilmelidir.

2.5. Plazma ve Polimerizasyon Teknikleri

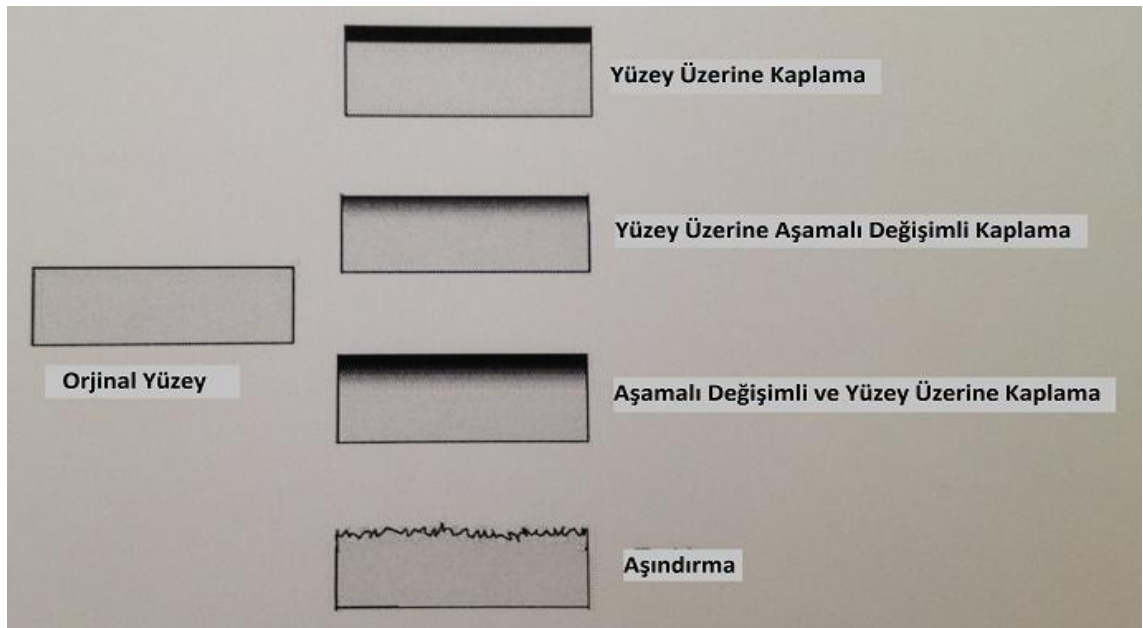
Plazma en basite indirgenmiş haliyle maddenin dördüncü hali olarak kabul edilmektedir. Çünkü plazma katı, sıvı ve gaz halinde bulunan diğer maddelerden farklı özelliklere sahiptir. Bu hallerden bir kısmıyla ortak özellikler taşısa da kesin bir sınıfa

dahil edilememektedir. Genellikle yüksek enerji, yüksek frekans ya da yük boşalımı gibi sıklıkla rastlanmayan olaylar neticesinde ortaya çıkar ve etki sürdüğü müddetçe varlığını sürdürebilir. Dolayısıyla plazmalar kısa ömürlü ve nadir rastlanan doğa olaylarıdır. Güneş'in yüzeyinin bir çok farklı malzemeye ait plazmalar ile kaplı olduğu tahmin edilmektedir.

Polimerler, en az üç adet monomer adı verilen tek atomlu molekülün bir araya gelmesiyle oluşur. Polimerlerin sentezlenmesinde iki tip mekanizma gerçekleşmektedir. Bunlar zincir-katılma polimerizasyonu ve basamak-kondenzasyon polimerizasyon mekanizmalarıdır. Her iki polimerizasyon işlemi de monomerlerin bir araya gelmesiyle kompleks yapılar oluşturma prensibine dayanır. Hangi mekanizmanın kullanılacağı materyalin kimyasına göre kendiliğinden gerçekleşmektedir (Onaran 2003).

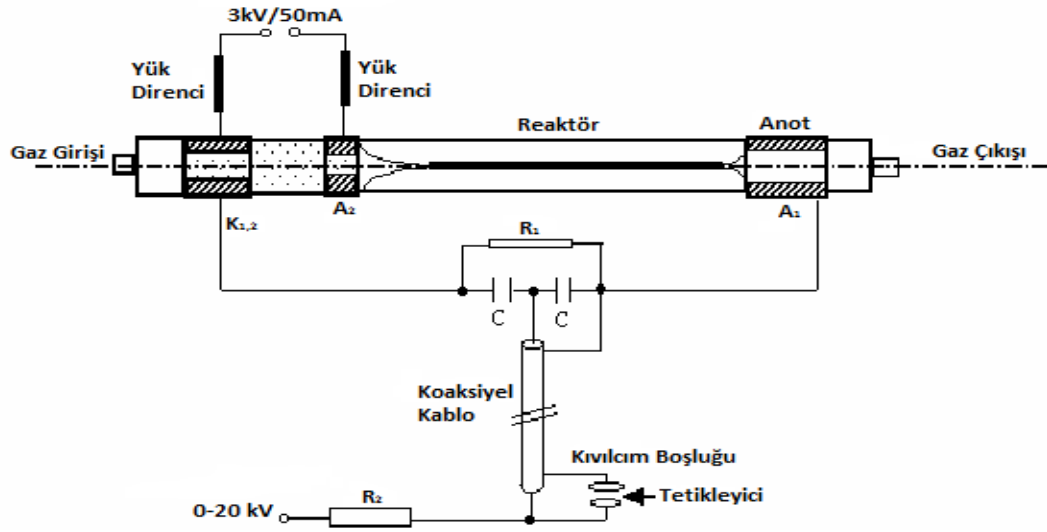
Polimerizasyon işlemleri birden fazladır. Bunlar;

- Yığın polimerizasyonu,
- Süspansiyon polimerizasyonu,
- Emisyon polimerizasyonu,
- Dispersiyon polimerizasyonu ve
- Plazma polimerizasyonudur.



Şekil 2.8. Plazma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen yüzey modifikasyonları

Yığın, süspansiyon, emisyon ve dispersiyon polimerizasyonu işlemlerinde plazma polimerizasyonunun farklı olarak hem polimerizasyonu gerçekleştirilecek monomer, hem de işlemin gerçekleştirileceği yer önem kazanmaktadır. Çünkü gerçekleşen kimyasal tepkimenin sonucunda ortamdan uzaklaştırılması gereken ürün ve artık malzeme miktarı fazladır. Örneğin, yığın polimerizasyonu işleminde ortamdan uzaklaştırılması gereken ısı açığa çıkarken süspansiyon polimerizasyonunda homojenite problemi ile karşılaşılmaktadır. Emülsiyon polimerizasyonunda ise kullanılan emülgatör ile malzemenin yoğunluklarının birbirine yakın olması gerekliliğinin getirdiği bir kısıtlama bulunmaktadır. Bununla beraber plazma polimerizasyon işlemi ise bu diğer tiplerden farklı olarak homojenlik ve malzeme konusunda bize özgürlük sağlamaktadır. Isı artışı ile ilgili problem plazma polimerizasyonunda da mevcuttur ancak katı, sıvı ya da gaz herhangi bir monomer büyük bir hızla ve büyük bir başarıyla polimerleştirilebilmektedir (Ratner vd. 2004).



Şekil 2.9. Plazma cihazının şematik gösterimi

2.5.1. Plazma parametreleri

Ortalama serbest yörünge ve çarpışma enerjisi frekansı gibi plazma parametreleri önemli plazma karakteristikleridir ve plazma dinamiğinin anlaşılmasında önemli rol oynamaktadır. Önemli plazma parametreleri ve formülasyonları aşağıda sunulmaktadır.

- Elektron Hızı: Serbest elektronların kinetik enerjileri elektron sıcaklığı T_e ifadesiyle bağlantılıdır. Elektron hızı v_e ifadesi elektron sıcaklığının elektron kütlesine m_e bölümünün karakökü alınarak hesaplanmaktadır.

$$v_e = \sqrt{\frac{2T_e}{m_e}} \quad (2.33)$$

- Kalma Süresi: Kalma süresi t , partiküllerin plazma içerisinde bulunma süresini ifade etmektedir. ℓ plazma oluşum bölgesinin uzunluğu, A plazma alanı ve u toplam gaz akış oranı olmak üzere kalma süresi 2.34'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$t = \frac{\ell \cdot A}{u} \quad (2.34)$$

- Ortalama Serbest Yörünge: λ_{MFP} ortalama serbest yörünge ifadesi bir partikülün çarpışma alanları arasındaki mesafelerin ortalama uzaklığını belirtmektedir.

$$\lambda_{MFP} = \frac{1}{d_g \sigma} \quad (2.35)$$

Bu ifadede d_g doğal gazın yoğunluğuna, σ ise doğal gazın elektron saçılımının ortalamasını belirtmektedir. Atmosferik basınç altında, p basınç, R molar gaz sabiti (8.314 J/K/mol) ve T 'de gazın ısısı olmak üzere; doğal gazın yoğunluğu aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$d_g = \frac{p}{RT} \quad (2.36)$$

- Çarpışma Enerji Zamanı ve Frekansı: Elektronlar çarpışmalar arasında ortalama zaman geçirmektedirler. Çarpışmalar arasındaki bu süre ortalama boşluk süresinin elektron hızına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Bununla beraber çarpışma enerji frekansı ifadesi de çarpışmada her saniye için ya da Hz birimleriyle çarpışma enerjisi zamanının tersine eşit olmaktadır.

$$\tau = \frac{\lambda_{MFP}}{v_e} \quad (2.37)$$

$$\nu = \frac{1}{\tau} \quad (2.38)$$

- Çarpışma Momentum Frekansı: Çarpışma momentum frekansı ν_m , gelen partikül ve hedef partiküllerin kütlelerine bağlı olarak yazılabilmektedir.

Çarpışma momentum frekansı ifadesi, çarpışma sonucu momenti değişen bir partikülün frekansını ifade etmektedir.

$$v_m = v \frac{m_1 + m_2}{2m_1} \quad (2.39)$$

- Elektron Plazma Frekansı: d_e elektron yoğunluğu, e ilk yük değeri, ε_0 vakum geçirgenlik sabiti ve m_e elektronun kütlesi olmak üzere elektron plazma frekansı 2.40'taki gibi yazılmaktadır.

$$\omega_{pe} = \left(\frac{d_e \cdot e^2}{\varepsilon_0 \cdot m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

- Çarpışma Et Kalınlığı: Elektron plazma frekansı, çarpışma momentum frekansı ifadelerine ek olarak, c vakumda ışık hızı ve ω mikrodalga frekansı olmak üzere çarpışma et kalınlığı ifadesi hesaplanmaktadır. 2.41 denklemini çarpışma momentum frekansı ve elektron plazma frekansı değerlerinin mikrodalga frekansından oldukça büyük olması durumunda yazılabilmektedir.

$$\delta = \frac{\sqrt{2}c}{\omega_{pe}} \left(\frac{v_m}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.41)$$

- Plazma İletkenliği: Çarpışma et kalınlığında olduğu gibi çarpışma momentum frekansı ve elektron plazma frekansı değerlerinin mikrodalga frekansından oldukça büyük olması durumunda ($\omega_{pe} , v_m \gg \omega$) 2.42'deki gibi hesaplanmaktadır.

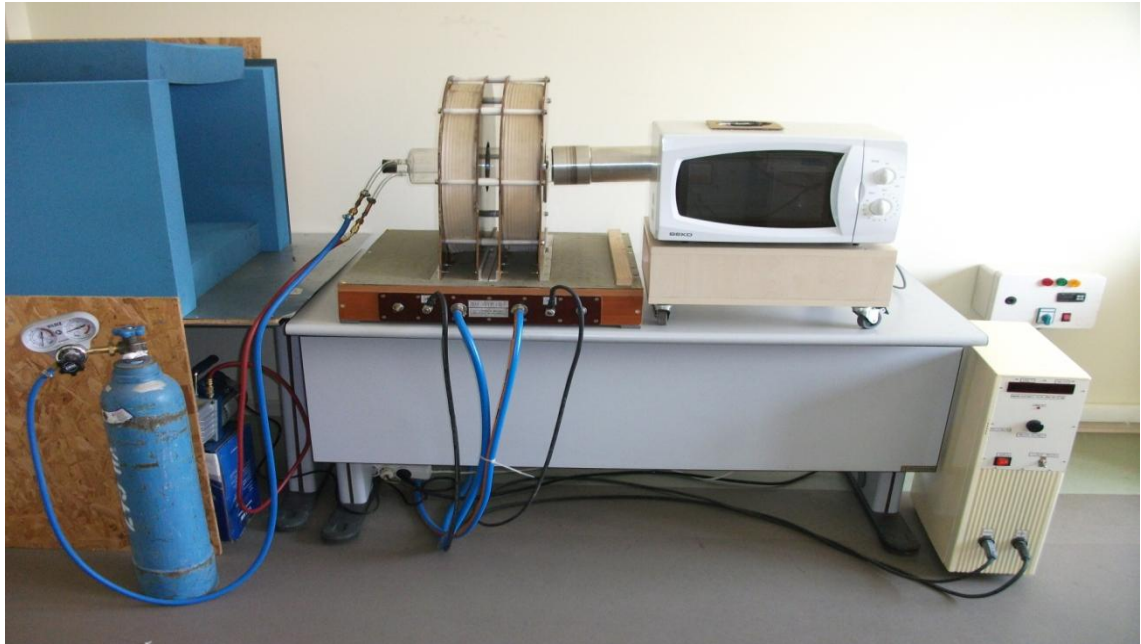
$$\sigma_{dc} = \frac{2}{\omega \mu_0 \delta^2} \quad (2.42)$$

2.5.2. Plazma polimerizasyonu

Plazma polimerizasyon tekniğinin temeli yüksek enerji oluşturularak vakum ortamında bir plazma oluşturulmasına dayanmaktadır (Hseuh vd 2005). Plazma maddenin dördüncü hali olarak da adlandırılmaktadır. Çünkü maddenin ne katı, ne sıvı ne de gaz formuna uymaktadır. Plazma oluşturacak monomere vakum altında yüksek elektrik voltajı, radyo frekansı, mikrodalga vb. uygulanarak ışığa yapması sağlanmaktadır (Kostyuk ve Voliak 2002).

Bu durumda, içerisinde vakum oluşturulmuş hazne kısmına önceden yerleştirilmiş olan kaplama yapılacak malzemenin üzerine homojen bir kaplama gerçekleştirilmektedir. Bu işlem yapılmadan önce bir soy gaz kullanılarak kaplama yapılacak malzemenin yüzeyinde temizleme işlemi yapılmaktadır. Vakum altında genelde argon (Ar) gazı kullanılarak malzemenin yüzeyinde süpürme işlemi yapılmaktadır (Kobayashi 2000). Bu gazın seçilmesinin sebebi soygaz ve ağır bir gaz olması dolayısıyla argonun, yüzeyde bir süpürme işlemi yapacak ve yüzeyde bulunan bir takım kimyasalları temizleyecek olmasıdır. Bu işlemin yapılmasının sebebiyse temizlenmiş bir yüzeyde tam istenen boyutlarda ve yüzeye homojen dağılmış bir kaplama yapılmasının mümkün olmasıdır (Kır vd 2006).

Plazma polimerizasyon işleminin kaplamanın dağılımında sağladığı eşitliğin yanı sıra kaplamanın sağlamlığı ve inceliği gibi diğer avantajları da bulunmaktadır. Argon gazı ile yapılan süpürme işlemi esnasında yüzeyde küçük deformasyonlar oluşmaktadır. Ancak bu deformasyonlar mikro boyutlarda yüzeye önemli zararlar vermeyen ancak kaplamanın stabilizasyonu için oldukça önemli olmaktadır. Plazma polimerizasyon yöntemiyle hazırlanan kaplamalar genel olarak mikrometre mertebelerinde olmaktadır (Cokeliler vd 2010).



Şekil 2.9. Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Araştırma ve Uygulama Merkezi (EMUMAM)'daki mikrodalga plazma polimerizasyon sistemi

3. MATERYAL VE METOT

3.1. İnce Ekranlar ve Yansıma Kaybı

İyi iletken ekranlarda iletilen elektrik alan değerinin büyüklüğü, ekranın kalınlığının ideal et kalınlığından daha ince olması durumunda aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. E_i değeri, d kalınlık ve σ iletkenliğine bağlı normal bir dalganın elektrik alan büyüklüğüdür (Kaiser 2005).

$$E_t \approx E_i \frac{2\sqrt{2}}{377 \cdot \sigma \cdot d} \quad (3.1)$$

İyi iletkenlerin empedansları havanın empedans değeri olan 377Ω 'dan çok düşük olmaktadır. Bu bilgi dahilinde empedans ifadesi 3.2 denklemde verilmektedir. 3.2 denklemden faydalanılarak genel ekranlama eşitliği sadeleştirilebilir.

$$\eta \approx \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1 + j) \quad (3.2)$$

$$\frac{E_{is}}{E_{ts}} \approx \frac{(\eta_0)^2}{4\eta_0\eta} \left[1 - \left(\frac{\eta_0}{\eta} \right)^2 e^{-j2\frac{d}{\delta}} \right] e^{\frac{d}{\delta}} e^{j\frac{d}{\delta}} e^{-j\beta_0 d} \quad (3.3)$$

$$\frac{E_{is}}{E_{ts}} = \frac{\eta_0}{4\eta} \left[1 - e^{-j2\frac{d}{\delta}} \right] e^{\frac{d}{\delta}} e^{j\frac{d}{\delta}} e^{-j\beta_0 d}$$

Euler dönüşümü kullanılarak e 'li terimler trigonometrik eşitliklerden faydalanılarak sadeleştirilmektedir. Belirtilen varsayımlar ışığında denklem 3.4'teki hali almaktadır.

$$\left| \frac{E_{is}}{E_{ts}} \right| \approx \left| \frac{\eta_0}{4\eta} \left[1 - \left(1 - j2\frac{d}{\delta} \right) \right] \right| \approx \left| \frac{\eta_0}{2\eta} \frac{d}{\delta} \right| \quad (3.4)$$

$$\left| \frac{E_{is}}{E_{ts}} \right| \approx \left| \frac{\eta_0}{2\eta} \frac{d}{\delta} \right| = \left| \frac{377}{2\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+j)} \right| d \sqrt{\pi f \omega \sigma} = \frac{377 \cdot \sigma \cdot d}{2\sqrt{2}}$$

3.2. Kalın Ekranlar ve Soğurulma Kaybı

E_i değerinde elektrik alanı olan d kalınlıklı ve σ iletkenliği bulunan manyetik olmayan bir ekranda, E_{di} olarak ifade edilen kalın ekran içerisindeki elektrik alan ifadesi 3.5 denkleminde hesaplanabilmektedir. Soğurulan elektrik alan ifadesinin metal-hava arasındaki yansıması göz ardı edilerek ortam empedans değeri, ince ve iyi iletken ekranda olduğu gibi olmaktadır (3.2). Manyetik olmayan bir iletkenin varlığında $\mu = \mu_0$ olmaktadır. Buna göre kalın ekran içerisine işleyen elektrik alan değerinin büyüklüğü 3.7 denklemindeki gibi olmaktadır.

$$E_{di} \approx 2E_i \sqrt{\frac{\omega\epsilon_0}{\sigma}} \quad (3.5)$$

$$E_{dis} = E_{is} \cdot T_{am} = E_{is} \frac{2\eta}{\eta + \eta_0} \approx E_{is} \frac{2\eta}{\eta_0} = E_{is} \frac{2\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+j)}{\eta_0} \quad (3.6)$$

$$\left| \frac{E_{dis}}{E_{is}} \right| = \left| \frac{2\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}(1+j)}{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}} \right| = 2\sqrt{\frac{\mu\epsilon_0}{\sigma}} \quad (3.7)$$

Bekleneceği üzere, iletkenlik arttığında artan yansıma dolayısıyla elektrik alan azalmaktadır. Ekranın kalınlığının ideal et kalınlığı değerinden oldukça yüksek olduğu kabul edilerek geliştirilen modelde ekranın ötesine kadar ilerleyen elektrik alan değeri ve bu değer hesaplanması gerçek değerine oldukça yaklaşık olarak yapılabilmektedir. T_{am} değeri hava ile metal yüzeyleri arasında gerçekleşen iletim değerini vermektedir.

EA metal hava arasına ulaştığında ise T_{ma} değeri devreye girmektedir. Buna göre ekrandan iletilen E_{ts} değeri 3.8 denklemindeki gibi olmaktadır.

$$|E_{ts}| = \left| E_{is} \cdot T_{am} \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} \cdot T_{ma} \right| = \left| E_{is} \left(\frac{2\eta}{\eta + \eta_0} \right) e^{-\frac{d}{\delta}} \left(\frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta} \right) \right| \quad (3.8)$$

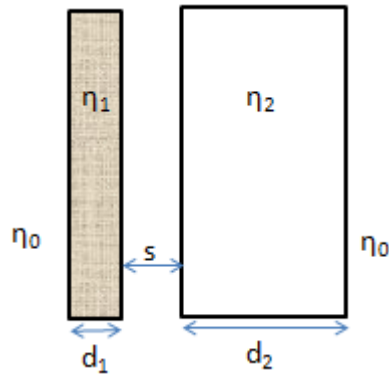
$$|E_{ts}| \approx \left| E_{is} \left(\frac{2\eta}{\eta_0} \right) e^{-\frac{d}{\delta}} \left(\frac{2\eta_0}{\eta_0} \right) \right| = \left| 4 \cdot E_{is} e^{-\frac{d}{\delta}} \frac{\eta}{\eta_0} \right| = \left| 4 \cdot E_{is} e^{-\frac{d}{\delta}} \sqrt{\frac{\omega \varepsilon_0}{2\sigma}} (1 + j) \right|$$

$$\frac{|E_{ts}|}{|E_{is}|} = 4e^{-\frac{d}{\delta}} \sqrt{\frac{\omega \varepsilon_0}{\sigma}} \quad (3.9)$$

Kalın ekranlarda soğurulma kaybı hesaplamasında kullanılan yaklaşım katmanlı ekranlardaki soğurulma kaybının hesaplamasında da kullanılmaktadır. Bu hesaplamalar esnasında katmanların et kalınlığının belli bir eşik değerde olması ve ekranların birbirine bitişik yani hiç hava boşluğu olan bir katman olmaması durumunda geçerli olmaktadır (Kaiser 2005).

3.3. Katmanlı Ekranlar

3.3.1. Hava boşluklu katmanlı ekranlar



Şekil 3.1. Hava boşluklu ekranlar

Hava boşluklu ekranlarda da toplam kayıp yansıma kaybı, soğurulma kaybı ve çoklu yansıma kayıplarının toplamına eşittir. Soğurulma kaybı tıpkı iki katlı yapıda olduğu gibi her iki materyalin kayıplarının toplamına eşittir. Boş alanın soğurulma kaybının sıfıra eşit olması dolayısıyla soğurulma kaybı hesabına bir etkisi bulunmamaktadır.

Hava boşluklu ekran yapısı dört yüzey bulundurması dolayısıyla her arayüz için ayrı ayrı çoklu yansıma kaybı hesabı yapmayı gerektirmektedir. Her bir bölgenin çoklu yansıma kaybı bulunup hepsinin toplamıyla ekranın çoklu yansıma kaybı hesaplanmaktadır.

$$MR_{dB} = MR_{1dB} + MR_{2dB} \quad (3.10)$$

$$MR_{dB} = 20 \log \left| 1 - \left(\frac{(\eta_1 - \eta_0) \cdot (\eta_1 - \eta_{in0})}{(\eta_1 + \eta_0) \cdot (\eta_1 + \eta_{in0})} \right) \cdot e^{-2 \left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{j\delta_1} \right) d} \right| + \quad (3.11)$$

$$20 \log \left| 1 - \left(\frac{(\eta_0 - \eta_1) \cdot (\eta_0 - \eta_{in2})}{(\eta_0 + \eta_1) \cdot (\eta_0 + \eta_{in2})} \right) \cdot e^{-2j\beta_0 s} \right| + 20 \log \left| 1 - \left(\frac{\eta_2 - \eta_0}{(\eta_2 + \eta_0)} \right)^2 \cdot e^{-2 \left(\frac{1}{\delta_2} + j\frac{1}{\delta_2} \right) d_2} \right|$$

Tüm ekran yapısının öncesinde ve sonrasında kalan boş alan bölgelerinin çoklu yansıma kayıpları, ekranın sol ve sağ kısımlarının empedanslarının boş alana eşit olması dolayısıyla ihmal edilmektedir. Burada da yine iletim hattı benzeştirmesinden faydalanılır ve 3.12 denklemi bu şekilde elde edilmektedir.

$$\eta_{in0} = \eta_0 \cdot \frac{\eta_{in2} \cos(\beta_0 \cdot s) + j\eta_0 \sin(\beta_0 \cdot s)}{\eta_0 \cos(\beta_0 \cdot s) + j\eta_{in2} \sin(\beta_0 \cdot s)} \quad (3.12)$$

Burada; β_0 , boşluğun yayılma sabitinin imajiner kısmı olan faz sabitidir. Dalganın boşluktaki yayılma hızı, frekansı ve boşluğun dielektrik sabitlerine bağlıdır. s ise arada kalan katın kalınlığını ifade etmektedir. Eğer ekranda kullanılan metaller göreceli et kalınlıklarına nazaran elektriksel olarak kalınlarsa, bu metallerin her biri için çoklu yansıma kaybı ihmal edilemez. Yansımış sinyalin gücü, direk gelen sinyalin gücüne oranla kalın metalin güçlü zayıflatıcı etkisi yüzünden oldukça küçüktür. Ancak boş alanın çoklu yansıma kaybı, bu bölgenin zayıflatıcı etkisi olmaması dolayısıyla sıfır değildir. Metaller arasındaki boşluk alanın çoklu yansıma kaybı 3.13 denklemine eşittir.

$$MR_{0dB} = 20 \log \left| 1 - \left(\frac{(\eta_0 - \eta_1) \cdot (\eta_0 - \eta_{in2})}{(\eta_0 + \eta_1) \cdot (\eta_0 + \eta_{in2})} \right) \cdot e^{-2j\beta_0 s} \right| \quad (3.13)$$

Bu kısımda analiz yapılırken iletim hattı modeli kullanıldığından, ikinci ortamın giriş empedansı 2.26 denkleminde faydalanılarak çözümlenebilmektedir. d_2 kalınlığı, et kalınlığından daha büyük olduğu durumda η_{in2} yaklaşık olarak, uzaktaki arayüzden gelen yansımanın empedans etkisi ihmal edilebileceğinden ötürü, η_2 'ye eşit olmaktadır. Bu yaklaşım sonucunda metallere arasında kalan boş alan 3.14 denklemindeki gibi yazılabilmektedir.

$$MR_{0dB} \cong 20 \log \left| 1 - \left(\frac{(\eta_0 - \eta_1) \cdot (\eta_0 - \eta_2)}{(\eta_0 + \eta_1) \cdot (\eta_0 + \eta_2)} \right) \cdot e^{-2j\beta_0 s} \right| \quad (3.14)$$

Her iki metalin de η empedanslı aynı kompozisyonda olduğu kabul edilirse Euler formülünün kompleks üstel ifadesi kullanılabilir. Ayrıca metalin empedansı η , η_0 yani boşluğun empedansı olan 377Ω 'dan oldukça düşük olduğu durumda ifade tekrar düzenlenebilir ve son olarak metal plakalar arasındaki s mesafesinin de boşluktaki dalgaboyu λ_0 değerinden daha küçük olduğu varsayılırsa metallere arasındaki boş alanın çoklu yansıma kaybı ifadesi 3.15'teki gibi elde edilmektedir.

$$MR_{0dB} \cong 20 \log \left| 4 \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_0} \right) + j \left(4\pi \frac{s}{\lambda_0} \right) \right| \quad (3.15)$$

3.15 denklemindeki logaritmanın değeri 1'den oldukça küçük olduğundan, boş alanın çoklu yansıma kaybının negatif ve büyük olduğunu ifade etmektedir. Kalın metallere için, metallere arasındaki mesafe dalga boyundan çok küçük olduğu zaman ise, aradaki hava boşluğu çift katlı ekranın toplam ekranlama verimliliğini de çoklu yansıma kaybını düşürmesi dolayısıyla düşürmektedir. Bununla beraber ortamlar arasındaki s mesafesi, dalga boyundan büyük ise de çoklu yansıma kaybı ifadesi pozitif çıkabilmektedir. Bu fenomen "antiresonant" yani rezonans olamama olarak adlandırılır. Çınlama frekanslarında ya da bu frekans değerlerine yakın değerlerde çoklu yansıma kaybı pozitif olduğundan toplam ekranlama verimliliğini de arttırmaktadır.

Ancak dalga boyunun çift katlarında rezonans frekans değerleri olmaktadır. Bu değerlerde çoklu yansıma kaybı büyük ve negatif olacağından, bu model için toplam ekranlama verimliliğini düşürmektedir. Rezonans frekanslarında çoklu yansıma kaybı büyüklük olarak tek katlı ekranın aynı değeri kadardır ancak işareti terstir.

Soğurulma kaybı, toplam metal kalınlığının bir fonksiyonuyken, yansıma kaybı arayüzey sayısı ve arayüzeylerdeki kesitlerin büyüklerinin fonksiyonudur. Eğer aynı tip iki materyal bir araya getiriliyorsa, yansıma katsayısı da düşmektedir.

$$R_{dB} = 2 \cdot \left(20 \log \left(\frac{1}{2} \left| 1 + \frac{\eta}{\eta_0} \right| \right) \right) + \left(20 \log \left(\frac{1}{2} \left| 1 + \frac{\eta_0}{\eta} \right| \right) \right) \quad (3.16)$$

$$R_{dB} \cong 2 \cdot \left(20 \log \left| \frac{\eta_0}{4\eta} \right| \right) \quad (3.17)$$

Bu yaklaşımla R_{dB} değeri tek katlı ekran yapılarına göre 2 kat fazla olmaktadır. Bu çok sürpriz bir sonuç değildir çünkü yansıma kaybı genelde hava-metal yüzeyleri arasında olmaktadır ve bu model için de bu geçiş iki kere gerçekleşmektedir. Aynı tip materyallerden oluşan, elektriksel kalın çift katmanlı bir ekranda da toplam kayba yol açan aralık bu şekilde olmaktadır.

3.3.2. Cam üzerine altın kaplı ekranlar

Cam veya plastik substratlar üzerine uygulanan ince metal kaplamalar görünür ışığın geçmesine izin verirken diğer frekans değerlerini zayıflatmaktadır. Örneğin, uzay gemilerindeki siper kısımlarında kullanılan metal filmler kızıl ötesi radyasyonu (infrared radiation IR) azaltmaya yaramaktadır.

Kızıl ötesi radyasyon frekans spektrumunda mikrodalganın altında ancak görünen ışığın üzerinde yer almaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere mikrodalga spektrumu oldukça geniştir. 1-100 GHz frekans değerleri arasını kapsaması dolayısıyla bandlara ayrılmıştır. IEEE'nin mikrodalga band isimleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. IEEE'nin mikrodalga band isimleri ve frekans aralıkları (Kaiser 2005)

Mikrodalga Bandı	Frekans Aralığı (GHz)	Boşluk Dalgaboyu Aralığı
L	1 - 2	30 - 15 cm
S	2 - 4	15 - 7.5 cm
C	4 - 8	7.5 - 3.75 cm
X	8 - 12	3.75 - 2.5 cm
Ku	12 - 18	2.5 - 1.67 cm
K	18 - 27	1.67 - 1.11 cm
Ka	27 - 40	1.11 - 0.75 cm
Millimeter	40 - 300	7.5 - 1 mm
Submillimeter	> 300	< 1mm

Bir kaç tip cam bulunmaktadır. Bunlardan biri silikon dioksittir. Eritilmiş kuartz olarak da bilinen bu tip cam 100 Hz'ten mikrodalga frekans aralığına kadar sabit 3.78 dielektrik katsayısına sahip son derece stabil bir materyaldir. Dağılma faktörü denklemi 3.18'de verilmiştir.

$$\tan \delta_{eff} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3.18)$$

Dağılma faktörü, 100 Hz'de 0.00085 değerinden başlayarak 25 GHz'deki 0.00025 değerleri arasında değişmektedir. İletim akımı ve yer değiştirme akımlarının oranı 1'den çok küçük olduğu için, bu geniş frekans aralığında bile cam çok iyi bir izolatördür (Kaiser 2005). Dağılma faktörü analizine göre, camın verimli iletkenliği 100 Hz'de 2×10^2 $1/\Omega m$ ve 25 GHz'de 1×10^{-3} $1/\Omega m$ civarında olmaktadır. Bu datalar metalin iletkenlik değeri olan 5.8×10^7 $1/\Omega m$ değeri ile karşılaştırıldığında camın iyi bir izolatör olduğunu göstermektedir.

Işık ince metal filmlerden geçebilmektedir. Bununla beraber metal filmlerin iletkenlikleri, metallerde kullanılan standart yığın iletkenlik değerinden daha küçüktür. Altın filmin iletkenliği Çizelge 5'te verilmiştir. Oda sıcaklığında ρ değeri 570 Å, σ değeri 4.7×10^7 $1/\Omega m$ ve t altın filmin kalınlığını ifade etmek üzere yüzey direnci 3.19 denkleminde olduğu gibi elde edilmektedir.

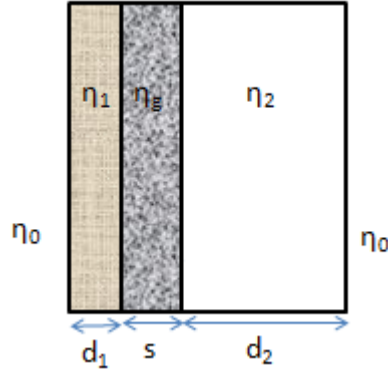
$$\sigma_f = \frac{3t\sigma}{4\rho} \left(\ln \left(\frac{\rho}{t} \right) + 0.4228 \right) \quad (3.19)$$

$$R_s = 1/\sigma ft \quad (3.20)$$

Çizelge 5. Altının yüzey direnci ve iletkenliği (Kaiser 2005)

t (Å) ^a	T -Kalınlık(m)	σ_f (1/Ωm)	R_s (Ω)
10	10×10^{-10}	0.24×10^7	420
30	30×10^{-10}	0.54×10^7	62
60	60×10^{-10}	0.87×10^7	19
90	90×10^{-10}	1.11×10^7	10
0.1×10^7	0.1×10^{-3}	4.10×10^7	2.4×10^{-4}
10×10^7	1.0×10^{-3}	4.10×10^7	2.4×10^{-5}
10×10^7	10×10^{-3}	4.10×10^7	2.4×10^{-6}

Çizelge 5'te görüldüğü üzere iletkenlik kalınlıkla artmaktadır. Daha büyük kalınlıklar için (0.1mm) iletkenlik sabit ve standart yığın değerlere eşittir. Hava boşluklu ekran modeline benzer olarak cam ile model tekrar kurulursa hesaplamalar değişmektedir. Çünkü camın belli bir dielektrik sabiti bulunmaktadır ve bu değer 4'tür.



Şekil 3.2. Cam katmanlı ekran

η_g camın yapısal empedansıdır. Soğurulma kaybı boş alan modelindekinden farksızdır çünkü cam da kayıpsız bir materyal olarak kabul edilmektedir. Camın empedansı 377Ω olmadığından ötürü metal-cam ve cam-metal yüzeyleri arasındaki yansıma kaybı değişmiştir. Çoklu yansıma kaybı değeri de ilk metal-cam arayüzeyinin camın empedansından etkilenmesi dolayısıyla değişmiştir.

$$\eta_g = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{0 + j\omega\epsilon_0}} = 194\Omega \quad (3.21)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Ekranlama Verimliliği ve Yüzey Empedansı

Geniş bir aralıktaki yüzey empedans değerleri için ekranlama verimliliği değerleri frekans değerlerine karşılık çizdirildiğinde ekranın ince ve düzlemsel dalganın ekranın normaline dik olarak geldiği durumda dB cinsinden toplam kayıp, yansıma, soğurulma ve çoklu yansıma kayıplarının toplamına eşit olmaktadır. İyi iletken t kalınlıklı bir ekranda bu değerler yaklaşık olarak aşağıda verilen denklemlerdeki gibi bulunmaktadır.

$$R_{dB} = 20 \log \left| \frac{2.6 \times 10^8}{\sqrt{\frac{\mu_r f}{\sigma_r}}} \right| \quad (4.1)$$

$$A_{dB} = 131t \sqrt{\mu_r \sigma_r f} \quad (4.2)$$

$$MR_{dB} = 10 \log \left| 1 - 2e^{-30.3t \sqrt{\mu_r \sigma_r f}} \cos(30.3t \sqrt{\mu_r \sigma_r f}) + e^{-60.6t \sqrt{\mu_r \sigma_r f}} \right| \quad (4.3)$$

Bir ekranda, ekranın kalınlığının et kalınlığına nazaran küçük olduğu ($t \ll \delta$) durumda yüzey empedansı değeri 4.4 denklemine eşittir.

$$R_s = \frac{l_{th}}{\sigma \omega t} = \frac{l_{th}}{\sigma l_{th} t} = \frac{1}{\sigma} \Omega \quad (4.4)$$

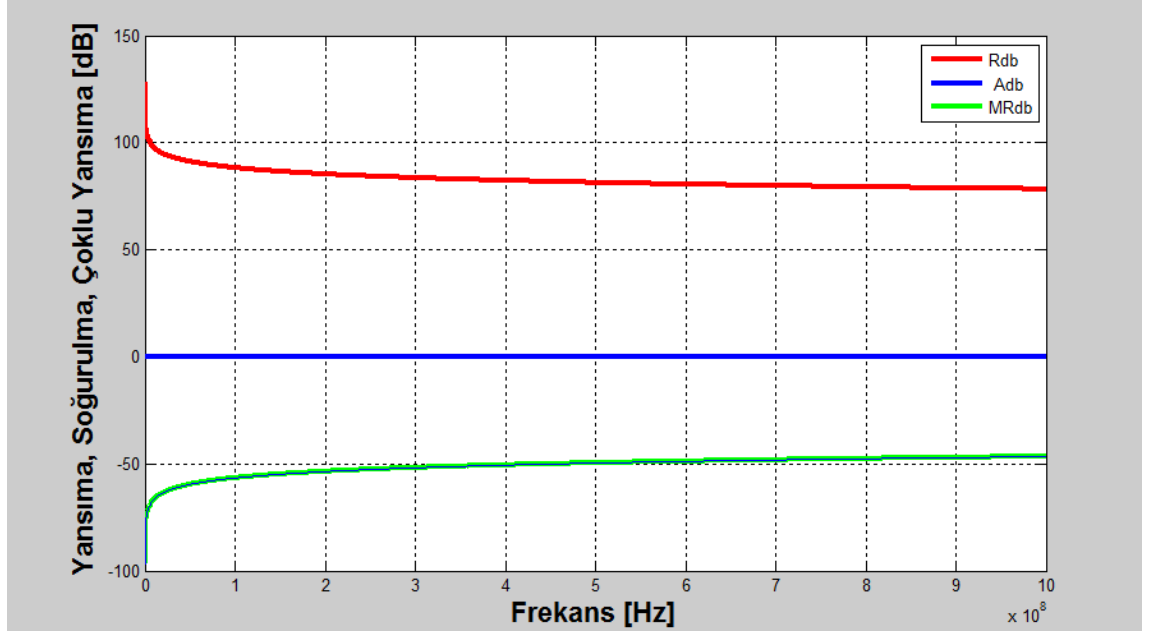
Bakır bir ekran yapısında, ekranın ince olması durumunda ekranlama verimliliğinin hesaplamaları yapılırken, soğurulma kaybı ihmal edilebilirken çoklu yansıma kaybı ifadesi ihmal edilememektedir. 1 GHz frekanslı bir düzlemsel dalganın ekranlaması incelendiğinde, bakır ekran için bu frekans değerinde et kalınlığı $2\mu\text{m}$ olarak hesaplanmaktadır. $2\mu\text{m}$ 'den biraz daha ince bir bakır ekranda yüksek yüzey empedans değerlerinde toplam zayıflatmanın sabit olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.2). Bunun sebebi, yüzey empedansının çok yüksek olduğu durumlarda ekran kalınlığının

oldukça küçük bir değer çıkmasıdır. 5Ω değerinde bir yüzey empedansı için bakır ekranın kalınlığı 4.5'teki gibi hesaplanmaktadır.

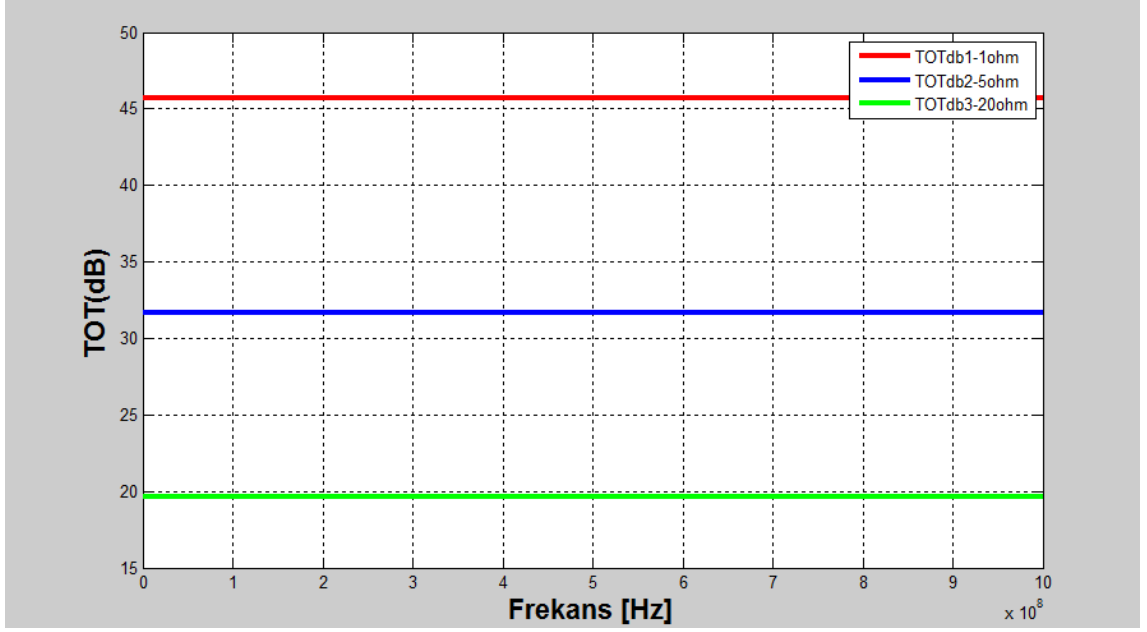
$$t = \frac{1}{R_s \sigma} \approx 3.4nm \quad (4.5)$$

Bu kalınlık 1GHz değerindeki et kalınlığı ifadesinden oldukça düşük bir değer olduğundan toplam kayıp ifadesi, ince ekranlar için yazılan yaklaşık toplam kayıp denkleminde de faydalanılarak, yüzey empedansının bir fonksiyonu şeklinde yazılabilmektedir.

$$TOT_{dB} = 20\log\left(\frac{377\sigma t}{2\sqrt{2}}\right) = 20\log\left(\frac{377}{2\sqrt{2}R_s}\right) \approx 42.5 - 20\log(R_s) \quad (4.6)$$



Şekil 4.1. 5Ω yüzey empedansı olan bakır ekranda yansımaya, soğurulma ve çoklu yansımaya kaybı



Şekil 4.2. Yüzey empedansının bir fonksiyonu olarak ekranda toplam kayıp

4.2. Kaplı İletkenlerde Empedans

Metal materyaller çoğunlukla başka tipteki diğer metallerle kaplanmaktadır. Bu işlemin yapılmasının sebebi, metalin sertliğini, iletkenliğini, kullanım süresini ve ekranlama verimliliğini arttırmaktır. t kalınlıklı, μ_1 manyetik geçirgenlik ve σ_1 iletkenliğe sahip bir metalin; μ_2 manyetik geçirgenliğe ve σ_2 iletkenliğe sahip kalın bir iletken üzerine kaplama olarak uygulandığı bir modelde oluşan yeni kompozit iletkenin yüzey empedansı 4.7'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$Z_s = R_s + j\omega L_{iAC} = R_{s1}(1+j) \left[\frac{\sinh(\gamma_1 t) + \left(\frac{R_{s2}}{R_{s1}} \right) \cosh(\gamma_1 t)}{\cosh(\gamma_1 t) + \left(\frac{R_{s2}}{R_{s1}} \right) \sinh(\gamma_1 t)} \right] \Omega \quad (4.7)$$

$$\gamma_1 = \frac{1+j}{\delta_1} = (1+j) \sqrt{\pi f \mu_1 \sigma_1} \quad (4.8)$$

$$R_{s1} = \frac{1}{\sigma_1 \delta_1} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_1}{\sigma_1}} \quad (4.9)$$

$$R_{s2} = \frac{1}{\sigma_2 \delta_2} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_2}{\sigma_2}} \quad (4.10)$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere empedans değerinin reel ve imajiner kısımları bulunmaktadır. Hesaplamalar yapıldıktan sonra, t kalınlıklı kaplama katmanının yüzey empedansına bağlı bir normalizasyon işlemi yapılmaktadır. Normalizasyon işleminde kalınlığın bir fonksiyonu olarak katmanın et kalınlığı ifadesi de hesaba katılmaktadır.

Üst katmanın gümüş, üzerine kaplama yapılan iletken katman ise bakırdır. Yüzey empedansı ve iç endüktans reaktans direnç değerlerinin kaplamanın t kalınlığına bağlı olduğu görülmektedir. Buna göre $t > 2\delta_1$ olduğu durumda bu iki değer sabit bir değere gelmektedir. Bununla birlikte, iletkenliği daha yüksek olan gümüş katmanın kaplama kalınlığı azaldığında ise et kalınlığına bağlı olarak daha yüksek bir normalize edilmiş yüzey empedans değeri elde edilmektedir. Ancak burada substrat malzemesi olarak kullanılan bakırın gümüşe nazaran daha düşük olan iletkenliği empedans değerini etkilemektedir. Gümüş katmanın kalınlığının, et kalınlığına eşit olduğu ya da büyük olduğu durumda empedans daha düşük değerlere normalize edilebilmektedir.

Kaplanacak malzemenin iletkenliğinin substrat olarak kullanılacak malzemenin iletkenliğinden düşük olduğu durumdaysa, normalize edilmiş empedans değeri düşük bir değerden başlayarak kaplamanın kalınlığı arttıkça, frekansa da bağlı olarak artacaktır. Kaplama malzemesinin et kalınlığına nazaran çok kalın olduğu durumda, yüzey empedansı kaplamanın elektriksel özelliklerine bağlı olmaktadır.

4.3. Kayıplı Ortamların Simülasyonu

Elektromanyetik alan ekranlaması, elektrik alan ve manyetik alan ekranlaması olarak ayrı ayrı ele alınması ve incelenmesi gereken bir konudur. Her iki ekranlamanın da başarılı olması bize tam bir elektromanyetik alan ekranlaması sağlamaktadır. Bu bağlamda teorisi de sunulan bu alanların ekranlama verimliliklerinin bilgisayar simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

İlk simülasyon düzlemsel dalganın kayıplı ortamda zayıflatılmasına ilişkin olarak yazılmış ve incelenmiştir. Teoride, yakın alan ve uzak alan kavramlarıyla ilişkili

olarak bir düzlemsel dalganın EM kaynaktan uzaklaştıkça etkisini kaybetmesi beklenmektedir. Şekil 4.4'te de bu özelliğin sağlandığı görülmektedir. Ortamın karakteristik empedansı arttıkça düzlemsel dalganın gücünü kaybettiği görülmektedir.

Kuramsal bilgiler kısmında daha önce Şekil 2.5'te gösterildiği üzere, ekran yapılarının kayıpları bulunmaktadır. Yansıma, soğurulma ve çoklu yansıma kayıplarının en önemli etkenlerinden biri de ekran yapılarının katmanlarını oluşturan malzemelerin farklı dielektrik özellikleri ve bazen de ekranda bulunan vida, bağlantı yerlerinden kaynaklanan açıklıklardır. Şekil 4.3'te sunulan MATLAB kodları bu sorunların simülasyonlarını sağlamaya yaramaktadır. Şekil 4.4'te sunulan grafikte, 1 GHz'lik düzlemsel dalganın kayıplı ortamda zayıflaması görülmektedir.

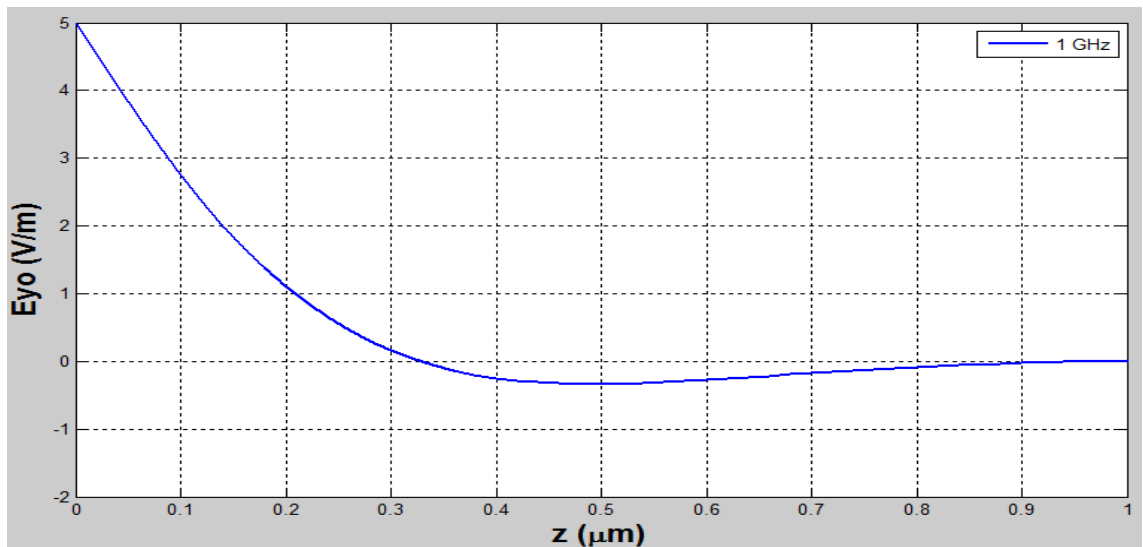
```
% Düzlem Dalganın Kayıplı Ortamda Zayıflatılması
clear; clf;
mu0=4*pi*1e-7;
Ey0=5; %V/m
f=1e9
sigma=5.8e7; %bakırın iletkenliği S/m
sd=1/sqrt(pi*f*mu0*sigma); %deri mesafesi
alpha=1/sd;
beta=alpha;
lambda=2*pi/beta
z=0:0.2e-6:12e-6;
Ey=Ey0.*exp(-alpha.*z).*cos(beta.*z);
plot(10^5*z,Ey);
grid;
xlabel('z (µm)');
ylabel('Eyo (V/m)');
legend('1 GHz');
```

```
%EKRAN AÇIKLIĞINA BAĞLI ZAYIFLAMA
clc;
clear all;

W=input('Açıklı genişliğini giriniz W=); %mm
d=input('Ekran kalınlığını giriniz d=); %mm

f=0.001:100:1000; %MHz
SE=100-20*log10(W)-20*log10(f)+27*(d/W)
grid on;
semilogx(f,SE);
xlabel('f [MHz]');
ylabel('SE [dB]');
```

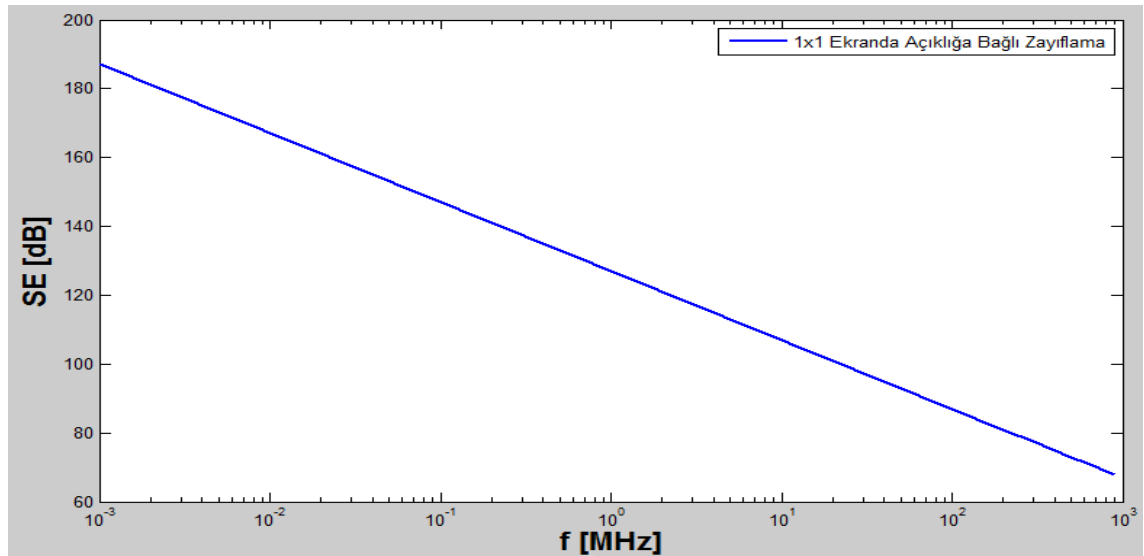
Şekil 4.3. Açıklıkların ekranlamaya etkilerini hesaplayan MATLAB kodu



Şekil 4.4. Düzlemsel dalganın kayıplı ortamda zayıflatılması

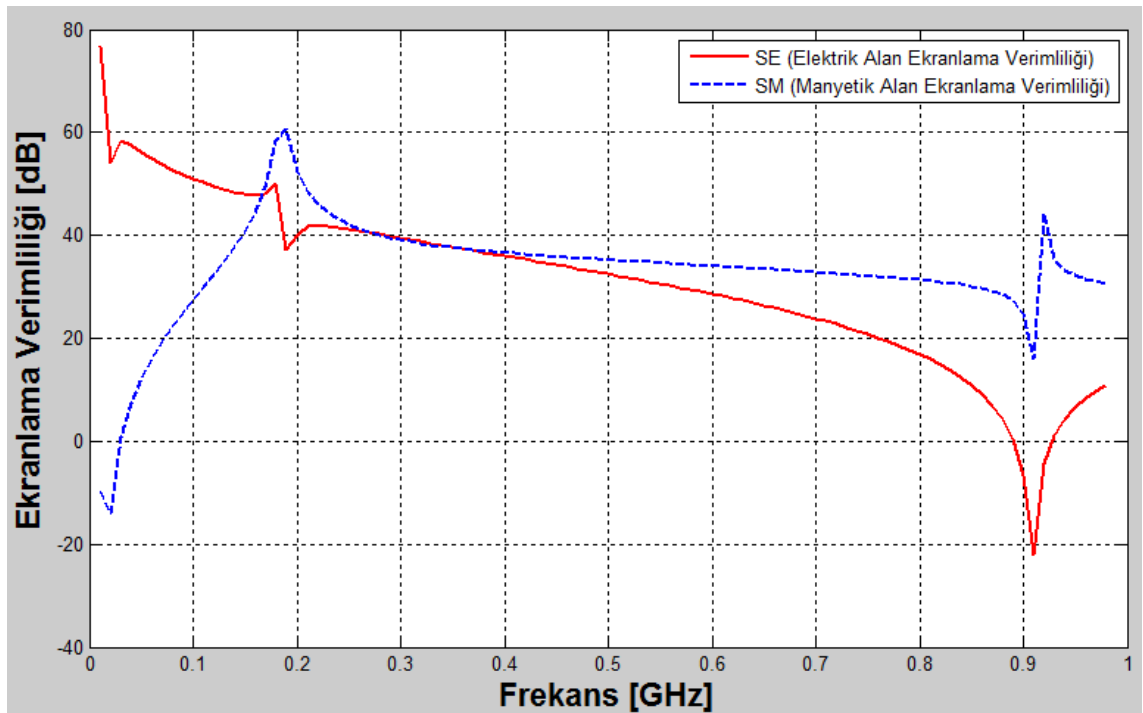
Düzlemsel dalganın özelliği incelendikten sonra her ekran modelinde gözlenebilen açıklık ve bağlantı noktalarından kaynaklanan ekranlama verimliliği azalması konuları incelenmiştir. Bu açıklık ve bağlantı noktaları, ekranların imalatları sırasında sıklıkla karşılaşılan bir problemdir. Dolayısıyla iyi bir elektromanyetik ekranlama yapılmak ve bu bağlamda bir malzeme ya da yöntem geliştirilmek istenirse, bu noktaların ekranlama verimliliğine etkileri dikkatle incelenmeli ve kesinlikle hesaba katılmalıdır. Şekil 4.5 ve 4.6'da bu simülasyonlarla alakalı olarak yazılan MATLAB kodlarının grafikleri görülmektedir. Şekil 4.5'teki grafikte ekranlama verimliliğinin ekranda bir açıklık olması durumunda frekansa bağlı olarak düştüğü gözlenmektedir. Şekil 4.6'da ise açıklığın elektrik alan ve manyetik alan ekranlamasına etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. 0.1-0.2 GHz gibi düşük frekans değerlerinde elektrik alan ekranlamasının manyetik alan ekranlamasına göre daha iyi yapılabildiği gözlenmiştir. Yüksek frekans değerlerinde ise açıklık Elektrik alan ekranlamasını etkilemektedir. Çünkü yüksek frekans değerlerinde dalganın etkinliği artmakta ve açıklık dolayısıyla daha uzak mesafelere ulaşabilmektedir.

Ekranlama verimliliğini düşürebilecek bir diğer etken ise ekran üzerinde bulunan açıklıklardır. Bu açıklığın genişliği ve ekran kalınlığının bilgisayardan girilerek, ekran açıklığına bağlı zayıflamasının modellenmesinin gerçekleştirildiği programın grafiği Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5. Ekran açıklığına bağlı zayıflama

Ekran üzerinde bulunan açıklıkların ekranlama verimliliğine etkilerine önceki bölümlerde değinilmişti. Açıklıkların ekranlama verimliliğine ilişkin etkilerinin incelendiği bir diğer analizde ise (EK-5'te sunulan MATLAB kodunda) 7.5x7.5cm bir açıklığa sahip ekranın 98 farklı frekans değeri için hem EA ekranlaması verimliliği hem de MA ekranlama verimliliği hesaplanmaktadır. Şekil 4.6'da görülen grafik elektrik ve manyetik alan ekranlama verimliliklerinin frekans değerlerine göre durumunu vermektedir. Açıklıkların elektrik alan ekranlamasını yüksek frekans değerlerinde etkilemediği, manyetik alan ekranlamasını ise düşük frekans değerlerinde etkilemediği bildirilmiştir (Başyigit 2010).



Şekil 4.6. Açıklık bulunan ekran üzerinde EA ve MA ekranlama verimliliği

```

iki metal katmanı arasındaki boşluğun, metal ve boşluktaki
dalgaboylarının oranlarının kıyaslaması.

clc;
clear all;

mur0= 4*pi*10^-7; %Boşluğun manyetik geçirgenliği [H/m]
eps0=8.854*10^-12; %Boşluğun elektrik geçirgenliği [F/m]
eta0=sqrt(mur0/eps0);
j=sqrt(-1);
eta=eta0/1000;

x=0:0.01:1;

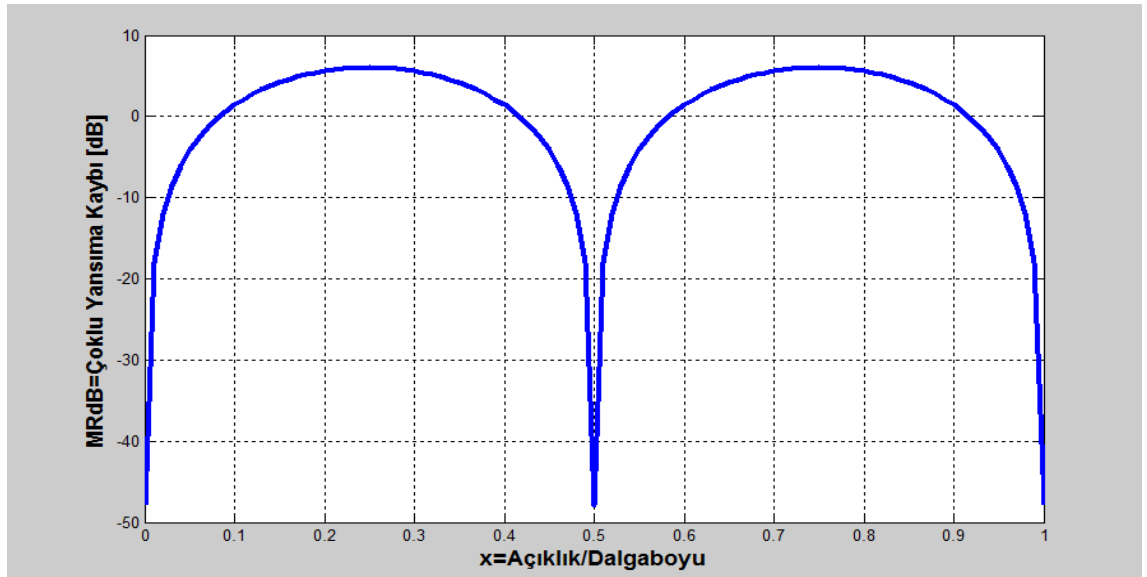
MRdb=20.*log10(abs(1-(1-(4*eta/eta0))*(cos(4*pi*x))-j*sin(4*pi*x))));

plot(x, MRdb,'Linewidth', 3);
hold on;
grid;

ylabel('MRdB=Çoklu Yansımaya Kaybı [dB]','fontsize',14,'fontweight', 'b');
xlabel('x=Açıklık/Dalgaboyu','fontsize',14,'fontweight', 'b');

```

Şekil 4.7. Boşluğun çoklu yansımaya kaybına etkilerini hesaplayan MATLAB kodu



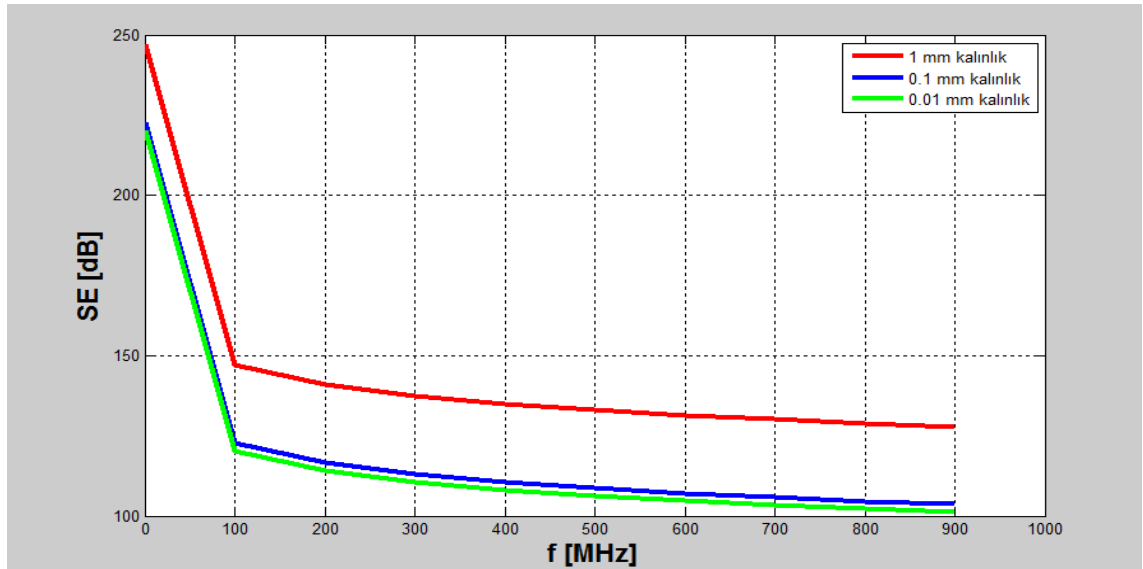
Şekil 4.8. İki metal katmanı arasındaki boşluğun, metal ve boşluktaki dalgaboylarının oranlarının kıyaslanması.

Şekil 4.7'de MATLAB kodu verilmiş ve Şekil 4.8'de analiz grafiği sunulmuş modelde ekran yapısında, katmanlar arasındaki boşluğun ekranlama verimliliğine etkileri incelenmişti. Şekil 4.8'de, rezonans frekans değerlerinde veya bu değerlere yakın frekans değerlerinde, açıklık/dalgaboyu oranının 0.5'in katları olduğu durumlarda;

MR değeri negatif ve oldukça yüksektir. Bu durum toplam ekranlama verimliliğini düşürmektedir. Ancak bu oran 0.25 ve 0.75 olduğunda en iyi MR değeri dolayısıyla da en yüksek ekranlama verimliliği elde edilmektedir.

4.4. Katmanlı Ekran Yapılarının Simülasyonu

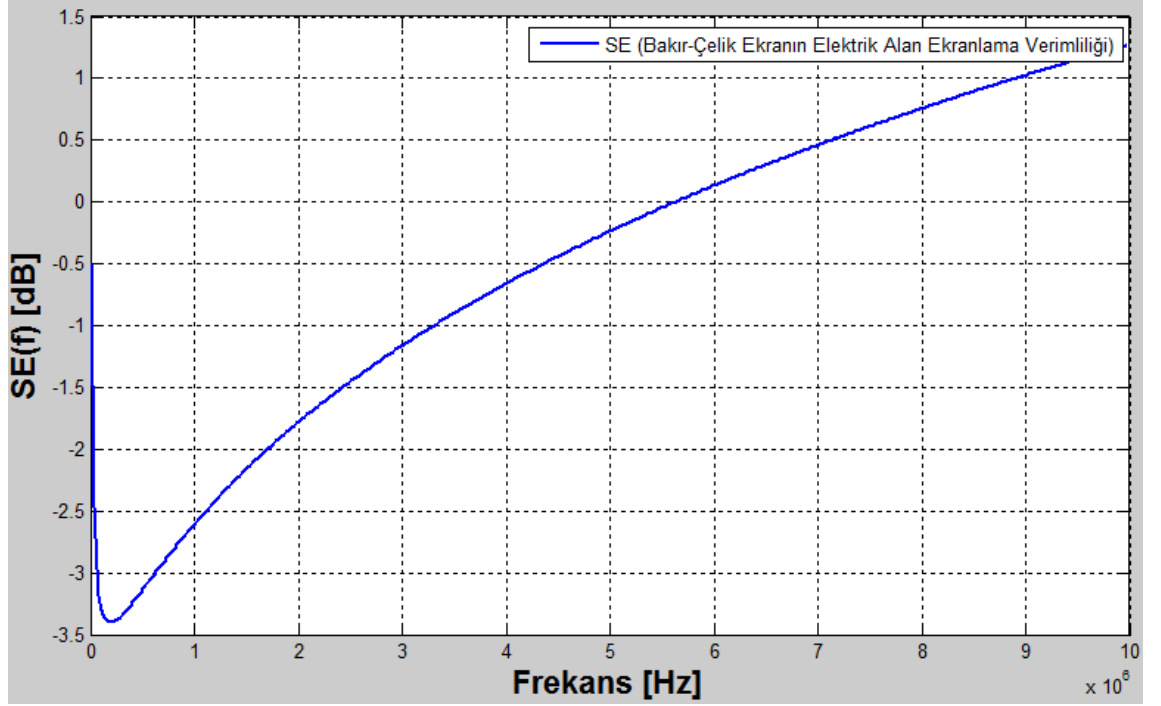
Katmanlı ekran yapılarının simülasyonuna başlarken öncelikle ince ekranlar ve yansıma kaybı ile kalın ekranlar ve soğurulma kaybı incelenmektedir. Şekil 4.9'da görüldüğü üzere malzeme kalınlığı azaldıkça yansıma kaybının azalışı dolayısıyla ekranlama verimliliği de düşmektedir.



Şekil 4.9. İnce ekranlar ve yansıma kaybının incelenmesi

Tezin 2. bölümü olan kuramsal bilgiler ve kaynak taramaları kısmında, 2.19 - 2.26 denklemleri arasında ekranlama verimliliğinin hesabına ilişkin teorik bilgiler bulunmaktadır. Materyal ve metot bölümünde ise 3.10-3.17 denklemleri ile katmanlı ekran yapılarının ekranlama verimliliği hesabının teorisi bildirilmiştir. Bu denklemlerden yola çıkılarak oluşturulmuş, iki katmanlı bir ekran yapısına ait simülasyonun ekranlama verimliliği grafiği Şekil 4.10'daki gibi olmaktadır. Bu MATLAB kodunun yazımında iletkenlik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri bilinen bakır ve çelik malzemeleri seçilmiştir. Ayrıca ekranda bakır ve çelik

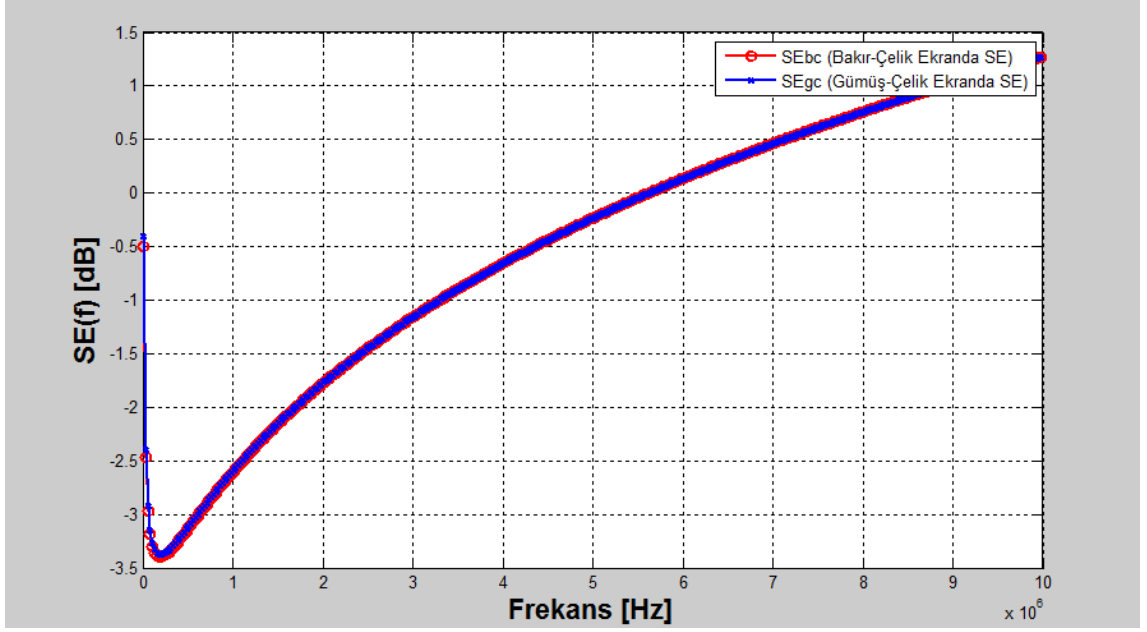
kısımlarının aynı boyutlarda olduğu varsayılmıştır. Ekran genişliği ve malzeme seçimi bu değerlerden farklı da seçilebilmektedir.



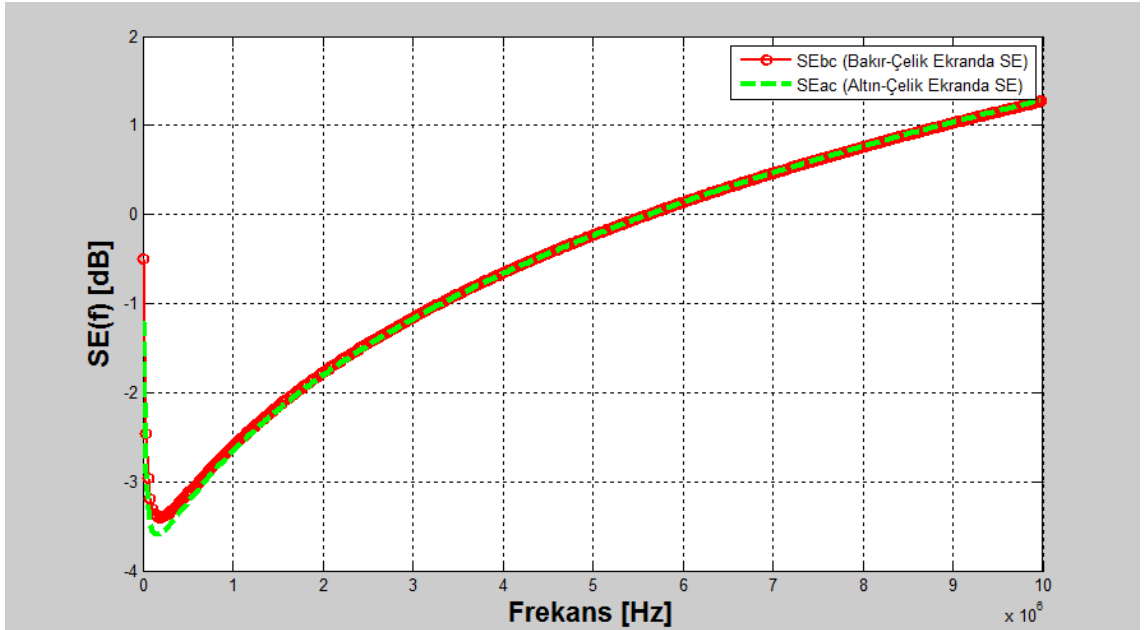
Şekil 4.10. İki katmanlı bakır-çelik ekran modelinin ekranlama verimliliği

Bakır-Çelik katmanlarından oluşan ekran modeli manyetik iletkenlikleri bilinen bu iki malzeme ile oluşturulmuştur. Bakır ve çelik ekran katmanlarının et kalınlığı 100 μm olarak seçilmiştir. Bu değer yaklaşık olarak plazma polimerizasyon işlemi ile yapılacak bir kaplamanın tipik et kalınlığı değerlerindedir. Yaklaşık 0.25 Hz civarında rezonans frekansı değerine denk gelen frekans değerinde ekranlama verimliliği yaklaşık 2.5 dB'lik ani bir düşüş yaşamış ancak frekans değeri arttıkça ekranlama verimliliğinin de arttığı gözlenmiştir.

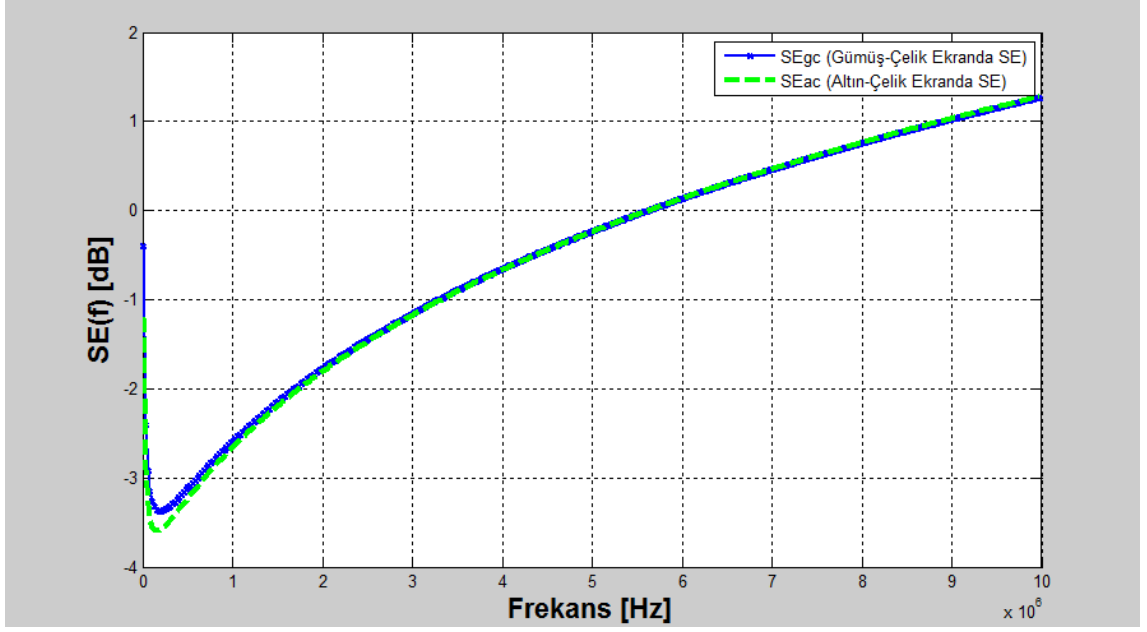
Farklı ekran malzemelerinin istenilen boyutlarda bir araya getirilerek oluşturulan üç farklı ekran modeline ait MATLAB kodunun simülasyon sonuçları Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te sunulmaktadır. Ekranlama verimliliği üç farklı tipteki katlı ekran modeli için frekansa bağlı olarak incelenmektedir.



Şekil 4.11. Bakır-Çelik ve Gümüş-Çelik ekranlarda ekranlama verimliliği



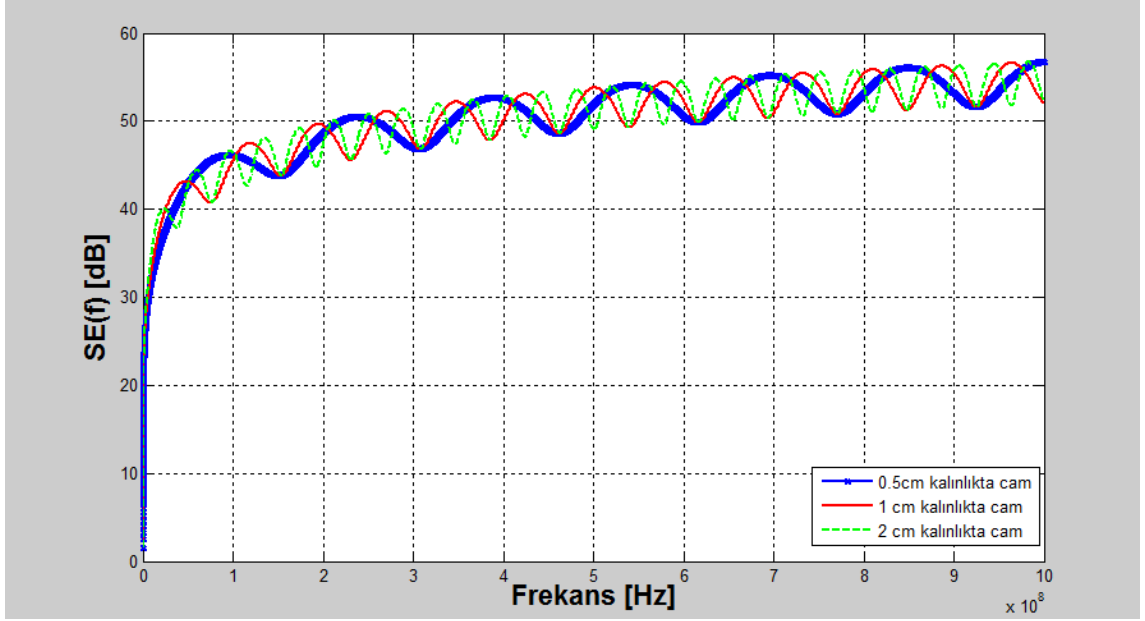
Şekil 4.12. Bakır-Çelik ve Altın-Çelik ekranlarda ekranlama verimliliği



Şekil 4.13. Gümüş-Çelik ve Altın-Çelik ekranlarda ekranlama verimliliği

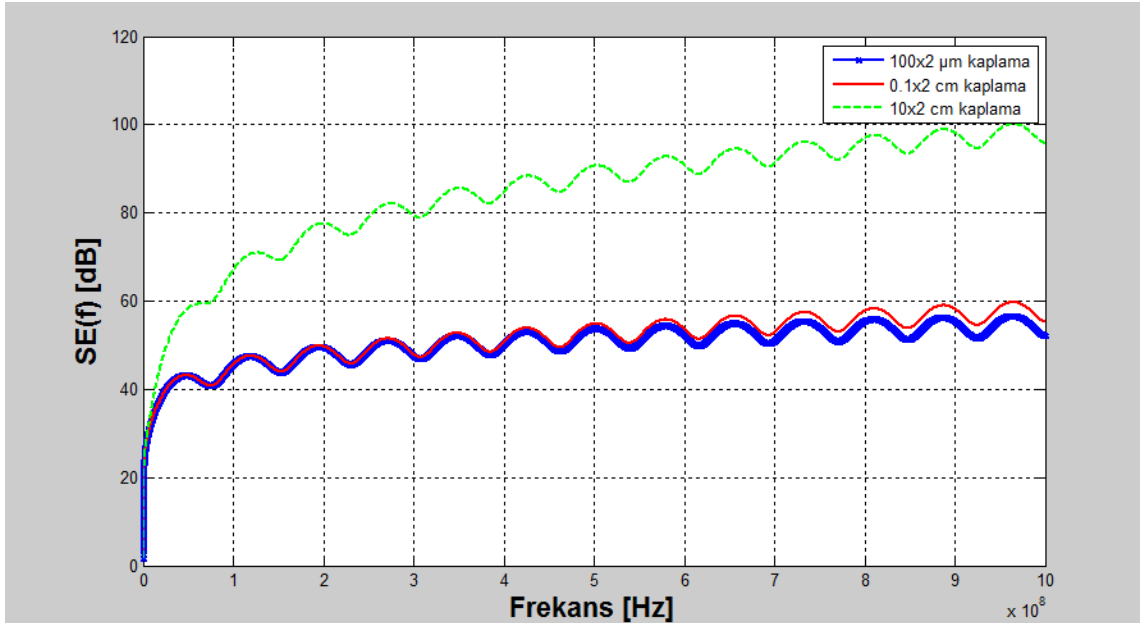
Farklı malzemelerden oluşmuş katlı ekran yapılarının ekranlama verimliliğine ilişkin hesaplama ve karşılaştırma yapan MATLAB kodunun simülasyon sonuçları Şekil 4.11-4.13 arasında sunulmuştur. Çelik bu kaplamalarda baz malzeme yani üzerine kaplama yapılan temel ekran malzemesi (substrat) olarak seçilmiştir. Bunun sebebi, çeliğin bol miktarlarda bulunabilmesi, ucuz ve korozyona dayanıklı olması dolayısıyla cihazların elektromanyetik alanlara karşı ekranlamasında çokça tercih edilmesidir. Buna göre grafikte bakır, gümüş ve altın kaplı 100 μm kalınlığındaki ekranların ekranlama verimlilikleri frekansa karşılık çizdirilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere, bu kalınlıkta kaplama seçilmesinin sebebi, plazma polimerizasyon ile yapılacak bir kaplamaya en yakın modeli kurmaktır. Altın kaplı ekranın çok az bir farkla en iyi ekranlamayı sağladığı grafikte de görülmektedir. Özellikle düşük frekans değerlerinde altın, en iyi elektrik alan ekranlamasını sağlamaktadır.

Bu analizlerden sonra kurulan bir diğer modelde cam substrat malzemesi olarak seçilmiş ve cam üzerine iki katman olarak farklı boyutlarda değişik metallere kaplandığı bir ekran modeli analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'te cam üzerine alüminyum ve nikel kaplanarak oluşturulmuş üç katlı bir ekranın analizi sunulmuştur.



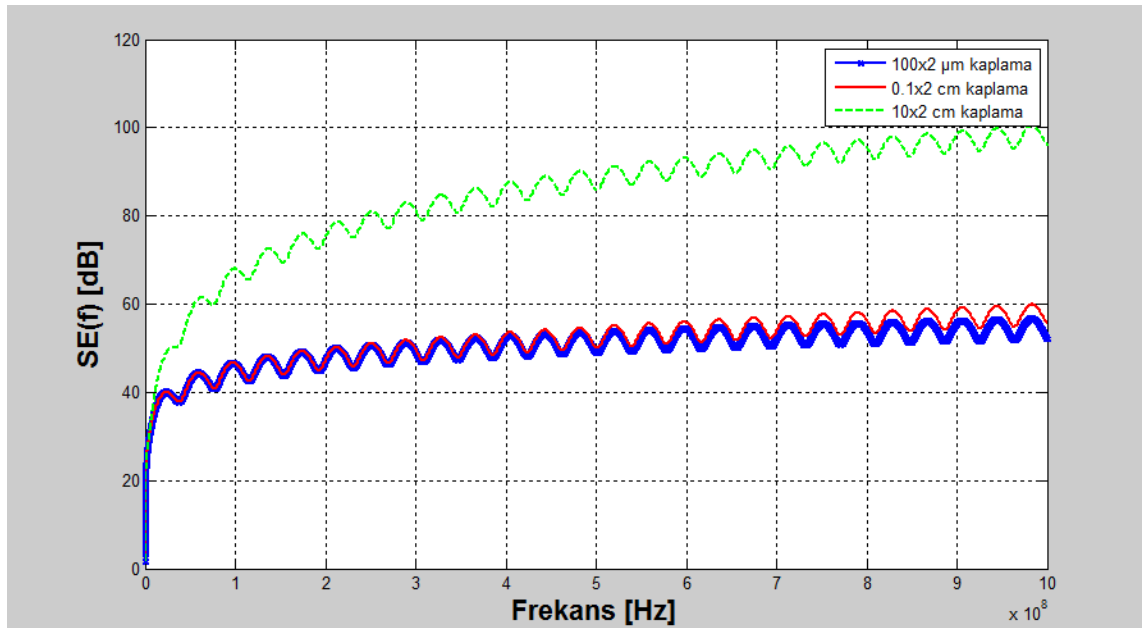
Şekil 4.14. Farklı kalınlıkta cam üzerine Al-Ni kaplamanın ekranlama verimliliği

Şekil 4.14'te substrat kalınlığının ekranlama verimliliğine etkileri incelenmiştir. Katmanlı ekran yapılarının hesaplamaları yapılırken çoklu yansıma hesabı sırasında sinüs ve cosinüslü ifadeler dolayısıyla grafikte salınım gözlenmektedir. Ancak bu salınımdan bağımsız olarak substrat kalınlığının SE'ye etkisi olmadığı gözlenmektedir.



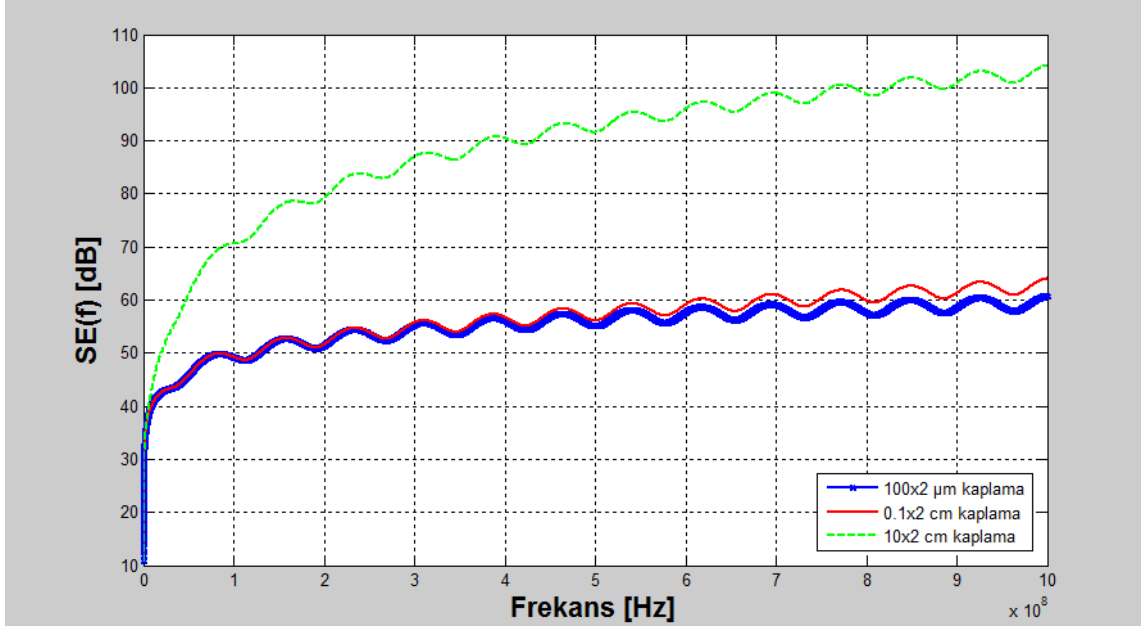
Şekil 4.15. 1 cm cam üzerine farklı kalınlıklarda uygulanmış Al-Ni kaplamanın ekranlama verimliliği

Şekil 4.15'te substrat malzemesi sabit tutulmuş ancak bu sefer de kaplama kalınlıklarının SE'ye etkileri incelenmiştir. Her bir kaplama katı, $100 \mu m$, $0.1 cm$ ve $10 cm$ kalınlıkta olacak şekilde 3 farklı ekranda analizler gerçekleştirilmiştir. Soğurulma kaybı ifadesinin artmasından dolayı katın kalınlığı arttıkça ekranlama verimliliği değeri de artmaktadır. $100 \mu m \times 2$ ve $0.1 cm \times 2$ kaplamalarının olduğu modelde SE yaklaşık 40dB mertebelerindeyken, $10 cm \times 2$ için ekranlama verimliliği ifadesinin tüm frekans değerleri için ortalama 30 dB daha fazla olduğu gözlenmektedir.

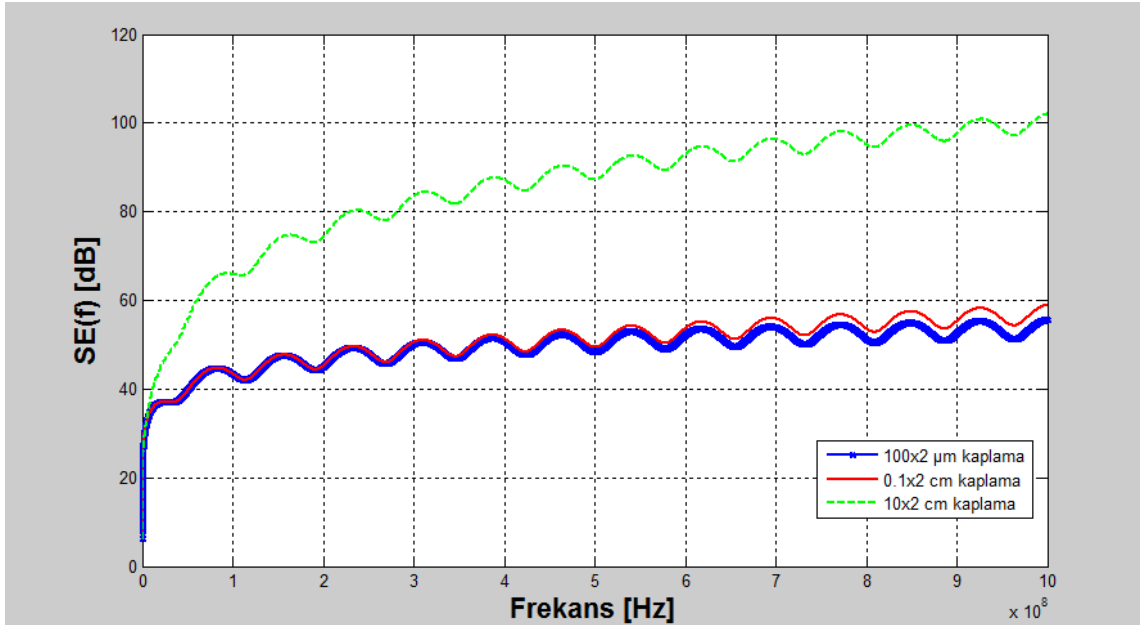


Şekil 4.16. 2 cm cam üzerine farklı kalınlıklarda uygulanmış Al-Ni kaplamasının ekranlama verimliliği

Şekil 4.16'da ise substrat kalınlığının ekranlama verimliliğine etkisi incelenmiştir. Burada; $2 cm$ kalınlıkta seçilmiş substratın üzerine yine her bir kaplama katı, $100 \mu m$, $0.1 cm$ ve $10 cm$ kalınlıkta olacak şekilde 3 farklı ekran yapısı oluşturulmuştur. Şekil 4.15'teki grafikte karşılaştırıldığında ekranlama verimliliği değerlerinde bir fark gözlenmemiştir ve substrat kalınlığının ekranlama verimliliğine etkisi olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.17. Cam üzerine teneke ve kurşun ekran modeli

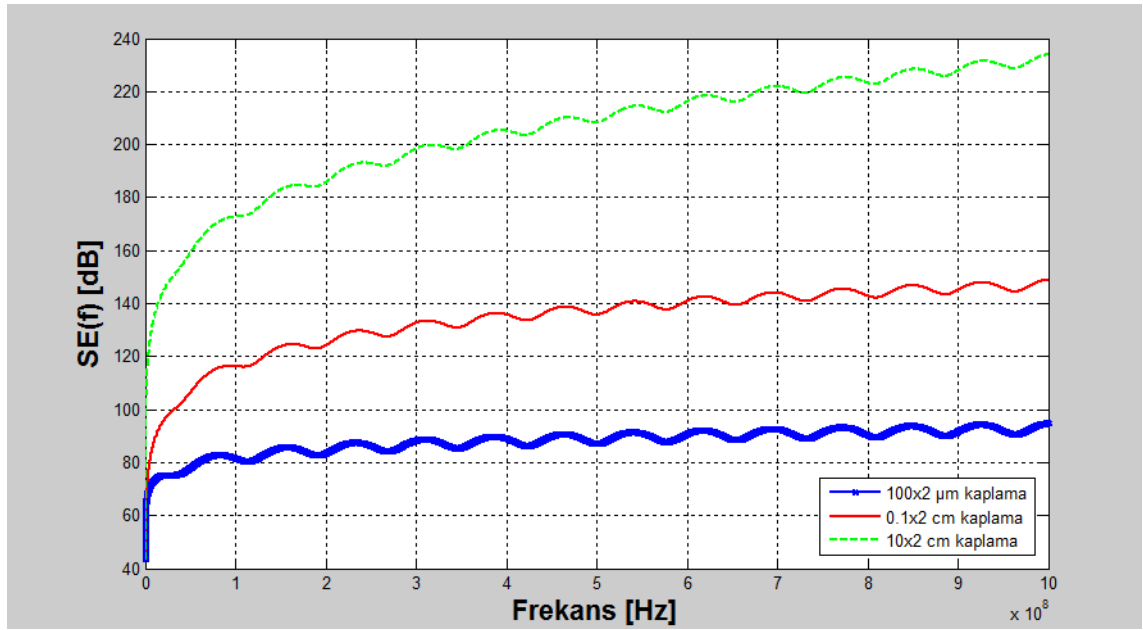


Şekil 4.18. Cam üzerine pirinç ve altın modeli

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de cam substrat malzemesinin kalınlığı 1 cm olacak şekilde sabit tutularak, önce teneke üzerine kurşun kaplanılarak oluşturulmuş ekran modeli daha sonra da pirinç üzerine altın kaplanılan ekran modelleri kurulmuş ve

analizleri sunulmuştur. Kalın kaplamalarla kurulmuş modelde ekranlama verimliliği değeri daha yüksek çıkmış ancak bu iki modelin karşılaştırılması yapıldığında SE analizlerinde büyük bir farka rastlanmamıştır. Örneğin; teneke-kurşun modelinde (100 μm ve 0.1 cm kalınlıkta kaplanmış ekranlarda) 500 MHz'de 55dB'lik bir ekranlama verimliliği değeri kaydedilirken bu değer pirinç-altın modelinde 50dB mertebelerindedir. Bu değerlere göre teneke-kurşun modelinin pirinç-altın modeline göre ufak bir farkla daha iyi ekranlama verimliliği sağladığı söylenebilmektedir.

10 cm kalınlıkta kaplı teneke-kurşun ekran modelinde Şekil 4.17'de görüldüğü üzere 500 MHz'de diğer iki kalınlıktaki kaplamalarla karşılaştırıldığında, ekranlama verimliliği değerinde yaklaşık 40 dB'lik bir artış görülmektedir. Aynı analiz pirinç-altın modeli için (Şekil 4.18) gerçekleştirildiğinde bu artış değeri yaklaşık 30dB olarak görülmektedir. Teneke-kurşun modelinin pirinç-altın modelinden daha iyi ekranlama verimliliği sağladığının bir diğer kanıtı da bu kalınlıktaki kaplama sonuçlarıdır.



Şekil 4.19. Cam üzerine çelik ve paslanmaz çelik ekran modeli

Şekil 4.19'daki grafikte ise dördüncü modelin analiz sonucu görülmektedir. Bu modelde de cam üzerine çelik ve paslanmaz çelik kaplama katlarıyla oluşturulmuş 3 katlı ekran modeli görülmektedir. Çelik ve paslanmaz çelik ile kurulan modelin analiz sonuçları göstermiştir ki bu iki malzeme ile kurulan model en iyi ekranlama

verimliliğini sağlamaktadır. Diğer modellerdeki analiz sonuçlarıyla benzer şekilde kalın kaplamalı ekran modelinin ekranlama verimliliği, diğer ince kaplamalı modellerin ekranlama verimliliği değerlerinden daha iyi çıkmaktadır. Ancak plazma polimerizasyon ile gerçekleştirilecek bir ekranda tipik 100 μm mertebelerindeki kalınlıklar karşılaştırıldığında en iyi model olduğu gözlenmektedir. Çelik-paslanmaz çelik modeli Al-Ni, teneke-kurşun ve pirinç-altın modelleri ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak iki kat daha iyi ekranlama verimliliği sağlamaktadır.

5. SONUÇ

Ekranlama verimliliği konusu incelenirken özellikle dikkat edilmesi gereken iki husus, ekran üzerindeki açıklıkların verimlilik üzerine etkileri ve ekran malzemesinin verimlilik üzerine etkileri olmaktadır. Bu bağlamda yürütülen tez çalışması ekran malzemesinin verimlilik üzerine etkileri konusunda olmaktadır. Yapılan modelleme ve simülasyonlar göstermiştir ki, ekran kaplaması olarak seçilen malzemenin iletkenliği özellikle düşük frekanslarda elektrik alan ekranlaması konusunda önem arz etmektedir. Bununla birlikte yüksek frekans değerlerinde elektrik alan ekranlaması konusunda daha farklı çalışmalar yapma gereksinimi bulunmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmalara ilişkin sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Düzlemsel dalgaların yayılması ve ortamda zayıflatılması konusundan başlanılarak, ekranlama teorisinin ışığında katmanlı ekranlar ve kaplanmış katlı ekran yapılarında SE analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler gerçekleştirilirken ekran katmanının et kalınlığının yansıma, soğurulma ve çoklu yansıma kaybına etkileri incelenmiştir. Et kalınlığı değerinin artması daha kalın ekran katmanı kullanmayı gerektirirken, kalın katmanında soğurulma kaybını artırması dolayısıyla toplam ekranlama verimliliğini arttırdığı gözlenmiştir. İnce katmanlar içinse yansıma kaybının toplam ekranlama verimliliğine direk etkisi olduğu belirlenmiştir.

Kayıplı ortamların ve ekran üzerindeki açıklıklarının ekranlama verimliliğine etkileri incelendiğinde, kayıplı ortamlarda ortamın zayıflatma etkisi dolayısıyla düzlemsel dalga zayıflamaya uğradığından ekranlama daha güçsüz bir dalgaya karşı yapılmaktadır. Bunun dışında ekran üzerindeki açıklıkların ekranlama verimliliğine etkileri incelenirken, ekran açıklığının artmasının ekranlama verimliliğini düşürdüğü gözlenmiştir. $1 \times 1 \text{ cm}$ açıklık olan ekranda SE değeri 60 dB iken, $7.5 \times 7.5 \text{ cm}$ açıklık olan ekranda 20 dB olarak kaydedilmiştir. Açıklığın dalga boyuna oranı ise rezonans frekansına bağlı olarak çoklu yansıma kaybını düşürmüş ya da arttırmış bu sayede ekranlama verimliliğini doğrudan etkilemiştir.

Ekranlama yaparken seçilen malzemenin ekranlama verimliliğine etkileri konusu da incelenmiştir. Malzemenin karakteristik özelliklerinden kaynaklanan et kalınlığı

ifadesinin dışında, elektriksel özelliklerinden kaynaklanan yüzey empedansının ekranlama verimliliğine etkileri de incelenmiştir. Frekans arttıkça sabit bir yüzey empedans değeri(5Ω) için; yansıma kaybı ifadesi yaklaşık 150 dB 'den 80 dB değerlerine düşerken, çoklu yansıma kaybı -100 dB 'den -50 dB mertebelerine çıkmıştır. Toplam ekranlama verimliliği ifadesi yüzey empedansının bir fonksiyonu şeklinde yazıldığında 1Ω için 46 dB , 5Ω için 32 dB (bu değer yukarıda verilen $80\text{ dB} + (-50\text{ dB})$ değerinden de sağlanmaktadır) ve 20Ω için 20 dB olarak bulunmuştur.

İki ve üç katmanlı ekran modelleri için ekranlama verimliliği analizleri gerçekleştirilmiştir. İki katmanlı modellerde metal-metal modellerin analizleri yapılırken 3 katlı modellerde cam üzerine iki ayrı metal kaplaması yapılarak gerçekleştirilmiş modellerin analizleri gerçekleştirilmiştir. İki katlı ekran modellerinde, rezonans frekansı 0.25 Hz değerinde 2.5 dB 'lik bir düşüş kaydedilmiştir. Bu düşüş tüm iki katlı metal-metal modelleri için kaydedilmiştir. 3 katlı modellerde ise daha yüksek frekans değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Üç farklı kalınlıkta kaplamalar ile oluşturulmuş modellerin analizinde $100\ \mu\text{m}$ ve 0.1 cm kalınlıkların ekranlama verimlilikleri birbirine yakın değerler çıkarken, 10 cm kalınlığında ekran için bu değer ortalama $30-40\text{ dB}$ daha yüksek çıkmıştır. Teneke-kurşun, pirin-altın ve çelik-paslanmaz çelik modellerinden çelik-paslanmaz çelik metallerle kurulmuş ekranda, ince kaplamalarda diğer modeller için $30-40\text{ dB}$ civarında olan ekranlama verimliliği değeri $80-90\text{ dB}$ değerlerinde gerçekleşmiştir.

Geleneksel ekranlama malzemelerinin dışına çıkılarak, polimerik yapılı ekran malzemelerinin ekranlama verimliliğinin araştırılması için bu tip kaplamalar yapılmalı ve bu tip kaplamaların ekranlama verimliliğindeki etkileri daha ayrıntılı araştırılmalıdır. Çünkü nanoteknoloji kullanılarak üretilen bu tip malzemeler ile ilgili literatürde çok bilgi bulunmamaktadır. Ayrıca nanoteknoloji kullanılarak üretilen tüm maddeler gibi, bu maddelerinde mikro boyuttaki özelliklerinden farklı özellikleri olacağı ve bu özelliklerin ekranlama verimliliği konusuna etkileri olacağı şüphesizdir. Bu bağlamda yazılan MATLAB kodlarının mikro boyutlardaki kaplamalar için hesaplamalar yapabildiği ancak daha ileri hesaplamalar için bir ön ayak oluşturduğu bilinmektedir.

6. KAYNAKLAR

- ARI, N. ve ÖZEN, Ş. 2008. Elektromanyetik Uyumluluk (EMU). Kitap: H. İ. Somyürek (Editör), Elektromanyetik Uyumluluk, Palme Yayıncılık, s. 1-4, Ankara.
- BAŞYİĞİT, B. 2010. Elektromanyetik Ekran Verimliliğinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- BRZEZINSKI, S., RYBICKI, T., MALINOWSKA, G., KARBOWNIK, I., RYBICKI E. and SZUGAJEW L. 2009. Effectiveness of Shielding Electromagnetic Radiation, and Assumptions for Designing the Multilayer Structures of Textile Shielding Materials. *FIBERS & TEXTILES in Eastern Europe*, 17: 60-65.
- COKELILER, D., GOKTAS, H., TOSUN P. D. and MUTLU, S. 2010. Infection Free Titanium Alloys By Stable Thiol Based Nanocoatigs. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 10, 4: 2583-2589.
- DICHEN, L. and SUQIAO, D. 2000. The Study of Metal Meshes on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness. *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*. 326-332.
- GREEN, M. K. 2000. Plasma Parameters. In: Effects of Radius, Microwave Power and Gas Flow on the Electronic Excitation Temperature in an Atmospheric Pressure Microwave Plasma Torch. *Un-published report*. Plasma Science and Fusion Center Massachusetts Institute of Technology. pp. 21-25.
- HAWTHORNE, E. I. 1954. Electromagnetic Shielding with Transparent Coated Glass. *Proceedings of the I-R-E*: 548-553.
- HSEUH, H., BLASKIEWICZ, M., HE, P., LEE, Y. Y., PAI, C., TODD, R., WANG, L., WEI, J., WEISS, D., BNL, HENDERSON and S., ORNL. 2005. Physical and Electromagnetic Properties of Customized Coatings for SNS Injection Ceramic Chambers and Extraction Ferrite Kickers. *Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference*: 3028-3030.
- KAISER, K. 2005. EMI Sources. In: *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, pp. 1-3, New York.
- KIR, E., OKSUZ, L., HELHEL, S. 2006. Preparation of poly(2-chloroaniline) membrane and plasma surface modification. *Applied Surface Science* 252, 10: 2574-2579.
- KOBAYASHI, A. 2000. Formation of TiN coatings by a gas tunnel type plasma reactive spraying. *Surface and Coatings Technology* 132, (2-3): 152-157
- KODALI, P. V. 2001. Plane Waves. In: *Engineering Electromagnetic Compatibility*, John Wiley & Sons Inc., New York.

- KOSTYUK, G. I., VOLIAK, E. A. 2002. Design Features of Parts and High-Performance Cutting Tool With Multi-Layer Plasma Ion Coatings. *XXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*: 257-260.
- LI, P., SHAN, Y., DENG, J. and XIJIANG Y. 2010. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon-Nanotubes Based Coatings. *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*: 969-972.
- MEHDIPOUR, A., TRUEMAN, C. W., SEBAK, A. R., ROSCA, I. D. and HOA, S.V. Shielding Effectiveness Analysis of Multilayer Carbon-Fiber Composite Materials, (unpublished), Kanada
- ONARAN, K. 2003. Kompozit Malzemeler. Kitap: Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, s.362-367, İstanbul.
- POZAR, D. M. 1998. Maxwell's Equations. In: *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons Inc., pp. 13-26, New York.
- RATNER, B. D., HOFFMAN, A. S., SCHOEN, F. J. 2004. Biofilms, Biomaterials and Device-related Infections. In: *An Introduction to Materials in Medicine*, pp.345-355, California.
- SAADI, H. and OUSSAID, R. 2007. Materials Effect on Shielding Effectiveness. *2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications*: 999-1002.
- SHINAGAWA, S., KUMAGAI, Y., UMEHARA, H. and JENVANITPANJAKUL, P. 1999. Conductive Papers for Electromagnetic Shielding. *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility '99*: 372-375.
- ZHANG, X., MAO, Q., WANG, Q., GE, K. and ZHOU, M. 2002. Study of Metallic Modification on the Surface of Synthetic Fibre with High Shielding Effectiveness. *IEEE*:599-604.

7. EKLER

EK-1

Düzlemsel dalganın kayıplı ortamda zayıflatılması ile ilgili MATLAB kodu.

% Düzlem Dalganın Kayıplı Ortamda Zayıflatılması

```
clear; clf;
mu0=4*pi*1e-7;
Ey0=5; % V/m
f=1e9
sigma=5.8e7; %bakırın iletkenliği S/m
sd=1/sqrt(pi*f*mu0*sigma); %deri mesafesi
alpha=1/sd;
beta=alpha;
lambda=2*pi/beta
z=0:0.2e-6:12e-6;
Ey=Ey0.*exp(-alpha.*z).*cos(beta.*z);
plot(10^5*z,Ey);
grid;
xlabel('z (\mum)');
ylabel('Eyo (V/m)');
legend('1 GHz');
axis([0 1 -2 5])
```

EK-2

Manyetik alan ekranlaması için ekranın ideal et kalınlığının hesabını yapan MATLAB kodu.

% Manyetik Alan Ekranlaması İçin İdeal Ekran Kalınlığı

%Elektromanyetik kaynağın yakın mı uzak alanda mı olduğunun tespiti

```
mur =1;
sigmar=0.61;
c=3*10^8;
f=10010^3;
lambda=c/f;
r=7;
if(r<(lambda/2*pi))
    r=1;

else
    r=0;
```

% Ekranlama verimliliği hesabı

```
H1=input ('İlk Manyetik Alan değerini giriniz', 'n');
H2=input ('İkinci Manyetik Alan değerini giriniz', 'n');
SE=20*log10(H1/H2);
```

%Manyetik alan için çoklu yansıma kaybı

```
SRH=14.6+10log10(f*r^2*sigmar*mur^-1);
```

%Soğurulma kaybı

```
SE=SA+SRH;
SA=SE-SRH;
```

%MA ekranlaması için ekranın ideal et kalınlığı hesabı;

```
d=SA/(131.8*sqrt(f*mur*sigmar));
```

EK-3

Katmanlı ekran yapılarını ekranlama verimliliği hesabını yapmaya yarayan MATLAB kodu.

% İKİ KATMANLI BAKIR_ÇELİK EKTRAN

```
clc;
clear all;
```

```
f=10000:25000:10000000; %Frekans [Hz]
mur0= 4*pi*10^-7; %Boşluğun manyetik geçirgenliği [H/m]
eps0=8.854*10^-12; %Boşluğun elektrik geçirgenliği [F/m]
sigma0=5.8*10^-7; %Bakırın iletkenlik sabiti [S/m]
mur1=1; %Birinci ekranın manyetik geçirgenlik sabiti
sigmar1=1; %Birinci ekranın iletkenlik sabiti
mur2=500; %İkinci ekranın manyetik geçirgenlik sabiti
sigmar2=0.1; %İkinci ekranın iletkenlik sabiti
z0=377; %Boşluk empedansı [ohm]
d1=100*10^-6; %Bakır ekran kısmının kalınlığı
d2=100*10^-6; %Çelik ekran kısmının kalınlığı
```

```
sd1=1./sqrt(pi*mur1*mur0*sigmar1*sigma0.*f); %Deri derinliği
sd2=1./sqrt(pi*mur2*mur0*sigmar2*sigma0.*f); %Deri derinliği
```

%Bakırın ortam empedansı

```
Z1=sqrt((2*pi*mur1*mur0.*f)/(2*sigmar1*sigma0)).*(1+j);
```

%Çeliğin ortam empedansı

```
Z2=sqrt((2*pi*mur2*mur0.*f)/(2*sigmar2*sigma0)).*(1+j);
```

%Yansımaya 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));
```

%Soğurulma Ekran Kaybı [dB]

```
A=8.69.*((d1./sd1)+(d2./sd2));
```

%Çoklu Yansımaya Kayıpları [dB]

```
K1=z0.*cosh((1./sd2+j*1./sd2).*d2);
K2=Z2.*sinh((1./sd2+j*1./sd2).*d2);
K3=Z2.*cosh((1./sd2+j*1./sd2).*d2);
K4=z0.*sinh((1./sd2+j*1./sd2).*d2);
Zin2=Z2*((K1+K2)/(K3+K4));
MR1=20.*log10(abs(1-((Z1-z0)/(Z1+z0)).*((Z1-Zin2)/(Z1+Zin2)).*exp(-2*(1./sd1+j*1./sd1).*d1)));
MR2=20.*log10(abs(1-((Z2-Z1)/(Z2+Z1)).*((Z2-z0)/(Z2+z0)).*exp(-2*(1./sd2+j*1./sd2).*d2)));
```



```
%Toplam Ekran Zayıflatması  
SE=R+A+MR1+MR2;  
plot (f, SE);  
xlabel('frekans [Hz]');  
ylabel('SE(f) [dB]');
```

EK-4

7.5x7.5cm'lik açıklık bulunan ekranda elektrik alan ve manyetik alan ekranlama verimliliği hesaplamasını yapan MATLAB kodu.

% Açıklığı bulunan bir alüminyum kutunun ekranlama verimliliği teorik çözümü

clc;

clear all;

w1=0.075; %Açıklık eni [m]

l1=0.075; %Açıklık boyu [m]

a=0.80; %Kutu boyu [m]

b=0.16; %Kutu eni [m]

d=0.16; %Kutu derinliği [m]

t=0.00001; %Kutu kalınlığı [m]

p=0.08; %Kurban sistemin ön yüzeydeki açıklığa uzaklığı [m]

V0=1; %Kaynak gerilimi [V]

Z0=377 %Kaynak empedansı [ohm]

f=0:0.01:0.98; %Değişken frekans değerleri

We1=w1-((5*t)/(4*pi))*(1+log(4*pi*w1/t));

%İletim hattının etkin en boyutu

m1=sqrt(sqrt(1-(We1/b)^2));

Zih=120*(pi^2)*(log(2*(1+m1)/(1-m1)))^-1; %İletim hattının empedansı

dboy=0.3./f; %98 farklı frekans değeri için dalga boyu hesabı

k0=(2*pi)/dboy; %sabit

Za1=(1/2)*(l1/a)*i*Zih*tan(k0.*(l1/2)); %Açıklığın karakteristik empedansı

V11=(V0.*Za1)/(Z0+Za1); %Esdeğer gerilim

Z11=(Z0.*Za1)/(Z0+Za1); %Kaynak empedansı

Zg=Z0./(sqrt(1-(dboy./(2*a)).^2));

%Dalga kılavuzunun karakteristik empedansı

Kg=k0./(sqrt(1-(dboy./(2*a)).^2)); %Dalga kılavuzunun yayılım sabiti

V21=V11./(cos(Kg*p)+i*(Z11./Zg).*sin(Kg*p)); %Eşdeğer gerilim

Z21=(Z11+(i*Zg.*tan(Kg*p)))/(1+i*(Z11./Zg).*tan(Kg*p));

%Kaynak empedansı

Z31=i*Zg.*tan(Kg*(d-p)); %Yük empedansı

Vp1=(V21.*Z31)/(Z21+Z31); % Açıklıklı ekranla kurban sistemin gerilimi (P noktası)

Ip1=V21/(Z21+Z31); %Açıklıklı ekranla kurban sistemin akımı (P noktası)

Vpr1=V0/2; %P noktasındaki referans gerilim-ekran yokken

Ipr1=V0/(2*Z0); %P noktasındaki referans akım değeri

SE1=-20*log10(abs(2*(Vp1./V0))); %Elektrik alan ekranlama verimliliği

SM1=-20*log10(abs(2*Ip1.*(Z0/V0))); % Manyetik alan ekranlama verimliliği

figure;

x=f;

plot(x, SE1, 'r', 'LineWidth',3);

```
hold on;  
plot(x, SM1, 'b--', 'LineWidth',3);  
h=legend('SE (Elektrik Alan Ekranlama Verimliliği)', 'SM (Manyetik Alan Ekranlama  
Verimliliği)');  
grid;  
xlabel('Frekans [GHz]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');  
ylabel('Ekranlama Verimliliği [dB]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
```

EK-5

Çelik üzerine bakır, gümüş ve altın kaplamaların ekranlama verimliliklerini hesaplayan MATLAB kodu.

**% İKİ KATMANLI BAKIR_ÇELİK, GÜMÜŞ_ÇELİK VE ALTIN_ÇELİK
EKRANLARDA
% EKRANLAMA VERİMLİLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

clc;
clear all;

f=10000:25000:5000000; %Frekans [Hz]
mur0= 4*pi*10^-7; %Boşluğun manyetik geçirgenliği [H/m]
eps0=8.854*10^-12; %Boşluğun elektrik geçirgenliği [F/m]
sigma0=5.8*10^-7; %Bakırın iletkenlik sabiti [S/m]
mur1=1; %Bakır ekranın manyetik geçirgenlik sabiti
sigmar1=1; %Bakır ekranın iletkenlik sabiti
mur2=500; %Çelik ekranın manyetik geçirgenlik sabiti
sigmar2=0.1; %Çelik ekranın iletkenlik sabiti
mur3=1; %Gümüş ekranın manyetik geçirgenlik sabiti
sigmar3=1.05; %Gümüş ekranın iletkenlik sabiti
mur4=1;%Altın ekranın manyetik geçirgenlik sabiti
sigmar4=0.7; %Altın ekranın iletkenlik sabiti

z0=377; %Boşluk empedansı [ohm]
d1=100*10^-6; %Bakır ekran kısmının kalınlığı
d2=100*10^-6; %Çelik ekran kısmının kalınlığı
d3=100*10^-6; %Gümüş ekran kısmının kalınlığı
d4=100*10^-6; %Altın ekran kısmının kalınlığı

sd1=1./sqrt(pi*mur1*mur0*sigmar1*sigma0.*f); % Cu Deri derinliği
sd2=1./sqrt(pi*mur2*mur0*sigmar2*sigma0.*f); % 430 Deri derinliği
sd3=1./sqrt(pi*mur3*mur0*sigmar3*sigma0.*f); % Ag Deri derinliği
sd4=1./sqrt(pi*mur4*mur0*sigmar4*sigma0.*f); % Au Deri derinliği

%Bakırın ortam empedansı
Z1=sqrt((2*pi*mur1*mur0.*f)/(2*sigmar1*sigma0)).*(1+j);

%Çeliğin ortam empedansı
Z2=sqrt((2*pi*mur2*mur0.*f)/(2*sigmar2*sigma0)).*(1+j);

%Gümüşün ortam empedansı
Z3=sqrt((2*pi*mur3*mur0.*f)/(2*sigmar3*sigma0)).*(1+j);

%Altının ortam empedansı
Z4=sqrt((2*pi*mur4*mur0.*f)/(2*sigmar4*sigma0)).*(1+j);

%Yansıma Kaybı [dB]

SRbc=20.*log10(0.5*abs(1+Z1./z0))+20.*log10(0.5*abs(1+Z2./Z1))+20.*log10(0.5*abs(1+z0./Z2)); **%Bakır_çelik kaplamanın yansıma kaybı**

SRgc=20.*log10(0.5*abs(1+Z3./z0))+20.*log10(0.5*abs(1+Z2./Z3))+20.*log10(0.5*abs(1+z0./Z2)); **%Gümüş_çelik kaplamanın yansıma kaybı**

SRac=20.*log10(0.5*abs(1+Z4./z0))+20.*log10(0.5*abs(1+Z2./Z4))+20.*log10(0.5*abs(1+z0./Z2)); **%Altın_çelik kaplamanın yansıma kaybı**

%Soğurulma Ekran Kaybı [dB]

Abc=8.69.*((d1./sd1)+(d2./sd2)); **%Bakır_çelik ekranın soğurulma kaybı**

Agc=8.69.*((d3./sd3)+(d2./sd2)); **%Gümüş_çelik ekranın soğurulma kaybı**

Aac=8.69.*((d4./sd4)+(d2./sd2)); **%Altın_çelik ekranın soğurulma kaybı**

%Çoklu Yansıma Kayıpları [dB] -Bakır_çelik ekranda-

K1=z0.*cosh((1./sd2+j*1./sd2).*d2);

K2=Z2.*sinh((1./sd2+j*1./sd2).*d2);

K3=Z2.*cosh((1./sd2+j*1./sd2).*d2);

K4=z0.*sinh((1./sd2+j*1./sd2).*d2);

Zin2=Z2*((K1+K2)/(K3+K4));

MR1=20.*log10(abs(1-((Z1-z0)/(Z1+z0)).*((Z1-Zin2)/(Z1+Zin2)).*exp(-2*(1./sd1+j*1./sd1).*d1)));

MR2=20.*log10(abs(1-((Z2-Z1)/(Z2+Z1)).*((Z2-z0)/(Z2+z0)).*exp(-2*(1./sd2+j*1./sd2).*d2)));

%Çoklu Yansıma Kayıpları [dB] -Gümüş_çelik ekranda-

% Çelik kısım üzerine kaplama yapılan katman olduğundan

%Zin2 hep aynı değer olacaktır

MR3=20.*log10(abs(1-((Z3-z0)/(Z3+z0)).*((Z3-Zin2)/(Z3+Zin2)).*exp(-2*(1./sd3+j*1./sd3).*d3)));

MR4=20.*log10(abs(1-((Z2-Z3)/(Z2+Z3)).*((Z2-z0)/(Z2+z0)).*exp(-2*(1./sd2+j*1./sd2).*d2)));

%Çoklu Yansıma Kayıpları [dB] -Altın_çelik ekranda-

MR5=20.*log10(abs(1-((Z4-z0)/(Z4+z0)).*((Z4-Zin2)/(Z4+Zin2)).*exp(-2*(1./sd4+j*1./sd4).*d4)));

MR6=20.*log10(abs(1-((Z2-Z4)/(Z2+Z4)).*((Z2-z0)/(Z2+z0)).*exp(-2*(1./sd2+j*1./sd2).*d2)));

%Toplam Ekran Zayıflatması

SEbc=SRbc+Abc+MR1+MR2; **%Bakır_çelik ekranda toplam zayıflama**

SEgc=SRgc+Agc+MR3+MR4; **%Gümüş_çelik ekranda toplam zayıflama**

SEac=SRac+Aac+MR5+MR6; **%Altın_çelik ekranda toplam zayıflama**

plot(f, SEbc, 'r', 'Linewidth', 2);

hold on;

plot(f, SEgc, 'b', 'Linewidth', 2);

```
hold on;  
plot (f, SEac, 'g', 'Linewidth', 2);  
  
h=legend('SEbc (Bakır-Çelik Ekranda SE)', 'SEgc (Gümüş-Çelik Ekranda SE)', 'SEac  
(Altın-Çelik Ekranda SE)');  
grid;  
  
xlabel('Frekans [Hz]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');  
ylabel('SE(f) [dB]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
```

EK-6

İletkenlik sabitleri belli olan gümüş, bakır ve alüminyum metallerinin et kalınlığı analizini yapan MATLAB kodu.

%Ekran Et Kalınlığı

```
mu0=4*pi*10^-7;
sig0=5.8*10^7;
sigag=1.09;
sigcu=1;
sigal=0.5;
f=1000:1000:1000000;
sdag(f)=1./sqrt(pi.*f*mu0*sig0*sigag);
sdcu(f)=1./sqrt(pi.*f*mu0*sig0*sigcu);
sdal(f)=1./sqrt(pi.*f*mu0*sig0*sigal);

subplot(2,2,[1 3]);
plot(f, sdag(f), 'r', 'Linewidth', 3);
hold on;
plot(f, sdcu(f), 'b', 'Linewidth', 3);
hold on;
plot(f, sdal(f), 'g', 'Linewidth', 3);
xlabel('Frekans [Hz]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
ylabel('Et kalınlığı [mm]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
h=legend('sdag (Gümüşün et kalınlığı)', 'sdcu (Bakırın et kalınlığı)', 'sdal (Alüminyumun et kalınlığı)');
grid;

subplot(2,2,2);
plot(f, sdag(f), 'r', f, sdcu(f), 'b', 'Linewidth', 3);
xlabel('Frekans [Hz]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
ylabel('Et kalınlığı [mm]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
h=legend('sdag (Gümüşün et kalınlığı)', 'sdcu (Bakırın et kalınlığı)');
grid;

subplot(2,2,4);
plot(f, sdag(f), 'r', f, sdal(f), 'g', 'Linewidth', 3);
xlabel('Frekans [Hz]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
ylabel('Et kalınlığı [mm]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
h=legend('sdag (Gümüşün et kalınlığı)', 'sdal (Alüminyumun et kalınlığı)');
grid;
```

EK-7

İnce ekranlar ve ekran kalınlığının yansıma kaybına etkilerinin analizini gerçekleştiren MATLAB kodu.

%İnce Ekran ve Yansıma Kaybı

```
mu0=4*pi*10^-7;
ep0=8.854*10^-12;
si0=5.8*10^7;
mur=1;
sir=1;
nu0=sqrt(mu0/ep0);
j=sqrt(-1);
f=10000:1000:1000000000;
d1=1*10^-3;
d2=1*10^-4;
d3=1*10^-6;
sig=1./sqrt(pi.*f*mur*mu0*si0*sir);
nu=sqrt((2*pi.*f*mur*mu0)/(2*sir*si0));
be0=2*pi./(3*10^8./f);

SEapp1=20*log((377*sir*si0*d1)/(2.*sqrt(2)));
SEdB1=20*log(abs((nu0+nu).^2/4*(nu0*nu))*(1-(nu0-nu)/(nu0+nu)).^2*exp(-
2*d1./sig*exp(-2*j*d1./sig))*exp(d1./sig)*exp(j*d1./sig)*exp(-j*be0.*d1));

SEapp2=20*log((377*sir*si0*d2)/(2.*sqrt(2)));
SEdB2=20*log(abs((nu0+nu).^2/4*nu0.*nu)*(1-(nu0-nu./nu0+nu)).^2*exp(-
2.*d2./sig*exp(-2*j*d2./sig))*exp(d2./sig)*exp(j*d2./sig)*exp(-j*be0*d2));

SEapp3=20*log((377*sir*si0*d3)/(2.*sqrt(2)));
SEdB1=20*log(abs((nu0+nu).^2/4*nu0.*nu)*(1-(nu0-nu./nu0+nu)).^2*exp(-
2.*d1./sig*exp(-2j.*d1./sig))*exp(d1./sig)*exp(j.*d1./sig)*exp(-j.*be0.*d1));

figure;
plot(f, SEdB1, 'r',f, SEdB2, 'b',f, SEdB3, 'g', 'LineWidth',3);
hold on;
h=legend('1 mm ','0.1 mm', '0.01 mm');
grid;
xlabel('Frekans [GHz]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
ylabel('Ekranlama Verimliliği [dB]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
```


EK-8

Ekranlama verimliliği ve yüzey empedansı karşılaştırması ve toplam kayıp ifadesinin hesaplamasını yapan MATLAB kodu.

%Ekran vs. Yüzey Empedansı Toplam Kayıp

```
clear all;
clc;

mu0=4*pi*10^-7;
ep0=8.854*10^-12;
sig0=5.8*10^7;
mu1=1;
sig1=1;
j=sqrt(-1);
Rs1=1;
Rs2=5;
Rs3=20;

f=10000:1000:1000000000;
t1=1/(sig0*Rs1);
t2=1/(sig0*Rs2);
t3=1/(sig0*Rs3);

fi=1./(sqrt(pi*mu0*mu1*sig1*sig0.*f));

Rdb=20.*log10(abs(2.6*10^8./sqrt(mu1.*f/sig1)));

Adb1=131*t1*sqrt(mu1*sig1.*f);
Adb2=131*t2*sqrt(mu1*sig1.*f);
Adb3=131*t3*sqrt(mu1*sig1.*f);

MRdb1=10.*log10(1-(2.*exp(-
30.3*t1*sqrt(mu1*sig1.*f))).*cos(30.3*t1*sqrt(mu1*sig1.*f))+exp(-
60.6*t1*sqrt(mu1*sig1.*f)));
MRdb2=10.*log10(1-(2.*exp(-
30.3*t2*sqrt(mu1*sig1.*f))).*cos(30.3*t2*sqrt(mu1*sig1.*f))+exp(-
60.6*t2*sqrt(mu1*sig1.*f)));
MRdb3=10.*log10(1-(2.*exp(-
30.3*t3*sqrt(mu1*sig1.*f))).*cos(30.3*t3*sqrt(mu1*sig1.*f))+exp(-
60.6*t3*sqrt(mu1*sig1.*f)));

TOTdb1=Rdb+Adb1+MRdb1;
TOTdb2=Rdb+Adb2+MRdb2;
TOTdb3=Rdb+Adb3+MRdb3;
```

```
plot(f,TOTdb1 , 'r',f, TOTdb2, 'b',f, TOTdb3, 'g', 'LineWidth',3);  
hold on;  
h=legend('TOTdb1-1ohm ', 'TOTdb2-5ohm', 'TOTdb3-20ohm');  
grid on;  
xlabel('Frekans [Hz]', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');  
ylabel('TOT(dB)', 'fontsize', 16, 'fontweight', 'b');
```

ÖZGEÇMİŞ

Pınar Deniz Tosun 1986 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, Bartın, Amasra, Karamürsel ve Antalya'da tamamladıktan sonra 2004 yılında Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği bölümünü kazandı. 2009 yılının Haziran ayındaki lisans mezuniyetinin ardından aynı yıl Eylül ayı içerisinde Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendiliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Aralık 2009 ile Eylül 2011 tarihleri arasında, Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır.