

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROMANYETİK EKLAN VERİMLİLİĞİNİN TEORİK VE DENEYSEL
İNCELENMESİ**

İ. Bahadır BAŞYİĞİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2011

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROMANYETİK EKLAN VERİMLİLİĞİNİN TEORİK VE DENEYSEL
İNCELENMESİ**

İ. Bahadır BAŞYİĞİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

Bu tez 30/05/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından (...) not takdir edilerek oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr.Şükrü ÖZEN (Danışman).....

Yrd.Doç.Dr. Selçuk HELHEL.....

Yrd.Doç.Dr. Mesud KAHRİMAN.....

ÖZET

ELEKTROMANYETİK EKTRAN VERİMLİLİĞİNİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ

İ. Bahadır BAŞYİĞİT

Yüksek lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr Şükrü ÖZEN

Haziran 2011, 48 Sayfa

Ekranlama, elektronik cihaz ve sistemleri elektromanyetik girişime karşı koruma yöntemlerinden biridir. Elektromanyetik ekranlama genellikle elektromanyetik ışınları azaltmak için kullanılır. Kutuların ekranlanması, kutuyu kutu üzerine gelen dalgalardan ve filtrelenen ışınlardan korumak için önemlidir. Açıklıkların dizaynı, ekranlanan kutunun daha iyi elektromanyetik ışın ve hassasiyet kazanmasına doğrudan etki eder. Ekranlama içindeki açıklıklar, slotlar, kablo kayıpları, pratikte kullanımı uygun olmayan konnektör girişleri ve diğer parçalar, kutunun ekranlama verimini açık bir şekilde etki eder.

Elektromanyetik ekran verimliliğinin incelendiği bu çalışmada endüstriyel cihaz ve sistemler için ekranlama açıklığı konusunda kullanılabilir sonuçlar elde etmek ve geniş band ekranlama verimini 100MHz-1GHz ile 6-13GHz aralığında incelemek amaçlanmıştır. 100MHz ile 1GHz arasındaki teorik ekranlama verimi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Elektromanyetik uyumluluk, Ekranlama verimliliği, Metalik kutularda açıklıklar

JÜRİ: Doç.Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)

Yrd.Doç.Dr. Selçuk HELHEL

Yrd.Doç.Dr. Mesud KAHRİMAN

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND THEORITICAL INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING EFACTIVENESS

I. BAHADIR BASYIGIT

M.Sc. Thesis in Electrical-Electronics Engineering

Adviser: Assoc. Prof.Dr.Sukru OZEN

January, 2011, 48 pages

Shielding is one of the methods to protect electronic devices and systems to electromagnetic interference. Electromagnetic Shielding is generally used to reduce emissions. Shielding enclosures are important to protect equipments from the effect of an exterior field, and filtering emission. Aperture design on electronic equipments' shielding enclosures is a fundamental aspect of getting better electromagnetic emission and susceptibility. Apertures, slots, cable penetrations, unused connector ports and others breaks in the shield can influence significantly the effectiveness of shielding enclosures.

In this study, electromagnetic shielding effectiveness has been examined in order to obatin usefull results about enclosure apertures of industrial systems, and it has been aimed to investigate broad band shielding effectiveness in between 100MHz to 1GHz and 6GHz to 13GHz. Theoretical SE calculations for 100MHz to 1GHz has been compared with measurements.

KEY WORDS: Electromagnetic compatibility, Shielding effectiveness, Apertures on enclosures

COMMITTEE: Assoc. Prof.Dr. Sukru OZEN (Adviser)

Asist. Prof.Dr. Selcuk HELHEL

Asist. Prof.Dr. Mesud KAHRIMAN

ÖNSÖZ

Günümüz elektrikle çalışan cihazları nitelik ve niceliği ilerledikçe elektromanyetik girişimlere karşı elektromanyetik uyumluluğun önemi artmaktadır. Bu tez çalışmamda elektromanyetik girişimlerinden korunmada geçerli yöntemlerden biri olan ekranlama konusuna paralel olarak elektromanyetik ekranlama verimi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

Bana bu konuda çalışma olanağı veren danışmanım Sayın Doç.Dr. Şükrü ÖZEN'e (A.Ü.M.F.), yardımlarını gördüğüm Sayın Yrd.Doç.Dr. Selçuk HELHEL'e (A.Ü.M.F.) ve desteğini esirgemeyen eşim Zeliha BAŞYİĞİT'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELERLER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. EKLANLAMA.....	6
2.1. Malzeme Özellikleri.....	6
2.1.1. Elektriksel bakımdan malzemenin özellikleri.....	6
2.1.2. Malzemelerin manyetik özellikleri.....	7
2.1.3. İletkenlik bakımdan malzemelerin özellikleri.....	8
2.1.4. Malzemelerde alternatif akım değişimleri.....	9
2.1.5. Kayıplı ortamlardaki üniform düzlem dalgalar.....	11
2.2. Temel Kavramlar.....	12
2.3. Ekranlamanın Amacı.....	15
2.4. Elektronik Ürünlerin Ekranlaması.....	15
2.4.1. Yakın alan ve uzak alan.....	16
2.4.2. Karakteristik ve dalga empedansı.....	19
2.5. Ekranlama Verimi Hesabı.....	20
3. METERYAL ve METOT.....	24
3.1. Analitik Yöntem.....	24
3.2. Teorik Çözüm ve Formülasyon.....	24
3.2.1. İletim hattı empedansı ve açıklık empedansı.....	25
3.2.2. Elektrik ve manyetik ekranlama verimi.....	26
3.2.3. Formül kapsamını geliştirme.....	27
3.3. Ekranlama Veriminin Teorik Olarak İncelenmesi.....	28
4. BULGULAR.....	34
4.1. Yüksek Frekanslarda (6-13GHz) Ekranlama Verimi Ölçümü.....	34
4.1.1. Ölçümde kullanılan elektrik elan SE teorik analizi.....	34
4.1.2. Test düzeneği ve ölçümler.....	35
4.1.3. Ölçüm sonuçları.....	36
4.2. Düşük Frekanslarda (0-1 GHz) Ekranlama Verimi Ölçümü.....	37
5. SONUÇ.....	42
6. KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler:

\vec{B}	Manyetik akı yoğunluğu
c	Işık hızı
C	Kapasitans
\vec{D}	Elektriksel akı yoğunluğu
\vec{E}	Elektrik alan
\vec{E}_o	Gelen elektrik alan
\vec{E}_r	Hat sonundaki elektrik alan
\vec{E}_s	Hat girişindeki elektrik alan
SE	Ekranlama verimi
f	Frekans
G	Kondüktans
\vec{H}	Manyetik Alan
i_p	P noktasındaki akım
I_r	Hat boyunca akan akım
k_o	Kısa devre modeli sabiti
k_g	Yayılmı sabiti
K, K'	Elipik tümlevler
L	Endüktans
\vec{J}	Akım yoğunluğu
\vec{M}	Manyetik volarizasyon vektörü
\vec{P}	Güç, Elektriksel polarizasyon vektörü
r	Kaynaktan itibaren ölçülen mesafe
R	Direnç
S_A	Soğrulma kaybı

S_{MR}	İnce ekranlar için çoklu yansıma kaybı
S_R	Yansıma kaybı
t	Kalınlık
T	İletim katsayısı
X_e	Elektrik hassasiyeti
X_m	Manyetik hassasiyeti
v	Dalganın geldiği ortamın empedansı ile ekran meteryalinin empedansının oranı
v	Faz hızı
v	Elektronların sürüklenme hızı
$v_{1,2}$	Eşdeğer gerilim
v_p	P noktasındaki gerilim
η	Empedans
η_E	Elektrik Alan için dalga empedansı
η_{in}	Hattın giriş empedansı
η_H	Manyetik Alan için dalga empedansı
η_m	Ekran empedansı
η_o	Ortamın karakteristik empedansı
η_r	Hattın sonlandırıldığı empedans
η_w	Dalga empedansı
δ	Deri kalınlığı
γ	Yayılm sabiti
α	Zayıflama sabiti
β	Faz sabiti
ϵ	Dielektrik sabiti
ϵ_o	Boşluğun dielektrik sabiti
λ	Dalga boyu
λ_o	Serbest uzaydaki dalga boyu
μ	Manyetik geçirgenlik sabiti

μ_e	Elektronların hareket yeteneği
μ_o	Boşluğun manyetik geçirgenlik sabiti
μ_r	Bağıl permeabilite
ρ	Özdirenç
ρ_e	Elektron yük yoğunluğu
σ	İletkenlik
σ_a	Değişken iletkenlik
σ_s	Statik iletkenlik
σ_r	Bağıl iletkenlik
η_o	Serbest uzay için dalga empedansı
ω	Açısal frekans ($2\pi f$)

Kısaltmalar:

A.Ü.M.F. Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Ekran dışında bulunan ortamın girişimden korunması için kullanılan ekran modeli.....	16
Şekil 2.2. Ekranın içinde bulunan ortamın girişimden korunması için kullanılan ekran modeli.....	17
Şekil 2.3. Kaynaktan olan mesafe ile alan karakteristiğinin değişimi.....	17
Şekil 2.4. Elektrik veya manyetik alan olması durumunda kaynağa olan mesafe ile dalga empedansının değişimi.....	18
Şekil 2.5. Düzlem dalgalar için ekranlama mekanizmasının gösterimi.....	21
Şekil 3.6. Üzerinde açıklık bulunan dikdörtgen kutu.....	25
Şekil 3.7. Üzerinde açıklık olan kutunun eşdeğer devresi.....	25
Şekil 3.8. Ekranlama verimi teorik çözümü için Matlab program kodları.....	29
Şekil 3.9. Açıklık boyutunun 7.5cm x 7.5cm olduğu durumda elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri.....	30
Şekil 3.10. Açıklık boyutunun 15cm x 3.75cm olduğu durumda elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri.....	31
Şekil 3.11. Açıklık boyutunun 30cm x 1.875cm olduğu durumda elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri.....	31
Şekil 3.12. Tüm açıklıklar için elektrik ekranlama verimi değerleri.....	32
Şekil 3.13. Tüm açıklıklar için elektrik ekranlama verimi değerleri.....	32
Şekil 3.14. Tüm açıklıklar için manyetik ekranlama verimi değerleri.....	33
Şekil 3.15. Tüm açıklıklar için manyetik ekranlama verimi değerleri.....	33
Şekil 4.16. Test Düzeneği.....	31
Şekil 4.17. Genişband'da SE'in açıklık alanına (λ^2) göre değişimi.....	36
Şekil 4.18. Farklı frekanslar için SE'in boy/en oranına göre değişimi.....	37
Şekil 4.19. Test Düzeneği.....	37

Şekil 4.20. Düşük frekansta yapılan ölçümlerin Matlab kodlari.....	38
Şekil 4.21. 7.5cm x 7.5 cm açıklık boyutuna sahip kutunun ölçülen elektrik ekranlama verimi.....	39
Şekil 4.22. 15cm x 3.75 cm açıklık boyutuna sahip kutunun ölçülen elektrik ekranlama verimi.....	39
Şekil 4.23. 30cm x 1.875 cm açıklık boyutuna sahip kutunun ölçülen elektrik ekranlama verimi.....	40
Şekil 4.24. Tüm kutular için ölçülen elektrik ekranlama verimi.....	41
Şekil 4.25. Tüm kutular için ölçülen elektrik ekranlama verimi.....	41
Şekil 5.26. 7.5cm x 7.5 cm'lik açıklığı olan kutu için elektrik ekranlama verimi değerleri.....	42
Şekil 5.27. 15cm x 3.75 cm'lik açıklığı olan kutu için elektrik ekranlama verimi değerleri.....	42
Şekil 5.28. 30cm x 1.875 cm'lik açıklığı olan kutu için elektrik ekranlama verimi değerleri.....	43
Şekil 5.29. Tüm kutular için elektrik ekranlama verimi değerleri.....	43

ÇİZELGELER DİZİNİ:

Çizelge 2.1. Değişik materyallerin bağıl iletkenlik ve permeabiliteleri.....	20
Çizelge 2.2. Ekran verimliliği bağıntıları.....	23
Çizelge 3.3. Analitik çözümde kullanılan alüminyum. kutunun özellikleri.....	29
Çizelge 4.4. Metalik kutu ölçüleri.....	35

1. GİRİŞ

Elektronik sistem ve cihazları civardaki elektrik ve manyetik alanların etkilerine karşı korumak gerekir. Böyle bir durum için cihazın bulunduğu ortamın veya üretilen cihazın elektromanyetik girişiminden izole edilerek ekranlanması cihaz veya sistem performansı açısından önem arz eder. Bu çalışmada korunan cihaz veya sistemin doğası gereği ekran üzerinde bulunması zorunlu olan açıklıkların ekran verimliliğine etkisi araştırılmış ve farklı şekil ile geometriye sahip ekran konfigürasyonları incelenmiştir.

İlk olarak malzemelerin elektrik, manyetik ve iletkenlik özellikleri ile malzemelerin farklı elektromanyetik alan ve dalgalara karşı davranışı incelenerek, elektriksel ve manyetik kayıp tanjantı hesabı ve kayıplı ortamlardaki uniform düzlem dalgalar incelenmektedir.

Bu tez çalışmasında, tez konusuna uygun olarak literatürdeki 25 makale ve 6 kitap'tan yararlanılmıştır. Çalışmada özellikle [4,19,20,27] makaleleri üzerinde yoğunlaşmış olup 3. Bölümde 0-1000 MHz için açıklıkların teorik çözümü yapılmıştır. Deneysel olarak tam yansımaz odada aynı frekans aralığı için 3 ayrı kutu ve açıklık için ölçümler yapılarak 4. Bölümde değerlendirilmiştir. 5. Bölümde de deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Araştırmamıza referans olan literatür özeti aşağıda sunulmuştur.

L. Golestani-Rad, 2005'de metalik kutulardaki açıklıkların şekillerini ve konfigürasyonları değiştirerek ekranlama verimi (SE) üzerindeki etkileri FDTD (Finite Difference Time Domain) metodu ile hesaplayarak analiz etmiştir. Hesaplama için 0-1 GHz frekans aralığında $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 'lik kapalı kutuda açıklık alanı 60cm^2 sabit kalmak şartı ile iki ayrı inceleme yapmıştır.

1. Açıklık boyutlarını değiştirmiş ve boyu büyük eni küçük açıklıklarda ekranlama veriminin 20 dB kadar arttığını görmüştür.

2. Aynı en ve boya sahip bir açıklık ve birden fazla açıklık olduğu durumu hesaplamış ve birden fazla açıklığın ekranlama verimi, bir açıklık olduğu durumdaki ekranlama veriminden yaklaşık olarak 25 dB daha fazla olduğunu görmüştür.

L. Wang, 2007'de 0-1 GHz aralığında açıklık şekillerinin ve açıklık arası mesafenin ekranlama verimi üzerindeki etkisini TLM (Transmission Line Method) metodu ile hesaplayarak analiz etmiş ve iki ayrı sonuca ulaşmıştır:

1. 30cm×12cm×30cm 'lik metalik bir kutu içinde aynı boyutlara sahip açıklıklar için sırasıyla 1,4 ve 8 açıklık için hesaplama yapmıştır. Ayrıca aynı hesaplamayı aynı boyuttaki açıklıkların şekli dairesel olarak almıştır. İncelemede delik sayısının fazla olduğu (8 delik) durumda SE değerinin en yüksek olduğunu ve deliklerinde dairesel olma durumunda da daha büyük SE değerine ulaştığını hesaplamıştır.

2. 30cm×16cm×30cm 'lik metalik kutuda 1cm×1cm 'lik 9 ayrı açıklık koyarak, açıklıklar arası mesafeyi değiştirmiş (2mm,5mm ve 6mm) SE' i hesaplamış ve delikler arasındaki mesafe düştükçe daha fazla alan kuplaj olduğundan SE' in azaldığını ancak buna rağmen frekans düştükçe SE' in arttığını gözlemlemiştir.

G. Chunhong, 2005' de metalik haznelerdeki deliklerin 0-2GHz arasında SE' ini devre modelini baz alarak analitik formülasyon ile çözümlenerek yedi ayrı sonuca varmıştır:

1. 22cm×55cm×15cm 'lik metalik haznede 10cm×4cm 'lik deliği üç farklı uzaklığa (13cm,7cm ve 1.6cm) konumlandırmıştır. Rezonans frekansı 1,2GHz olduğunu görmüştür.1,2GHz' den büyük frekanslarda elektrik alan SE' in frekans ve delik uzaklığı arasında karmaşık ancak 1,2 GHz' in altında frekanslarda düzgün bir ilişki olduğunu görmüştür. 1,2 GHz' in altında elektrik alan SE' in, frekans arştı ile azaldığını ama delik uzaklığı artışı ile arttığını gözlemlemiştir.

2. Delik boyutları (10cm×4cm) sabit olması durumunda metalik hazne boyutlarını değiştirmiştir. (22cm×55cm×15cm ve 25cm×7cm×17cm). Bu iki hazne içinde elektrik alan SE değişmediğini ancak hazne boyutu küçüldükçe rezonans frekansının arttığını gözlemlemiştir (Rezonans frekansı 1,2GHz' den 1,6GHz' e çıkmıştır).

3. Hazne boyutu sabit kalmak koşulu ile delik boyutunu arttırarak elektrik alan SE' i hesap etmiş ve delik boyutları küçüldükçe elektrik alan SE' in arttığını görmüştür.

4. Wang birinci kısımda elektrik alan için yaptığı hesaplamaları manyetik SE içinde yapmış ve manyetik alan SE' in; frekansla ilişkisi olmadığını, rezonans frekansından (1,2GHz) küçük frekanslarda delik uzaklığı arttıkça SE' in de arttığını gözlemlemiştir.

5. Elektrik alan SE için; 400mm² 'lik delik alanı sabit kalması durumunda iki farklı delik boyutu kullanmıştır (20mm×20mm ve 100mm×4mm). Her iki durumda da rezonans frekansının 1,2GHz olduğunu, düşük frekanslarda 20mm×20mm 'lik deliğin elektrik alan SE' ini daha büyük olduğunu özellikle 600MHz-1000MHz frekans aralığında SE' in yaklaşık 20 dB artış olduğunu gözlemlemiştir.

6. Metalik kutu ve delik boyutları aynı kalması durumunda, delik sayılarını sırasıyla 1, 2 ve 3 olarak attığında elektrik alan SE'in de arttığını gözlemlemiştir.

7. Aynı metalik haznede açıklık alanları toplamı 400mm^2 , delik sayıları farklı olacak şekilde üç ayrı durum incelemiştir. (4 adet $10\text{mm}\times 10\text{mm}$, 2 adet $14\text{mm}\times 14\text{mm}$ ve 1 adet $20\text{mm}\times 20\text{mm}$). Bu durumda deliklerin, boyutlarının küçük ve sayılarının fazla olduğu durumda (4 adet $10\text{mm}\times 10\text{mm}$) hem elektrik hem de manyetik alan SE'in arttığını gözlemlemiştir.

M. Bahadorzadeh, 2008'de 0-1 GHz frekans aralığında iki katmanlı metalik kutularda SE'i TLM-TD denilen nümerik yöntemle hesaplayarak 4 farklı sonuca ulaşmıştır:

1. Metalik haznenin 1 ve 2 katmanlı olduğu durumlarda SE'in ve rezonans frekansının 2 katmanlı olan durumda daha yüksek çıktığını gözlemlemiştir.

2. Açıklık sayısı arttıkça SE'in de arttığını gözlemlemiştir.

3. 2 katmanlı kutuda 2. ekrandaki delikler 3 farklı uzaklığa (0mm,30mm,60mm) konumlandırmıştır. Delik uzaklığı arttıkça SE'in de arttığını ve rezonans frekansının ise değişmediği gözlemlemiştir.

4. 1GHz frekansında 2 katmanlı kutuda 2 ekran mesafesi (R) arttıkça hem SE'in hem de rezonans frekansının arttığını gözlemlemiştir.

I. Belekour, 2000'de 0-1GHz frekans aralığında deliklerin SE değerini Furier Transform ile hesaplayarak Tx-line ve FDTD metotlarını karşılaştırmıştır. İki farklı durum için her iki yöntemi de hesap etmiştir. Sonuç olarak her iki durumda da; özellikle rezonans frekansında Tx-line için SE -10dB, -20 dB'lere giderken FDTD metodunda ise daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Buradaki iki farklı durum ise;

1. Gelen dalganın ekrana gelme açısının sırasıyla normal açı,10,30 ve 60 derece olduğu paralel polarizasyon durumu için 4 ayrı hesap yapılmıştır.

2. Polarizasyon açısının sırasıyla 20, 30, 60 ve 90 derece olduğu ve hepsinde gelen dalganın ekrana normal açı ile geldiği 4 ayrı durum hesap edilmiştir.

A. Cicomancini, 2007'de 0-1GHz frekans aralığı için ilk önce CST-MW yazılımı ile FIT (Finite Integration Technique) yöntemini kullanarak yakın alan ve uzak alanda hesapladığı SE'i, daha sonra yansız odada ölçtüğü SE ile karşılaştırarak analiz etmiştir.

C. H. Fang, 2008'de metalik kutudaki açıklıkların 0-1GHz frekans aralığı için önce yansıtma hücresinde (Reverberation Chamber) ve GTEM odasında iki ayrı ölçüm yaptı. Daha sonra CTS-MW yazılımı ile simülasyon olarak SE hesap ederek ölçtüğü ve hesapladığı SE değerlerini karşılaştırdı. CST'den elde edilen sonuçların GTEM hücresindeki sonuçlara daha yakın olduğunu ve bazen RC'deki random polarizasyonlarından dolayı RC'deki SE değerlerinin GTEM hücresindekilere göre küçük olduğunu gözlemlemiştir.

X.C. Nie, 2008'de metalik kutularda açıklıkların SE'ini 0-3GHz frekans aralığında incelemiştir. Elektrik alan entegre denklemi (EFIE) kullanılarak present metod ile hesap etmiştir. Aynı zamanda yansısız odada 6,5 cm uzunluğundaki monopol antenle ölçtüğü SE değerlerinin nümerik yöntemle karşılaştırdığında uygun bir model oluşturduğunu görmüştür.

Z. B. Zhao, 2005'de metalik kutulardaki açıklıkların ekranlama verimini (SE) 0,3-0,6 GHz frekans aralığında yansısız odada ölçüm yapmıştır. Daha sonra analitik yaklaşımlar yaparak rigorous yöntemi denilen yarı-analitik çözüm ile hesaplanan SE'i yansısız odada ölçtüğü SE ile karşılaştırdığında birbirine yakın olduğunu dolayısıyla Rigorous modeli ile verimli bir çözüm yaptığını görmüştür. Rigorous yöntemini uygulamak için gerekli olan GPOF çözüm metodunu Green's fonksiyonlarındaki GSI yaklaşımı ile kullanmıştır.

P. Dangkham, 2007'de 0-1 GHz frekans aralığında yansısız odada açıklıkların boyutlarını ve sayılarını değiştirerek 9 farklı durum için SE değerlerini ölçmüştür. Daha sonra ölçümlerden elde ettiği verileri kullanarak 13 girişli, 4 çıkışlı ve 100 gizli birimi olan yapay sinir ağı kurmuş ve bu yöntemle elde ettiği sonuçların ölçümlerden elde ettiği veriler ile yakın olduğunu gözlemlemiştir.

M Yazıcı, yansısız odada metalik haznelerdeki deliklerin ekranlama verimini ölçmek için yapılan network veya sinyal analizöründe yapılması gereken birkaç işlemi tek başına ve daha kolay yapabilen, network veya sinyal analizörü ile uyum içinde çalışabilen, otomatik tarama özelliğine sahip, C++ veri tabanlı yeni bir Lab Windows CVI programı yazmıştır. Daha sonra 1997'den beri deliklerin SE ölçümlerinde standart olan IEEE-STD-299 ölçümlere göre kendi geliştirdiği programdaki ölçüm sonuçlarının daha doğrusal ve düzgün sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir.

R. D. Leo, 1999'da koaksiyel kabloların ekranlama faktörünü ölçmek için basit ve uygun bir ölçme tekniği uygulamış ve üç eksenli (triaxial) teorik çözümlerle kendi ölçüm sonuçlarının yakın olduğunu gözlemlemiştir.

A. Marvin, 2006'da PCB kartının SE değerlerini hem yansız hem de yansıtımlı odada ölçmüş ve ölçtüğü bu değerleri incelediğinde karşılaştırılabilir yakın değerler olduğunu gözlemlemiştir.

D. C. Smith, elektronik devre elemanlarının ekranlama verimini 0-1GHz frekans aralığında loop anten kullanarak ölçmüş ve farklı elemanlarda ölçtüğü değerleri karşılaştırarak analiz etmiştir.

H. Herlemann, 2008'de bir elektronik kabinetin geçici (transient) ekranlama verimini yansız ve yansıtımlı odalarda ölçmüştür. Simülasyon olarak ise nümerik yöntemde Cocept2 ve Comsol Multiphysics araçlarını kullanarak hesapladığı SE'in ölçüm yaptığı SE değerlerine yakın olduğunu gözlemlemiştir.

A. Keshtkar, 2009'da çeşitli paramanyetik, ferromanyetik ve diyamanyetik malzemeleri kullanarak manyetik ekranlama verimini karşılaştırmış ve 2DFEM ile delik sayılarındaki değişimin ekranlama verimi üzerine etkilerini de gözlemlemiştir.

G. Chunhong 2005'de, M.P. Robinson'un 1996 ve 1998'de uyguladığı metalik haznelerdeki deliklerin ekranlama verimini devre modeli ile çözen analitik formülasyonu metalik kutu ve deliklerin boyutlarını ve delik sayılarını değiştirerek elektrik ve manyetik alan ekranlama verimini hesaplayarak karşılaştırmıştır.

M. P. Robinson 1996'da, daha önce 1988'de açıklıkların SE'ini gürültü azaltma tekniği ile hesaplayan H.W. Qtt'nin çalışmasının içine frekansı da ekleyerek deliklerin SE'ini devre modeli çözümü ile hesaplayarak yeni bir analitik formülasyon geliştirmiş ve SE değerlerini karşılaştırarak analiz etmiştir.

D. W. Thomas 1999'da, M.P. Robinson'un 1996 ve 1998'de metalik haznelerdeki deliklerin SE'i hesaplamak için kullandığı analitik formülasyonu kendi çalışmasında PCB kartları için uyguladı ve daha sonra ölçtüğü değerler ile karşılaştırdığında büyük oranda yakın değerler aldıklarını gözlemlemiştir.

M. P. Robinson, 1998'de metalik haznelerdeki deliklerin elektrik ve manyetik ekranlama verimini log-periyodik, bikonik ve mikroşerit anteni kullanarak 3 farklı antenle 3 farklı SE değeri ölçmüş ve geliştirdiği analitik devre modeli ile hesapladığı SE değerlerini karşılaştırarak analiz etmiştir.

2. EKSPANLAMA

2.1. Malzeme Özellikleri

2.1.1. Elektriksel bakımdan malzemelerin özellikleri

Dielektrikler, elektrik akımı taşıyabilecek serbest elektronları olmayan maddelerdir ve bir elektrik alanla kutuplanma özelliğine sahiptirler. Elektrik alanın etkisiyle bir molekül içindeki pozitif ve negatif yükler birbirinden uzaklaşarak elektrik dipolü oluşturur. Bunun sonucunda dielektrik polarize olur.

Aralarında 'd' mesafesi olan iki paralel levhaya bir dış gerilim kaynağı bağlı olsun ve levhaların arasına yarısına kadar dielektrik malzeme konduğu, diğer yarısının ise boşluk olduğu varsayalım. \vec{E} (V/m) uygulanan elektrik alan olmak üzere, paralel levhalar arasındaki boşlukta elektriksel akı yoğunluğu:

$$\vec{D}_0 = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir. Maddesel ortamlarda \vec{D} , ortamın dielektrik sabitine bağlı olarak:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Polarize olan dielektriğin birim hacmindeki bileşke dipol momentine elektrik polarizasyonu \vec{P} [C/metre²] denir ve;

$$\vec{D}_0 = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.3)$$

dir. Polarizasyon vektörü ise:

$$\vec{P} = \epsilon_0 X_e \vec{E} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada X_e boyutsuz olup, elektriksel polarizasyon duyarlılığı veya elektrik suseptibilitesi olarak adlandırılır. Burada (2.4) eşitliği (2.3)'de yerine konursa:

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + X_e) \vec{E} \quad (2.5)$$

olarak bulunur. Burada dielektrik ve bağıl dielektrik sabitleri:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.6)$$

$$\epsilon_r = 1 + X_e \quad (2.7)$$

ve (2.7) eşitliği (2.6)'da yerine konursa;

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + X_e) \quad (2.8)$$

olarak elde edilir

2.1.2. Malzemelerin manyetik özellikleri

Manyetik malzemeler manyetik alana maruz kaldığında, manyetik polarizasyon sergiler. Manyetik akı yoğunluğu \vec{B} ile aynı doğrultuda olan \vec{M} Manyetik Polarizasyon vektörü (Magnetizasyon vektörü), H (A/m) toplam manyetik alan şiddeti ve μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği olmak üzere; (Özen ve Arı 2008)

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.9)$$

dir. \vec{M} (A/m) manyetik polarizasyon vektörü, uygulanan alan içindeki manyetik dipollerin alana olan katkısını gösterir. İzotrop maddesel ortamda \vec{M} deneysel olarak:

$$\vec{M} = X_m \vec{H} \quad (2.10)$$

olduğu bulunmuştur. Burada X_m , manyetik polarizasyon duyarlılığı veya manyetik suseptibilite olarak adlandırılır. Bu durumda (2.9) eşitliği;

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + X_m) \vec{H} \quad (2.11)$$

şeklini alır. Permeabilite (Manyetik geçirgenlik katsayısı) ve bağıl permeabilite sırası ile:

$$\mu = \mu_0 (1 + X_m) \quad (2.12)$$

$$\mu_r = 1 + X_m \quad (2.13)$$

olarak tanımlanır. Bu eşitlikler (2.11)'de yerine konursa;

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (2.14)$$

eşitliği olarak ifade edilebilir.

Manyetik malzemeler; diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik malzemeler olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Bunlar aşağıdaki gibi karakterize edilirler. (Bayrakçı 1988)

Diyamanyetizma: Manyetik alan uygulanmamış iken, her atom etrafında hareket eden elektronların dipol momentleri birbirini yok eder. Manyetik alan içinde, bir çekirdek etrafında hareket eden elektronların etkileri farklı olduğundan farklı yörüngelere sahiptirler. Meydana gelen net manyetik moment uygulanan alana zıt yöndedir. Sonuç olarak manyetik akı yoğunluğu miktarında azalma olur. Bu sebeple diyamanyetik maddelerde $X_m \leq 0$ ve $\mu_r \leq 1$ 'dir.

Paramanyetizma: Paramanyetizmanın asıl nedeni, her atomdaki toplam manyetik dipolü oluşturan elektronların spin etkileridir. Bu tip maddelerde komşu dipoller ve uygulanan manyetik alan dolayısıyla meydana gelen dipol doğrultuları arasında manyetik akıyı arttıran bir etki vardır. Bu halde $X_m \geq 0$ ve $\mu_r \geq 1$ 'dir.

Ferromanyetizma: Ferromanyetik maddelerde (demir, nikel, kobalt ve bunların alaşımları) atomlardaki spinler, toplam dipol momentini arttıracak şekildedir. Bir manyetik alan uygulandığında dipoller, uygulanan alan doğrultusunda kuvvetli bir iç alan meydana getirecek şekilde sıralanırlar. Ferromanyetizma ile ilgili iki kabul önerilmiştir. Birincisi; uygulanan manyetik alan, manyetik dipoller yardımı ile çok kuvvetli bir iç alan meydana getirir. İkincisi; ferromanyetik bir malzemede çok sayıda domen adı verilen bölgeler vardır. Boyutları 10^{-3} cm mertebesinde olup milyonlarca atom bulundurlar. Her domende spinler manyetizasyonun aynı yönde olmasını sağlayacak şekilde düzenlenirler.

2.1.3. İletkenlik bakımından malzemelerin özellikleri

Elektrik Alana maruz kalan bir iletkende, elektronlar rastgele hareket eder fakat uygulanan elektrik alana ters yönde v sürüklenme hızı ile yavaş yavaş sürüklenir. Uygulanan elektrik alan \vec{E} ise, elektronların sürüklenme hızı,

$$\vec{v} = -\eta_e \vec{E} \quad (2.15)$$

bağıntısı ile birbirine bağlıdır. η_e [$m^2/(V.s)$] elektronların hareket yeteneğidir. \vec{E} elektrik alanı varken, elektronlarla \vec{E} 'ye zıt yönde bir kuvvet uygulandığından, ortalama kayma hızı ile akış olur. Bu akış, önce tabaka üzerindeki ağır iyonların çarpışması ile önlenir. Böylece maddedeki elektrik enerjisi, ısı enerjisine dönüşür. Neticede σ_e elektron yük yoğunluğu ve J akım yoğunluğu olmak üzere;

$$\vec{J} = \sigma_e \vec{v} \quad (2.16)$$

olarak ifade edilir. Maddelerin çoğunda hız, elektrik alanın ve maddesel ortamın özelliklerinin bir fonksiyonudur. Ortalama hız, elektrik alana doğrusal olarak bağlıdır. (2.15) eşitliği (2.16)'da yerine konursa akım yoğunluğu ifadesi,

$$\vec{J} = \rho_e \mu_e \vec{E} \quad (2.17)$$

şeklinde elde edilir. Diğer taraftan σ_s (S/m) malzemenin statik iletkenliği olmak üzere, iletkendeki akım yoğunluğu;

$$\vec{J} = \sigma_s \vec{E}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. (2.17) ve (2.18) eşitliklerinden,

$$\sigma_s = -\sigma_e \mu_e \quad (2.18)$$

bulunur. σ_s iletkenliği, bir ortamdaki serbest elektron yoğunluğunu karakterize eden bir parametredir. Çok düşük iletkenliğe sahip malzemeler dielektrikler (yalıtkanlar) olarak sınıflandırılırlar. İdeal dielektriklerin iletkenlikleri sıfırdır. Yukarıda (2.18) eşitliği ile belirtilen iletkenlik ifadesi statik ya da dc iletkenliktir. İletkenlik frekansın boyutu olarak değişir.

2.1.4. Malzemelerde alternatif akım değişimleri

Malzemelere alternatif alanlar uygulandığında \vec{P} ve \vec{M} polarizasyon vektörleri bu alandan etkilenirler ve frekansın fonksiyonu olurlar. Ortamın dielektrik katsayısı;

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (2.20)$$

şeklinde kompleks olarak yazılabilir. Bağlı değeri ise;

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' + j\epsilon_r'' \quad (2.21)$$

şeklinindedir. Bu durumda ortam sabitleri kompleks olduğundan Maxwell-Amper denklemleri:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{H} &= \vec{J}_i + \vec{J}_c + j\omega\epsilon\vec{E} = \vec{J}_i + \sigma_s\vec{E} + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')\vec{E} \\ \nabla \cdot \vec{H} &= \vec{J}_i + (\sigma_s + \omega\epsilon'')\vec{E} + j\omega\epsilon'\vec{E} = \vec{J}_i + \sigma_e\vec{E} + j\omega\epsilon''\vec{E} \end{aligned} \quad (2.22)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a$ eşdeğer iletkenlik, $\sigma_a = \omega\epsilon''$ değişken (ac) iletkenlik, σ_s statik iletkenliktir. (2.22)'de uygulanan elektriksel akım yoğunluğu J_i ile, malzemenin efektif iletkenlik akım yoğunluğu $\vec{J}_{ce} = \sigma_e \vec{E} = (\sigma_s + \omega\epsilon'')\vec{E}$ ve efektif yer değiştirme akım yoğunluğu $J_{de} = j\omega\epsilon'\vec{E}$ olarak bulunmaktadır. Toplam elektriksel akım yoğunluğu;

$$\vec{J}_t = \vec{J}_i + \vec{J}_{ce} + \vec{J}_{de} = \vec{J}_i + \sigma_e\vec{E} + j\omega\epsilon'\vec{E} \quad (2.23)$$

şeklinde yazılabilir. (2.23)'den toplam elektriksel akım yoğunluğu;

$$\vec{J}_t = \vec{J}_i + \sigma_e\vec{E} + j\omega\epsilon'\vec{E} = \vec{J}_i + j\omega\epsilon' \left(1 - j\frac{\sigma_e}{\omega\epsilon'}\right)\vec{E} = j\omega\epsilon' (1 - j \tan \delta_e)\vec{E} \quad (2.24)$$

$\tan \delta_e$, efektif elektriksel kayıp tanjantı olarak adlandırılır ve;

$$\tan \delta_e = \frac{\sigma_e}{\omega \epsilon'} = \frac{\sigma_s + \sigma_a}{\omega \epsilon'} = \frac{\sigma_s}{\omega \epsilon'} + \frac{\sigma_a}{\omega \epsilon'} = \frac{\sigma_s}{\omega \epsilon'} + \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \tan \delta_s + \tan \delta_a = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $\tan \delta_s$ statik elektriksel kayıp tanjantı ve $\tan \delta_a$ ise değişken (ac) elektriksel kayıp tanjantı olarak adlandırılır.

Malzemeler iyi dielektrikler ve iyi iletkenler olarak sınıflandırılabilirler:

İyi dielektrikler için; $(\sigma_e / \omega \epsilon') \ll 1$ olup bu tip malzemeler için yer değiştirme akım yoğunluğu, iletkenlik akım yoğunluğundan çok daha büyük olup yaklaşık olarak toplam akım yoğunluğuna eşittir.

İyi iletkenler için; $(\sigma_e / \omega \epsilon') \gg 1$ olup bu tip malzemeler için iletimsel akım yoğunluğu, yer değiştirme akım yoğunluğundan çok daha büyüktür ve yaklaşık olarak toplam akım yoğunluğuna eşittir.

Birçok dielektrik malzemenin manyetik geçirgenliği yaklaşık olarak boşluk değerine μ_0 'a eşittir. Ancak ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerde daha büyük değer alır. Bu tip malzemelerde manyetik kayıplar oluşur ve bunlar kompleks bir manyetik geçirgenlik tanımlanarak hesaplanır. Genel olarak Maxwell denklemi; (Özen ve Arı 2008)

$$\nabla \times \vec{E} = -\vec{M}_i - j\omega \mu \vec{H} = -\vec{M}_i - j\omega(\mu' - j\mu'') \vec{H} = -\vec{M}_i - j\omega \mu'' \vec{H} - j\omega \mu' \vec{H} = -\vec{M}_t \quad (2.26)$$

$$\vec{M}_t = \vec{M}_i + \omega \mu'' \vec{H} + j\omega \mu' \vec{H} \quad (2.27)$$

olarak yazılabilir. Burada \vec{M}_t toplam manyetik akım yoğunluğu, \vec{M}_i uygulanan (kaynak) manyetik akım yoğunluğu olarak adlandırılır ve;

$$\vec{M}_t = \vec{M}_i + j\omega \mu' (1 - j \frac{\mu''}{\mu'}) \vec{H} = \vec{M}_i + j\omega \mu' (1 - j \tan \delta_m) \vec{H} \quad (2.28)$$

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} = \text{Alternatif akım manyetik tanjantı} \quad (2.29)$$

şeklinde yazılabilir. Ayrıca ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin kompleks manyetik geçirgenliği çoğu kez frekansın bir fonksiyonudur ve genel olarak:

$$\mu = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega) \quad (2.30)$$

şeklinde yazılır. Burada $\mu = \mu_0 \mu_r$ 'dir.

2.1.5. Kayıplı ortamlardaki uniform düzlem dalgalar

y-ekseni doğrultusunda polarize bir düzlem dalganın kayıplı bir ortamda x yönünde yayıldığını düşünelim. Elektrik alan: (Özen ve Arı 2008)

$$\vec{E}(x) = \hat{a}_y \vec{E}(x) = \hat{a}_y (E_o^+ e^{-\gamma x} + E_o^- e^{+\gamma x}) = \hat{a}_y (E_o^+ e^{-\gamma x} e^{-j\beta x} + E_o^- e^{+\alpha x} e^{+j\beta x}) \quad (2.31)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $\gamma = \alpha + j\beta$ kompleks yayılma sabitini göstermektedir. İlk terim, x yönünde ilerleyen dalga ve ikinci terim ise negatif yönde ilerleyen dalga bileşenidir. γ yayılma sabitinin reel kısmı, α zayıflama sabiti ve imajiner kısmı β ise faz sabiti olmak üzere;

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (2.32)$$

eşitliği elde edilir. Eşitliğin her iki tarafının karesi alınıp reel ve imajiner kısımları eşitlenirse:

$$\beta^2 - \alpha^2 = \omega^2 \epsilon \mu \quad (2.33)$$

$$2\alpha\mu = \omega\mu\sigma \quad (2.34)$$

elde edilir. (2.33) ve (2.34) eşitlikleri (2.32)'de yerlerine konursa α ve β ;

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right)} \quad [\text{Np/m}] \quad (2.35)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right)} \quad [\text{rad/m}] \quad (2.36)$$

şeklinde bulunur. Elektrik alanla ilgili manyetik alan ise;

$$\vec{H} = -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \vec{E}(x) = -\hat{a}_z \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} = +\hat{a}_z \frac{\gamma}{j\omega\mu} (E_o^+ e^{-\gamma x} \pm E_o^- e^{+\gamma x}) \quad (2.37)$$

şeklinde bulunur. Yayılma ifadesi yerine konularak;

$$\begin{aligned} \vec{H} &= \hat{a}_z \frac{\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}}{j\omega\mu} (E_o^+ e^{-\gamma x} - E_o^- e^{+\gamma x}) \\ &= \hat{a}_z \sqrt{\frac{\sigma + j\omega\epsilon}{j\omega\mu}} (E_o^+ e^{-\gamma x} - E_o^- e^{+\gamma x}) \\ &= \hat{a}_z \frac{1}{\eta_w} (E_o^+ e^{-\gamma x} - E_o^- e^{+\gamma x}) \end{aligned} \quad (2.38)$$

elde edilir. Buradaki η_w kayıplı ortamın dalga empedansıdır ve,

$$\eta_w = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad [\Omega] \quad (2.39)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Kayıplı ortamda ilerleyen dalga için, genliğin başlangıçtaki değerinin $e^{\pm 1} = 0,368$ yani % 36,8'ine düştüğü mesafeye deri (cidar) kalınlığı denir. δ ile gösterilir ve;

$$\delta = \frac{1}{a} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} \pm 1 \right)}} \quad [\text{m}] \quad (2.40)$$

şeklinde ifade edilir. Deri kalınlığı frekans veya iletkenlik yükseldikçe küçülür. Elektromanyetik dalganın, dielektrik içinde ilerlediği her deri kalınlığı uzunluğunda 1 Neper = 8,686 dB azalır. İletkenler içinde dalgalar çabuk zayıflar.

$(\sigma/\omega\epsilon)$ oranına bakılarak (2.40) eşitliği daha basit hale indirgenebilir. $(\sigma/\omega\epsilon) \ll 1$ olan ortamlar iyi dielektriklerdir. $(\sigma/\omega\epsilon) \gg 1$ ortamlar iyi iletkenlerdir. Buna göre;

$$(\sigma/\omega\epsilon) \ll 1 \text{ için } \delta = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.41)$$

$$(\sigma/\omega\epsilon) \gg 1 \text{ için } \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.42)$$

olarak ifade edilebilir.

2.2. Temel Kavramlar

Elektromanyetik uyumluluk (EMU), mühendislik prensiplerinin, kompleks elektrik ve elektronik sistemlerin birlikte ve uyum içerisinde çalışmalarını sağlamak amacıyla uygulandığı çalışma alanıdır. Elektronik sistemlerin tatmin edici bir şekilde çalışabilmeleri için EMU prensiplerinin sağlanması gerekir. Konuyu daha iyi anlayabilmek için konunun tarihi gelişimine göz atmakta yarar vardır. (Şeker ve Çerezci 1997)

Bir elektronik sistemin bir alt elemanının, diğer bir alt elemanı ile veya diğer sistemlerle olan elektromanyetik girişim problemi, elektriksel sistemlerle çalışmaya başladığından beri yaklaşık olarak 1 asırdır bilinmektedir. Günlük hayatımızda elektronik cihazların yaygın olarak kullanılması ve gelecekte bu kullanımda büyük bir

artış olacağına beklenmesi dolayısıyla önümüzdeki yıllarda elektromanyetik uyumluluğa yoğun ilgi duyulacağı tahmin edilmektedir.

Haberleşmede kullanılan cihazlar çalışırken devrelerini ve elemanlarını civardaki elektrik ve manyetik alanın etkisine karşı korumak gerekir. Bu elektromanyetik alanın kaynağı; daimi mıknatıslar, transformatörler ve telefon hatları olabilir. Böyle bir durum için imal edilen cihazın, interferans (girişim) etkisinden izole edilerek ekranlanması önemli bir problemdir. Aksi takdirde örneğin manyetik şerit üzerindeki bilgiler, kuvvetli elektromanyetik alanların etkisi sonucu zarar görebilir hatta tamamen yok olabilir. Manyetik şeritler bu yüzden, ekranlanmış ünitelerde depolanmalıdır.

Bobin ve transformatörler, güçlü mıknatısların yanına monte edildiklerinde, performansları bozulabilir. Örneğin rezonans devresinin frekansı kayabilir. Benzer problemler, mikrodalga cihazlarında ve devrelerinde de vardır. Ölçme yapan herhangi bir kimsenin, elde ettiği ölçünün kesin olarak doğru olduğundan emin olması imkansızdır. Bu nedenle mikrodalga ölçmelerinde mikrodalga ekranlarının dizayn edilmesi gereklidir. Böyle bir ekranlama, ekran içindeki elektromanyetik alanın dışarı kaçmasını engellediği gibi, tersine dışarıdan içeriye elektromanyetik enerjinin girmesini de önler. Teorik olarak; bir verici, verilen enerjiyi iletebilmeli, alıcıda yalnız onu olmalıdır. Bu olay normal bir laboratuarda asla gerçekleşmez. Çünkü elektronik cihazların parçaları her an için elektriksel enerjiyi alabilir veya yayabilirler. Ayrıca elektriksel enerjinin bir kısmı, laboratuvar duvarları ve laboratuvardaki cihazlar tarafından yansıtılabilir. Bu nedenle laboratuvardaki elektronik cihazlar sürekli olarak, arzu edilmeyen kaynaklardan gelen enerjiye maruz kalırlar. Bir cihazın dizaynında, ideal olarak istenmeyen enerjiyi yayınlamaması ve arzu edilmeyen herhangi bir enerjiye karşı duyarlı olmaması istenir. Bunun başarılması için, dış ortam cihaza kapatılır ve böylelikle ister dışarıdan içeriye ister içeriden dışarıya yönelmiş olsun, istenilmeyen enerjinin efektif olarak zayıflaması sağlanır.

Diğer interferans kaynakları arasında, dünyanın manyetik alanı sayılabilir. Bu alan, deney, araştırma ve tesislerde kesin sonucunun elde edilmesini engelleyici bir faktör olabilmektedir. Yapılarda kullanılan çelikler diğer ferromanyetik özellikli cisimler, istenmeyen manyetik özellikli çevrenin oluşmasına neden olurlar. Modern yapı tekniğinde, tavanların tutulması ve binaların dayanıklı olması için çelik çubukların fazlaca kullanılması, manyetik problemlerin artmasına neden olmuştur. Bu yüzden

laboratuvar araştırmaları ve cihaz üretiminde, performansı olumsuz yönde etkileyen manyetik alanlardan korunma sıklıkla düşünölmüştür. Ekranlama probleminin en zor olduğu durum, birçok verici ve alıcı ile diğer duyarlı cihazın birbirine yakın olarak bir arada monte edildiği hareketli sistemlerde ortaya çıkar. Radyoastronomi, güdümlü mermi, uydu ve uzay izleme cihazları için de ekranlamanın başariılması hayli zordur. Mikrodalga yutucular, tam yansız odalarda veya test hücrelerinde bir sistemin kontrolü için kullanılırlar. Tam yansız odalar, duvarlarına çarpan enerjinin çoğunu yutmak suretiyle serbest uzayın bir benzerini oluşturur.

EMU problemini tartışmak için, kullanılan bazı terimleri ve kısaltmaları belirtmek gerekir. Girişim sözcüğü ilk çalışmalarda, sistemde zayıflamaya neden olan; ses, istenmeyen sinyal gibi olayları tarif etmek için ve bozulmak kelimesi yerine kullanılmıştır. Elektromanyetik girişim (Electromagnetic interference, EMI) sonucunda elektronik cihaz ve sistemlerin fonksiyonlarında bozulmalar meydana gelir.

Birçok alanda EMU problemi ile karşılaşmak mümkündür. Bu nedenle, problemlerin boyutları hakkında bir fikir vermek üzere, aşağıdaki başlıklar günümüzde önem kazanmışlardır:

- 1. Askeri Sistemler:** Buradaki problem, elektromanyetik koruma için karşı önlemler içerir. Amaçlanan gelişme, mikrodalga silahlar ve ekranlama teknolojileri kullanımına geçilmesidir. Savaş koşullarında radar ve iletişim sistemleri de ayrıca önemlidir.
- 2. Elektrostatik Deşarjlar:** Bu başlık altında incelenecek ana konu, mikroçiplerin satış ve işletme sırasındaki tahribatıdır. Bunun yanında uçaklardaki ve arabalardaki elektrostatik boşalmalar ayrıca incelenmesi gereken önemli bir konudur.
- 3. Besleme Sinyalleri:** RF sinyalleri, vericileri için kullanılan besleme kaynaklarına olan ihtiyaç paralelinde, girişim problemlerinde artış oluşturur.
- 4. Besleme Kaynağının Bozunumu:** Bu, birçok nedenden kaynaklanabilir.
- 5. Spektrumun Yararlı Biçimde Kullanımı:** Kanuni veya kanunsuz radyo frekansı kullanıcılarının, sınırlı olan RF spektrumun kullanımında yol açtığı artışlar, birçok RF interferans problemini de beraberinde getirmektedir.
- 6. Tartışma ve Patlama Tehlikeleri:** Radyo istasyonlarındaki yayını, yanıcı buharların bulunduğu petro-kimya ve benzer endüstriyel tesislerdeki (örneğin uçakların yakıt ikmali) potansiyel tehlikeyi artırmaktadır. Gelecekte, halk bandı telsizlerinin

özelliklerinin yasal olarak izin verilen maksimum verici gücünü aştığı durumlarda; petrol istasyonları ve kuyularının, civarın tutuşma ve patlama riski artacaktır.

7. Elektrik Sistemlerinin Arızası: Elektrik ve elektronik sistemlerinin çeşitli nedenlerden ötürü oluşan girişimler sonucu ortaya çıkan hatalı çalışmalardır.

8. Data Güvenliği: Modern bilgisayar sistemleri, yerleştirildikleri noktadan çok uzaklara oluşan yüksek frekans harmonikli ışına yapan hızlı lojik devrelerle çalışırlar. Bu emisyon, güvenli kabul edilen sistemler için de bir tehdit oluşturur.

2.3. Ekranlamanın Amacı

Ekranlamanın amacı, yayılan enerjiyi özel bir bölge sınırları içinde tutmak ya da yayılan enerjinin özel bir bölgeye girmesini önlemektir. Ekranlama etkinliği, ekranlanan bölgeye giren ve çıkan alanın şiddetindeki desibel olarak azalma ile karakterize edilebilir. Ekranlama ile sağlanan zayıflamanın üç nedeni vardır:

- ❖ Gelen enerji hava-metal sınırının empedans süreksizliğinden dolayı ekranın yüzeyinden yansır. Bunun için özel bir malzeme kalınlığı gerekmez.
- ❖ Ekran yüzeyini geçen, yani yansımamış enerji ekranın içinden geçerken zayıflar.
- ❖ Ekranın karşı yüzüne ulaşan enerji öteki metal-hava sınırı ile karşılaşır ve böylece bir kısmı ekranın içine geri yansır.

2.4. Elektronik Ürünlerin Ekranlanması

Ekran kelimesi genellikle metalik bir kaplamayı göstermiş olup, elektronik cihazın tümünü veya bir kısmını kaplar. Bu işlem iki amaçla yapılır birincisi; radyasyonun elektronik cihazın dışına çıkışını veya dışarıdaki bir radyasyonun cihaza girişini, ikinci amaç ise; girişim olayını önlemektir. Ekranlama, örneğin yüksek güçlü radarlar veya radyo ve tv vericileri gibi dış sinyallere karşı duyarlı olan elektronik cihazların hassasiyetini azaltmak amacıyla gütmektedir. Bundan dolayı kavramsal olarak ekran; elektromanyetik alanların geçişine karşı yapılan bir engel olarak tanımlanabilir. Bir ekranın etkinliği veya verimi; bir ekran üzerine düşen elektrik ve manyetik alan şiddetinin ekrandan geçen dalganın alan bileşenine oranı olarak da tanımlanabilir. (Şeker ve Çerezci 1994)

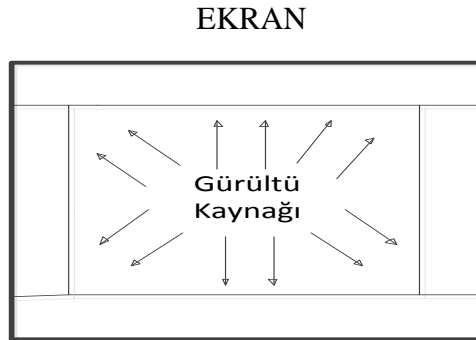
Ekranlamanın etkili olması ekranlanacak kaynağın cinsine bağlıdır. Ekranlama probleminde iki tip girişim kaynağı söz konusudur; elektrik dipolü gibi davranan kaynaklar, manyetik dipolü gibi davranan kaynaklar. Elektrik dipolü yakınında güçlü

elektrik alan, manyetik dipol yakınında ise güçlü manyetik alan oluşur. Uzak alanda iki kaynağın etkileri açısından bir fark yoktur öyle ise elektrik dipol gibi davranan girişim kaynağı yakınında elektriksel ekranlama, manyetik dipol gibi davranan girişim kaynağı yakınında manyetik ekranlama gereklidir.

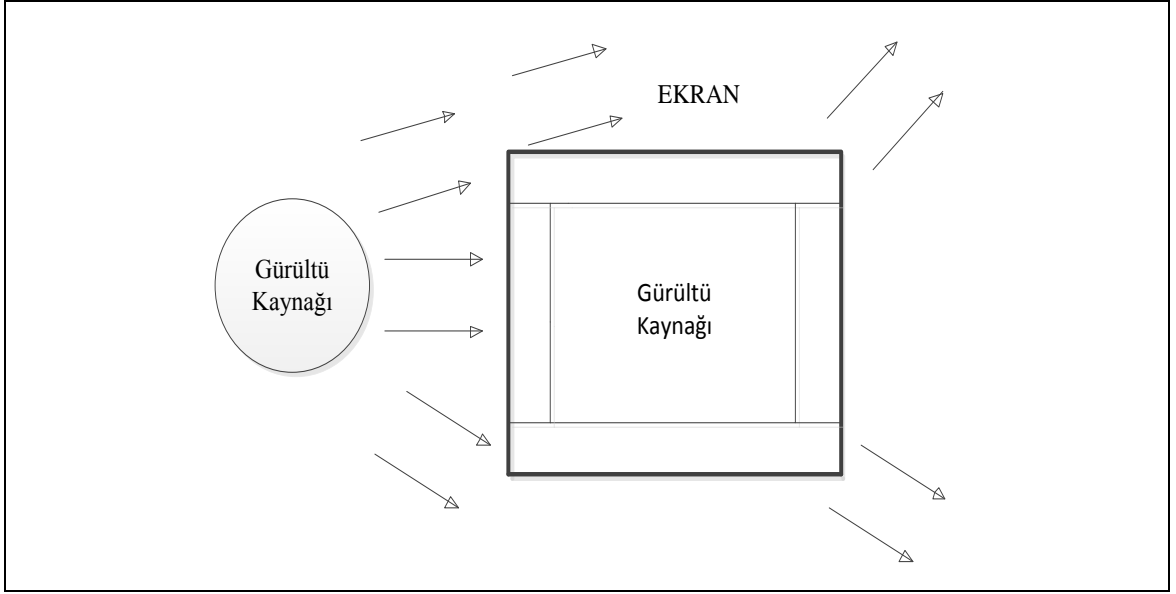
Elektriksel ekranlama için mükemmel iletken duvarlar kullanılırken, manyetik ekranlama ferromanyetik malzemelerden oluşan filtrelerle sağlanır. Kalınlığı t olan kayıplı bir duvar, elektromanyetik dalgaları üç şekilde zayıflatır. Birincisi duvardan yansımalarıdır. İkincisi duvar içinde yutulma, üçüncüsü ise duvar içindeki ardışıl yansıma kayıplarıdır. (Sevgi, 2000) Eğer ekran kapalı bir çevre ise Şekil 2.1.' de gösterildiği gibi ekran içinde elektromanyetik alan kaynağı olabilmektedir. Bu konşekilasyon ekranı dışına yerleştirilmiş duyarlı bütün cihazlar için bir koruma sağlamaktadır. Bir ekran ayrıca şekil 2.2' de gösterildiği gibi bölgenin dışından gelen elektromanyetik yayılımı da engelleyebilir. Bu, ekran içindeki özel cihazlar için bir koruma sağlar. Sistemin genelinde gürültü kaynağının ekranlanması, alıcının ekranlanmasından daha etkilidir. (Qtt 1988)

2.4.1. Yakın alan ve uzak alan

Bir alanın karakteristiği kaynak, kaynağın bulunduğu ortam, kaynakla gözlem noktası arasındaki mesafe ile belirlenmektedir. Kaynağa yakın noktada olan özellikleri kaynak karakteristikleri ile birlikte öncelikle belirlenmelidir. Kaynaktan uzakta; alanın özellikleri, alanın yayıldığı ortama bağlıdır. Bu neden şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir kaynaktan yayılım iki bölge içinde olmaktadır. Kaynağın yakınında yakın alan veya indüklenen alan, $\lambda/2\pi$ ' den daha büyük mesafelerde ise uzak olarak tanımlanmaktadır. $\lambda/2\pi$ bölgesi civarı ise yakın alan ve uzak alan bölgesi arasında bir geçiş bölgesidir. (Qtt 1988)

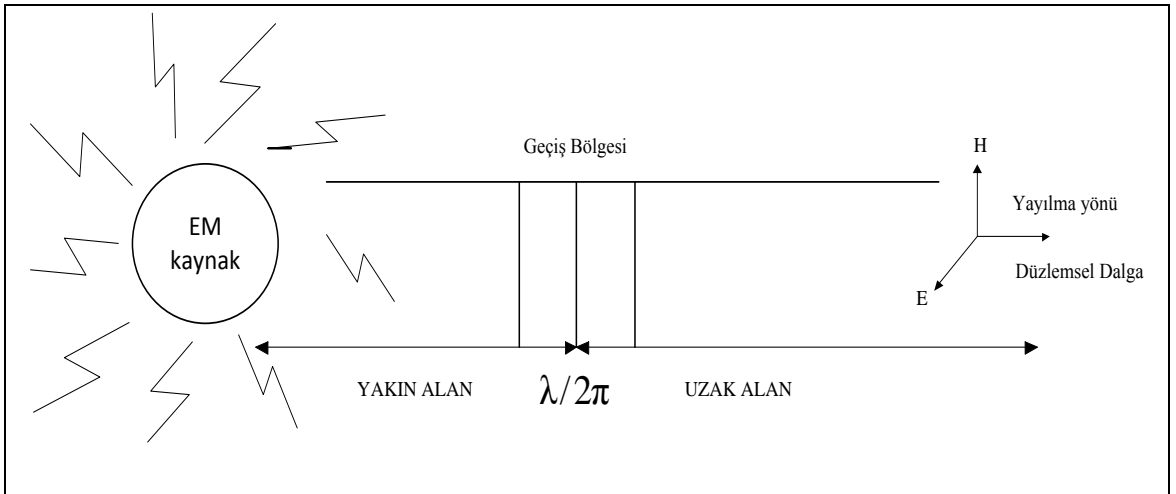


Şekil 2.1. Ekranın dışında bulunan ortamın girişimden korunması için kullanılan ekran modeli

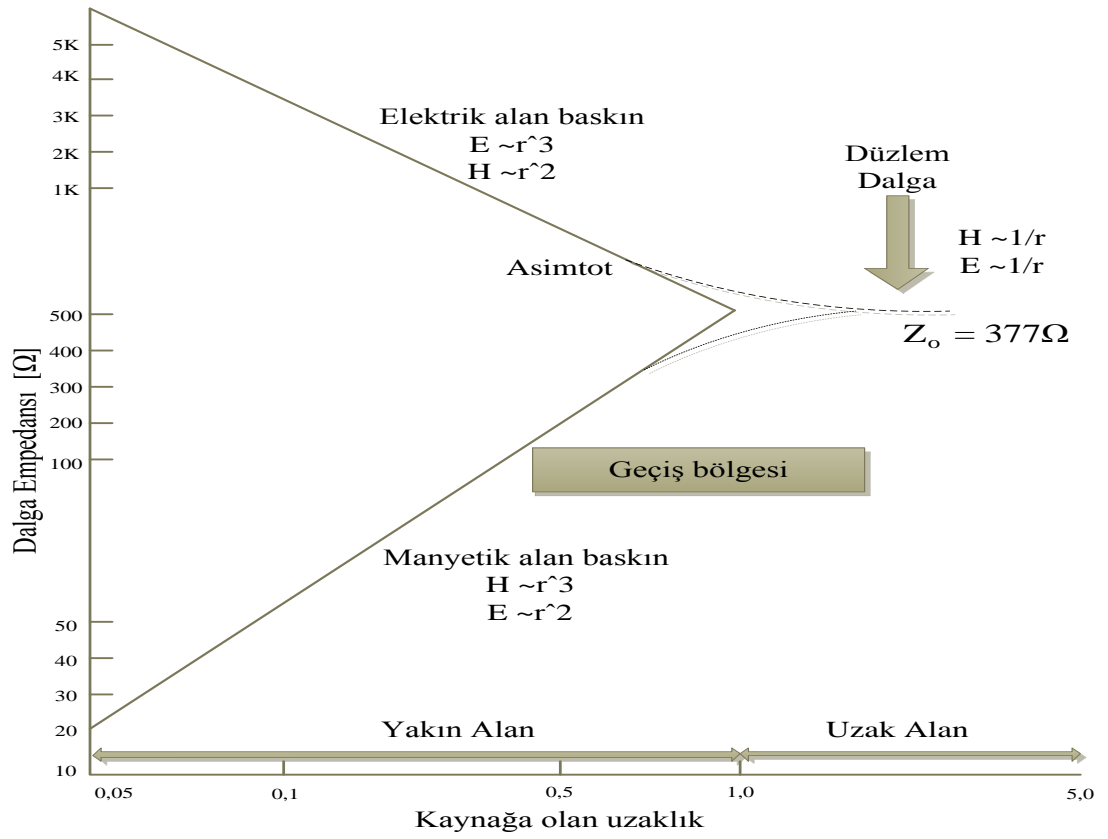


Şekil 2.2. Ekranın içinde bulunan ortamın girişimden korunması için kullanılan ekran modeli

\vec{E} Elektrik alanın, \vec{H} manyetik alana oranı dalga empedansı olarak tanımlanır. Uzak alan için bu \vec{E}/\vec{H} oranı, ortamın karakteristik empedansına eşittir (Hava ve serbest uzayda $\vec{E}/\vec{H} = \eta_0 = 377\Omega$ 'dur). Yakın alanda ise bu oran kaynaktan olan mesafeye ve kaynağın karakteristiği ile belirlenir. Eğer kaynak düşük voltaj, yüksek akıma sahipse ($\vec{E}/\vec{H} < 377\Omega$) yakın alanda manyetik alan baskın, eğer kaynak yüksek voltaj, düşük akıma sahipse ($\vec{E}/\vec{H} > 377\Omega$) yakın alanda elektrik alan baskındır. (Özen ve Arı 2008)



Şekil 2.3. Kaynaktan olan mesafe ile alan karakteristiğinin değişimi



Şekil 2.4. Elektrik veya manyetik alan olması durumu için kaynaktan olan mesafe ile dalga empedansının değişimi

Yakın alanda elektrik alan $(1/r)^3$ oranı ile zayıflar, ancak manyetik alan ise $(1/r)^2$ oranı ile zayıflamaktadır. Bu nedenle şekil 2.4.'de gösterildiği gibi dalga empedansı uzak alan için serbest uay empedansına asimptotik olarak yaklaşmaktadır. Manyetik alanın baskın olduğu durum için, anten yakınındaki dalga empedansı düşüktür. Kaynaktan olan mesafe artarken manyetik alan $(1/r)^3$ oranı ile zayıflar, elektrik alan ise $(1/r)^2$ oranı ile zayıflamaktadır. Dalga empedansı bu nedenle mesafe ile artmakta, $\lambda/2\pi$ mesafesinde serbest uzayinkine yaklaşmaktadır. Uzak alanda elektrik ve manyetik alanın her ikisi de $1/r$ oranı ile zayıflar. Yakın alanda elektrik ve manyetik alan ayrı ayrı göz önüne alınmalıdır ve bu bölgede birbirlerine oranı sabit değildir. Uzak alanda ise gelen elektrik ve manyetik alan düzlem dalga olarak alınır ve serbest uay için empedansı 377Ω 'dur. (Özen ve Arı 2008)

2.4.2. Karakteristik empedans ve dalga empedansı

Bir ortamın karakteristik sabitleri:

Permeabilite: Serbest uzay için $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]

Dielektrik sabiti: Serbest uzay için $\epsilon = 8,85 \times 10^{-12}$ [F/m]

İletkenlik: Bakır için $\sigma = 5,82 \times 10^7$ [mho/m]

şeklindedir. Herhangi bir elektromanyetik dalga için dalga empedansı şu şekilde hesaplanır: (Qtt, 1988)

$$\eta_w = \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \quad [\Omega] \quad (2.43)$$

Ortamın karakteristik empedansı ise;

$$\eta_o = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad [\Omega] \quad (2.44)$$

şeklinde ifade edilir. Uzak alan bölgesinde düzlem dalga için η_o dalga empedansına eşittir. Yalıtkanlar için ($\sigma \ll j\omega\epsilon$) karakteristik empedans frekanstan bağımsızdır ve;

$$\eta_o = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [\Omega] \quad (2.45)$$

$$\eta_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1 + j) \quad [\Omega] \quad (2.46a)$$

$$|\eta_m| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \quad (2.46b)$$

şeklinde ifade edilir. Bakır için 1 kHz'de $|\eta_m| = 1,16 \times 10^{-5}$ değerine eşittir. Herhangi bir iletken için genel olarak ekran empedansı:

$$|\eta_m| = 3,68 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \times \sqrt{f} \quad (2.47)$$

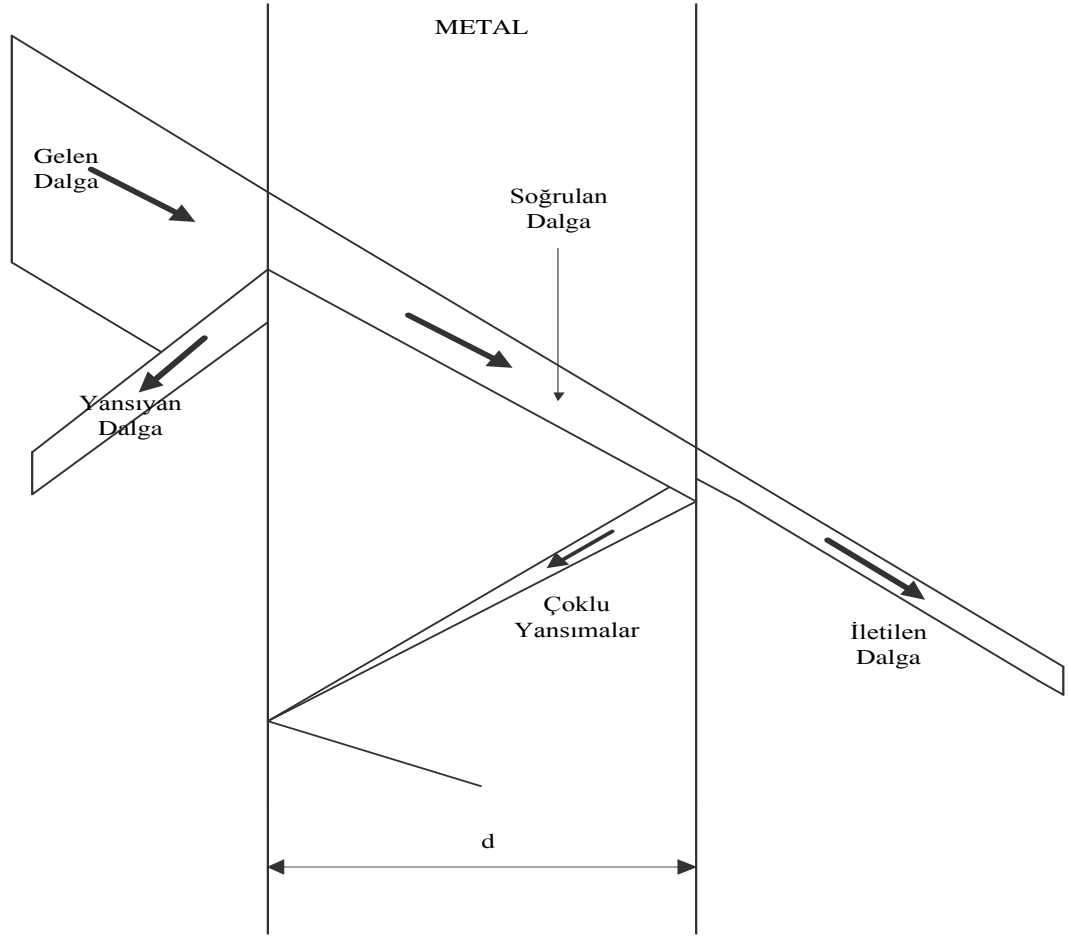
şeklinde ifade edilebilir. Farklı materyaller için bağıl permeabilite (μ_r) ve bağıl iletkenlik (σ_r) değerleri Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Değişik materyallerin bağıl iletkenlik ve permeabiliteleri

Malzeme	σ_r	μ_r	$\sigma_r \times \mu_r$	σ_r / μ_r
Gümüş	1,05	1	1,05	1,05
Bakır	1	1	1	1
Altın	0,7	1	0,7	0,7
Alüminyum	0,61	1	0,61	0,61
Pirinç	0,26	1	0,26	0,26
Bronz	0,18	1	0,18	0,18
Teneke	0,15	1	0,15	0,15
Kurşun	0,08	1	0,08	0,08
Nikel	0,2	100	20	2×10^{-3}
Paslanmaz Çelik (1KHz)	0,02	500	10	4×10^{-5}
Çelik (SAE 1045)	0,1	1000	100	1×10^{-4}
Mumetal (1kHz)	0,03	20000	600	$1,5 \times 10^{-6}$
Süper İletken (1KHz)	0,03	100000	3000	3×10^{-7}

2.5. Ekranlama Verimi Hesabı

Ekranlama; alıcı ve verici arasında, elektromanyetik dalganın ilerlediği yola metal bir bariyer yerleştirme işlemidir. Metal bariyerin karakteristik empedansı 2.46a' daki gibi hesaplanmaktadır. Bu empedans değeri optik bölgenin altındaki frekanslarda iyi iletkenler için oldukça küçüktür. Buna göre ekranlama teorisi, şekil 2.5.' teki metal yüzeyden yansıma ve metal boyunca iletim davranışını baz alarak kurulur. Bu kısımda, şekilde gösterilen t kalınlıkta, σ iletkenliğinde, ϵ_r dielektrik katsayısında ve μ_r manyetik geçirgenliğindeki bir tabaka veya ekran engel problemini ele alalım. Problemden bir elektromanyetik dalga bu tabakaya çarpmaktadır. Tabaka çarpan dalganın bir kısmı yansırken, geri kalan kısmı da geçer. Kaynaktan gelen elektromanyetik dalganın, ekran empedansı ve geldiği ortamdaki dalga empedansı arasındaki uyumsuzluk nedeni ile, düşük empedanslı ekran yüzeyinden bir kısmı yansımaktadır. Ekran içindeki kısmi zayıflamadan sonra geriye kalan kısım iletilir. (Kodali 1998)



Şekil 2.5. Düzlem dalgalar için ekranlama mekanizmasının gösterimi (Özen ve Arı 2008)

Elektrik alan için tanımlanan ekranlama verimi desibel olarak; (Şeker ve Çerezci 1997)

$$SE = 20 \log \left| \frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_t} \right| \quad [\text{dB}] \quad (2.48)$$

şeklinde ifade edilir. Burada \bar{E}_i , gelen dalganın elektrik alan şiddeti, \bar{E}_t ise tabakadan geçen dalganın elektrik alan şiddetini gösterir. Tabakaya gelen alanın, tabakayı geçen alandan daha büyük olması dolayısıyla sonuç pozitif olacaktır. Fakat oran \bar{E}_t/\bar{E}_i alınırsa, sonuç negatif çıkacaktır ki bu oran geçme katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Örneğin 120 dB' lik ekranlama verimi demek; gelen alanın büyüklüğünün geçen alanın büyüklüğünün 10^6 katına eşit olduğu anlamına gelir. Ekranlama verimi manyetik alan cinsinden desibel olarak;

$$SE = 20 \log \left| \frac{\bar{H}_i}{\bar{H}_t} \right| \quad [\text{dB}] \quad (2.49)$$

şeklinde ifade edilir. Burada \bar{H}_i , gelen dalganın manyetik alan şiddeti \bar{H}_t ise tabakadan geçen dalganın manyetik alan şiddetini gösterir. Ekranlamanın performansını belirleyen ekranlama verimliliği, gelen dalganın frekansına bağlı olup, düşük frekanslarda quasi statik sistemlerde (2.48) ve (2.49)'da olduğu gibi ayrı ayrı ifade edilir. Yüksek frekanslarda \bar{E} ve \bar{H} birlikte ele alındığı için, ekranlama verimi güç akışı anlamında;

$$SE = 10 \log \frac{\bar{P}_i}{\bar{P}_t} \quad [\text{dB}] \quad (2.50)$$

şeklinde yazılabilir. Burada \bar{P}_i ve \bar{P}_t , daha önce alan bileşenlerinde tanımlandığı gibi sırasıyla; gelen ve geçen güç akışını göstermektedir.

Ekran kabini dizaynında göz önüne alınması gereken iki önemli parametre vardır. Bunlar: (Sevgi, 2000)

1. Ekran materyalinin kendi ekranlama etkinliği
2. Ekrandaki boşluklar ve süreksizliklerin oluşturduğu ekranlama etkinliğidir.

İlk olarak boşluk veya ek yerleri olmayan bir ekranın ekranlama verimi (SE) belirlenir ve daha sonra boşluk ve süreksizliklerin etkisi göz önüne alınır. SE; frekansla, ekranın geometrisiyle, ekran içinde ölçüm yapılan konuma, zayıflamanın olduğu alan tipine, gelen alanın yönüne ve polarizasyona bağlıdır.

Bir metal yüzeye çarpan elektromanyetik dalganın bir kısmı iletken yüzeyden yansır ve bir kısmı da iletken içinde yutulur. Bu son etki absorpsiyon veya penetrasyon kaybı olarak da adlandırılan soğrulma kaybıdır. Aynı zamanda elektrik veya manyetik alan ile uzak ve yakın alan için bu etki aynıdır. Ayrıca yansıma kaybı alanın tipine ve dalga empedansına bağlıdır. Zayıflama kaybı küçük olduğunda ince ekran yüzeyleri arasında çoklu yansımalar oluşmaktadır. Buna göre toplam ekranlama verimi (SE) yansıma kaybı, soğrulma kaybı ve çoklu yansıma kayıplarının toplamı şeklinde ifade edilebilir. Toplam ekran verimliliği; soğrulma kaybı (S_A), yansıma kaybı (S_R) ve ince ekranlardaki çoklu yansıma kayıpları (S_{MR}) olmak üzere;

$$SE = S_A + S_R + S_{MR} \quad (2.51)$$

şeklinde ifade edilir. Burada toplam ekran verimliliği ifadeleri, çizelge 2.2.'deki gibi yakın alan ve uzak alanda pratik kullanım için üç grupta sınıflandırılmıştır. Bu ifadelerde $f(\text{Hz})$, $r(\text{m})$ ve $d(\text{m})$ olarak alınmıştır. (Özen ve Arı 2008)

Çizelge 2.2. Ekran Verimliliği Bağlıları

Uzak Alan	Yakın Alan	
Düzlemsel Dalga $\eta = 377\Omega$	Elektrik Alan Baskın $\eta > 377\Omega$	Manyetik Alan Baskın $\eta < 377\Omega$
$S_A = 131,8d\sqrt{f(\text{Hz})\sigma_r\mu_r}$	$S_A = 131,8d\sqrt{f(\text{Hz})\sigma_r\mu_r}$	$S_A = 131,8d\sqrt{f(\text{Hz})\sigma_r\mu_r}$
$S_R = 168,2 + 10\log\left(\frac{\sigma_r}{f\cdot\mu_r}\right)$	$S_{RE} = 321,74 + 10\log\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r\cdot r^3\cdot f^3}\right)$	$S_{RH} = 14,6 + 10\log\left(\frac{f\cdot r^2\cdot\sigma_r}{\mu_r}\right)$
$S_{MR} = 0$	$S_{MR} = 0$	$S_A > 10\text{dB ise}$ $S_{MR} = 29,6 + 10\log(f\cdot\mu_r\cdot\sigma_r\cdot d^2)$
$SE = S_A + S_R$	$SE = S_A + S_R$	$SE = S_A + S_R + S_{MR}$

3. METERYAL ve METOD

3.1. Analitik Yöntem

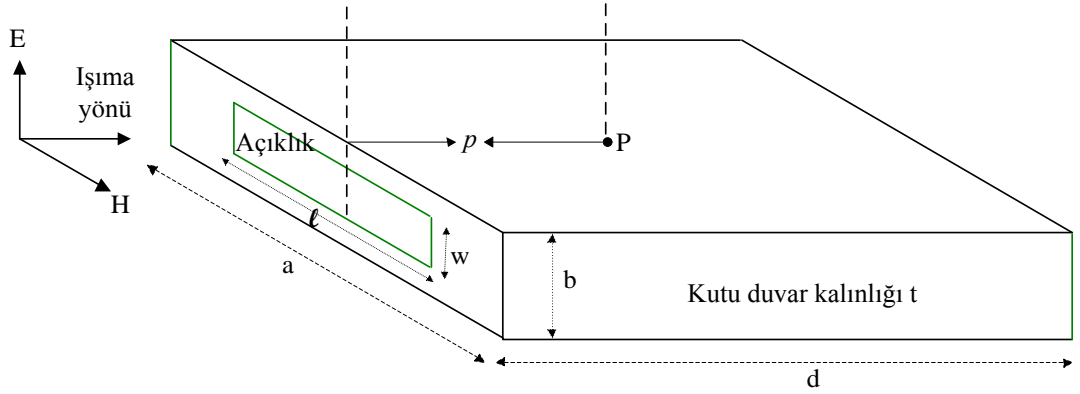
Ekranlama verimliliği nümerik veya analitik yöntem ile hesaplanabilir. Nümerik yöntem karmaşık model yapılarında kullanılabilirdiğinden üzerinde parçacık bulunan kutuların ekranlama hesabında iyi sonuçlar verebilmektedir. Elektrik ve manyetik ekranlama verimliliğinin parçacıklar üzerindeki etkisi; iletim hattı, sonlu farklar ve moment metod gibi nümerik yöntemler ile kolayca hesap edilebilir.

Analitik çözüm ise cihazın dizayn parametrelerinin ekranlama üzerindeki etkilerini hesaplamada daha anlaşılabilir sonuçlar vermektedir. Genellikle ampirik denilen gözleme dayalı analitik yöntemler kullanılırken bu tez çalışmasında analitik çalışmada temel prensipler kullanılmıştır. Ampirik yönteme dayalı çalışmaların çoğu Bethe'nin, sadece çok küçük deliklere uygulanabilen, deliklerden kaynaklanan kırınım teorisini baz almaktadırlar.

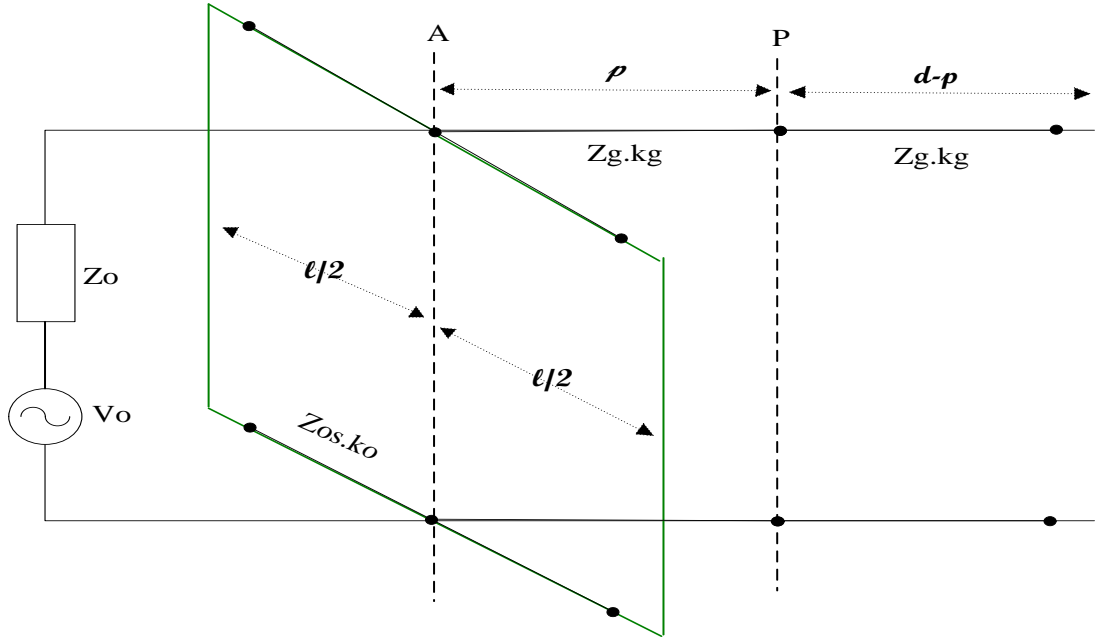
Bu bölümdeki analitik yöntemde, Mendez'in çalışmasını takip ederek metalik kutunun TE_{10} yayılım moduna sahip dalga klavuzu olarak kabul edilmiştir. Elektrik ve Manyetik ekranlama verimi; frekans, delik boyutları, kutu boyutları, kutu duvar kalınlığı, kutu uzaklık pozisyonu verilerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. (Mendez H.A. 1978)

3.2. Teorik Çözüm ve Formülasyon

Üzerinde dikdörtgen delikleri olan dikdörtgen kutunun eşdeğer devre modeli şekil 3.7'de görülmektedir. P noktasında oluşan gerilim elektrik ekranlama verimliliğini ve P noktasındaki akım da manyetik ekranlama verimliliğinde etkindir. Kaynak gerilimi V_0 ve kaynak empedansı ise $Z_0 = 377\Omega$ 'dir. Kutu ile ilgili olarak, kısa devre olan dalga klavuzunun karakteristik empedansı Z_g ve yayılım sabiti de k_g ile gösterilir. P noktasındaki empedans ve gerilimi hesaplamak için ilk önce açıklığın (deliğin) eşdeğer empedansı bulunur ve iletim hattı ile dönüşüm uygulanır. (Robinson M.P. 1996)



Şekil 3.6. Üzerinde açıklık bulunan dikdörtgen kutu



Şekil 3.7. Üzerinde açıklık olan kutunun eşdeğer devresi

3.2.1. İletim hattı empedansı ve açıklık empedansı

Kutudaki açıklık, düzlemsel şerit iletim hattının bir parçası olarak kabul edilir. Çünkü sadece kutunun ön yüzeyindeki akımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Toplam en uzunluğu, kutu en uzunluğuna ve açıklık en uzunluğu w 'ye eşittir. İletim hattı karakteristik empedansı Gubta vd. tarafından belirlenmiştir. İletim hattı karakteristik empedansı:

$$Z_{os} = 120\pi K \frac{K(w_e/b)}{K'(w_e/b)} \quad (\Omega) \quad (3.52)$$

şeklinde tanımlanır. Burada K ve K' eliptik tımlevlerdir. Efektif en uzunluğu ise:

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t}\right) \quad (3.53)$$

şeklinde tanımlanır. Burada t kutu duvar kalınlığıdır. Gupta vd'e göre birçok pratik açıklık için $w_e < b/\sqrt{2}$ 'dir. Bu koşulu sağlayan durumlarda açıklığın karakteristik empedansı için: (Gupta K.C. 1979)

$$Z_{os} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt[4]{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1} \quad (\Omega) \quad (3.54)$$

eşitliği kullanılır. Açıklıklığın empedansını hesaplamak için açıklık uzaklığının $\ell/2$ 'ye geldiği en sonda kısa devre uygulanır. şekil 3.2'deki A noktasında eşdeğer devre modeli görülebilir. Açıklık empedansı:

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{\ell}{a} jZ_{os} \tan \frac{k_0 \ell}{2} \quad (\Omega) \quad (3.55)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $k_0 = 2\pi/\lambda$ 'dır. Bu denklemler iletim hattı ve dalga klavuzu bağlantısı arasındaki hesaplamalara karşılık gelir. (Robinson M.P. 1998)

3.2.2. Elektrik ve manyetik ekranlama verimi

Thevenin Teoreminden yola çıkılarak Z_o, v_o ve Z_{ap} bileşiminden eşdeğer v_1 gerilimi ve kaynak empedansı hesaplanarak:

$$v_1 = v_o \left(\frac{Z_{ap}}{Z_{ap} + Z_o} \right) \quad (\text{dBV}) \quad (3.56)$$

$$Z_1 = \left(\frac{Z_o * Z_{ap}}{Z_o + Z_{ap}} \right) \quad (\Omega) \quad (3.57)$$

eşitlikleri elde edilir. $k_0 = 2\pi/\lambda$ olmak üzere; dalga klavuzu karakteristik empedansı:

$$Z_g = \frac{Z_o}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \quad (\Omega) \quad (3.58)$$

ve dalga klavuzu yayılım sabiti:

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (3.59)$$

şeklinde tanımlanır. v_1, Z_1 ve dalga klavuzu son P noktasına kısa devre dönüşümü uygulanırsa eşdeğer gerilimi;

$$v_2 = \frac{v_1}{\cos k_g p + j(Z_1 / Z_g) \sin k_g p} \quad (\text{dBV}) \quad (3.60)$$

kaynak empedansı:

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \tan k_g p}{1 + j(Z_1 / Z_g) \tan k_g p} \quad (\Omega) \quad (3.61)$$

ve yük empedansı da:

$$Z_3 = jZ_g \tan k_g (d - p) \quad (\Omega) \quad (3.62)$$

olarak tanımlanır. Kutunun olduğu hesaplamada P noktasındaki gerilim ve akım sırasıyla:

$$v_p = v_2 \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \quad (\text{dBV}) \quad (3.63)$$

$$i_p = \frac{v_2}{Z_2 + Z_3} \quad (\text{dBA}) \quad (3.64)$$

şeklinde tanımlanır. Kutunun olmadığı referans hesaplamasının olduğu durumda P'deki yük empedansı Z_0 'a eşit olduğundan P noktasındaki gerilim ve akım sırasıyla:

$$v_p' = \frac{v_0}{2} \quad (\text{dBV}) \quad (3.65)$$

$$i_p' = \frac{v_0}{2Z_0} \quad (\text{dBA}) \quad (3.66)$$

şeklinde tanımlanır. Elektrik ve manyetik ekranlama verimliliği gerilim oranlarına bağlı olarak 3.67 ve 3.68'deki gibi verilir. (Robinson M.P. 1998)

$$SE_E = -20 \log_{10} \left| v_p / v_p' \right| = -20 \log_{10} \left| 2v_p / v_0 \right| \quad (\text{dBm}) \quad (3.67)$$

$$SE_M = -20 \log_{10} \left| i_p / i_p' \right| = -20 \log_{10} \left| 2i_p Z_0 / v_0 \right| \quad (\text{dBm}) \quad (3.68)$$

3.2.3. Formül kapsamını geliştirilmesi

Hesap ile bulunan bu değerlere elektromanyetik kayıplar, dairesel açıklıklar ve açıklıkların birden fazla olduğu durumların elektromanyetik ekranlama üzerine etkisi de göz önüne alınarak analitik çözümü geliştirebiliriz.

Dairesel kartlar, güç kaynakları ve birçok küçük ürünler kutu içerisinde elektromanyetik kayıplara neden olmaktadır. (Dawson J.F. 1992) I.D.Woods'a göre bu kayıpları özellikle rezonans frekanslarında görebiliriz. İlk yaklaşımımıza göre kutu

içerisinde dağılan bu kayıpları gösteren ζ düzeltme faktörünü, karakteristik empedans ve yayılım sabiti içine ekleyebiliriz. (Woods I.D. 1971) Bu pratik yaklaşımda geliştirilen ekranlama verimindeki yeni karakteristik empedans ve yayılım sabiti sırasıyla:

$$Z_g' = (1 + \zeta - j\zeta)Z_g \quad (3.69)$$

$$k_g' = (1 + \zeta - j\zeta)k_g \quad (3.70)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Turner vd.'leri, açıklık alanları aynı olan dairesel bir açıklık ile kare bir açıklığın ekranlama veriminin aynı olduğunu bulmuştur. Formüle dairesel açıklığı eklemek istersek d_h açıklık çapı olmak üzere: (Turner J.D. 1996)

$$\ell = w = d_h \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (3.71)$$

şeklinde tanımlanabilir. Kutu yüzeyinde n tane benzer yapıda açıklık olduğu durumlarda tek tek tüm açıklık empedansları formül kapsamına eklenmelidir. Seri olarak toplam açıklık empedansı:

$$Z_{ap} = n \frac{1}{2} \frac{\ell}{a} jZ_{os} \tan \frac{k_o \ell}{2} \quad (3.72)$$

şeklinde ifade edilebilir. Açıklıkların birbirine çok yakın olduğu durumlarda karşılıklı kuplajlardan kaynaklanan etkiyi teorik formüle eklemek hesaplamada mümkün olmadığından karşılıklı kuplaj etkisi bu durumda ihmal edilmiştir. (Robinson M.P. 1998)

3.3. Ekranlama Verimliliği'nin Teorik Olarak İncelenmesi

Bölüm 3.2.2'de verilen eşitliklere ait hesap kodları matlab ortamında yazılmış ve elektrik ve manyetik ekranlama veriminin hesabında kullanılmıştır. Teorik çözümde kullanılan kutu boyutları ve özellikleri çizelge 3.3'de, elektrik ve manyetik ekranlama verimi teorik çözümü ile bulunan formüllerin Matlab kodları ise şekil 3.8'de görülmektedir.

Çizelge 3.3. Analitik çözümde kullanılan aliminyum kutunun özellikleri

Açıklık Boyu	Açıklık Eni	Kutu Boyu	Kutu Eni	Kutu Derinliği	Kutu kalınlığı	Malzeme
$\ell = 7.5\text{cm}$	$w = 7.5\text{cm}$	$a = 80\text{cm}$	$b = 16\text{cm}$	$d = 16\text{cm}$	$t = 0.01\text{mm}$	Aliminyum
$\ell = 15\text{cm}$	$w = 3.75\text{cm}$	$a = 80\text{cm}$	$b = 16\text{cm}$	$d = 16\text{cm}$	$t = 0.01\text{mm}$	Aliminyum
$\ell = 30\text{cm}$	$w = 1.875\text{cm}$	$a = 80\text{cm}$	$b = 16\text{cm}$	$d = 16\text{cm}$	$t = 0.01\text{mm}$	Aliminyum

```

clc;
clear all;

% DEKLARASYONLAR..

w1=0.075; %Açıklık eni
l1=0.075; %Açıklık boyu
a=0.80; %Kutu boyu
b=0.16; %Kutu eni
d=0.16; %Kutu derinliği
t=0.00001; %Kutu kalınlığı
p=0.08; %Kutudaki alıcı antenin ön yüzeydeki açıklığa uzaklığı
Vo=1; %Kaynak gerilimi
Zo=377; %Kaynak empedansı

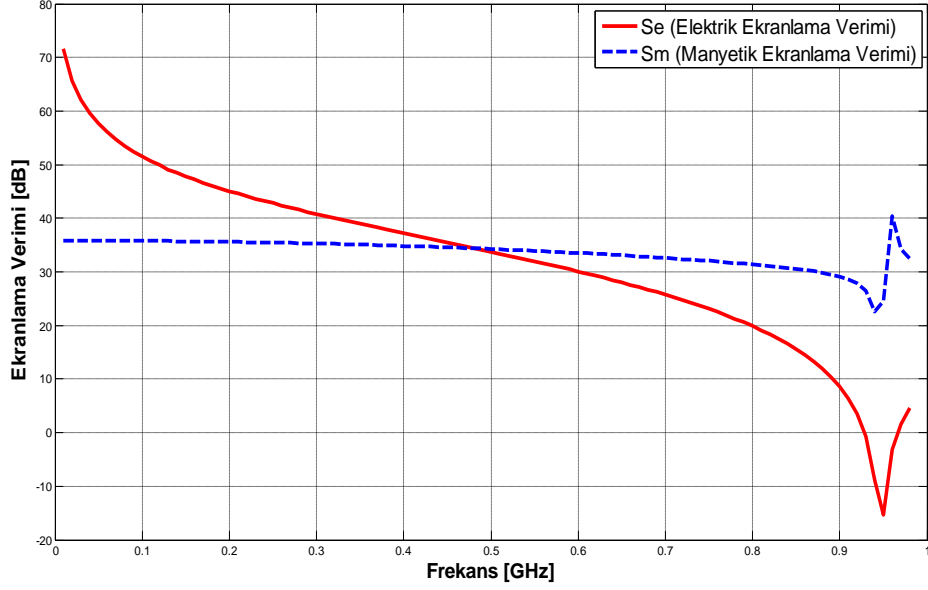
frekans=0:0.01:0.98;
We1=w1-(5*t)/(4*pi)*(1+log(4*pi*w1/t)); %İletim Hattının etkin en boyutu
m1=sqrt(sqrt(1-(We1/b)^2));
Zos1=120*(pi^2)*(log(2*(1+m1)/(1-m1)))^T; %İletim hattı empedansı
dboyu=0.3./frekans; %98 farklı feransın dalga boyu
Ko=(2*pi)./dboyu; %Sabit
Zap1=(1/2)*(1/a)*i*Zos1*tan(Ko.*(1/2)); %Açıklığın karakteristik empedansı(A noktasında)
V11=(Vo.*Zap1)/(Zo+Zap1); %Eşdeğer gerilim
Z11=(Zo.*Zap1)/(Zo+Zap1); %Kaynak empedansı
Zg=Zo./sqrt(1-(dboyu./(2*a))^2); %Dalga klavuzunun karakteristik empedansı
Kg=Ko.*(sqrt(1-(dboyu./(2*a))^2)); %Dalga klavuzunun 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); %P noktasındaki gerilim (Kutulu ölçüm)
Ip1=V21./(Z21+Z31); %P noktasındaki akım (Kutulu ölçüm)
Vpr1=Vo/(2*Zo); %P noktasındaki gerilim (Kutusuz referans ölçüm)
Ipr1=Vo/(2*Zo); %P noktasındaki akım (Kutusuz referans ölçüm)
Se1=-20*log10(abs(2*(Vp1./Vo))); %Elektrik Ekranlama Verimi
Sm1=-20*log10(abs(2*Ip1.*(Zo./Vo))); %Manyetik Ekranlama Verimi

figure
x=frekans;
plot(x,Se1,'r','LineWidth',3); hold on;
plot(x,Sm1,'b--','LineWidth',3);
h=legend('Se (Elektrik Ekranlama Verimi)','Sm (Manyetik Ekranlama Verimi)');
grid;
xlabel('Frekans [GHz]','fontsize',16,'fontweight','b');
ylabel('Ekranlama Verimi [dB]','fontsize',16,'fontweight','b');

```

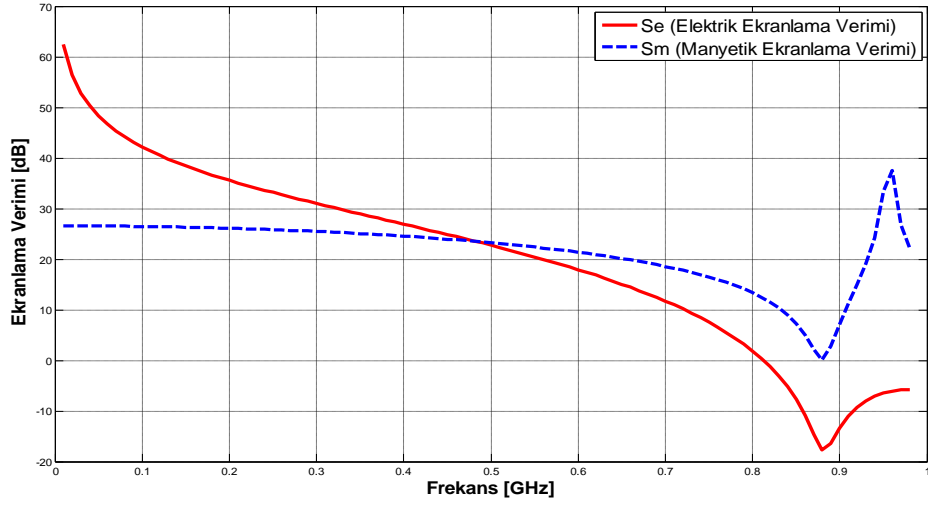
Şekil 3.8. Ekranlama verimi teorik çözümü için yazılan Matlab kodları

Şekil 3.9’de açıklık boyutu 7.5cm x 7.5cm olan kutunun elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri görülmektedir. Elektrik ekranlama verimi 72 dB’den başlayarak azalır ve 950MHz’de -15dB’ye kadar hızlı bir şekilde düşerek rezonansa uğramıştır. Manyetik ekranlama verimi ise, 36 dB’de aynı seviyede ilerleyerek 600MHz’den itibaren yavaş yavaş azalmış 940 MHz’de 22dB’ye kadar azaldığı ve rezonansa girdiği gözlemlenmiştir.



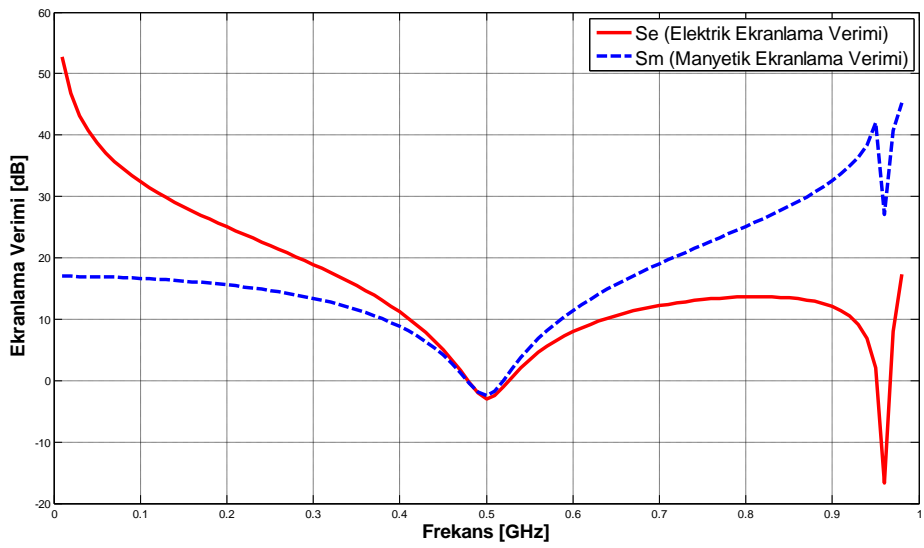
Şekil 3.9. Açıklık boyutu 7.5cm x 7.5cm olduğu durumda elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri

Şekil 3.10’de açıklık boyutu 15cm x 3.75cm olan kutunun elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri görülmektedir. Elektrik ekranlama verimi 63 dB’den başlayarak azalmış ve 880MHz’de -18dB’ye kadar düşerek rezonansa uğramıştır. Manyetik ekranlama verimi ise, 26 dB’den başlayarak aynı seviyede kalmış ve 500MHz’den itibaren yavaş yavaş azalarak 880 MHz’de 0dB’ye kadar ani düşüş ile rezonansa girdiği gözlemlenmiştir.



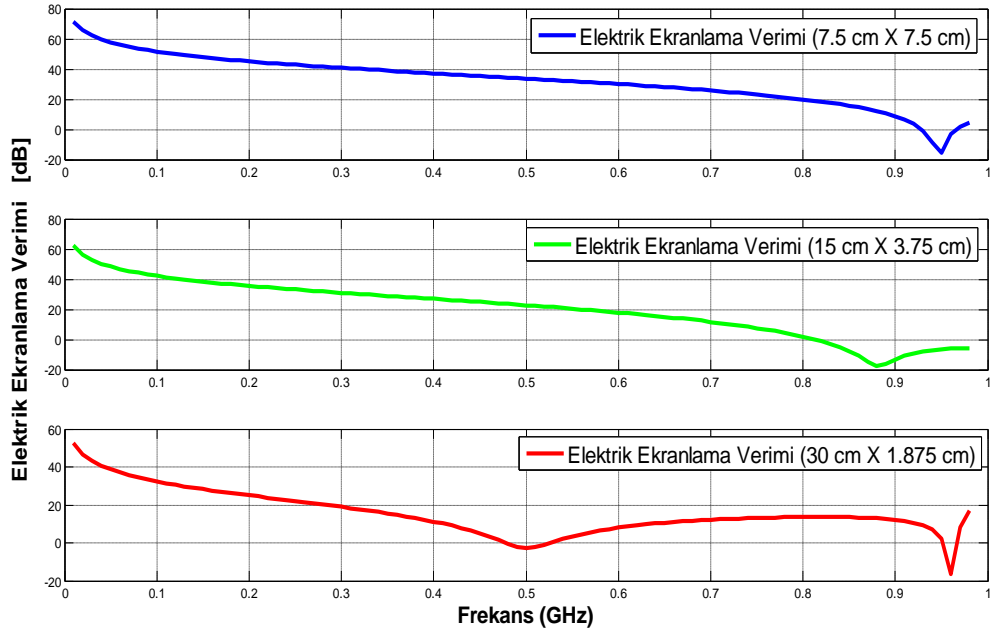
Şekil 3.10. Açıklık boyutu 15cm x 3.75cm olduğu durumda elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri

Şekil 3.11’de açıklık boyutu 30cm x 1.875cm olan kutunun elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri görülmektedir. Elektrik ekranlama verimi 53 dB’den başlayarak azalmış ve 500MHz’de -3dB’ye kadar düşerek 1. rezonansa, 960MHz’de ise -17dB’ye kadar ani düşüş ile de 2. rezonansa girmiştir. Manyetik ekranlama verimi ise, 17 dB’den başlayarak aynı seviyede ilerleyerek 300MHz’den itibaren yavaş yavaş azaldığı, 500 MHz’de -2dB’ye kadar düşerek 1. rezonansa girdiği, daha sonra artış göstererek 960MHz’de 26dB’ye kadar yaklaşık 16dB ani düşüş ile de 2. rezonansa girdiği gözlemlenmiştir.

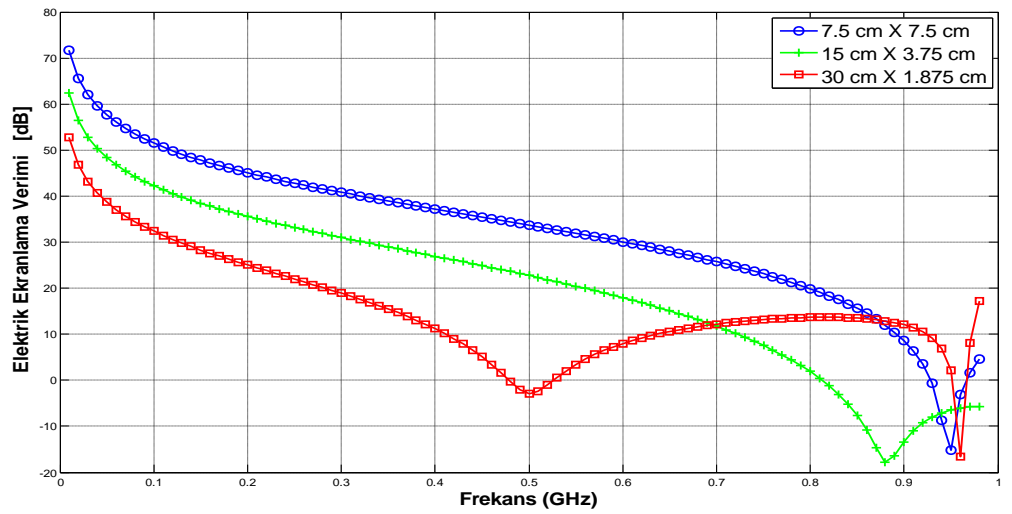


Şekil 3.11. Açıklık boyutu 30cm x 1.875cm olduğu durumda elektrik ve manyetik ekranlama verimi değerleri

Şekil 3.12 ve 3.13’da tüm kutular için elektrik ekranlama verimi değerleri görülmektedir. Ekranlama verimi değerinin 15 dB ile -15 dB arasında rezonansa girdiği görülmüştür. Ekranlama verimi değerlerinin 10Mhz’de yüksek değerlerden rezonans frekansına kadar belirli şekilde azaldığı ve rezonans frekansından sonra arttığı gözlenmektedir. Açıklıktaki en/boy oranının büyük olduğu durumlarda elektrik ekranlama veriminin daha yüksek olduğu da gözlenmektedir.

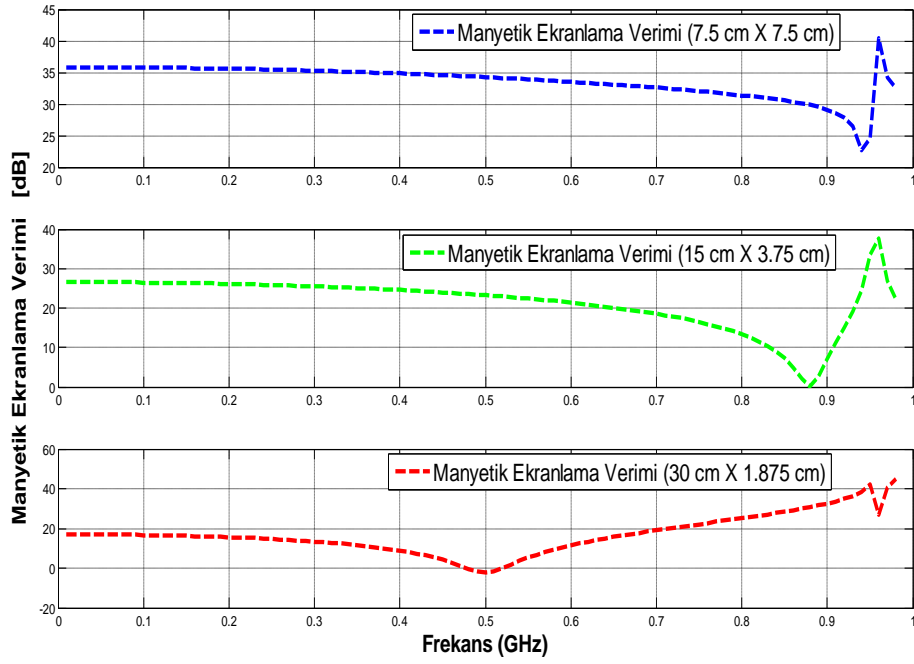


Şekil 3.12. Tüm açıklıklar için elektrik ekranlama verimi değerleri

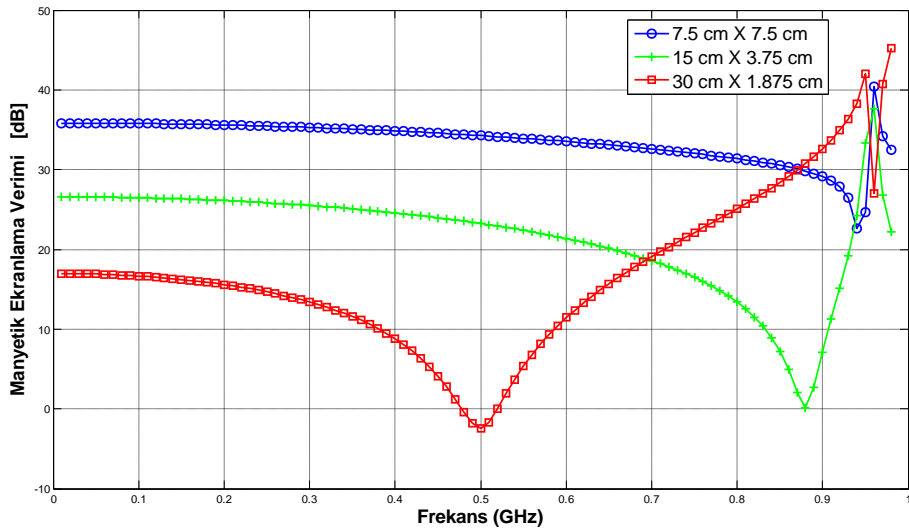


Şekil 3.13. Tüm açıklıklar için elektrik ekranlama verimi değerleri

Şekil 3.14 ve 3.15’de tüm kutular için manyetik ekranlama verimi değerleri görülmektedir. Ekranlama verimi değerinin 45 dB ile -25 dB arasında rezonansa girdiği görülmüştür. Ekranlama verimi değerlerinin 10MHz’de başladığı değerlerden rezonans frekansına kadar belirli şekilde azalma ya da artma göstermeden devam ettiği ve rezonans frekansında düşüş gösterdikten sonra yüksek bir artış olduğu gözlenmektedir. Açıklıktaki en/boy oranının büyük olduğu durumlarda manyetik ekranlama veriminin daha yüksek olduğu da gözlenmektedir.



Şekil 3.14. Tüm açıklıklar için manyetik ekranlama verimi değerleri



Şekil 3.15. Tüm açıklıklar için manyetik ekranlama verimi değerleri

4. BULGULAR

4.1. Yüksek Frekanslarda (6-13 GHz) Ekranlama Verimi Ölçümü

Tezin bu bölümünde belirtilmesi gereken iki önemli çalışma vardır:

1. Giriş bölümünde belirtildiği gibi literatürde tez konusuna paralel çalışmalar genelde 0-1000 MHz frekans aralığında yapılmıştır. Literatürde bugüne kadar yüksek frekanslarda yapılmış gerek ölçüm gerek teorik hesaplama olmadığından bu tez çalışması, literatürde bir ilk olma özelliği taşımaktadır.
2. Tez konusuna paralel literatürdeki çalışmaların tamamı ekranlama veriminin frekansa göre değişimi incelenmişken tezin bu bölümünde şekil 4.10 ve 4.11’de de gösterildiği gibi ekranlama veriminin dalga boyuna (açıklık alanının ölçüm yapılan frekansa ait dalga boyu biriminden ifadesi) göre değişiminin incelenmesi de literatürde bir ilk olma özelliği taşımaktadır.

Alanları $2\lambda^2$ ile $11\lambda^2$ arasında değişen metalik kutu açıklıklarının ekranlama verimi (SE) yansısız odada ölçülerek bu açıklıkların SE üzerine etkileri incelenmiştir. 6-13GHz frekans aralığında yapılan ölçümlerde SE değerinin; açıklıklardaki en/boy oranı 1’den 16’ya çıktığında düşük frekanslarda 6.5dB, yüksek frekanslarda 10dB arttığı ve rezonans frekanslarında ise ani azalış ile bazen birbiriyle örtüştüğü gözlemlenmiştir.

4.1.1. Ölçümde kullanılan elektrik alan SE teorik analizi

Literatürdeki birçok çalışmada belirtildiği gibi SE, gelen alan ve iletilen alan arasındaki logaritmik orana eşittir (Helhel 1997).

$$SE = 20 \log\left(\frac{E^r}{E^e}\right) \quad [\text{dB}] \quad (4.73)$$

Burada \vec{E}^r (V/m) ölçümde sadece alıcı ve verici antenin olduğu, metalik kutunun olmadığı (Ekranlamanın olmadığı) referans elektrik alan değeridir. \vec{E}^e ise, verici antenin metalik kutu içinde iken yapılan ekranlamanın olduğu elektrik alan değeridir. (4.73) eşitliğin çözülmesi için; ilk olarak ölçümde mW biriminde görülen güç değerleri ($P^{r,e}$), (4.74) eşitliği ile dBm birimine çevrildikten sonra (4.75)’de yerine konarak elektrik alan değerleri hesaplanmış olur (Helhel 1997).

$$E^{r,e} = \sqrt{P^{r,e} \cdot \eta_0} \quad [\text{V/m}] \quad (4.74)$$

$$P^{r,e} = 10 \log \left(\frac{P^{r,e} [\text{mW}]}{10^3} \right) \quad [\text{dBm}] \quad (4.75)$$

4.1.2. Test düzeneği ve ölçümler

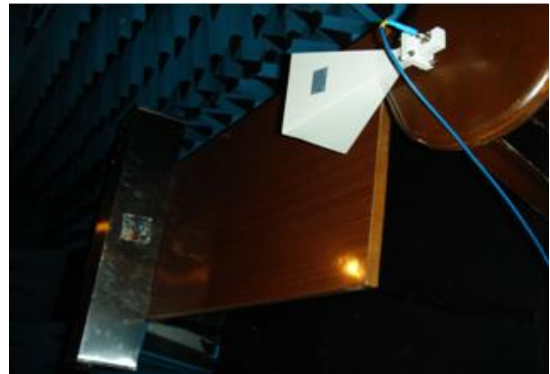
Test ölçümleri Akdeniz Üniversitesi, Endüstriyel ve Medikal Uygulama Mikrodalga Araştırma Merkezi'nde (EMUMAM) yansımaz odada yapılmıştır. Bu oda tam yansımaz oda olup 4m x 4m x 8m boyutlara sahiptir. Sinyal Jeneratörü, dc-41GHz frekans aralığında çalışabilen Rohde-Schwarz (SMF-100A) modeli RF sinyal verici olarak, spektrum analizör de dc-13 GHz frekans aralığında çalışabilen Agilent (E4405B-ESA-E Serileri) modeli de RF sinyal alıcı olarak kullanılmıştır. Sinyal jeneratörü, 5-13 GHz band genişliğine sahip geniş bandlı (Ultra wide band) mikroşerit antene, spektrum analizör ünitesi de 6-12 GHz aralığında Agilent (E4405B-ESA-E Serileri) denilen standart kazançlı koni antene bağlanarak ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. Alıcı ve verici antenler yerden 30cm yükseklikte referans tahta masa üstüne konumlandırılmıştır. Testte 3 metalik kutu kullanılmış olup her üç kutuda 15cm x 15cm x 80cm boyutta olup çizelge 4.4'de görüldüğü gibi 3 farklı açıklığa sahiptirler.

Çizelge 4.4. Metalik kutu ölçümleri

Kutu Boyutları	Alan Boyutları	
	En (cm)	Boy (cm)
15cm x 15cm x 80cm	30	1.875
15cm x 15cm x 80cm	15	3.75
15cm x 15cm x 80cm	7.5	7.5



(a) Kutusuz referans ölçüm



(b) Kutulu ölçüm (7.5x7.5cm)



(c) Sinyal Jeneratörü ve Spektrum Analizör

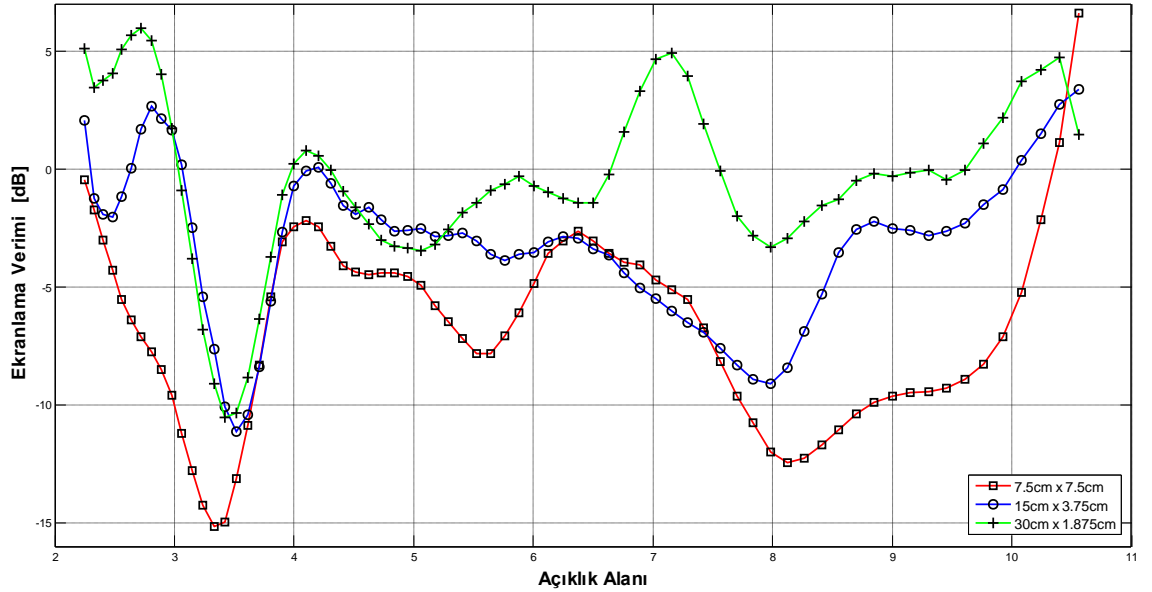


(d) En/Boy = $(30/1.875\text{cm}) = 16$

Şekil 4.16. Test Düzenegi

4.1.3. Ölçüm sonuçları

6-12GHz frekans aralığında her 100MHz için 60 ayrı ölçüm yapılmıştır. Şekil 17'de; açıklığın en/boy oranı 1'den 16'ya çıktığı durum için; düşük frekanslarda 6.5dB ve yüksek frekanslarda 10dB arttığı, rezonans frekanslarında ise hızlı bir şekilde azaldığı gözlenmiştir.



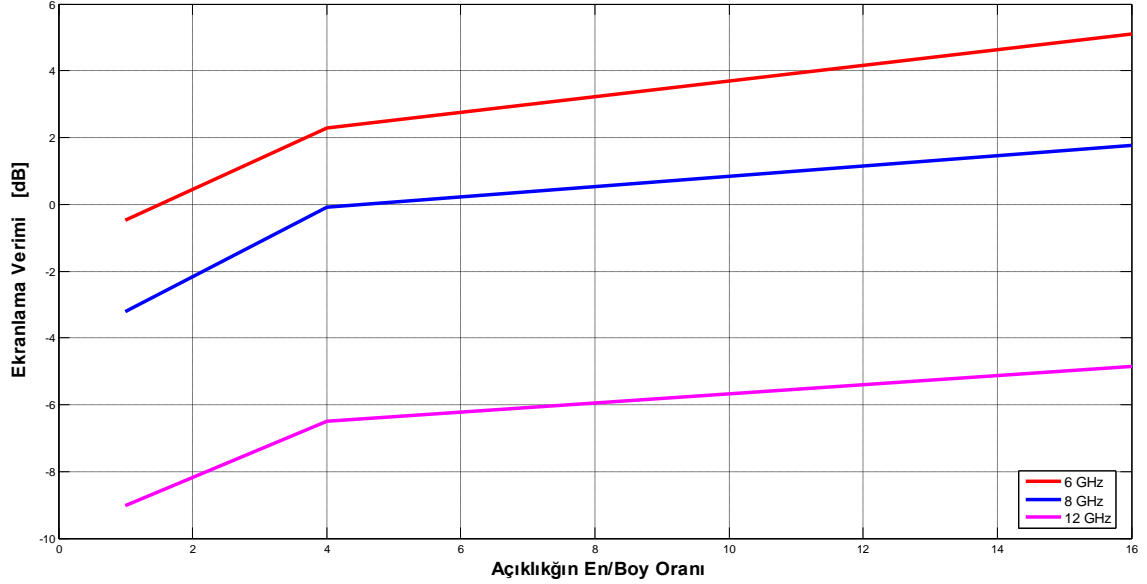
Şekil 4.17. Genişband'da SE'in açıklık alanına (λ^2) göre değişimi

Şekil 4.18'de aynı ölçümde seçilen 6, 8 ve 12GHz için iki ayrı gözlem yapılmıştır:

1. Aynı frekansta ekranlama veriminin en/boy oranı artışı ile arttığı gözlenmiştir.

Açıklık alanı en/boy oranı $4-16\lambda^2$ aralığında ekranlama veriminde yavaş artış ve $0-4\lambda^2$ aralığında ise daha hızlı bir artış gösterdiği görülmüştür.

2. Açıklık en/boy oranının sabit olduğu durumlarda ekranlama veriminin düşük frekanslarda, ekranlama veriminin artış gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.18’de; aynı açıklık en/boy oranına sahip 6 GHz’de ölçülen ekranlama veriminin 12 GHz’de yapılan ölçümlerdeki ekranlama veriminden yaklaşık 8 dB daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. Farklı frekanslar için SE'in en/boy oranına göre değişimi

4.2. Düşük Frekanslarda (0-1000 MHz) Ekranlama Verimi Ölçümü

0-1000 MHz aralığındaki ölçümlerde, yüksek frekanslardaki ölçümlerde kullanılan 4.1.1. Ekranlama verimliliği teorik analizi ile 4.1.2. Test düzeneği aynı şekilde kullanılmış olup sadece yüksek frekanslarda kullanılan geniş band mikroşerit ve standart kazançlı koni anten yerine şekil 4.19’de görüldüğü gibi 0-1000 MHz aralığını kapsayan 6 cm uzunluğa sahip monopol anten kullanılmıştır. Çizelge 3.3’de kullanılan kutu ve açıklıkların parametreleri görülmektedir.



(a) Kutusuz referans ölçüm

(b) Kutulu ölçüm (15x3.75cm)

Şekil 4.19. Test Düzeneği

Şekil 4.20’de 0-1 GHz aralığında yapılan ölçüm sonuçlarının analizi için oluşturulan Matlab kodları verilmiştir.

```

clc;
clear all;
load Kop.dat;

for b=2:99
    frekans(b-1)=Kop(b,1);
    referans(b-1)=Kop(b,2);
    se7575(b-1)=Kop(b,3);
    se15375(b-1)=Kop(b,4);
    se301875(b-1)=Kop(b,5);
end

ar=(10.^(referans./10))/1000; %Esitlik (4.75) Kutusuz referans olcum
a1=(10.^(se7575./10))/1000; %Esitlik (4.75) 7.5cm X 7.5cm'lik aciklik olan kutu
a2=(10.^(se15375./10))/1000; %Esitlik (4.75) 15cm X 3.75cm'lik aciklik olan kutu
a3=(10.^(se301875./10))/1000; %Esitlik (4.75) 30cm X 1.875cm'lik aciklik olan kutu
er=sqrt(ar.*377); %Esitlik (4.74) Kutusuz referans olcum
e1=sqrt(a1.*377); %Esitlik (4.74) 7.5cm X 7.5cm'lik aciklik olan kutu
e2=sqrt(a2.*377); %Esitlik (4.74) 15cm X 3.75cm'lik aciklik olan kutu
e3=sqrt(a3.*377); %Esitlik (4.74) 30cm X 1.875cm'lik aciklik olan kutu

for j=1:98
    se1(j)=-20*log10(er(j)/e1(j)); %Esitlik (4.73) 7.5cm X 7.5cm'lik aciklik olan kutu
    se2(j)=-20*log10(er(j)/e2(j)); %Esitlik (4.73) 15cm X 3.75cm'lik aciklik olan kutu
    se3(j)=-20*log10(er(j)/e3(j)); %Esitlik (4.73) 30cm X 1.875cm'lik aciklik olan kutu
end

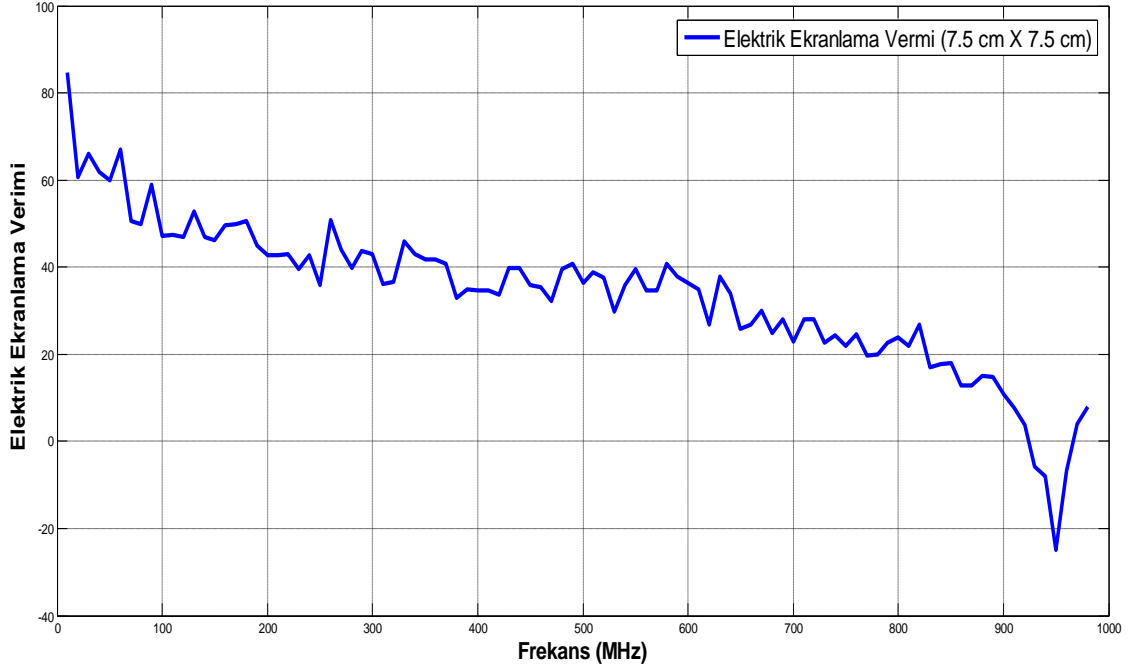
dboyu=0.3./frekans; %98 farkli frekans icin dalga boyu
boyut=(7.5)./dboyu; %Acikligin bir kenarinin olculen frekanstaki dalga boyu
alan=boyut.^2; %Acikligin alanı (Olcum freanstaki dalga boyu cinsinden)

%figure
x=frekans;
subplot(3,1,1);
plot(frekans,se1,'--b','LineWidth',2);hold on;
grid;
subplot(3,1,2);
plot(frekans,se2,'--g','LineWidth',2);hold on;
grid;
subplot(3,1,3);
plot(frekans,se3,'--r','LineWidth',2);hold on;
xlabel('Frekans (GHz)','fontsize',16,'fontweight','b');
ylabel('Ekranlama Verimi','fontsize',16,'fontweight','b');
grid;

```

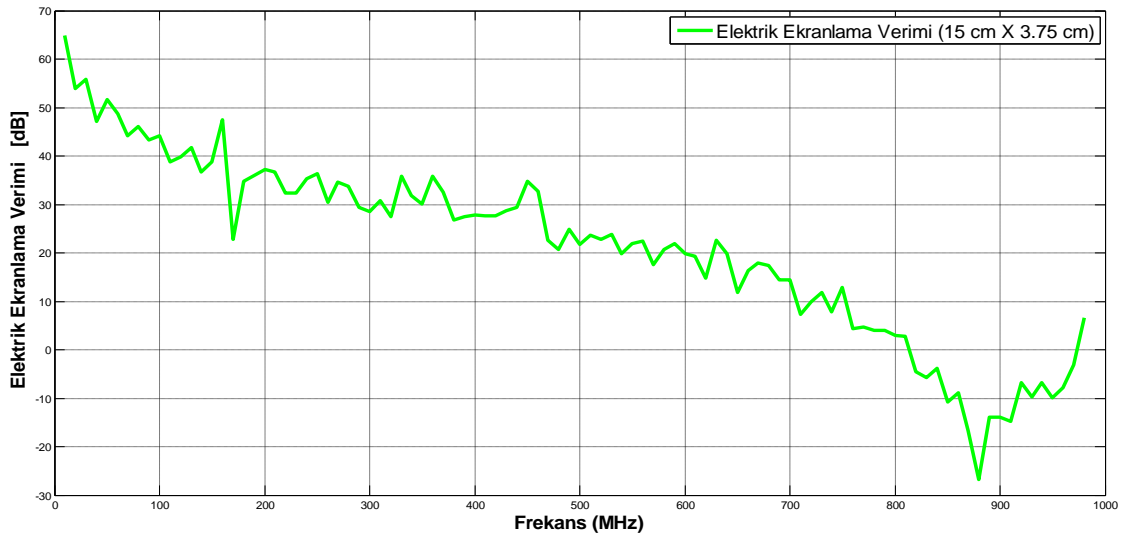
Şekil 4.20. Düşük frekansta yapılan ölçümlerin analizi

Şekil 4.21’de; 7.5cm x 7.5cm boyutunda açıklığı olan alüminyum kutu için 0-1000 MHz aralığında ölçülen elektrik ekranlama verimi değerleri görülmektedir. Elektrik ekranlama veriminin, yaklaşık 85 dB’den başlayarak azaldığı ve 950 MHz’de -25 dB’ye kadar ani düşerek rezonansa uğradığı görülmüştür.



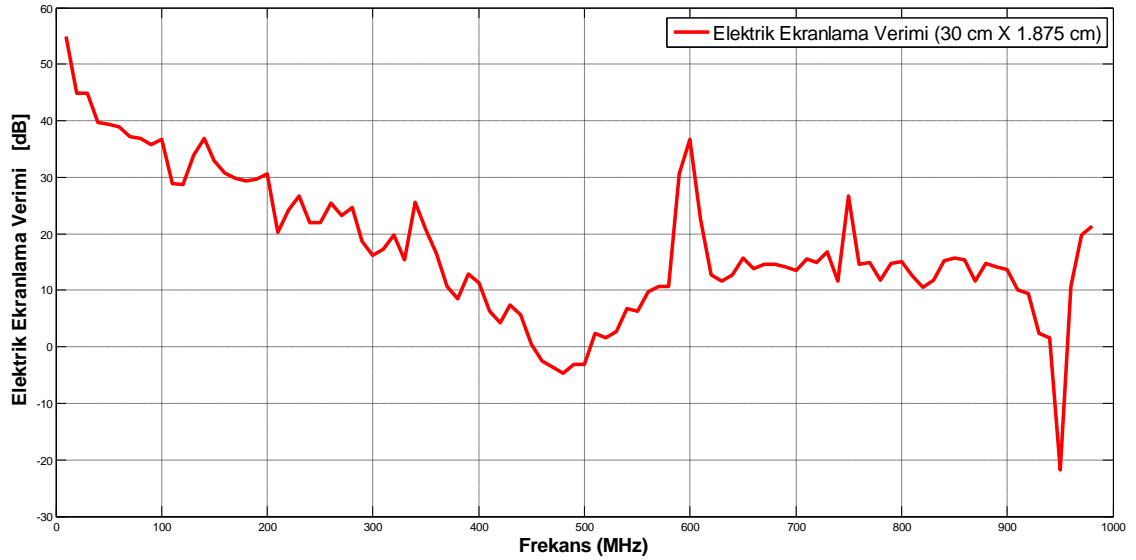
Şekil 4.21. 7.5cm x 7.5 cm açıklık boyutuna sahip kutunun ölçülen elektrik ekranlama verimi

Şekil 4.22’de; 15cm x 3.75cm boyutunda açıklığı olan alüminyum kutu için 0-1000 MHz aralığında ölçülen elektrik ekranlama verimi değerleri görülmektedir. Elektrik ekranlama verimi, yaklaşık 65 dB’den başlayarak azaldığı ve 880 MHz’de -27 dB’ye kadar ani düşerek rezonansa uğradığı görülmüştür.



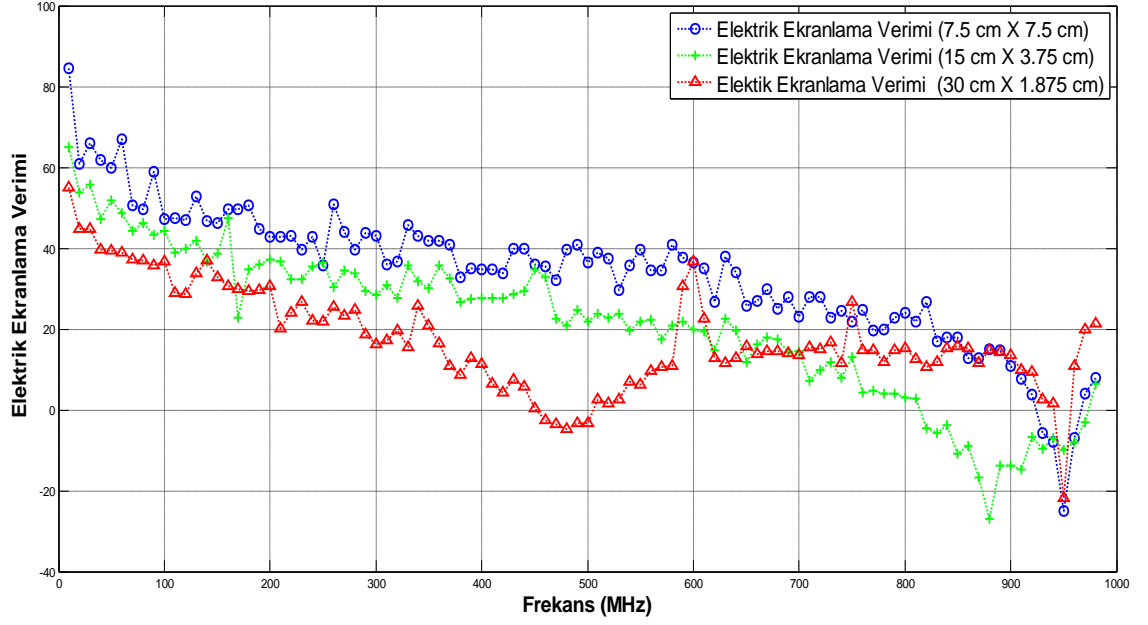
Şekil 4.22. 15cm x 3.75 cm açıklık boyutuna sahip kutunun ölçülen elektrik ekranlama verimi

Şekil 4.23’de; 30cm x 1.875cm boyutunda açıklığı olan aliminyum kutu için 0-1000 MHz aralığında ölçülen elektrik ekranlama verimi değerleri görülmektedir. Elektrik ekranlama veriminin, yaklaşık 55 dB’den başlayarak azaldığı ve iki rezonans bölgesi olduğu, 1. Reonansa 480 MHz’de -5 dB’ye kada düştüğü ve 2. rezonansa ise 950 MHz’de -22 dB’ye ani düşüşle gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

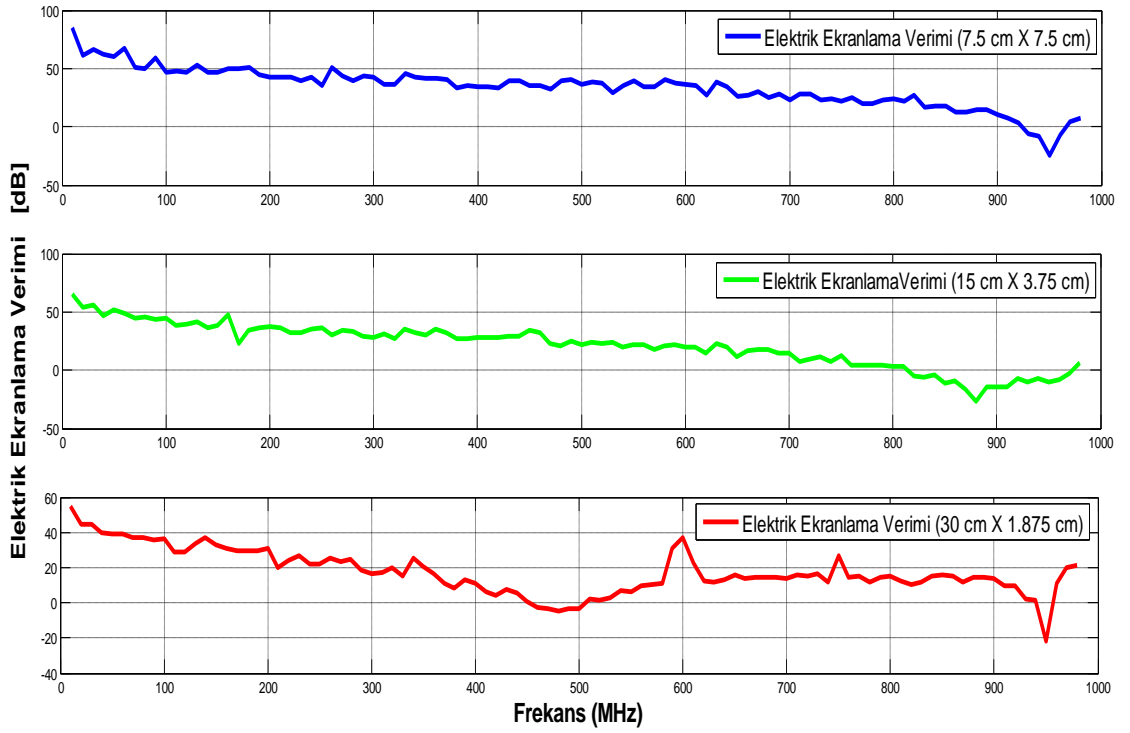


Şekil 4.23. 30cm x 1.875 cm açıklık boyutuna sahip kutunun ölçülen elektrik ekranlama verimi

Şekil 4.24 ve şekil 4.25’de tüm kutuların elektrik ekranlama verimi değerleri karşılaştırıldığında en ve boy oranı küçüldükçe ekranlam veriminin arttığı görülmüştür. Kullanılan kutularda aralarında 10 dB farkla ölçüme başlandığı da gözlemlenmiştir.



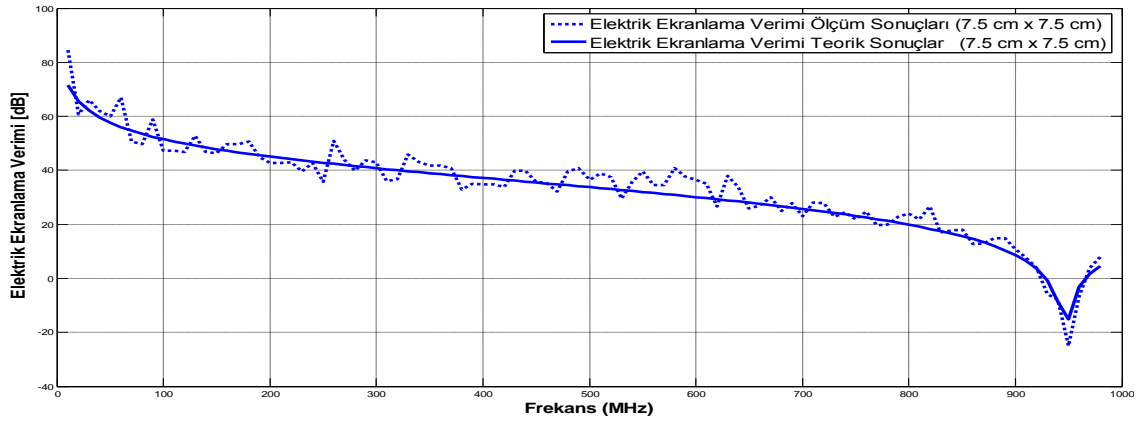
Şekil 4.24. Tüm kutular için ölçülen elektrik ekranlama verimi



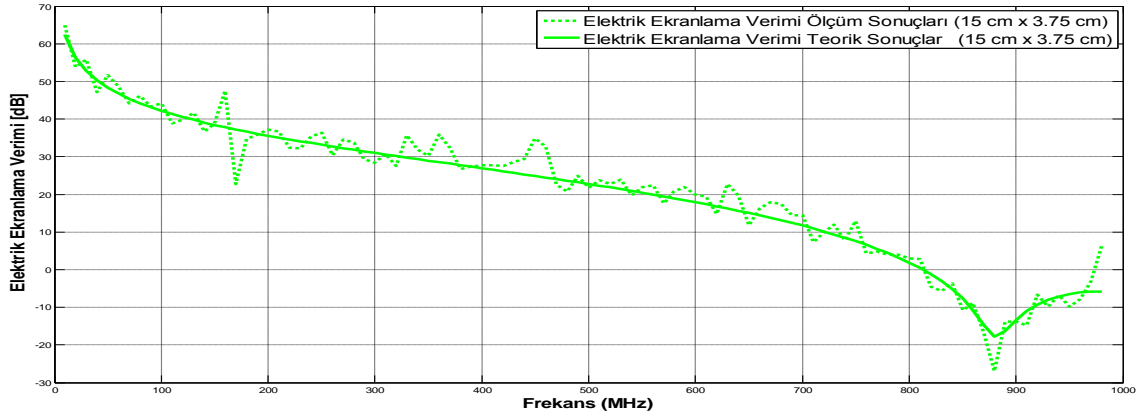
Şekil 4.25. Tüm kutular için ölçülen elektrik ekranlama verimi

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

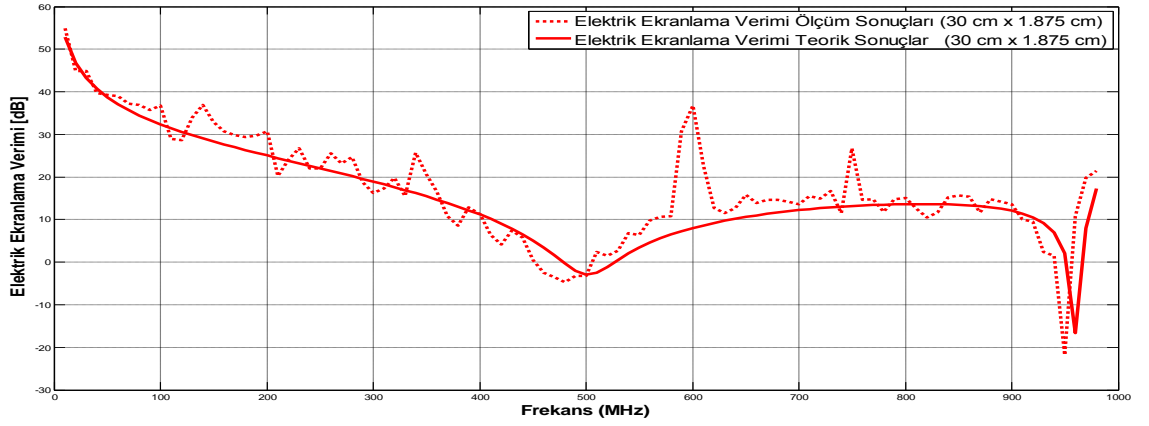
Ekranlama veriminin teorik sonuçları 3. bölümde, deneysel sonuçları da 4. bölümde sunulmuştur. Bu bölümde ise elektrik ekranlama veriminin 0-1 GHz aralığında teorik ve deneysel verileri değerlendirilmiştir. 3 kutunun teorik ve deneysel sonuçları ayrı ayrı şekil 5.26, 5.27 ve 5.28’de gösterilmiştir. Tüm kutulara ait sonuçlar ise şekil 5.29’da gösterilmiştir.



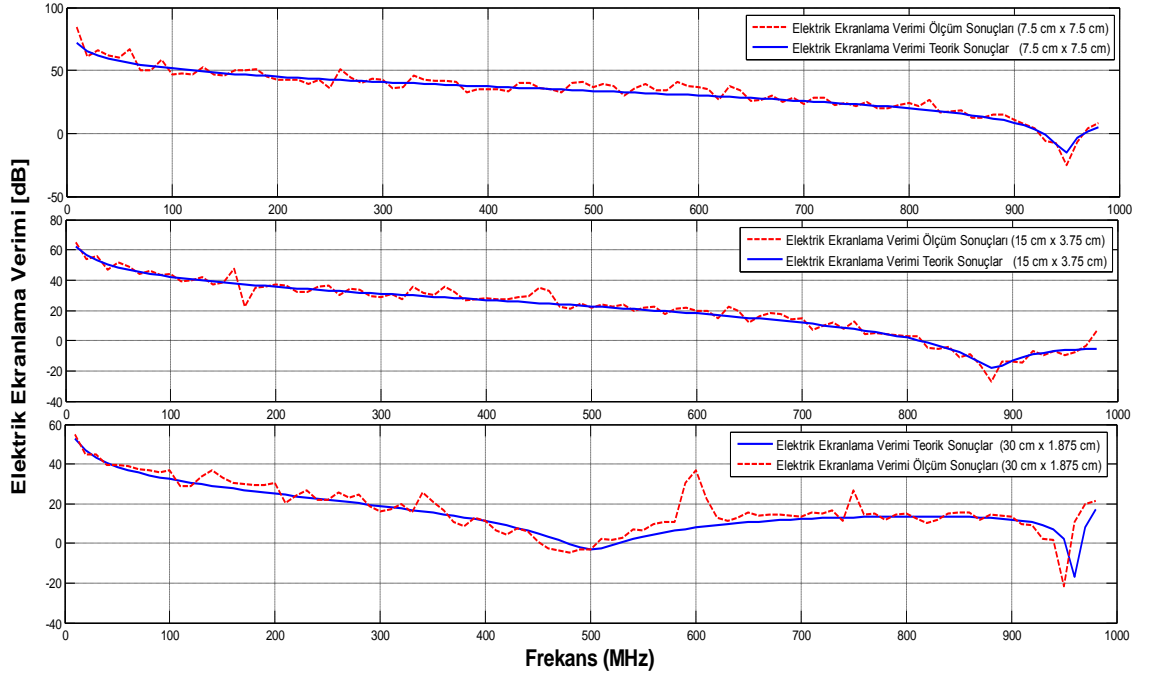
Şekil 5.26. 7.5cm x 7.5 cm'lik açıklığı olan kutu için elektrik ekranlama veriminin frekansa bağlı değişimi



Şekil 5.27. 15cm x 3.75 cm'lik açıklığı olan kutu için elektrik ekranlama veriminin frekansa bağlı değişimi



Şekil 5.28. 30cm x 1.875 cm'lik açıklığı olan kutu için elektrik ekranlama veriminin frekansa bağlı değişimi



Şekil 5.29. Tüm kutular için elektrik ekranlama veriminin 0-1 GHz aralığındaki değişimi

Tez çalışmasında yapılan ölçümlerle ilgili olarak; çizelge 4.4'de belirtilen kutu ve açıklık boyutlarına sahip her metalik kutu için iki farklı frekans bandında ölçümler yapılmıştır. 0-1000 MHz aralığındaki düşük frekans bandında her 10 MHz aralığında 100 farklı frekansta ölçüm yapılmıştır. 6-12 GHz yüksek frekans bandı için ise her 100 MHz aralığında 60 farklı frekansta ölçüm yapılmıştır.

Ölçüm sonuçlarının yüksek hassasiyette elde edilebilmesi amacıyla her bir frekans için 20 ölçüm yapılmış ve bunları aktif güçte ortalaması alınarak matlab ortamında grafik olarak analiz edilmiştir. Dolayısıyla şekil 5.29'da görülen her bir frekanstaki ölçüm değeri, o frekansta yapılmış 20 ölçümün ortalama değeridir.

Tez çalışmasında literatürdeki çalışmalardan farklı olarak araştırılmış iki temel durum mevcuttur. Literatürde, bu konuda yapılan ölçümler 0-1 GHz aralığında yoğunlaşmıştır. Araştırmamız ile 6-12 GHz yüksek frekans aralığında elektromanyetik ekranlama verimi incelenmiş ve bu frekans aralığına ait orijinal veriler bu tez çalışması ile literatüre kazandırılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda elektromanyetik ekranlama veriminin frekansa göre değişimi incelenmiştir. Bu tez çalışması ile ilk defa, elektromanyetik ekranlama veriminin metalik kutu üzerindeki açıklık alanına göre değişimi incelenmiştir.

Düşük frekans aralığında (0-1000 MHz) yapılan ölçümlerle ilgili olarak, her üç kutu içinde elektrik ekranlama veriminin rezonans frekansına kadar göreceli olarak azaldığı ve rezonans frekansından sonra arttığı gözlemlenmiştir. Elektrik ekranlama veriminin metalik kutu üzerindeki açıklığın en/boy oranı ile arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek frekans aralığında (6-12 GHz) yapılan ölçümlerle ilgili olarak; düşük frekanslarda 6.5dB ve yüksek frekanslarda 10dB arttığı, rezonans frekanslarında ise hızlı bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir.

Aynı frekansta ekranlama veriminin en/boy oranı artışı ile arttığı gözlemlenmiştir. Açıklık alanı en/boy oranı $4-16\lambda^2$ aralığında ekranlama veriminde yavaş artış ve $0-4\lambda^2$ aralığında ise daha hızlı bir artış gösterdiği görülmüştür. Açıklık en/boy oranının sabit olduğu durumlarda düşük frekanslarda ekranlama veriminin artış gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.18'de aynı açıklık en/boy oranına sahip kutu için, 6 GHz'de ölçülen ekranlama veriminin 12 GHz'de yapılan ölçümlerdeki ekranlama veriminden yaklaşık 8 dB daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Düşük frekans (0-1000MHz) aralığında çalışan elektromanyetik cihaz ve metalik kutularda olması gereken açıklıklar için, eni büyük boyu küçük açıklık tasarlanmanın daha

iyi bir elektromanyetik ekranlama verimi için önemli olduğu belirlenmiştir. Yüksek frekans (6-12 GHz) aralığında çalışan elektromanyetik cihaz ve kutularda olması gereken açıklıklar için, açıklık alanının $0-4\lambda^2$ olacak şekilde tasarlanmasının ekranlama verimi açısından daha iyi olacağı belirlenmiştir.

Elektromanyetik ekranlama veriminin analitik çözüm ile incelenmesi ve teorik formüllerin geliştirilmesi literatürdeki çalışmalara ışık tutma açısından önemlidir. Tez çalışmasındaki analitik çözümün 0-1000 MHz aralığı için uygun çözüm olduğu, aynı frekans aralığında yapılan ölçümlerden anlaşılmıştır. Şu ana kadar literatürdeki hiçbir çalışmada yüksek frekanslar için uyumlu olan bir analitik çözüm bulunmamaktadır. Bu açıdan bu konuda yapılacak araştırmalarda, yüksek frekanslar için elektromanyetik ekranlama verimi için matematiksel modelin geliştirilmesi yönündeki çalışmalara önem verilmelidir. Bu tez çalışması ile ulaşılan sonuçlar, ileri araştırmalara ışık tutacak olması bakımından önemli bilgiler sunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] BAHADORZADEH M. and MOGHADDASI M.N. 2008. Improving the shielding effectiveness of a rectangular metallic enclosure with aperture by using extra shielding wall. Progress in Electromagnetics Research Letters, Vol. 1; 45-50.
- [2] BAYRAKÇI H.E. 1988. Elektromagnetik Dalga Teorisi. Birsen Yayınevi, 296s. İstanbul.
- [3] BELOKOUR I. et al. 2000. Shielding effectiveness of enclosures with apertures. 0-7803-5677-2/00.
- [4] CHUNHONG G. and SHUFANG L. 2005. Shielding effectiveness of an enclosure with apertures. IEEE. 0-7803-9128-4/05.
- [5] DANGKHAM P. Et al. 2007. Recognition and identification of radiated EMI for shielding aperture using Neural Network. Piers Online. Vol 3, No 4.
- [6] FANG C.H. et al. 2008. Shielding Effectiveness measurements on enclosures with various apertures by both mode-tuned reverberation chamber and GTEM Cell methodologies. Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 2; 103-114.
- [7] HELHEL S. 1997. "900 MHz Dalga Boyunda Elektromanyetik Alanların Kapalı Ortamda Işılması", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği.
- [8] HELHEL S. et al. 1997. "Ray Tracing Propagation Model of UHF Radio Waves for Corridors", Electronics, Circuits and Systems ICECS'97, December 15-18 1997, Cairo, EGYPT.
- [9] HERLEMANN H. and KOCH M. 2008. Measurement of the transient shielding effectiveness of shielding cabinets. Advances in Radio Science. 6; 293-298.
- [10] KESHTKAR A. Et al. 2009. Simulation of shielding effectiveness in low for conductive enclosure. IEEE. 978-0-7695-3925-6/09.
- [11] KODALI V.P. 1998. Engineering Electromagnetic Compatibility Principles, Measurement and Technologies. IEEE Press, 367s. New York
- [12] LEO R. D. Et al. 1999. A simple but effective way for cable shielding measurement. IEEE. Vol, 41, No 3
- [13] MARVIN A. and CUI Y. 2006. Anechoic and Reverberation Chamber Shielding

- Measurement at Frequencies above 1 GHz. IEEE. 1-4244-0293-X/06
- [14] NIE X. C. and YUAN N. 2008. Accurate modeling of monopole antennas in shielded enclosures with apertures. Progress in Electromagnetics Research Pier,79, 251-262.
- [15] OTT H.W. 1988. Noise Reduction Techniques In Electronic Systems. A Wiley-Interscience Publication, 419s. New York.
- [16] ÖZEN Ş. ve ARI N. 2008. Elektromnyetik Uyumluluk. Palme Yayıncılık. ISBSN: 978-9944-341-72-1
- [17] ÖZEN Ş. ve ARI N. 2008. Elektromnyetik Alanlar. Palme Yayıncılık. ISBSN: 978-9944-341-72-1
- [18] RAD L.G. and MOHASSEL J.R. 2005. The effects of apertures shape and configuration on the shielding effectiveness of metallic enclosures. IEEE. 0-7803-9433-X/05.
- [19] ROBINSON M.P. et al. 1996. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture. Electronic Letters. Vol,32,No,17
- [20] ROBINSON M.P. et al. 1998. Analytical Formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. IEEE. Vol, 40,No 3.
- [21] SCOGNA A. et al. 2007. Analysis of radiated emissions and shielding effectiveness for a metallic enclosure with shielding springs. IEEE. 1-4244-1350-8/07.
- [22] SEVGİ L. 2000. Elektromanyetik Uyumluluk–Elektromanyetik Kirlilik. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul şubesi yayını, 316s. İstanbul.
- [23] SEVGİ L. 2009. Electromagnetic Screening and shielding effectiveness (SE) modeling. IEEE. Vol.51,No.1.
- [24] SMITH D.C. A method of accurately measuring effectiveness of materials in electronics products
- [25] ŞEKER S. ve ÇEREZCİ O. 1994. Elektromanyetik Dalgalar ve Mühendislik Uygulamaları. Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, 300s. İstanbul.
- [26] ŞEKER S. ve ÇEREZCİ O. 1997. Çevremizdeki Radyasyon ve Korunma Yöntemleri. Boğaziçi Üniversitesi Yayınları No:607, 436s. İstanbul.
- [27] THOMAS D.W.P. et al. 1999. Characterization of the shielding effectiveness of loaded equipment enclosures. IEEE. EMC York 99. Conference publication

No.464.

- [28] WANG L. et al. 2007. Analysis on shielding effectiveness of aperture arrays with different spacing. IEEE. 1-4244-1372-9/07.
- [29] YAZICI M. vd . Automated scan measurement method (ASM2) for shielding effectiveness of enclosures.
- [30] YAŞAR H. 1998. Elektromanyetik Etkileşimin Önlenmesi İçin Ekranlama Düzenlerinin Tasarımı. İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 89s, İstanbul.
- [31] ZHAO Z.B. et al. 2005. Analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosure of metal structures with apertures above ground plane. IEEE.Vol.41,No.5.

ÖZGEÇMİŞ

İ. Bahadır BAŞYİĞİT 1982 yılında Isparta'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Isparta'da tamamladı. 2001 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. 2006-2009 yılları arasında özel sektörde değişik firmalarda GSM Hücre Planlama ve Optimizasyon alanında uzman mühendis olarak çalıştı. Eylül 2009'dan beri Akdeniz Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.