

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROMAGNETİK ALANLARIN EKCRANLANMASI**

Elektrik Müh. Murat Metin ÇABUK

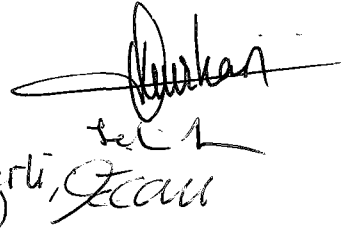
**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nurettin UMURKAN**

Prof. Dr. Selim AY

Doç. Dr. Özcan Kalenderli,  
(İTÜ)



**İSTANBUL, 2005**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	vii
ÖNSÖZ .....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
1 GİRİŞ .....	1
1.1 Elektromagnetik Alanların Etkileri.....	1
1.1.1 Biyolojik/Epidemiyolojik Araştırmalar .....	2
1.1.2 Mühendislik Araştırmaları.....	2
1.2 Önerilen Mühendislik Çözümleri .....	3
2 ELEKTROMAGNETİK UYUMLULUK VE GİRİŞİM KAYNAKLARI.....	6
2.1 Elektromagnetik Uyumluluk Problemleri .....	7
2.2 Elektromagnetik Uyumluluğun Biçimsel Tanımı.....	9
2.3 Girişim Problemlerinin Çözümünde Genel Yöntemler .....	10
2.4 Elektromagnetik Alan Uyumluluk Birimleri .....	11
2.5 Elektromagnetik Girişim Kaynakları.....	13
2.5.1 Elektromagnetik Girişim Kaynaklarının Sınıflandırılması.....	14
2.5.2 Doğal Elektromagnetik Girişim Kaynakları.....	15
2.5.2.1 Alçak Frekanslı Elektrik ve Magnetik Alanlar .....	15
2.5.2.2 Yıdırım.....	16
2.5.2.3 Yüksek Frekanslı Elektromagnetik Dalgalar .....	16
2.5.3 İnsan Yapımı Elektromagnetik Girişim Kaynakları .....	17
3 TEMEL EKLANLAMA KURAMI İLE EKLANLAMA HESABI .....	23
3.1 Temel ekranlama Kuramı .....	23
3.1.1 Yüksek magnetik Geçirgenlikli Metaller ile Ekranlama .....	24
3.1.2 İndüksiyon Akımlarının Sağladığı Ekranlama .....	26
3.1.3 Yüksek Magnetik Geçirgenlikli Malzeme ve İndüksiyon Akımının Sağladığı Ekranlama .....	27
3.2 Magnetik Ekranlama Değerlendirme Yöntemleri .....	28
3.2.1 Analog Yöntemler .....	29
3.2.2 Analitik Teknikler.....	30
3.2.2.1 Yaklaşık Çözüm Teknikleri.....	30
3.2.2.2 Magnetik Uyumluluk Denklemleri.....	30

3.2.2.3	Diferansiyel Yöntemlerle doğrudan Çözüm.....	32
3.2.3	İntegral Denklem Teknikleri.....	32
3.2.4	Nümerik Teknikler.....	35
3.2.4.1	Diferansiyel Operatör Teknikleri.....	35
3.2.4.2	İntegral Operatör Teknikleri.....	38
3.2.4.3	Modal Genişlemeler.....	41
3.2.4.4	Monte-Carlo Yöntemi.....	42
3.3	Araştırmaların Özeti .....	42
4	EKRANLAMA DENEYLERİ .....	43
4.1	Magnetik Alan Ölçümleri .....	48
4.1.1	Enerjisiz Magnetik Alan Ölçümleri.....	48
4.1.2	Ekransız Enerjili Magnetik Alan Ölçümleri.....	49
4.1.3	Alüminyum Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü .....	50
4.1.4	Bakır Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü.....	51
4.1.5	Kurşun Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü.....	52
4.1.6	DKP Sac Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü.....	53
4.1.7	Galvenizli Sac Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü .....	54
4.1.8	Paslanmaz Çelik (304) Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü .....	55
4.1.9	Paslanmaz Çelik Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü.....	56
4.1.10	Mıknatıslı Levha Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü .....	57
4.1.11	Çinko Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü.....	58
4.1.12	Trafo Sac Ekran İçin Magnetik Alan Ölçümü.....	59
4.2	Ekranlama Etkinlikleri.....	60
5	SONUÇLAR .....	71
	KAYNAKLAR.....	74
	ÖZGEÇMİŞ.....	77

## SİMGE LİSTESİ

$\sigma$	Elektriksel İletkenlik
$\sigma_{cu}$	Bakırın elektriksel iletkenliği
$\mu$	Magnetik geçirgenlik
$\mu_0$	Boşluğun magnetik geçirgenliği
$\mu_r$	Bağıl magnetik geçirgenlik
$\lambda$	Elektromagnetik alan dalga boyu
$f$	Frekans
$j$	Kaynağın akım yoğunluğu
$\gamma$	Zayıflama Katsayısı
$\phi$	Magnetik Akı
$\epsilon$	Dielektrik sabiti
$\epsilon_r$	Bağıl dielektrik sabiti
$\delta$	Ekran deri kalınlığı
$\beta$	Faz açısı
$\alpha$	Zayıflama terimi
$\tau$	Zaman Sabiti
$t$	Ekran kalınlığı
$r$	Ekran-kaynak arası uzaklık



## KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
A/m	Amper/metre
B	Magnetik Akı Yoğunluğu
BEM	Boundary Element Method
CGM	Conjugate Gradient Method
CSM	Charge/Source Simulation Method
DA	Doğru Akım
dB	Desibel
ESD	Elektrostatik boşalma.
E	Elektrik alan şiddeti.
EE	Ekranlama etkinliği
EMU	Elektromagnetik Uyumluluk
FDM	Finite Difference Method
FDTD	Finite Difference Time Domain Method
FEM	Finite Element Method
GTD	Geometrical Theory of Diffraction
GMT	General Multipole Technique
H	Magnetik alan şiddeti.
Hz	Hertz.
MFS	Method of Fundemantel Solutions.
MoM	Method of Moments
NEMP	Nükleer elektromagnetik darbe
PTD	Physical Theory of Diffraction
VIM	Volume Integral Equation Method
V/m	Volt/metre
VTHD	Gerilim toplam harmonik bozulması.

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Dört temel EMU problemi .....	7
Şekil 2.2	Desibel biriminin tanımlanması .....	11
Şekil 3.1	İç bölgenin dış alanlardan magnetik korunması.....	25
Şekil 3.2	Ekranlanmamış güç kablosunun etrafındaki magnetik akı çizgileri .....	25
Şekil 3.3	Ekranlı güç kablosunun etrafındaki magnetik akı çizgileri.....	26
Şekil 3.4	Ekranlama etkinliği .....	31
Şekil 3.5	Sonlu farklar yönteminin tipik dikdörtgen ızgarası.....	36
Şekil 3.6	Sonlu elemanlar yönteminin tipik ızgara elemanı.....	36
Şekil 4.1	Yıldız Teknik Üniversitesi yüksek akım laboratuvarı.....	43
Şekil 4.2	Magnetik alan kaynağı olarak kullanılan deney düzeneği .....	44
Şekil 4.3	Deney transformatörü ve varyakların bulunduğu kumanda odası.....	45
Şekil 4.4	Yüksek akım laboratuvarındaki amperetreler .....	45
Şekil 4.5	F.W Bell marka 4080 model magnetik alan ölçüm cihazı .....	46
Şekil 4.6	Magnetik alan ölçüm cihazıyla laboratuvarda yapılan ölçümlerden bir fotoğraf .....	46
Şekil 4.7	Ekranlama malzemesinin kaynağa silindir şeklinde sarılması .....	47
Şekil 4.8	Enerjisiz magnetik alan dağılımı.....	48
Şekil 4.9	Ekranlı enerjili magnetik alan dağılımı.....	49
Şekil 4.10	Alüminyum ekranlı magnetik alan dağılımı.....	50
Şekil 4.11	Bakır ekranlı magnetik alan dağılımı .....	51
Şekil 4.12	Kurşun ekranlı magnetik alan dağılımı .....	52
Şekil 4.13	DKP sac ekranlı magnetik alan dağılımı.....	53
Şekil 4.14	Galvenizli sac ekranlı magnetik alan dağılımı .....	54
Şekil 4.15	Paslanmaz çelik (304) ekranlı magnetik alan dağılımı .....	55
Şekil 4.16	Paslanmaz çelik ekranlı magnetik alan dağılımı .....	56
Şekil 4.17	Mıknatıslı levha ekranlı magnetik alan dağılımı.....	57
Şekil 4.18	Çinko ekranlı magnetik alan dağılımı .....	58
Şekil 4.19	Trafo sac ekranlı magnetik alan dağılımı .....	59
Şekil 4.20	Deneyde kullanılan ekran malzemelerinden bir fotoğraf.....	60
Şekil 4.21	Alüminyum ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı .....	61
Şekil 4.22	Bakır ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.....	62
Şekil 4.23	Kurşun ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.....	63
Şekil 4.24	DKP sac ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.....	64
Şekil 4.25	Galvenizli sac ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı .....	65
Şekil 4.26	Paslanmaz çelik (304) ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı .....	66
Şekil 4.27	Paslanmaz çelik ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.....	67
Şekil 4.28	Mıknatıslı levha ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.....	68
Şekil 4.29	Çinko ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.....	69
Şekil 4.30	Trafo sac ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.....	70

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Çeşitli mertebeden desibel cinsinden karşılıklar .....	13
Çizelge 4.1	Deneyde kullanılan ekran malzemelerinin özellikleri .....	47
Çizelge 4.2	Enerjisiz magnetik alan ölçüm sonuçları .....	48
Çizelge 4.3	Ekranlı enerjili magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	49
Çizelge 4.4	Alüminyum ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	50
Çizelge 4.5	Bakır ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	51
Çizelge 4.6	Kurşun ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	52
Çizelge 4.7	DKP sac ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	53
Çizelge 4.8	Galvenizli sac ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	54
Çizelge 4.9	Paslanmaz çelik (304) ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	55
Çizelge 4.10	Paslanmaz çelik ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	56
Çizelge 4.11	Mıknatıslı levha ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	57
Çizelge 4.12	Çinko ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	58
Çizelge 4.13	Trafo sac ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG] .....	59
Çizelge 4.14	Alüminyum ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	61
Çizelge 4.15	Bakır ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	62
Çizelge 4.16	Kurşun ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	63
Çizelge 4.17	DKP sac ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	64
Çizelge 4.18	Galvenizli sac ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	65
Çizelge 4.19	Paslanmaz çelik (304) ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	66
Çizelge 4.20	Paslanmaz çelik ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	67
Çizelge 4.21	Mıknatıslı levha ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	68
Çizelge 4.22	Çinko ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	69
Çizelge 4.23	Trafo sac ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB] .....	70

## ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlamamda bilgi ve birikimiyle bana yol gösteren, çalışmalarına ilgisi ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. Nurettin Umurkan'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin hazırlanması sırasında bana dostluklarını ve yardımlarını esirgemeyen bildiklerini benimle paylaşan Araştırma Görevlisi Selim Köroğlu arkadaşşıma teşekkür ederim.

Hep yanımda olduklarını bildiğim ve bundan güç aldığım aileme, arkadaşlarıma ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.



## ÖZET

Bu tezde, elektromagnetik uyumluluk çalışma alanının konularından olan elektromagnetik alanların ekranlaması konusu üzerinde çalışılmıştır.

Bu çalışmada; başlıca elektromagnetik alan kaynakları, elektromagnetik girişim kaynakları, elektromagnetik alanların etkileri hakkında bilgiler verilmiştir. Elektromagnetik alanların ekranlanması konusunda çözüm teknikleri anlatılmıştır ve bu konudaki tartışmalara değinilmiştir. Değişik elektriksel iletkenlik ve magnetik geçirgenlik özelliğine sahip malzemeler ile yüksek akım laboratuvarında magnetik alan ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler neticesinde tablo ve grafikler oluşturularak değişik malzemelerin elektromagnetik alanların ekranlanması konusundaki etkileri değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde, çeşitli malzemelerin ekranlama etkinlikleri ölçümlerle tespit edilmiştir. Daha ileriki çalışmalarda bu ölçüm sonuçlarıyla tezde belirtilen yöntemlerle elde edilecek hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması yapılabilir. Magnetik alan büyüklüğüne göre kullanılacak malzemenin cinsini ve miktarını belirleyecek programlar geliştirilebilir.

**Anahtar kelimeler:** Elektromagnetik alanlar, elektromagnetik uyumluluk, ekranlama, magnetik geçirgenlik, elektromagnetik girişim.

## **ABSTRACT**

This thesis is a study on the shielding of electromagnetic fields which is one of the subjects of electromagnetic compatibility.

The study elaborates on the main sources of electromagnetic field, sources of electromagnetic interference and on the influences of electromagnetic fields. It further dwells on the solution techniques for electromagnetic shielding, and on related discussions. Magnetic field measurements were made in a high current laboratory on materials with different electrical conductivity and magnetic permeability. Figures and tables were formed as a result of these measurements and the effects of different materials on the shielding of electromagnetic fields were evaluated.

As a result of the work, shielding efficiency of different materials were determined with measurements. Further studies in this subject could compare these measurement results with the results of the calculations to be made with the methods shown in this study. Programs could be developed which could determine, according to the magnitude of the magnetic field, the type and amount of the material to be used.

**Key words:** Electromagnetic fields, electromagnetic compatibility, shielding, magnetic permeability, electromagnetic interference.

## 1. GİRİŞ

Elektromagnetik uyumluluk (EMU), elektrik-elektronik cihazların birbirleriyle girişim yapmadan uyum içerisinde çalışabilmeleri koşullarının araştırıldığı bir çalışma alanıdır. Gelişen teknolojilerle birlikte günlük yaşamda kullanılan elektrikli cihazların sayısı artmakta ve buna bağlı olarak da şebekeden çekilen gücün miktarı sürekli olarak artış göstermektedir. Şebekeden çekilen gücün artması, bu gücü taşıyan kablo ve baraların etrafında meydana gelen magnetik alan seviyelerinin de büyümesine neden olmaktadır. Dolayısıyla önümüzdeki yıllarda elektromagnetik uyumluluk çalışmalarına artan bir ivmeyle gereksinim duyulacaktır.

Başlıca magnetik alan kaynakları olarak, enerji iletim ve dağıtım hatları, şalt sahaları, bölgesel trafo merkezleri, sanayi, ofis ve hastane binaları, trafo merkezleri sayılabilir. Alçak gerilimde yüksek akımı taşıyan kablo ve baralar, binaların transformatör merkezleri ile ana dağıtım panoları, tali panolar ve yüksek güç tüketen cihazlar arasında bulunurlar. Bu kablo ve baralar, geçtikleri bölgelerde yüksek magnetik alan meydana getirirler. Yüksek magnetik alanlar başta insan sağlığı olmak üzere, hassas elektronik cihazlarda bozucu etkiye neden olmaktadır. Ölçme cihazları hatalı değerler gösterebilmekte, hassas üretim cihazları ve tezgahların çalışmaları etkilenmekte ve üretilen ürünlerde kalite sorunu oluşabilmektedir. Özellikle hastanelerin ameliyathane ve yoğun bakım ünitelerinin bulunduğu ortamda bu durum büyük önem taşımaktadır. Ayrıca veri iletimi, veri saklanması ve video görüntüleme sistemlerinde problemler ortaya çıkabilmektedir (Umurkan vd., 2004).

Magnetik alan ekranlamasında yaygın kanaat ferromagnetik malzemelerin kullanılmasıdır. Ferromagnetik olmayan (alüminyum, bakır vb. gibi) malzemelerin bağıl magnetik geçirgenliklerinin yaklaşık bire yakın olması sebebiyle kullanılamayacağı yönünde yaygın bir görüş vardır.

Elektromagnetik uyumluluk çalışmalarının ana alt başlıklarından biri olan elektromagnetik ekranlama çalışmaları bu tezin ana yapısını oluşturacaktır. Bu çalışmada 50 Hz. magnetik alanların ekranlanması için ferromagnetik olmayan malzemelerden değişik konfigürasyonlarda farklı malzemeler kullanılarak ekranlama etkinlikleri laboratuvar ortamında incelenecek ve bunlara ait bilgiler tablo ve grafik olarak sunulacaktır.

### 1.1 Elektromagnetik Alanların Etkileri

Endüstrileşme ve elektrifikasyon gelişimi sonucunda, tüm frekanslarda yüksek değerdeki elektromagnetik alanlara insanların, hayvanların ve çevrenin maruz kalması sonucunu ortaya

çıkarmıştır. Bu elektriksel çevre değişimine en önemli katkıda bulunan öğelerden biri elektrik güç üretimi ve iletim sistemlerinin büyümesi ile ilgili teknolojik gelişmelerdir.

### 1.1.1 Biyolojik/Epidemiyolojik Araştırmalar

Enerji iletim hatlarının, ev içi tesisatların ve diğer kaynakların ortaya çıkardığı magnetik alanlar insan sağlığı kaygılarını doğurmaktadır. A.B.D.'de büyük elektrik şirketi yöneticilerinin katıldığı bir ankette, 15 yöneticinin 6'sı elektromagnetik alan etkilerinin mevcut ve gelecekteki kaygılarını oluşturduğunu belirtti. Ayrıca elektrik şirketlerinin kaygıları konulu 1990 tarihindeki Denver DOE şirketi çalışmasında elektromagnetik alanlar konusunu en öncelikli araştırma konusu olarak belirledi. Bu endişeler aile dergilerinin ve A.B.D. kongresinin dikkatini çekecek kadar artmıştır (Frix, 1996).

Araştırmalar, 1970'lerdeki ve 1980'li yılların başında düşük frekanslı magnetik alanların çocuklarda kanser gelişimi ile bağlantılı bir dizi raporla başladı (Frix, 1996). Bu raporlar birçok araştırmacı tarafından taraf tutmalar, sorgulanabilir varsayımlar ve verilerdeki tutarsızlıklar dahil olmak üzere çeşitli kusurlar bulunarak eleştirildi. Daha sonra, daha ayrıntılı yapılan araştırmalarda kanser ile düşük frekanslı magnetik alanlar arasında bir ilişki bulunmamakla beraber, sonraki diğer epidemiyolojik araştırmalar bulguları doğruladı (Myers vd., 1985). Tam aksine, bazı araştırmacılar (15 mT'yi veya 150 G'yi aşan) yüksek yoğunluktaki şebeke frekanslı magnetik alanların, yapay olarak ortaya çıkarılan göğüs kanserlerini hafiflettiğini deneysel olarak ortaya çıkardılar (Frix, 1996). Özet olarak, bilimsel toplum bu konuda bölünmüş durumdadır.

### 1.1.2 Mühendislik Araştırmaları

1100 kV enerji iletim hatlarının orta kısmından dolaysız olarak yapılan magnetik alan ölçümlerinde 35  $\mu$ T (350 mG)'den düşük değerler bulunmuştur, diğer yandan yüksek gerilim hatlarının yakınında bulunan evlerdeki şebeke frekanslı magnetik alanları nadiren 3.5  $\mu$ T (35 mG)'den büyüktür. A.B.D.'deki Elektrik Enerjisi Araştırma Kurumu rastgele seçilmiş evlerde ölçülen meskun mahal magnetik alanlarının %10'dan az süre içinde 0.25  $\mu$ T (2.5 mG)'yi ve %0.5'ten az süre içinde 0.50  $\mu$ T (5.0 mG)'yi geçtiğini bulmuştur. Bunlar 0.5  $\mu$ T (5.0 mG) civarında değerlerde gözlenen doğal olarak meydana gelen düşük frekanslı magnetik alanlarla karşılaştırılmalıdır. Diğer yandan, toprağın doğal DC magnetik alanı 25  $\mu$ T (250 mG) ila 70  $\mu$ T (700 mG) arasında değişmektedir. Diğer yaygın düşük frekanslı magnetik alan kaynaklarının magnetik alanı enerji iletim hatlarının ürettiği magnetik alanla kıyaslanabilir veya bundan daha büyüktür. Örneğin, havaalanlarında kullanılan magnetik tespit sistemleri

tipik olarak yaklaşık 100 Hz'de 130  $\mu$ T (1.3 G)'ye yakın magnetik alanlar üretirken, kütüphanelerde ve alışveriş merkezlerinde kullanılan magnetik tespit sistemleri ise daha büyük magnetik alanlar üretir. Kullanıcıların evlerinde saatlerce yakın temasta bulunduğu elektrikli battaniyelerde 1 ila 10  $\mu$ T (10 ila 100 mG) arasında ortalama magnetik akım yoğunluğu değerleri ölçülmüşken, tipik ev aletleri 1 mT (10 G)'ye kadar akım yoğunluğu üretmektedir. Düşük frekanslı magnetik alanların olası kanserojen özelliklerine ilişkin bu kaygılar, ölçülen magnetik akım yoğunlukları 100  $\mu$ T (1.0 G)'yi aşan elektrikli aletler yaygınlaştıkça daha da artacaktır (Gillette vd.,1954; Stewart vd., 1993).

Kısaca, farklı kaynakların ürettiği düşük frekanslı magnetik alan ölçümleri, açıkça göstermiştir ki enerji iletim hatlarının magnetik alanları insanların daha yaygın bir şekilde maruz kaldığı kaynakların ürettiği magnetik alanlardan çok daha azdır. Bununla birlikte, kamuoyunun kaygıları enerji iletim hatlarının bu belirgin tehdidi üzerinde ısrarcıdır. Bu nedenle, her ne kadar 60 Hz'lik magnetik alan çalışmaları ve bunların insan sağlığı üzerine etkileri karışık sonuçlar ortaya koysa da, idareler kamuoyu kaygılarını azaltmak için adımlar atmaya üzere sistemlerinin ürettiği magnetik alanları azaltmaya çalışmaktadır.

## 1.2 Önerilen Mühendislik Çözümleri

Alan yönetimi için araştırılan sistemler; elektrik trafo merkezleri, havai enerji hatları ve yeraltı enerji kablolarıdır. Her ne kadar kamuoyu trafo merkezlerinden pek etkilenmese de, bunlar iki nedenden ötürü idare yöneticileri için bir kaygı oluşturur. Özellikle büyük şehirlerde kamuoyunun bunları bir risk olarak görmesi ve buralardaki çalışanlara gelebilecek riskler. İlk kaygı istasyon içinde, elektrik teçhizatı ile istasyon çevresi arasında bir tampon bölge oluşturularak giderilmektedir. İstasyon içindeki kaynaklar genellikle birbirine yakın yerleştirildiği için (tevzi çubukları ve transformatörler), Biot-Savart bir magnetik noktasal kaynak kanuna göre alanlar doğal olarak  $r$  uzaklığının karesel tersi ile  $1/r^2$  azalmaktadır. Aynı bir prosedür de istasyona daha az sanayi görüntüsü vermek üzere estetik bir tasarım kullanmaktır. Çalışan güvenliği için, uygulanacak prosedür ise bakım için istasyonun akımını keserek maruz kalmayı asgariye indirmek veya yakın yerlerde geçirilen süreyi kısıtlamaktır. Bir diğer teknik de, mümkün olduğunca çok teçhizatı (genellikle transformatörler) ekranlamaktır.

Havai enerji hatları elektrik enerjisini bir yerden bir başka yere nakletmek üzere kullanılan en ucuz yöntemdir. Çünkü sistem göreceli olarak basittir. Ekonomik ve fiziksel nedenler havai enerji iletim hatlarındaki magnetik alanları azaltmayı zor kılmaktadır.

Halkın havai hatların manyetik alanlarına maruz kalışını azaltmak üzere sadece dört teknik bulunmuştur. Bunlar; hat güzergah genişliklerinin artırılması, hat yoğunlaştırma, faz manipülasyonu ve yüksek-faz düzenli sistemler. Hat güzergah genişliği, elektrik-alan yalıtımı, hatların emniyeti ve bakımının kolayca yapılması için enerji hattının her iki yanında bulunan arazidir. Bir iletim hattının manyetik alanı hatta olan uzaklıkla ters orantılı olarak azaldığından ( $1/r$ ), hat güzergahını arttırmak, alanın azalması için fazladan imkan sağlar. Hat yoğunlaştırma, yani farklı hatlar arasındaki mesafenin azaltılması, dielektrik devre kesme sınırına kadar kullanılmaktadır. Mesafenin azaltılmasıyla bir faz hattının magnetik alanı, komşularının magnetik alanının bir bölümünü iptal edebilir. Bununla birlikte hat yoğunlaştırma, mevcut direkleri değiştirme masrafları nedeniyle mevcut sistemleri yeniden tesis etme konusunda pek pratik bir yol değildir. Yoğunlaştırmaya benzer şekilde, enerji hatlarının fazlarının yeniden ayarlanmasının da, deneysel ve analitik olarak toplam magnetik alanı azalttığı görülmüştür. Benzer şekilde, faz ayarlaması da enerji hattı düzeneğinin tümünden yeniden inşa edilmesini gerektirdiğinden yeniden tesis etmelerde pratik bir yol değildir. Çok fazlı enerji iletimi (6 ve 12 fazlı) ile yapılan araştırmalar bunların mevcut trifaze sistemlerle karşılaştırıldığında daha düşük magnetik alan ortaya koyduğunu göstermiştir (Stewart vd., 1983). Bu hatlar sadece enerji hatlarının değil tüm enerji sisteminin yeniden dizayn edilmesini gerektirecektir. Yüksek gerilimli DC hatları gibi diğer teknikler düşük frekanslı magnetik alanları ortadan kaldırdığı gibi yüksek DC magnetik alanlarına neden olacaktır. Ayrıca mevcut elektrik sistemi tümünden değiştirmek gerekeceğinden bu sistemler elektrik dağıtım sistemleri için kullanışlı değildir.

Özet olarak, havai iletim ve dağıtım hatlarının magnetik alanlarını azaltmak üzere hat yoğunlaştırması ve hatların faz ayarlamasında oynama yapmak hariç olmak üzere, pek bir şey yapılamamaktadır. Bu teknikler mevcut sistemleri değiştirmek için kullanılacak ancak çok pahalı olan yeni tasarımlara daha çok uymaktadır.

Yeraltı yüksek gerilim kabloları ilk olarak 1927'de kullanılırken, kabloların etrafında çelik boru ilk defa 1932'de kullanıldı. Havai hatlar için mevcut olan tüm tekniklere ek olarak yeraltı kablolarının magnetik alanını azaltmak üzere magnetik ekranlama kullanılabilir (Gillette vd., 1954).

Magnetik ekranlamanın avantajı, mevcut enerji kablolarının magnetik alanlarını azaltmak üzere görece ucuz bir yöntem olmasıdır. Ekranlama teorisi, özellikle düşük frekanslı magnetik ekranlama bilimsel literatürde zengince temsil edilmemiştir. 1951'den günümüze doğru yapılan elektrik mühendisliği ve 1910'dan günümüze doğru yapılan fizik literatür taramasında

Çalışmaların buyk çoğunluğu analizlerini 1 kHz üzerindeki frekanslarla sınırladığından uygun değildir. Mevcut teknikler ya (1) iletim hattı teorisine dayanmakta ya (2) ekran ebatlarını sonsuz varsaymakta ya (3) integral denklemler kullanmakta veya (4) Sonlu Elemanlar Yöntemi veya Sınır Elemanları Yöntemi gibi karmaşık numerik teknikler kullanmaktadır. Bu tekniklerin her biri düşük frekanslı magnetik ekranlamada kullanım için ya yetersizdir ya da kullanımı çok zordur. Ayrıca birçok magnetik ekranlama tekniği ya DC magnetik alanlarını kabul etmekte ve böylece indüksiyon akımlarını ihmal etmektedir veya magnetik olmayan bir ekranı kabul edip, geçirgenlik etkilerini ihmal etmektedir. Keyfi iki boyutlu yapıların düşük frekanslı magnetik ekranlamasını belirlemek üzere elektromagnetik teoride uzman olmayanların da kullanabileceği pratik bir tekniğe ihtiyaç vardır.



## 2. ELEKTROMAGNETİK UYUMLULUK VE GİRİŞİM KAYNAKLARI

Elektromagnetik uyumluluk, fizik ilkelerinin, karmaşık elektrik ve elektronik sistemlerin birbirleriyle elektromagnetik girişim yapmadan, uyum içerisinde çalışabilmelerini sağlamak amacıyla uygulandığı çalışma alanıdır. Diğer bir deyişle elektromagnetik uyumluluk, aygıtların iletim, ışınım ya da indükleme ile meydana gelen elektromagnetik girişimden kaynaklanan bozulmalardan korunmasıdır.

Elektronik sistemlerin tatmin edici bir şekilde çalışabilmeleri için elektromagnetik uyumluluğun sağlanması gerekir. Bu çalışma alanında çeşitli sınırlamalar vardır. Bunlardan biri, Avrupa Birliği yasasıdır (Directive 89/336/EEC). Bu yasaya göre Avrupalı elektrik malzemeleri üreticileri ve ithalatçıları kendi ürünlerinin elektrik ve elektronik aygıtların üzerinde herhangi bir girişim meydana getirmeyeceklerini garanti etmek zorundadırlar. Bu yasa özellikle radyo ve televizyon için önemli olmasına karşın, yasa sadece bunlarla sınırlı değildir. Yasa aynı zamanda girişimden etkilenen aygıtlar içinde geçerlidir.

Bir elektronik sistemin bir alt elemanının, diğer bir alt elemanı ile veya diğer sistemlerle olan elektromagnetik girişim problemi, elektriksel sistemlerle çalışılmaya başlanmasından beri bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu konuya özellikle, II. Dünya savaşıdan sonra ilgi artmıştır. Elektromagnetik uyumluluk çalışmalarının çoğu 1980'li yıllara kadar askeri donanım güvenliği üzerine yoğunlaşmıştır. Daha sonradan elektromagnetik uyumluluk çalışmaları günlük hayatta kullandığımız elektronik aygıtlarla, endüstriyel uygulamaları da içine alacak şekilde genişlemiştir. Günümüzde elektronik aygıtların yaygın bir şekilde kullanılması ve gelecekte elektronik aygıt kullanımının artacağı düşünülürse elektromagnetik uyumluluk kavramının önümüzdeki yıllarda daha da önem kazanacağı açıktır.

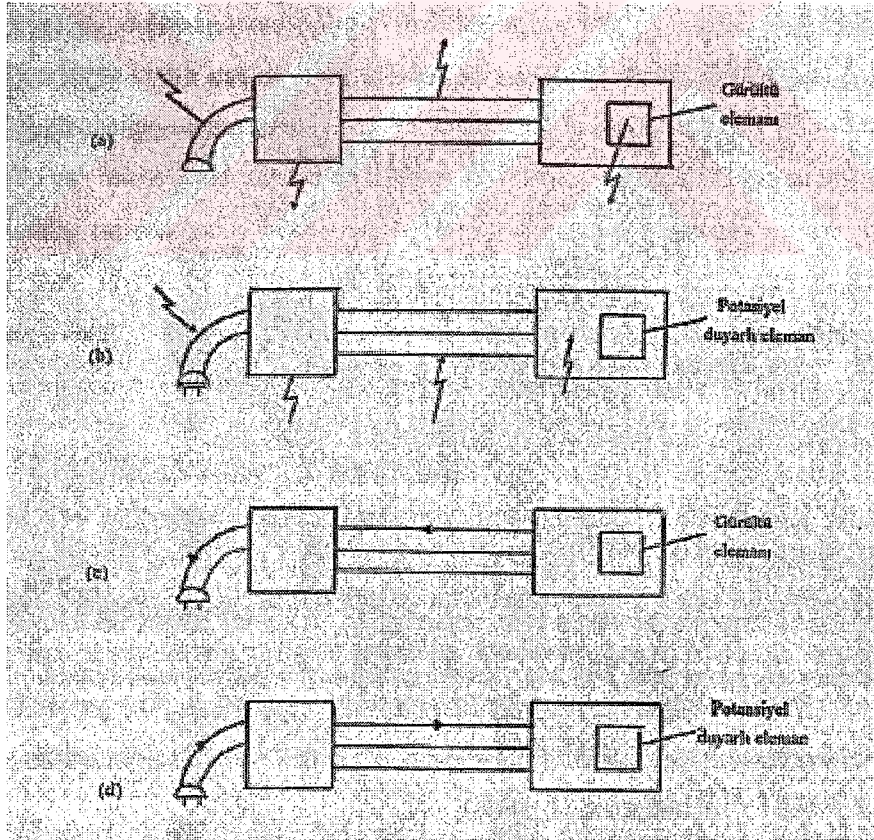
EMU, bütün bir elektronik kontrol sistemi veya bütün bir kent gibi, inter-sistem, intra-sistem ve sistemler için düşünülmelidir. Alıcı olarak çalışan herhangi bir sistem, özel elektromagnetik bozulmaya maruz kaldığında uygun bir şekilde çalışabilmelidir. Sistem aynı zamanda bazı belirlenmiş düzeylerin üzerindeki elektromagnetik girişimlerin kaynağı olmamalıdır. Alıcı noktadaki bu düzeyler yasalarla belirlenmiştir.

Bir alt sistemin tasarımcısı kendi EMU sınırlarını bağımsız olarak belirleyemez. Tasarımcıların, bazıları öneri niteliğinde, bazıları ise yasal gereksinimlerden kaynaklanan sınırlamaları göz önünde bulundurmaları gerekmektedir. Bunun yanında sistemin normal çevre içerisinde ve belli bir tolerans çerçevesinde güvenli çalışabileceği koşullarda daha önceden belirlenmiş hiçbir sınırlama olmayabilir. Ürün tasarımının söz konusu olmadığı

durumlarda bile, EMU kontrol teknikleri herhangi bir elektriksel sistem ve deneydeki elektriksel gürültü problemlerinin çözümünde kullanılabilirler.

## 2.1 Elektromagnetik Uyumluluk Problemleri

Elektromagnetik uyumluluk çalışmaları incelenirken bu konuda dört temel problem vardır. Bunlar; ışınım emisyonları, ışınım duyarlılığı, iletim emisyonları, iletim duyarlılığı problemleridir. Bilindiği gibi herhangi bir elektronik sistemde, bir veya daha çok alt sistem, kablolar aracılığı ile iletişim halindedir. Kablolar ayrıca, dalganın geçmesi ve alt sistemlere bağlanması içinde kullanılır. Girişim işaretleri bu kablolar aracılığı ile alt sistemlere geçerler. Eğer alt sistemler metal bir muhafaza içerisinde iseler, iç ve dış işaretler tarafından akım endüklenmesi oluşturulur. Bu akımlarla, kabinin içine ve dışına doğru ışınım yaparlar. Genellikle maliyeti ucuz olduğu için plastik muhafaza kullanmak yaygınlaşmıştır. Bu tip kabinlerde muhafaza edilen elektronik sistemler, elektromagnetik emisyonlara, direk ışınım ve emisyonlara maruz kalırlar (Pancar, 1999). Bu anlamda aşağıda isimleri belirtilen dört adet elektromagnetik uyumluluk (EMU) problemi ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Dört temel EMU problemi (a) Işınım emisyonları, (b) Işınım duyarlılığı, (c) İletim emisyonları, (d) İletim duyarlılığı (Pancar,1999)

Elektromagnetik emisyonlar, alternatif akım güç bağlantılarındaki alt sistemi çevreleyen metal kabinlerde, alt sistem bağlantılarında veya metal olmayan kabin içerisindeki elektronik kabinlerde oluşur (Şekil 2.1.a). AA enerji kablolarında sadece 50 Hz'lik işaret mevcut olmayıp, daha yüksek frekanslı işaretlerde olabilir. 1 metre veya daha uzun AA kablolarında yüksek frekanslı akımlar oluşabilir ve bu durumdaki kablo, tıpkı anten gibi, etkin bir şekilde ışıma yapabilir, veya yakınındaki elektronik sistemden ışıma alabilir (Şekil 2.1.b). Bu kablolarda endüklenen işaretler, bağlantıların olduğu alt sistemlere geçebilir ve bu yüzden, devrelerde girişim oluşabilir. Şekil 2.1.c ve şekil 2.1.d'de görüldüğü gibi, elektromagnetik enerji sadece havadan yayılmayıp, doğrudan iletkenlerde de oluşabilir. Bu bağlanma yolu genellikle havaya göre daha etkindir. Elektronik sistem tasarımcıları, bu istenmeyen enerji geçişine karşı filtre kullanırlar.

Şekil 2.1'de gösterilen durumların dışında da girişim problemleri vardır. Örneğin AA enerji kablolarından dışarı doğru iletilen akımların, enerji dağıtım şebekesi üzerinden akması durumunda, birbirine bağlı iletkenlerden oluşan iletim şebekesi bu işaretleri yoğun bir şekilde ışıyabilir. Buna iletilen emisyonun ışıma emisyonu iletilmesi denir. İletim emisyonlarına bir örnek; DA motoru ile çalışan bir blender veya benzeri bir ev içi aygıtın çalışması esnasında televizyonda ortaya çıkan girişim gösterilebilir. DA motorunun fırçalarındaki arklardan oluşan gürültü, blenderin AA kablosundan geçerek, evin enerji sistemine gelir ve ışıma yapar. Bu ışıma da televizyon tarafından girişim olarak alınır. AA kabloları üzerine getirilen sınırlandırmalar ile enerji dağıtım sistemlerinin ışıma emisyonlarının azaltılması amaçlanır.

Bazı durumlarda elektromagnetik girişim düzeyi, girişimden etkilenen aygıtın, elektromagnetik girişim kaynağından belli uzaklıkta ve aygıtın minimum ışıma alacak şekilde yerleştirilmesiyle başarılabılır. Fakat bu durum sadece iletim yoluyla girişim için geçerlidir. Havada yayılan girişim için bunun yararı olmaz.

Uygulamada karşılaşılan EMU problemlerinin çeşitleri hakkında bir fikir verebilmek için, yakın geçmişte ortaya çıkan önemli birkaç olayın açıklanmasında yarar vardır. Vietnam savaşı sırasında ABD Forestall uçak gemisinde, geminin radarı tarafından istenmeyen bir şekilde roket bırakma devresi harekete geçmiştir. Bu olay sonucunda, 27 uçak tahrip olmuş ve 134 kişi ölmüştür. Bundan 20 yıl sonra Falkland savaşında, HMS Sheffield gemisi, gemi radarının elektromagnetik girişim sonucu çalışmaması neticesinde düşman torpidosunun fark edilememesinden dolayı batırılmıştır. Mobil telefonlar da diğer bir elektromagnetik girişim meydana getiren aygıtlardır. Mobil telefonlar, otomobillerde kullanılması esnasında elektromagnetik girişim meydana getirerek arabadaki elektronik sistemlerin istenmeyen bir

şekilde çalışmasına, örneğin hava yastığının harekete geçmesine neden olabilirler. Uluslararası bir jetonlu telefon üreticisi, dünyanın bir bölgesinde başarıyla telefon satmakta iken, Amerika pazarına girdiğinde aynı başarıyı sağlayamamıştır. Bunun nedeni bazı bölgelere yerleştirilmiş telefonların yakın çevredeki iletişim sistemlerinin mikrodalga ışımlarından etkilenip bozunuma uğramalarıdır. Çünkü, telefonlar, daha önceden denenmedikleri bir ortama konulmuşlardır. Birkaç yıl önce yeni geliştirilmiş ve çelik işlerinde kullanılan radyo kontrollü bir vinç, beklenmedik bir anda, bir kepçe dolusu erimiş çeliği işçilerin üzerine dökmüştür. Yapılan araştırmalar sonunda yeni radyo linkinin bazı durumlarda asıl açma-kapama düğmesi ile karıştığı ve kazaya bu durumun yol açtığı çıkmıştır. Bu durumlar, geçici olarak kurulan bir inşaat iskelesinin bazı noktalarda radyo sinyalleri üzerine yaptığı bozucu etkinin sonucudur. Diğer bir örnek, otomotiv elektroniği alanında verilebilir. Modern gösterge sistemleri yüksek frekans lojji Fourier analizi kullanırlar. Bu tip sistemler, arabanın radyo ve frekans sistemleriyle girişim yapabilmektedirler. Anten konumu, arabanın iç dış elektromagnetik tasarımı ve göstergenin gürültü çıkışlarının belirlenmesi problem doğuracağından, izin verilen ışımanın dikkatli bir şekilde sınıflandırılması zordur. Uluslararası uçak pilotları federasyonu, mobil telefonların, CD çalıcı ya da diğer elektronik aygıtların yolcular tarafından uçaklarda kullanılmalarından dolayı yılda ortalama olarak 20 olayın meydana geldiğini açıklamaktadır. Aynı şekilde, günlük hayatımızda beyaz eşya olarak tanımladığımız cihazların kullanılmaları ile radyo, televizyon gibi aygıtlarda meydana gelen ses ve görüntü bozuklukları, tehlikeli olmamasına rağmen pek hoş olmayan durumlardır.

Yukarıdaki örnekler bile elektromagnetik uyumluluğun ne kadar önemli olduğunun göstergesidir. Bu durum, çevremizde bulunan elektromagnetik girişim meydana getiren ekranlanmamış aygıtlardan kaynaklanmaktadır.

## 2.2 Elektromagnetik Uyumluluğun Biçimsel Tanımı

Elektromagnetik uyumluluk problemini tartışmak için, bazı terim kısaltmalarının bilinmesinde fayda vardır. Girişim sözcüğü sistemde zayıflamaya neden olan ses, istenmeyen işaret gibi olayları tanımlamak için kullanılır. Bu olay, aygıt, alet, ya da sistemin performansında, elektromagnetik bozukluk sonucu azalma oluşturabilir. Bu alanda kullanılan bazı temel kavramlar şunlardır

Elektromagnetik uyumluluk; bir aygıtın, bir malzemenin veya sistemin elektromagnetik ortam içerisinde herhangi bir elektromagnetik bozunuma meydan vermeden, fonksiyonlarını tatmin

edici bir şekilde yerine getirebilme yeteneği olarak tanımlanır.

Elektromagnetik bozulma; bir aygıt, alet ya da sistemin performansını azaltan elektromagnetik bir olaydır. Bir elektromagnetik bozukluk, elektromagnetik gürültü, istenmeyen işaret veya ortamda yayılmasındaki bir değişiklikten kaynaklanır.

Elektromagnetik ışıma ise; enerjinin, asıl kaynak kapatılsa bile, elektromagnetik dalga olarak uzayda yayılmasıdır.

Elektromagnetik duyarlılık; bir aygıt, bir malzeme veya sistemin elektromagnetik bozucu etkiler karşısında hatasız çalışmasıdır.

Elektromagnetik uyumluluk düzeyi ise; belirli durumlar altında çalışan bir aygıt veya sistemin çalışmasını etkileyecek maksimum elektromagnetik bozulma düzeyidir.

Elektromagnetik uyumluluk sınırı, bir aygıt veya sistemin bağışıklık düzeyinin, referans bozulma düzeyine oranıdır. Dikkat edilmesi gereken nokta, sözü edilen olasılığın belirlenmesinin zor bir kavram olduğudur. Bu olasılık, verilen bir sistem için, temel prensiplerden yararlanarak, örneğin devre diyagramlarından başlayarak, gerçekçi bir şekilde hesaplanamamasıdır. Bunun yerine, sistemin örneklerinin istatistiksel davranışları ve ölçümlerden elde edilen bozulma emisyon ve bağışıklık düzeylerinin incelenmesiyle hesaplanır.

### **2.3 Girişim Problemlerinin Çözümünde Genel Yöntemler**

Elektromagnetik uyumluluk (EMU) teknikleri, iki genel şekilde kullanılabilir. Birincisi, elektriksel bozunumlardan kaynaklanan problemlerin çözümü esnasında kullanım veya daha verimli bir şekilde tasarım aşamasında yaygın görülen gürültü kaynaklarının bilinmesidir.

En basit düzeyde, bir sistemin diğer bir sistem üzerindeki elektriksel girişimini etkisiz bırakabilmek için, beş ana yöntem vardır:

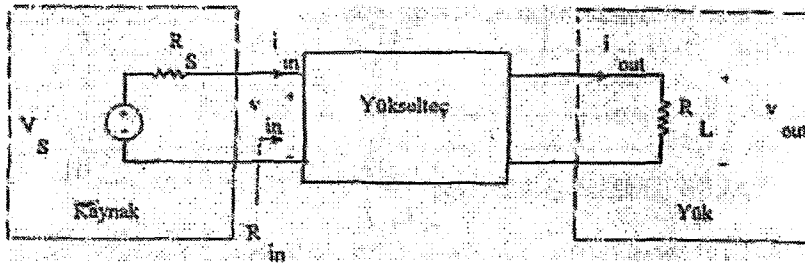
- Duyarlı devreyi ve alıcıyı kaynaktan olabildiğince uzağa yerleştirmek. Bu yöntem, kuplaj, eğer elektromagnetik dalgalarla yapılyorsa, yararlı olur. Ama kuplaj yolu iletkense hiçbir yarar sağlamaz.
- Bazı kuplaj alanları polarize olmuşlardır. Bu yüzden alıcının kaynağa göre uygun uyarlamaları ile bu etki minimuma indirilir. Bu tür teknikler sadece sabit alıcı ve vericiler için kullanılabilir.

- Alıcı ve/veya çevresine engel veya ekran koymak. Bu teknik kullanıldığı zaman, ekranı delip geçen herhangi bir iletkenin düzeltilmesi birinci dereceden önem kazanır.
- Uygun bir tasarım ile kaynağın daha az gürültülü hale getirilmesi.
- Uygun bir tasarım ile alıcının elektriksel girişimlere karşı daha az duyarlı hale getirilmesi.

#### 2.4 Elektromagnetik Alan Uyumluluk Birimleri

Elektromagnetik uyumluluk problemlerinde temel birimleriyle esas kavramlar, volt biriminde gerilim, amper biriminde akım, V/m biriminde elektrik alan, A/m biriminde magnetik alan şeklindedir. Ayrıca, watt biriminde güç veya W/m<sup>2</sup> biriminde güç yoğunluğu tanımları da elektromagnetik uyumluluk kavramlarıdır. EMU olaylarında, birimlerin sayılarla ifade edilmesi, desibel (dB) biriminin kullanılmasına yol açmıştır. Bu birimle sonucun sıkıştırılmış ifadesi mümkündür. Örneğin; 10<sup>8</sup> mertebesinde bir geriliminin 160 dB ile gösterilmesi mümkündür.

Desibel ilk olarak, telefon devrelerindeki gürültü etkisini logaritmik olarak tanımlamak için kullanılmıştır. Kulak, sesleri logaritmik olarak işler. Bu nedenle, gürültünün dB olarak tanımlanması sayesinde doğa ile bir bakıma uyum sağlanmış olunacaktır. Şekil 3.2'de yükselteç devresinde, açık devre gerilimi  $V_s$  olan bir kaynak gösterilmektedir. Bu kaynağın direnci  $R_s$  ile gösterilsin ve işaret, yükü  $R_L$  ile gösterilen yükseltece  $R_s$  vasıtasıyla bağlansın. Yükseltecin giriş direnci  $R_{in}$  ise, yükseltece verilen güç,



Şekil 2.2 Desibel Biriminin tanımlanması (Pancar, 1999)

$$P_{in} = \frac{V_{in}^2}{R_{in}} \quad (2.1)$$

ve çıkış gücü;

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R_L} \quad (2.2)$$

olur. Yükselticinin güç kazancı,

$$\text{Güç kazancı} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out}^2}{V_{in}^2} \frac{R_{in}}{R_L} \quad (2.3)$$

olacaktır.

Güç kazancı desibel biriminde şu şekilde tanımlanır:

$$\text{Güç Kazancı (dB)} \cong 10 \log \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.4)$$

benzer şekilde gerilim ve akım kazançları dB olarak:

$$\text{Gerilim Kazancı (dB)} \cong 20 \log \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (2.5)$$

$$\text{Akım Kazancı (dB)} \cong 20 \log \left( \frac{i_{out}}{i_{in}} \right) \quad (2.6)$$

olur. Burada görüldüğü gibi dB biriminde güç kazancı, iki büyüklüğün oranlarının 10log işlemine uygulanmasıyla elde edilir. Gerilim ve akım kazancının dB ile tanımı ise; iki büyüklüğün oranlarının 20log ile işlem görmesi olarak ifade edilir.

Güç, gerilim ve akım değerlerinin tümünü dB biriminde ifade etmek mümkündür. Örneğin gerilimler,  $1\mu\text{V}$ 'a göre, dB $\mu\text{V}$  olarak ifade edilebilir. Yani,

$$\text{dB}\mu\text{V} = 20 \log \left( \frac{\text{Volt}}{1\mu\text{V}} \right) \quad (2.7)$$

olur. Örneğin 1 Volt değerinin dB $\mu\text{V}$  cinsinden değeri hesaplanırsa:

$$20 \log \left( \frac{1\text{V}}{10^{-6}} \right) = 20 \log 10^6 = 120 \text{ dB}\mu\text{V} \quad (2.8)$$

bulunur.

Çizelge 2.1'de çeşitli oranların dB cinsinden değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çeşitli mertebeden değerlerin desibel cinsinden karşılıkları

ORAN	Desibel Cinsinden	Desibel Cinsinden
	V veya I	P
10	120	60
$10^5$	100	50
$10^4$	80	40
$10^3$	60	30
$10^2$	40	20

Görüldüğü gibi, fiziksel kavramları dB biriminde tanımlamak, büyük sayıları daha küçük sayılarla ifade imkânını sağlamaktadır.

## 2.5 Elektromagnetik Girişim Kaynakları

Herhangi bir elektronik cihazın imalatı sırasında, bu birimi oluşturan devrelerin ve elemanların civardaki elektrik ve magnetik alanlara karşı korunmasını sağlamak için çeşitli önlemler almak gerekmektedir. Daimi mıknatıslar, transformatörler, telefon hatları, filtreler elektromagnetik alanların kaynağı olabilirler. Bu durumlarda imal edilen aygıtın, girişim etkisinden yalıtılarak ekranlanması gerekir. Aksi takdirde, örneğin magnetik şerit üzerindeki bilgiler, kuvvetli elektromagnetik alanların etkisi sonucu hasar görebilir ya da tamamen yok olabilir.

Bobin ve transformatörler, güçlü mıknatısların yanına monte edildiklerinde performansları bozulabilir. Örneğin, rezonans devresinin frekansı kayabilir. Özellikle vakum tüpleri, elektron yolu uzun olduğundan, girişim etkisine karşı çok duyarlıdır. Benzer problemler, mikrodalga aygıtlarında ve devrelerinde de vardır. Ölçme yapan herhangi bir kimsenin, elde ettiği ölçünün kesin olarak doğru olduğundan emin olması imkansızdır. Bu nedenle, mikrodalga ölçümlerinde, mikrodalga ekranlarının tasarlanması gereklidir. Böyle bir ekranlama, ekran içindeki elektromagnetik enerjinin dışarı kaçmasını engellediği gibi aynı zamanda dışardan içeriye enerji girişini de engeller. Bir aygıtın tasarımında, ideal olarak, istenilmeyen enerjiyi yayınlamaması ve arzu edilmeyen herhangi bir enerjiye karşı da, duyarlı

olmaması istenir. Bunun başarılması aygıtın ekranlanması ile sağlanabilir ki böylelikle, ister dışarıdan içeriye, isterse de içeriden dışarıya yönelmiş olan elektromagnetik enerjinin efektif olarak zayıflaması sağlanır.

Diğer girişim kaynakları arasında dünyanın magnetik alanı da gösterilebilir. Yapılarda kullanılan çelikler ve ferromagnetik özellikli malzemeler, istenmeyen magnetik özellikli ortamın oluşmasına katkıda bulunurlar. Modern yapı tekniğinde, tavanların alçak tutulması ve binanın dayanıklı olması için çelik çubukların kullanılması magnetik problemlerin artmasına neden olmuştur.

Diğer taraftan, aydınlatma ve enerji iletim hatları, yeraltı iletim kabloları, kiloamperler mertebesinde akıma ve kilovoltlar mertebesinde gerilime sahiptirler. Eğer bir elektronik devre alternatif akımla çalışmak durumundaysa, uzun yeraltı veya hava hatları ile birbirine bağlanmalıdır. Kablolar ile küçük işaret elektronik aygıtları arasına konacak ekranın, geçiş darbelerini 100 dB'den daha fazla azaltacak özellikte olması gerekir.

### **2.5.1 Elektromagnetik Girişim Kaynaklarının Sınıflandırılması**

Çok sayıda elektromagnetik girişim kaynağı çevreyi kirletmektedir. Uygulamalarda bu elektromagnetik kaynakların küçük bir bölümü ön plana çıkmasına rağmen tüm elektromagnetik girişim kaynaklarının gözden geçirilmesi, bir elektromagnetik tehdit altında doğru soruların sorulmasına imkan verecektir. Elektromagnetik girişim kaynaklarının teşhis edilmesinde bir takım güçlüklerle karşılaşılacaktır. Çünkü her uygulama kendine has özellikler içermektedir. Çoğu uygulama için benzer elektromagnetik tehditler söz konusu olmasına rağmen baskın tasarım ve işlemsel faktörler her uygulamada farklılıklar gösterir. Elektromagnetik girişim kaynaklarının geniş başlıklar altında toplanması elektromagnetik girişim incelemelerinde bize kolaylıklar sağlayacaktır. Elbette ki sınıflandırmada kullanılan kriterler sonucu etkileyecektir.

Elektromagnetik girişim kaynakları kaynağın sürekli ya da geçici olup olmamasına göre sınıflandırılabilirler. Girişim kaynağı olarak geçici girişim kaynağının kabul edildiği bazı uygulamalarda sürekli girişim de uygulama için tehlikeli olabilmektedir.

Ayrıca kaynaklar doğada istenilerek veya istenilmeden meydana gelmeleri şeklinde de sınıflandırılabilir. İstenilerek meydana getirilen kaynağa, radyo yayını yapan radyo vericisi örnek gösterilebilirken; bilgisayardan bilgisayara sayısal işaret hattından yayılan girişim, istenilmeden meydana gelen girişim kaynağı olarak gösterilebilir.

Girişim, diğer taraftan band genişliğine bağlı olarak geniş band girişim, dar band girişim olarak da sınıflandırılabilir.

Girişim kaynağı dahili ya da harici olabilir. Enerji sistemlerinde açma-kapama işlemi ile meydana gelen girişim dahili girişim kaynağı olmasına karşın yıldırım, sistemi dışarıdan etkileyen harici bir kaynaktır.

Elektromagnetik girişim kaynaklarının sınıflandırılmasında, daha birçok ölçütten yararlanılabilir. Fakat, biz burada girişimi iki genel başlık altında toplayacağız. Birincisi, doğal olaylardan kaynaklanan girişim, ikincisi de insan etkinliklerinden kaynaklanan girişimdir.

## 2.5.2 Doğal Elektromagnetik Girişim Kaynakları

Doğal kaynaklar; alçak frekanslı, yıldırım ve yüksek frekanslı elektromagnetik girişim kaynakları olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır.

### 2.5.2.1 Alçak Frekanslı Elektrik ve Magnetik Alanlar

İlk bakışta alçak frekanslı elektromagnetik alanların elektromagnetik uyumluluk çalışmalarında önemli bir yer kaplamadığı görüşü ortaya çıkabilir. Şüphesiz ki, bu tip alanlar ile ilgili çalışmalar bazı özel tip aygıtların dışında oldukça azdır. Bununla birlikte alçak frekanslı alanların önemli etkilerinin olabileceği durumlar vardır. Yer mıknatıslanma alanının magnetik alan şiddeti yaklaşık olarak 30 A/m şiddetindedir. Güneş hareketleri ile ilişkili olduğuna inanılan bu alanın saat periyotları bazında değişimleri magnetik fırtına olarak tanımlanır. Magnetik fırtına olarak tanımlanan bu alandaki değişimler, bu alanla ilişkili elektrik alanı üretirler. Alanların mühendislik açısından ihmal edilebilecek düzeyde olmalarına karşın bu alanlar büyük ağ sistemlerinde istenmeyen önemli etkiler meydana getirebilirler. Magnetik alanların değişimi, dünya yüzeyinde potansiyel farklılıkların endüklenmesine neden olabilir ki; bu topraklanmış transformatörlerin nötüründe akım (100 A mertebesinde) akmasına sebebiyet verir. Bu akım, akım transformatörlerinin doymasına neden olabilir. Böylece koruma sistemi düzenlemelerinde birçok sorunlar meydana gelir.

### 2.5.2.2 Yıldırım

Yıldırım tüm elektromagnetik olaylar içerisinde en güçlü olanıdır. Yıldırım boşalması esnasında yer ile yıldırım bulutları arasındaki potansiyel farkı 100 MV'lar, yük değişimi 20 C'lar mertebesinde. Elektrik fırtınaları esnasında,  $10^{10}$  joule mertebesindeki enerjiler söz

konusudur. Yıldırımın basit fiziksel açıklaması şu şekilde yapılabilir. Karmaşık işlemler sonucu, yıldırım bulutlarında yük ayrımı meydana gelir. Böylece büyük miktarda negatif elektriksel yük bulutun alt tarafında yoğunlaşır. Alan yükselmesi ve iyonizasyon, bir kanal oluşumuna yol açar ve basamaklar halinde yere doğru ilerler. Bu kanal yere doğru yaklaşırken yerden buluta doğru pozitif bir boşalmanın başlamasına neden olur. Buluttan ve yerden ilerleyen kanallar birleştiğinde içinden oldukça yüksek bir akım geçiren yüksek iletkenli iyonize olmuş bir kanal oluşur (ana boşalma). Ana boşalma akımları oldukça yüksek olabilir. Tüm yıldırımların yaklaşık %10'nunda 40 kA'den büyük, %1'inde 100 kA'den büyük boşalma akımı gözlenir. Akım darbeleri 1  $\mu$ s yükselme, 50  $\mu$ s sönme süresine sahiptir.

Yıldırım etkilerini iki gruba ayırmak mümkündür. Birincisi, yıldırımın bina ya da uçak gibi yapılara doğrudan teması ile oluşan doğrudan etkilerdir. Bu etki, yapıda mekanik hasarlara, yangınlara ya da patlamalara yol açabilir. İkincisi, yıldırım olayı esnasında hızlı akım değişimlerinden indüklenmiş girişim işaretlerinin, yakındaki devre ve yapılarda oluşturduğu etkilerdir. Bu etkiler, dolaylı etkiler olarak bilinir. İkincisi yani dolaylı etki olarak tanımladığımız etkiler elektromagnetik uyumluluk çalışmaları içerisine girmektedir. Uçan sistemlere yıldırım etkisi özel bir çalışma alanıdır. Yapılmış ölçümler, uçaklar üzerinde 600 A/m, 50 kV/m civarında alan şiddetlerinin ve 150 kA/ $\mu$ s mertebesinde akım yükselme oranının meydana geldiğini göstermektedir.

### 2.5.2.3 Yüksek Frekanslı Elektromagnetik Dalgalar

Ortalama 30 MHz'in altındaki yüksek frekans alanları genel olarak statik veya sferik alanlar olarak ifade edilir. Geniş mevsimsel ve bölgesel değişimler söz konusudur. Genellikle, gece ve ekvatora yakın yerlerde yüksek olmakla birlikte frekansın artmasıyla bu alan şiddeti düşme eğilimi gösterir. 30 MHz'den yüksek frekanslar kozmik kökenlidir. Dünyanın magnetosfer, iyonesfer ve atmosfer yapısı, dünya dışından kaynaklanan Elektromagnetik alanları kısmi olarak ekranlamaktadır. Dışarıdan yer yüzeyine Elektromagnetik alan girişi sadece optik frekanslarda (kırmızı ötesi frekanslarda) ve 10 MHz ila 37 GHz arasındaki radyo frekanslarında mümkün olmaktadır. Elektromagnetik uyumluluk çalışma alanına giren radyo frekans geçiş bandı, iyonesfer ekranlama özellikleri ve gelen alanın su molekülleriyle zayıflatılmasıyla belirlenir. Kozmik radyasyon kaynağı güneş ve galaksilerdir. Her galaksi büyük termal parçacıklarla 10 MHz ila 10 GHz arasında yaklaşık  $10^{35}$  W gücünde ve aynı zamanda bazı özel frekanslarda (hidrojen 1.428 GHz frekansta) yayınım yapar.

### 2.5.3 İnsan Yapımı Elektromagnetik Girişim Kaynakları

İnsan yapımı mühendislik aygıtları, elektromagnetik çevre açısından önemli bir yer tutmaktadırlar. Belki de bu, elektromagnetik kirlilik şekli olarak da düşünülebilir. Elektromagnetik girişim kontrolüne ve elektromagnetik girişimin azaltılması çalışmalarına çok büyük ilginin gösterilmesine ihtiyaç vardır.

Radyo vericileri; insan yapımı ışıyım şeklidir. Bu mobil ve sabit vericiler, radarlar, bilgisayardan bilgisayara iletişim, sayı, güç ve bölgesel dağılım bakımından devamlı olarak artmaktadır. Uluslararası düzenleme komiteleri, farklı tipteki uygulamalar için sabit frekans kanalları tahsis etmektedir. Şehir çevresindeki yayın vericilerinden kaynaklanan elektrik alan şiddeti 200 mV/m üzerine nadir olarak çıkar. Bununla birlikte, güçlü verici yakınında alan şiddetinin 10 V/m'ler mertebesinde olduğu görülebilmektedir. 250 kW gücündeki vericiler ile 100 m uzaklıkta, 4 MHz'de, 8 V/m'luk alan şiddetleri; 26 MHz'de, 272 V/m şiddetinde alanlar oluşur. Bu yayınımların darbandda olmalarına rağmen taşıyıcı frekans harmoniklerinde girişim gözlenir. Aynı zamanda vericideki çeşitli aşamalardan kaynaklanan genişband gürültü kirliliği meydana gelebilir. Bir vericinin iyi tasarlanmış bir verici statüsünü elde edebilmesi için harmoniklerinin ve gürültüsünün, temel frekans gücünün (70 dB) oldukça altında olması gerekmektedir.

Elektrikle ısı elde etme uygulamaları; oldukça yüksek iletkenliğe sahip numunelerde, ısıtma, endükleme akımından meydana gelir (endüklemeye ısıtma). Oysa, yalıtkan malzemelerde ısınma dielektrik kayıplardan kaynaklanmaktadır (dielektrik ısıtma). Endüksiyonla ısıtma için kullanılan frekanslar 1-100 kHz ve 1 MHz'dir. Bunun yanında, dielektrik ısıtma için çalışma frekansları 13,560 MHz; 27,12 MHz, 40,68 MHz, 433 MHz, 915 MHz, 2,45 MHz ve 5.8 GHz'dir. Böyle ısıtıcılardan 30 m uzaklıkta yapılan ölçümlerde, elektrik alan değeri normalde 100 dB  $\mu$ V/m değerindedir. Ev içi mikrodalga fırınlarının çalışma frekanslarındaki harmonikleri uydu yayın frekanslarında girişim meydana getirirler.

Sayısal işaret işleme ve iletim yöntemleri, bilgileri iletmek için hızlı darbelerden yararlanırlar. İşaret işleme, depolama, giriş, ve çıkış; sürekli olarak elektronik bir saat ile senkronize bir şekilde meydana gelir. Daha yüksek işleme hızları ve daha hızlı bilgi iletimi için daha yüksek saat hızı ve bundan dolayı daha kısa geçiş zamanı (düşüş ve yükselme zamanları) gerektirir. Hızlı geçiş zamanları, çalışma açısından bakıldığında istenildiği halde hızlı geçiş zamanları elektromagnetik uyumluluk açısından bakıldığında istenmeyen bir durumdur. Çünkü hızlı geçiş zamanları yüksek dereceli harmoniklere katkıda bulunurlar. Temel frekansın 20 katı ya da daha yüksek

frekanslarda önemli miktarda güç bulunmaktadır.

Enerji üretimi ve iletimi; elektromagnetik girişim kaynağı olduğu gibi aynı zamanda elektromagnetik girişimden de etkilenmektedir. Yüksek kaliteli kaynaklar kullanılmasına rağmen, yine de tüm işaret aralıkları ve parazitleri, geniş veya kısmi olarak şebekelerde yer almaktadır. Şebekelerde enerji kalitesi, elektromagnetik uyumluluk çalışmaları içerisinde.

Alçak frekanslı girişimlerde harmonikler; çevirici düzenlerden, güç sistemlerinde transformatör ve ark fırınları gibi lineer olmayan aygıtların varlığından dolayı ana frekansın (50 Hz ya da 60Hz) katlarından oluşan frekansı sinüs biçiminde gerilim ve akımlar üretilir. Örneğin; çevirici, ana frekansın "n" katındaki frekansta sinyal oluşturur.

$$n=m.p\pm 1$$

$$m=1,2,3,\dots$$

ve

$p=6,12,\dots$  çeviricinin darbe sayısıdır.

Gerilimin toplam harmonik bozulması (THD)

$$V_{THD} = \% \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}$$

ifadesi ile hesaplanır.

Harmonikler; iletim ile girişim, aşırı ısınma, kontrol ve koruma sistemlerinde bozulmalar, motorlarda istenmeyen moment darbeleri şeklinde bazı istenmeyen etkileri meydana getirirler.

Gerilim dalgalanmaları; yüklerin devreye girmesi ve devreden çıkması sonucunda oluşan gerilimdeki küçük değişimler, dalgalanma ya da fliker (titreşme) olarak ifade edilir. Bu dalgalanmalar akkor telli lambalarda kendini parlaklığın azalıp artmasıyla gösterir. Gerilim dalgalanmalarının belli düzeyleri geçmemesi gerekmektedir. Örneğin, dakikada bir kereden fazla olmamak kaydıyla gerilim dalgalanması %27 olabilir. Bunun yanında, dakikada 10 kez meydana gelen dalgalanmalarda bu oran % 1.3'den fazla olmamalıdır.

Gerilim düşümleri; besleme gerilimindeki ani azalmaların (%10'dan fazla) 300 ms gibi bir sürede tekrar yerine oturtulması şebeke ağlarında sıkça rastlanılan bir olaydır. Araştırmalar bu gerilim düşümlerinin ve ara sıra oluşan kesilmelerin nedenlerinin yüksek ve orta gerilim

şebekelerinde meydana geldiğini göstermiştir. Şehir çevresinde ikamet eden tüketicilerde ayda anma geriliminin %10'dan fazla yaklaşık olarak dört tane gerilim düşümünün meydana geldiği tahmin edilir. Gerilim düşümleri, büyük yüklerin açıp kapatılması ve endüksiyon motorunun kullanımındaki yanlışlıklardan meydana gelmektedir. Gerilim düşümleri ve kesilmeler veri işleme aygıtlarında problemlere sebebiyet vermekle birlikte motorların ve otomasyon işlemlerinin doğru zamanlanması ve tekrar başlatılması gereksinimini ortaya çıkarmaktadır.

Dengesizlik; büyük tek-faz yüklerin varlığı ve her fazın eşit olmayan şekilde yüklenmesi gerilimde ve fazda dengesizliğe neden olmaktadır. Bazı motorlar, dengesiz bir kaynaktan beslendiği zaman ısınabilir. Pratikte bu dengesizlik %2'nin altında tutulmalıdır.

Enerji şebekesinin öncelikli görevi gücün tüketiciye iletilmesini sağlamaktır. Bununla birlikte kontrol (kamuya ait yerlerin aydınlatılması), yük yönetimi ve tarife tespitinde güç şebekesinin kullanılması mümkündür. Güç şebekelerinde işaret iletimi, yüksek frekanslarda meydana gelir. Fakat elektrik şebekesi, işaret iletimi için tasarlanmamıştır. Bu yüzden, gelecekte muhtemelen elektrik şebekelerinde işaret iletimi artacağından elektromagnetik uyumluluk gereksinimi olacaktır.

Alçak frekanslı yayınan girişimlerde; elektrik hatları ve ev aygıtlarının kullanımından dolayı meydana gelen boş elektrik ve magnetik alanlar çeşitli ülkelerde çeşitli sınırlamalara maruzdur. Şebeke frekansında, endüstriyel çevrede ve güç hatlarına yakın yerlerde 30 kV/m'den büyük olmayan, yine aynı şekilde ev aygıtlarının kullanıldığı mekanların yakınında 0,3 kV/m'lik elektrik alan olması beklenilebilir. Magnetik alanlar, nadiren endüstriyel çevrelerde 1mT'den büyük, ev aygıtları yakınında ve kablolarda 100µT civarındadır.

Yüksek frekanslı iletilen girişimlerde; alçak gerilim şebekelerinde ani gerilim yükselmeleri, hatların çeşitliliği, açma-kapama işlemleri, elektrik şebekesine yıldırım düşmesi sonucunda ev tüketicisi düzeyinde günde 10 kez 200V'u aşan ani gerilim yükselmeleri meydana gelmektedir. Bu ani gerilim yükselmelerinin genlikleri ve meydana geliş sıklıkları üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır.

Yüksek frekanslı iletilen girişimlerde; yüksek gerilim tesislerinde yürüyen dalgalar, yüksek gerilim tesisleri güçlü elektromagnetik çevrenin olduğu yerlerdir. Elektromagnetik uyumluluk açısından bakıldığında çoğu problem açma-kapama işlemi esnasında ortaya çıkmaktadır. SF<sub>6</sub>'nın gaz yalıtım ortamı olarak kullanıldığı gaz yalıtımlı istasyonlarda, daha hızlı anahtarlama, 10 ila 20ns mertebesindeki yükselme zamanı ve 40 MV/µs yükselme hızı

üretilmesi ile sonuçlanan dik cepheli geçici gerilimler ile elde edilebilir. Bu dalgalar yalıtım problemlerinin yanında istenmeyen elektromagnetik girişime de neden olabilir.

Yüksek frekansla yayınan girişimlerde; açma-kapama işlemi esnasında istasyonlar yakınında önemli büyüklükte yayınım alanları ölçülmektedir. Örneğin, bu istasyonlar civarında 200 MHz'den yüksek frekans bileşenli 70 kV/m büyüklüğünde elektrik alanları gözlenmektedir.

Birçok girişim, devrelerin sabit durumunda çalışmasından kaynaklandığı halde çoğu ciddi elektromagnetik girişim durumları; dışarıdan sisteme girmeye çalışan elektromagnetik alanlardan ya da sistemin normal çalışma fonksiyonlarından kaynaklanan ya da anormal durumlara karşı cevap şeklinde ortaya çıkan geçici olaylardan kaynaklanmaktadır. Normal koşullar altında çalışan elektriksel bir devrede enerji, kondansatör ve endüktans gibi özel elemanlarda depolanır. Kondansatörler elektrik alan enerjisini depolarlar. Bu depolanan enerji aşağıdaki şekildedir.

$$W_e = \frac{1}{2} CV^2 \text{ Joule} \quad (2.9)$$

Benzer şekilde, elektrik alanın E ve dielektrik sabitesinin  $\epsilon$  olduğu uzayın herhangi bir yerinde enerji depolama yoğunluğu;

$$W_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \text{ Joule} / m^3 \quad (2.10)$$

tür. Endüktanslar magnetik alan enerjisini depolarlar. Bu depolanan magnetik alan enerjisi;

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \text{ Joule} \quad (2.11)$$

Ve depolanan magnetik alan enerji yoğunluğu,

$$W_m = \frac{1}{2} \mu H^2 \text{ Joule} / m^3 \quad (2.12)$$

tür. Bir devredeki enerjinin tekrar dağılımı ani olarak yapılamaz. Bu temel fizik yasasıdır. Bir zaman periyodu içinde gerçekleşir. Bununla birlikte potansiyel olarak büyük miktarda enerji devrede geçici şekildedir. Bu periyot esnasında devre geçici koşullar altında incelenir. Belirtilen zaman diliminde, devrenin farklı yerlerindeki gerilim ve akım değerleri önceki sabit değerlere küçük bir etki yapar. Bu durumlar altında aşırı akımlar, aşırı gerilimler ve oldukça hızlı darbeler nadir olan olaylar değildir. Buradan diyebiliriz ki, bu olaylar elektromagnetik uyumluluk davranışlarını etkiler.

Şimdi daha detaylı olarak pratikte kullanılan bir elektromekanik anahtarın akım kesilmesinden sonra nasıl davranacağını inceleyelim. Kontakların ayrılmasını takiben anahtar üzerindeki akım iki kısımdan oluşur. Birincisi, güç kaynağından kaynaklanan  $I_1$  bileşenidir. Bu devrenin normal çalışma sırasındaki akım bileşenidir. İkincisi, yüksek frekans bileşeni  $I_2$  'dir. Bu akım enerji depolama elemanında tutulan enerjinin tekrar dağıtılmasından kaynaklanır ve doğada salınır. Kaynak frekansıyla karşılaştırıldığında bu bileşen oldukça yüksektir.

Büyük yapılar büyük oranda elektriksel bakımdan yüksüzdür. Bununla birlikte yük ayrımı ve yükleme; en azından tekinin yalıtkan olduğu iki yapının birbiriyle temasta olup daha sonra ayrılmasıyla meydana gelmektedir. Bu "tribo" etki olarak bilinir ve en eski bilinen elektriklenme olayıdır. Kontak sırasında bazı malzemeler elektron alma eğilimi gösterirken bazı malzemelerde elektron verme eğilimi gösterirler. Elektron almaya meyilli olanlar negatif olarak yüklenmeye, elektron verme eğiliminde olanlar pozitif yüklenmeye meyillidir. Yükleme endüklemeyle olabilir ki bununla, yüklenmiş yapı A, nötr yapı B'de yük ayrımına neden olur. B'nin geçici olarak topraklanması yükünün bir kısmının kaçmasına neden olur. Böylece arta kalan B yüklüdür. En çok rastlanan problem, düşük elektrik iletkenli yüzey (halı) üzerinde insanların yüklenmesine neden olduğu problemdir. İnsan vücudunun 10 kV'lar mertebesinde potansiyele yüklenebileceği bilinmektedir. Triboelektrik etkiden dolayı ayaklar negatif yük kaybederler. Endükleme ile vücut içerisinde yük ayrımı olur. Vücudun alt kısımları pozitif, üst kısımları negatif olarak yüklenir. Diğer bir cisme yaklaşırken, belki de ESD (elektrostatik boşalma) ile sonuçlanabilecek bir elektrik alan oluşur. Alçak gerilim ve daha hızlı yaklaşımlarla boşalmanın daha kısa yükselme zamanına sahip olduğu bilinmektedir.

Yüksek güçlü elektromagnetik darbe (NEMP) nükleer patlamanın ardından ortaya çıkar. Nükleer patlamanın ardından çok sayıda foton üretilir ve bu fotonlar uzay boyunca yayılırlar. Bu fotonlar, çevresindeki malzemelerle karşılıklı etkileşerek yüksek enerji elektronları üretirler (Compton Etkisi). Kompton elektronları yüksek hızda hareket ederler ve bunlar yoğun elektromagnetik alanları üreten kaynak akımlarıdır. Bu elektronlar daha fazla elektron üreterek ortamın iletkenliğini arttırırlar. NEMP'in zaman ve uzaya ait açılımı bu yüzden oldukça karışıktır ve yüksek enerjili parçacıkların malzemelerle karşılıklı etkileşimini gerektirir. Diğer etkiler, örneğin, nötronların karşılıklı etkileşimi ve yüklenmiş parçacıkların yörüngelerinin yerin magnetik alanından kaynaklanan bozulmaları zaten varolan karışıklığa ek karışıklık olarak katılmaktadır. NEMP üç kısma ayrılabilir. Birincisi, yüksek irtifadaki

patlamalar ( $> 100$  km ) ki bu patlamalar yüksek irtifa EMP olarak bilinir. İkincisi, yere yakın patlamalardır ve üçüncüsü de, sistem-üretimli EMP olarak adlandırılır.

Yüzey EMP yere yakın patlamaları ifade etmektedir ve elektromagnetikle ilgili etkileri çok daha sınırlı bir bölgeyi kapsar.



### 3. TEMEL EKRANLAMA KURAMI İLE EKRANLAMA HESABI

Elektrik alandan korunabilme faraday kafesi gibi basit bir yöntemle bile mümkün iken, magnetik alanlardan korunma ve ekranlama daha karmaşık ve güçtür. Magnetik alanlar DC ve ELF'de çakışan magnetik alana alternatif olarak sadece düşük dirençli bir yol sağlanarak ekranlanabilir. Bu iki ifade düşük dirençli magnetik ekranlama konusunda yapılacak araştırmanın zorluğunu göstermektedir (ANSI/IEEE Std.,1988).

Bu bölümde temel ekranlama kuramı ile ekranlama hesabı yöntemleri özet halinde sunulacaktır.

#### 3.1 Temel Ekranlama Kuramı

Araştırmacılar arasındaki tutarsızlıklar genellikle anlamsaldır. Ekranlama kuramı (magnetik ve elektrik alanlarının ekranlanması dahil) elektromagnetik uyumluluk (EMU) birliğinin teknik disiplinleri arasındadır. Birlik içinde, ekranlama sadece yürüyen elektromagnetik dalganın ekran tarafından yansıtılması ve zayıflatılması olarak görülür.

Alçak frekanslı magnetik alanlar büyük ölçüde zayıflatılıp yansıtılmadığından, EMU terminolojisine göre önceki araştırmacılar teknik açıdan haklıdır (Frix, 1996).

Alçak frekanslı magnetik ekranlamanın iki etkisi olur: düşük dirençli ekranlama (buna yüksek geçirgenlikli veya magnetostatik ekranlama da denir) ve indüksiyon akımlarıyla ekranlama (Epstein, 1965). Klasik magnetik ekranlama kuramı bir iç bölgenin toprağın magnetik alanından korunmasına yöneliktir. Analiz sadece ekranın dışındaki değişmez magnetik alanlardan iç bölgeleri korumak üzere kullanılan yüksek geçirgenlikli silindirik veya küresel ekran malzemelerini ele alır. Bu sıfır-hertz alanlar indüksiyon akımlarına neden olmaz; bu yüzden indüksiyon akımlarıyla alçak frekanslı magnetik alan ekranlaması geleneksel magnetik ekranlamasıyla aynı bağlamda tartışılmaz. Aksine indüksiyon akımlarıyla araştırma yapan birçok kişi geçirgenliğin indüksiyon akımları üzerindeki etkisini hesaplamaz (Tegopoulos vd.,1971).

Araştırmacılar indüksiyon akımlarıyla birlikte yüksek geçirgenlikli ekranlamanın birlikte ortaya koyduğu bir ekranlamayı nadiren tartışır (Mager,1970).

İndüksiyon akımıyla ekranlama ve yüksek geçirgenlikli ekranlama arasındaki ayrım farklı nedenler yüzünden anlaşılabilir: (1) Frekansın bir fonksiyonu olarak yüksek geçirgenlikli ekranlama azalırken, indüksiyon akımıyla ekranlama frekansla birlikte artar, (2) yüksek

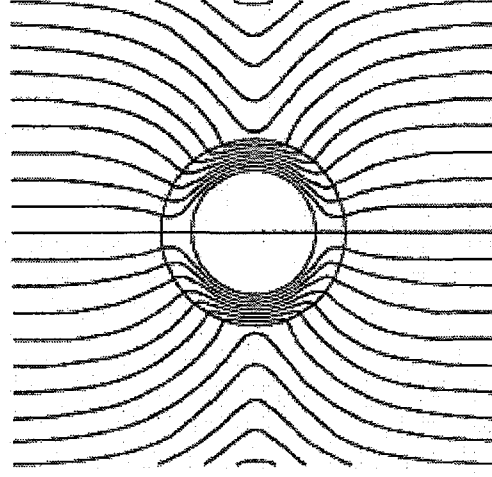
geçirgenlikli metallerin iletkenliği magnetik olmayan metallerden daha azdır, bu nedenle indüksiyon akımı etkileri magnetik olanlarda baskın iken, geçirgenlik etkileri birçok demir ve nikel (mumetal) alaşımlar gibi ferromagnetik metallerde baskındır; (3) İki etkiyi tanımlayan denklemler farklıdır ve (4) en pratik magnetik metallere hatsız geçirgenliğe sahiptir ve çok değerli özelliklere sahiptir (örn. Histerezis), ancak indüksiyon akımları tipik olarak lineer etkiye sahiptir. Bununla beraber, elektrik idareleri alçak frekanslı yüksek akımlarla çalıştığından ekranlama etkilerinin her ikisi de mevcuttur ve aynı anda ele alınmalıdır. Daha sonra gösterileceği gibi, alçak frekanslı magnetik ekranlama indüksiyon akımlarının neden olduğu ekranlama ile ekran, geçirgenliğinin neden olduğu ekranlamanın doğrusal bir kombinasyonu değildir. Bununla beraber, geleneksele uyararak, ekranlama kavramı iki alt disipline ele alınacak, yüksek geçirgenlikli ekranlama 3.1.1.'de indüksiyon akımlarının neden olduğu ekranlama 3.1.2.'de tartışılacak, bu ikisinin kombinasyonu 3.1.3.'te ele alınacaktır.

### 3.1.1 Yüksek Magnetik Geçirgenlikli Metaller İle Ekranlama

Magnetik metallere magnetik kuvvet hatlarının iletkeni olarak düşünülebilir. Bu akış hatlarının ne başlangıcı ne de sonu vardır (Frix, 1996). Ancak kendileri üzerinde tekrar birleşirler. Böyle olduğundan başlangıç noktalarından geriye akarken hatlar en düşük empedanslı yolu ararlar. Bir magnetik akış hattının gördüğü empedans, ki buna magnetik devre direnci de denir, materyal bölgesinin geçirgenliği ile ters orantılıdır ve bu durum bir elektronun bir bölgenin öz direnci içinden geçerken maruz kaldığı empedansa benzer.

Akım taşıyan bir iletkenin yarattığı magnetik alanı ele alalım. Ampère kanununa göre bir iletkenin etrafında üretilen akış hatlarının sayısı iletkenin içindeki akımla doğru orantılıdır. Zamanda verilen belli bir anda, bir akış hattının küçücük bir elemanı onun başlangıç noktası sayılabilir. İletkenin neden olduğu magnetik güç elemanı başlangıç noktasından bir varış noktasına doğru çeker. Ampère Kanununa göre, eleman akıma göre magnetik bir eş potansiyeli koruyacak şekilde hareket edecektir, böylece daha önceden belirlenen yolda başlangıç noktasına doğru hareket eder. Eğer geçişi boyunca magnetik akış elemanı devresini tamamlayabilecek iki yola rastlarsa, direnci daha düşük olan yolu izler, böylece yolunu kısaltır ve yolculuğunu tamamlamak için gerekli enerji miktarını azaltır.

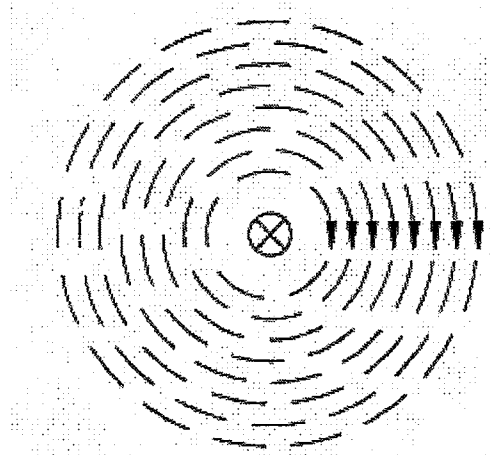
Şekil 3.1'de görüldüğü gibi küçük bir bölgeyi dış alanlardan korumak üzere üretildiği görülmüştür. Amuneal Şirketi "alçak frekanslı magnetik ekranlamanın akı bileşenin veya ekranlanan örneğin etrafından geçmesi için çok düşük-dirençli bir yol sağladığını" belirtmiştir.



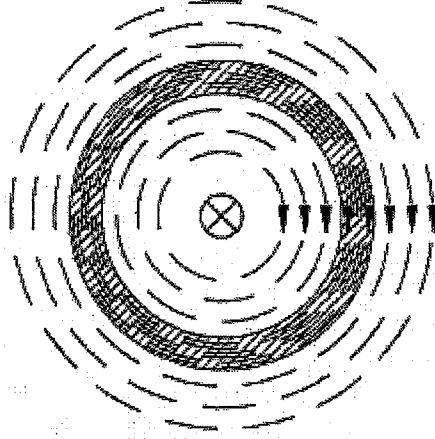
Şekil 3.1 İç bölgenin dış alanlardan magnetik korunması (Frix, 1996).

Yüksek magnetik geçirgen malzeme, akı hatlarını ekranı normal bir açıyla kesecek şekilde doğal yolundan (bu örnekte yatay) “çekme” eğilimindedir. Bir ekran tek bir iletkenin etrafını çevrelediğinde olduğu gibi başlangıçtaki akı çizgisine paralelse, (Şekil 3.2 ve 3.3), koruma gerçekleşmez. Burada akı çizgisine her iki yöndeki alanlarda bir azalma olmaksızın (ekranı kayıpsız varsayarak) geçirgen malzemenin içinde sıkışır.

Yüksek geçirgenlikli malzemelerle magnetik ekranlamanın fiziksel ilkesi budur. Amaç magnetik akının izleyeceği düşük dirençli alternatif bir yol sağlamaktır. Yüksek geçirgenliğin sağladığı magnetik ekranlamanın işe yaraması için, akı çizgilerinin normal yoldan alternatif yola sapması gerekir. Basitçe söylersek, bu da akının yolu üzerindeki belirli bir noktada ekran sınırını kesmesini gerektirir, tüm yüzeyleri bir alanın magnetik eş potansiyel çizgilerine paralel olan bir ekran etkisizdir .



Şekil 3.2 Ekranlanmamış güç kablosunun etrafındaki magnetik akı çizgileri (Frix, 1996)



Şekil 3.3 Ekranlı güç kablosunun etrafındaki magnetik akı çizgileri (Frix, 1996)

Bu nedenlerle Stimmer(1989) görüşünde, çevre elektrik alanlarından korunabildiği halde, magnetik alanları ekranlama yolu olmadığını belirtmiştir. Elektrik alanları yüksek potansiyelli kaynaklardan doğar ve düşük potansiyelli noktalarda sonlanır. Bu alanları ekranlamak nispeten kolaydır: alanları kısa devre yaptırmak için araya iletken bir ekran konur. Magnetik alanlar yüksek magnetik potansiyelli fiziksel kaynaklardan akmadığı için, fiziksel magnetik akım söz konusu değildir. Bu nedenle, elektrik ekranlarıyla karşılaştırılacak magnetik ekran da yoktur.

### 3.1.2 İndüksiyon Akımlarının Sağladığı Ekranlama

Korumanın sadece düşük dirençli alternatif yollar sağlayan ferromagnetik ekranlarla ortaya konabileceği görüşü alüminyum gibi ferromagnetik olmayan malzemelerle ekranlama yapma ihtimalini göz ardı eder. Eğer düşük dirençli magnetik ekranlama sadece geçirgenliğe bağlı olsaydı, bağlı geçirgenliği kabaca havanın geçirgenliğine eşit olan alüminyum gibi malzemeleri kullanmak mümkün olmazdı. Ohio State Üniversitesi'nde yapılan deneysel çalışmalar alüminyumun kalınlık ve frekansla doğru orantılı olarak artan ekranlama sağladığını göstermiştir (Frix, 1996).

Tüm iletken metallerin (ferromagnetik olan ve olmayan, aynı zamanda yarı-iletken malzemeler) sağladığı bir koruma şekli de ekranlanarlarda indüklenen indüksiyon akımlarına bağlı korumadır. Bu ekranlamayı destekleyen teori basittir: Ampère kanunu fiziksel bir çevirge etrafında hesaplanmış magnetik alan yoğunluğunun bu çevirge içinde normal olarak akan akımla doğru orantılı olduğunu belirtir. Akımın azaltılması alanı küçültür. Ya da, çevirge içinde akan negatif akımın miktarını arttırmak çevirgenin etrafındaki alanı küçültecektir. Bu

negatif akım ya (aktif ekranlama düzeneklerinde) kasıtlı olarak sağlanır ya da tesadüfen indüklenir, böyle tesadüfen indüklenen akımlara indüksiyon akımı denir.

İndüksiyon akımları Faraday'ın İndüksiyon Kanunu'nun bir sonucudur. Bir iletkende zaman değiştiren bir magnetik alan indüksiyon akımına neden olur. Bir akım (bundan sonra faz akımı olarak anılacaktır) bir başka iletkene (ekran) yakın bulunan bir iletken içinde akarken ekranda faz akımının ters yönüne doğru akan indüksiyon akımları indüklenir. İndüklenen bu indüksiyon akımları kendi magnetik alanlarını oluşturur ki bunlar da, indüklenen akımlar indükleyen akımlara ters aktığından, indükleyen alanlara terstir. Aşağı doğru gelen alanın indüklenen alanla azaltılması indüksiyon akımlarına bağlı magnetik ekranlamaya neden olur.

### 3.1.3 Yüksek Magnetik Geçirgenlikli Malzeme ve İndüksiyon Akımlarının Sağladığı Ekranlama

Alçak frekanslı magnetik ekranlamaya iki etki neden olur: düşük-dirençli ekranlama ve indüksiyon akımlarıyla ekranlama. Bu iki etki bağımsızdır ancak birbirleriyle ilişkilidir. Düşük-dirençli ekranlama indüksiyon akımı olmaksızın mümkün olduğu için ve zaman değiştiren magnetik alanları magnetik olmayan ekran malzemesiyle korumak mümkün olduğundan bunlar birbirinden bağımsızdır. Yüksek geçirgenlikli ekranların bulunduğu yerdeki alanları bozmaları, böylece ekranlar içinde üretilen indüksiyon akımlarını etkilemeleri nedeniyle de birbirleriyle ilişkidir; aksine, indüksiyon akımları yüksek geçirgenlikli ekranların biçimlendirdiği kendi magnetik alanlarını üretirler.

Magnetik ekranlama aşağıdaki diferansiyel denklemlerin çözümlerine bağlıdır:

$$\vec{\nabla} \times \left( \frac{1}{\mu(A)} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{j} \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (3.4)$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (3.5)$$

Burada  $\vec{A}$  magnetik vektör potansiyeli,  $\mu(A)$  ortamın magnetik geçirgenliği ve  $J$  de kaynağın

akım yoğunluğudur. (3.1)'de verilen  $\mu(A)$  magnetik vektör potansiyelinin bir fonksiyonu olarak gösterilebilir. Birçok ferromagnetik malzeme için,  $\mu$ 'nin bir sabit olmayıp, vektör potansiyeli ile ilgili uygulanan magnetik alana bağlı olmasıdır.

$$\nabla^2 \vec{A} + \gamma^2 \vec{A} = -\mu \vec{j} \quad (3.6)$$

Burada  $\gamma^2 = \omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \sigma$ 'dur.  $\sigma$  ortamın iletkenliğini;  $\epsilon$ , ortamın dielektrik geçirgenliğini gösterir.  $\omega = 2\pi f$  'dir. Burada  $f$ , sistemin frekansdır. (3.6) silindirik koordinatlarda hesaplandığında, denklemin çözümleri, birinci tip  $J_n(\gamma\rho)$  ve ikinci tip  $Y_n(\gamma\rho)$  Bessel fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar  $\gamma$ 'nin lineer değil, nonlinear ilişkileridir. Ayrıca  $\gamma$  ne  $\sigma$ 'nun ne de  $\mu$ 'nin lineer bir fonksiyonudur. Ancak, eğer (3.6) dc işletimi (yani düşük direnç için incelenirse indüksiyon akımı olmayan ekranlama),  $\gamma$  sıfır olur ve (3.6) şu şekilde sadeleşir:

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{j} \quad (3.7)$$

Bunun çözümü, kaynak akım yoğunluğu ve ortamın geçirgenliği ile doğru orantılı, kaynak ile gözlem noktası arasındaki dikey uzaklıklarla ters orantılıdır; ekranın iletkenliği önemsizdir. (3.6)'dan bir ekran içinde indüklenen indüksiyon akımlarının ortaya çıkardığı toplam magnetik alanın; ekranın geçirgenliği, dielektrik geçirgenliği ve iletkenliği, yakın iletkenlerdeki akımlar, ekran ve iletkenler arasındaki fiziksel ilişki ile ilgili olduğu görülmektedir. (3.7) denklemi, yüksek geçirgenlik, düşük direnç ve ekranların sağladığı magnetik ekranlamanın sadece ekranın geçirgenliği, yakın iletkenlerdeki akımlar ve ekran ile iletkenler arasındaki fiziksel ilişkiye bağlı olduğunu göstermektedir.

(3.7) denklemi (3.6) ile karşılaştırıldığında, indüksiyon akımlarıyla ekranlamanın düşük-direnç yollarıyla ekranlama ile birbirinden bağımsız olmadığı; sadece indüksiyon akımı ekranlamasını hesaplayıp dc magnetik ekranlamasını buna eklenemeyeceği veya tam tersi yapılamayacağı görülmektedir. Düşük frekanslı magnetik ekranlamayı hesaplarken her iki özellik de ayrı ayrı belirlenmelidir.

Özet olarak, düşük-frekanslı magnetik ekranlamanın iki özelliği bulunur: yüksek geçirgenlik; alanları saptırmak için düşük-dirençli yollar ve üretilen magnetik alana yıkıcı müdahalede bulunan indüklenen indüksiyon akımları (Frix, 1996).

### 3.2 Magnetik Ekranlama Değerlendirme Yöntemleri

Magnetik ekranlama sorunlarını incelemek için analog, deneysel, analitik ve sayısal olmak

üzere dört önemli teknik bulunur (Frix, 1996). Ayrıca integral denklem teknikleri tipik olarak analitik çözümleri sayısal prosedürlerle birleştirir. Analog yöntemlerin avantajlarından biri de çözümlerin (muhtemelen) kesin olmasını ve analiz edilen sistemler için sezgisel olarak hissedilmesini sağlar. Bununla birlikte, dijital hesaplamalardaki son ilerlemeler, analog yöntemlerin giderek önemini kaybetmesine yol açmıştır. Deneysel yöntemler ekranlar ile magnetik alanlar arasındaki gerçek etkileşimleri yansıtırken, yapılan spesifik ölçümlerle sınırlıdır. Sonuç olarak, farklı alan şartlarında çeşitli ekranlar arasındaki tüm etkileşim yelpazesini ortaya koymak pahalı ve zaman alıcıdır. Bu üçlüden analitik teknikler, problemlere kesin çözümler sunan en güçlü tekniktir. Ancak bunlar da belli sayıda problemle sınırlıdır. Bu nedenlerle, genel olarak elektromagnetik alan problemlerinde nümerik teknikler giderek daha popüler olmuştur. Nümerik teknikler analitik tekniklerle aynı sınırlandırmalara tabi değildir, ancak bunlar da çözümlere yakın sonuçlar verir. Her tekniğin güçlü yanı ve sınırlamaları vardır, bunlar aşağıda tartışılacaktır.

### 3.2.1 Analog Yöntemler

Elektronik analog hesaplama ve analog modeller olmak üzere iki tip analog yöntem bulunur. Magnetik ekranlamayı karakterize eden diferansiyel denklemler, analog bir bilgisayarda, elektronik aletlerin analog diferansiyel denklemleri kullanılarak simule edilir. Bobinler, kondansatörler, dirençler ve entegre devreler gibi bu aletler, ekranlama sisteminin eş elektronik modeli olarak bir araya getirilir. Elektronik analog bilgisayarın kullanımı analitik çözümler kadar bilgi sağlamaz. Ancak sonuçlarda nümerik dijital prosedürlerde görülen hesaplama hızına karşılık ayırım sorunları yaşanmaz. Ne yazık ki, analog bilgisayarlar sadece diferansiyel denklemlerle sınırlıdır, ancak magnetik ekranlama kısmi differansiyel denklem hesabını gerektirir.

Analog yöntemin bir diğer şekli, ya (örneğin rüzgar tüneli deneylerinde kullanılanlar gibi) düşük ölçekli fiziksel modeller kullanır ya iyi tanımlanmış, doğal problemlerin çözümünü ortaya koyar veya her ikisini birden yapar. İlk durumda, model testlerinin deneysel sonuçları hakiki sistemi yansıtacak şekilde analitik olarak ölçeklendirilir. İkincisinde ise, analitik olarak elde edilen doğal sonuçlar test edilen sisteme uydurulacak şekilde genelde konform dönüşüm teknikleri kullanılarak dönüştürülür. Konform dönüşüm teorisi Laplasyen kısmi diferansiyel denklem sonuçlarını dönüştürürken, magnetik ekranlama diferansiyel denklemleri ya dalga ya da Helmholtz kısmi diferansiyel denklemleriyle sonuçlanır.

İki denklem sınıfı arasındaki fark sadece anlamsal değildir. Laplasyen alanlar (ve daha genel

Poisson alanları) alan frekansı indüksiyon akımlarını ihmal edecek kadar düşükken de mevcuttur. Ayrıca konform dönüşümler, sınırların sonsuz geçirgen olduğu veya akış çizgileriyle çakışık olduğu, düşük-frekanslı magnetik ekranlamada mevcut olmayan, durumlarla sınırlıdır. Sonlu geçirgenlik problemleri, zorlukları yüzünden konform dönüşüm teknikleri kullanılarak nadiren çözülmüştür. Sonuç olarak analog dönüşüm yöntemleri statik magnetik alanların ekranlamasıyla sınırlıdır.

### 3.2.2 Analitik Teknikler

Magnetik ekranlama konusunda mevcut analitik teknikler ya (1) alan zayıflatma konusunda basit tahminler kullanır ya (2) Schelkunoff (1943)'un iletim hattı teorisine dayalıdır ya da (3) direkt olarak ekranlama diferansiyel denklemlerini çözer.

#### 3.2.2.1 Yaklaşık Çözüm Teknikleri

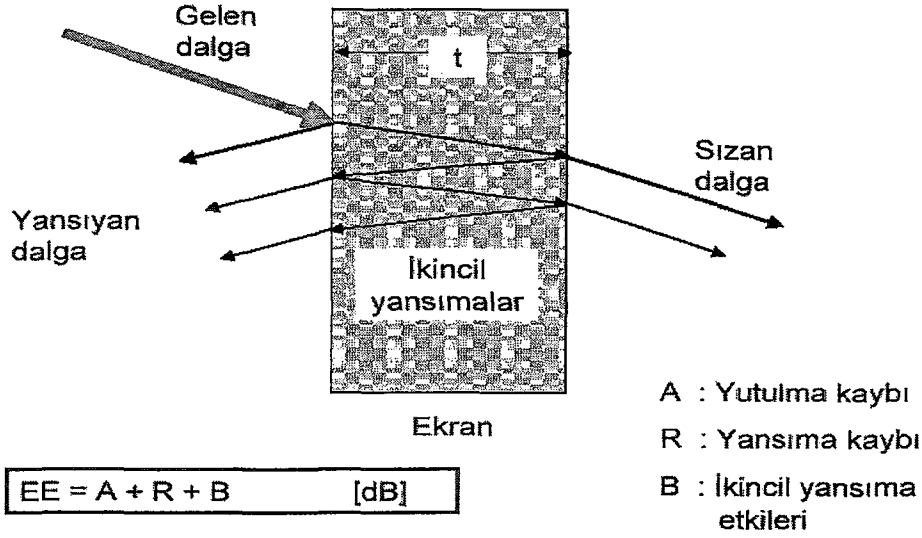
Magnetik ekran malzemesi üreticileri silindirik ekranların etkinliğini hesaplamak üzere yaklaşık çözüm denklemlerini kullanır. Bu ekranlar yüksek geçirgenlikli (mumetal) malzemelerden tasarlanmıştır.

$$A=20 \log_{10} \left[ \frac{\mu t}{d} \right] \text{ dB} \quad (3.8)$$

Burada t ekranın kalınlığı, d ekranın çapı,  $\mu$  ekranın geçirgenliğidir. Dikdörtgen şeklindeki ekranlar için, (4.4)'teki ekranın çapı en büyük yatay kesit boyutuyla değiştirilerek yaklaştırma yapılır. Şirketler (4.4)'ü, ekran genişliği ekrandan kaynağa veya ölçüm noktasına olan uzaklıktan büyük olması şartıyla, düz plaka ekranları değerlendirmek üzere kullanır; ancak dar ekranları değerlendirmek üzere bir yöntemleri yoktur.

#### 3.2.2.2 Magnetik Uyumluluk Denklemleri

Elektromagnetik uyumluluk, elektromagnetik ekranlamayı değerlendirmek için Schelkunoff'un iletim hattı teorisini kullanır. Bu teoride, gezici bir elektromagnetik dalganın iletken bir düzleme doğru açılarla vurduğu, enerjinin bir kısmını yansıttığı ve bir kısmını da düzlem içine iletmediği varsayılır. Enerjinin iletilen kısmı iletken levha içinde hareket ederken absorbe edilerek zayıflatılır. Ekran plakanın diğer ucuna ulaştığında enerjinin bir kısmı ekrana geri yansıtılır ve bir kısmı nakledilir. Ekrana çarpan elektromagnetik alanın ekrandan geçen elektromagnetik alana oranına ekranlama etkinliği denir. 60 Hz'lik gezici magnetik bir dalga için  $\sigma$  iletkenliğinde ve  $\mu$  bağıl geçirgenliğindeki bir ekranın ekranlama etkinliği şu denklemlerle hesaplanır.



Şekil 3.4 Ekranlama etkinliği

$$EE = 20 \log \left| \frac{B_i}{B_t} \right| \quad (3.9)$$

Burada  $EE$  = Ekranlama Etkinliği (dB cinsinden),  $R_m$  magnetik dalganın ekran yüzeyindeki yansıması nedeniyle kayıp (dB cinsinden),  $A$  emilim nedeniyle kayıp (dB cinsinden) ve  $R_r$  dalganın ekranın arkasına yeniden yansıtılması nedeniyle kayıptır (dB cinsinden).

Yöntem birkaç varsayım yapmaktadır. Öncelikle inen alanın gezici bir dalga olduğu varsayılmaktadır. Bu da elde edilen denklemlerin sadece elektrik ve magnetik alanların karşılıklı olarak dik olduğu durumlara uygulanabileceğini gösterir (Adams,1968). Bu durum iletim hatları için geçerli değildir (Olsen,1992). Ayrıca EMU denklemlerinde gelen enerjinin, sonlu bir ekran yüzeyine düşen enerji olduğu varsayılmaktadır. Bir elektrik kablosunda yakın bölgede magnetik alanlar tek fazlı akımlar için sarmal şeklinde, çok fazlı akımlar için elipsoit şeklindedir. Ayrıca, test edilen düz plakalar sonsuz geniş değil, sonlu bir genişliğe sahiptir. Son olarak, teknik indüklenen indüksiyon akımlarının varlığını ihmal etmekte, iletken ve geçirgen maddelerin varlığının alanda bozulma yaratmadığını varsaymaktadır. Bu varsayımları nedeniyle teori, deneysel verilerle uyumlu değildir, bu tutarsızlık düşük frekanslarda daha çoktur. Tekniğin düşük-frekanslı magnetik alan ekranlaması değerlendirilmesinde kullanıldığında hatalı değerler verdiği görülmüştür (Frix, 1996).

### 3.2.2.3 Diferansiyel Denklemlerle Doğrudan Çözüm

(3.6) ve (3.7) gibi kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için en yaygın teknik John Bernoulli'nin 1600'lerin sonunda geliştirdiği değişkenlerin ayrılması yöntemidir. Ne yazık ki, bu yöntem diferansiyel denklemin sınır şartlarına ciddi limitler koymaktadır (Frix, 1996). Küresel ve silindirik ekranlar, basit yüzeyleri nedeniyle, bir dizi çözüm tekniğiyle beraber kullanılarak değişkenlerin ayrılması yöntemiyle analiz edilebilir. Benzer şekilde, değişkenlerin ayrılması yöntemi sonsuz geniş düz levhalar için geçerli bir yaklaşımdır. Bunun nedeni, sonsuz genişlikteki düz levhanın kartezyen koordinat sisteminin eksenlerine uymasındır. Örneğin, Panas ve Kriezis (1968), bir dilimin paralel ve sonsuz uzunlukta bir iletkenin magnetik alanlarına olan ekranlayıcı etkisini belirlemede Fourier dönüşümlerini kullanmıştır. Sonuç denklemleri Fourier dönüşümlerini tersine çevirmek üzere nümerik analiz gerektirmiştir. Bir başka grup araştırmacı (Young vd., 1970) lineer magnetik ekranlardaki magnetik akı dağılımını belirlemede değişkenlerin ayrılmasını kullanmıştır. Akım akışını düşen bir düzlem dalgayla indüklenen düzlemsel bir ekran yoluyla incelediler. Akışın incelenmesinin amacı indüksiyon akımı üzerine düşen alanın etkisini belirlemektir. Her ne kadar analizleri sonsuz, magnetik olmayan bir levha olsa da, ayrıca düzlemin geçirgenliği ve iletkenliğinin indüksiyon akımı üzerindeki etkisini de araştırdılar. Araştırmacılar kaynağın düzlem bir dalga olduğunu varsaydılar, bu nedenle ekran üzerinde değişmeyen bir dağılım söz konusudur, ki bu da enerji iletkenlerine yakın ekranlar için geçerli değildir.

Özet olarak, magnetik ekranlama konusundaki analitik analizler keyfi biçimli ekranlar konusunda eksiktir. Tam çözümler sadece silindirik borular veya sonsuz geniş dilimler gibi birkaç durum için belirlenebilir. Düz veya eğri olsun, sonlu metal levhaların ekranlamasının belirlenmesi, bir koordinat sistemine uyacak sınırların olmaması nedeniyle analitik teknikler kullanılarak gerçekleştirilemez.

### 3.2.3 İntegral Denklem Teknikleri

Düzlemsel ekranlama için analitik teknikler sıklıkla integral denklemlerdir. İntegral denklemleri çözenin bir yolu Fourier dönüşümü gibi dönüşüm analizleridir. Örneğin, Cronenwett magnetik olmayan sonsuz geniş düzlem ekranların elektriksel alan ekranlama etkinliğini belirlemek için Fourier analizinin bir varyasyonunu kullanmıştır. Jain ve Ray (1970) tarafından, sonsuz boyda magnetik olmayan bir ekranda indüklenen indüksiyon akımlarını ve kayıpları belirlemek üzere benzer bir teknik kullanmıştır. Analizlerde kaynaklar sonsuz Fourier serisi sinüsoit akım levhaları olarak temsil edilmektedir. Bu levhaların sonsuz genişlik ve uzunluğu olduğu ve birbirleri üzerine çakıştığı varsayılmaktadır.

Cronenwelt (1) düşük frekanslarda, düşük iletkenlikte, iletken aralıklarının küçük olması halinde analizin başarısız olduğunu, (2) analizin sadece magnetik olmayan ekranlara uygulandığını ve (3) analizin sonsuz geniş bir ekranı varsaydığını belirtmektedir. Sadece denklemin çekirdeği belirli bir biçimdeyse, integral denkleme dönüşüm çözümleri elde edilebilir. İleri ve ters dönüşümler her zaman bilinmediğinden, genellikle nümerik işlemlere ihtiyaç duyulur (Chew,1986).

Düz levha ekranların incelenmesindeki birçok integral denklem tekniği, Levy ve Moser (1967)'de olduğu gibi, ekranın sonsuz boyda ve sonlu kalınlıkta olduğunu varsayar. Levy'nin bildirisi bu konuda diğerlerinin de dayalı olduğu en eski bildiridir. Bildirisinde ekranlama, indüklenen gerilimlerin oranı olarak tanımlanmıştır. Çok ince bir çerçeve antende iletim yapan özdeş bir çerçeve antenin alanı nedeniyle indüklenen gerilim önce aralarında bir ekran yokken belirlenmiş, daha sonra arada iki antene eş uzaklıkta bulunduğu belirlenmiştir. Buradan eliptik bir integral gerektiren bir ifadeye varılır. Bütünleşmeden sakınmak üzere, ekran/kaynak konfigürasyonunu sınırlayan bir tahmin yapar.

Moser (1967), Levy'nin tekniğinin genel analiz için geçerli olmadığını gösterir: (1) sadece doğal koordinat sistemlerine uyumlu şekiller için geçerlidir; (2) ekranın bir yüzey derinliğinin kalınlığından az olduğunu varsaymaktadır; (3) magnetik olmayan ekranlarla uyumludur. Üçüncü teorisinin sonuçları probleme adapte edilir. Schelkunoff'un ekranlama etkinliği formüllerinin sadece ekran kaynaktan hesaplama amaçlı gözlem noktasına olan uzaklığın  $1/3$ 'üne yerleştirildiği zaman en doğruyu verdiği gösterilmiştir. Genel olan ikinci çözümde, ifadeler ekranın içindeki ve her iki yanındaki toplam elektrik ve magnetik alanları için türetilmiştir. Sonuçlar çözülmesi gereken bir integral denklem ortaya koyar. Ekranlama etkinliğinin sonuç ifadesinin deneysel verilerle uyduğu gösterilmiştir. İkinci makalesinde ise, (Moser, 1988) deneysel verileri sunarak bunları 100 Hz ila 50 kHz frekans aralığında Levy ve Schelkunoff yöntemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırır.

Moser, analizlerinde ekranlama etkinliğini indüklenen gerilimlerin oranı olarak tanımlar. Elektriksel olarak ince çerçeve antenin içinde, iletim yapan bir çerçeve antenin alanı nedeniyle indüklenen gerilim, önce aralarında ekran yokken ve sonra aralarına eşit uzaklıkta konan bir ekran varken belirlenir. Ekranın sıfıra yakın incelikte, boyca sonsuz ve sadece indüksiyon akımlardan oluştuğu (yani nonmagnetik olduğu) varsayılır. Varsayılan antenler eksenleri ekrana dik olan çerçevelerdir. Sonuç iki integral denklemin oranı olarak verilir, ancak son sonuçlar verilmez. Ne yazık ki, analizleri sonlu-ebatta ekranları, lineer akım

kaynaklarını, yakınlık etkilerini veya değişken geçirgenliği içermez. Ayrıca hesaplamalar da eksiktir.

Moser'in makalesinin takipçileri (Ryan, 1967) ve (Bannister,1968) integral denklemlerin nümerik ifadelerini sağlamıştır. Bununla beraber, bu analizler sonlu magnetik olmayan bir düzlem ekran ve alan kaynağı için de elektriksel olarak akım çerçevesi varsaymıştır. (gerçek yakın-alan analizi yerine) yalancı-yakın alan tahmini kullanılmıştır. Bu tahmin ekranın 2 yüzey derinliğinden daha kalın olmasını gerektirir, ancak Bannister bu kısıtlamayı daha sonraki baskıda kaldırmıştır (Bannister,1969).

Daha sonra, (Sikora vd., 1978) ince levhalarda indüklenen indüksiyon akımlarını hesaplamak üzere bir değişken hesap yaklaşımı kullandı. Bu yaklaşım, Schelkunoff'un eserine dayanarak, belirli bir frekanstaki metalin yüzey derinliğinden daha ince levha kalınlığı olarak tanımlandı. Ekranlar farklı ebatlardayken, varsayılan kaynak değişmez düzlem dalgaydı. Ayrıca, (indüklenen indüksiyon akımları nedeniyle ortaya çıkan) tali magnetik alanlar ihmal edildi, böylece, indüksiyon akımlarının neden olduğu ekranlama ihmal edilebilir varsayıldı.

Gösterildiği gibi, integral denklem teknikleri dönüşüm yöntemleri veya genel elektromagnetik analizler yoluyla çözülebilir. Ancak, bunlar sıklıkla bir sonraki bölümde tartışılacak olan nümerik teknikler kullanılarak değerlendirilir (Ludwig, 1987). İntegral denklem tekniklerini kullanmadaki bir zorluk da integral denklemleri formüle etmenin çeşitli yolları olmasıdır.

Green'in İkinci Kimlik kuralı kullanarak:

$$A(\vec{r}) + \oint A(\vec{r}) \frac{\partial G(\vec{r}/\vec{r}')}{\partial n'} dI' = \oint G(\vec{r}/\vec{r}') \frac{\partial A(\vec{r}')}{\partial n'} dI' \quad (3.10)$$

sonucuna varılır.

Burada  $G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{4j} H^{(2)}_D \left( \gamma \left( \vec{r} - \vec{r}' \right) \right)$  Green'in iki-boyutlu konfigürasyon için

Fonksiyonudur. Böylece diferansiyel denklem, nesnenin sınırı etrafından integral denkleme dönüştürülmüştür. Diğer araştırmacılar bitişik iletkenlerde indüklenen akımları hesaplar. Normalde integral yöntem çözümleri ya ekranın ideal iletken olduğunu ya da kayıpsız bir dielektrik olduğunu varsayar. Bu da gerçek bileşenleri olan hesaplanmış akımlara yol açar (Frix, 1996).

Özet olarak, integral denklem teknikleri, indüksiyon akımı problemlerini çözmeye veya ekranlama hesaplamalarında en yaygın kullanılan yaklaşımdır. Bunların birkaç dezavantajı vardır, en ciddi dezavantajlar: (1) kurulması zordur ve elektromagnetik teorisi ile ilgili matematikte uzmanlık gerektirir (2) sonuç integral denklemleri kapalı formda çözülemez, çözmek için nümerik analiz gerektirir. Ayrıca (3) birçok işlem nonlinear ekranlarda işe yaramaz, ekranlara ebat ve şekil açısından sınırlama getirir.

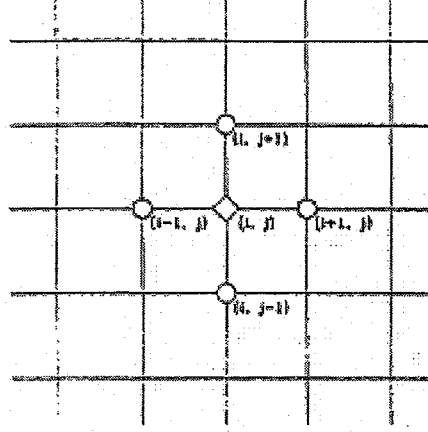
### 3.2.4 Nümerik Teknikler

Magnetik ekranlamada kullanılan analitik teknikler zayıf olduğu için birçok araştırmacı nümerik teknikler kullanır. Nümerik teknikler dört temel tipe ayrılır: Differential Operator Techniques (Diferansiyel operatör teknikleri), Integral Operator Techniques (integral operatör teknikleri), Modal Expansions (modal genişlemeler) ve Optical Discription (optik tanımlamalar) (Frix, 1996).

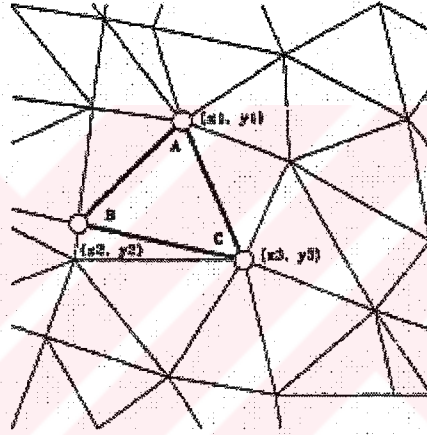
Son kategorideki Geometrical Theory of Diffraction (Geometrik Kırınım Teorisi, GTD) ve Physical Theory of Diffraction (Fiziksel Kırınım Teorisi, PTD) gibi programlar analizlerinde yüksek frekanslı yaklaşımlar kullanır. Fiziksel optik yaklaşımlar denilen bu yaklaşımlar ekranların genişlik olarak bir dalga boyundan az olduğu yerlerde işe yaramaz. Sonuç olarak, Optik Tanımlama teknikleri düşük frekanslı magnetik ekranlama hesaplarında işe yaramaz ve daha fazla üzerinde durulmayacaktır.

#### 3.2.4.1 Diferansiyel Operatör Teknikleri

Diferansiyel operatör kategorisindeki en yaygın yöntemler Finite Difference method (FDM); Sonlu Farklar Yöntemi ve Finite Element Method (FEM); Sonlu Eleman Yöntemidir. Diferansiyel operatör tekniklerinde diferansiyel denklemlerin çözüleceği tüm bölge üzerinde bir ızgara tanımlanır. FDM için bu ızgara geleneksel olarak Şekil 3.4'te gösterildiği gibi dikdörtgen biçimindedir. FEM'in geleneksel ızgarası da Şekil 3.5'de gösterildiği gibi üçgen elemanlardan oluşur. Bu şekiller iki yöntem arasındaki farklardan biridir. FDM'de ızgaralar değişmez olup üretilmesi kolaydır. Bu da kodun kolayca programlanmasını sağlar ancak dairesel ekranlar gibi dikdörtgen olmayan bölgelere izin vermez. FEM'de ise ızgaraların önceden belirlenen bir yapısı yoktur, ancak probleme uydurulabilir. Bu nedenle keyfi şekilli çözüm bölgeleri sayesinde FEM daha popülerdir, ancak karmaşık bir ızgara üretme zorluğu taşır (Frix, 1996).



Şekil 3.5 Sonlu farklar yönteminin tipik dikdörtgen ızgarası



Şekil 3.6 Sonlu elemanlar yönteminin tipik ızgara elemanı

FDM ızgarasının her bir düğüm noktası için çözülecek olan diferansiyel denklem bir bitişik düğüm noktaları arasındaki alan miktarlarını ifade eden bir fark denklemi şeklinde yazılır (Ahmed 1989). (3.2) denklemi aşağıdaki fark denklemine dönüştürülür:

$$A(i,j) = \left( \frac{1}{4 - h^2 \gamma^2} \right) [A(i, j+1) + A(i, j-1) + A(i+1, j) + A(i-1, j)] + h^2 \mu J(i, j) \quad (3.11)$$

Çözüm alanındaki her bir düğüm noktasında bir dizi lineer denklem (3.11) diğer düğüm noktalarıyla bağlantı kurar. Sonuç olarak ortaya çıkan denklem seti, geniş olsa da, sık değildir ve genellikle (denklem sayısı küçükse) Gauss yok etme yöntemi ile veya Conjugate Gradient Method; Bileşik Gradyen Yöntemi, (CGM) veya gevşetme yöntemleri gibi iteraktif (yinelemeli) tekniklerle çözülür. Ayırma sonucu olarak, çözüm ızgarasının düğüm noktalarında

tanımlanır; düğüm noktaları arasında çözüm lineer olarak ara değerini bulur.

Magnetik ekranlama problemleri için, FDM'de iki büyük zorluk vardır: (1) açık sınır problemleri için çözüm alanının ucunun kesilmesi ve (2) kompleks ekranlar için ızgaranın tanımlanması. Sınırın sonlandırılması için en basit yöntem Emici sınır şartlarını kullanır. Radyasyon şartları da denilen bu şartlar söz konusu bölgeden uygun şekilde kaldırılan yapay bir sınır koyar. Daha sonra diferansiyel denklemler sınırda sadece tek yönde yayılmaya izin verecek şekilde belirlenir. Sonuç olarak ortaya çıkan fark denklemleri kesik serilerle yaklaştırılır (Tirkas,1982). Kullanılan seri terimlerin sayısı arttıkça sonuçların doğruluğu artar. Ne yazık ki bu uzaysal ayırında bir artış gerektirir, bu da kullanılan bilgisayar belleğini arttırır. Sonlu sınırı dahil etmenin bir diğer yolu da ekran/kaynak konfigürasyonundan büyük ölçüde kaldırılan varsayımsal bir sınır koymaktır. Magnetik alanlar ekran/kaynak uzaklığı şeklinde sifira yaklaştığından, bir yaklaşım da magnetik alanı sınırda sıfır olarak belirlemek ve geleneksel şekilde FDM'i uygulamaktır. Bu yaklaşım kavram olarak en basit yaklaşım olup, çözüme yaklaşıncaya kadar sınır için sürekli artan bir uzaklık kullanarak birçok tekrar gerektirmesi dezavantajıdır (Frix, 1996).

FDM'de sınırların ucunun kesilmesi açık sınırlı problemlerde zor olduğundan, düşük frekanslı elektromagnetik alan hesaplamalarında nadiren kullanılır, ancak Rikitake bunu dc magnetik ekranlama hesaplarında kullanmıştır. Rikitake'nin yaklaşımı, ekran yapılarından uzak olan alanın değerlerini varsayarak alanı büyük bir mesafeye ayırmaktır. FDM, Dodd tarafından da elektromagnetik ekranlama hesabında kullanıldı. Onun yaklaşımında da sınırın ucunun kesilmesi Rikitake'ye benzerlik gösterdi.

FDM'in bir varyasyonu olan Finite Difference Time Domain Method; Sonlu Farklar Zaman Alanı Yöntemi (FDTD) de geçici elektromagnetik alanların dağılan hesaplamalarında sıkça kullanılır. Yine, FDTD yöntemini kullanmadaki en büyük zorluk, uygun sınır kesme yönteminin belirlenmesidir.

FDM değişmez bir ızgara kullandığından, araştırmacı bunu keyfi alanlara uygulamada büyük zorluk çeker. Sonuç olarak magnetik ekranlama hesapları için en yaygın nümerik yöntem Sonlu Elemanlar Yöntemidir (FEM) (Labridis vd., 1988). FEM'in uygulamaları arasında (1) trifaze güç kablolarındaki indüksiyon akımı kayıpları (Labridis vd., 1992); (2) elektrik alanı dağılımı (Feliziani, 1992); (3) lineer ekranlardaki indüksiyon akımları (Bramble vd., 1983; Salon vd., 1983; Luo vd., 1992) ve (4) ferromagnetik ekranlarda indüksiyon akımları sayılabilir (Frix, 1996).

FEM diferansiyel denklemleri dolaysız olarak FDM gibi çözmez. Bunun yerine, FEM diferansiyel denklemin varyasyonel bir formülasyonunu çözer. (3.2) denklemi için bu formül şu şekildedir:

$$I(A) = \frac{1}{2} \iint [(\nabla A)^2 - 2\gamma^2 A^2 - \mu JA] dS \quad (3.12)$$

(3.12) denklemi A'ya göre çözmek üzere, Rayleigh-Ritz Yöntemi ya da Galerkin Yöntemi ve Artalan Yöntemi gibi Ağırlıklı Artık Yöntemleri kullanarak küçültülür. Küçültme işleminin uygulanması bir dizi lineer denklem verir.

FDM'de olduğu gibi FEM'de de açık sınırlı problemlerde sınırların kesilmesi zordur. Yine FDM'deki gibi sonsuz bir sınır dahil etmenin yaygın bir yolu da ekran/kaynak konfigürasyonundan kaldırılan varsayımsal bir sınır belirlemektir. Varsayımsal sınırda bir dizi yaklaşım kullanılabilir (Hasselgren,1994). Daha önce bahsedildiği gibi, bir teknik de, sınırdan çözüm alanına olan uzaklığı arttırarak, alanın varsayımsal sınırdaki değerini belirlemektir.

FEM'in kullanımında birkaç zorluk vardır. Öncelikle, FDM'de olduğu gibi sınır sonlandırılmalıdır. Yukarıda sayılan sınırı kesmede kullanılan yöntemlerin her birinin zorlukları bulunur ve her şartta uygulanabilir değildir. Bu durum özellikle düşük frekanslı magnetik alan problemlerinde geçerlidir. İkinci olarak, yöntem işe yarar ancak vektör miktarlar gerektiğinde zorluk yaşanır. Bu nedenle iki boyutlu magnetik problemlerde birçok analiz vektör potansiyelini kullanır. Sonuç olarak ortaya çıkan magnetik alanları bulmak için vektör potansiyelinin nümerik farkının bulunması gerekir, böylece doğruluk kaybolur. Üçüncü sorun da, FEM'in yüzey derinliği küçük olan malzemelerin analizlerinde işe yaramamasıdır. Bunun nedeni ise ızgara boyunca alan değerlerindeki değişiklikleri doğru modelleyebilmek için ızgarada ince ayırmalar olmasının gerekmesidir (Frix, 1996).

#### 3.2.4.2 İntegral Operatör Teknikleri

İntegral operatör kategorisindeki en yaygın yöntemler Method of Moments (MoM); Momentler Yöntemi ile Boundary Element Method (BEM); Sınır Elemanları Yöntemidir. Method of Fundamental Solutions (MFS); Temel Çözümler Yöntemi, General Multipole Technique (GMT); Genel Çok kutuplu Teknik ve Volume Integral Equation Method (VIM); Hacimli İntegral Denklem Yöntemi gibi diğer yöntemler bu iki yöntemin varyasyonlarıdır. Ayrıca, Charge/Source Simulation Method (CSM); Yük/Kaynak Simülasyon Yöntemi ve Surface Charge Method (SCM);Yüzey Yükü Yöntemi adındaki diğer iki yöntem hem BEM hem de GMT yöntemi ile ilişkilidir (Frix, 1996).

MoM integral veya diferansiyel denklemleri ele alarak başlar:

$$L(f) = g \quad (3.13)$$

Burada  $L$  herhangi bir linear integral veya diferansiyel operatör,  $f$  bilinmeyen fonksiyon,  $g$  ise bilinen bir zorlama fonksiyonudur. (3.6) için  $f = \vec{A}$ ,  $g = -\mu j$  ve  $L = \nabla^2 + \gamma^2$ 'dir. Bilinmeyen fonksiyon bir dizi temel fonksiyon ile tahmin edilir:  $f = \sum \alpha_n f_n$ 'ye (3.13) denklemi uygulanır, aşağıdaki sonucu verir:

$$\sum \alpha_n L(f_n) = g \quad (3.14)$$

$\alpha_n$  katsayılarına göre çözmek için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bir yöntem ilgilenilen alanın üzerindeki iç çarpımı formüle etmek için (3.14)'ü uygun bir ağırlık verme veya test fonksiyonuyla çarpıp çözüm alanın üzerinde birleştirilerek, Ağırlıklı Artık Yöntemlerini kullanır. Matematik olarak iç toplam fiziksel olarak bir vektörün bir değerinin üzerindeki izdüşümünü bulmaya eşit olacağından bu yaklaşıma İzdüşüm Tekniği (PT) denir ve MoM'nin temelini oluşturur. PT'nin (3.14)'e uygulanması sonucu bir dizi lineer, cebirsel denklem ortaya çıkar. Bu denklemler FEM ve FDM'de olduğu gibi çözülür.

Tipik olarak, iç çarpımı bulma konusundaki hesabı gereklileri azaltmak için Dirac Delta fonksiyonu adında bir test fonksiyonu kullanılır, bu da Nokta Eşleştirme Yöntemi (PMM) ya da Sıraya Koyma Yöntemi (CM) adındaki işleme yol açar. Aynı zamanda, temel fonksiyonları çözüm alanının sadece bir parçasında varolacak şekilde tanımlayarak (ki buna Alt Kısımlar Yöntemi veya Alt Bölgelere Göre Sıraya Koyma Yöntemi denir), MoM hesaplama gereksinimlerini daha da azaltır (Frix, 1996).

Dağılık hesaplamalar için (3.13) genellikle potansiyel kaynaklarını (yükleri veya akımları) dağılımın dış hatları boyunca yansıtacak şekilde formüle edilir. Geliştirilen denklem setlerinin çözülmesi dağıtıcının sınırı üzerindeki her bir alt kısım bölgede etkilenen kaynağı verir. Sonuç olarak yöntem en çok ideal iletkenlerde ve kayıpsız dağıtıcılarda işe yarar.

Ne yazık ki, frekans azaldıkça geliştirilen matris yarayılsız hale gelir. Ayrıca, MoM ile magnetik alan hesaplamaları elektriksel alan hesaplamalarından daha zordur. Bu nedenle, yöntem normalde elektriksel alan hesaplamalarında kullanılsa da demir olmayan muhafazaların magnetik ekranlamasını hesaplamak üzere kullanılmıştır.

Çoklu Çok kutuplu Program (MMP) adıyla da anılan Genel Çok kutuplu Teknik (GMT),

formülasyon açısından MoM'a benzer ancak temel fonksiyonlarını çok kutuplu kaynakların ürettiği alanların analitik çözümleri oluşturur. Yani, ikisinin arasındaki fark GMT alan miktarını çözerken, MoM alanın kaynaklarını belirler. MoM'da bir dağıtıcı (veya ekran) nesnenin sınırı boyunca kaynaklarla modellenirken, GMT nesneyi bir dizi stratejik olarak yerleştirilmiş monopol, dipol ve diğer çok kutuplular yoluyla modeller. Her iki teknik de çözümleri için PT'yi kullanır. Nüfuz edilebilir sistemleri belirlemek için dağıtıcının içine ve dışına hayali kaynaklar yerleştirilir. Tüm alan üzerindeki toplam çözüm iki ayrı çözümün yaklaştırılmasını gerektirir: biri sınırın iç bölge çözümü diğeri sınırın dış bölge çözümüdür. MoM gibi GMT de tipik olarak ideal iletken olduğunu varsayar.

GMT konusunda farklı kaygılar vardır. Bunların en büyüğü özellikle keyfi biçimli nesnelere için hayali kaynakların yerleştirilmesi konusunda iyi tanımlanmış ilkeler yoktur. Ayrıca formülasyon "aşırı örneklenmiş bir denklemler sistemi" içerir, bu da yaraysız bir matrise yol açar. Denklemlerin çözümü, En Küçük Kareler Yöntemi veya Tekli Değer Ayrışımı gibi tekrarlayan bir yaklaşımı gerektirir.

BEM, ya da Sınır İntegral Denklemi Yöntemi (3.10) integral denklemiyle başlar. Denklem sınır elemanları olarak anılan parçalı doğrusal veya parçalı kuadratik bölümlere ayrılmış olan sınır boyunca nümerik olarak bütünlenir. MoM gibi BEM de PMM ile Alt kısımlar Yöntemini kullanır. MoM sınır şartına etki ederken PT'yi kullanırken, BEM Hata Azaltma Tekniğini (EMT) kullanır.

Daha sonra elde edilen lineer denklemler daha önce anılan yöntemler gibi çözülür. BEM ile MoM arasındaki bir başka fark da, BEM'in sınırı tanımlarken FEM'e benzer şekilde biçim fonksiyonlarını kullanmasıdır. BEM sonsuz levhaların magnetik ekranlamasını; yakınlık ve derinlik etkilerini; silindirlerden yayılmayı ve indüksiyon akımlarını değerlendirmekte kullanılmıştır.

Sınır boyunca nümerik entegrasyonun uygulanması geleneksel BEM'in ana sorunudur. Genellikle bu entegrasyonlar tekillikleri keserek, kompleks analitik analizlerin yeniden tanımlanmasını gerektirir. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için dolaylı bir BEM yaklaşımı geliştirilmiştir, buna Temel Çözümler Yöntemi (MFS) denir. MFS, BEM ile olan ilişkisinde GMT ile MoM arasındaki ilişkiye benzer. MFS'de tekilliklerden sakınmak için ilgilenilen alanın dışındaki yardımcı bir sınıra sanal kaynaklar yerleştirilir. Bu sanal kaynaklar tanımlı kaynaklar için Green'in fonksiyonları olmak üzere, temel kaynaklarca yakınlştırılır. Ne yazık ki geleneksel BEM'in kare matrisine karşılık, bu işlem dikdörtgen katsayı matrisi ile

sonuçlanır. Ayrıca, MFS kaynak yerlerinin seçimine aşırı duyarlıdır (Frix, 1996).

Düşük frekanslı magnetik ekranlamayı değerlendirmek için bir yaklaşım da, ekran içindeki akımı dahil edebilmek için, sadece sınır yerine, tüm ekranı belirlemektir. İç bölgelerin dahil edilmesi MoM formüllerinin bilgisayar belleği sorunlarıyla birlikte FEM'e benzerlik göstermesine neden olur.

Diferansiyel operatör tekniklerinin açık sınır problemlerinde kullanımı zorken, integral operatör teknikleri homojen olmayan bölgelerde modelleme yapamaz ve doğrusal olmayan bölgelerin modellenmesinde zorluk yaşanır. Bu nedenle, yaygın kullanılan bir yaklaşım BEM ile FEM'i birleştirir. Bu yaklaşım (3.7)'nin heterojen biçimini sınır içinde homojen biçimini,  $(\vec{f}(\vec{r}) = 0)$ , sınırın dışında kullanır. Sınır içinde geleneksel FEM problemi formüle edilir. Sınırın dışında çözümün (ya da Green fonksiyonunun) biçimi bilindiğinden, varsayımsal sınır yüzeyi üzerinde bir BEM integral formülü belirlenir. Bu sınır şartını kullanarak, bir dizi lineer denklem formüle edilerek çözülür. Bu yaklaşımın FEM açısından bir dezavantajı da, sonuç olarak ortaya çıkan lineer denklemlerin artık dağınık olmamasıdır, bu durum iç FEM problemi için de geçerlidir. Ayrıca, lineer denklemlerin sayısı kıyaslanabilir iç FEM problemi denklemlerinin sayısından daha büyüktür. Ancak en zorlu görev iki yaklaşımın sınır şartlarını birleştirmektir.

Genel olarak integral operatör tekniklerle ilişkilendirilen birçok problem vardır. İntegral operatör tekniklerinin hiçbiri doğrusal olmayan ortamlarda ve/veya karmaşık geometrilere tek başlarına problemleri etkin bir şekilde çözemezler. İkinci olarak, EM alanları elde etmek için, keyfi biçimli alanlar için bulunması zor olan Green fonksiyonları gereklidir. Böylece gövdenin keyfi bir sınırı olduğunda, integralleri hesaplamada kullanılan çekirdeklerin genel bilgisayar algoritmasında temsil edilmesi zordur. Üçüncü olarak, integral operatör tekniklerinin pek çoğu çözüm için Galerkin veya nokta eşleştirme yöntemlerinden birini kullanır. PMM daha hızlıdır ancak doğruluğu daha azdır. Galerkin yöntemi daha doğrudur ancak katsayı matrislerini kurarken daha fazla süre ister. Dördüncüsü, teknikler küçük yüzey derinliği olan bölgelerde pek işe yaramaz. Beşincisi, çözüm alanı sınır belirleme yöntemine duyarlıdır. Altıncısı, nümerik çözümler dairesel olmayan sınırlarda çok yavaş yaklaşır. Son olarak, yanlış şartlandırma tipik bir sorundur (Frix, 1996).

### 3.2.4.3 Modal Genişlemeler

Her ne kadar El-Gamal vd.,(1990) Discrete Boundary Points Method; Belirgin Sınır Noktaları

(DBP) Yöntemi'ni önermiş olsa da, modal genişleme yöntemleri belirli isimlerle anılmaz (Mullin vd., 1965). Yöntem sadece dağılma problemleri için kullanılmıştır. Yöntemde dağıtıcılar sonlu ve sonsuz silindir sıraları şeklinde modellenmiştir. Tipik olarak yöntem bir düzlem dalga gelişi ve ideal iletken silindirleri varsayar. İstenilen dağılma probleminin çözümü dağılma çözümlerinin bir silindir tarafından üst üste konmasıdır. Geçtiğimiz yıllarda Elsherbeni ve diğerleri bu yöntemi dielektrik ve ideal olmayan iletken dağıtıcıları modellemek üzere kullanmıştır (Elsherbeni vd., 1992, 1993, 1994).

#### 3.2.4.4 Monte-Carlo Yöntemi

Monte-Carlo Yönteminde araştırmacı yüklü yüzeyler arasındaki potansiyelin haritasını belirlemek üzere istatistiksel analiz kullanır (Davey vd., 1993). Monte Carlo Yöntemini indüksiyon akımlarını hesaplamakta kullanmıştır. Programı FDM ile karşılaştırmışlar ve daha az hesaplama süresiyle FDM'ye kıyaslanabilir sonuçlar elde etmişlerdir. Yöntemin "program için önemsiz" olduğunu ve FDM kadar çok bellek gereksinimi olmadığını bildirmişlerdir. Yöntemin avantajı basitliği, büyük dezavantajı ise bilgisayar süresi için doymak bilmeyen iştahıdır. Ayrıca, bir çözüm alanında her arzu edilen nokta için çok sayıda simülasyon çalıştırmak gereklidir.

### 3.3 Araştırmaların Özeti

Elektromagnetik etkileşimlerin değerlendirilmesi için çeşitli teknikler mevcuttur. Ne yazık ki, genel ekran biçimleri için doğru analitik teknik mevcut değildir. Hali hazırda kullanılan nümerik tekniklerin uygulaması o kadar zordur ki sadece bir elektromagnetik uzmanı bunları doğru kullanabilir. Kısaca, düşük frekanslı magnetik ekranlamanın değerlendirilmesi için pratik bir yöntem hali hazırda mevcut değildir. Düşük frekanslı magnetik ekranlamayı belirlemede kullanılacak ve:

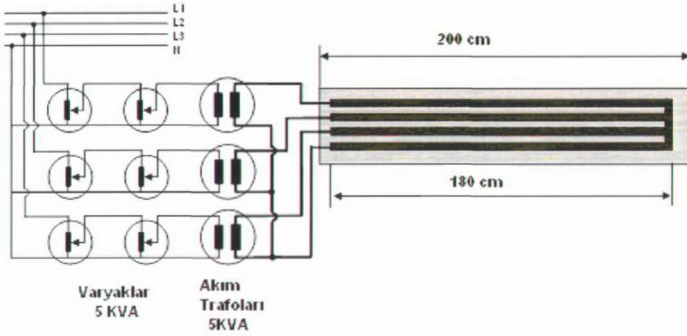
- Sınır kesme gereksinimi düşünülmezsizin uygulanabilecek bir prosedüre ihtiyaç vardır. Bu da ekranın etrafındaki alanın değil, sadece ekranın belirlenmesi gerektir.
- Bu prosedür ferromagnetik ortamlara uygulanabilmeli;
- Heterojen malzemedен üretilmiş ekranlara uygulanabilmeli;
- Ekran içindeki indüksiyon akımlarını belirleyebilmeli
- Kullanıcının elektromagnetik uzmanı olmasını gerektirmeyecek kadar basit olmalıdır.

#### 4. EKLANLAMA DENEYLERİ

Ekranlama deneyleri Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde bulunan yüksek akım laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Akım kaynağı dolayısıyla magnetik alan kaynağı olarak kullanılan deney düzeneği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Y.T.Ü. yüksek akım laboratuvarı.



Şekil 4.2. Magnetik alan kaynağı olarak kullanılan deney düzeneği.

Magnetik alan kaynağı olarak kullanılan düzende; üç adet tek fazlı 5 kVA gücünde transformatör, her bir fazda birbirine paralel iki adet 5 kVA varyak ve dört adet 2 metre uzunluğunda 40x10 mm<sup>2</sup> bara, bara ile trafo arasındaki bağlantıyı sağlayan 2 adet 120 mm<sup>2</sup> kablo bulunmaktadır. Deney mantığı transformatörlerin kısa devre çalışmasına dayanmaktadır. Varyaklar ile baradan geçen akım miktarı istenilen seviyeye gelene kadar, transformatöre uygulanan kısa devre gerilimi ayarlanır. Her fazdaki iki varyağın paralel bağlanması ayarların daha hassas yapılmasını sağlamaktadır. Bu deney düzeneği ile her fazdan 0 – 1000 A aralığında akım geçirilebilmektedir. Deney transformatörleri ve varyakların bulunduğu kumanda odası Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Geçen akım değerlerinin ölçümünde çeşitli akım kademeleri için akım transformatörleri kullanılmış ve bu akımlar dijital ampermetreler ile ölçülmüştür. Ampermetreler Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Deneyler her bir fazdan dengeli 400 A geçirilerek yapılmıştır. Magnetik alan değerleri F.W. Bell marka 4080 model, üç eksenli dijital göstergeli bir magnetik alan ölçü aleti ile mG birimi cinsinden ölçülmüştür. Şekil 4.5’de Magnetik alan ölçüm aleti görülmektedir. Şekil 4.6’da magnetik alan ölçüm cihazıyla yüksek akım laboratuvarında yapılan ölçme çalışmaları sırasında çekilmiş bir fotoğraf görülmektedir. Levha şeklindeki ekranlama malzemeleri akım (magnetik alan) kaynağına silindirik şekilde sarılarak (şekil 4.7) deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan ekran malzemeleri, 1x2 m<sup>2</sup> boyutlarında ve 0.5 mm kalınlığında farklı metallere malzemelerdir.



Şekil 4.3 Deney transformatörleri ve varyakların bulunduğu kumanda odası



Şekil 4.4 Yüksek akım laboratuvarındaki ampermetreler.



Şekil 4.5 F.W Bell marka 4080 model magnetik alan ölçüm cihazı



Şekil 4.6 Magnetik alan ölçüm cihazıyla laboratuarda yapılan ölçümlerden bir fotoğraf.

Çizelge 4.1 Deneyde kullanılan ekran malzemelerinin özellikleri.

Ekran	$\mu\text{r}$	İletkenlik $\sigma$	Deri Kalınlığı $\delta$ (mm)
Trafo	4000	$2.1739.10^6$	$0,763.10^{-3}$
Galvanizli Sac	500	$7.8229.10^5$	$3,6.10^{-3}$
DKP Sac	700	$7.1429.10^6$	$1,0.10^{-3}$
Bakır	1	$5.8824.10^7$	$9,3.10^{-3}$
Alüminyum	1	$3.5714.10^7$	$11,9.10^{-3}$
Paslanmaz Çelik	182	$6.6698.10^6$	$9,3.10^{-3}$
Kurşun	1	$4.8426.10^6$	$32,3.10^{-3}$
Çinko	1	$1.6949.10^7$	$17,3.10^{-3}$



Şekil 4.7 Ekranlama malzemelerinin kaynağa silindirik şekilde sarılması.

#### 4.1 MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ

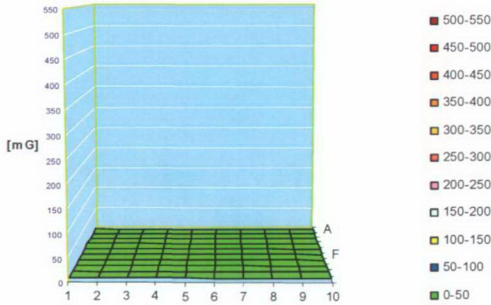
Enerjisiz, ekranlı ve enerjili farklı malzemelerin kullanılmasıyla elde edilen deney sonuçları bu bölümde verilmektedir.

##### 4.1.1 ENERJİSİZ MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ

Ekran malzemesi olmadan ve enerjisiz olarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Enerjisiz magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1,1	1,1	1,1	1,1	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
B	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
C	1,6	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
D	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6	1,6	1,7
E	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
F	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
G	2,1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
H	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1
I	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4
J	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5



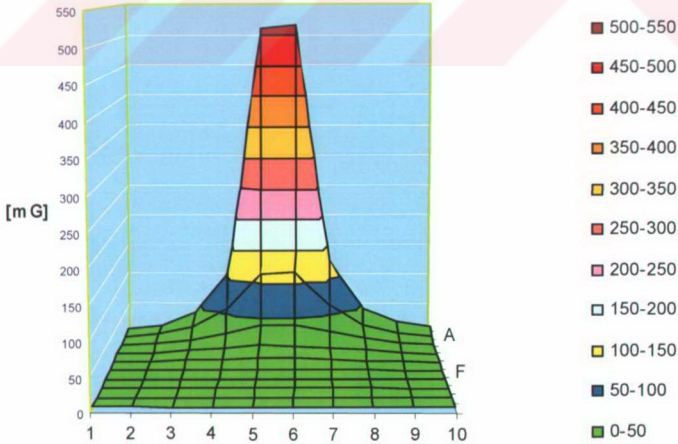
Şekil 4.8 Enerjisiz magnetik alan dağılımı

#### 4.1.2 EKCRANSIZ ENERJİLİ MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ

Ekran malzemesi olmadan ve enerjili olarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Ekcransız enerjili magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	10	17,7	39	106	510	515	126	46,7	24,2	14,5
B	7,7	12,7	25	56,1	114	115	62,5	28,1	16	10,4
C	6	9,3	15,3	26,5	40,6	41	28,2	18,3	10,9	7,1
D	4,5	6,4	9,5	14,3	18,5	17,8	14,7	10,8	7,6	5,4
E	3,3	4,4	5,8	7,5	8,9	9	8,5	6,7	5,3	4,2
F	2,5	2,9	3,7	4,5	4,9	5,1	5	4,4	3,9	3,3
G	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,2	3,1	2,9	2,7
H	1,8	1,8	1,9	1,9	2,1	2,1	2,3	2,5	2,4	2,4
I	1,9	1,7	1,8	1,8	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,3
J	1,9	1,9	1,9	1,9	2	1,9	2,1	2,1	2,2	2,3



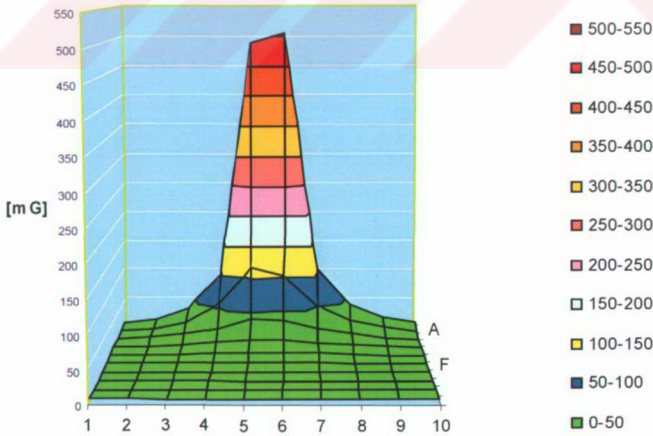
Şekil 4.9 Ekcransız enerjili magnetik alan dağılımı

### 4.1.3 ALÜMİNYUM EKRAN İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak alüminyum kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Alüminyum ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	10	17,1	35,4	96	490	505	103	43,1	21,9	13,8
B	7,8	11,5	23,6	54,7	115	102	51,2	25,1	14,4	8,7
C	6	8,7	14,7	24,2	40,6	37,1	23,8	15,8	9	6,1
D	4,4	6	8,8	12,9	16,5	16,1	11,9	8,8	6,2	4,6
E	3,3	4,1	5,3	6,8	7,7	8	6,8	5,5	4,4	3,5
F	2,6	2,8	3,2	3,8	4,1	4,2	4,1	3,7	3,2	2,8
G	2,1	2,1	2,1	2,2	2,4	2,6	2,6	2,6	2,5	2,4
H	1,9	1,8	1,6	1,6	1,6	1,7	1,9	2	2,1	2,1
I	1,9	1,8	1,6	1,6	1,3	1,4	1,7	1,8	1,9	2
J	1,9	2	2	1,7	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2



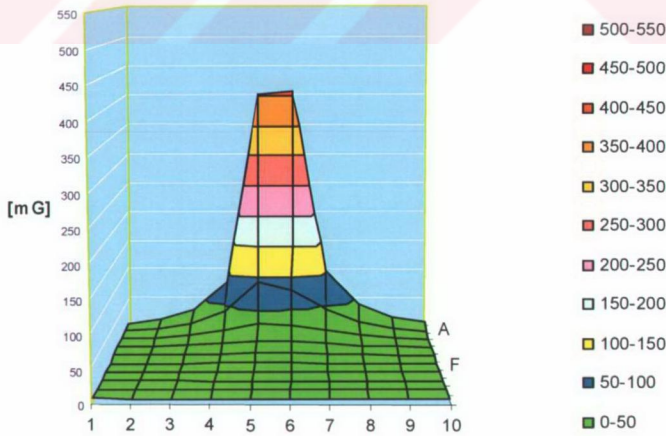
Şekil 4.10 Alüminyum ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.4 BAKIR EKРАН İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak bakır kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.5'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 Bakır ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	8,8	15,6	32,5	80,5	402	409	101	41,8	22,1	13,2
B	7	10,9	21,1	42,1	90	77	45,6	23,2	12,8	8,2
C	5,3	7,9	12,9	20,7	30,5	28,9	21,9	12,8	8,1	5,4
D	3,8	5	7,5	10,5	13	13	10,8	7,6	5,6	4,2
E	2,8	3,4	4,5	5,4	6,5	6,5	6	4,9	4	3,2
F	2,1	2,3	2,7	3,1	3,7	3,6	3,6	3,2	3	2,7
G	1,7	1,7	1,8	1,8	2,1	2,2	2,3	2,4	2,4	2,3
H	1,6	1,5	1,5	1,4	1,6	1,6	1,8	2	2,1	2,1
I	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,5	1,7	1,8	2	2
J	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	2



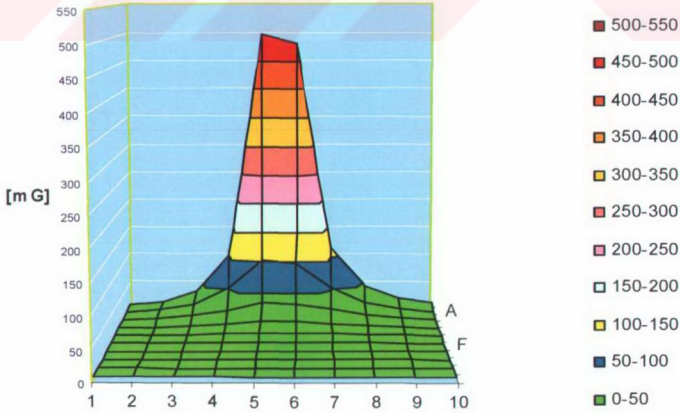
Şekil 4.11 Bakır ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.5 KURŞUN EKRAN İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak kurşun kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Kurşun ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	10,5	17,4	35,9	103	496	482	114	46,4	24,1	15
B	8,4	12,7	23,7	51,7	102	98	52,1	26,4	15,7	9,8
C	6,5	8,9	14,4	24,2	35,6	35,7	26	16,4	10,1	7,2
D	4,8	6,2	8,8	11,9	16	16,7	12,8	9,7	7	5,4
E	3,6	4,3	5,2	6,7	8,3	8,6	7,5	6,2	5,2	4,2
F	2,9	3,1	3,5	4	4,7	5,1	4,6	4,3	3,9	3,5
G	2,5	2,5	2,5	2,6	2,9	3,1	3,1	3,1	3,1	3
H	2,4	2,3	2,2	2,2	2,3	2,4	2,4	2,6	2,7	2,7
I	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,3	2,2	2,4	2,6	2,6
J	2,6	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5	2,3	2,4	2,6	2,6



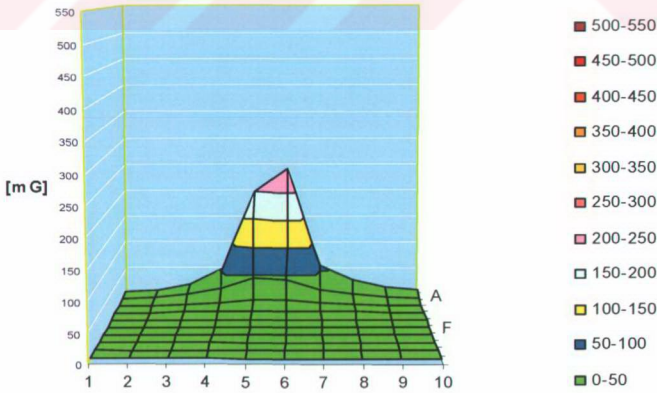
Şekil 4.12 Kurşun ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.6 DKP SAC EKРАН İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak DKP sac kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 DKP sac ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	7,3	12,3	22,4	52,3	200	245	58,2	31,1	17,8	12
B	5,6	8,1	13,1	26,2	44	42,3	23,6	15,6	10,3	7,2
C	4,1	5,2	7,1	10,1	15,5	14,8	10,5	8,2	6,2	4,8
D	3,1	3,5	4,2	5,2	6,1	6,6	5,6	5,1	4,2	3,4
E	2,5	2,5	2,7	3	3,3	3,5	3,4	3,3	3	2,6
F	2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,4	2,2
G	2	2,1	2	1,9	1,4	1,5	1,8	2	2,1	2,1
H	2,1	2	2	2	1,4	1,4	1,8	1,9	2	2
I	2,3	2,2	2,2	2,1	1,5	1,6	1,7	1,7	1,9	2
J	2,3	2,3	2,3	2,3	1,7	1,7	1,8	1,8	2,1	2,1



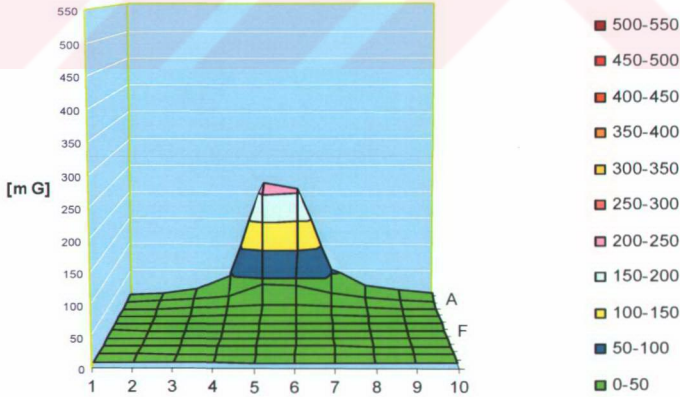
Şekil 4.13 DKP sac ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.7 GALVANİZLİ SAC EKРАН İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak galvanizli sac kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Galvenizli sac ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	7,2	11,4	20	46	220	210	57,6	27,6	17,7	11,9
B	5,6	7,8	11,1	18,4	39,5	38	23	13,9	10,2	7,3
C	4,4	5,1	6,2	8,6	13,5	13	9,7	7,5	6,2	4,9
D	3,2	3,5	3,9	4,4	5,7	6,1	5,4	4,7	4,1	3,6
E	2,7	2,7	2,8	2,9	3,2	3,4	3,4	3,3	3,1	2,9
F	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,6	2,5
G	2,3	2,3	2,2	2,1	2	2,1	2,3	2,3	2,4	2,4
H	2,4	2,4	2,3	2,3	2,1	2,1	2,2	2,3	2,4	2,3
I	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4
J	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,5



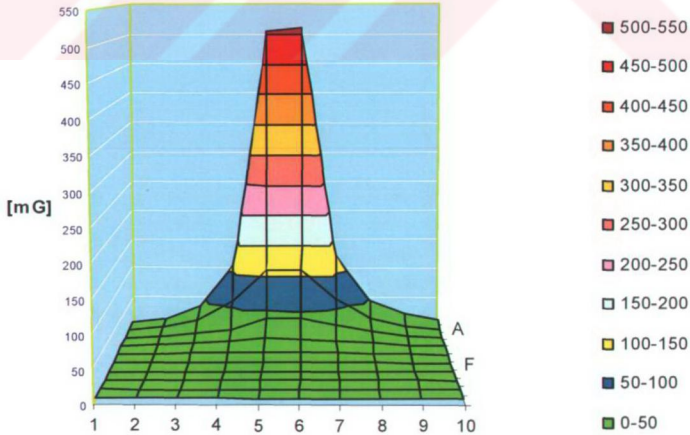
Şekil 4.14 Galvanizli sac ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.8 PASLANMAZ ÇELİK (304) EKRAN İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak paslanmaz çelik (304) kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.9'da verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Paslanmaz çelik (304) ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	10,6	17,5	38,6	108	505	510	126	47,9	25	15,3
B	8,4	13,5	25,2	57	111	111	60,5	29,1	16,5	10,6
C	6,5	9,5	15,8	21,8	39	39,5	28,9	17,4	11,2	7,6
D	4,9	6,5	10	12,8	18,5	17,4	15	10,6	7,9	5,7
E	3,7	4,5	5,9	7,7	8,6	8,8	8,5	6,8	5,4	4,4
F	2,9	3,2	3,9	4,5	4,8	5,1	5,2	4,6	4	3,6
G	2,5	2,5	2,7	2,9	3	3,2	3,5	3,3	3,2	3,1
H	2,3	2,2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	2,8
I	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
J	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7



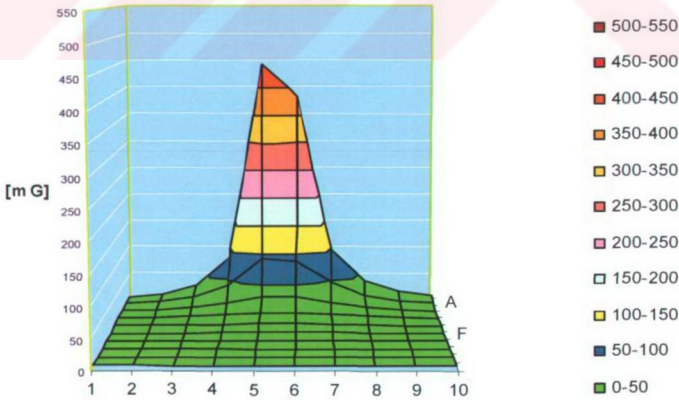
Şekil 4.15 Paslanmaz çelik (304) ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.9 PASLANMAZ ÇELİK (YENİ) EKTRAN İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 Paslanmaz çelik ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	9	15,2	30,6	84,6	443	385	99	39,6	22,1	13,8
B	7,1	10,6	19,2	41,3	91	85	47,8	23,9	13,8	8,8
C	5,1	7,4	12	20,2	30,9	30,5	21,2	13,8	8,8	6,2
D	3,9	5	6,9	9,7	13	13,4	11,1	8,2	6,1	4,5
E	2,9	3,4	4,2	5,5	6,4	6,5	6,2	5	4,3	3,5
F	2,3	2,4	2,7	3,1	3,6	3,8	3,8	3,4	3,1	2,8
G	1,9	1,9	2	2,1	2,3	2,3	2,5	2,5	2,5	2,4
H	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,8	2	2	2,2	2,2
I	1,9	1,9	1,8	1,8	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1
J	2	2	2	1,9	1,7	1,8	1,9	2	2	2



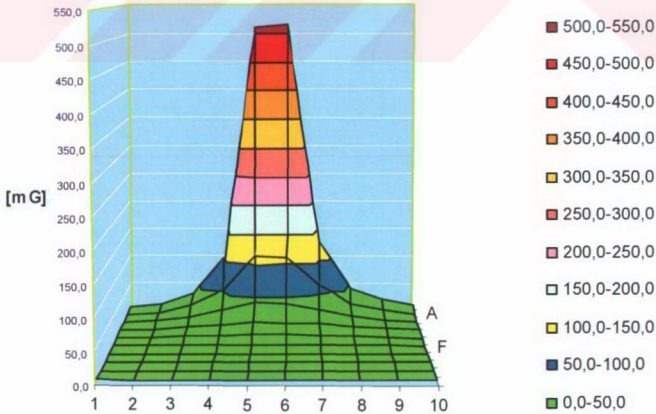
Şekil 4.16 Paslanmaz çelik ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.10 MIKNATISLI LEVHA EKRAN İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak mıknatıslı levha kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Mıknatıslı levha ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	9,5	17,8	35,5	102,0	510,0	515,0	130,0	46,0	25,0	15,9
B	7,5	12,5	24,5	52,5	114,0	111,0	63,0	30,0	17,0	10,4
C	5,8	8,8	15,8	27,5	41,6	40,1	30,0	18,6	11,5	7,6
D	4,4	6,4	9,6	14,3	18,6	17,6	15,5	11,3	8,1	5,9
E	3,4	4,4	6,2	7,8	9,0	9,2	8,7	7,2	5,7	4,6
F	2,5	3,0	3,8	4,7	5,2	5,2	5,3	4,9	4,3	3,8
G	1,9	2,2	2,5	2,7	3,2	3,5	3,5	3,5	3,5	3,2
H	1,7	1,7	1,7	1,8	2,2	2,4	2,6	2,8	2,9	3,0
I	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	2,9
J	1,7	1,7	1,8	1,8	2,3	2,3	2,5	2,5	2,9	2,9



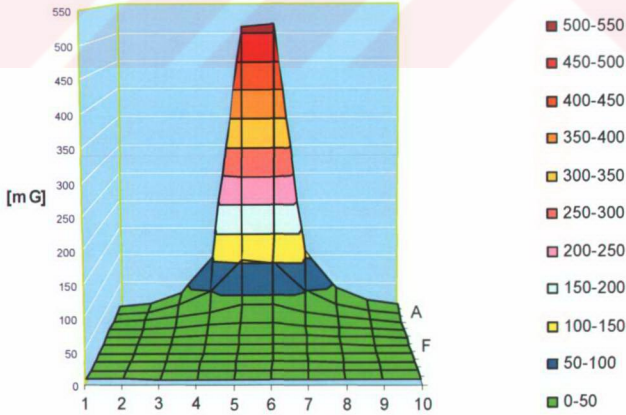
Şekil 4.17 Mıknatıslı levha ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.11 ÇİNKO EKCRAN İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak çinko kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.12'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12 Çinko levha ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	9,9	16,5	36,1	100	510	515	112	44,4	23,8	14,4
B	7,8	12,3	24	49,1	105	101	52	26,3	14,8	9,6
C	6	8,8	15,1	24,3	37,2	36	25	15,4	10,3	6,8
D	4,5	6	9	12,8	16	16,1	12,8	9,4	7	5,1
E	3,3	4,2	5,4	7,2	8,2	8,4	7,4	6,1	5	4,2
F	2,5	2,9	3,5	4,1	4,5	4,8	4,5	4,1	3,7	3,3
G	2	2,1	2,2	2,5	2,8	2,9	2,9	3	2,9	2,8
H	1,8	1,8	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,4
I	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	2	2,1	2,3	2,3
J	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	2	2,1	2,3	2,3



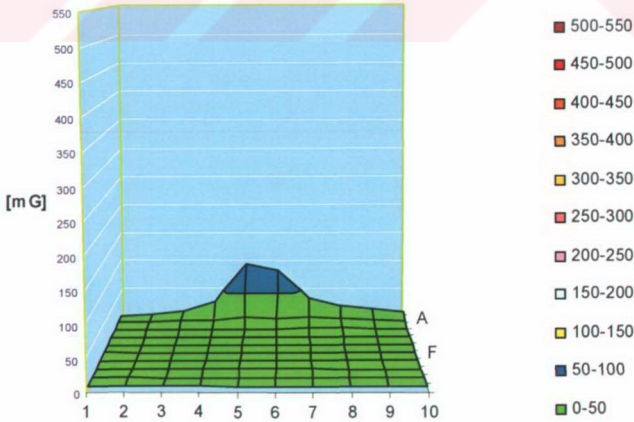
Şekil 4.18 Çinko ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.1.12 TRAFO SAC EKРАН İÇİN MAGNETİK ALAN ÖLÇÜMÜ

Ekran malzemesi olarak trafo sac kullanılarak deney alanı üzerinde yapılan magnetik alan ölçüm sonuçları Çizelge 4.13'de verilmiştir. Bu değerlerden elde edilen, deney alanının üç boyutlu magnetik alan dağılımı Şekil 4.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 Trafo sac levha ekran için magnetik alan ölçüm sonuçları [mG]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	6	9,1	15	30,3	98	88	37	24	17	11,6
B	4,9	6,4	8,5	10	13,9	13,2	14,2	13	9,9	7,2
C	3,8	4,5	5,1	5,1	4,6	5,3	7,2	7	6	4,7
D	3,1	3,4	3,6	3,6	3,5	3,8	4,5	4,3	4	3,4
E	2,7	2,8	2,9	2,8	2,8	2,9	3,2	3,2	3	2,7
F	2,4	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4	2,6	2,6	2,6	2,4
G	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,3
H	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,3
I	2,5	2,5	2,4	2,5	2,4	2,4	2,4	2,3	2,5	2,4
J	2,5	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,5



Şekil 4.19 Trafo sac ekranlı magnetik alan dağılımı

#### 4.2 EKLANLAMA ETKİNLİKLERİ

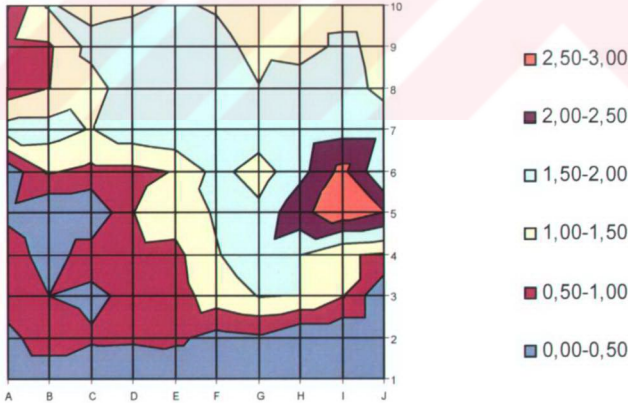
Ekran malzemesi olarak kullanılan materyallerin ekranlama etkinlikleri, (3.9) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Deney alanı üzerinde hesaplanan magnetik alan ekranlama etkinliği sonuçları her bir ekran malzemesi için aşağıda çizelgeler halinde verilmiş ve bu çizelgelerden elde edilen, deney alanının magnetik alan ekranlama etkinliğinin dağılımı şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 4.20 Deneyde kullanılan ekran malzemelerinden bir fotoğraf.

Çizelge 4.14 Alüminyum ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0,00	0,30	0,84	0,86	0,35	0,17	1,75	0,70	0,87	0,43
B	0,00	0,86	0,50	0,22	0,00	1,04	1,73	0,98	0,92	1,55
C	0,00	0,58	0,35	0,79	0,00	0,87	1,47	1,28	1,66	1,32
D	0,20	0,56	0,66	0,89	0,99	0,87	1,84	1,78	1,77	1,39
E	0,00	0,61	0,78	0,85	1,26	1,02	1,94	1,71	1,62	1,58
F	0,00	0,30	1,26	1,47	1,55	1,69	1,72	1,51	1,72	1,43
G	0,00	0,40	1,51	1,78	1,64	1,24	1,80	1,53	1,29	1,02
H	0,00	0,00	1,49	1,49	2,36	1,84	1,66	1,94	1,16	1,16
I	0,00	0,00	1,02	1,02	2,83	2,65	1,84	1,74	1,66	1,21
J	0,00	0,00	0,00	0,97	2,50	1,49	1,84	1,34	1,27	1,21

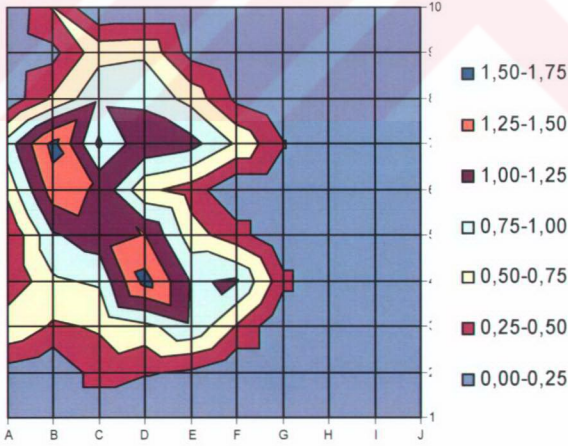


Şekil 4.21 Alüminyum ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.



Çizelge 4.16 Kurşun ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

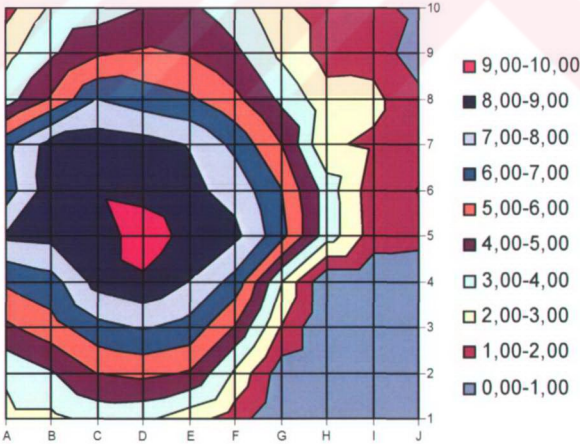
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0,00	0,15	0,72	0,25	0,24	0,58	0,87	0,06	0,04	0,00
B	0,00	0,00	0,46	0,71	0,97	1,39	1,58	0,54	0,16	0,52
C	0,00	0,38	0,53	0,79	1,14	1,20	0,71	0,95	0,66	0,00
D	0,00	0,28	0,66	1,60	1,26	0,55	1,20	0,93	0,71	0,00
E	0,00	0,20	0,95	0,98	0,61	0,39	1,09	0,67	0,17	0,00
F	0,00	0,00	0,48	1,02	0,36	0,00	0,72	0,20	0,00	0,00
G	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00
H	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 4.23 Kurşun ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı

Çizelge 4.17 DKP sac ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

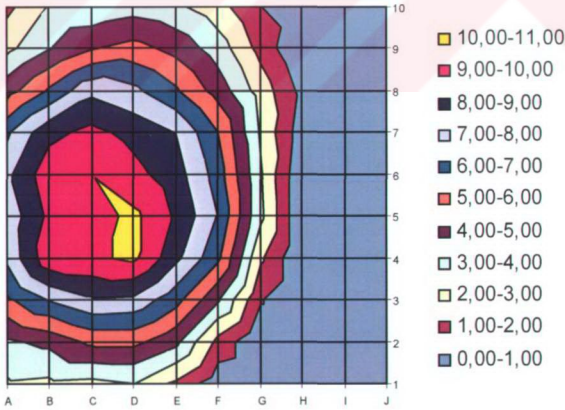
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	2,73	3,16	4,82	6,14	8,13	6,45	6,71	3,53	2,67	1,64
B	2,77	3,91	5,61	6,61	8,27	8,69	8,46	5,11	3,83	3,19
C	3,31	5,05	6,67	8,38	8,36	8,85	8,58	6,97	4,90	3,40
D	3,24	5,24	7,09	8,79	9,64	8,62	8,38	6,52	5,15	4,02
E	2,41	4,91	6,64	7,96	8,62	8,20	7,96	6,15	4,94	4,17
F	1,51	2,80	4,92	6,62	8,23	7,71	6,74	5,26	4,22	3,52
G	0,00	0,40	1,94	3,05	6,33	6,02	5,00	3,81	2,80	2,18
H	0,00	0,00	0,00	0,00	3,52	3,52	2,13	2,38	1,58	1,58
I	0,00	0,00	0,00	0,00	1,58	1,49	1,84	2,24	1,66	1,21
J	0,00	0,00	0,00	0,00	1,41	0,97	1,34	1,34	0,40	0,79



Şekil 4.24 DKP sac ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.

Çizelge 4.18 Galvanizli sac ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

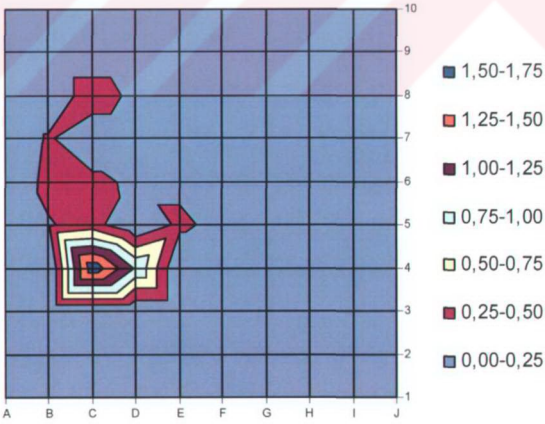
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	2,85	3,82	5,80	7,25	7,30	7,79	6,80	4,57	2,72	1,72
B	2,77	4,23	7,05	9,68	9,21	9,62	8,68	6,11	3,91	3,07
C	2,69	5,22	7,85	9,77	9,56	9,98	9,27	7,75	4,90	3,22
D	2,96	5,24	7,73	10,24	10,23	9,30	8,70	7,23	5,36	3,52
E	1,74	4,24	6,33	8,25	8,88	8,46	7,96	6,15	4,66	3,22
F	0,35	1,64	4,13	6,22	6,96	6,55	6,02	4,57	3,52	2,41
G	0,00	0,00	1,11	2,18	3,23	3,10	2,87	2,59	1,64	1,02
H	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,72	0,00	0,37
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 4.25 Galvanizli sac ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.

Çizelge 4.19 Paslanmaz çelik (304) ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

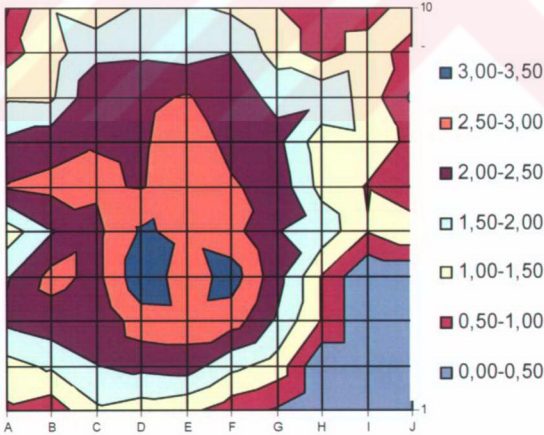
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0,00	0,10	0,09	0,00	0,09	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,31	0,28	0,00	0,00	0,00
C	0,00	0,00	0,00	1,70	0,35	0,32	0,00	0,44	0,00	0,00
D	0,00	0,00	0,00	0,96	0,00	0,20	0,00	0,16	0,00	0,00
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 4.26 Paslanmaz çelik (304) ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı

Çizelge 4.20 Paslanmaz çelik ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

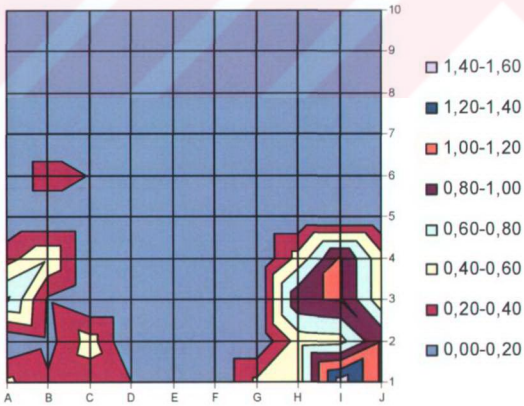
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0,92	1,32	2,11	1,96	1,22	2,53	2,09	1,43	0,79	0,43
B	0,70	1,57	2,29	2,66	1,96	2,63	2,33	1,41	1,28	1,45
C	1,41	1,99	2,11	2,36	2,37	2,57	2,48	2,45	1,86	1,18
D	1,24	2,14	2,78	3,37	3,06	2,47	2,44	2,39	1,91	1,58
E	1,12	2,24	2,80	2,69	2,86	2,83	2,74	2,54	1,82	1,58
F	0,72	1,64	2,74	3,24	2,68	2,56	2,38	2,24	1,99	1,43
G	0,45	1,27	1,94	2,18	2,01	2,31	2,14	1,87	1,29	1,02
H	0,00	0,00	0,97	0,97	1,84	1,34	1,21	1,94	0,76	0,76
I	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	0,97	1,34	1,27	1,21	0,79
J	0,00	0,00	0,00	0,00	1,41	0,47	0,87	0,42	0,83	1,21



Şekil 4.27 Paslanmaz çelik ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.

Çizelge 4.21 Miknatıslı levha ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

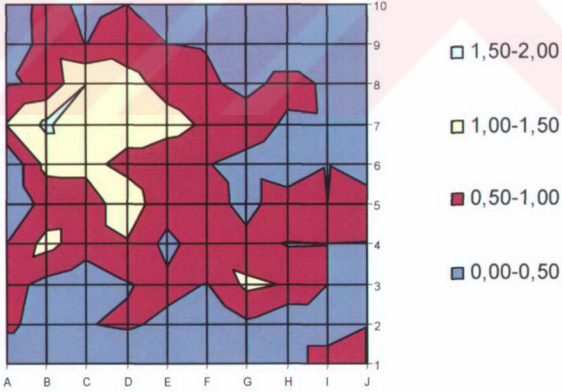
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0,45	0,00	0,82	0,33	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00
B	0,23	0,14	0,18	0,58	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
C	0,29	0,48	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
D	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H	0,50	0,50	0,97	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I	1,49	0,53	1,02	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J	0,97	0,97	0,47	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 4.28 Miknatıslı levha malzemesi için ekranlama etkinliğinin dağılımı.

Çizelge 4.22 Çinko ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

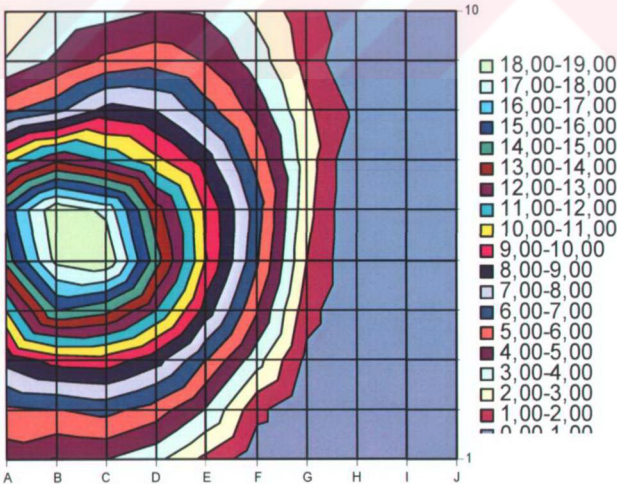
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0,09	0,61	0,67	0,51	0,00	0,00	1,02	0,44	0,14	0,06
B	0,00	0,28	0,35	1,16	0,71	1,13	1,60	0,58	0,68	0,70
C	0,00	0,48	0,11	0,75	0,76	1,13	1,05	1,50	0,49	0,37
D	0,00	0,56	0,47	0,96	1,26	0,87	1,20	1,21	0,71	0,50
E	0,00	0,40	0,62	0,35	0,71	0,60	1,20	0,81	0,51	0,00
F	0,00	0,00	0,48	0,81	0,74	0,53	0,92	0,61	0,46	0,00
G	0,00	0,40	1,11	0,67	0,30	0,29	0,86	0,28	0,00	0,00
H	0,00	0,00	0,97	0,47	0,87	0,00	0,39	0,72	0,00	0,00
I	0,97	0,00	0,50	0,50	0,50	0,47	0,42	0,40	0,00	0,00
J	0,47	0,47	0,47	0,47	0,92	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00



Şekil 4.29 Çinko ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı

Çizelge 4.23 Trafo sac ekran için ekranlama etkinliği değerleri [dB].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	4,44	5,78	8,30	10,88	14,33	15,35	10,64	5,78	3,07	1,94
1	3,93	5,95	9,37	14,98	18,28	18,80	12,87	6,70	4,17	3,19
2	3,97	6,31	9,54	14,31	18,92	17,77	11,86	8,35	5,19	3,58
3	3,24	5,49	8,43	11,98	14,46	13,41	10,28	8,00	5,58	4,02
4	1,74	3,93	6,02	8,56	10,04	9,84	8,49	6,42	4,94	3,84
5	0,35	1,29	3,41	5,11	6,20	6,55	5,68	4,57	3,52	2,77
6	0,00	0,00	0,72	1,39	2,01	2,31	2,50	2,22	1,64	1,39
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,00	0,37
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 4.30 Trafo sac ekran için ekranlama etkinliğinin dağılımı.

## 5. SONUÇLAR

Enerjisiz yapılan magnetik alan ölçümlerinde deney alanında kaynağa yakın bölgelerde magnetik alan seviyesi 1.1-2.0 mG arasındadır. Kaynağa uzak bölgelerde 2.0-2.6 mG arasında tespit edilmiştir (Çizelge 4.2).

Ekran malzemesi kullanmadan yapılan ölçümlerde ekranın hemen önündeki noktalarda magnetik alan değerinin 500 mG'u aştığı görülmektedir. Ekrandan uzaklaştıkça oldukça düşük seviyelere gerilediği tespit edilmiştir (Çizelge 4.3).

Ekran malzemesi olarak alüminyum kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre çok fazla bir değişim göstermediği ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır (Çizelge 4.4).

Ekran malzemesi olarak bakır kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre kaynağa çok yakın noktalarda yaklaşık %20'lik bir azalma olduğu görülmektedir (Çizelge 4.5).

Ekran malzemesi olarak kurşun kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre önemli bir değişim göstermediği ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır (Çizelge 4.6).

Ekran malzemesi olarak DKP sac kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre kaynağa çok yakın noktalarda yaklaşık %50'lik bir azalma olduğu görülmektedir (Çizelge 4.7).

Ekran malzemesi olarak galvanizli sac kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre kaynağa çok yakın noktalarda yaklaşık %55'lik bir azalma olduğu görülmektedir (Çizelge 4.8).

Ekran malzemesi olarak paslanmaz çelik (304 kalite) kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre çok fazla bir değişim göstermediği ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır (Çizelge 4.9).

Ekran malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre kaynağa çok yakın noktalarda yaklaşık %16'lık bir azalma olduğu görülmektedir (Çizelge 4.10).

Ekran malzemesi olarak mıknatıslı levha kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre çok fazla bir değişim göstermediği ölçüm sonuçlarından

anlaşılmaktadır (Çizelge 4.11).

Ekran malzemesi olarak çinko kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre çok fazla bir değişim göstermediği ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır (Çizelge 4.12).

Ekran malzemesi olarak trafo sacı kullanıldığında yapılan magnetik alan ölçümlerinde ekransız duruma göre kaynağa çok yakın noktalarda yaklaşık %80'lik bir azalma olduğu görülmektedir (Çizelge 4.13).

Alüminyum malzemesinin ekranlama etkinliği olarak kaynaktan uzak noktalarda en fazla 2,8 dB'e çıktığı görülmektedir. Deney platformu üzerindeki ekranlama etkinliği dağılımı düzgün bir şekil göstermemektedir (Şekil 4.21).

Bakır malzemesinin ekranlama etkinliği olarak en yüksek 3,5 dB değerine kadar çıktığı görülmektedir. Buradaki ekranlama etkinliği, düzgün bir dağılım göstermemektedir (Şekil 4.22).

Kurşun malzemesinin ekranlama etkinliği, kaynağa yakın bölgelerde ekranlama etkinliğinin olduğu, bunun dışında bu malzemenin ekranlama etkinliği seviyesinin çok düşük olduğu ve bu değer en fazla 1,58 dB'e kadar çıkabildiği görülmüştür (Şekil 4.23).

DKP sac malzemesinin ekranlama etkinliği laboratuvar sahasında düzgün bir dağılım sergilediği grafikten anlaşılmaktadır. Ekranlama etkinliği, kaynaktan 1,80 metre uzaklıkta maksimum seviyede olduğu ve bu noktada 9,64 dB ekranlama etkinliği görülmektedir (Şekil 4.24).

Galvanizli sac malzemesinin ekranlama etkinliği, kaynaktan 1,80 metre uzaklıkta ekranlama etkinliği maksimum düzeyde olduğu ve 10,24 dB'e kadar çıktığı görülmektedir (Şekil 4.25).

Paslanmaz çelik (304), mknatsız levha ve çinko malzemelerinin ekranlama etkinlikleri birbirlerine benzemektedir. Bu üç malzemenin de ekranlama etkinlik dağılımı incelendiğinde, ihmal edilebilecek seviyede bir ekranlama etkisi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bu üç malzemenin magnetik alana karşı ekranlayıcı olarak kullanılmayacağı anlaşılmıştır (Şekil 4.26, Şekil 4.28, Şekil 4.29).

Paslanmaz çelik malzemesi için ekranlama etkinlik dağılımı nispeten karışık bir dağılım göstermektedir. En fazla 3,37 dB'lik ekranlama etkinliği sağlamaktadır (Şekil 4.27).

Trafo sacı malzemesi için ekranlama etkinlik dağılımı düzgün olduğu görülmektedir.

Ekranlama etkinliği kaynağa yakın bölgelerde 18,92 dB'e kadar çıkmakta olduğu, kaynaktan 3,5 metre uzaklaşıldığında ise herhangi bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. En fazla ekranlama etkinliğine sahip malzeme olduğu tespit edilmiştir (şekil 4.30).

Böylece ekran malzemeleri içerisinde en etkili malzemenin trafo sacı olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada çeşitli malzemelerin ekranlama etkinlikleri ölçümlerle tespit edilmiştir. Daha ileriki çalışmalarda bu ölçüm sonuçlarıyla tezde belirtilen yöntemlerle elde edilecek hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması yapılabilir. Magnetik alan byklğne göre kullanılacak malzemenin cinsini ve miktarını belirleyecek programlar geliştirilebilir.



**KAYNAKLAR**

A. C. Ludwig, (1987), "Wire Grid Modeling of Surfaces", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-35, No.9, 1045-1048.

A. J. Mager, (1970), "Magnetic Shields" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-6 No.1, 67-75.

C. M. Ryan, (1967), "Computer Expression for Predicting Shielding Effectiveness for the Low Frequency Plane Shield Case", IEEE Transactions on Elektromagnetic Compatibility, Vol. EMC-9, No.2, 83-94.

D. J. Epstein, (1965) "Magnetic Shielding," Proceedings of the IEEE, Vol. 53, No.6, 655-656.

D. Labridis, P. Dokopoulos, (1988), "Finite Element Computation of Field, Losses and Forces in a Three-Phase Gas Cable with Non-Symmetrical Conductor Arrangement", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-3, No.4, 1326-1333.

D. Labridis, P. Dokopoulos, (1992), "Finite Element Computation of Eddy Current Losses in Nonlinear Ferromagnetic Sheaths of Three-Phase Power Cables", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-7, No.3, 1060-1067.

E. K. Miller, (1988), "A Selective Survey of Computational Electromagnetics", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-36, No.9, 1281-1305.

F. J. Young, W. J. English, (1970), "Flux Distribution in a Linear Magnetic Shield," IEEE Transactions on Electromagnetic Compalibility, Vol.EMC-12, No.3, 118-133.

IEEE Magnetic Fields Task Force, (1988), AC Fields Working Group, Corona and Field Effects Subcommittee Transmission and Distribution Committee, "Magnetic Fields from Electric Power Lines- Theory and Comparison to Measurements," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-3, No.4, 2127-2136.

J.A. Tegopoulos, E. E. Kriezis, (1971), "Eddy Current Distribution in Cylindrical Shells of Infinite Length Due to Axial Currents-Part I: Shells of One Boundary," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.13, No.3, 1287-1294.

J. H. Bramble, J. E. Pasciak, (1983), "An efficient Numerical Procedure for the Computation of Steady State Harmonic Currents in Flat Plates", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-19, No.6, 2409-2412.

J. R. Moser, (1967), " Low Frequency Shielding of Circular Loop Electromagnetic Field Source" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC 9, No.1, 6-18.

L. Hasselgren, E. Möller, Y. Hamnerius, (1994), "Calculation of Magnetic Shielding of a Substation at Power Frequency Using FEM". IEEE/PES Winter Meeting, New York, 94.

M. Felizani, (1992), "Numerical Solutions of Low Frequency Scattering Problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-28, No.2, 1224-1227.

M. S. Towers, A. McCowen, J. A. R. Macnab, (1993), "Electromagnetic Scattering from an Arbitrary", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-41, No.6, 770-777.

M. T. Ahmed, J. D. Lavers, P. E. Burke, (1989), "An Evaluation of the Direct Boundary Element Method and the Method of Fundamental Solutions", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-25, No.4, 3001-3006.

M. P. Jain, L. M. Ray, (1970), "Field Pattern and Associated Losses in Aluminum Sheet in Presence of Strip Bus Bars," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No.7, 1525-1539.

Pancar, M., (1999) "Elektromagnetik Alanların Ekranlanması", İ.T.Ü. F.B.E. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1-35.

P. A. Tirkas, C. A. Balanis, (1992), "Higher Order Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Time-Domain Method". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-40, No.10, 1215-1222.

P. R. Bannister, (1968), "New Theoretical Expressions for Predicting Shielding Effectiveness for the Plane Shield Case", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-10, No.1, 2-7.

R. A. Ross, (1966), "Radar Cross Section of Rectangular Flat Plates as a Function of Aspect Angle", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-14, No.3, 329-335.

R. G. Olsen, P. S. Wong, (1992), "Characteristics of Low Frequency and Magnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-7, No.4, 2046-2055.

R. Sikora, J. Purczynski, W. Lipinski, M. Gramz, (1978) "Use of Variational Methods to the Eddy Currents Calculation in Thin Conducting Plates", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-14, No.5, 383-385.

R. W. Gillette and F. M. Hull, (1988) "Pipe-type Cable Installation Techniques," IEEE Transactions on Power Delivery, No.12, 587-599.

S. J. Salon, B. Mathewson, S. Uda, (1983), "An Integro-Differential Approach to Eddy Currents in Thin Plates". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-19, No.6, 2405-2408.

Standart Dictionary of Electrical and Electronic Terms, (1988), 4 th Ed., ANSI/IEEE Std. New York:IEEE, 778.

Şeker, S., Çerezci, O., (1994), "Elektromagnetik Dalgalar ve Mühendislik Uygulamaları", Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

T. B. Hansen, A. D. Yaghjian, (1992), "Low Frequency Scattering from Two Dimensional Perfect Conductors", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-40, No.11, 1389-1402.

Umurkan, N., (1995), "Enerji İletim Hatlarında Elektrik ve Magnetik Alan Hesabı ve Biyolojik Etkilerin Değerlendirilmesi", Y.T.Ü. Doktora Tezi, İstanbul, 68-71.

W. C. Chew, T. M. Habashy, (1986) "The Use of Vector Transforms in Solving Some Electromagnetic Scattering Problems", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34, No.7, 871-879.

W. M. Frix, (1996), "Three Numerical Techniques to Evaluate the Low Frequency Magnetic Shielding of Two Dimensional Metallic Structure", Arizona State University, 1-43.

W. S. Adams, Aa. H. Mills, (1968), "Electromagnetic Shielding in the Near Field," Symposium Record: IEEE Symposium on Electromagnetic Compalibility. Seattle, WA, 317-329.

Z. Luo, N. A. Demerdash, (1992), "A Finite Element Ballooning Model for 2D Eddy Current Open Boundary Problems for Aerospace Applications", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-28, No.5, 2241-2243.



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	07.03.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1991-1994	Üsküdar Cumhuriyet Lisesi
Lisans	1996-2001	Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003-Devam	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri

**Çalıştığı kurum(lar)**

2003-2004  
2005- Devam

Teknosin Kodlama Sistemleri A.Ş.  
G.E.B. Otomasyon Teknoloji A.Ş.