

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE MANYETİK ALAN
EKRANLANMASININ İNCELENMESİ**

Selim KÖROĞLU

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

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 03 Kasım 2010
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nurettin UMURKAN (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)
: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
: Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (YTÜ)
: Prof. Dr. Osman KILIÇ (MÜ)

İSTANBUL, 2010

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

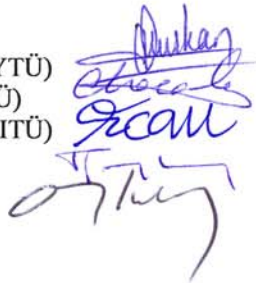
**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE MANYETİK ALAN
EKRANLANMASININ İNCELENMESİ**

Selim KÖROĞLU

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

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 03 Kasım 2010
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nurettin UMURKAN (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)
: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
: Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (YTÜ)
: Prof. Dr. Osman KILIÇ (MÜ)



İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. MANYETİK EKRANLAMA	7
2.1 Başlıca Manyetik Alan Kaynakları	7
2.2 Güç Frekanslı Manyetik Alanların Olumsuz Etkileri ve Maruz Kalmanın Değerlendirilmesi	10
2.3 Manyetik Ekranlama ve Sınıflandırılması	11
2.3.1 Aktif Ekranlama	12
2.3.2 Pasif Ekranlama	14
2.3.3 Aktif/Pasif Ekranlama	16
2.4 Malzemelerinin Elektriksel ve Manyetik Özellikleri	17
2.4.1 Ekran Malzemelerinin Elektriksel İletkenliğin Belirlenmesi	18
2.4.2 Ekran Malzemelerinin Manyetik Özelliklerinin Belirlenmesi	21
3. DÜZGÜN DAĞILIMLI MANYETİK ALANIN EKRANLANMASI	25
3.1 Problemin Tanımlanması	25
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi	27
3.3 Analitik Yöntem	28
3.4 Yapay Sinir Ağları Yöntemi	32
3.4.1 Yapay Sinir Ağları	32
3.4.2 İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı	32
3.4.3 Oluşturulan YSA Modelinin Gerçeklenmesi	34
3.5 Sonuçlar ve Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması	36
4. YER ALTI KABLOLARININ EKRANLANMASININ MODELLEME VE BENZETİM YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ	44
4.1 Yüksek Gerilim Yer altı Kabloların Ekranlanması	44
4.2 Ekranlama Probleminin Tanımı	45
4.3 Yer Altı Kablolarının Ekranlanmasında Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanımı	46
4.4 2B Sonlu Elemanlar Yöntemli Devre Yöntemi	50
4.5 Manyetik Alanların Azaltılması İçin Benzetim Çalışmaları	53

4.5.1	Ekransız Durum	54
4.5.2	Ekranlı Durum	56
4.5.2.1	Ekran Malzemesi ve Kabloların Yerleşim Düzeninin Ekranlama Etkinliği Üzerindeki Etkisi	57
4.5.2.2	Ekran Boyutlarının Ekranlama Etkinliği Üzerindeki Etkisi	60
4.5.2.3	Akım Genliğinin Ekranlama Üzerindeki Etkisi.....	62
4.5.2.4	Ekran Kalınlığının Ekranlama Üzerindeki Etkisi	63
5.	YER ALTI KABLOLARININ EKRANLANMASININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI	65
5.1	Deney Düzeneği	65
5.2	Kontak Direncinin Ekranlama Etkinliği Üzerindeki Etkisi	68
5.3	Ölçüm ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	72
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
	KAYNAKLAR.....	83
	ÖZGEÇMİŞ.....	87

SİMGE LİSTESİ

∇	Nabla vektörü
ω	Açısal frekans
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boşluğun (hava) manyetik geçirgenliği
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
a	Aktivasyon transfer fonksiyonu
A	Manyetik vektör potansiyeli
B	Manyetik akı yoğunluğu veya manyetik indüksiyon
D	Elektriksel akı yoğunluğu
E	Elektrik alan
d_{pk}	Hedeflenen çıkış değeri
f	Frekans
H	Manyetik alan şiddeti
I	Akım
J	Akım yoğunluğu
J_e	Dış akım yoğunluğu
l_m	Epstein çerçevesinde etkin manyetik akı yolu uzunluğu
m	Çıkış katmanındaki nöron sayısı
N_1	Epstein çerçevesinin birincil sargısının toplam sarım sayısı
N_2	Epstein çerçevesinin ikincil sargısının toplam sarım sayısı
P	Giriş verisi sayısı
R	Direnç
r	Yarıçap
s	Ekranlama faktörü
S	Kesit alan
t	Kalınlık
V	Gerilim
w_{ji}	Nöron girişlerindeki ağırlıklar
w_{jo}	Bias değerleri
x_i	Nöron girişleri
y_j	Nöron çıkışları
y_{pk}	Gözlenen çıkış değeri
Z	Empedans
δ	Dalma derinliği
ε	Dielektrik katsayısı
ρ	Elektriksel yük yoğunluğu
σ	Elektriksel iletkenlik

KISALTMA LİSTESİ

2B	İki Boyutlu
AC	Alternatif Akım (Alternating Current)
AY	Analitik Yöntem
BR	Bayesian regülasyon (Bayesian regularization)
CGF	Fletcher-Reeves eşlenik eğim (Conjugate Gradient Back-Propagation with Fletcher-Reeves)
CPU	İşlemci
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DY	Devre Yöntemi
EE	Ekranlama Etkinliği
EMA	Elektromanyetik Alan
ELF	Aşırı Düşük Frekans (Extremely Low Frequency)
GDX	Eğim-düşme momentumlu ve adaptif öğrenme oranlı (Gradient Descent Momentum and an Adaptive Learning Rate)
GetDP	A General Environment for the Treatment of Discrete Problems
ICNIRP	Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyondan Koruma Komisyonu (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
MLP	İleri Beslemeli Çok Katmalı Yapay Sinir Ağı (Feed Forward Multilayer Perception)
R	Korelasyon Katsayısı
S	Ekranlama Faktörü
SCG	Ölçekli-eşlenik eğim (Scaled Conjugate Gradient)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SSE	Toplam Karesel Hata
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
YG	Yüksek Gerilim
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Manyetik alan ekranlamanın sınıflandırılması.	12
Şekil 2.2	Bara ve alan azaltma bobinlerinden oluşan aktif ekranlama (Salinas, 2000).	13
Şekil 2.3	Metal bir malzemede oluşan girdap akımları ile ekranlama prensibi (López vd. 2000).	14
Şekil 2.4	Yüksek geçirgenlikli bir malzeme için akı yönlenmesi etkisiyle ekranlama prensibi (López vd. 2000).	14
Şekil 2.5	İndüksiyon ısıtma sistemi için aktif ve pasif ekranlamanın birlikte kullanılması (Sergeant vd., 2007).	17
Şekil 2.6	Sac levha ve şerit şeklindeki malzemelerin iletkenlik ölçümünde kullanılan deney düzeneğin fotoğrafı.	20
Şekil 2.8	Sac levha, şerit şeklindeki malzemelerin manyetik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği.	22
Şekil 2.9	Epstein çerçevesi ve manyetik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneğinin blok şema gösterimi.	23
Şekil 2.10	Galvanizli demir (DX52) sac malzemesinin (a) bağlı manyetik geçirgenlik değerinin manyetik akı yoğunluğuna bağlı değişim (b) BH düzlemindeki histerisiz çevrimi.	23
Şekil 3.1	Doğrusal olmayan ferromanyetik silindirik bir ekran ile düzgün manyetik alan içerisindeki bir bölgenin ekranlanması.	26
Şekil 3.2	Fe-Si ekran için manyetik alanın fonksiyonu olarak bağlı manyetik geçirgenliğin gerçel ve sanal kısmının değişimi.	27
Şekil 3.3	Silindirik Fe-Si ekran için SEY probleminin çeyrek simetri modeli.	28
Şekil 3.4	Çok katmanlı silindirik ekran.	29
Şekil 3.5	Beş alt katmandan oluşan ve herbir katmanı farklı sabit manyetik geçirgenliğe sahip olan ekrandaki manyetik geçirgenliğin değişimi ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 200$ A/m).	31
Şekil 3.6	Doğrusal olmayan manyetik özelliklere sahip ekrandaki manyetik geçirgenliğin değişimi ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 200$ A/m).	31
Şekil 3.7	Silindirik Fe-Si ekran için ekranlama faktörü tahmininde kullanılan YSA ağının prensip şeması.	35
Şekil 3.8	Ölçüm sonuçlarına göre AY, SEY ve YSA hesaplamalarındaki mutlak bağlı hata oranlarının yüzdesel değişimi.	38
Şekil 3.9	Ekranlama faktörünün uygulanan alanın fonksiyonu olarak AY, SEY, YSA hesaplamaları ve ölçüm sonuçlarına bağlı olarak değişimi ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 4$ ile 318 A/m aralığında değişmekte).	40
Şekil 3.10	Ekranlama faktörünün AY, SEY ve YSA ile frekansa bağlı değişimi ($r = 0,05$ m, $t = 0,5$ mm, $H_0 = 48$ A/m ve $f = 50$ Hz ile 10 kHz aralığında değişmektedir).	41
Şekil 3.11	Ekranlama faktörünün AY, SEY ve YSA ile ekran kalınlığına bağlı değişimi ($r = 0,05$ m, $f = 50$ Hz, $H_0 = 48$ A/m ve $t = 0,5$ ile 5 mm aralığında değişmektedir).	41
Şekil 3.12	SEY ile elde edilen (a) ekrandaki manyetik indüksiyonun değişimi, (b) ekrandaki bağlı manyetik geçirgenliğin değişimi ($t = 5$ mm, $r = 0,05$ m, $f = 50$ Hz, $H = 48$ A/m).	42
Şekil 3.13	AY, SEY ve YSA hesaplamalarında, ekranlama faktörünün ekran yarıçapı ($r = 0,05$ m ile $0,25$ m aralığında değiştirildi) ve frekansın ($f = 50$ Hz, $f = 2$ kHz ve $f = 6$ kHz) fonksiyonu olarak değişimi ($t = 0,5$ mm ve $H_0 = 48$ A/m).	43
Şekil 4.1	Yer altı kablolarını ekranlanmasında (a) açık ekran (b) kapalı ekran	

	topolojisi.	44
Şekil 4.2	Üç fazlı yer altı kabloları ve ekranların xy-düzlemindeki geometrik yerleşimi.	46
Şekil 4.3	Üç fazlı yer altı kabloları ve ekrandan oluşan 2B SEY'in ağ yoğunluğuna ilişkin bir örnek.	48
Şekil 4.4	Ferromanyetik malzemelerinin manyetik özellikleri a- bağlı manyetik geçirgenliğin manyetik akı yoğunluğuna göre değişimi b- BH düzleminde histerisiz çevrimleri.	49
Şekil 4.5	2B SEY modelinin dilimlerden oluşmuş parçalar şeklinde modellenmesi.	50
Şekil 4.6	Devre modelinin prensip şemasına ilişkin temsili gösterim.	51
Şekil 4.7	Akım enjekteli 2B SEY için elektrik eşdeğer devre modeli.	52
Şekil 4.8	Kablolar arası uzaklığa göre (a) düz yerleştirme düzeni (b) üçgen yerleştirme düzeni durumunda x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun dağılımı.	55
Şekil 4.9	Ekransız durumda toprak yüzeyinden farklı yüksekliklerde x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun değişimi.	56
Şekil 4.10	Düz yerleşimli güç kablolarının DX52 malzemesiyle ekranlanması durumunda manyetik alanın herhangi bir andaki dağılımı.	59
Şekil 4.11	Üçgen yerleşimli güç kablolarının DX52 malzemesiyle ekranlanması durumunda manyetik alanın herhangi bir andaki dağılımı.	60
Şekil 4.12	Ekranlama ölçekleme parametresine bağlı farklı ekranlardaki ekranlama faktörünün değişimi.	61
Şekil 4.13	Farklı ekran malzemelerinde, ekranlama faktörünün akımın genliğiyle değişimi.	63
Şekil 4.14	Farklı ekran malzemelerinde, ekranlama faktörünün ekran kalınlığıyla değişimi.	63
Şekil 5.1	Deney düzeneğine ait bir fotoğraf.	66
Şekil 5.2	Üzeri düz plakayla örtülü U-biçimli oluk ekranın xyz-düzlem koordinatlarıyla gösterimi.	66
Şekil 5.3	Deneyisel düzenekte kullanılan busbar ve ekranların xy-düzlemindeki geometrik gösterimi.	68
Şekil 5.4	Farklı ekran yapıları için manyetik akı yoğunluğunun değişimi ($y = 1 \text{ m}$, $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 500 \text{ A rms}$).	69
Şekil 5.5	Ekranın hemen üzerinde manyetik akı yoğunluğunun z-ekseni boyunca değişimi ($y = 0,28 \text{ m}$, $x = 0 \text{ m}$, $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 500 \text{ A rms}$).	70
Şekil 5.6	İyi ve kötü kontak R_c durumları için x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun değişimi ($y = 0,5 \text{ m}$, $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 500 \text{ A rms}$).	70
Şekil 5.7	(a) Busbarların yerleşim düzeni düz, (b) busbarların yerleşim düzeni üçgen olması durumunda hesaplanan ve ölçülen manyetik akı yoğunluğunun x-ekseni boyunca dağılımı ($H_d = 1 \text{ m}$, $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 750 \text{ A rms}$).	72
Şekil 5.8	DX52 ekran ile yapılan ekranlamada akımın genliğiyle manyetik akı yoğunluğunun değişimi [koordinatlar; Nokta1 (0; 1), Nokta2 (0,5; 1) ve Nokta3 (1; 1)].	73

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Elektriksel ev aletleri ve tipik manyetik alan değerleri (Sevgi, 2005).	8
Çizelge 2.2 ICNIRP'a göre maruz kalınabilecek şebeke frekanslı elektrik ve manyetik alan sınır değerleri (ICNIRP, 1998).	11
Çizelge 3.1 Oluşturulan YSA'da kullanılan dört farklı eğitim algoritmalarının performans karşılaştırması.	35
Çizelge 3.2 Giriş değişkenlerine karşı ölçülen ve üç farklı hesaplama yönteminden elde edilen ekranlama faktörü sonuçlarının karşılaştırılması.	37
Çizelge 3.3 AY, SEY ve YSA yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması.	39
Çizelge 4.1 Yer altı kablolarının benzetimde manyetik ekranlamaya ait parametre ve büyüklükler.	54
Çizelge 4.2 Ekran malzemesinin türüne ve kabloların yerleştirilme düzenine göre ekranlama performansının karşılaştırılması.	59
Çizelge 5.1 Deneysel sisteme ait parametre ve büyüklükler.	67

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgisi ve katkıları ile destek olan çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Nurettin UMURKAN'a, çalışmalarımın Belçika'da yürütülen kısmından yakın ilgisi ve desteğini gördüğüm Dr. Peter SERGEANT'a, çoğu kez görüş ve önerilerine başvurduğum İTÜ öğretim üyesi sayın Prof Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, Anabilim Dalı Başkanımız çok kıymetli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR'a ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan ve beni yetiştiren aileme, destek ve yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma ve özellikle anlayışından dolayı sevgili eşime teşekkür etmek isterim.

Kasım, 2010

Selim KÖROĞLU

ÖZET

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE MANYETİK ALAN EKRANLANMASININ İNCELENMESİ

Selim KÖROĞLU

Elektrik Mühendisliği, Doktora Tezi

Kamu ve endüstriyel alanlarda, aşırı düşük frekanlı (ELF) güç sistemleri tarafından üretilen manyetik alanların azaltılması güncel bir problemdir. Ana ELF manyetik alan kaynaklarına güç kabloları, güç iletim hatları, şalt sahaları, trafo merkezleri vb. örnek olarak verilebilir. Özellikle yer altı yüksek gerilim kablolarının ekranlaması son zamanlarda büyük dikkat çekmektedir. Manyetik alanlar, duyarlı elektrik ve elektronik cihazların çalışmaları üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Bunlardan en bilineni manyetik alan seviyesi $0,5-1 \mu T$ olması durumunda TV, bilgisayar, elektron mikroskobu gibi tüplü monitorlar üzerinde titreşim etkisi yapmasıdır. Son zamanlarda, bu alanların insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaptığı konusunda kaygılar vardır. Sonuç olarak, manyetik alanların cihazlar ve insan sağlığını üzerindeki sınır değerler belirlenmeli ve gerekli ise manyetik ekranlama yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasında, iki ana manyetik alan problemi üzerinde çalışılmıştır. Birinci olarak, düzgün dağılımlı bir manyetik alan içerisinde kalan, silindirik ferromanyetik (Fe-Si) ekran için ekranlama verimliliğinin hesabı analitik, sonlu elemanlar ve yapay sinir ağları gibi üç farklı yöntem kullanılarak yapılmıştır. Yöntemlerin hepsinde ekranın doğrusal olmayan histerisiz etkisi dikkate alınmıştır. Yöntemlerin performansı birbiriyle ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar farklı ekran yarıçapı, kalınlığı, uygulanan alanın genliği ve frekansa bağlı birçok durum için yapılmıştır. İkinci olarak, yer altı yüksek gerilim kablolarının ekranlanmasında çeşitli ekran malzemelerin ekranlama verimliliği incelenmiştir. U-biçimli oluk ekran içerisine yerleştirilmiş kabloların üzeri düz bir ekranla kapatılmış kablo yerleşimi üçgen ve düz olması durumunda incelemeler yapılmıştır. Ekranlama verimliliği, aynı geometri için alüminyum ve iki adet ferromanyetik ekran için incelenmiştir. Hesaplama sonuçları ölçümlerle doğrulanmıştır. Ayrıca, kontak direncinin ekranlama üzerindeki etkisi incelenmiş, kontak direnci etkisini dikkate alan sonlu elemanları kullanılan bir devre yöntemi önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Manyetik ekranlama, sonlu elemanlar yöntemi, analitik yöntem, yapay sinir ağları, devre yöntemi, kontak direnci, yer altı yüksek gerilim kabloları.

ABSTRACT

INVESTIGATING MAGNETIC FIELD SHIELDING IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Selim KÖROĞLU

Electrical Engineering, Ph.D Thesis

An extremely low frequency (ELF) magnetic field produced by electric systems in public areas or in industrial environments is an actual problem. Power distribution systems, power cables, power transmission lines, switchyards, substations, industrial and transformer centres can be given as examples for the main ELF sources. Especially, buried high voltage (HV) cables draw great attention recently. Power frequency magnetic fields higher than 0.5-1 μT are known to produce interference with electron beam devices such as TV, computer monitors and electron microscopes. Moreover, magnetic fields cause a considerable disturbance of the operation and accuracy of sensitive electrical and electronic equipment. Nowadays, there are also concerns about the effects of these magnetic fields on human health. Consequently, a shielding system is necessary to keep field magnitude values lower than the limits related to human health and disturbances on electromagnetic devices.

In this thesis, two main magnetic shielding problems are studied. First, three types of methods, i.e. an analytical method, a finite element method and a neural network method, are presented to calculate the shielding performance of a cylindrical ferromagnetic (Fe-Si) shield in a transverse magnetic field. Nonlinear hysteretic behaviour in the shield is taken into account by the methods. All of the methods are compared with each other and with measurements: the shielding factor is computed and measured for several shield radii, thicknesses, field amplitudes and frequencies. Secondly, shielding efficiency of several materials for a buried three phase high voltage cable is studied. The shields are U-shaped gutters covered with plates, and the power cables are positioned either in trefoil or in flat configuration. The shielding efficiency are compared for shields with the same geometry but consisted of different materials: aluminium and two ferromagnetic steel grades. The validity of the numerical results is verified experimentally on the shielding setup. In addition, a circuit method combining the 2D FEM with an electric circuit, which also takes into account contact resistance effect in the shield, has been proposed.

Keywords: Magnetic shielding, finite element method, analytical method, neural network method, circuit method, contact resistance, underground high voltage cables.

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler ve toplumdaki modernleşmeye bağlı olarak elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi aşamasında birçok düzenek, aygıt ve cihazlar kullanılmaktadır. İletim ve dağıtım hatlarında yüksek akım taşıyan kablolar, transformatörler, günlük yaşantıda kullanılan elektrik-elektronik aygıtların birçoğu etraflarında bir manyetik alanın oluşmasına neden olabilmektedir. Tüm bu elektromanyetik alan (EMA) kaynaklarının neden olduğu istenmeyen manyetik alanlar yüksek seviyelerde olabilir. Bu alan seviyeleri hassas elektrik-elektronik cihazların çalışmasını olumsuz yönde etkileyebildiği gibi insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu yönünde, araştırma sonuçları ve kaygılar bulunmaktadır. Bazı organizasyon ve kuruluşlar elektrik ve manyetik alan seviyeleri için sınır değerler belirlemiştir.

EMA kaynakların neden olduğu istenmeyen alan seviyelerini azaltmak için manyetik ekranlama teknikleri kullanılır. En çok kullanılan tekniklerde biriside pasif ekranlamadır. Ekranlama, manyetik alana neden olan kaynağı veya etkilenen duyarlı cihazı manyetik alandan yalıtımlar olarak tanımlanır. Bu amaç için manyetik alan kaynağı ve ekranlanacak bölge arasına uygun özellikli malzemeler yerleştirilir. Ekran olarak ferromanyetik ve/veya yüksek iletkenlikli malzemeler kullanılır. Ekranlama performansı, ekran malzemesinin türü, ekran kalınlığı, frekans, kaynaktan olan uzaklık vb. parametrelere bağlıdır.

Manyetik alan ekranlama problemlerin incelenmesi ve çözümü için literatürde birçok yöntem mevcuttur. Bu inceleme yöntemlerini genel manada analitik, yaklaşık, sayısal ve deneysel yöntemler olarak sınıflandırabilir. Analitik yöntemler uygun sınır koşullarında Maxwell denklemlerinin çözümüyle mümkün olmaktadır. Problemin analitik çözümünün varlığı durumunda sistemin bütün performansı sistem denklemi yardımıyla verilmesinden dolayı kullanışlı bir yöntemdir. Ancak, bu yöntem genellikle basit ekran geometrileri ve karmaşık olmayan sınır koşullarında geçerli bir çözümdür. Karmaşık sınır koşullarında ve karmaşık geometrilerde analitik yöntemlerle çözüm bulmak oldukça zor ve hatta bazı durumlarda imkansız olabilmektedir. Bu nedenle problemin çözümünde yaklaşık yöntemlerden veya sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal yöntemlerden yararlanılır.

EMA alanların ekranlaması konusundaki çalışmalar 70-80 yıl öncelerine dayanmaktadır. Aşırı düşük frekanslı (ELF) manyetik ekranlama çalışmalarının öncülerinden olan Levy sonsuz genişlikte ince düz ekranlar için ekranlama etkinliği ile ilgili çalışmalarını rapor etmiştir (Levy, 1936). Schelkunoff, manyetik ekranlamasıyla ilgili çalışmalarında iletim hattı yaklaşımı (Transmission Line Approach) yöntemini kullanmıştır. Hareket eden manyetik

dalganın bir kısmı ekrandan geri yansır, bir kısmı ekran tarafından yutulur ve bir miktarı ekrandan geçerek zayıflar (Schelkunoff, 1938; Schelkunoff, 1943). Bu teori için pratik ekranlama ifadeleri verilmiştir (Schulz vd., 1988). Ekran genişliğinin sonsuz, malzeme özelliklerinin sabit olduğu varsayımı altında çok katmanlı düzlemsel ekran modelleri için 2-boyutlu analitik bir analiz yapılmıştır. Birçok ekranlama parametresinin (ekran kalınlığı, ekranın kaynağa olan uzaklığı, ekranla gözlem noktası mesafenin etkisi, malzemenin elektriksel iletkenliği, manyetik geçirgenliği vb.) ekranlama etkinliği üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur (Du ve Burnett, 1996).

Hasselgren ve Luomi (1995) tarafından yapılan çalışmada, manyetik ekranlama etkinliği kapalı ve açık ekran yapıları için incelemiştir. Basit ekran geometrileri için analitik yöntemle çözüm yapılmıştır. Buna karşın, karmaşık yapıli geometrilerde sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapılmıştır. Ekran malzemesi olarak yüksek iletkenlikli ve ferromanyetik malzemeler kullanılmıştır. Ferromanyetik malzemeyle yapılan ekranlamada, ekran geometrisin küçük ve kaynağı saracak şekilde olması durumunda daha iyi sonuçlar alındığını göstermiştir. Aynı zamanda, açık ekranlama yapılması durumdaysa kaynağı yakın yerlerde daha yüksek ekranlama sağlandığını gözlenmiştir. Yüksek iletkenlikli malzemeyle yapılan ekranlamada ise geniş boyutlu ekranların kullanılmasının daha uygun omaktadır. Ekranın alan kaynağına çok yakın olması durumunda ise ekranlama etkinliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Elde edilen sayısal hesaplama ve analitik sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Hoburg (1995) çalışmasında, kuasistatik manyetik ekranlamanın temel prensiplerini, silindirik ve küresel ekranlama için açıklamıştır. Manyetik alan kaynağı dışarıda ekranlı bölge içeride veya alan kaynağı içeride ekranlı bölge dışarıda olacak şekilde, temel iki ekranlama mekanizması incelemiştir. Yüksek iletkenlikli malzeme ile yüksek manyetik geçirgenlikli malzemenin bir arada kullanılmasının ekranlama etkinliğini artırdığı göstermiştir.

Literatürde manyetik ekranlama probleminin çözümünde birçok teknik önerilmiştir. ELF manyetik alan ekranlama probleminin çözümünde moment yöntemini önermiştir (Tekin ve Newman, 1996). İntegral yöntemini kullanarak bir hesaplama tekniğı geliştirmiştir (Guarnieri vd., 2005). Tek ve çift katmalı sonsuz genişlikteki düz ekranların ekranlama etkinliği hesabı için yaklaşık çözüm yapan basit bir teknik geliştirmiştir (Olsen vd., 2003). Sonlu genişlikteki mükemmel olmayan malzeme özelliklerine sahip düzlemsel ekranlar için basit hibrit bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, mükemmel olmayan sonlu ekrandaki kaçak manyetik alanları ve dalma derinliğı dikkate almaktadır (Istencic ve Olsen, 2004).

Güç frekanslı sistemlerin silindirik ekranla ekranlanması üzerine bir çalışmada, malzemenin

elektiriksel ve manyetik özelliklerinin sabit olduğu kabul edilmiş, manyetik alan kaynağının da içeride olduğu durum dikkate alınmıştır. Bu şartlar altında, tek katmanlı silindirik ekranlamanın hesabı için basitleştirilmiş formüller önerilmiştir (Du ve Burnett, 1996).

ELF manyetik alanların azaltması için farklı ferromanyetik malzemelerin performans analizi yapılmıştır. Tane yönlendirmeli (grain-oriented) malzemenin diğerlerine göre daha etkin bir ekranlama sağladığını ortaya koyulmuştur. Yapılan benzetimler deneysel ölçümlere doğrulamıştır (Bottauscio vd. , 2000).

Canova vd. (2002)  alışmalarında, ekranlama etkinliğini ferromanyetik (yüksek manyetik geçirgenlikli) ve ferromanyetik olmayan (yüksek iletkenlikli) ekran malzemeleri için farklı analitik yöntemlerle incelemiştir. Ekran geometrisi ve fiziksel parametrelerin ekranlama üzerindeki etkileri ortaya koymuştur.

Havai güç hatları tarafından oluşturulan alanları azaltmak için pasif iletken döngülerden oluşan bobinlerin kullanılması önerilmiştir (Memari ve Janischewskyj, 1996). Cruz vd. (2003) tarafından yapılan araştırmada ise havai g   hatlarının meydana getirdiği manyetik alanları azaltmak için pasif ekran döngülerinin optimum yerleştirilmesi üzerine bir araştırma yapılmıştır.

Bilindiği gibi transformatör merkezlerinde, trafonun ve yüksek akımlı baraların neden olduğu manyetik alanlar yüksek seviyelerde olabilmektedir. Trafo merkezine yakın yerlerdeki insanlar ve elektronik donanımlar bu alanlara maruz kalabilir. Büyük güçlü trafıo merkezinin ekranlanması ile ilgili bir çalışmada, kaynak ve ekranlanacak bölge arasında sonlu düz ekran kullanmışlar ve 3 ile 30 kat arasında bir ekranlama sağlanmıştır (Hartal vd., 2005).

G   sistem hatlarında manyetik alan azaltması için Kalhor ve R. Zunoubi (2005) tarafından yapılan çalışmada, faz kablolarının yerleştirme ve diziliş biçimlerinin oluşan alan seviyesi etkisini ortaya konulmuştur. Ayrıca, ekranlama etkinliğinin hesabı için basit bir teknik geliştirilmiştir. Bu tekniğin doğruluğu literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Elektrik enerjisinin t keticiciye ulaştırılması yüksek, orta ve düşük gerilim hatları kullanılarak gerçekleşmektedir. Yerleşim yerlerindeki nüfusun artması ve şehirlerdeki modernleşmeye bağlı olarak enerji iletiminde yer altı kablolarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu akım taşıyan kablolar yakın bölgelerde yüksek seviyeli alanlar oluşurmaktadır. Yer altı kablolarının yerleşim bölgelerine ve çalışma ortamlarına yakınlığı göz önüne alınarak manyetik alan hesapları yapılmalıdır. Alan seviyesinin düşürülmesi gerekli olduğu durumlarda en etkin çözüm yollarından birisi manyetik ekranlamaya başvurulmalıdır. Buna bağlı olarak son yıllarda yer altı kablolarının dış ortama yaydıkları alan seviyesinin

azaltılması üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Literatürde, bu konuyla ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Xu X.-B. ve Liu (2002) tarafından yapılan çalışmada, çelik boru içerisine yerleştirilmiş üç fazlı kabloların neden olduğu manyetik alan seviyelerinin akım dengesizliği ile olan ilişkisi incelenmiştir. Hesaplamalarında sayısal bir yöntem olan sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Elde ettikleri sonuçlar göstermiş ki boru içerisine yerleştirilmiş kabloların ürettiği oldukları manyetik alan, boru üzerinden dönen akımın sıfır bileşeniyle ilgilidir. Akımın sıfır bileşeni (zero-sequence current) manyetik alan seviyesini önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Yüksek gerilim yer altı kablolarının ekranlaması ilgili bir çalışmada, yüksek iletkenlikli düzlemsel ekranlar arasında oluşan kontak direncinin ekranlama performansına olan etkisi incelenmiştir. Ekranların yerleştirilmesinde ekranlar arası elektriksel kontak direncinin kötü olması durumunda ekranlama performansının düştüğü görülmüştür (Sergeant vd., 2008).

Koroglu vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yer altı kablolarının ekranlanması problemi ferromanyetik bir ekranla kapalı formda gerçekleştirilmiştir. Böyle bir sistemde, ekranlar arası oluşan kontak direncinin iyi veya kötü olması durumunun ekranlamaya olan etkisi araştırılmıştır. Bu topoloji için, eğer ekran boyu ekran uzunluğuna göre yeterince uzun ise ekranlar arası kontak direncinin ekranlama performansını çok fazla etkilemediği sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışmasını içindikiler bakımından birinci giriş bölümü dahil olmak üzere toplam altı bölümden oluşmaktadır ve geri kalan bölümlerin kapsamı şu şekildedir.

İkinci bölümde, manyetik alan kaynakları, olumsuz etkileri, sınır değerler, manyetik ekranlama kavramı, sınıflandırılması ve ekran malzemelerinin elektromanyetik özellikleri açıklanmış; manyetik ekranlama malzemelerinin elektriksel iletkenliği ve manyetik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili tez kapsamındaki uygulama ve çalışmalar sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, düzgün dağılımlı bir manyetik alan içinde kalan bir bölgenin ekranlaması probleminde silindirselsel bir manyetik ekranın ekranlama etkinliği, sonlu elemanlar yöntemi, analitik yöntem ve yapay sinir ağları yöntemiyle hesaplanmıştır. Hesaplamalar literatürde var olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu üç yöntemin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur.

Dördüncü bölümde, yer altı kabloları tarafından oluşan manyetik alan hesaplamaları için benzetim ve modelleme yöntemleri açıklanmıştır. Benzetim çalışmaları, ekranlı ve ekransız

durum için gerçekleştirilmiştir. Ekransız durumda; kabloların yerleşim düzenin, kablolar arası mesafe ve manyetik alan kaynağına olan uzaklık parametrelerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Ekranlı durumda ise; U-biçimli bir ekran kanalı çerisine yerleştirilmiş güç kabloların üzeri düz plakayla örtülen bir ekranlama sistemin benzetim modellemeleri yapılmıştır. İncelemelerde ekran malzemesinin türü, kalınlığı ve kablolardan akan akım değeri değişken olarak alınmış, ekranlamaya etkileri araştırılmıştır.

Beşinci bölümde, yer altı kabloların ekranlanmasında kullanılacak deney düzeneği tanıtılmıştır. Hesaplama sonuçlarını doğrulamak için ölçümlerden elde edilen sonuçlar, benzetim ve modelleme yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ekranların uç uca eklenmesinde, ekranlar arası oluşan kontak direncinin ekranlama verimliliğine olan etkisi incelenmiştir. Kontak direncinin etkisini dikkate almak için önerilen sonlu elemanlar yöntemli devre yönteminin sonuçları gösterilmiştir.

Altıncı bölümde, çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tartışma ve gelecekte konuyla ilgili yapılması gereken çalışmalar ve öneriler sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında, iki önemli manyetik alan ekranlama problemi üzerinde çalışılmıştır. Birinci problemde, düzgün dağılımlı bir manyetik alana maruz kalan bir bölgenin ekranlanması için silindirik yapılı (Fe-Si) ekran kullanılmıştır. Ekranlama etkinliği analitik, sonlu elemanlar ve geliştirilen yapay sinir ağları gibi üç farklı yöntem kullanarak hesaplanmıştır. Yapay sinir ağları yöntemi bu problem için ilk kez uygulanmıştır. Kullanılan bu üç yöntem, hesaplamalarında ekran malzemesinin doğrusal olmayan etkilerini dikkate almaktadır. Farklı çözümleme tekniğine sahip bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur. Ayrıca, ekranlama etkinliğini etkileyen parametrelerden ekran yarıçapı, ekran kalınlığı, uygulanan alanın genliği ve frekansa bağlı detaylı incelemeler yapılmıştır.

İkinci olarak, son yıllarda önemi bir ekranlama problemi olan yüksek gerilim kablolarının ekranlanması üzerine benzetim, modelleme ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ekranlama sistemi, U-biçimli oluk ekran içerisine yerleştirilmiş kabloların üzeri düz bir ekranla kapatılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Üç farklı ekran (alüminyum, Magnetil, DX52) malzemelerin ekranlama verimliliği benzetim çalışmaları yardımıyla incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kablo yerleşim düzeni (üçgen, düz), akım genliği, ekran kalınlığı ve ekran boyutlarının ekranlama performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Son olarak yapılan benzetim ve hesaplamaların doğrulanması için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Uzun bir kablo hattı boyu gerçekleştirilen ekranlamada ekranların uç uca eklenmesi gerekmektedir. Bu durumda, bir biri

üzerine eklenen ekranların temas noktalarında elektriksel olarak bir kontak direnci oluşmaktadır. Bu kontak direncinin iyi ve kötü olması durumunun ekranlama etkiliğine olan etkisi araştırılmıştır. Normalde, ekranlar arasında oluşan kontak direnci üç boyutlu sonlu elemanlarla çözümlenebilir bir problemidir. Fakat bu tür manyetik alan problemlerinin üç boyutlu sonlu elemanlarla çözümü oldukça zaman almaktadır. Aynı zamanda güçlü bilgisayar donanımına ve hafızaya ihtiyaç duyulur. Bu tez çalışmasında, kontak direnci etkisini dikkate alan iki boyutlu sonlu elamanlar yöntemiyle birlikte kullanılan bir devre yöntemi geliştirilmiştir. İncelenen problemde, geliştirilen bu yeni yöntem problemin üçüncü boyutu olan kontak direncinin etkisi dikkate alabilmektedir. Böylelikle, problemin iki boyutlu sonlu elamanların avantajlarıyla çözülebilmektedir.

2. MANYETİK EKLANLAMA

Uzun yıllardan beri şebeke frekanslı sistemlerde manyetik alanların ekranlanması konusunda incelemeler devam etmektedir. Ekranlama, manyetik alana neden olan kaynağı veya etkilenen duyarlı cihazı manyetik alandan izole etmek olarak tanımlanır. Bu amaç için manyetik alan kaynağı ve ekranlanacak bölge arasına ekran malzemesi yerleştirilir. Ekran olarak, yüksek manyetik geçirgenlikli veya yüksek elektriksel iletkenlikli malzemeler kullanılır. Ekranlama performansı kullanılan ekran malzemelerinin türü, ekran kalınlığı, alan kaynağın yönlenmesi, frekans, gözlem noktası olan uzaklık gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Bu bölümde; güç frekanslı manyetik alan kaynakları, onların olumsuz etkileri, genel manyetik ekranlama yapı ve topolojileri, kullanılan ekran malzemeleri üzerine temel bilgiler verilmiştir. Ayrıca bu tez kapsamında kullanılan malzemelerin elektriksel ve manyetik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler açıklanmış ve deneysel çalışmalar açıklanmıştır.

2.1 Başlıca Manyetik Alan Kaynakları

Elektrik enerjisi, üretiminden dağıtımına kadar birçok aşamalardan geçer ve son noktada tüketiciye ulaşır. Tüm bu aşamalarda, elektrik akımının varlığı yakın çevresinde az veya çok bir manyetik alan oluşmasına neden olur. Oluşan bu alan seviyeleri ve onların değerlendirilmesi, manyetik ekranlama stratejisi açısından önemlidir. Başlıca manyetik alan kaynakları;

- Enerji iletim ve dağıtım hatları
- Şalt sahaları
- Trafo merkezleri
- Yüksek akım taşıyan kablo ve baralar
- Elektrik motorları
- Elektriksel ev aletleri
- İndüksiyon ısıtma sistemleri
- Yer altı güç kabloları vb.

şeklinde sıralanabilir.

Gelişen teknolojilerle birlikte günlük yaşantıda 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

manyetik alan seviyelerinin büyümesine neden olmaktadır. Bu nedenlerle ev, ofis vb. yerleşim yerlerinde elektrik altyapının tesisinde oluşacak manyetik alan seviyelerinde değerlendirilmesi de önemli olacaktır. Evlerde kullanılan elektriksel ev aletleri manyetik alanlara neden olabilmektedir. Elektriksel ev aletleri ve onların yakın çevrelerinde oluşturdukları manyetik alan değerleri miligauss (1 miligauss = 0,1 mikrottesla) cinsinden Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Elektriksel ev aletleri ve tipik manyetik alan değerleri (Sevgi, 2005).

Cihaz/Uzaklık	d = 10 cm	d = 30 cm	d > 1 m
Elektrik süpürgesi	300-400	30-50	3-5
Ütü	5-10	1	0,5
Çamaşır makinesi	20-30	3-5	1
Saç kurutma makinesi	400	10	1
Elektrikli tıraş makinesi	200	5	0,5
Mikser	70-200	5-10	0,5
Kahve makinesi	3-5	0,5	0,5
Bulaşık makinesi	20-40	5-10	0,5-1
Elektrik fırını	5-10	0,5	0,5
Tost makinesi	5-10	0,5	0,5
Buzdolabı	5-10	1	0,5
Müzik seti	3-5	1	0,5
Renkli TV	3-5	1	0,5
Digital saat	2-3	1	0,5
Klima	100	3-5	0,5
Fotokopi makinesi	80-150	10-30	1-3

Literatürde, şebeke frekanslı manyetik kaynaklarının neden olduğu alanları hesaplanması, değerlendirilmesi ve istenmeyen bu alanların azaltılması üzerine birçok araştırma mevcuttur ve bazıları aşağıda verilmiştir.

Umurkan (1995) tarafından yapılan tez çalışmasında, enerji iletim hatlarında elektrik ve manyetik alan hesaplamaları için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu program gerçek sistemlerde farklı gerilim seviyeleri, çeşitli faz konfigürasyonları için iki ve üç boyutlu alan hesapları yapmaktadır. Elde edilen sonuçların elektrik ve manyetik alan sınır değerlerine göre değerlendirilmesi yapılmıştır.

Özen (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, tipik bir 380/154kV trafo merkezinde, çalışanların maruz kaldığı manyetik alan seviyelerinin belirlenmesi amacıyla manyetik alan şiddetleri ölçmüştür. Kontrol ve ölçme merkezinde operatör masasında, manyetik alan seviyelerinin 0,5 – 0,8 μ T aralığında değiştiği gözlenmiştir. 380/154kV şalt sahası içerisinde açık alanda normal yük şartlarında ölçülen manyetik alanın en büyük değerini 20 μ T, orta gerilim hücrelerinin bulunduğu bina içerisinde ise 63 μ T olarak ölçülmüştür. Yerleşim birimlerinden geçen 380 kV ve 154 kV hatlar için yapılan ölçümlere göre direkler arası sehim bölgelerinde ölçülen manyetik alan değerleri direk bölgelerine göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Örneğin 154 kV hatta direk altında manyetik alan değeri 3 μ T iken bu değer sehim bölgesinde 4,5 μ T'ya yükselmektedir. Elde edilen sonuçlar, güvenlik limitleri ve bu konuda sürdürülen son çalışmaların ışığında değerlendirmiştir.

Yüksek güçlü transformatörler etraflarında bir manyetik alan oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle düşük gerilim tarafına bağlı kablo ve baralardan yüksek akımlar geçmektedir. Öyle ki, bu alanlar izin verilen sınır değerler üzerine bile çıkabilmektedir. Yüksek güçlü bir transformatör ve onun düşük gerilim tarafındaki kabloların ürettikleri manyetik alan seviyeleri ve bu alanların azaltılması üzerine bir çalışma yapılmıştır (Hartal vd., 2005).

Bunların yanında son yıllarda özellikle yoğun nüfuslu yerleşim yerleri ve şehir merkezlerinde enerji iletimi ve dağıtımında yer altı kablolarının kullanımı artarak devam etmektedir. Tüm akım taşıyan elamanlar gibi bu kablolarda yakın çevrelerinde bir manyetik alan oluşumuna neden olmaktadır. Habiballah vd. (1998) tarafından yapılmış olan çalışmada, yer altı kablolarının dış ortamda neden oldukları manyetik alan seviyelerinin kabloların yerleşim düzeniyle olan ilişkisini incelenmiştir. Bu amaç için tekli, ikili, üçlü ve dörtlü üç fazlı kabloların yerleştirilme düzeninin, manyetik alan seviyesine olan etkisini birçok kombinasyona göre hesaplamıştır. Üç fazlı kabloların yerleştirilme düzeninin alan seviyesi

üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ortaya koymuştur. Böylece, üç fazlı çoklu kabloların yerleştirilme düzeninde yapılacak düzenlemeyle alan seviyesinin düşürüldüğünü göstermiştir.

2.2 Güç Frekanslı Manyetik Alanların Olumsuz Etkileri ve Maruz Kalmanın Değerlendirilmesi

Endüstriyelleşme ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak, tüm frekanslarda elektromanyetik alanlar ortaya çıkmaktadır. Bu manyetik alanlar elektronik cihazların çalışmasını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bazı bilim adamları ve araştırmacılar manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri konusunda görüş ayrılığına düşmesine rağmen literatürde manyetik alanların olumsuz etkilerini ortaya koyan birçok araştırma sonuçları mevcuttur.

Yüksek manyetik alanlar hassas elektronik cihazlarda bozucu etkiye neden olmaktadır. Alan seviyesinin genellikle 0,5-1 μT 'yı geçmesi durumunda tüplü monitörlerde parazit ve titreme gibi sorunlar meydana gelmektedir (Sandström vd., 1993; Banfai vd, 2000). İstenmeyen manyetik alanlar ölçme cihazları hatalı değerler göstermesine, hassas üretim cihazları ve tezgahların çalışmaları etkilemesine ve üretilen ürünlerde kalite düşmesine neden olabilmektedir. 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.

Son zamanlarda, özellikle şebeke frekanslı (50 Hz) manyetik alanların insan sağlığı üzerinde olan olumsuz etkilerine ilişkin de birçok araştırma öne çıkmaktadır. Coleman vd. (1989) yaptıkları çalışmaya göre, enerji hatlarına 50 m ve daha az mesafede yaşayan yetişkin insanlarda leukemia riskinin 50 ile 100 m arası mesafede yaşayan insanlara göre daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Ölüm oranları ve manyetik alana maruz kalma arasındaki ilişkiye yönelik bir çalışma Savitz ve Loomis (1995) tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında, manyetik alana maruz kalma ve kanserden ölümler arasında zayıfta olsa bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Dawson vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada, güç frekanslı enerji hatlarından dolayı oluşan manyetik alanların kalp pilleri üzerine olan etkileşimini araştırmışlardır. Bu ve bunlara benzer çalışmalar, manyetik alanlarının insan sağlığı üzerinde olan olumsuz etkileri yönündeki kaygıyı her geçen gün artırmaktadır. Bu nedenlerle manyetik kaynaklar tarafından oluşan istenmeyen alanların azaltılması yönündeki çalışmalar sürerek devam edecektir.

Bazı organizasyon ve kuruluşlar, elektrik ve manyetik alan seviyeleri için sınır değerler belirlemektedir. Şebeke frekanslı sistemler için Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyondan

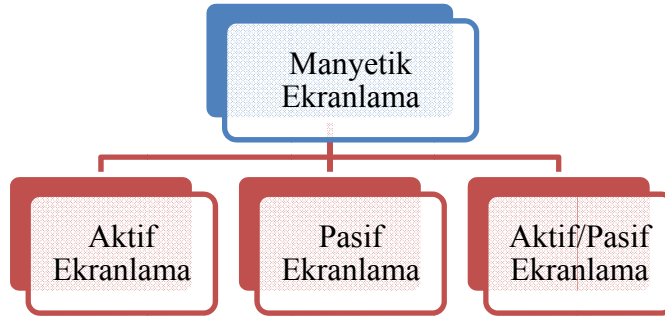
(Işımadan) Korunma Komisyonu (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)) tarafından yayımlanan sınır elektrik ve manyetik alan değerleri Çizelge 2.2’den de görüleceği gibi mesleki maruz kalma standardını 500 μT ve genel halk için ise 100 μT olarak kabul etmiştir. Ancak son zamanlarda sürdürülen çalışmalara göre özellikle genel halk ve çocuklar için enerji hatları çevresinde 0,4 μT ve üzerindeki manyetik alan değerlerinin leukemia riskini artırdığını göstermektedir. Hollanda da 0,4 μT değerinin temel standart alınması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Benzer yaklaşımlar diğer ülkelerde de sürmekte, güvenlik limitlerinin yeniden gözden geçirilmesi, elektromanyetik alanlara hassas gruplar (çocuklar ve hamileler vb.) için daha özel standart tanımlamalarının yapılması yönünde talepler gündeme gelmektedir (Özen, 2007; Ögel vd., 2010). Benzer şekilde, eğer manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri üzeri daha net ve kesin sonuçlara ulaşırsa maruz kalınan alan seviyelerinin yeniden belirlenmesi olasıdır. Her geçen günde bu alan seviyelerinin sınır değerleri değişecece benziyor. Hatta İtalya’nın bazı bölgelerinde hastane, okul gibi yoğun nüfusun yaşadığı yerlerde yeni düzenlemeler yapılmıştır. Bu bölgelerde yerel kanunlarla, uzun süreli maruz kalma durumu için sınır değeri 0,5 μT olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.2 ICNIRP’a göre maruz kalınabilecek şebeke frekanslı elektrik ve manyetik alan sınır değerleri (ICNIRP, 1998).

	Elektrik Alan Sınır Değeri	Manyetik Alan Sınır Değeri
Kamu Alanlarında	5 kV/m	100 μT
Endüstriyel Çevrelerde	10 kV/m	500 μT

2.3 Manyetik Ekranlama ve Sınıflandırılması

Manyetik ekranlama, ya gürültü kaynağını ya da alınan (hassas) cihazı manyetik ortamdan yalıtım olarak tanımlanabilir. Bu anlamda, ekranlanacak bölgeye göre iki tür ekranlamadan bahsedilir. Birincisi manyetik alana neden olan kaynağın ekranlanmasıdır. Kaynak tarafından oluşan manyetik alanın dış ortama yayılmaması veya azaltılması için yapılan ekranlamadır. Kaynak bölgesi içerisi, ekranlı bölge ise dışarısı olacak şekilde yapılan ekranlamadır. Buna yer altı kabloları için yapılan ekranlama örnek gösterilebilir. İkincisi ise alınan cihazın veya belirli bir yerin dış ortamdan gelen manyetik alana karşı muhafazasıdır. Yani kaynak dışarıda, ekranlı bölge içerisi olacak şekilde yapılan uygulamalardır. Örnek olarak hassas bir elektrik-elektronik cihaz veya laboratuvar ortamının manyetik alandan yalıtılmasıdır.



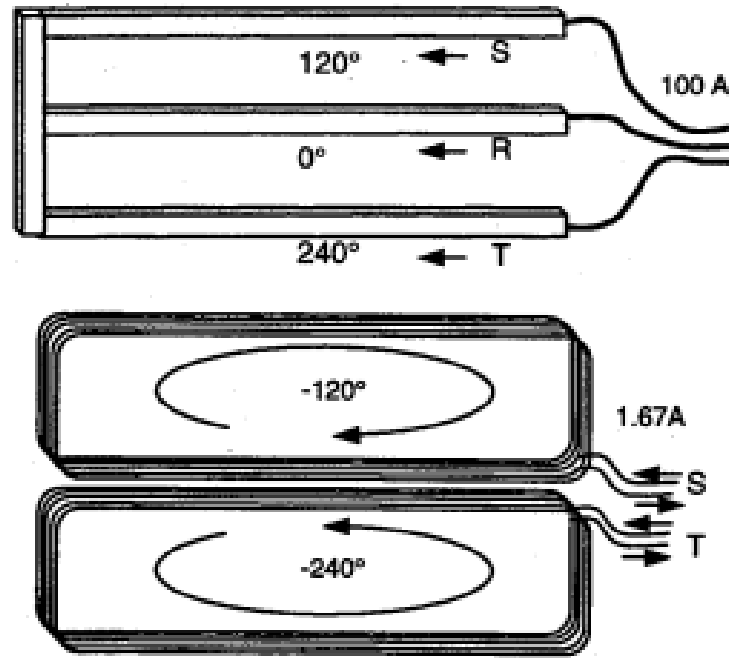
Şekil 2.1 Manyetik alan ekranlamanın sınıflandırılması.

Manyetik ekranlama, çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Genel olarak Şekil 2.1’de gösterildiği üzere aktif ekranlama, pasif ekranlama ve ikisinin birlikte kullanılması durumunda aktif/pasif ekranlama diye üç ana sınıfta gruplandırılır. Bu teknikler kullanılarak alan seviyeleri sınır değerlerin altına çekilebilir.

2.3.1 Aktif Ekranlama

Aktif ekranlama, manyetik alan kaynağına ters yönde bir manyetik alan oluşturarak alan seviyesini azaltmayı hedef alan bir uygulamadır. Bu amaç için bobinler kullanılır. Manyetik kaynaklar tarafından üretilen alana eşit genlikli, fakat ters yönlü bir alan oluşturularak yapılan alternatif bir azaltma tekniğidir. Bu ters yönlü alan, genellikle uygun tasarlanmış ve yerleştirilmiş bobinlere bir akım uygulanması ile elde edilir. Öyle ki, pasif ekranlamanın yapılmasının fiziksel olarak zor olması durumlarda tercih edilebilir. Dezavantajları ayrı bir beslemeye ihtiyaç duymalarıdır. Ayrıca sadece verilen akımın frekansında çalışır. Eğer sistemde harmoniki bileşenler varsa diğer frekanslardaki alan azaltması için etkili olamamaktadır.

Aktif ekranlamaya ilişkin yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Salinas, (2000) tarafından yapılan çalışmada, yüksek akım taşıyan baralar ve onların oluşturduğu alanı azaltmak için kullanılan sistemin prensip şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir. S, R ve T olarak isimlendirilmiş üç fazlı baralardan 100 A rms değerinde dengeli akımlar akmaktadır. Bu baraların oluşturduğu alanı azaltmak için Şekil 2.2’nin alt tarafında görülen azaltma bobinleri belli bir mesafe aralığında baraların üstüne yerleştirilmiştir. Bobinlerin sarım sayısı 60 olarak belirlenmiş ve üzerine uygulanacak akımın değeri de 1.67 A rms hesaplanmıştır. İki fazdan oluşan, uygun bir biçimde yapılandırılmış bobin fazlarının eşdeğer akımları $-S-T=-R$ olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu şekildeki bir aktif ekranlama düzenlemesiyle manyetik alan seviyesinin azaltıldığı gösterilmiştir.



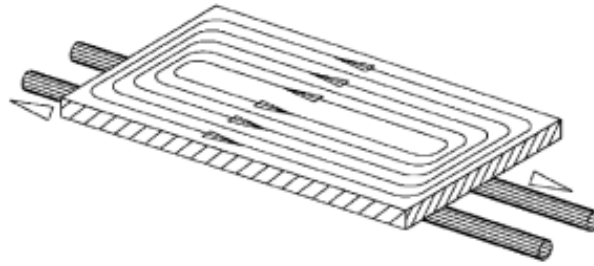
Şekil 2.2 Bara ve alan azaltma bobinlerinden oluşan aktif ekranlama (Salinas, 2000).

Ayrıca, Reta-Hernandez ve Karady (1998) tarafından çalışmada, iletim hattı altında bulunan kübik bir bölgenin ekranlaması için aktif ekranlama yapılmıştır. Aktif ekran birbirine dik olacak şekilde x , y ve z koordinatlarına yerleştirilmiş ve birbirinden bağımsız olarak beslenen bobinlerden oluşmaktadır. Burada amaç, kaynağın üretmiş olduğu alana ters yönde bir alan oluşturmaktır. Yapılan çalışmada, manyetik alan seviyesinde % 10 civarında bir azalma sağlanmıştır.

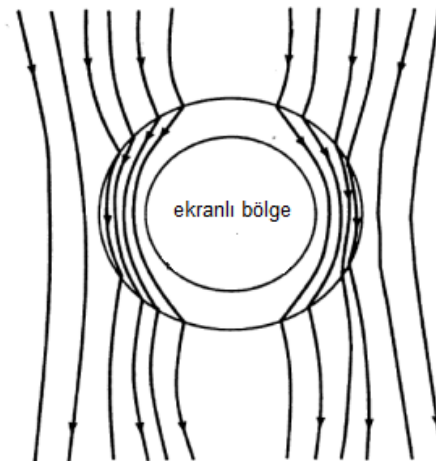
Geleneksel pasif ekranlama, özellikle geniş bir yüzeyin ekranlaması gerektiği durumlarda bazı zaman çok iyi bir çözüm olmayabilir. Kullanılan ekran malzemesinin fazlalığına bağlı olarak sistem maliyeti artacaktır. Bu durumlarda, alternatif tekniklerden birisi olan aktif bobinlerle ters yönlü alan oluşturarak manyetik kaynağın ürettiği toplam alan azaltılabilir. Yapılan bir çalışmada şebeke frekanslı manyetik alanların azaltılmasında aktif ekranlama tekniği kullanılmıştır. Bir bina içerisinde bulunan dağıtım transformatörünün neden olduğu toplam alanı azaltmak için aktif ekranlama sistemi tasarlanmıştır. Manyetik alanı azaltmak için uygun biçimde yerleştirilmiş kare şeklindeki bobinlerle maksimum % 60 civarında bir azalma sağlanmıştır (Bucella vd. 2002).

2.3.2 Pasif Ekranlama

Pasif ekranlama, elektromanyetik kaynakla etki noktası arasına uygun yapı ve özellikte malzemeler yerleştirilerek yapılan alan azaltma uygulamasıdır. Ekran tabakasının kaynakla ölçüm noktası arasına yerleştirilmesi, dış ortamdaki alanda bir azalmaya yol açacaktır. Genelde, bu amaç için yüksek iletkenli malzemeler (alimünyum, bakır) veya yüksek manyetik geçirgenlikli (ferromanyetik) malzemeler (demir, düşük karbonlu çelik, μ -metal) kullanılır. Yüksek iletkenlikli malzemelerde ekranlama prensibi girdap akımlarına dayanır. Yani manyetik alandan dolayı ekran malzemesi içerisinde “girdap akımı” oluşur. Bu akımlar kendini oluşturan alana zıt yönde olduklarından manyetik alan metal tarafından reddedilir. Metalin içinde düşük akı yoğunluğu oluşacak şekilde alan ekranın yüzeyine paralel şekillenmeye zorlanır. Metal bir malzemede içerisinde oluşan girdap akımlarının manyetik alan azaltılmasının prensip şemasını Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Metal bir malzemede oluşan girdap akımları ile ekranlama prensibi (López vd. 2000).



Şekil 2.4 Yüksek geçirgenlikli bir malzeme için akı yönlenmesi etkisiyle ekranlama prensibi (López vd. 2000).

Yüksek geçirgenlikli malzemelerin ekranlama prensibi ise “akı yönlenmesi” (“Flux shunting”) yoluyla olur. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip ferromanyetik malzemelerde akı metalin içine doğru, alana dik olarak ve çoğunlukla ekrandan geçmeden ekran içi boyunca şekillenir. Düzgün dağılımlı bir alan içerisine yerleştirilmiş silindirik bir ekranda manyetik ekranlama prensibini gösteren akı çizgilerinin değişimi Şekil 2.4’de gösterilmiştir.

Manyetik ekranlamada önemli kavramlardan biriside dalma derinliğidir. Elektromanyetik dalgaların iletken cisimlere nüfuz etmedikleri kabul edilse de mükemmel olmayan iletken cisimlere bir miktar nüfuz edebilirler. Elektromanyetik dalgalar iletken ortam içerisinde ilerledikçe genlikleri üstel olarak zayıflar. Elektromanyetik dalgaın genliğinin $1/e$ 'ye düştüğü derinlik *dalma derinliği* olarak adlandırılır. Dalma derinliği,

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (2.1)$$

eşittlik (2.1) ile ifade edilir. Burada f frekans, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, μ_r kullanılan malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği ve σ ise malzemenin elektriksel iletkenliğidir. Dalma derinliği, ekranlamada kullanılacak malzemenin belirlenmesinde ve ekran kalınlığının seçiminde önemli bir büyüklüktür. Örneğin fazla kalın olmayan yüksek iletkenlikli alüminyum, bakır vb. ekranlarda ekranlama etkinliği düşük frekanslarda çok iyi olamayacaktır. Fakat frekansın artmasıyla birlikte dalma derinliği düşecek ve ona bağlı olarak ekranlama etkinliği artacaktır.

Pasif ekranlama tekniği manyetik alan kaynaklarının ekranlanmasında oldukça yaygın ve etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Litaretürde konuyla ilgili yapılmış birkaç çalışma şunlardır. Kullanılan malzemelerin mükemmel iletken veya mükemmel manyetik geçirgenliğe sahip olması varsayımında, sonlu genişlikteki düzlemsel ekranlar için ekranlama etkinliğini incelenmiş ve kaynak yönlendirmesine fazla bağlı olmayan basit bir analitik model geliştirmiştir (Morone ve Olsen, 1977).

Önemli bir manyetik alan kaynağı olan güç kablolarının ekranlanması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Kaynak alanın pasif ekranlama tekniğiyle manyetik alan seviyesinin bazı durumlar için % 98 gibi oldukça etkin bir şekilde azaltılabileceğini gösterilmiştir. Ekranlama için iyi iletkenli ve iyi manyetik geçirgenlikli malzemelerin bir arada kullanılmasını önermişlerdir (Farag vd., 1999).

Enerji kalitesinde, elektromanyetik uyumluluk ve girişim problemleri önemli etkenlerden

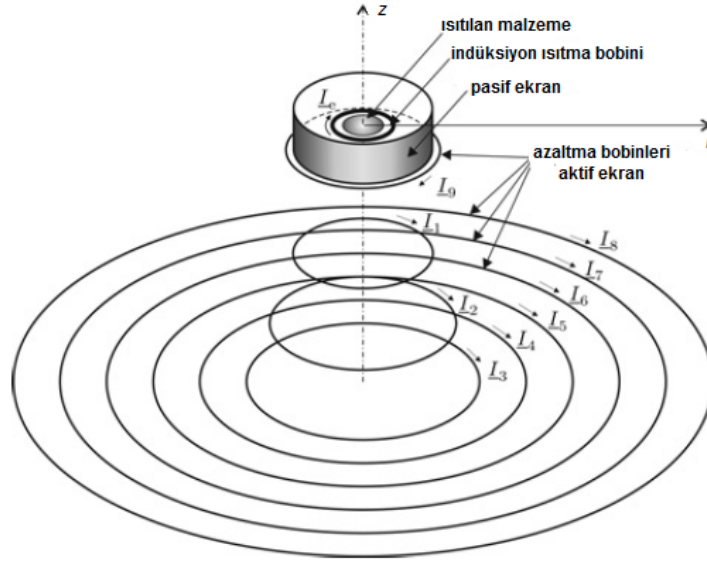
biridir. Özellikle şebeke frekanslı manyetik alanların ekranlanması büyük önem taşımaktadır. Yapılan deneysel çalışmada, piyasada yaygın olarak kullanılan farklı elektriksel özelliklere sahip sac levha şeklindeki malzemelerin (transformatör sacı, galvanizli sac, dkp sac, paslanmaz çelik, kurşun, çinko, alüminyum ve bakır) ekranlama etkinliği incelenmiştir. İncelenen ekranlamada, güç kabloları içeride kalacak şekilde etrafı silindir şeklinde ekranla sarılmıştır. Ekranlar tek katmanlı ve kalınlığı 0,5 mm'dir. Elektriksel iletkenliği ve manyetik geçirgenliği yüksek malzemelerin ekranlama etkinliğinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunlardan dalma derinliği düşük olan malzemelerin daha iyi ekranlama etkinliği sağladığı tespit edilmiştir (Köroğlu vd., 2005).

2.3.3 Aktif/Pasif Ekranlama

Manyetik alan kaynakları tarafında üretilen alanın aktif veya pasif ekranlama teknikleriyle azaltılması mümkün olmaktadır. Fakat birçok cihaz ve manyetik kaynağın yapılarındaki geometrik sınırlamalar nedeniyle sadece aktif veya sadece pasif ekranlama yapmak mümkün olamayabilir. Bunun yanında tek başına çözüm bulmak her zaman için en etkin çözüm de sağlamayabilir. Özellikle harmonik bileşenli alanlar olması durumunda tüm bileşenleri dikkate alacak bir aktif ekranlama zor olacaktır. Bu gibi nedenlerle iki yöntemin birlikte kullanılması optimum bir ekranlama yapmak için etkin bir yol olabilmektedir.

Aktif ve pasif ekranlamanın birlikte kullanıldığı birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları şunlardır.

Endüstri ve ev uygulamalarında indüksiyon fırınlarının kullanıldığı bilinmektedir. Temel prensip olarak bir indüksiyon bobini ısıtılacak parçanın üzerine sarılır veya yakınına konumlandırılır. Yüksek akımlı bu indüksiyon bobini ısıtılacak parça üzerinde bir gerilim indüklenmesine neden olur. Oluşan girdap akımları neticesinde iş parçası üzerinde ısı meydana gelmektedir. Fakat indüksiyon bobinleri yakın dış çevrelerinde 0,1 m ile 1 m arasında militesla seviyelerinde manyetik alanların oluşmasına da neden olmaktadır. Sergeant vd. (2004) tarafından indüksiyon fırının ekranlanması üzerine yapılan çalışmada, hem aktif hem de pasif ekranlamayı birlikte kullanmıştır. İndüksiyon ısıtma sistemi için aktif ve pasif ekranlamanın birlikte kullanılması Şekil 2.5'deki resimde gösterilmiştir. İki ekranlama yönteminin birlikte kullanılması ayrı ayrı kullanılmasına karşın daha optimum bir ekranlama sağladığını tespit etmişlerdir. Bu induksiyon ısıtma sisteminin aktif ekranlaması için yazılım kontrolü (Sergeant ve Dupre, 2006), donanım kontrolü (Sergeant vd., 2007) geliştirilmiştir.



Şekil 2.5 İndüksiyon ısıtma sistemi için aktif ve pasif ekranlamanın birlikte kullanılması (Sergeant vd., 2007).

2.4 Malzemelerinin Elektriksel ve Manyetik Özellikleri

Manyetik ekranlamada, yüksek elektriksel iletkenlikli veya yüksek manyetik geçirgenlikli malzemeler kullanılır. Bunun yanında, bu iki özelliğe sahip malzemelerin bir arada kullanılması da mümkün olabilmektedir. Manyetik malzemeler, sahip oldukları bağıl manyetik geçirgenliklerine göre kabaca üç grupta sınıflandırılır. Yani manyetik alandaki mıknatıslanmalarına göre diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik olmak üzere üç kısımda toplanırlar. Kısaca;

- **Diyamanyetik**, $\mu_r \leq 1$
- **Paramanyetik**, $\mu_r \geq 1$
- **Ferromanyetik** $\mu_r \gg 1$

olarak malzemeleri bağıl manyetik geçirgenliklerine göre sınıflandırabiliriz. Bağıl manyetik geçirgenlik;

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.2)$$

eşitlik (2.2)'deki gibi tanımlanır. Burada μ manyetik geçirgenliktir. μ_0 ise $4\pi 10^{-7}$ H/m değerinde olup boşluğun manyetik geçirgenliğidir. Boşluğun (hava) bağıl manyetik geçirgenliği $\mu_r=1$ 'dir.

Diyamanyetik malzemelere civa, altın, gümüş, bakır vb. malzemeler örnek verilebilir. Bu

malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri 1'den çok az düşüktür. Örneğin bakır için $\mu_r=0,9999991$ değerine sahiptir.

Paramanyetik malzemelere magnezyum, titanyum, tungsten, alüminyum gibi malzemeler örnek olarak gösterilebilir. Bu malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri ise 1'den çok az büyüktür. Örneğin alüminyum için $\mu_r=1,00000036$ 'dır. Hem diyamanyetik hem de paramanyetik malzemeler için mıknatıslanma eğrileri sabit olarak kabul edilir. Yani bağıl manyetik geçirgenlikleri alan şiddetinden bağımsızdır.

Ferromanyetik malzemelere ise nikel, kobalt, demir gibi malzemeler örnek verilebilir. Bu malzemelerin bağıl manyetik geçirgenliğin değeri 1'den çok çok büyüktür. Bu malzemelerin en önemli karakteristiklerinden birisi μ_r 'nin doğrusal olmayışıdır. Yani μ_r 'nin değeri, malzemedeki manyetik alan şiddeti $|H|$ 'nin değerine bağlı, doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir.

Genellikle, pratik uygulamalarda hem diyamanyetik hem de paramanyetik malzemeler için $\mu_r=1$ olarak alınır. Bilindiği gibi manyetik ekranlamada kullanılan ekran malzemeleri ekseriye sac levha şeklindedir. İyi bir ekranlama performansı elde etmek için kullanılan ekran malzemeleri, yüksek iletkenlikli (ferromanyetik olmayan) ve/veya yüksek manyetik geçirgenlikli (ferromanyetik) malzemelerden seçilmesi gerekmektedir. Pratik manyetik alan ekranlamasında kullanılan malzemeleri elektiriksel ve manyetik özelliklerine göre, yüksek elektriksel iletkenlikli ve yüksek manyetik geçirgenlikli olarak iki kısımda sınıflandırmamız mümkündür. Gerçek yaşamda mevcut olan demir gibi ferromanyetik malzemelerin bakır, aliminyum kadar olamasa da elektriksel bir iletkenliğe sahip oldukları unutulmamalıdır. Tez çalışmasında, kullanılan malzemelerin elektriksel özelliklerin belirlenmesinde iletkenlik ölçüm düzeneği, manyetik özelliklerinin belirlenmesinde ise Epstein çerçevesi ölçüm yöntemini kullanan deney düzeneklerinden yararlanılmıştır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneysel ölçümler, Gent/Belçika'da bulunan Ghent University, Electrical Energy Laboratory (EELAB)'da yapılmıştır.

2.4.1 Ekran Malzemelerinin Elektriksel İletkenliğin Belirlenmesi

Sac ve şerit şeklindeki ekran malzemelerin iletkenlik ölçümleri ohm kanunundan hareketle yapılmaktadır. Bilindiği gibi ohm kanunu;

$$V = IR \quad (2.3)$$

şeklinde akım, gerilim ve direnç ifadesi arasındaki ilişkiyle tanımlanır. Yani eğer biz gerilim

ve akım ifadesini bilirsek onların oranından direnci hesaplayabiliriz. Fakat R direnci malzeme hakkında özel bir bilgi vermez. Bunun yerine malzemenin boyutlarından bağımsız öz direnç (ρ) ifadesi kullanılır ki bu ifade malzemenin elektriksel özelliği ile ilgili bilgiye sahiptir. Direnç ve öz direnç arasındaki ilişki;

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.4)$$

ile tanımlıdır. Malzemenin iletkenliği

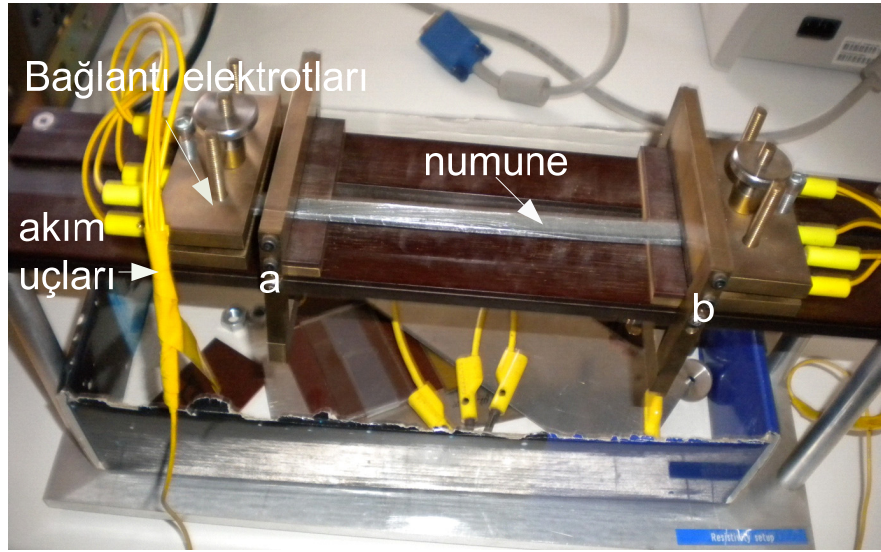
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlıdır. Eşitlik (2.4) (2.3)'de yerine konulur ve eşitlik (2.5) kullanılarak yeniden düzenlenirse iletkenlik;

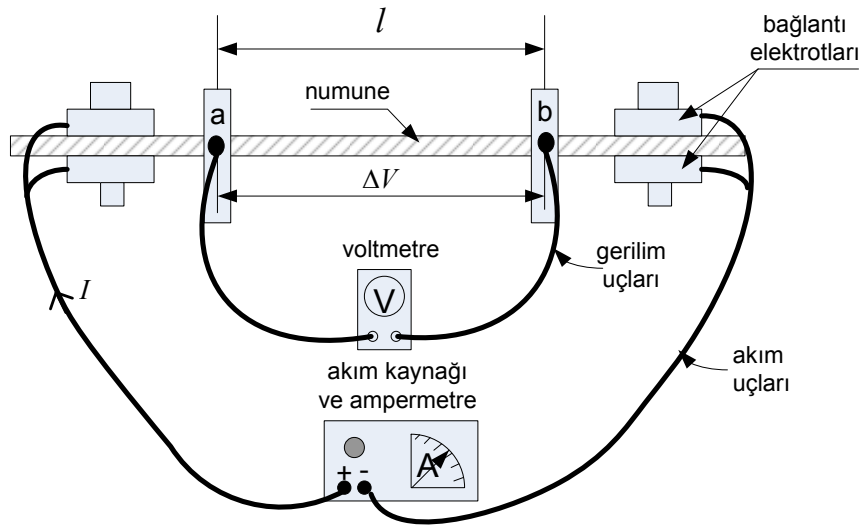
$$\sigma = \frac{l}{S} \frac{I}{V} \quad (2.6)$$

eşitlik (2.6) ifadesi elde edilir. Eşitlik (2.6)'yı kullanarak her hangi bir malzeme için iletkenlik değerini rahatlıkla hesaplanır.

Sac ve şerit malzemelerin iletkenlik ölçümü için numune malzemenin yerleşimi deney düzeneği Şekil 2.6'da görüldüğü gibidir. Numune malzemesinin bağlantı uçları alt ve üstten olacak şekilde iki metal plaka arasına sıkıştırılır. Ayrıca elektriksel yönden iyi bir bağlantı yapılması için enerji malzemeye dört noktadan bağlantı yapılarak verilmektedir. Daha sonra bu dört nokta birleştirilmiştir. Bu birleşim noktaları ise kaynağa bağlanmıştır. Böylelikle bağlantı noktalarında tam bir elektriksel geçiş sağlanmakta ve ölçüm doğruluğunu artırmaktadır. Şekil 2.7'de sac ve şerit malzemelerin iletkenlik ölçümü için prensip şema gösterilmiştir. Malzeme yerleştirildikten ve bağlantılar düzgün bir şekilde yapıldıktan sonra ayarlı bir DC bir güç kaynağına bağlanır. Numune malzemesi üzerinden geçen akım ayarlanır ve bu akım değeri kaydedilir. Daha sonra a ve b noktaları arasında gerilim düşümü ölçülerek kaydedilir ve gerilimin okunduğu bu iki nokta arasındaki uzunluk ölçülür. Böylelikle eşitlik 2,6'dan iletkenliğin hesaplanması için bütün büyüklüklere sahip olunur. Malzemelerin iletkenliklerini bu yöntemle rahatlıkla belirlenir. Eşitlikteki S numune malzemenin kesit alanı (m^2), l ise a ve b noktası arasında ki malzemenin uzunluğu (m), I malzeme üzerinden geçen akımın değeri (A) ve V ise a ve b noktası arasındaki ΔV gerilim düşümü (V) şeklindedir.



Şekil 2.6 Sac levha ve şerit şeklindeki malzemelerin iletkenlik ölçümünde kullanılan deney düzeneğinin fotoğrafı.



Şekil 2.7 Sac levha, şerit şeklindeki malzemelerin elektriksel iletkenlik ölçümünde kullanılan düzeneğin prensip şeması.

Örneğin DX52 (galvanizli demir) ekran malzemesi için iletkenliğin ölçümü; öncelikle iletkenliği ölçülecek malzemede 200 mm boyunda 10 mm genişliğinde bir numune hazırlanır. Bu numune deney düzeneğindeki gibi yerleştirilir. Malzemenin kalınlığı 3 mm, genişliği 10 mm, uygulanan akım 3 A iken bu durumda a ve b noktaları arasından ölçülen gerilim düşümü 2,5 mV olarak okunmuştur. Numune malzemesinin a ve b noktalar arasındaki uzunluğu $l=162$

mm ölçülmüştür. Eşitlik (2.6) kullanılarak malzemenin elektriksel iletkenliği $\sigma=6.48$ MS/m olarak belirlenmiştir.

2.4.2 Ekran Malzemelerinin Manyetik Özelliklerinin Belirlenmesi

Elektriksel şerit ve sac levhaların manyetik özelliklerinin belirlenmesi oldukça kullanılan yöntemlerden en önemlisi Epstein çerçevesi metodudur. Epstein çerçevesi, elektriksel sac ve şeritlerden elde edilen her kalite numuneye uygulanabilir a.a. manyetik karakteristikler, sinüs biçimli indüklenmiş gerilimler, manyetik polarizasyonun belirli tepe değerleri ve belirli bir frekans için tayin edilebilir (Mthombeni vd., 2005 ; TS 4490 EN 60404-2, 2003). Standard Epstein çerçevesi yöntemiyle güç frekanslarında farklı manyetik malzemelerin spesifik güç kayıplarını ölçmüştür (Kockar ve Meydan, 2002).

Epstein çerçevesi modelinin prensip şeması Şekil 2.8'den görülebilir. Dikdörtgen şeklindeki bu çerçevenin her bir kolunda toplam sarım sayısının dörtte birini taşıyan dört adet makara vardır. Dört makaradan her biri iki sargı ihtiva eder;

- Birincil sargı, dış sargı (mıknatıslama sargısı),
- İkincil sargı, iç sargı (gerilim sargısı).

Deneye tabi tutulacak numune ise bu bobinlerin içinden geçecek şekilde dört bir tarafa yerleştirilir. Bu numuneleri sanki boşta çalışan bir transformatörün nüvesi gibi düşünebiliriz. Her bir kenar uzunluğu 25 cm olan Epstein çerçevesi, tıpkı yüksüz bir transformatörün boşta çalışmasına benzer. Malzeme üzerindeki manyetik akı yolunun uzunluğu $l_m = 0.94$ m olarak alınır. Manyetik alan şiddeti H , Epstein çerçevesinin birincil sargısındaki mıknatıslama akımının bilinmesi ile eşitlik (2.7) kullanılarak tayin edilir;

$$H = \frac{N_1 \cdot I}{l_m} \quad (2.7)$$

Burada N_1 Epstein çerçevesinin birincil sargısının toplam sarım sayısı, I mıknatıslama akımı ve l_m kabul edilen etkin manyetik akı yolu uzunluğudur. Mıknatıslanma sargısındaki akımdan dolayı ikincil sargıda bir gerilim oluşacaktır. İndüklenecek bu gerilim, indüksiyon değeri B ile ilişkilidir ve manyetik akının zamanla değişimiyle orantılıdır ($\phi = B \cdot A$). Buradan ikincil sargıdaki gerilim düşümü;

$$U_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.8)$$

eşitlik (2.8) ifadesiyle bulunur. Burada, N_2 ikincil sargının sarım sayısı, ϕ manyetik akı ve t' de zaman ifadesidir. Eşitlik 2.8'in integrali alınır;

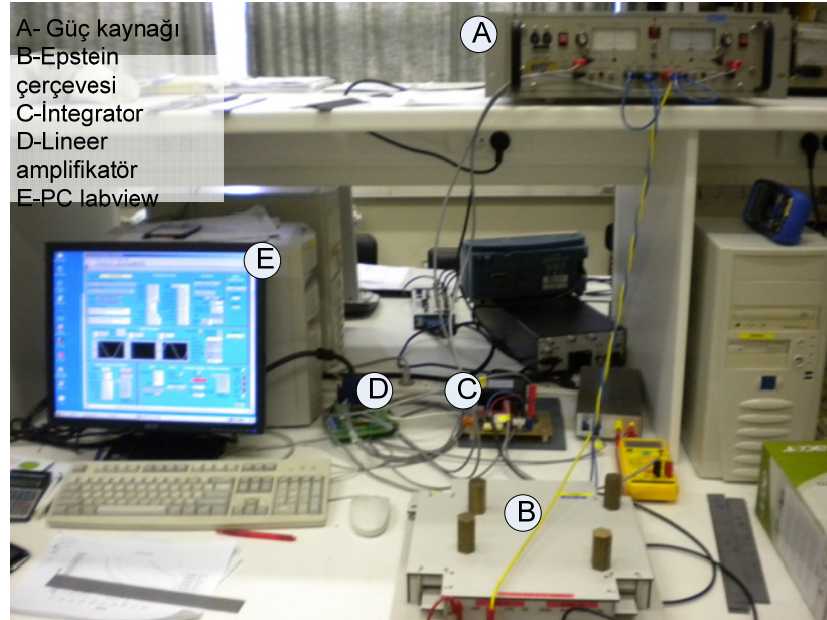
$$\Delta B = -\frac{1}{N_2 A} \int U dt \quad (2.9)$$

eşitlik (2.9) ifadesi yazılır. Bu eşitliklerden bağıl manyetik geçirgenliğin indüksiyon seviyesi ve manyetik alan arasında olan ilişkisi;

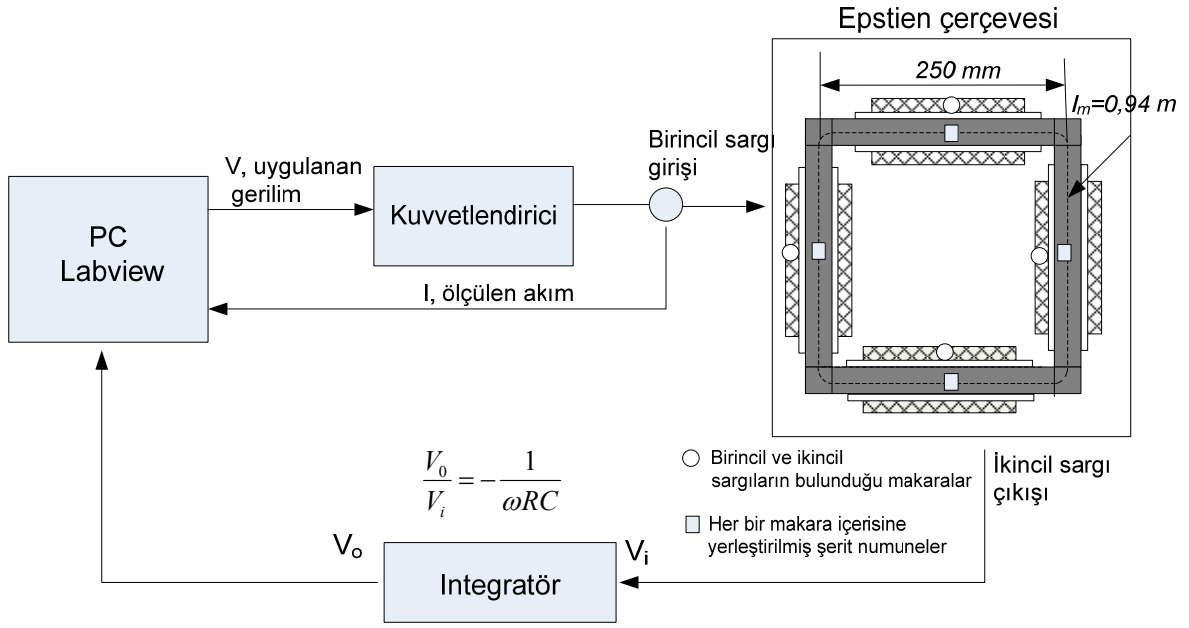
$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.10)$$

şeklinde eşitlik (2.10) ile ifade edilir (Fukuhara vd., 2006). Böylelikle ferromanyetik bir malzeme için doğrusal olmayan bağıl manyetik geçirgenlik değeri farklı alan değerlerindeki ölçümlerden elde edilir.

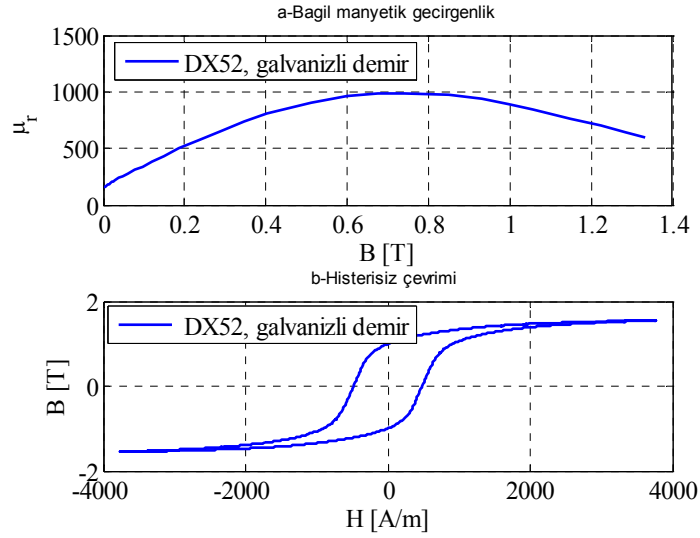
Sac levha ve şerit şeklindeki malzemelerin göreceli manyetik geçirgenlikleri, histerisiz çevrimleri ve malzemelerdeki kayıplar Şekil 2.8' deki deney düzeneği yardımıyla tespit edilir. Bu düzenek prensip olarak Epstein çerçeve yöntemini kullanır. Ayrıca Labview kullanılarak ve geliştirilmiş olan yazılımı sayesinde tüm veri ve çizimler bilgisayar ortamından yapılabilmektedir. Düzeneğe ait basit blok diyagramı Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.8 Sac levha, şerit şeklindeki malzemelerin manyetik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği.



Şekil 2.9 Epstein çerçevesi ve manyetik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneğinin blok şema gösterimi.



Şekil 2.10 Galvanizli demir (DX52) sac malzemesinin (a) bağıl manyetik geçirgenlik değerinin manyetik akı yoğunluğuna bağlı değişim (b) BH düzlemindeki histerisiz çevrimi.

Örnek olarak galvanizli demir sac olan DX52 malzemesine ait bir ölçümün nasıl yapıldığını açıklayalım. Öncelikle ölçümün yapılacağı numunelerin hazırlanması gerekmektedir. Bu numunelerin kalınlığı 3 mm, eni 30 mm ve boyu 300 mm olacak biçimde 4 adet şerit malzeme çapaksız ve kenarları düzgün olacak şekilde hazırlanmıştır. Daha sonra bu 4 numune Epstein çerçevesinin içine her biri bir kenara gelecek şekilde düzgünce yerleştirilmiştir.

Şeritlerin birleşim noktalarının bir birine iyi temas etmesine dikkat edilir. Aralarında hava aralığı kalmaması gerekir. Bunun için birleşim noktalarına baskı yapacak uygun ağırlıklar konulmaktadır. Hazırlama ve numunelerin düzgün bir şekilde yerleştirme işlemleri bittikten sonra deney düzeneği çalıştırılarak ölçüm sonuçları alınır ve bir bilgisayar dosyasına kaydedilir.

Şekil 2.8’ da resmi gösterilen deney düzeneği kullanılarak galvanizli demir sacın (DX52) manyetik özellikleri belirlenmiştir. Örneğin, bu malzeme için manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak bağlı manyetik geçirgenliğin değişimi Şekil 2.10 (a)’ da, BH düzlemindeki histerisiz çevrimi ise Şekil 2.10 (b)’de gösterilmiştir. Görüleceği gibi bağlı manyetik geçirgenlik uygulanan alan şiddetine bağlı olarak doğrusal olmayan bir biçimde değişmektedir.

3. DÜZGÜN DAĞILIMLI MANYETİK ALANIN EKRANLANMASI

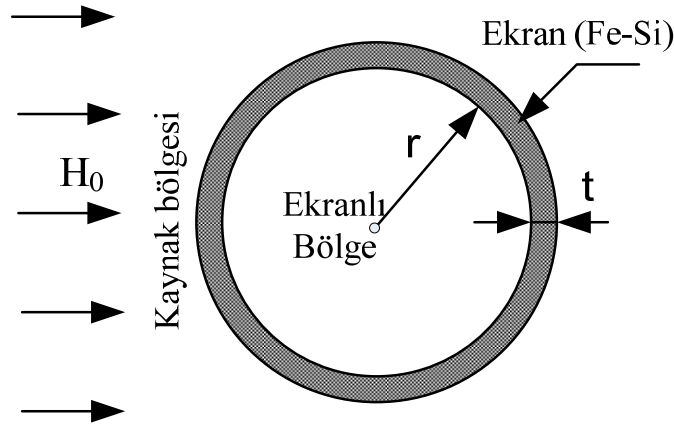
Bu bölümde, düzgün dağılımlı manyetik alan içerisinde kalan bir bölgenin basit silindirik bir ekran ile ekranlanması problemi incelenmiştir. Ekran malzemesi olarak silisyumlu demir olan Fe-Si'i kullanılmıştır. Fe-Si yüksek ve kompleks manyetik geçirgenlikli ferromanyetik bir malzemedir. Aynı zamanda elektriksel olarak iletken bir malzemedir. Ekranlama probleminin çözümü Analitik Yöntem (AY), Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi üç farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç yöntemde, uygulanan manyetik alanın şiddetine bağlı olarak ekrandaki bağlı manyetik geçirgenliğin doğrusal olmayan değişimini dikkate almaktadır. Ekranlama etkinliğinin bağlı olduğu parametrelerden ekran yarıçapı, kalınlığı, uygulanan manyetik alan genliği ve frekansın ekranlama etkinliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, yöntemlerin birbirine olan avantaj ile dezavantajları ortaya konmuş ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.1 Problemin Tanımlanması

Bu çalışmanın amacı, H_0 manyetik alan genliğine bağlı sinüsoidal ve düzgün dağılımlı bir manyetik alan içerisinde kalan bir bölgenin ekranlanmasını incelemektir. Silindirik bir ekran için ekranlama performansı birçok parametreye bağlı olarak araştırılmıştır. Çalışılan ekranlama uygulamasında, ekranın sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilmiştir. Doğrusal olmayan ferromanyetik silindirik bir ekran ile düzgün manyetik alan içerisindeki bir bölgenin ekranlanmasına ilişkin prensip şema Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.1'den görüldüğü gibi kaynak bölgesi ekranın dışında, ekranlanacak bölge ise ekranın içerisinde kalmaktadır. Buradaki amaç ekranın iç tarafında kalan bölgedeki alan seviyesini azaltmaktır. Ekran olarak ferromanyetik özellikli bir ekran olan Fe-Si malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemenin bağlı manyetik geçirgenliği, uygulanan manyetik alanın şiddetine bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir. Ekranlama uygulamalarında, manyetik alan şiddeti için ekranlama faktörü;

$$|s| = |\underline{H}_s| / |\underline{H}_0| \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, $\underline{H}_0$ kaynak bölgesindeki manyetik alan şiddetini, $\underline{H}_s$ ise ekranlı bölge içindeki manyetik alan şiddetini göstermektedir.



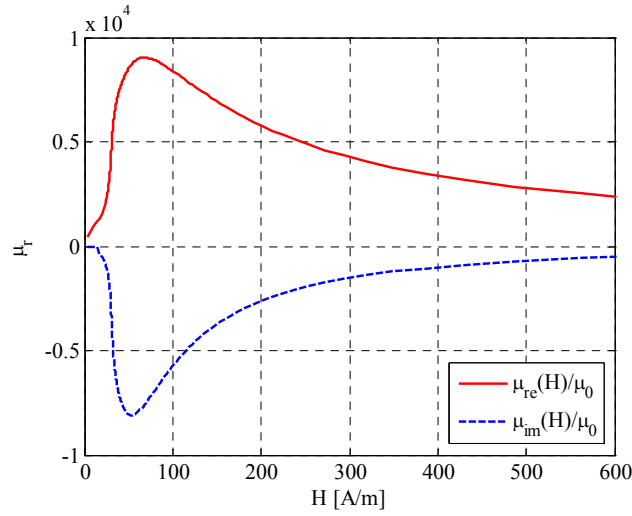
Şekil 3.1 Doğrusal olmayan ferromanyetik silindirik bir ekran ile düzgün manyetik alan içerisindeki bir bölgenin ekranlanması.

Ekranlama faktörü $|s|$, eşitlik (3.2)'den de görüleceği gibi ekran geometrisine ve elektromanyetik parametrelere göre değişmektedir.

$$|s| = s(r, t, f, H_0) \quad (3.2)$$

Ekranlama faktörü; ekranın yarıçapı (r), ekranın kalınlığı (t), uygulanan düzgün dağılımlı alanın frekansı (f) ve manyetik alanın genliği (H_0)'nin fonksiyonu olarak değişir.

Ekranlama faktörünün hesabı için bu üç yöntem de (SEY, AY ve YSA) eşitlik (3.2)'de ki ilişkiyi kullanmaktadır. Hem AY hem de SEY çözümlerinde manyetik alan şiddetine bağlı manyetik geçirgenliğin doğrusal olmayan değişim etkisi dikkate alınmıştır. Fe-Si ekran için bağlı manyetik geçirgenliğin gerçel ve sanal kısmının doğrusal olmayan değişimi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Ekran malzemenin kompleks manyetik geçirgenliği, uygulanan manyetik alanın fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu değişim SEY modellemesinde ve AY hesaplamalarında dikkate alınmıştır. Malzemenin manyetik özellikleri Epstein çerçeve yöntemiyle tespit edilmiştir. Elektriksel iletkenliğini ise iletkenlik ölçüm düzeneği yardımıyla belirlenmiştir. Kullanılan ekranın elektriksel iletkenliği $3,24 \text{ MS/m}$ olarak ölçülmüştür. Ekranlama faktörünün tahmin edilmesinde kullanılan YSA modelinin eğitiminde, eşitlik (3.2)'de ki parametrelerin birçok değeri için SEY tarafından elde edilen veriler kullanılmıştır. Kullanılan YSA yöntemi dolaylı olarak ekran malzemesinin manyetik ve elektriksel özelliklerini otomatik olarak dikkate almaktadır.



Şekil 3.2 Fe-Si ekran için manyetik alanın fonksiyonu olarak bağıl manyetik geçirgenliğin gerçel ve sanal kısmının değişimi.

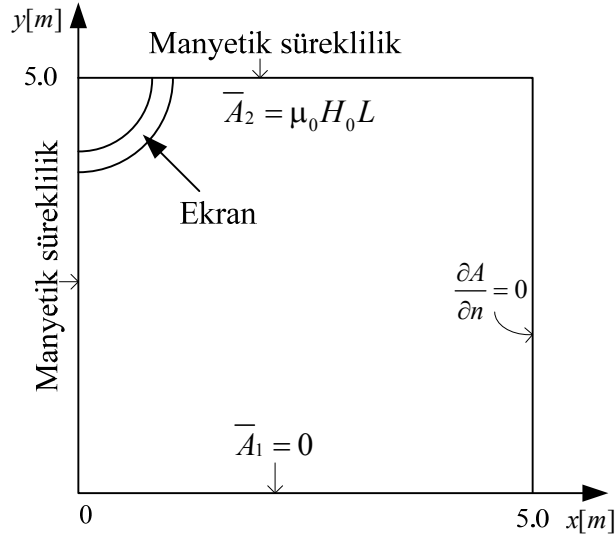
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

SEY hesaplamaları için A General Environment for the Treatment of Discrete Problems (GetDP) paket programı kullanılmıştır. GetDP ayrık problemler için sayısal çözümler veren bilimsel hesaplama yazılımıdır. Çözüm yöntemi olarak sonlu elemanlar ve integral yöntemini kullanır. Program açık kodlu bir program olup internet [www.geuz.org/getdp] adresinden ulaşılabilir.

Hesaplamalarda iki boyutlu (2B) zaman-harmonikli (time-harmonic) manyetodinamik SEY modeli kullanılmıştır. Manyetik vektör potansiyeli $\bar{A}$ sistem bilinmeyenidir. Sistemin matematiksel eşitliği Maxwell denklemlerinden elde edilen;

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \right) + j\omega\sigma\bar{A} = 0 \quad (3.3)$$

eşitlik (3.3)'deki ifadeyle tanımlıdır. Burada, σ elektriksel iletkenlik, ω açısal frekans, μ ise manyetik geçirgenliktir. Hesaplamalarda 2B SEY kullanıldığından, sadece manyetik vektör potansiyelin z-bileşenini dikkate alınır. Hesaplamaları yapılacak ekranlama probleminin SEY modeli Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Problemindeki simetri nedeniyle çeyrek simetri modeli kullanılmış ve 5 m²'lik bir bölge için modellenmiştir. Manyetik vektör potansiyeli $\Phi = A_2 - A_1$ akısını yatay sınır koşullarında uygulanır. Ekransız durumda bu alan yatay doğrultudadır. Dikey kenarlara ise Neuman sınır koşulları uygulanır. Ekran haricinde kalan kısımların havayla kaplı olduğu varsayılmıştır. Hesaplamalar 2B SEY ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3 Silindirik Fe-Si ekran için SEY probleminin çeyrek simetri modeli.

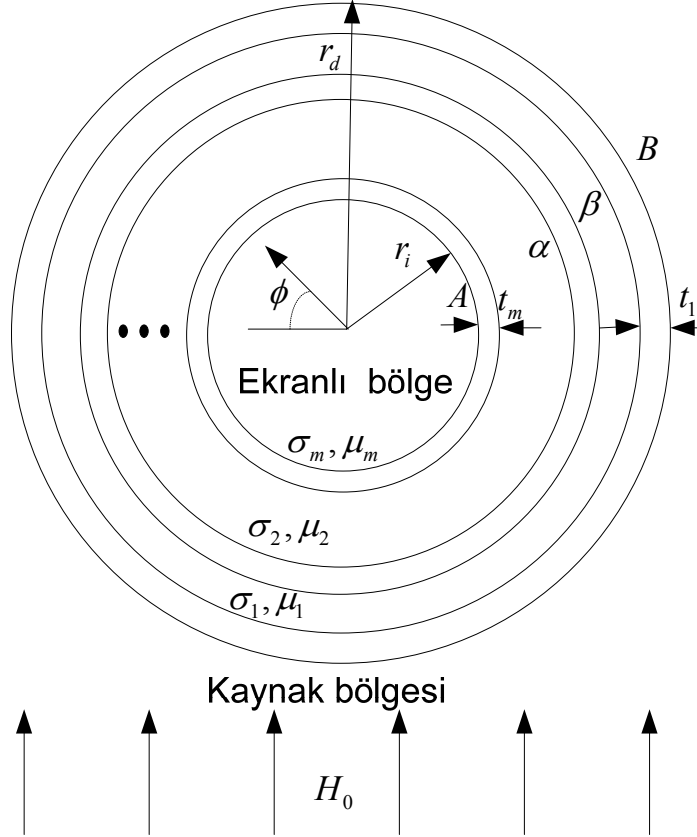
Problem tipik olarak 4188 serbestlik derecesine (degrees of freedom) sahip olup ağ (mesh) yoğunluğu ekran geometrisi ve frekansın bir fonksiyonu olarak dalma derinliğince tanımlanmıştır. Özellikle yüksek frekanslarda, manyetik alan ekran içerisinde hızlıca azalacağından ağ yoğunluğu dalma derinliğinin bir fonksiyonu olarak adaptif bir şekilde artırılmıştır. Örneğin, ekran kalınlığı 5 mm ve sistem frekansı 10 kHz durumunda, sistem 40422 serbestlik derecesi sahiptir. Ekranlama faktörü, ekranlı bölgenin ortasında hesaplanan alanın uygulanan düzgün dağılımlı manyetik alan değerine bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

3.3 Analitik Yöntem

Manyetik ekranlama problemlerinde, basit ekran yapıları için analitik çözümler bulunmaktadır. Haburg (1996) yaptığı çalışmada, çok katmalı ekranlar için analitik ifadeleri detaylıca ortaya koymuştur. Çalışmasında problemi doğrusal olarak kabul etmiştir. Yani ekran malzemelerin bağlı manyetik geçirgenliğinin manyetik alan şiddetiyle değişmediğini ve sabit değerli olduğunu varsaymıştır. Çok katmandan oluşan silindirik bir ekranlama yapısı Şekil 3.4’de görülmektedir. Burada, manyetik alan H_0 genliğinde enine düzgün dağılımlı (uniform transverse field) bir alan olup $\omega/2\pi$ frekansına sahiptir. Alt ve üst kenarı α ve β ile tanımlı olan bir ekranda, elektromanyetik alan büyüklükleri ile ilgili olarak tanımlama;

$$\begin{bmatrix} \underline{H}_{x0}^{\alpha} \\ \underline{B}_{y0}^{\alpha} / \mu_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{H}_{x0}^{\beta} \\ \underline{B}_{y0}^{\beta} / \mu_0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

eşitlik (3.4)'deki gibi yapılmıştır. Buradaki matris elemanları T_{11} , T_{12} , T_{21} ve T_{22} ekran katmanındaki malzeme özelliklerinin ve geometrinin tanımını içeren ifadelerdir. Uygulanan manyetik alanın, düzgün dağılımlı bir alan olduğu ve ekrana uzak bir bölgeden uygulandığı varsayılmıştır. Silindir ekranların iç kısmında kalan bölge ise ekranlanmış bölgeyi temsil etmektedir Haburg, (1996).

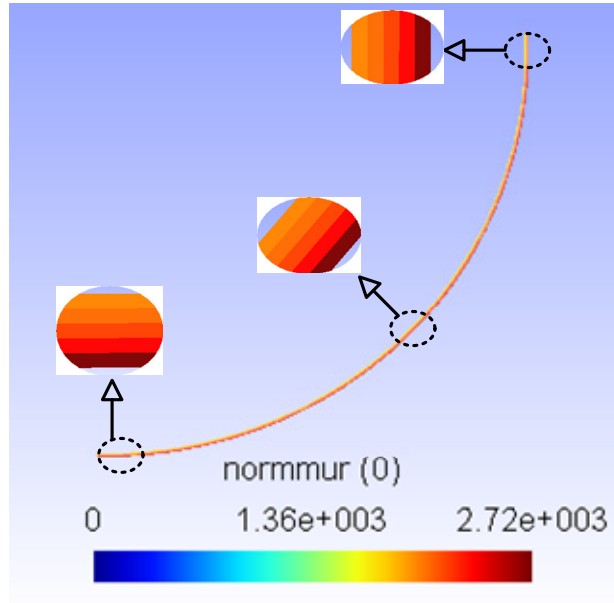


Şekil 3.4 Çok katmanlı silindirik ekran.

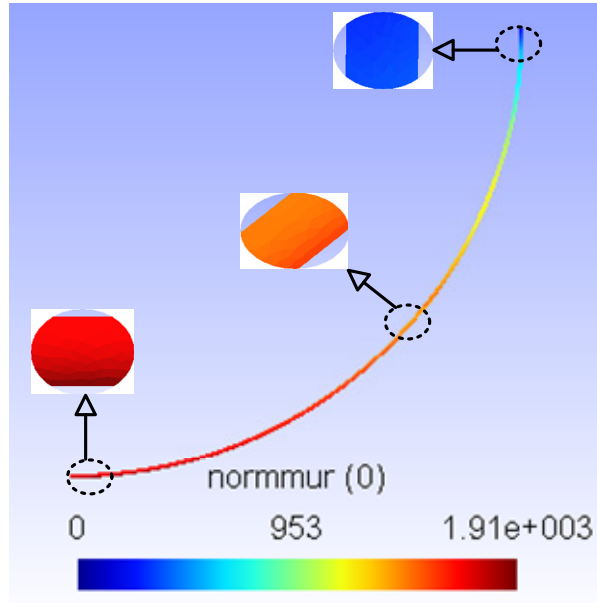
Ekran malzemesinin doğrusal olmayan etkilerinin dikkate alınması durumunda ise daha karmaşık bir yaklaşım gerekmektedir. Gerçek bir sistemde kullanılan ferromanyetik malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri manyetik alanın fonksiyonu olarak doğrusal olmayan bir biçimde değişmektedir. Dolayısıyla doğru bir analitik çözüm gerçekleştirmek için doğrusal olmayan bu etkinin dikkate alınması gerekmektedir. Sergeant vd., (2005) çalışmalarında düz ve silindirik ekranlar için doğrusal olmayan manyetik malzeme özelliklerini dikkate alan analitik hesaplama tekniğini ortaya koymuştur. Ekrandaki doğrusal olmayan değişimi dikkate almak için ekranı n sayıda alt katmana bölmüşlerdir. Her bir alt katman, sabit ve kompleks geçirgenliğe sahip olmasına karşın ekran kalınlığı boyunca ki alt

katmanlarda farklı değerler alacak şekilde modellenmiştir. Böylelikle radyal yöndeki manyetik alan geçirgenliğinin değişimi dikkate alınabilmektedir. Eğer yeterli alt katman seçilirse doğrusal olmayan davranış etkisinin iyi bir şekilde modellenebileceğini gösterilmiştir (Sergeant vd., 2006). Fakat analitik model, sadece radyal yöndeki değişimleri dikkate alır. Her bir alt katmandaki manyetik alan değeri kendi içinde sabit olduğu için eksenel yöndeki geçirgenliğin değişimi dikkate alınamamaktadır.

Aslında, gerçek problemlerde manyetik geçirgenliğin doğrusal olmayan değişimi hem radyal hem de eksenel yönde farklılıklar gösterebilmektedir. Doğrusal olmayan malzeme özelliklerini dikkate alan AY ve SEY’de, ekrandaki manyetik geçirgenliğinin nasıl değiştiğini görsel bir şekilde ortaya koymak için Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’daki grafikler GetDP programı kullanılarak çizdirilmiştir. Şekil 3.5 analitik model için beş alt katmandan oluşan ve her bir katmanı farklı sabit manyetik geçirgenliğe sahip olan ekrandaki manyetik geçirgenliğin değişimini gösterir ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 200$ A/m). Bu şeklin elde edilmesi şu şekilde yapılmıştır. İlk önce beş alt katmandaki olduğu varsayılan silindirik ekranda, her bir katmandaki manyetik geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler her bir katman için kompleks değerlere sahiptir. Daha sonra aynı geometri için model beş alt katmandan oluşacak şekilde SEY programında modellenmiştir. Her bir katmanın manyetik geçirgenlikleri AY’dan elde edilen değerlerle tanımlanmıştır. Görüldüğü gibi geçirgenliğin doğrusal olmayan değişimi radyal yönde olup alt katmanın birinden diğerine doğru değişmektedir. Manyetik geçirgenlik ekranın iç katmanında daha düşük, dış katmanında ise diğerlerine göre daha yüksek olmaktadır. Çünkü ekranın içine doğru manyetik alan şiddeti azalmaktadır. Fakat alt katmandaki manyetik geçirgenliklerin değişim eksenel yönde sabittir. Bu şekilde AY’le doğrusal olmayan etki dikkate alınır, fakat tam anlamıyla doğru çözüm verdiği söylenemez. Özellikle alan seviyesinin yüksek olması durumunda çözüm doğruluğu azalacaktır. Doğrusal olmayan ekrandaki manyetik geçirgenliğin daha doğru bir şekilde değişimi Şekil 3.6’da görülmektedir ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 200$ A/m). Bu şekil doğrusal olmayan malzemenin elektriksel özelliklerinin tanımlanması ile modellenen SEY’den elde edilmiştir. Doğrusal olmayan etkiye sahip bu problemin çözümünde SEY kullanmak daha doğru çözüm vermektedir. Şekil 3.6’dan da görüleceği gibi SEY, manyetik alana bağlı geçirgenliğin değişimini hem radyal hem de eksenel yönde dikkate almaktadır.



Şekil 3.5 Beş alt katmandan oluşan ve herbir katmanı farklı sabit manyetik geçirgenliğe sahip olan ekrandaki manyetik geçirgenliğin değişimi ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 200$ A/m).



Şekil 3.6 Doğrusal olmayan manyetik özelliklere sahip ekrandaki manyetik geçirgenliğin değişimi ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 200$ A/m).

Tanımlanan silindirik ekranlama probleminde ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 200$ A/m), ekranlama faktörü SEY ile hesaplandığında 0,1186 olarak bulunmuştur. Fakat aynı durumda ekranlama faktörü AY ile hesaplandığında 0,0840 olarak bulunmuştur. Buna ek olarak, AY'den elde edilen manyetik geçirgenlikler Şekil 3.5'deki gibi SEY'de

tanımlandığında yapılan hesaplamada, ekranlama faktörü 0,0836 olarak bulunmuştur. AY ile yapılan hesaplamayla, AY'den elde edilen verilerle modellen SEY ile hesaplanan değerlerin bir biriyle oldukça iyi bir şekilde uyuşmaktadır. Böylelikle AY'in çözüm doğruluğu SEY aracılığıyla ortaya konmuştur.

3.4 Yapay Sinir Ağları Yöntemi

3.4.1 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA) insan beyninin bilgi işleme tekniğinden hareket ederek geliştirilen bir bilgi işleme tekniğidir. İnsan beyni sinir hücreleri nöronlar içerir. Çeşitli şekillerde birbirleriyle bağlantı içeren bu nöronlar bir ağ oluştururlar. Nöronlar arasındaki sinaptik ağların ayarlanması ile öğrenme gerçekleşir. Sinaptik ağların bağlantıları yaşam boyunca edinilen öğrenme ve deneyimlere bağlı olarak değişir ve hatta yeni bağlar kurulur. Bu şekilde öğrenme gerçekleşir. YSA'da buna benzer bir prensipten hareket eder. Öğrenme eğitim yoluyla gerçekleştirilir. Eğitim için verilen girdi/çıkıtlara bağlı olarak veriler işlenir. Bu verilere bağlı olarak sistem ağırlıkları belli bir algoritma ile koşturularak tekrarlı bir yakınsama ile öğrenmeyi gerçekleştirir. Kısacası YSA, biyolojik nöron ağlarından oluşan matematiksel bir hesaplama modelidir. Literatürde, YSA ile ilgili birçok uygulama vardır (Capizzi vd., 2004; Fırat ve Güngör, 2009; Ekonomou vd., 2007; Koroglu vd., 2009; Umurkan vd., 2010). YSA'nın birçok tipi olmasına rağmen çok katmanlı ileri beslemeli ağ (Feed Forward Multilayer Perception) (MLP), basit yapısı ve güçlü modelleme yeteneği nedeniyle en çok kullanılan modeldir.

3.4.2 İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı

Katmanlardan oluşan ileri beslemeli bir sinir ağında her katman işlem birimleri sinir hücrelerinden oluşur. Katmanlar aldıkları veriler üzerinde bağımsız hesaplamalar yapar ve sonuçları bir sonraki katmana iletir. Son katman ise ağın çıktısını belirler. Öğrenmede, geri yayılım algoritmalarını kullanır (Haykin, 1994). Katmanlardaki her bir nöron, bir önceki katmandan giriş ağırlıklarına sahiptir ve bu ağırlıkları bir sonraki katmana iletir. En sonunda ise sistem girişleri ile ilişkilendirilmiş bir çıkış seti üretirler. Giriş sinyallerinin ağırlıklarının toplamaları;

$$net_j = \sum_{i=1}^n w_{ji}x_i + w_{j0} \quad (3.5)$$

eşitlik (3.5) ile ifade edilir. Bu giriş sinyallerin ağırlıklı toplamı bir aktivasyon fonksiyonu ile;

$$y_j = a(net_j) \quad (3.6)$$

eşitlik (3.6)'da ki gibi transfer edilir. Eşitlik (3.5) ve (3.6)'daki büyüklükler, w_{ji} nöron girişlerindeki ağırlıklar, x_i nöron girişleri, w_{jo} bias değerleri, y_j her bir nöronun çıkışı ve a ise seçilen aktivasyon transfer fonksiyonudur. Sigmoid transfer fonksiyonu türevi alınabilen, sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olması nedeniyle özellikle çok katmanlı algılayıcılarda tercih edilmektedir. Doğrusal olmayan problemlerin çözülmesi amacıyla kullanılırlar. Sonuç olarak logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılması ile ifade;

$$y_j = \frac{1}{1 + e^{(-net_j)}} \quad (3.7)$$

eşitlik (3.7)'deki biçimi alır. Hedeflenen çıkış değeri ile gözlenen çıkış arasındaki hata miktarı;

$$E = \sum_{p=1}^P \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (d_{pk} - y_{pk})^2 \right) \quad (3.8)$$

eşitlik (3.8) ile hesaplanır. Burada, P giriş verisi sayısı, m çıkış katmanındaki nöronların sayısı, d_{pk} hedeflenen çıkış değeri ve y_{pk} ise çıkış nöronunda gözlenen değerdir. Öğrenme algoritması eşitlik (3.8)'deki hatanın minimize edilmesi kuralına göre çalışır. Eğitim işlemi bu hata miktarı kabul edilir bir seviyeye ulaşana kadar tekrarlanır. Hatayı minimize etmek için ağırlıklar çeşitli algoritmalarla göre ayarlanır (Haykin, 1994). Bizim hesaplamalarımızda Bayesian regülasyon (Bayesian regularization) (BR), Fletcher-Reeves eşlenik eğim (conjugate gradient back-propagation with Fletcher-Reeves) (CGF), eğim-düşme momentumlu ve adaptif öğrenme oranlı (gradient descent momentum and an adaptive learning rate) (GDX), ve ölçekli-eşlenik eğim (scaled conjugate gradient) (SCG) geriye yayılım (back-propagation) algoritmaları kullanılmıştır. Bunların MATLAB[®] fonksiyonları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Neural Network Toolbox User's Guide, 2009; Erkem, 2006).

BR: `Trainbr` bir eğitim fonksiyonudur. Ağırlık ve eşik değerleri Levenberg-Marquardt algoritmasına göre optimize eder. İyi bir genelleme yapmak için hata ve ağırlıkların kombinasyonlarını minimize eder ve çıkışında doğru bir kombinasyon üretir.

CGF: `Traincgf` ağırlık ve eşik değerlerini Fletcher-Reeves eşlenik eğim geri yayılım

algoritmasına göre düzenler. Bütün eşlenik eğim algoritmaları ilk ağırlık değişimin gradyanının negatif değerini arayarak eğitime başlar. Bu süreçte, belirlenen yönde gidilecek optimum mesafe için arama yapılır. Bir sonraki arama yönü, bir öncekine eşlenik olacak şekilde belirlenir. Yeni arama yönünü belirlemek, negatif eğim yönünü bir önceki arama yönüyle bir araya getirilmesi işlemiyle gerçekleştirir.

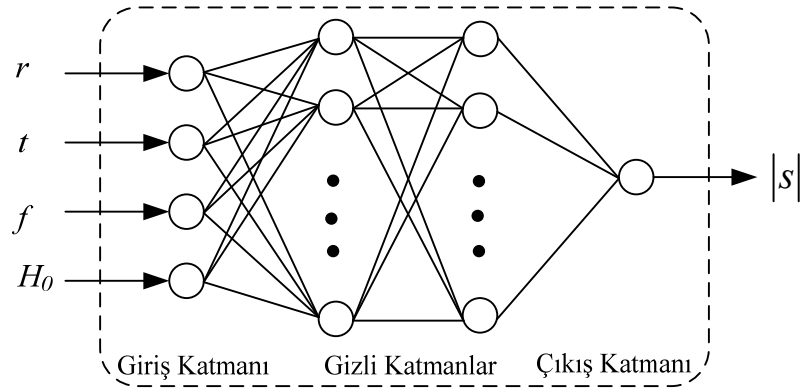
GDX: `Traingdx` ağırlık ve eşik değerlerini eğim-düşme momentumlu ve adaptif öğrenme oranlı geri yayılım algoritmasına göre düzenler. Bu algoritma değişken öğrenme oranlı eğitim algoritması ile momentum kullanarak eğim düşürme algoritmasının birleştirilmesi olarak düşünülebilir.

SCG: `Trainscg` ağırlık ve eşik değerlerini ölçekli-eşlenik eğim yöntemine göre düzenler. Moller tarafından geliştirilen bu algoritma hesaplama yükünü azaltmayı hedeflemiştir.

YSA probleminin çözümünde, en önemli problemlerden biriside “aşırı-uydurma” (over-fitting) veya “kötü genelleme problemi” (poor generalization problem) sorunudur. Genelleme sorunu çözmek için genel olarak iki çözüm vardır. Bunlardan birincisi eğitimi erken sonlandırmaktır. Yani aşırı öğrenme sinyali görünür görünmez eğitim işlemi sonlandırılmaktadır. Bu teknikte veriler, eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç kısma bölünerek gerçekleştirilir. Diğer genelleme sorununu iyileştirme yöntemi ise BR algoritması kullanmaktır.

3.4.3 Oluşturulan YSA Modelinin Gerçeklenmesi

Çözülmesi amaçlanan problem için kullanılan YSA modelinin ağ modeli Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Manyetik ekranlama probleminde, ekranlama faktörünü tahmin etmek için modellenen MLP YSA ağının eğitiminde BR, CGF, GDX ve SCG geri yayılım algoritmaları kullanılmıştır. Bu YSA modelinin eğitiminde kullanılmak üzere gerekli olan veri kümesi SEY hesaplamalarından elde edilmiştir. Eğitim seti toplamda 1320 veri kümesinden oluşmakta olup giriş parametreleri r , t , f ve H_0 ’ın birçok değeri ve bunlara karşılık gelen hesaplanmış $|s|$ değerlerini içermektedir. Eğitimden önce giriş ve çıkış veri kümeleri çoğunlukla belli bir aralığa normalize edilirler. Burada giriş ve çıkış parametreleri doğrusal olarak -1 ile 1 aralığında normalizi edilmiştir. Kötü genelleme sorununu aşmak ve iyi bir genelleme sağlayabilmek için toplam veri rastgele bir şekilde üçe bölünmüştür. Bu amaçla toplam verinin %70’i eğitim, %15’i eğitimin doğrulanması ve %15’i ise gerçekleştirilen modelin test edilmesi amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Silindirik Fe-Si ekran için ekranlama faktörü tahmininde kullanılan YSA ağının prensip şeması.

YSA modelinde, MATLAB fonksiyonlarını kullanarak çözümleme yapılmıştır. İleri beslemeli çok katmanlı (MLP) model kullanılmıştır. Birçok denemeden sonra en iyi ağ yapısı üç katman olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde birinci gizli katmandaki nöron sayısı 8, ikinci gizli katmandaki nöron sayısı ise 13 olarak belirlenmiştir. Bilindiği gibi ağ r , t , f ve H_0 olmak üzere 4 girişe, buna karşılık $|s|$ olarak tanımlanmış tek çıkış değerine sahiptir. Adaptasyon öğrenme fonksiyonu olarak "learngdm" kullanılmıştır. Gizli katmanlarda transfer fonksiyonu olarak logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu ("logsig"), çıkış katmanında ise doğrusal aktivasyon fonksiyonu ("purelin") kullanılmıştır. Ağın performansını değerlendirme ölçütü olarak toplam karesel hata (SSE) ve korelasyon katsayısı (R) kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 Oluşturulan YSA'da kullanılan dört farklı eğitim algoritmalarının performans karşılaştırması.

YSA	Ağ yapısı	Eğitim algoritması	İterasyon sayısı	Eğitim zamanı (saniye)	Hata (SSE)	Korelasyon katsayısı (R)
MLP	4x8x13x1	BR	100	17,69	5,41	0,98
	4x8x13x1	CGF	78	11,68	13,74	0,937
	4x8x13x1	GDX	100	7,25	74,53	0,61
	4x8x13x1	SCG	97	11,20	16,33	0,924

İyi bir eğitim işlemi, hem hızlı hem de düşük hata oranına sahip olmalıdır. Bu amaçla dört farklı eğitim algoritması test edilmiştir. En uygun algoritmanın seçilmesi, hız ve doğruluk performansı dikkate alınarak yapılmaktadır. Çizelge 3.1’de dört farklı algoritmanın performans karşılaştırması yapılmıştır. Bu çizelgeden görüleceği üzere GDX algoritmasının eğitim süresi kısa olmasına karşı hata oranı yüksektir. Fakat BR algoritması, hem düşük hata oranına sahip hem de çalışma algoritması nedeniyle iyi genelleme yapma özelliğine sahiptir. Bu nedenlerle, verilen ekranlama probleminde ekranlama faktörünün tahmini için BR algoritması seçilmiştir. Eğitim işlemlerinin gerçekleştirilmesinde BR algoritmasının korelasyon katsayısı $R=0,98$ olarak hesaplanmıştır. Eğitim işlemi 100 iterasyonda tamamlanmış ve 17,69 saniye sürmüştür.

3.5 Sonuçlar ve Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması

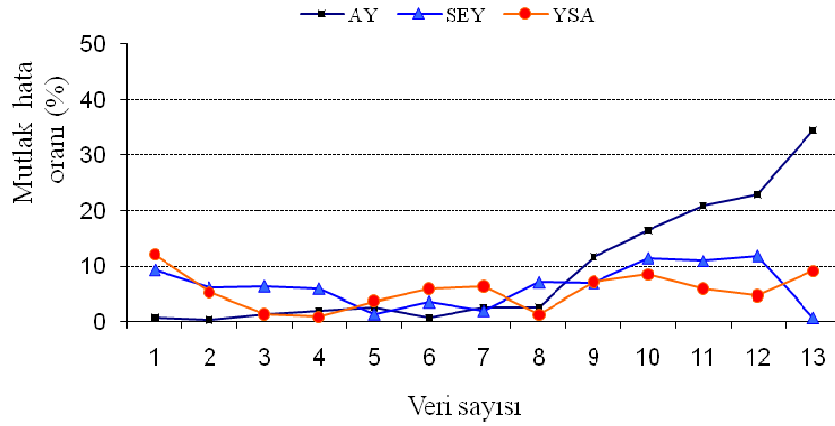
Düzgün dağılımlı bir manyetik alan içerisinde kalan bir bölgenin silindirik ekranla ekranlanması problemi AY, SEY ve geliştirilen YSA modeli kullanılarak çözülmüştür. Bu yöntemlerin, hız, doğruluk, çözüm tekniği gibi performans kriterlerine bağlı olarak avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur. Ayrıca bu üç yöntemden elde edilen sonuçlar, literatürde var olan ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak, hesaplama tekniklerinin doğruluğu ve özellikle geliştirilen YSA modelinin kullanılabilirliği test edilmiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen ölçüm sonuçları literatürde var olan bir çalışmadan alınmıştır. İlgili deney düzeneği ve manyetik alanların ölçümlerine ilişkin ayrıntılı bilgi ve detaylar verilmiştir (Peter vd., 2006). Farklı 13 giriş parametresine karşılık gelen, deneysel ve hesaplama yöntemlerinden elde edilmiş ekranlama faktörü sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği gibi ekran yarıçapı 0,0545 m, ekran kalınlığı 0,5 mm, frekans 50 Hz olarak kalmak şartıyla uygulanan manyetik alan genliği 4 ile 318 A/m arasında değişmektedir. Aynı parametreler olması durumunda farklı çözüm tekniğine sahip bu yöntemlerle hesaplamalar yapılmış, elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bu sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında YSA yöntemi bu tür bir problem çözümünde ilk kez kullanılmıştır. Ayrıca YSA modeli, SEY’den elde edilen verilerle başarılı bir şekilde eğitildiği için problemin doğrusal olmayan etkisini de başarılı bir şekilde dikkate aldığı görülmüştür. Bu nedenlerle geliştirilen YSA modelinin, bu tür problemlerin çözümünde rahatlıkla kullanılabilineceği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 3.2 Giriş değişkenlerine karşı ölçülen ve üç farklı hesaplama yönteminden elde edilen ekranlama faktörü sonuçlarının karşılaştırılması.

No	Giriş değişkenleri				Ekranlama faktörü $ s $			
	r [m]	t [mm]	f [Hz]	H_0 [A/m]	Ölçüm	AY	SEY	YSA
1	0,0545	0,5	50	4	0,5000	0,5036	0,4534	0,4390
2	0,0545	0,5	50	8	0,4070	0,4056	0,3821	0,3858
3	0,0545	0,5	50	12	0,3467	0,3511	0,3246	0,3420
4	0,0545	0,5	50	16	0,3090	0,3148	0,2907	0,3063
5	0,0545	0,5	50	28	0,2440	0,2504	0,2475	0,2350
6	0,0545	0,5	50	40	0,2100	0,2114	0,2175	0,1977
7	0,0545	0,5	50	56	0,1857	0,1810	0,1895	0,1740
8	0,0545	0,5	50	78	0,1570	0,1529	0,1681	0,1590
9	0,0545	0,5	50	120	0,1340	0,1183	0,1433	0,1435
10	0,0545	0,5	50	160	0,1180	0,0987	0,1315	0,1280
11	0,0545	0,5	50	199	0,1072	0,0848	0,1190	0,1135
12	0,0545	0,5	50	239	0,0967	0,0745	0,1082	0,1012
13	0,0545	0,5	50	318	0,0920	0,0602	0,0913	0,0836

Üç farklı yöntemin hesaplama hızları karşılaştırmak için problemin çözümü aynı bilgisayar kullanılarak yapılmıştır. Çözümler Çizelge 3.2 verilen 13 durum için gerçekleştirilmiştir. Bu durumda CPU hesaplama zamanları AY yöntem için 3,03 saniye, YSA için 0,15 saniye, SEY için ise problem kaba bir ağ ile çözüldüğünde hesaplama zamanı 107,04 saniye olarak saptanmıştır. Problemin SEY ile çözümünde, hesaplama zamanı ağ yoğunluğuna güçlü bir şekilde bağlıdır. Örneğin daha yoğun bir ağ ile çözüm gerçekleştirildiğinde hesaplama zamanının 1358,75 saniye olarak arttığı gözlenmiştir. Hesaplama hızı bakımından yöntemler karşılaştırıldığında sırasıyla YSA, AY ve SEY şeklinde sıralanabilir.



Şekil 3.8 Ölçüm sonuçlarına göre AY, SEY ve YSA hesaplamalarındaki mutlak bağıl hata oranlarının yüzdesel değişimi.

Aynı problemde yöntemlerin çözüm doğruluğu hakkında bilgi edinmek için ölçüm sonuçları doğru olduğu varsayılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre AY, SEY ve YSA hesaplamalarında ki mutlak bağıl hata oranlarının yüzdesel değişimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Mutlak yüzdesel bağıl hata oranı AY için % 9,16, SEY için % 6,45 ve son olarak YSA için %5,54 olarak hesaplanmıştır. Bu tür manyetik alan problemlerin çözümünde çok hassas doğruluk oranı aranmamaktadır. Farklı üç yöntemden elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçları genel manada örtüşmektedir. Dolayısıyla, kullanılan yöntemler verilen ekranlama problemi için kullanılabilir yeterliliğe sahiptir.

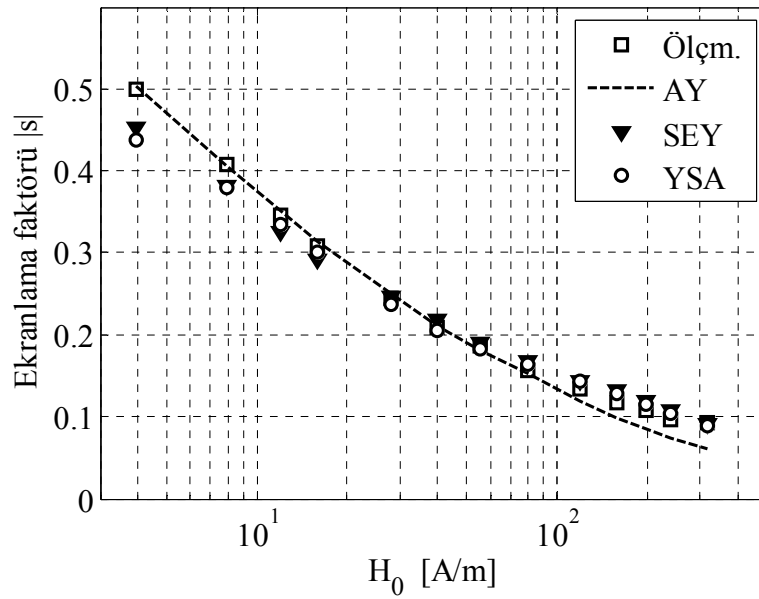
Bu üç yöntemin bir birlerine olan genel performans değerlendirmeleri Çizelge 3.3’de gösterilmiştir. Yöntemlerin avantaj ve dezavantajları kısaca şu şekilde özetleyebiliriz. AY hızlı bir yöntemdir. Özellikle düşük alan durumlarında doğru sonuçlar vermektedir. Buna karşın alan seviyesinin yükselmesine bağlı olarak doğruluğu düşmektedir. Daha önce açıklandığı gibi AY, ekrandaki manyetik alan şiddetine bağlı manyetik geçirgenliğin doğrusal olmayan değişimini aksel yönde dikkate almamaktadır. Özellikle, uygulanan alanın yüksek olması durumunda problemin çözüm doğruluğu azalmaktadır. Aynı zamanda sadece basit ekran ve kaynak geometrileri için geçerli bir yöntem olup karmaşık modellerde çözüm yapmak çok zordur. SEY hesaplama zamanı olarak yavaş olmasına karşı karmaşık ekran ve kaynak geometrileri içinde çözüm veren güçlü sayısal bir yöntemdir. Problem çözümünde ağ yoğunluğunun uygun bir şekilde seçilmesi oldukça önemli olup sonuçların doğruluğunu artırır. Buna karşı hesaplama zamanı yüksektir. Son olarak YSA modeli, yeterli veriyle iyi bir şekilde eğitilmesiyle hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı ise eğitim için hazır verilere ihtiyaç duymasındır.

Çizelge 3.3 AY, SEY ve YSA yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması.

Hesaplama yöntemi	CPU zamanı	Doğruluk	Avantaj	Sınırlamaları
AY	Hızlı	İyi	- Hızlı hesaplama zamanı - Eğer manyetik geçirgenliğin değişimi ekranın dairesel çevresi boyunca fazla değilse çok doğru çözüm vermekte (uygulan alanın düşük olması durumunda)	- Sadece basit ekran ve kaynak geometrilerinde - Doğruluk manyetik geçirgenliğin değişimi ekranın dairesel çevresi boyunca fazla olması durumunda azalır (uygulan alanın yüksek olması durumunda)
SEY	Yavaş	Çok iyi	Kompleks kaynak ve ekran geometrileri için geçerlidir	Hesaplama zamanı uzundur.
YSA	Çok hızlı	Çok iyi	- Kompleks kaynak ve ekran geometrileri için uygulanabilir - Eğer ölçüm sonuçlarından elde edilen verilerle eğitilmişse malzeme özellikleri bilgisine (iletkenlik, geçirgenlik) ihtiyaç duymaz	Her bir durum için eğitim verisine ihtiyaç duyar

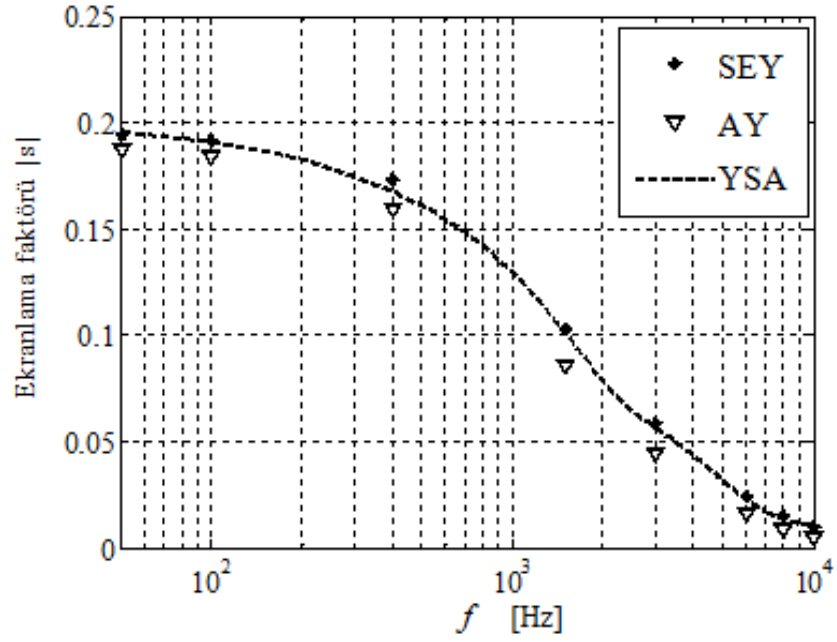
Çözülen problemde $r = 0.0545$ m, $t = 0.5$ mm, $f = 50$ Hz olup uygulanan manyetik alan şiddeti 4 ile 318 A/m aralığında değiştirilmiştir. Düzgün dağılımlı manyetik alanın fonksiyonu olarak AY, SEY, YSA ve ölçüm sonuçlarına göre ekranlama faktörünün değişimi Şekil 3.9’da görüldüğü gibidir. Anlaşılabacağı üzere manyetik alanın artışına bağlı olarak ekranlama

performansı yükselmektedir. Bu değişim, ekrandaki manyetik geçirgenliğin manyetik alana bağlı doğrusal olmayan artışıyla ilgilidir. Düşük alanlarda ekrandaki manyetik geçirgenlik nispeten düşük olacaktır. Eğer alan artırılırsa ekranlama etkinliği artacaktır. Çünkü manyetik geçirgenlik maksimum değer alacaktır. Ekranda geçirgenliğin değiştiği bu bölge Rayleigh bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Fakat çok güçlü alanlarda manyetik geçirgenlik saturasyona girmesi nedeniyle ekranlama etkinliği kötüleşir. Ancak bu durum pratik olarak ekranlama uygulamalarında gerçekleşmez. Çünkü ekran içerisinde manyetik indüksiyon genelde ekranı saturasyona (doymaya) geçirecek seviyelere ulaşmaz.

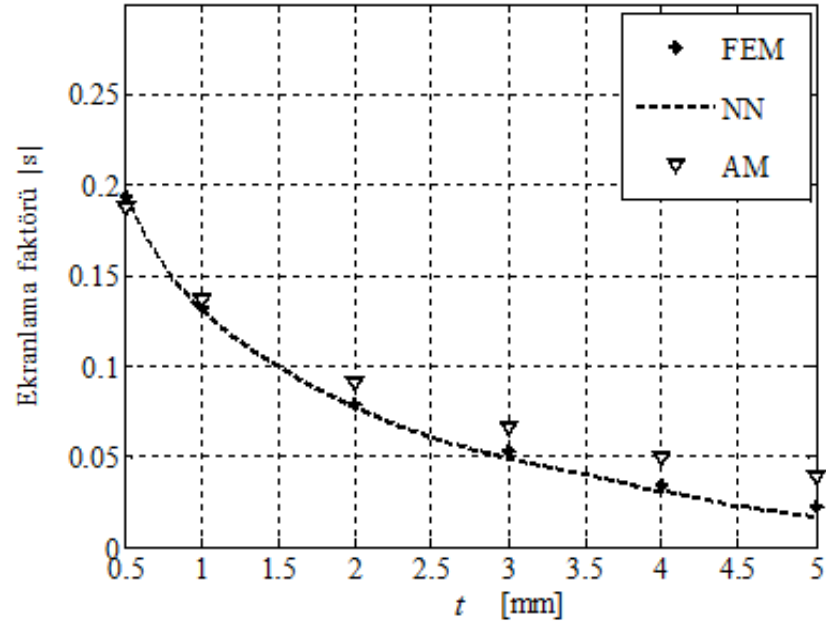


Şekil 3.9 Ekranlama faktörünün uygulanan alanın fonksiyonu olarak AY, SEY, YSA hesaplamaları ve ölçüm sonuçlarına bağlı olarak değişimi ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 4$ ile 318 A/m aralığında değişmekte).

Problemde ki büyüklükler $r = 0,05$ m, $t = 0,5$ mm, $H_0 = 48$ A/m olup frekans 50 Hz ile 10 kHz aralığında değiştirilmiştir. Frekansın fonksiyonu olarak AY, SEY ve YSA'da ki hesaplamalarından elde edilen ekranlama faktörünün değişimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Frekansın artmasıyla birlikte ekranlama performansı artış eğilimindedir. Ancak, bu artış 200 Hz'e kadar olan bölgede neredeyse sabit kalmaktadır. Bu frekans aralığında ekranlama prensibi olarak düşük akı yolu etkisi daha baskındır. 200 Hz'den sonraki bölgede ise ekranlama faktörün değişimi frekansın güçlü bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu bölgede ise ekranlama prensibi olarak girdap akımlarının etkisi daha baskın olmaktadır. İncelenen frekans aralığında tüm yöntemler benzer özellikler gösterir.



Şekil 3.10 Ekranlama faktörünün AY, SEY ve YSA ile frekansa bağlı değişimi ($r = 0,05$ m, $t = 0,5$ mm, $H_0 = 48$ A/m ve $f = 50$ Hz ile 10 kHz aralığında değişmektedir).

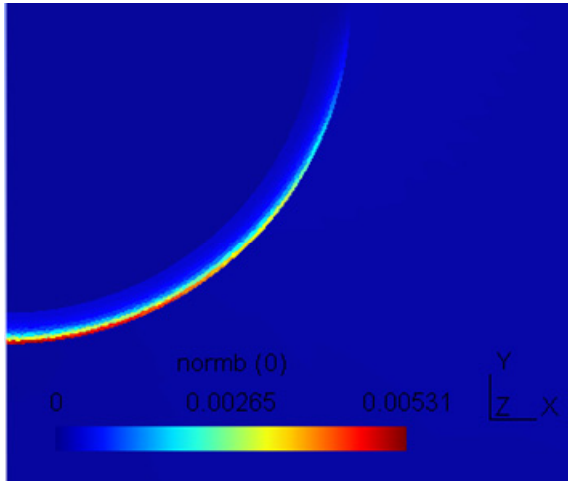


Şekil 3.11 Ekranlama faktörünün AY, SEY ve YSA ile ekran kalınlığına bağlı değişimi ($r = 0,05$ m, $f = 50$ Hz, $H_0 = 48$ A/m ve $t = 0,5$ ile 5 mm aralığında değişmektedir).

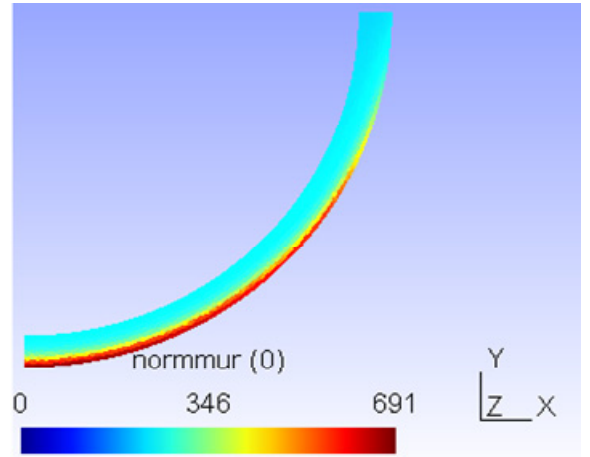
Sistem büyüklükleri $r = 0,05$ m, $f = 50$ Hz, $H_0 = 48$ A/m olup ekran kalınlığı 0,5 mm ile 5 mm aralığında değiştirilmiştir. Bu durumda hesaplamalardan elde edilen ekranlama faktörünün ekran kalınlığına bağlı değişimi Şekil 3.11'de gösterilmiştir. SEY ve YSA yöntemlerinden elde edilen ekranlama faktörünün değişimi benzer özellikler sergilemiştir. Görüleceği gibi

geliştirilen YSA modeli dikkate alınan ekran kalınlığı için iyi bir tahmin yapmaktadır. Ancak, AY diğer yöntemlere göre daha kötü sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum Şekil 3.12 (b)'den de gözleneceği gibi manyetik geçirgenliğin ekran içerisindeki dağılımı ile açıklanır. Bilindiği üzere AY ekrandaki manyetik geçirgenliğin sadece radyal yöndeki değişimini dikkate alabilmekte eksenel yöndeki değişimi dikkate alamamaktadır. Bu sebeplerden ötürü ekran kalınlığının artışına bağlı olarak çözüm doğruluğunu AY'de azalmaktadır.

Ekranlama probleminde $t = 5$ mm, $r = 0,05$ m, $f = 50$ Hz ve $H_0 = 48$ A/m olması durumunda ekrandaki manyetik indüksiyonun değişimi Şekil 3.12 (a)'da aynı durum için ekrandaki manyetik geçirgenliğin değişimi Şekil 3.12 (b)'de gösterilmiştir. Bu şekil SEY'i kullanılarak elde edilmiştir. Görüleceği gibi ekranın dış kısımlarında manyetik indüksiyon seviyesi yüksektir. Manyetik indüksiyon seviyesi, kullanılan ekran parametrelerine bağlı olarak ekranın iç kısmına doğru zayıflayarak azalacaktır. Beklenildiği gibi manyetik geçirgenliğin değişimi de benzer şekilde olmaktadır. Aynı zamanda görüleceği gibi uygulanan manyetik alana bağlı olarak ekrandaki manyetik geçirgenliğin değişimi hem radyal hem de eksenel yönde doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir. Görüldüğü üzere SEY problemin fiziksel özellikleri doğru bir şekilde tanımlanabildiği güçlü bir çözüm tekniğidir.

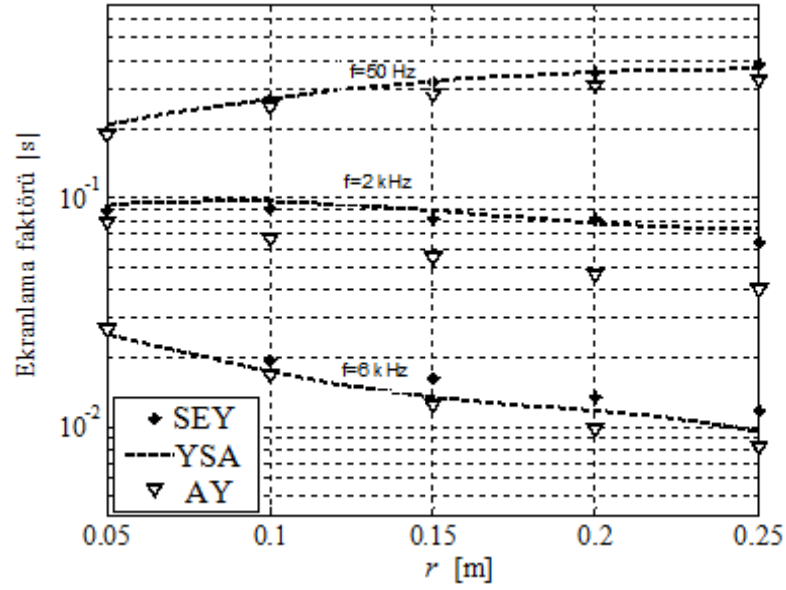


(a)



(b)

Şekil 3.12 SEY ile elde edilen (a) ekrandaki manyetik indüksiyonun değişimi, (b) ekrandaki bağıl manyetik geçirgenliğin değişimi ($t = 5$ mm, $r = 0,05$ m, $f = 50$ Hz, $H = 48$ A/m).



Şekil 3.13 AY, SEY ve YSA hesaplamalarında, ekranlama faktörünün ekran yarıçapı ($r = 0,05$ m ile $0,25$ m aralığında değiştirildi) ve frekansın ($f = 50$ Hz, $f = 2$ kHz ve $f = 6$ kHz) fonksiyonu olarak değişimi ($t = 0,5$ mm ve $H_0 = 48$ A/m).

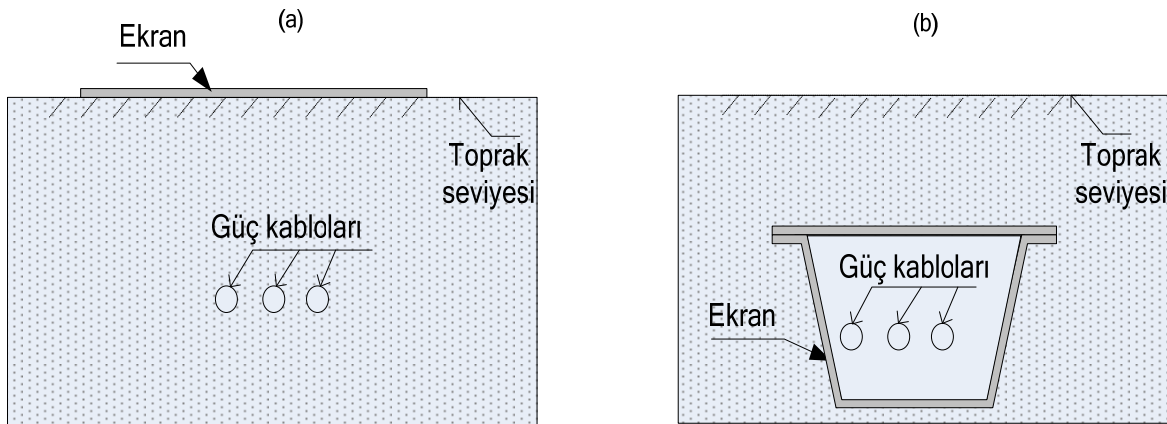
Ekranslama faktörünün ekran yarıçapına bağlı üç farklı frekansta ki değişimi Şekil 3.13'te verilmiştir. Ekran kalınlığı $t = 0,5$ mm ve uygulanan alanın genliği $H_0 = 48$ A/m olması durumunda üç farklı frekans aralığında $f = 50$ Hz, $f = 2$ kHz ve $f = 6$ kHz için hesaplamalar AY, SEY ve YSA yöntemleriyle yapılmıştır. Ekranslama performansı 50 Hz için yarıçapın artmasıyla azalmaktadır. Bu durumda ekranlama prensibi olarak düşük akı etkisinin girdap akımlarına göre daha baskın olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük frekanslarda yarıçapa bağlı olarak ekranlama performansının azalması, manyetik relüktans yolunun ekran boyunca artması ile açıklanır. Yüksek frekanslarda, örneğin 6 kHz'de, ekranlama prensibi olarak girdap akımlarının etkisi daha baskın olmaktadır. Yarıçapın artmasıyla ekran yüzeyi artacak buna bağlı olarak indüklenen akımın artışına bağlı olarak ekranlama performansı artış eğiliminde olacaktır. Yaklaşık olarak 2 kHz civarındaki frekanslarda her iki ekranlama prensibi (düşük akı yolu oluşturma, girdap akımı) aşağı yukarı aynı katkıyı sağladığı gözlenmiştir. Bu frekans aralığı civarında ekran yarıçapının değişiminin ekranlama etkinliği üzerinde fazla bir etki oluşturmadığı görülmüştür. YSA yönteminin ekran yarıçapına göre olan çözümü kabul edilir doğruluktur. AY'in ise küçük ekran çaplarında, büyük ekran çaplarına göre daha doğru sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

4. YER ALTI KABLOLARININ EKRANLANMASININ MODELLEME VE BENZETİM YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ

Sanayi tesislerinin artması, teknolojik gelişmeler ve toplumlardaki modernleşmeye bağlı olarak elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artarak devam etmektedir. Enerjinin üretildiği yerden tüketiciye ulaştırılmasında iletim hatları kullanılmaktadır. Talep edilen yüksek güçlü bu enerjinin uzak noktalara aktarılmasının en etkin yolu gerilim seviyesini yükselterek enerjinin taşınmasıdır. Bu şekilde en az iletim kaybıyla enerjinin aktarılması gerçekleştirilmektedir. Bunun için genellikle üretim noktasından tüketiciye enerjinin ulaştırılmasında havai iletim ve dağıtım hatları kullanılmaktadır. Ancak çevresel etkiler, güvenlik problemleri, yerleşim yerlerindeki nüfusun artması ve modernleşmeye bağlı olarak enerji iletim ve dağıtımın yer altından yapılması artarak devam etmektedir. Özellikle birçok şehirde, kalabalık ve modern yerleşim yerlerinde enerji dağıtım hatlarıyla yer altından yapılmaktadır.

4.1 Yüksek Gerilim Yer Altı Kabloların Ekranlanması

Hatırlanacağı gibi manyetik alan ekranlama; ya manyetik alana maruz kalan bir bölgeyi ya da manyetik alana neden olan kaynağı ekranlayarak gerçekleştirilmektedir. Yer altı kablolarının ekranlamasında açık ve kapalı olmak üzere iki ekran topolojisi kullanmak mümkündür. Açık ekranlamada ekranlar kabloların üzerine düzlemsel plakalar yerleştirilerek gerçekleştirilir. Diğerinde ise kabloların etrafı ekran malzemeleri ile kapatılacak şekilde gerçekleştirilir. Şekil 4.1’de yer altı kablolarını ekranlanmasında (a) açık ekran (b) kapalı ekran topolojisi gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Yer altı kablolarını ekranlanmasında (a) açık ekran (b) kapalı ekran topolojisi.

Yüksek gerilim yer altı kabloları ekranlanması için açık ekran ve kapalı ekran topolojisiyle yapılan çalışmada, kapalı ekranlama durumunun açık ekranlamaya göre daha etkin bir ekranlama sağladığı gösterilmiştir (Wulf vd., 2007). Açık ekranlama topolojisinde ekran boyutlar genişliğinin ve ekran kalınlığının artması ekranlama performansını artırmaktadır. Ayrıca ekran geometrisinin kompleksleştirilmesiyle ekranlama etkinliği arasındaki ilişki ortaya konulmuştur (Cardelli vd., 2010). Özellikle ferromanyetik malzemelerle yapılan ekranlamada, ekranların bağlı manyetik geçirgenliği manyetik alan şiddetiyle artması nedeniyle kaynağa yakın olan kapalı ekranlama topolojisi daha çok tercih edilmektedir.

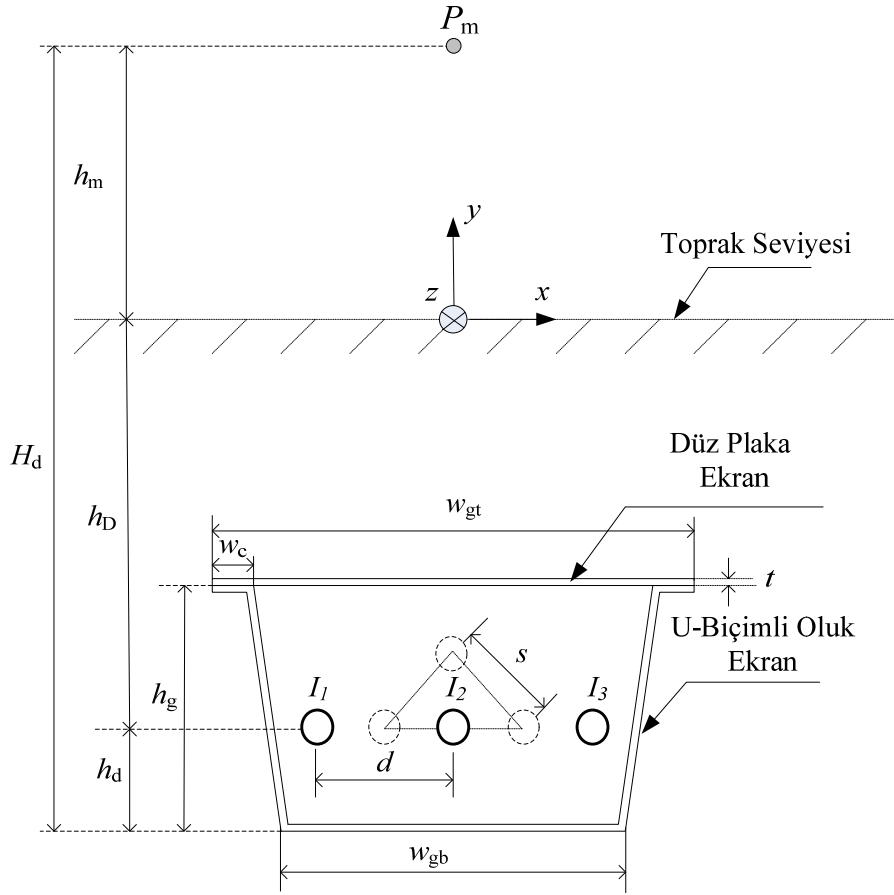
Bu bölüm kapsamında, yüksek akım taşıyan yer altı kablolarının manyetik alan ekranlanması problemi bakımından detaylıca incelenmiştir. Problem manyetik alan kaynağının ekranlanmasına bir örnek teşkil etmektedir. Yer altı kablolarının ekranlanması modelleme ve benzetim yöntemi tekniği kullanılarak incelenmiştir. Karmaşık ekran ve kaynak geometrisine sahip ekranlama problemlerini analitik yöntemlerle çözmek oldukça zor, hatta bazen imkansızdır. Bu tür problemlerin çözümünde yaklaşık çözüm sunan sayısal teknikler kullanılır. SEY, manyetik alan ekranlanması problemlerin doğrusal olmayan etkilerinin de modellenbildiği başarılı ve güçlü bir çözüm tekniğidir. Bu nedenle problemin çözümünde tercih edilmiştir.

4.2 Ekranlama Probleminin Tanımı

Yüksek akım taşıyan kabloların neden olduğu istenmeyen yüksek seviyeli manyetik alanları azaltmanın en etkin yollarından birisi pasif ekranlama yapmaktır. Pasif ekranlama, kaynakla ekranlanması istenen bölge arasına ekran malzemesi yerleştirerek kaynak tarafından oluşturulan alanı yok etmeyi veya azaltmayı hedef alan bir uygulamadır. Genelde yüksek iletkenlikli ve/veya yüksek manyetik geçirgenlikli malzemeler kullanılmaktadır. Ekranlama probleminin performansı ölçütü olarak ekranlama faktörü kullanılır. Ekranlama faktörü, aynı noktadaki ekranlı alan seviyesinin, ekranlama öncesi alan seviyesine oranı şeklinde;

$$|s| = |B_s| / |B_0| \quad (4.1)$$

eşitlik (4.1)'deki gibi tanımlanır. Burada, B_s ekranlama sonrası manyetik akı yoğunluğu, B_0 ekranlama öncesi manyetik akı yoğunluğu olup s değeri, 0 ile 1 arasında değişmektedir. Eğer bu değer yaklaşık 0 ise mükemmel bir ekranlama 1 ise herhangi bir ekranlama etkisinin gözlenmediği anlamındadır.



Şekil 4.2 Üç fazlı yer altı kabloları ve ekranların xy-düzlemindeki geometrik yerleşimi.

Şekil 4.2’de üç fazlı yer altı kabloları ve ekranların xy-düzlemindeki geometrik yerleşimi görülmektedir. Bu düzen, gerçek bir uygulamadaki yerleşim düzenine karşılık gelmektedir. Yüksek akımın taşıyan güç kabloları, U-biçimli oluk ekran içerisine yerleştirilerek ve üzeri düz ekranla örtülerek manyetik ekranlama gerçekleştirmektedir. Kablolar, yerleştirilme düzeni göre düz veya üçgen biçiminde olabilirler. Ekran içerisindeki kesikli daireler üçgen yerleşimli kablo düzenini temsil eder. Düz kalın çizgili daireler ise kabloların düz şekilde yerleştirilmesini temsil etmektedir.

4.3 Yer Altı Kablolarının Ekranlanmasında Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanımı

Bu bölümde, yer altı kabloların ekranlaması çözümlerinde, sonlu elemanlar programı olan ”COMSOL Multiphysics, Version 3.5a” kullanılmıştır. Bu yazılım, fizik tabanlı sistemlerin benzetim ve modellemesinde kullanılan bir mühendislik, tasarım ve sonlu eleman analiz yazılımıdır. Esnek ve basit kullanım özelliği sayesinde karmaşık problemler rahatlıkla modellenebilmektedir. Ayrıca sürüm 3.5a’da MATLAB’le birlikte çalışabilen COMSOL

Script özelliği bulunmaktadır. Bu özellik, programın kodlarla yazılabilesine olanak sağlamaktadır. Böylece, parametrik modelleme çalışmaları daha kolay ve hızlı yapılabilmektedir.

Elektromanyetik problemlerin çözümü Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Bu denklemler Faraday, Maxwell-Amper, Gauss ve Manyetik Gauss yasası olmak üzere dört temel biçimle ifade edilebilmektedir. Maxwell denklemleri diferansiyel biçimde;

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.5)$$

eşitlikleriyle ifade edilir. Burada, E elektrik alan, B manyetik akı yoğunluğu veya manyetik indüksiyon, H manyetik alan şiddeti, J akım yoğunluğu, D elektriksel akı yoğunluğu ve ρ elektriksel yük yoğunluğunu göstermektedir. Bu denklemler, genel Maxwell denklemleri olup elektromanyetik alan probleminin türüne göre türetilir.

Yer altı kablolarının ekranlaması hesaplamalarında iki boyutlu (2B) zaman-harmonikli (time-harmonic) manyetodinamik SEY modeli kullanılmıştır. Manyetodinamik 2B SEY modelinin formülasyonun Maxwell denklemlerinden türetilmesi aşağıdaki gibidir. Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan arasındaki ilişki;

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.6)$$

eşitlik (4.5) ile ifade edilir. Aynı zamanda, manyetik alan yoğunluğu manyetik vektör potansiyeli ile birlikte;

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4.7)$$

eşitlik (4.7)'deki gibi yazılır. Eşitlik (4.7) eşitlik (4.5)'de yerine yazılırsa;

$$\nabla(\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (4.8)$$

eşitlik (4.8)'deki biçimi alır. Manyetodinamik problemlerde, deplasman akımı diğer

büyükliklere göre çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. Bu durumda eşitlik (4.2) yeniden düzenlenir ve manyetik alan şiddeti yerine (4.6)'daki ifade yerine yazılırsa;

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \vec{B} = \vec{J} = \vec{J}_e + \sigma \vec{E} \quad (4.9)$$

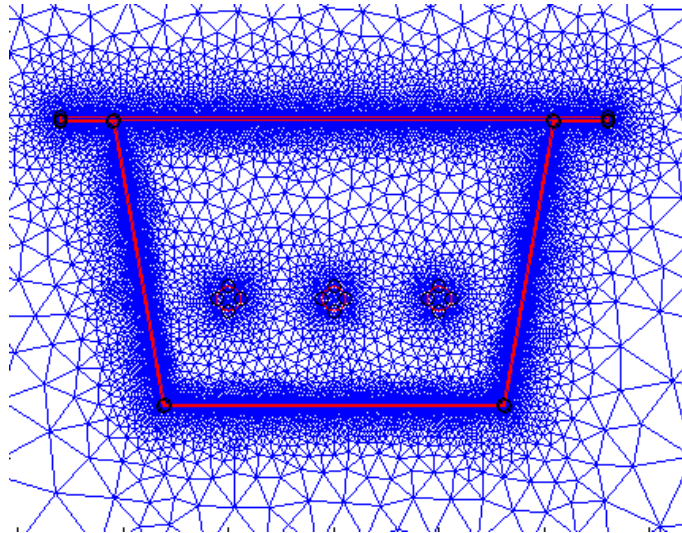
eşitlik (4.9) elde edilir. Eşitlik (4.1)'de manyetik akı yoğunluğunun yerine eşitlik (4.7) yazılırsa ve eşitlik zaman harmonikli biçimde yeniden düzenlenirse elektrik alan şiddeti;

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} \quad (4.10)$$

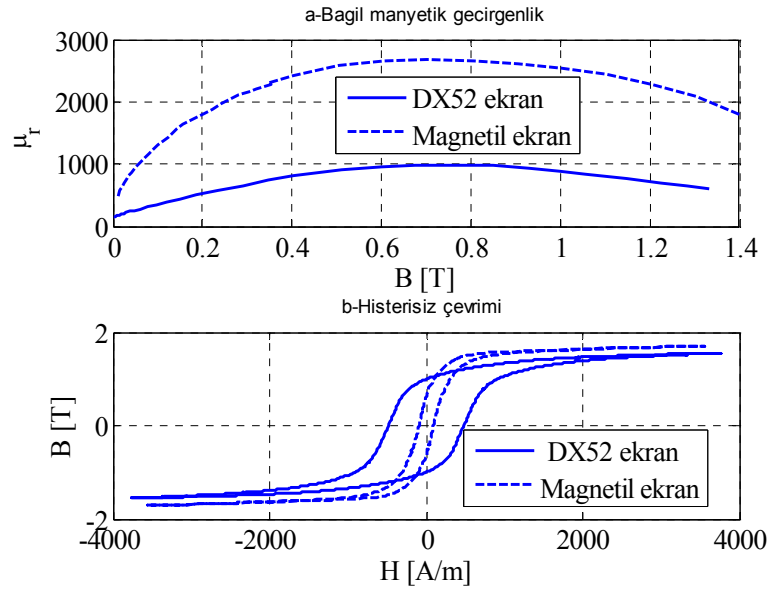
eşitlik (4.10)'daki biçimi alır. Son olarak eşitlik (4,9)'de manyetik akı yoğunluğu eşitlik (4.7) ve elektrik alan şiddeti yerine (4.10)'daki eşitlik konursa;

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + j\omega\sigma \vec{A} = \vec{J}_e \quad (4.11)$$

eşitlik (4.11) elde edilir. Bu problem için 2B SEY modeli eşitlik (4.11)'daki formülasyonu kullanır. Burada, J_e dış akım yoğunluğu olup ve manyetik vektör potansiyeli $\mathbf{A} = A_z \mathbf{1}_z$ sistem bilinmeyenidir. Modellenen sistemde, ekran ve etrafındaki boşluktaki ağ yoğunluğuna ilişkin bir örnek Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Bu model için, 2B SEY 137881 serbestlik derecesine (degrees of freedom) sahiptir. Görüldüğü gibi yer altı kablolarının meydana getirdiği alan seviyesini düşürmek için kablolar U-biçimli oluk ekran içerisine yerleştirilir, sonra bu ekranın üzeri başka düz bir ekranla örtülerek ekranlama tamamlanmaktadır.



Şekil 4.3 Üç fazlı yer altı kabloları ve ekrandan oluşan 2B SEY'in ağ yoğunluğuna ilişkin bir örnek.



Şekil 4.4 Ferromanyetik malzemelerinin manyetik özellikleri a- bağıl manyetik geçirgenliğine manyetik akı yoğunluğuna göre değişimi b- BH düzleminde histerisiz çevrimleri.

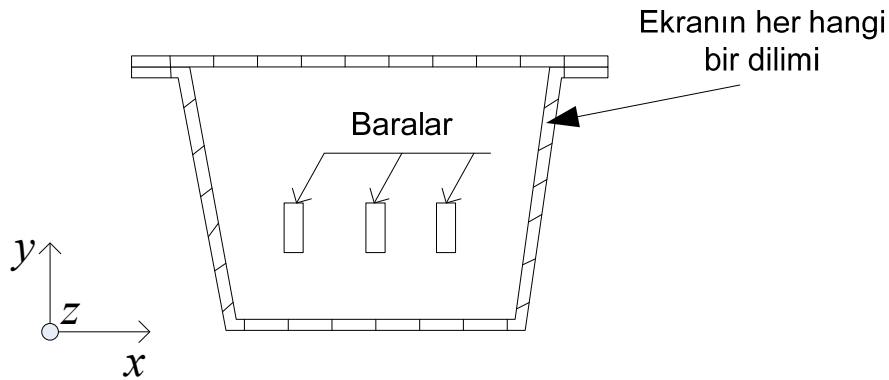
Simülasyon çalışmaları boyunca, üç farklı ekran malzemesi dikkate alınmıştır. Bunlardan ikisi Magnetil ve DX52 olarak isimlendirilmiş ferromanyetik malzemelerdir. Bu iki ferromanyetik malzeme ArcelorMittal firması tarafından üretilmiş ticari kullanımlı malzemelerdir. DX52 malzemesi sıcak haddelenmiş galvanizli demir olan bir malzemedir. Magnetil malzemesi ise oldukça düşük karbonlu bir çelik malzeme olup; düşük artık mıknatıslanma, düşük manyetik alanlarda yüksek manyetik geçirgenlik ve yüksek doyum gibi spesifik manyetik karakteristiğe sahip bir malzemedir. Bu iki ferromanyetik malzeme uygulanan alanın şiddetine bağlı doğrusal olmayan manyetik geçirgenliğe sahiptirler. Malzemelerin manyetik geçirgenlikleri, Epstein çerçeve deney düzeneği yardımıyla yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. Histerisiz çevrim eğrileri, DX52 için 0,5 Hz'lik frekansta, Magnetil için 0,2 Hz'lik frekansta statik durumdaki ölçümlerden manyetik alan şiddetinin tek değerli tepe değerlerinden elde edilmiştir. Bu iki malzeme için, manyetik akı yoğunluğuna bağlı bağıl manyetik geçirgenliğinin değişimi ve ölçülen histerisiz çevrimleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Bu malzemelerin elektriksel iletkenlikleri ise iletkenlik ölçüm deney seti aracılığıyla ölçülmüştür. DX52 malzemesi için iletkenlik değeri $6,48 \text{ MS/m}$ olarak belirlenmişken bu değer Magnetil malzeme için $8,50 \text{ MS/m}$ olarak ölçülmüştür. Diğer bir ekran malzemesi olan tipik alüminyumun malzemesi kullanılmıştır. Yüksek iletkenlikli ferromanyetik olmayan bir malzeme olup bağıl manyetik geçirgenliği $\mu_r = 1$ ve elektriksel iletkenliği $\sigma = 36 \text{ MS/m}$ olarak bilinmektedir.

4.4 2B Sonlu Elemanlar Yöntemli Devre Yöntemi

Bu yöntemin amacı, sonlu uzunluklu ekranlar arası oluşan kontak direncini dikkate alarak yaklaşık bir çözüm tekniği ortaya koymaktır. Devre Yöntemi (DY) ekranlardaki kontak direnci etkisini hesaba katmak için elektriksel bir devre modelinin 2B SEY ile birlikte çalıştırılması esasına dayanır. Bu yöntemde SEY’i iki modellemeden oluşur. İlk olarak, Şekil 4.5’den de görüleceği gibi ekran modeli parçalara bölünmüş dilimler şeklinde modellenir. Bu parça dilim üzerinde zamanla değişen akılar nedeniyle bir gerilim indüklenecektir. Örneğin birinci dilim üzerinde V_1 gerilimi oluşacaktır. Bu parçalı şekilde modellenen 2B SEY modelinde, her hangi bir dilim üzerindeki elektrik alanın, o dilime ait yüzey büyüklüğüne bölünmesiyle, o dilim üzerindeki V_i gerilimi hesaplanır. Aynı şekilde, her bir yüzeydeki akım yoğunlukları SEY modelinden rahatlıkla hesaplanır. Dilimlerin empedansları;

$$Z_{fi} = \frac{V_i}{I_i} \quad (4.12)$$

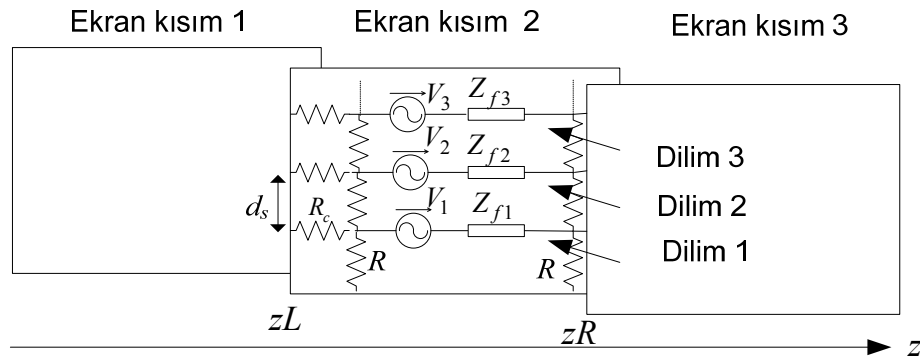
eşitlik (4.12) yardımıyla hesaplanır. Burada, Z_{fi} i . dilimin empedansı, V_i i . dilimdeki gerilim düşümü, I_i i . dilimdeki akımın büyüklüğünü göstermektedir. Hesaplanan bu değerler, modellenen 2B SEY’den elde edilmiş olduğundan dalma derinliğini de dikkate alır.



Şekil 4.5 2B SEY modelinin dilimlerden oluşmuş parçalar şeklinde modellenmesi.

İkinci olarak, kontak direnci etkisini dikkate alan yeni bir 2B SEY modeli tanımlanmıştır. Yine aynı şekilde parça dilimler şeklindeki modelde her dilim bir akım yüzeyi şeklinde düşünülmüştür. Yeni modeldeki yüzeylere devre modeli yardımıyla hesaplanan akımlardan elde edilen akım yoğunluğu değerleri girilir. Kontak direncini ihtiva eden devre modelinin prensip şemasının temsili gösterimi Şekil 4.6’dan görülmektedir. Burada R_c direnci bitişik ekran kısımları arasında meydana gelen kontak direncini temsil etmektedir. Eğer kontak

direnci çok yüksek ise, bunun anlamı ekran kısımları arasında elektriksel bir temas yoktur. Kontak direnci sonsuz büyüklüğe sahiptir. Böyle bir durumda, her bir ekran kısmında oluşan girdap akımları neticesinde oluşan sirkülasyon akımları o ekran kısmı içerisinde dolaşır. Bu durumda d_s uzunluğu boyunca oluşan direnç R olarak tanımlanır. Eğer ekranlar arasında mükemmel bir temas sağlanırsa ekran kısımları üzerinde oluşan sürkilasyon akımları bir ekrandan diğerine doğru akacaktır. Bu durumda kontak direnci oluşmayacak ve aynı zamanda her bir ekran kısmındaki d_s uzunlu boyunca her hangi bir direnç oluşmadığı varsayılır.



Şekil 4.6 Devre modelinin prensip şemasına ilişkin temsili gösterim.

Şekil 4,6'dan hareket ederek, akım enjekte edilecek ikinci 2B SEY için elektriksel eşdeğer devre modeli Şekil 4.7'deki gibi modellenir. Bu model ekran kısımları arasındaki kontak direnci etkisini dikkate alır. Kontak direncini dikkate almak için enjekte edilecek akımların yeni değerlerini ilk önce hesaplamak için toplam empedans hesaplanır. Her bir kolda R ve R_c arasındaki paralellikten eşdeğer direnç;

$$R_e = \frac{R \cdot R_c}{R + R_c} \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.13) ile hesaplanır. Buradan eş değer empedans;

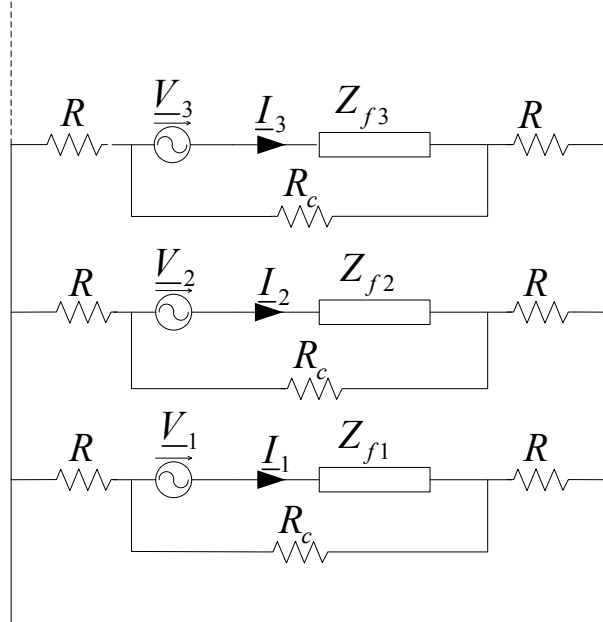
$$Z_i = R_e + Z_{\hat{f}} \quad (4.14)$$

eşitlik (4.14) kullanılarak hesaplanır. Hesaplanan bu toplam empedansın V_i gerilimine bölünmesiyle;

$$I_{ei} = \frac{V_i}{Z_i} \quad (4.15)$$

eşitlik (4.15) gibi bir dilime enjekte edilecek akım değerleri hesaplanmış olacaktır.

Daha öncede bahsedildiği gibi ekranlar arası mükemmel kontak olması durumunda temas noktaları arasında her hangi bir direnç oluşmayacağı için $R_c = 0$ kabul edilir. Bütün akımlar ekran kısımları boyunca (z-boyunca) akar. Buna bağlı olarak d_s uzunluğu boyuncada bir direnç oluşmaz. Böyle bir durumda her bir dilim üzerinde oluşan akımlar birinci 2B SEY modelinden tahmin edilen akıma eşit olur ($I_i = I_{ei}$). Fakat kötü kontak durumunda, yani ekran kısımları arasında iyi bir temas olmadığında kontak direnci $R_c > 0$ olacaktır. Bu şartlar altında Şekil 4.7'deki eş değer devre modeli yardımıyla kontak direnci etkisini dikkate alan yeni akım değerleri hesaplanır. Enjekte edilecek akımların yeni değerleri I_{ei} olarak gösterilmiştir. Elde edilen bu akım değerleri 2B SEY'e uygulanır. Modellemede en önemli husus R_c ve R değerlerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Bu direnç değerlerinin nasıl tahmin edildiğine ilişkin ayrıntılar deneysel çalışmaların incelendiği Bölüm 5'de kontak direnci etkisinin ekranlama üzerindeki etkisinin açıklanması kısmında detaylıca verilecektir. Önerilen bu yöntem sayesinde, kontak direncinin ekranlamaya olan etkisi eşdeğer devre yöntemiyle birlikte kullanılan 2B SEY ile çözülmüştür ve ekranlar arasında oluşan kontak direncinin ekranlamaya olan etkisi gözlenmiştir.



Şekil 4.7 Akım enjekteli 2B SEY için elektrik eşdeğer devre modeli.

4.5 Manyetik Alanların Azaltılması İçin Benzetim Çalışmaları

Yer altı kablolarının neden olduğu manyetik alanların azaltılması için benzetim incelemeleri hem ekransız hem de ekranlı durumlar için gerçekleştirilmiştir. Benzetimi gerçekleştirilecek sistemin geometrik yerleşimi Şekil 4.2’de, ekranlamaya ait parametreler ve onların büyüklükleri ise Çizelge 4.1’den verilmiştir. Kullanılan kablo elemanları dairesel kesitli ve her bir iletken kablo 1600 mm^2 kesit alanına sahiptir. Simülasyonlar boyunca gerçek yaşamda olabilecek ölçeklendirmeler kullanılmıştır. Bu şekilde elde edilen sonuçlardan, gerçek yaşam uygulamaları ile ilgili fikirler elde etmek mümkün olacaktır.

Yapılan çalışmada, problem daha çok manyetik alanlar yönünde incelediği için toprağın elektriksel özellikleri dikkate alınmamış ekran dışında kalan bölgenin tanımlanmasında boşluğa ait elektriksel ve manyetik özellikler kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları kapsamında ilk önce ekransız durum incelenmiştir. Bu durumda alan seviyesinin azaltılması için neler yapılabileceği gösterilmiştir. Daha sonra alüminyum, DX52 ve Magnetil gibi üç farklı ekran malzemesinin kullanılarak ekranlama benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Üç değişik ekran malzemesinin ekranlama etkinliği ve onun bağlı olduğu bazı elektriksel ve fiziksel parametreler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Sistem üç fazlı ve dengeli akımlardan oluşan, 50 Hz’lik şebeke frekansına sahip olduğu kabul edilmiş ve benzetimler bu şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Ekran malzemelerinin manyetik özellikleri kullanılan malzeme türüne göre doğrusal veya doğrusal olmayan özelliklere sahip olabilmektedir. Ekran malzemesi özellikleri 2B SEY modelinde doğrusal veya doğrusal olmama durumuna göre tanımlanmıştır. Yani ferromanyetik malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri model içerisine katılmıştır. Böylelikle, hesaplamalarda bağlı manyetik geçirgenliğin manyetik alana bağlı değişimi de dikkate alınmıştır. Bu durumda SEY doğrusal olmayan iteratif çözüm yapmaktadır. Ferromanyetik olmayan yüksek iletkenlikli malzemelerde ise malzeme özellikleri sabit değerli olup çözümlemelerde buna göre yapılmaktadır. Benzetim çalışmalarında kullanılan ekran malzemelerine ait elektriksel ve manyetik özellikler o malzemelere ait gerçek verilerdir. İletkenlik değerleri uygun hazırlanmış numulardan iletkenlik ölçüm deney seti yardımıyla, manyetik özelliklerinin tespiti ise Epstein çerçevesiyle yapılan deneysel ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir.

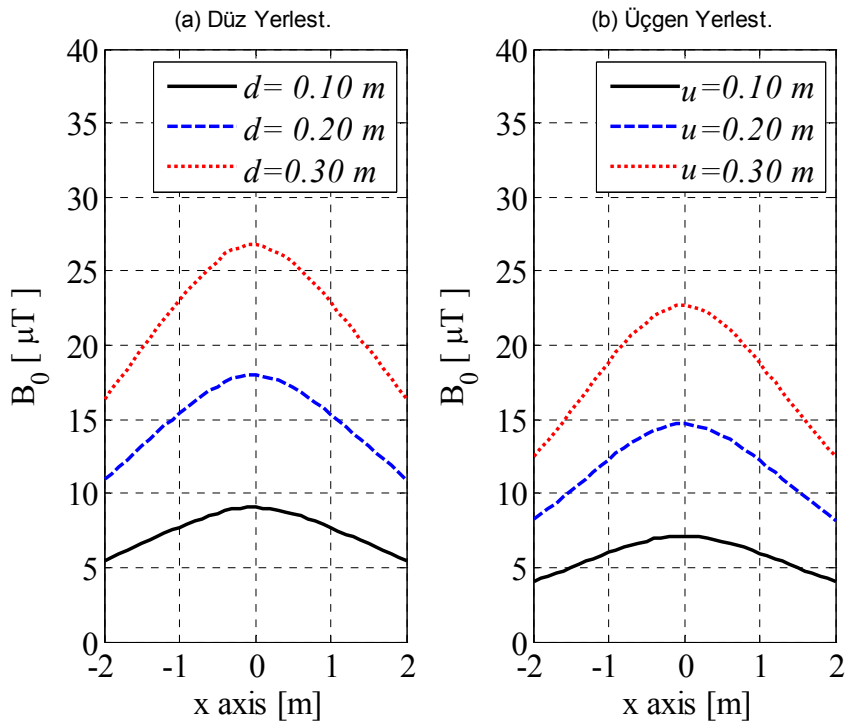
Çizelge 4.1 Yer altı kablolarının benzetimde manyetik ekranlamaya ait parametre ve büyüklükler.

Parametre	Büyüklüğü	Tanımı
h_m	1,00 m	Gözlem noktasının yerden yüksekliği
h_D	1,30 m	Kabloların gömülme derinliği
h_d	0,20 m	Kablolarla ekranın dibi arasındaki mesafe
H_d	2,00 m	Gözlem noktasından ekranın dibine olan toplam uzaklık
h_g	0,532 m	U-Biçimli oluk ekranın yüksekliği
w_{gt}	1,040 m	U-Biçimli oluk ekranın üst kenar genişliği
w_{gb}	0,650 m	U-Biçimli oluk ekranın alt kenar genişliği
w_c	0,10 m	U-Biçimli oluk ekranın kelepçe genişliği
t	3 mm	Ekranın kalınlığı
d	0,20 m	Düz kablo yerleşiminde kablolar arası mesafe
s	0,20 m	Üçgen kablo yerleşiminde kablolar arası mesafe
I_1, I_2, I_3	1500 A (rms)	Her bir faz akımının genliği

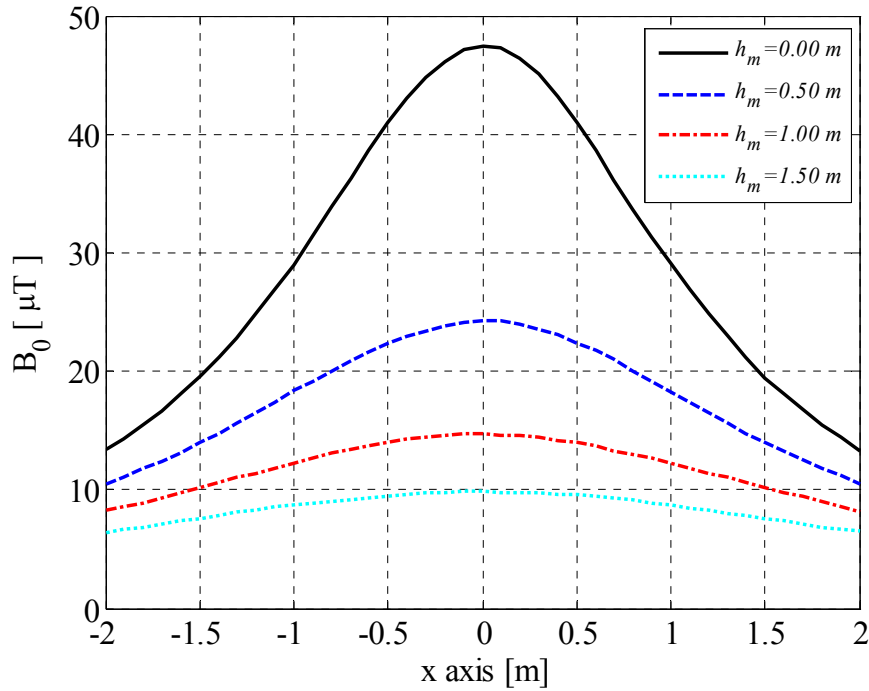
4.5.1 Ekransız Durum

YG yer altı kabloları düşük frekanslı istenmeyen manyetik alanlar üretirler. Bunların üretmiş olduğu manyetik indüksiyon seviyeleri μT seviyelerinde olup kablolarla yakın bölgelerde daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Bu alanın büyüklüğü kablolardaki akımın seviyesine, kablolar arasındaki mesafeye, kabloların yerleşim şekline ve gözlem noktasına olan uzaklığa göre değişmektedir. Ekranlama gerçekleştirilmeden önce, manyetik alan seviyesini makul bir düzeye çekilip çekilemeyeceğinin araştırılması önemlidir. Bu kapsamda, ekransız durum için kablolar arası mesafe ve manyetik alan kaynağına olan uzaklığa bağlı bazı benzetim çalışmaları yapılmıştır.

İlk önce ekran olmaması durumdaki hesaplamalar 2B SEY’i kullanarak yapılmıştır. İndüksiyon alan seviyesinin kablolar arası mesafe, kablo yerleşim düzeniyle olan ilişkisi araştırılmıştır. Alan seviyesinin kablolar arasındaki uzaklığa göre, kablo (a) düz ve (b) üçgen yerleştirilme durumunda x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun değişimi Şekil 4.8’de görülmektedir. Burada; hesaplama yüksekliği $h_m=1$ m, kabloların gömülü derinliği $h_D=1,30$ m iken sistem üç fazlı dengeli ve her bir fazdan geçen akımın genliği 1500 A rms değerine sahiptir. Bu şekil göstermektedir ki oluşan indüksiyon alan seviyesi hem kablolar arasındaki uzaklık ile hem de kabloların yerleşim biçimi ile ilişkilidir. Görüleceği gibi kablolar arası mesafe yaklaştıkça alan seviyesinde önemli bir azalma meydana gelmektedir. Kabloların yerleştirme biçimi de bu alan seviyesini etkilemektedir. Örneğin kablolar arası mesafenin eşit olduğu $u = d = 0,2$ m durumunu dikkate alalım. Burada kabloların düz yerleştirilmesi durumu için manyetik akı yoğunluğu maksimum değeri $18,03 \mu\text{T}$ olarak hesaplanırken, üçgen yerleşim durumunda bu değer $14,70 \mu\text{T}$ olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak YG yer altı kablolarında ekransız bir durum için üçgen yerleşim kabloların düz yerleşime göre yaklaşık olarak % 18 daha fazla bir azaltma sağlamaktadır.



Şekil 4.8 Kablolar arası uzaklığa göre (a) düz yerleştirme düzeni (b) üçgen yerleştirme düzeni durumunda x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun dağılımı.



Şekil 4.9 Ekransız durumda toprak yüzeyinden farklı yüksekliklerde x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun değişimi.

Dış ortamda oluşan manyetik alan seviyesini etkileyen diğer önemli büyüklükten biriside alan kaynağına olan uzaklıktır. Toprak seviyesinden farklı yüksekliklerde x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun Şekil 4.9’de gösterilmektedir. Hesaplamalar aynı şekilde SEY aracılığı ile yapılmıştır. Kabloların yerleştirme düzeni üçgen yerleşimdir ve kablolar arası mesafe 0,20 m dir. Şekilden görüleceği gibi gözlem noktasının yüksekliği artıkça manyetik indüksiyon seviyesinin değeri de ona göre güçlü bir şekilde azalmaktadır. Örneğin, gözlem noktası yüksekliği $h_m=0$ m olması durumunda indüksiyon seviyesi 47,41 μT iken, buna karşı $h_m=1,5$ m olmasında alan seviyesi 9,75 μT olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, yüksek akım kablolarının neden olduğu alan seviyeleri önceden hesaplanmalıdır. Alan seviyesini azaltmak için, kabloların yerleşim düzeni, kablolar arası mesafe ve etki noktasına olan uzaklık dikkate alınarak durum değerlendirilmeli ve ona göre yeniden tasarım yapılmalıdır.

4.5.2 Ekranlı Durum

Yüksek gerilim (YG) yer altı kablolarının üretmiş olduğu düşük frekanslı manyetik alanların azaltılması son yıllarda büyük dikkat çekmektedir. Özellikle kabloları yakın bölgelerde bu alan seviyeleri yüksek olmaktadır. Bu istenmeyen alanlar elektrik-elektronik donanımlar

üzerinde girişim etkisi meydana getirebilir ve duyarlı cihazların çalışmasını olumsuz yönde etkileyebilir. Bununla birlikte yüksek alanlara maruz kalınması durumunda insan sağlığını olumsuz yönde etkilenileceği üzerine de kaygılar vardır. Manyetik alan kaynağının yaşam ve çalışma ortamlarına olan maruziyetine, etki edebileceği hassas elektrik-elektronik ekipmanların varlığına bakılarak manyetik alan seviyeleri yeniden değerlendirilmelidir. Gerekli görülmesi durumunda manyetik ekranlama yapılmalıdır.

Bu kısım kapsamın üç fazlı yüksek akım taşıyan yer altı kablolarının ürettiği dış manyetik alanları azaltmak için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetimi gerçekleştirilen YG yer altı kablosuna ait ekran boyutlarının ölçüleri ve diğer büyüklükler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Üç farklı ekran malzemesinin ekranlama etkinliği irdelenmiştir. Bu malzemelerden birisi iyi iletkenlikli bir malzeme olan alüminyumdur. Diğer ikisiyse Magnetil ve DX52 olarak adlandırılan ferromanyetik malzemelerdir. Bu iki ferromanyetik malzeme ArcelorMittal firması tarafından üretilmiş malzemelerdir. DX52 malzemesi sıcak haddelenmiş galvanizli demir olan bir malzemedir. Magnetil malzemesi ise oldukça düşük karbonlu bir çelik malzeme olup düşük artık mıknatıslanmaya, düşük manyetik alanlarda yüksek manyetik geçirgenliğe ve yüksek doyum gibi spesifik manyetik karakteristiğe sahip bir malzemedir. Bu üç farklı malzemenin aynı koşullarda ekranlama etkinlikleri incelenmiştir. Aynı zamanda ekran ölçüsünün, ekran kalınlığının ve kablolardan geçen akımın genliğinin ekranlama etkinliği üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

4.5.2.1 Ekran Malzemesi ve Kabloların Yerleşim Düzeninin Ekranlama Etkinliği Üzerindeki Etkisi

Üç farklı özelliğe sahip ekran malzemesinin (alüminyum, DX52 ve Magnetil) yer altı kabloların ekranlanmasındaki performansları, kabloların yerleştirme düzeni ve kullanılan ekranın malzemesi türüne göre incelenmiştir. Üç fazlı akımlar arasındaki faz farkı 120^0 olup akımların genliği 1500 A rms değerine sahiptir. Kablolar arası uzaklık hem düz hem de üçgen yerleşim durumunda 0,2 m olarak alınmıştır. Kullanılan ekranların kalınlığı ise 3 mm dir. Diğer büyüklükler ve ekran ölçüleri Çizelge 4.1’de verildiği gibidir.

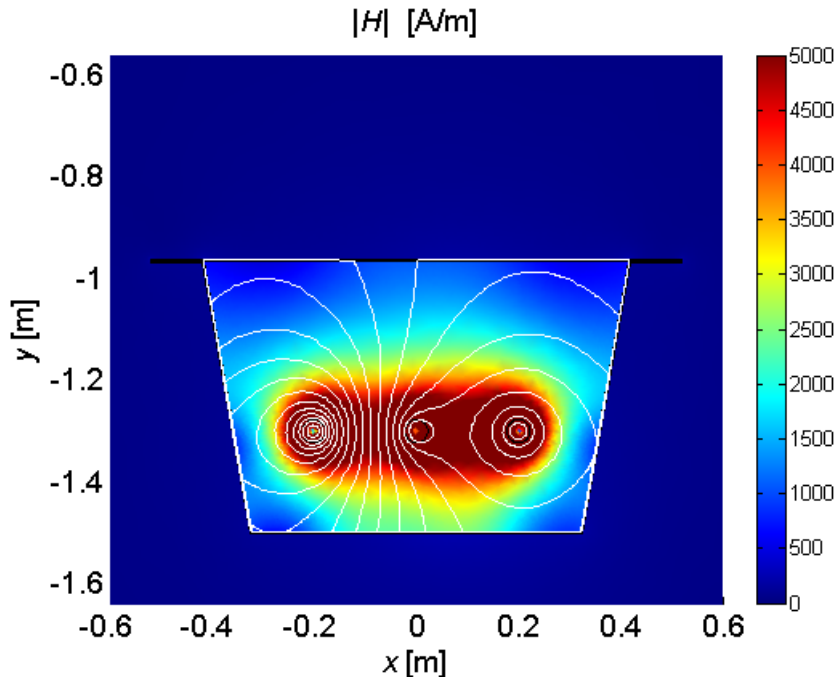
Yapılan benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Tüm hesaplamalar SEY ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen geometri ve ekran parametrelerine göre, ekranlama performansı bakımından malzemeler Magnetil, alüminyum ve DX52 ekran olarak sıralanmaktadır.

Kabloların yerleştirilme düzenine göre performans karşılaştırması yapılmıştır. Kabloların düz yerleştirilmesi durumu üçgen yerleştirilmeye göre ekranlama etkinliği açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. Düz yerleştirilmiş kablo düzeninde Magnetil malzemesiyle yapılan ekranlamada, manyetik indüksiyon seviyesinde ortalama olarak yaklaşık 101 kat azalma sağlanırken, kabloların üçgen yerleştirilmesi durumunda ki bu azalma 61 kat olarak tespit edilmiştir. Bu durum alüminyum ekran için düz yerleşimde ortalama olarak yaklaşık 15 kat iken, kabloların üçgen yerleştirilmesinde 10 kat olarak hesaplanmıştır. Son olarak DX52 ekran malzemesi için düz yerleşim için ortalama olarak yaklaşık 11 kat azalma sağlanırken, üçgen durumda manyetik alandaki azalma 7 kat olarak gözlenmiştir. Görüldüğü gibi kabloların düz bir biçimde yerleştirilmiş olması manyetik alanın azaltılması bakımından üçgen yerleşime göre daha iyi sonuçlar vermesinin nedeni düz yerleştirilme durumunda kabloların ekrana olan yakınlığı ile açıklanır. Çizelge 4.2'den anlaşılabacağı üzere üçgen yerleşim durumunda ferromanyetik ekran malzemelerinin bağıl manyetik geçirgenlik değerlerinin ortalaması kabloların düz yerleştirilmesi durumuna göre daha yüksektir. Aynı durum ekranda indüklenen akım yoğunlukları için de geçerlidir. Örneğin DX52 malzemesini ele alalım. Kabloların düz yerleştirilmesi durumunda ekrandaki bağıl manyetik geçirgenliğin ortalama değeri 354, ekranda indüklenen akım yoğunluğu ortalama değeri $1,97 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Kabloların üçgen yerleştirilmesi durumunda bağıl manyetik geçirgenliğin ortalama değeri 301, ekranda indüklenen akım yoğunluğunun ortalama değeri $1,47 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

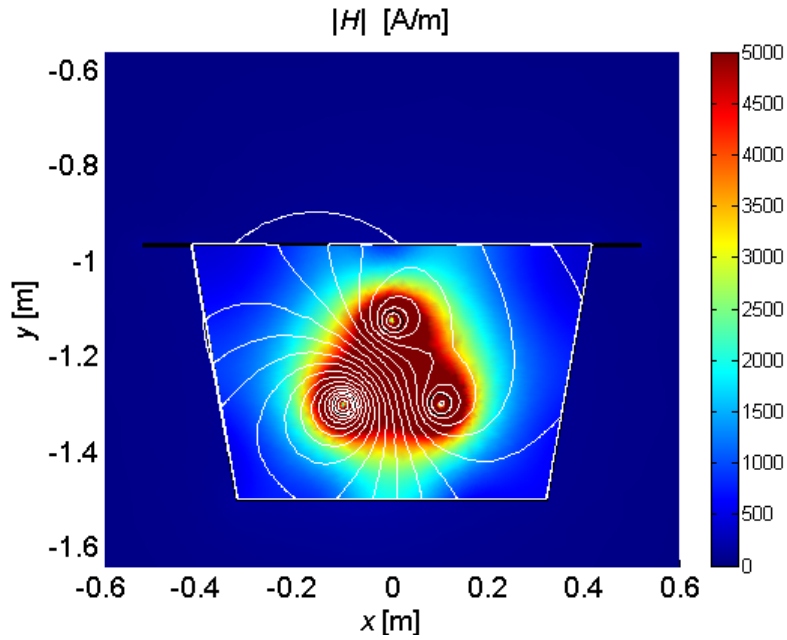
Alüminyum ekran kullanılmasında ise kabloların düz yerleştirilmesi, üçgen yerleşime göre daha iyi bir ekranlama yapması ekranda oluşan akım yoğunluklarının değeri ile açıklanır. Benzer nedenlerden dolayı kablolar düz yerleştirildiği zaman ekranda indüklenen akım yoğunluklarının değeri üçgen yerleşime göre daha yüksek olmaktadır. Yüksek iletkenlikli malzemelerde ekranlama prensibi ekran içerisinde oluşan girdap akımlarına bağlıdır. Bilindiği gibi alüminyum malzemesinin manyetik özelliği olmadığı için bağıl manyetik geçirgenlik değeri alandan bağımsız ve 1'dir. Çizelge 4.2'den görüleceği üzere kabloların düz yerleştirilmesi durumunda ekranda oluşan akım yoğunluğunun ortalama değeri $3,14 \text{ A/m}^2$ iken, üçgen yerleşim durumunda indüklenen akım yoğunluğu ortalama değeri $1,97 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2 Ekran malzemesinin türüne ve kabloların yerleştirilme düzenine göre ekranlama performansının karşılaştırılması.

Ekran malzemesi	Kablonun yerleşim düzeni	μ_{r-ort}	B_{ort} [T]	J_{ort} [A/m ²]	Ekranlama faktörü
Alüminyum	Düz	1	$7,17 \times 10^{-4}$	$3,14 \times 10^5$	0,0688
	Üçgen	1	$5,49 \times 10^{-4}$	$2,51 \times 10^5$	0,0959
DX52	Düz	354	0,12	$1,97 \times 10^5$	0,0943
	Üçgen	301	0,08	$1,47 \times 10^5$	0,1387
Magnetil	Düz	1118	0,17	$1,72 \times 10^5$	0,0099
	Üçgen	1045	0,12	$1,19 \times 10^5$	0,0165



Şekil 4.10 Düz yerleşimli güç kablolarının DX52 malzemesiyle ekranlanması durumunda manyetik alanın herhangi bir andaki dağılımı.



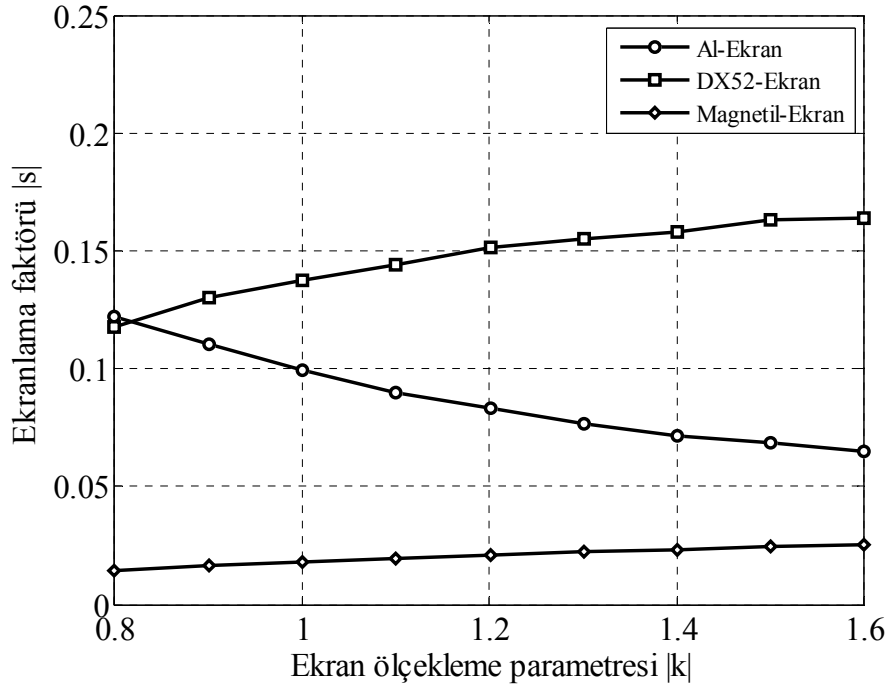
Şekil 4.11 Üçgen yerleşimli güç kablolarının DX52 malzemesiyle ekranlanması durumunda manyetik alanın herhangi bir andaki dağılımı.

Kabloların yerleştirilme düzenine göre manyetik alan şiddetinin her hangi bir anındaki değişimleri SEY’de ki hesaplamalardan elde edilmiştir. Üç fazlı kablolardan geçen akımlar eşit ve dengelidir. Düz yerleşimli güç kablolarının DX52 malzemesiyle ekranlanması durumunda manyetik alan şiddetinin herhangi bir andaki dağılımı Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Aynı şartlar altında, kabloların üçgen yerleştirilmesiyle oluşan manyetik alan şiddetinin herhangi bir andaki dağılımı Şekil 4.11’deki gibi gözlenmiştir. Görüleceği gibi kabloların düz yerleşim durumunda manyetik alan şiddetinin dağılımı diğer duruma göre ekrana yakın bölgelerde daha yüksek olmaktadır. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’deki alan dağılımlarında azda olsa bir simetrisizlik göze çarpabilir. Bu manyetik alan şiddetinin herhangi bir an için çizdirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bilineceği üzere üç fazlı sinüs biçimli bir akım için alan şiddeti zamana bağlı bir şekilde değişmektedir.

4.5.2.2 Ekran Boyutlarının Ekranlama Etkinliği Üzerindeki Etkisi

Bu kısımda ekran boyutlarının ekranlama etkinliği üzerinde etkileri incelenecektir. Bunun için ölçekleme faktörü olarak bir k parametresi tanımlanmıştır. Ekran boyutları tanımlanan k parametresiyle çarpılarak değiştirilmektedir. Eğer $k = 1$ ise bunun anlamı ekranın bütün boyutları Çizelge 4.1’de verilenlerle aynıdır. Çarpan parametresinin 1’den küçük olması ekran boyutlarının küçüldüğü, 1’den büyük olması ise ekran boyutlarının o oranda büyüdüğü anlamına gelir. Ekran kalınlığı, kablolardan geçen akımın genliği, kabloların ölçü ve

pozisyonları sabit bırakılmıştır. Ölçüt çarpanı k 0,8 ile 1,6 arasında değiştirilerek ekranlar yeniden boyutlandırılmıştır. Benzetimler kabloların üçgen yerleştirilme durumunda gerçekleştirilmiştir. Kablolar arası mesafe 0,2 m olarak belirlenmiştir. Daha sonra 2B SEY ile üç farklı ekran malzemesi (alüminyum, DX52 ve Magnetil) için k parametresi değiştirilerek ekranlama etkinliği hesaplanmıştır. Ekran ölçekleme parametresi k 'ya göre üç farklı ekranda ekranlama faktörünün değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Ferromanyetik malzeme olan DX52 ve Magnetil ekranların elektriksel ve manyetik özelliklerinin doğası gereği ekranlama prensibi olarak düşük akı yolu etkisi girdap akımları etkisinden daha baskın olmaktadır. Boyutlarının büyümesine bağlı olarak ekranlama faktörünün sayısal değeri artmaktadır. Bunun anlamı ekranlama performansı kötüleşme eğiliminde demektir. Ölçeklemenin artmasıyla ekran malzemesi kaynaktan uzaklaşmakta ve buna bağlı olarak ekrandaki bağlı manyetik geçirgenliğinin değeri azalmaktadır. Buda ekranlama performansının azalmasına neden olmaktadır. Örneğin DX52 malzemesiyle yapılan ekranlamada, ölçekleme faktörünün küçük değeri $k=0,8$ için bağlı manyetik geçirgenliğinin ortalama değeri 353,18 iken, ölçekleme parametresinin büyük değeri $k=1,6$ olmasında ise bağlı manyetik geçirgenliğinin ortalama değeri 217,02 olarak hesaplanmıştır. Ferromanyetik malzemelerde ekran boyutları ve kaynağa olan mesafesi ekranlama performansını etkileyen önemli bir parametredir.



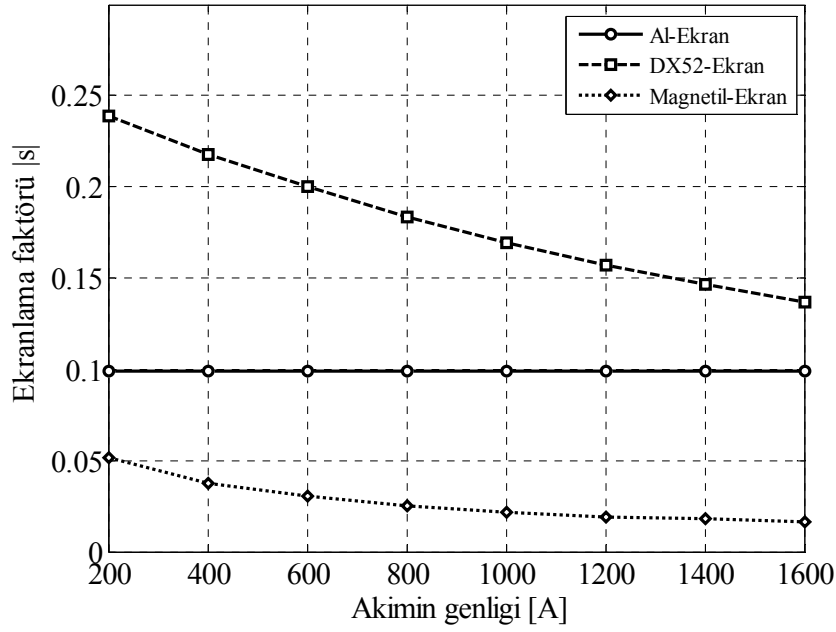
Şekil 4.12 Ekranlama ölçekleme parametresine bağlı farklı ekranlardaki ekranlama faktörünün değişimi.

Ferromanyetik olmayan alüminyum malzemesiyle yapılan ekranlamada ise durum tam tersidir. Ekran ölçekleme parametresi k 'nın artışına bağlı olarak ekranlama performansında artış gözlenmektedir. Bilindiği gibi bu malzeme iyi iletkenlikli bir malzeme olup manyetik geçirgenlik değeri 1 dir ve ekranlama prensibi olarak girdap akımı etkisiyle azaltma sağlamaktadır. Ölçekleme parametresi k 'nın artması, ekran yüzeyi alanının büyümesi demektir. Buda daha fazla yüzeyde bir gerilim indüklenmesine ve daha fazla girdap akımlarının oluşmasına neden olur. Bu nedenlerle girdap akımlarının azaltma etkisi ekran yüzeyinin büyümesine bağlı olarak artacaktır.

Genel manada bir sonuç değerlendirmesi yapılırsa, manyetik kaynağa yakın ekranlama uygulamalarında ferromanyetik malzemeler tercih edilmelidir. Çünkü ekranın bağlı manyetik geçirgenliği kaynağa yakın olması durumunda yüksektir. Tam tersi durumlarda, yani ekranın kaynak bölgesinden uzaklaşmasıyla birlikte geçirgenlik değeri azalmakta ve bağlı olarak ekranlama performansı önemli ölçüde düşmektedir. Kaynaktan uzak yerde ekran kullanılması durumunda ise yüksek iletkenlikli malzemelerin seçilmesi ekranlama performansı bakımından daha etkili olacaktır.

4.5.2.3 Akım Genliğinin Ekranlama Üzerindeki Etkisi

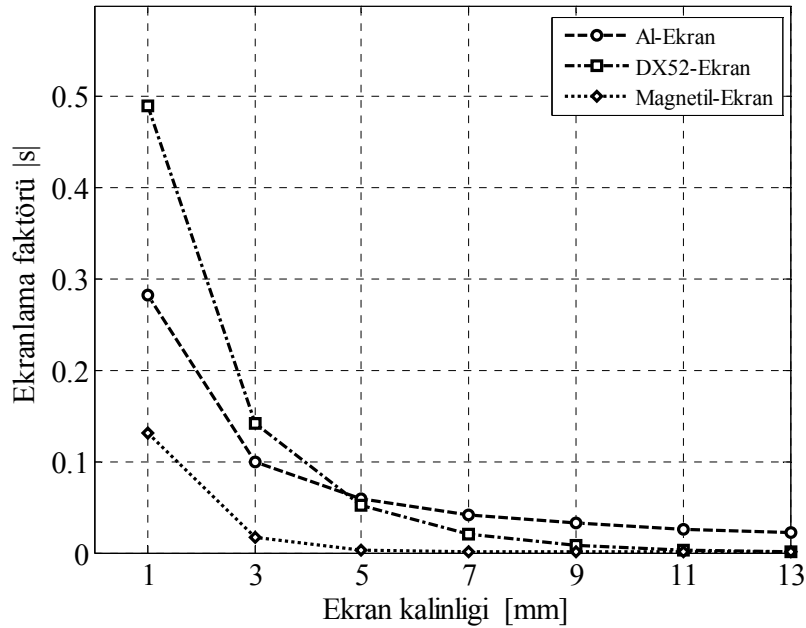
Bu kısımda, akımın genliğinin ekranlama üzerindeki etkisi üç farklı ekran malzemesi (Alüminyum, DX52 ve Magnetil) için incelenmiştir. Hesaplamalar 2B SEY ile gerçekleştirilmiştir. Ekran geometrisi Şekil 4.2'de, boyutlar ve ölçüler Çizelge 4.1'de verildiği gibidir. Kabloların yerleştirme düzeni üçgen ve kablolar arası uzaklık 0,2 m olarak alınmıştır. Kablolardan akan akım üç fazlı ve dengeli olup akımın genliği 200 ile 1600 A rms arasında 200 A basamaklarla değiştirilmiştir. Akımın genliğine bağlı olarak farklı ekran malzemelerinin ekranlama faktörünün değişimi Şekil 4.13'de görülmektedir. Ferromanyetik ekran olan DX52 ve Magnetil için ekranlama performansı akımın genliğine bağlı olarak artmaktadır. Bunun sebebi, bu ekranlardaki manyetik indüksiyon ve bağlı manyetik geçirgenlik arasındaki bağıntıyla açıklanır. Manyetik alana bağlı olarak bağlı manyetik geçirgenlikte bir artış meydana gelmektedir. Bu nedenlerden dolayı ferromanyetik malzemelerde akımın artışıyla birlikte ekranlama performansı yükselme gösterecektir. Fakat Şekil 4.13'den görüleceği gibi alüminyum malzemesi ile yapılan ekranlamada, akımın genliğindeki artışla ekranlama faktörü değişmemekte ve sabit kalmaktadır. Bu durum alüminyum ekranın elektriksel özelliklerinin ve manyetik özelliklerinin doğrusallığıyla açıklanır.



Şekil 4.13 Farklı ekran malzemelerinde, ekranlama faktörünün akımın genliğiyle değişimi.

4.5.2.4 Ekran Kalınlığının Ekranlama Üzerindeki Etkisi

Ekranlama performansını etkileyen önemli parametrelerden biriside ekran kalınlığıdır. Bu kısımda ekran kalınlığının ekranlama üzerindeki etkisi üç farklı ekran malzemesi (alüminyum, DX52 ve Magnetil) için incelenmiştir. Hesaplamalar 2B SEY ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.14 Farklı ekran malzemelerinde, ekranlama faktörünün ekran kalınlığıyla değişimi.

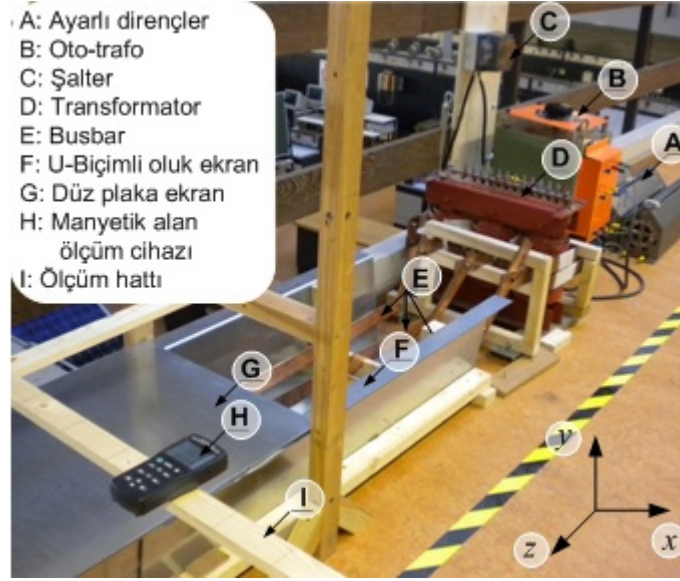
Ekran geometrisi Şekil 4.2, boyutlar ve ölçüler Çizelge 4.1’de verildiği gibidir. Kabloların yerleştirme düzeni üçgen ve kablolar arası uzaklık 0,2 m olarak alınmıştır. Ekran kalınlığına bağlı olarak farklı ekran malzemelerin ekranlama faktörünün değişimi Şekil 4.14’te görülmektedir. Ekranlama performansı tüm malzemeler için kalınlığa bağlı olarak artış göstermiştir.

5. YER ALTI KABLOLARININ EKRANLANMASININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

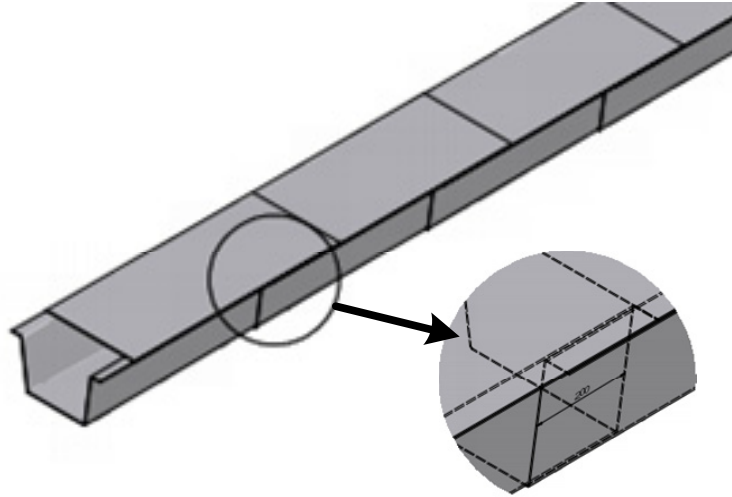
Bu bölüm kapsamında, yer altı kablolarının ekranlaması problemi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaç için prototip ölçekli bir deney düzeneği kurulmuştur. Deneysel çalışmalardan ve SEY'den elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu test edilmiştir. Ayrıca, ekranlar arasındaki kontak direncinin ekranlama etkinliği üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmış ve kontak direncinin etkisini dikkate alan Devre Yöntemli SEY, problemin çözümü için önerilmiştir. Kabloların yerleşim biçimine göre (düz, üçgen) ve akım genliğine bağlı olarak ölçülen manyetik akı yoğunluğu değerleri yapılan hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Bunlara bağlı değerlendirilmeler yapılmıştır.

5.1 Deney Düzeneği

Deneysel incelemeler yapmak için hazırlanan prototip düzenek; bir adet acil kapatma düzeni olan devre açıcı şalter, bir adet üç fazlı oto-transformatör, bir adet özel tasarlanmış düşük gerilim seviyesinde yüksek akım çıkışı sağlayan üç fazlı transformatör, çıkışları kısa devre edilmiş üç adet busbar, manyetik alan ölçüm cihazı, U-biçimli oluk ve düz plaka şeklindeki ekranlardan oluşmaktadır. 5 kVA gücüne sahip bir transformatör düşük gerilimlerde yüksek akım çıkışı sağlayabilmesi için özel olarak değiştirilmiştir. Bu amaç için 5 mm kalınlığa 50 mm genişliğe sahip busbarlar kullanılarak taransformatörün her bir faz sargısının üzerine tek sarımlık sargı sarılmıştır. Böylelikle yeni bir sekorder sargı çıkışı elde edilmiştir. Sekonder sargı çıkışına her biri 5 mm kalınlığında, 50 mm genişliğinde ve 8 m uzunluğunda olan busbarlar bağlanmıştır. Deney düzeneğinden yüksek akımlı çıkışlar elde edebilmek için busbarların çıkışları kısa devre edilmiştir. Bu durum bir taransformatörün kısa devre çalışmasına benzemektedir. Busbarlardaki akımların genliği ayarlamak için transformatör primer sargına üç fazlı bir oto-transformatör bağlanmıştır. Oto-transformatör yardımıyla yüksek akım çıkışı verebilen transformatörün giriş gerilimi ayarlanmaktadır. Böylelikle çıkıştan ayarlanabilir yüksek akımlar elde edilebilmektedir. Oto-tarnsformatörün girişine bağlı olan olan ayarlı dirençler ise fazlar arasında dengeli bir yüklemeyi sağlamak için kullanılmaktadır. Deney düzeneğine ilişkin bir fotoğraf Şekil 5.1'de görülmektedir. Yapılan testlerden, bu düzeneğin 1000 A rms seviyelerine kadar akım çıkışı sağladığı gözlenmiştir.



Şekil 5.1 Deney düzeneğine ait bir fotoğraf.



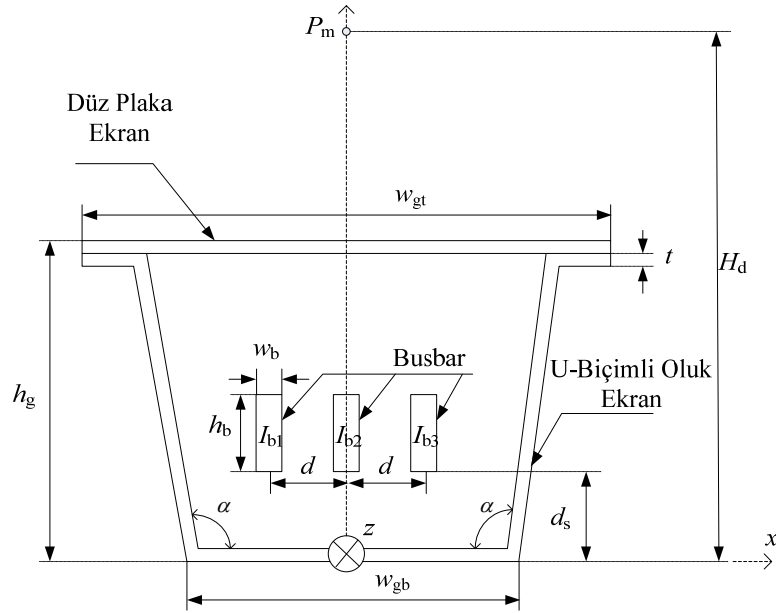
Şekil 5.2 Üzeri düz plakayla örtülü U-biçimli oluk ekranın xyz-düzlem koordinatlarıyla gösterimi.

Deneysel çalışmada ferromanyetik bir malzeme olan sıcak haddelenmiş galvanizli demir (DX52) kullanılmıştır. Bu malzeme Belçika'daki ArcelorMittal firması tarafından üretilen ticari kullanımı olan bir üründür. Deney düzeneğinde kullanılmak için U-biçimli ve düz plaka şeklindeki ekranlar yine aynı firma tarafından deneysel çalışmalarımızda kullanılmak üzere özel olarak imal edilmiştir. YG güç kabloları U-biçimli ekranın içerisine yerleştirilir ve üzeri düz plaka ekranla örtülerek ekranlama gerçekleştirilir. Kullanılan ekran yapısı ve onların yerleştirilme biçiminin xyz-düzleminde ki gösterimi Şekil 5.2'deki gibidir. Kalınlığı 3 mm olan 1,20 m uzunluğundaki her bir ekran uç uca eklendiğinde 0,20 m'lik kısımları diğer

ekranın üzerine bindirilmektedir. Aynı zamanda U-biçimli ekranların kenarları 98^0 lik bir eğime sahiptir. Bu şekilde ekranların birleştirilen yüzeylerinin birbirleriyle olan teması artırılarak elektriksel kontakın iyi bir şekilde olması sağlanmıştır. Deneysel sisteme ait ekranlama yapısına ait ölçü ve büyüklükler Çizelge 5.1 verilmiştir. Yüksek akım taşıyan busbarların ve ekranların xy-düzlemindeki geometrik gösterimi ise Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Kurulan deneysel düzenekte yerleştirilen ekran ve yüksek akım taşıyan üç fazlı baralar 8 m boyundadır. Düzenegın başında ve sonunda oluşabilecek harici alanlardan kaçınmak için ölçümler orta noktaki kısımlarda yapılmıştır. Manyetik alanların ölçümünde üç boyutlu ölçüm yapabilen ticari bir manyetik alan ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihazın ölçüm doğruluğu $\% \pm 3$, ölçüm aralığı 0,01 μT ile 200 μT arası ve ölçüm frekansının band genişliği 30 Hz ile 2000 Hz arasındadır. Busbarlardan geçen akımlarını ölçmek için pens ampermetre kullanılmıştır. Ticari kodu MX1200S olan bu multimetrenin akım için ölçüm doğruluğu $\% 1$, ölçüm kademesi aralığı 200/1000 A rms ve ölçüm frekansının band genişliği 15 Hz ile 1 kHz aralığındadır.

Çizelge 5.1 Deneysel sisteme ait parametre ve büyüklükler.

Parametre	Tanımı	Büyüklükleri
w_{gt}	U-Biçimli oluk ekranın üst kenar genişliği	0,520 m
w_{gb}	U-Biçimli oluk ekranın alt kenar genişliği	0,325 m
h_s	Ekranın yüksekliği	0,266 m
t	Ekran kalınlığı	0,003 m
w_b	Busbarların kalınlığı	0,005 m
h_b	Busbarların genişliği	0,050 m
d	Busbarlar arasındaki uzaklık	0,10 m
d_s	Ekranın dibindende busbara olan uzaklık	0,10 m
α	Ekranın sağ ve sol kenarın eğim açısı	98^0
I_{b1}, I_{b2}, I_{b3}	Busbarlardan geçen akımın genliği	500 A



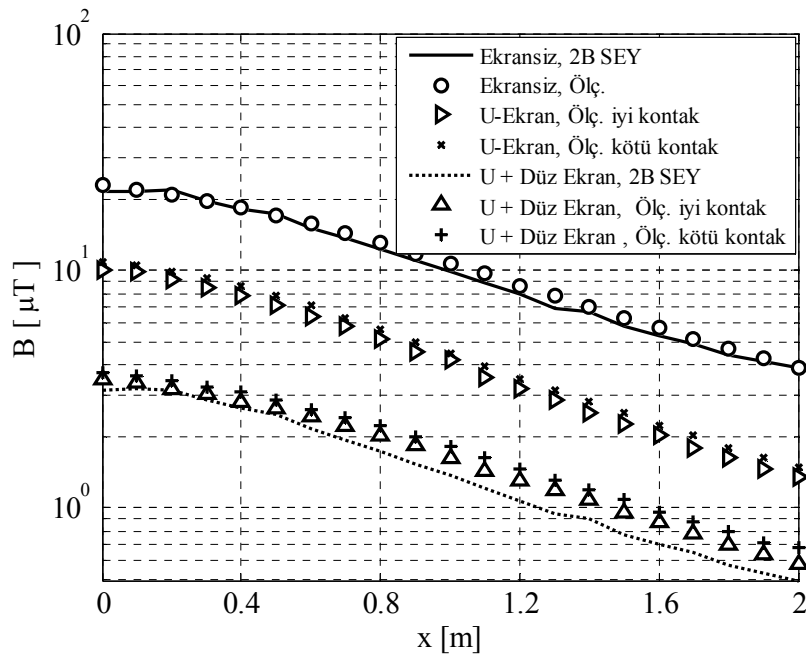
Şekil 5.3 Deneyisel düzenekte kullanılan busbar ve ekranların xy-düzlemindeki geometrik gösterimi.

5.2 Kontak Direncinin Ekranlama Etkinliği Üzerindeki Etkisi

Yüksek akım taşıyan güç kablolarının ekranlaması, metrelerce hatta kilometrelerce uzunluk boyunca yapılması gerekebilir. Bunun için kullanılan ekranlar parçalı bir şekilde olmakta ve hat boyunca uç uca eklenmektedir. Bu eklenen ekranlar arasında ki elektriksel kontak ekranlama etkinliği açısından önemli olabilmektedir. Sergeant vd., (2008) yüksek iletkenlikli (bakır) düz ekran malzemesi kullanarak yer altı kablolarının ekranlanmasıyla ilgili bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Açık ekran yapısı kullanılmıştır. Yani manyetik ekranlamayı, güç kablolarının 1,5 m üzerinde düz yapılı ekranlar kullanarak gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında, yerleştirilen bu ekranlar arasındaki kontak direncinin ekranlama performansı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Ekranlar arasında elektriksel açıdan iyi temas olmaması, yani kötü kontak durumunda ekranlama performansının azaldığını rapor etmişlerdir. Ayrıca Wulf vd., (2007) de YG yer altı kabloları ekranlanması için açık-ekran ve kapalı-ekran uygulamaları için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Onların çalışmaları kapalı-ekran topolojisi açık-ekran topolojisine göre daha etkin bir ekranlama sağladığını göstermiştir. Bu nedenle bizde çalışmamızda kapalı-ekran topolojisi tercih etmiş bulunuyoruz. Yapılan deneysel incelemelerle, verilen geometri ve kullanılan ekran malzemesi için kontak direncinin etkisi araştırılmıştır.

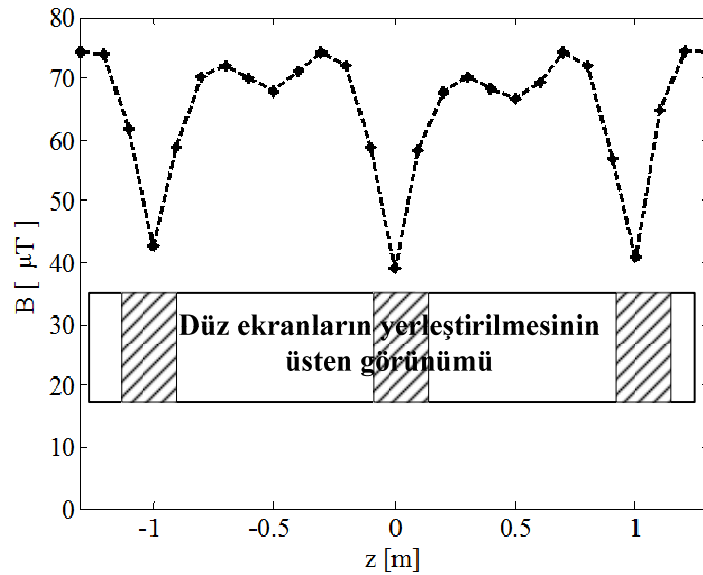
Bu çalışmada, ekran olarak U-biçimli oluk ve üzeri düz plakayla örtülebilen düz ekranlar kullanılmıştır. U-biçimli ekranların sağ ve sol tarafları 98^0 bir eğime sahiptir. Bu eğim ekranların birbirine eklenmesini kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda ekranların uç uca gelen kısımlarında ekranın diğer ekrana olan basıncı artırarak ekranlar arası daha iyi bir elektriksel kontak sağlayacaktır. U-biçimli oluk ekran üzerine konulan düz ekranın elektriksel kontağı iyileştirmek için kelepçeler kullanılmıştır. Yani, U-biçimli ekranın üzerine yerleştirilen düz ekranların her iki kenar kısımlarına 0,5 m aralıklarla kelepçeler bağlanmıştır. Bu şekilde ekranlar arası maksimum kontak sağlanması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmada, kötü kontak durumunu sağlamak içinde ince plastik yalıtım mazlemesi ekranların üst üste binen kısımları arasına yerleştirilmiş ve böylece elektriksel açıdan kötü kontak durumu sağlanmıştır.

Kullanılan ekran yapısı ekranlama performansına etki etmektedir. Bu kapsamda, ekransız, sadece U-biçimli ekran kullanılması ve U-biçimli ekranın düz bir ekranla örtülmesi durumlarında manyetik akı yoğunluğunun x-ekseni boyunca değişimi Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Burada hesaplama yüksekliği $y = 1$ m'dir. Busbarlardan geçen akımın genliği $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 500$ A rms olarak belirlenmiştir. Sadece U-biçimli ekran kullanıldığında manyetik indüksiyon azalması ortalama olarak yaklaşık 2,5 kattır. U-biçimli ekrana düz ekranın birlikte kullanılması durumunda yaklaşık olarak 6 katlık bir azalma gerçekleştiği görülmektedir.

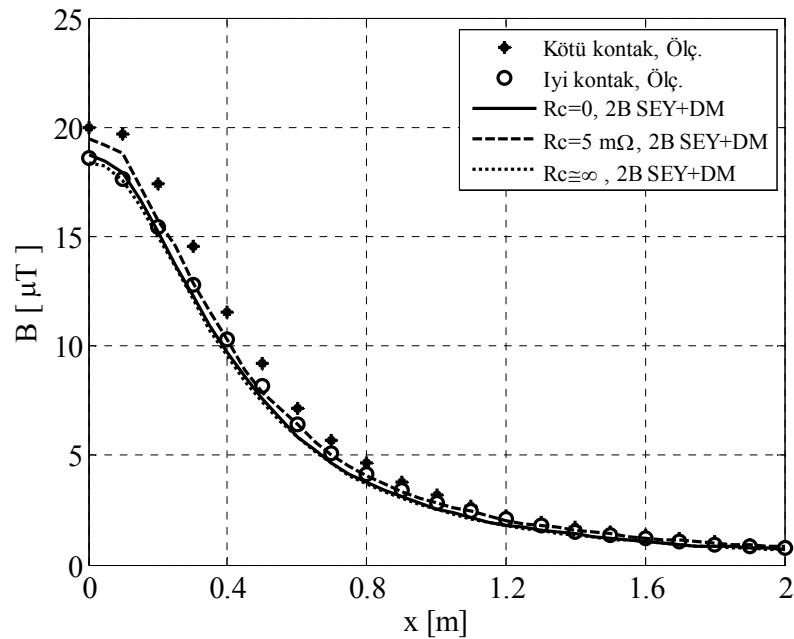


Şekil 5.4 Farklı ekran yapıları için manyetik akı yoğunluğunun değişimi ($y = 1$ m, $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 500$ A rms).

Ekranın hemen üzerinde $y = 0,28$ m’de z-ekseni boyunca yapılan manyetik akı yoğunluğunun değişimi Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Şekildeki çizgilerle taralı yerler düz ekranların üst üste gelen kısımlarını temsil eder. Bu kısımların hemen üzerinde alan seviyesi diğer kısımlara göre daha düşüktür. Çünkü bu noktalarda ekran kalınlığı iki katına çıkmaktadır.



Şekil 5.5 Ekranın hemen üzerinde manyetik akı yoğunluğunun z-ekseni boyunca değişimi ($y=0,28$ m, $x=0$ m, $I_{b1}=I_{b2}=I_{b3}=500$ A rms).



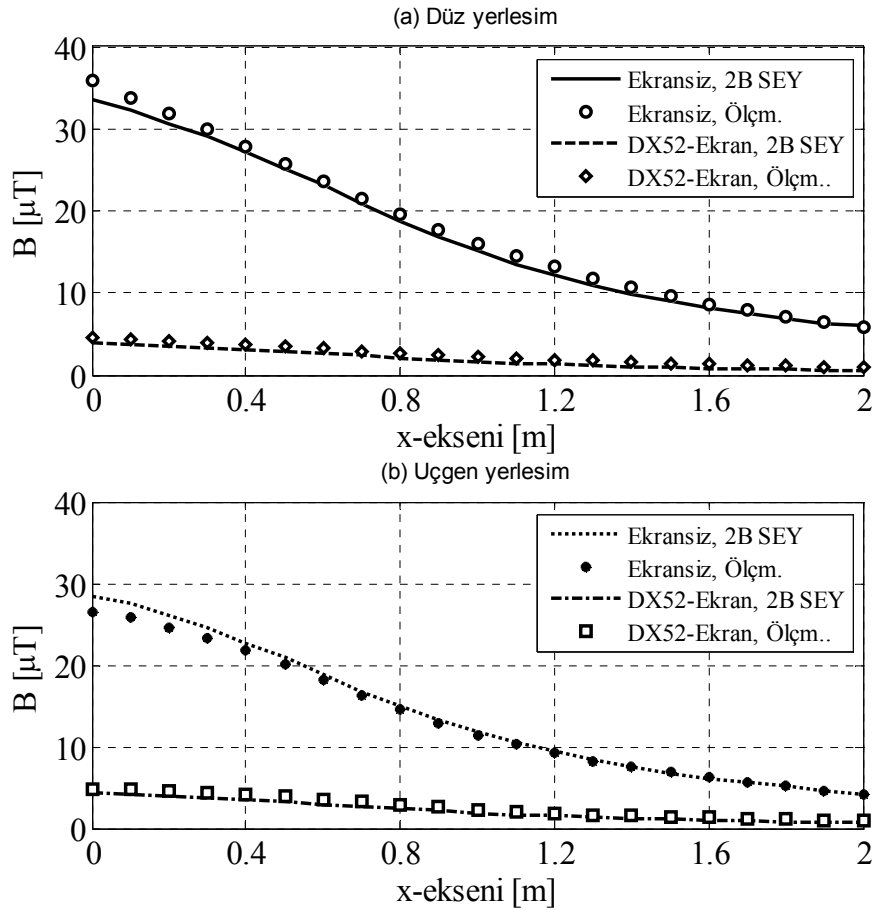
Şekil 5.6 İyi ve kötü kontak R_c durumları için x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun değişimi ($y = 0,5$ m, $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 500$ A rms).

Ekranlar arasında kontak direncinin iyi ve kötü olması durumunda x-ekseni boyunca manyetik akı yoğunluğunun değişimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Burada hesaplama yüksekliği $y = 0,5$ m ve her bir fazdan geçen akım 500 A rms değerine sahiptir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre elektriksel kontakın iyi olması durumunda manyetik azalma daha iyi olmaktadır. Her iki değer arasında ortalama % 10 civarında bir fark vardır. 2B SEY analizi, z-ekseni boyunca olan hesaplamaları dikkate alamayacağından tek başına kontak direncinin etkisini dikkate alacak bir çözüm sunamayacaktır. Bu tür problemler aslında 3B SEY yöntemi ile modellenenebilir. Fakat bu şekilde karmaşık alan problemlerinin 3B SEY ile modellenmesi zor, problemin çözümü zaman alıcıdır. Aynı zamanda yüksek bellekli, güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle yeni bir yaklaşım olarak 2B SEY'li devre yöntemi önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu yöntem, problemin çözümünde kontak direncinin etkisini dikkate alarak problemin üçüncü boyut etkisinin iki boyutlu bir ortamda modellenmesine olanak sağlayacaktır.

Devre yöntemi için önerilen eşdeğer devre Şekil 4.7'de verilmiştir. Bilineceği üzere bu yöntem için en önemli husus bu devredeki R_c ve R direnç değerlerinin belirlenmesidir. $R_c \cong \infty$ demek ekranlar arası elektriksel bir temasın olmadığı, yani kötü kontak olmasını temsil eder. Ekranlar arası temas olmaması durumunda olduğu varsayılan ve devre yönteminde R ile temsil edilen direncin değerini belirlemek için kötü kontak durumundaki ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Öyleki akım enjekteli 2B SEY'den elde edilen sonuçlar, kötü kontak durumundaki ölçüm sonuçlarına yaklaşıncaya kadar devre yöntemindeki R 'nin değeri değiştirilerek $0,67$ m Ω olarak bulunmuştur. $R_c = 0$ olması durumu ise ekranlar arası mükemmel temasın olduğu ve herhangi bir kontak direncinin olmadığı anlama gelir. Bu durum yaklaşık 2B SEY sonuçlarına karşılık gelir. Gerçek yaşamda ekranlar arası kontak direncini sıfır yapmak ancak ekranlar arası mükemmel bir temasla sağlanabilir. Bunu sağlamak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Belki ekranların birbirine kaynak yapılması ile mümkün olabilir. Fakat, ekranlamanın uzun bir hat boyunca yapılacağı ve ileride bakım gibi durumlarında olacağı gözönüne alınırsa iyi bir çözüm olmayacağı aşikardır. Mevcut yöntemlerle (tasarım, kelepçe kullanımı vb.) elde edilen iyi kontak durumuna karşılık gelen R_c 'nin değeri yine aynı şekilde benzetimler yardımıyla tahmin edilmiştir. Şekil 5.6'dan da görüleceği gibi $R_c = 5$ m Ω olması durumu iyi kontak durumu için güzel sonuç vermiştir. Sonuç olarak; kontak direncinin ekranlama problemi üzerindeki etkisi 2B SEY ile devre yönteminin birlikte kullanılmasıyla tahmin edilebileceği gösterilmiştir.

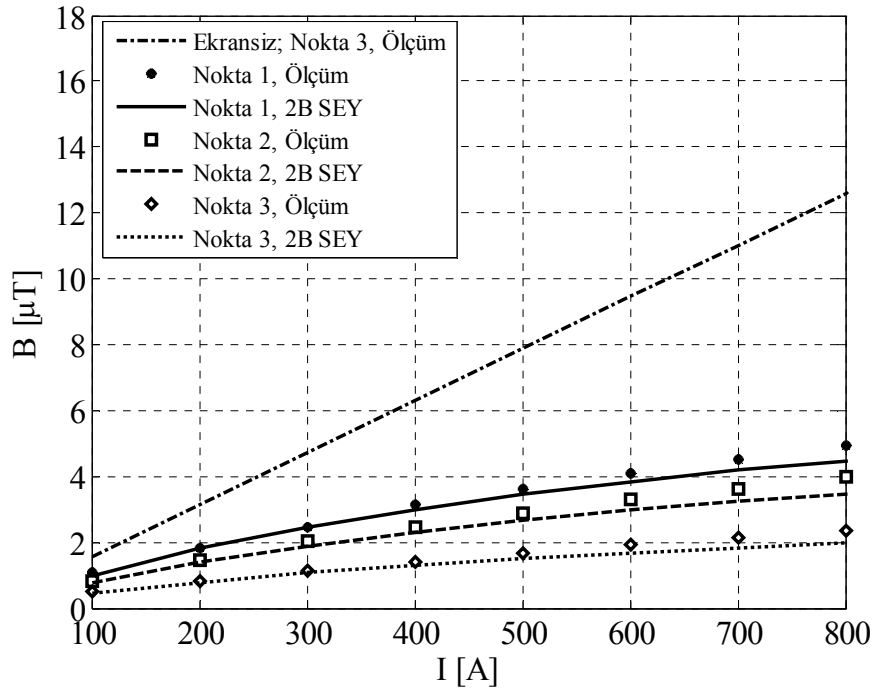
5.3 Ölçüm ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Ölçüm sonuçlarının alındığı deney düzeneğinin bir fotoğrafı Şekil 5.1’de görülmektedir. Aynı şekilde sisteme ait büyüklükler Çizelge 5.1’de verilmiştir. Ekran malzemesi olarak ferromanyetik bir ekran olan DX52 kullanılmıştır. Busbarlardan akan akımın dengeli ve genliği $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 750$ A rms değerindedir. Hesaplama ekran tabanından yukarı doğru y eksenini boyunca 1 m olarak alınmıştır. Kabloların yerleştirme düzeni düz yerleşim için baralar arası uzaklık 0,1 m dir ve ekranın tabanına olan uzaklık 0.1 m’dir. Kabloların üçgen yerleştirilmesi durumunda ise ortadaki bara üste olacak şekilde yerleştirilmiştir ve her bir busbar arasındaki mesafe 0,1 m olacak şekilde düzenlenmiştir. Hesaplamalar ise 2B SEY ile yapılmıştır. Bu şartlar altında busbarların düz ve üçgen yerleştirilmesi durumundaki ölçüm sonuçlarıyla, benzetimler yardımıyla elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.7 (a) Busbarların yerleşim düzeni düz, (b) busbarların yerleşim düzeni üçgen olması durumunda hesaplanan ve ölçülen manyetik akı yoğunluğunun x-ekseni boyunca dağılımı ($H_d = 1$ m, $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = 750$ A rms).

Busbarların yerleşim düzenine göre ekransız ve ekranlama sonrası manyetik akı yoğunluklarının hesap ve ölçüm sonuçları Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Hesaplama ve ölçüm sonuçları birbiriyle uyuşmaktadır. Bu da, 2B SEY ile yapılan hesaplamaların uygulama için geçerli olabileceğini kanıtlamaktadır. Busbarların düz ve üçgen durumundaki ekranlı ve ekransız alan karşılaştırmalarını yapmak için ekranın orta noktasına gelecek şekil hesaplama yüksekliği 1 m olan bir noktadaki sonuçları verebiliriz. Yani x, y koordinatı (0; 1) olsun. Ekransız durumda, busbarların düz yerleştirilmesi halinde manyetik akı yoğunluğu $35,80 \mu\text{T}$ olarak ölçülmesine karşın, aynı noktada üçgen yerleştirilme için manyetik akı yoğunluğu $26,44 \mu\text{T}$ olarak ölçülmüştür. Ekransız durumda, üçgen yerleştirilme düz yerleştirmeye göre daha az manyetik alan seviyesine neden olmaktadır. Ekranlı durumda, busbarların düz yerleştirilmesi halinde manyetik akı yoğunluğu yine aynı nokta için $4,48 \mu\text{T}$ iken, buna karşı busbarların üçgen yerleştirilmesi durumunda $4,90 \mu\text{T}$ olarak ölçülmüştür. Bu durumda, düz yerleştirilme için ekranlama faktörü 0,13 bulunur. Buna karşın üçgen yerleştirilme durumu için ekranlama faktörü 0,19 olarak hesaplanır. Sonuç olarak, manyetik alanın azaltılması bakımından ekransız durumda üçgen yerleşim daha iyi sonuç verirken, ekranlı durumda düz yerleşim üçgen yerleşime göre daha iyi ekranlama sağlamaktadır. Bunun sebebi, benzetimler bölümünde nedenleriyle birlikte açıklanmıştır.



Şekil 5.8 DX52 ekran ile yapılan ekranlamada akımın genliğiyle manyetik akı yoğunluğunun değişimi [koordinatlar; Nokta1 (0; 1), Nokta2 (0,5; 1) ve Nokta3 (1; 1)].

Akımın genliğiyle manyetik akı yoğunluğunun değişimi deneysel ve benzetim sonuçlarından gözlenmiştir. Yapılan hesaplama ve ölçümlerde busbarlar üçgen yerleştirilmiştir. Hesaplama yüksekliği 1 m ve x-ekseni boyunca $x = 0$, $x = 0,5$ ve $x = 1$ m olmak üzere, üç ayrı noktada ekranlı durum için ölçüm ve hesaplamalar yapılmıştır. Akımın genliği 100 ile 800 A arasında 100 A rms değerlerinde artırılmıştır. Hem hesaplama hem de ölçüm sonuçlarına göre akımın genliğine bağlı manyetik akı yoğunluğunun değişimi Şekil 5.8’de verilmiştir. Ekransız durumda indüksiyon seviyesi doğrusal olarak artarken ekranlı durumda bu artış ekranın doğrusal olmayan özelliğinden dolayı doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Şekil 5.8’den görüleceği gibi verilen üç farklı koordinatta manyetik akı yoğunluğunun değişimi, 2B SEY ile yapılan hesaplamalarla ölçümler arasında kabul edilebilir bir uyum vardır. Bu da hesaplama modelinin geçerliliğini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek güç taşıyan kablolar, taşıdığı akım kapasitesine bağlı olarak etrafında manyetik alanlar oluşturur. İstenmeyen bu manyetik alanlar, yakın çevresinde bulunan elektrik-elektronik cihazlar üzerinde girişim yapabildiği gibi uzun süreli maruz kalınması durumunda insan sağlığı üzerinde de olumsuz etkiler yapabileceği üzerine araştırma sonuçları ve kaygılar vardır. Yer altı güç kablolarının, yerleşim yerlerine ve çalışma ortamlarına yakınlığı göz önüne alınarak etrafında oluşturduğu manyetik seviyelerinin değeri hesaplanmalıdır. Oluşan yüksek değerli alan seviyelerinin azaltılması için gerekli tasarım ve manyetik alan azaltma teknikleri kullanılmalıdır. Bu alan seviyesinin düşürülmesi gerekli olduğu durumlarda en etkin çözüm yollarından birisi de manyetik ekranlamadır.

Bu tez kapsamında iki temel ekranlama problemi incelenmiştir. Birinci olarak, düzgün dağılımlı manyetik alan içerisinde, ekranlı bir bölge oluşturmak için silindirik bir ekranlama problemi çalışılmıştır. İkinci olarak, önemli bir ekranlama problemi olan güç sistemlerinde yer altı kablolarının ekranlaması, benzetim yöntemleri ve deneysel çalışmalarla detaylı olarak incelenmiştir.

Bölüm 3’de düzgün dağıldığı varsayılan bir manyetik alan içerisinde kalan bir bölgenin ekranlanması problemi çalışılmıştır. Silindirik yapıli bir ekran modeli kullanılmıştır. Problemin çözümünde AY, SEY ve geliştirilen YSA yöntemleri karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. Silindir ekran olarak iletkenlikli ve yüksek manyetik geçirgenlikli ferromanyetik bir malzeme olan Fe-Si demir kullanılmıştır. Ekranlama etkinliği üç farklı yöntem ile hesaplanmıştır. Bu üç yöntemde, ekranın doğrusal olmayan manyetik özelliklerinin etkisini dikkate almaktadır. Ekranlama etkinliğinin bağlı olduğu parametrelerden ekran yarıçapı, ekran kalınlığı, uygulanan manyetik alanın genliği ve frekansının ekranlama üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, bu üç yöntemin birbirine olan avantaj ve dezavantajları ortaya konmuş ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu problemin incelenmesinden elde edilen sonuç, bulgu ve öneriler şu şekilde sıralanabilir.

- Doğrusal olmayan ekranlama probleminin çözümü üç yöntemle de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen hesaplama ve ölçüm sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Verilen problem ve dikkate alınan durumda ölçüm sonuçlarının AY, SEY ve YSA’nın hesaplama sonuçlarıyla karşılaştırılmasıyla, bağıl yüzdesel hata oranlarının değişimi Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bağıl yüzdesel hata oranı AY için % 9,16, SEY için % 6,45 ve son olarak YSA için % 5,54 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar problemin çözümü için aşağı

yukarı kabul edilebilir doğrulukta olduğunu göstermektedir.

- Üç yöntem hesaplama zamanı bakımından karşılaştırılırsa; AY yöntem için 3,03 saniye, YSA için 0,1 saniye ve SEY içinse kaba bir ağ kullanıldığında hesaplama zamanı 107,04 saniye iken ağ yoğunluğunun artırılması durumunda bu hesaplama zamanı 1358,75 saniye olarak gözlenmiştir.
- Bu üç yöntemin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.3’de verilmiştir.
 - i. AY’nin avantaj ve dezavantajları; hızlı hesaplama zamanına sahiptir. Hesaplama doğruluğu kabul edilebilir seviyededir. Özellikle uygulanan alan seviyesinin düşük olduğu durumlarda daha doğru sonuçlar vermektedir. Uygulanan alanın yükselmesiyle birlikte yöntemin doğruluğu azalmaktadır. Bu durum analitik yöntemde, bağlı manyetik geçirgenliğin doğrusal olmayan değişiminin sadece radyal yönde dikkate alınabilmesi, eksenel yönde dikkate alınamamasının bir sonucudur. Normalde bağlı manyetik geçirgenliğin değişimi eksenel yönde de değişmektedir. Aslında gerçek problemde, manyetik geçirgenliğin doğrusal olmayan değişimi, uygulanan alana bağlı olarak hem radyal hem de eksenel yönde farklılıklar gösterebilmektedir. Bölüm 3.3’de bu duruma ilişkin ayrıntılar verilmiştir. Ayrıca analitik çözüm sadece basit ekran ve kaynak geometrileri için mevcuttur. Kompleks geometri durumlarında analitik çözümleme oldukça zor hatta bazı durumlar için olanaksızdır.
 - ii. SEY’in avantaj ve dezavantajları; sonlu elemanlar yöntemi karmaşık ekran ve kaynak geometrilerine uygulanabilir, problemin doğrusal olmayan elektriksel özelliklerin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi yönüyle mükemmel bir yöntemdir. Hesaplama doğruluğu oldukça iyidir. Fakat diğerlerine göre hesaplama süresi daha uzundur.
 - iii. YSA’nın avantaj ve dezavantajları; karmaşık ekran ve kaynak geometrilerine uygulanabilir. YSA modeli, sistemin yeterli veriyle ve iyi bir şekilde eğitilmesi durumunda hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı ise eğitim için hazır verilere ihtiyaç duymasındır.
- Uygulanan düzgün dağılımlı manyetik alanın fonksiyonu olarak olarak AY, SEY, YSA hesaplamaları ve ölçüm sonuçlarına göre ekranlama faktörünün değişimi ($r = 0,0545$ m, $t = 0,5$ mm, $f = 50$ Hz ve 4 ile 318 A/m aralığında değişmektedir) Şekil 3.9’da verilmiştir. Ekranlama performansı manyetik alan şiddetiyle artmaktadır. Bu da

maruz kalınan alan seviyesine göre ekrandaki bağıl manyetik geçirgenliğin doğrusal olmayan artışıyla açıklanır.

- Frekansın bir fonksiyonu olarak üç yöntemle hesaplanan ekranlama faktörünün değişimi ($r = 0,05$ m, $t = 0,5$ mm, $H_0 = 48$ A/m ve $f = 50$ Hz ile 10 kHz aralığında değişmekte) Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Frekansın artmasıyla birlikte ekranlama performansı iyileşmektedir. Özellikle frekansın yüksek olması durumunda ekranlama performansı daha büyük olmakta bu da yüksek frekanslarda girdap akımlarının etkisinin fazla olmasının sonucudur.
- Ekran kalınlığının fonksiyonu olarak üç yöntemle hesaplanan ekranlama faktörünün değişimi ($r = 0,05$ m, $f = 50$ Hz, $H_0 = 48$ A/m ve $t = 0,5$ ile 5 mm aralığında değişmektedir) Şekil 3.11'de verilmiştir. SEY ve YSA modelleri ekranlama faktörünün hesabında benzer özellikler göstermektedir. Fakat AY diğer yöntemlerine göre daha kötü hesaplama yaptığı görülmektedir. Bu durum yine Şekil 3.12 (b)'den gözleneceği gibi manyetik geçirgenliğin ekran içerisindeki dağılımının neticesidir. Yani, AY'in ekranda manyetik geçirgenliğin eksenel yöndeki doğrusal olmayan değişimini dikkate almamasıyla açıklanabilmektedir.
- Ekran yarıçapının fonksiyonu olarak üç farklı frekans $f=50$ Hz, $f=2$ kHz ve $f=6$ kHz için ekranlama faktörünün değişimi Şekil 3.13'de verilmiştir. Ekran kalınlığı $t=0,5$ mm ve uygulanan alanın genliği $H_0=48$ A/m olması durumunda hesaplamalar üç yöntemle yapılmıştır. Ekranlama performansı 50 Hz için yarıçapın artmasıyla azalmaktadır. Bu durumda ekranlama prensibi olarak düşük akı yolu oluşması daha baskındır. Yarıçapa bağlı olarak ekranlama performansının düşmesi, manyetik relüktans yolunun ekran boyunca artması ile açıklanır. Yaklaşık olarak 2 kHz civarında ekran yarıçapının ekranlama etkinliği üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yüksek frekanslarda, örneğin 6 kHz'de ekran yarıçapına bağlı olarak ekranlama etkinliğinin arttığı gözlenmiştir. Yüksek frekanslarda ekranlama prensibi olarak girdap akımları etkisi daha baskındır. Yani yarıçapın artmasıyla ekran yüzeyi artacaktır. Buna bağlı olarak girdap akımları etkisi artması nedeniyle ekranlama performansı artış eğiliminde olacaktır.

Bölüm 4'de, önemli bir ekranlama problemi olan, güç sistemlerinde yer altı kablolarının ekranlaması için modelleme ve benzetim çözümleri çalışılmıştır. Yani problem manyetik alan kaynağı içeride, ekranlı bölge dışarıda olacak şekilde tanımlanır. Benzetim çalışmalarında; üç farklı ekran malzemesi dikkate alınmıştır. Bunlardan ikisi Magnetil ve

DX52 olarak isimlendirilmiş ferromanyetik malzemelerdir. DX52 malzemesi sıcak haddelenmiş galvanizli demir olan bir malzemedir. Magnetil malzemesi oldukça düşük karbonlu bir malzeme olup; düşük artık mıknatıslanma, düşük manyetik alanlarda yüksek manyetik geçirgenlik ve yüksek doyum gibi spesifik manyetik karakteristiğe sahiptir. Diğer ise ferromanyetik olmayan ve iyi iletkenlikli alüminyum malzemesidir. Benzetimi gerçekleştirilen ekranlama probleminin xy-düzlemindeki geometrik yerleşimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Yer altı kablolarının benzetimde manyetik ekranlama ait parametre ve büyüklükler ise Çizelge 4.1’de gösterildiği gibidir. Bu düzen, yerleşim olarak gerçek bir uygulamaya karşılık gelmektedir. Görüleceği gibi kablolar, U-biçimli oluk ekran içerisine yerleştirilmiş, üzeri diğer bir düz ekranla örtülerek manyetik ekranlama gerçekleştirilmiştir. Benzetimler 2B SEY kullanarak gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde ekranlı ve ekransız durum için incelemeler yapılmıştır.

Yer altı kablolarında ekransız durum için yapılan incelemelerden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir.

- Kabloların yerleştirme düzeninin üçgen olması durumunda, düz yerleşime göre daha az bir manyetik alan seviyesi oluşmaktadır (Şekil 4.8).
- Kablolar arasındaki mesafe arttıkça manyetik alan seviyesinin düştüğü görülmektedir (Şekil 4.8).
- Yer altı kabloları tarafından üretilen manyetik alan kabloları olan uzaklıkla azalmaktadır (Şekil 4.9).

Üç farklı ekran malzemesinin ekranlama performansları benzetim çalışmaları yardımıyla incelenmiştir. Kabloları yerleştirme düzeni ve ekran malzemesinin türüne, ekran boyutlarına, akımın genliğine ve ekran kalınlığına bağlı olarak farklı ekranlar için ekranlama etkinliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kabloların yerleştirme düzeni ve kullanılan ekranın çeşidine göre ekranlama performansı Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. İncelenen geometride, ekranlama performansı malzemelerin türüne göre Magnetil, alüminyum ve DX52 ekran olarak sıralanmaktadır.
- Kabloların düz yerleştirilmesi ekransız durumun tam tersine üçgen yerleştirmeye göre daha iyi ekranlama performansı göstermektedir. Bu durum düz yerleştirmede ki kabloların ekrana olan yakınlığı ile ilişkilendirilir.

- Ekran ölçkleme parametresi k' 'ya bağılı üç farklı ekranda ekranlama faktörünün değışimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Ferromanyetik malzeme olan DX52 ve Magnetil ekran için ekranlama performansı ekran boyutlarındaki artışıyla kötüleşmektedir. Bu durum ekranın kaynaktan uzaklaşmasına bağılı olarak ekrandaki indüksiyon seviyenin düşmesinin sonucu olan bağılı manyetik geçirgenliğin azalışla ilgilidir. Yüksek iletkenlikli ferromanyetik olmayan malzeme olan alüminyum için ise durum tersidir. Ekran ölçüsünün artışına bağılı olarak ekranlama performansında artış gözlenmektedir. İletken mazlemeler ekranlama prensibi olarak girdap akımları etkisini kullanır. Ekran yüzeyinin büyümesi sonucunda oluşan girdap akımları etkisinin artışıyla ilgilidir.
- Akımın genliğine bağılı olarak farklı ekran malzemelerinde ekranlama faktörünün değışimi Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Ferromanyetik malzemeler için ekranlama etkinliğı akım genliğinin artışına bağılı olarak artar. Çünkü ekran içinde oluşan indüksiyona bağılı olarak manyetik geçirgenlik artmaktadır. Ferromanyetik olmayan malzeme olan alüminyum için sahip olduğı sabit elektriksel özellikleri nedeniyle ekranlama performansının değışmediğı görülmüştür.
- Ekran kalınlığına bağılı olarak farklı ekran malzemelerinde, ekranlama faktörünün değışimi Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Ekranlama performansı tüm malzemeler için kalınlığa bağılı olarak artış göstermiştir.

Bölüm 5'de deneysel çalışmalarla, yapılan benzetim çalışmaları doğrulanmış ve ekranlar arası oluşan kontak direncinin etkisi incelenmiştir. Kurulan deney düzeneğı Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgu ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Farklı ekran yapıları için manyetik akı yoğunluğunun x-ekseni boyunca değışimi Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Sadece U-biçimli ekran kullanıldığında manyetik indüksiyon azalması ortalama olarak yaklaşık 2,5 kat iken düz ekranla birlikte kullanılması durumunda yaklaşık olarak 6 katlık bir azalma gerçekleştiğı görülmektedir.
- Deneyler yardımıyla kontak direncinin ekranlama etkinliğı üzerinde etkisi ortaya konmuştur. İlk önce ekran elemanları arasına konulan ince plastik yalıtım malzemesiyle ekranlar birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış ve kontaksız durum için ölçümler yapılmıştır. İyi kontak durumunda ise ekranların üst üste her hangi bir yalıtım olmadan yerleştirilmiş ve kontak direncini azaltmak için bağlantı noktaları kelepçelerle sıkılmıştır. Böylece iyi kontak durumu için ölçümler alınmıştır. İyi ve

kötü kontak durumunda elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.4 ve 5.6'da gösterilmiştir. İyi kontak durumu, kötü kontak durumuna göre biraz daha iyi ekranlama sağlamaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre % 10 civarında bir iyileşme olmaktadır.

- Kontak direnci etkisini dikkate alan 2B SEY'li Devre Yöntemi (DY) önerilmiştir. Bu yöntemle, ekranlamadaki kontak direncinin etkisi dikkate alınır. Şekil 5.6'da ekranlar arası kontak direncinin iyi ve kötü olması durumunda 2B SEY'li DY ile edilen sonuçlar gösterilmiştir. İncelenen problem için kontak direncinin ekranlama problemi üzerindeki etkisi 2B SEY ile DY'nin birlikte kullanılması ile tahmin edilebileceği gösterilmiştir.
- Busbarların yerleşim düzenine göre ekransız ve ekranlama sonrası manyetik akı yoğunluklarının hesap ve ölçüm sonuçları Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbiriyle oldukça uyumludur. Bu da kullanılan 2B SEY yönteminin geçerliliği ve problemin çözümde rahatlıkla kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.
- Ferromanyetik bir ekran olan DX52 için, akımın genliğiyle manyetik akı yoğunluğunun değişimi Şekil 5.8'de verilmiştir. Ekranın manyetik geçirgenliğinin akıma bağlı olarak artması neticesiyle ekranlama performansı artış eğilimindedir. Hesaplama ve ölçüm sonuçları birbiriyle örtüşmektedir. Kullanılan 2B SEY sonuçları çok azda olsa ölçüm sonuçlarının altındadır. Bu durum simülasyonun iki boyutlu olması nedeniyle kontak direncini dikkate almasıyla açıklanır. Ama bu fark dikkate alınmayacak kadar düşüktür.

Elektrik güç sistemlerinde manyetik ekranlamasının incelenmesi iki farklı ekranlama problemi için incelenmiştir. Yapılan çalışmada ortaya konulan yenilikler şu şekilde özetlenebilir:

- Birinci problemde; önerilen yöntemlerden YSA yöntemi, düzgün dağılımlı bir manyetik alan içerisinde ki bir bölgenin ekranlanması probleminde ilk kez kullanılmıştır. Önerilen bu yöntem birçok parametreye göre ekranlama faktörünün tahmininde tatmin edici sonuçlar vermiştir.
- Yine aynı problem için SEY, AY ve YSA gibi üç yöntemle hesaplama yapılmıştır. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur.
- Doğrusal olmayan ferromanyetik özellikli ekran için AY'in yüksek alan seviyelerinde hesaplama doğruluğunun azaldığı görülmüş ve bunun nedenleri detayları ile

açıklanmıştır.

- İkinci problemde; yer altı kablolarının ekranlanması hem modelleme ve benzetim yöntemiyle hem de deneysel çalışmalarla detaylıca incelenmiştir. Doğrusal olmayan elektriksel özelliğe sahip ferromanyetik bir ekranla yapılan ekranlamada, ekranlar arası oluşan kontak direncinin ekranlamaya olan etkisi gözlenmiştir. Kontak direnci etkisini dikkate alan 2B SEY'li DY yöntemi problem çözümü için önerilmiş ve uygulanmasında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.
- Eğer kullanılan ekran geometrisinde ekran uzunluğu, genişliğine göre yeterince uzunsa kontak direncinin ekranlama performansı üzerinde çok ciddi etki yapmadığı sonucuna varılmıştır.
- Kabloların yerleştirme düzeninin ekranlama performansı üzerinde etkisi olduğu ve etki edecek diğer parametreler (ekran ölçüsü, ekran kalınlığı, akımın genliği) topluca incelenmiştir. Bu sonuçlardan hareketle yer altı kablolarının ekranlaması üzerine pratik bilgilere ulaşılmıştır.

Gelecekte özellikle yer altı kablolarının incelenmesiyle ilgili yapılabilecek bazı öneriler şu şekildedir.

- Yer altı kabloları kilometrelerce uzunlukta olabilir. Bu nedenle maliyet, performans ve ekran kayıplarının birlikte değerlendirilmesi optimum bir ekranlama için önemlidir. En iyi ekranlama yapan malzeme kullanmak çoğu zaman için en iyi çözdür demek doğru olmaz. Bunun için, optimum ekranlama yapabilmek için yer altı kablolarının ekranlamasında ekran kayıpları da detaylıca incelenmelidir.
- Kontak direncinin etkisi deney ve simülasyonu gerçekleştirilen kapalı form ekranlamada ferromanyetik ekran için incelenmiştir. Ayrıca, bu durumun yüksek iletkenlikli (Alüminyum, bakır vb.) ekranlar için incelenmesi de önemli fikirler verecektir.
- Son olarak dengesiz akımların ekranlamadaki etkisi, harmoniklerin ekranlamaya ve özellikle de ekran kayıplarına olan etkileri incelenebilir.

Bu çalışmayla, özellikle yer altı kablolarının manyetik ekranlanması üzerine dikkat çekilmiştir. Yerleşim yerlerine yakın bölgelerde oluşan manyetik alanların, canlılar üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği ve elektrik-elektronik cihazların çalışmasına olumsuz etkileri olabileceği dikkate alınarak, manyetik alanların hesaplanması manyetik alan ekranlamasının

değerlendirmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Eğer alan seviyesi limit ve etki değerlerinin üzerinde ise ilk önce kablolar arası mesafenin düzenlenmesi ve/veya kabloların yerleştirme düzeniyle alan seviyesi arzu edilen seviyeye düşürülmeye çalışmalıdır. Eğer tasarımla bu sorun aşılamıyorsa manyetik alan ekranlama tekniği yürürlüğe konmalıdır. Hastane cihazları, hassas ölçüm yapan elektronik cihazlar, manyetik uyumluluk açısından önemli olan laboratuvarlar vb. yerlerde öncelik ekranlama etkinliğine verilmelidir. Çok hassas olmayan bölgelerinin ekranlamasında ise maliyet ve kayıplar dikkate alınarak optimum ekranlama yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Banfai B., Karady G.G., Kim C.J. ve Maracas K.B., (2000), "Magnetic Field Effects on CRT Computer Monitors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1):307-312.
- Bottauscio O., Chiampi M., Chiarabaglio D. ve Zucca M., (2000), "Use of Grain-Oriented Materials in Low-Frequency Magnetic Shielding", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216:130-132.
- Buccella, C., Feliziani, M. ve Prudenzi, A. (2002), "Active shielding design for a MV/LV distribution transformer substation", 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Page(s):350 – 353, 21-24 May 2002, Beijing, China.
- Canova A., Manzin A. ve Tartaglia M., (2002), "Evaluation of Different Analytical and Semi-Analytical Methods for the Design of ELF Magnetic Field Shields", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(3): 788 -796.
- Capizzi G., Coco S., Giufrida C. ve Laudani A., (2004), "A Neural Network Approach for the Differentiation of Numerical Solutions of 3-D Electromagnetic Problems, *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(2): 953-956.
- Cardelli E., Faba A. ve Pirani A., (2010), "Nonferromagnetic Open Shields at Industrial Frequency Rate," *IEEE Trans. Magn.*, 46(3):.889-898.
- Coleman, M. P., Bell, C. M. J., Taylor, H. L. ve Primic-Zakelj, M., (1989), "Leukaemia and Residence Near Electricity Transmission Equipment: a Case-Control Study", *Br. J. Cancer*, 60:193-198.
- Cruz, P., Izquierdo, C. ve Burgos, M., (2003), "Optimum Passive Shields for Mitigation of Power Lines Magnetic Field", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(4):1357-1362.
- Dawson T.W., Caputa K., Stuchly M.A., Shepard R.B., Kavet R. ve Sastre A., (2002), "Pacemaker Interference by Magnetic Fields at Power Line Frequencies", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 49 (3):254-262.
- Du Y. ve Burnett, J., (1996), "Magnetic Shielding Principles of Linear Cylindrical Shield at Power-Frequency", *IEEE 1996 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 19-23 Aug. 1996, 488-493.
- Ekonomou L., Fotis G. P., Maris T. I. ve Liatsis P., (2007), "Estimation of The Electromagnetic Field Radiating by Electrostatic Discharges Using Artificial Neural Networks", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15:1089-1102.
- Erkem B., (2006), Bir Bölgenin Elektromagnetik Alan Şiddetinin Haritasının Yapay Sinir Ağları Kullanarak Çıkartılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Farag A. S., Dawoud M. M. ve Habiballah I. O., (1999), "Implementation of Shielding Principles for Magnetic Field Management of Power Cables", *Electric Power Systems Research*, 48:193-209.
- Firat M. ve Gungor M., (2009), "Generalized Regression Neural Networks and Feed Forward Neural Networks for Prediction of Scour Depth Around Bridge Piers", *Advances in Engineering Software*, 40:731-737.
- Fukuhara M, Yonamine T. ve Missell F. P., (2006), "Reference Material For Magnetic Measurements in Epstein Frame", XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Metrology for a

Sustainable Development, 17-22 September 2006, Rio de Janeiro, Brazil.

Guarnieri, M., Moro, F. ve Turri, R., (2005), "An Integral Method for Extremely Low Frequency Magnetic Shielding", IEEE Transactions on Magnetics, 41(5):1376-1379.

Habiballah I.O., Farag A.S. , Dawoud M.M. ve Firoz A., (1998), "Underground Cable Magnetic Field Simulation and Management Using New Design Configurations", Electric Power Systems Research, 45:141-148.

Hartal O., Merzer M. ve Netze M., (2005), Shielding from ELF Magnetic Fields Emanating from Power Plants in Large Facilities, The Environmentalist, 25:209-214.

Hasselgren, L. ve Luomi, J., (1195), "Geometrical Aspects of Magnetic Shielding at Extremely Low Frequencies", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 37(3):409-420.

Haykin S., (1994), Neural networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Company, New York.

Hoburg, J. F., (1995), "Principles of Quasistatic Magnetic Shielding with Cylindrical and Spherical Shields", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 37(4):574-579.

Hoburg, J. F., (1996), "A Computational Methodology and Results for Quasistatic Multilayered Magnetic Shielding", IEEE Trans. Electromagn. Compat., 38(1): 92-103.

ICNIRP, (1998), "Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)", Health Physics, 74 (4): 494-522.

Istenic, M. ve Olsen, R. G., (2004), "A Simple Hybrid Method for ELF Shielding by Imperfect Finite Planar Shields", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 46(2):199 – 207.

Kalhor H. A. ve Zunoubi M. R., (2005), "Mitigation of Power Frequency Fields by Proper Choice of Line Configuration and Shielding", Electromagnetics, 25 : 231-243.

Kockar H. ve Meydan T., (2002), "Specific Power Loss Comparisons of Magnetic Strips Using Standard Epstein Frame", Journal of the Korean Physical Society, 40(5):918-920.

Köroğlu S. Umurkan N., Kılıç O. ve Attar F. , (2005), "Elektromagnetik Uyumluluk İçin Sac Levha Malzemelerin Şebeke Frekanslı Sistemlerde Ekranlama Etkinliği", I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu EVK'2005, 17-18 Mayıs, Kocaeli

Koroglu S., Sergeant P., Sabariego R., Quoc V. D. ve Wulf M. D., (2010), "Influence of Contact Resistance on Shielding Efficiency of Shielding Gutters for HV Cables", 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 9-12 May 2010 Chicago, 1-1.

Koroglu S., Umurkan N., Kilic O. ve Attar F., (2009), "An Approach to the Calculation of Multilayer Magnetic Shielding using Artificial Neural Network", Simulation Modelling Practice and Theory, 17:1267-1275.

Levy S., (1936), "Electromagnetic Shielding Effect of an Infinite Plane Conducting Sheet Placed between Circular Coaxial Cables", Proc. IRE, 21:923-941.

López J. P., Romero P. C. ve Dular P., (2007), "Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables," in Proc. Int. Conf. ICREPQ, 2007 [Online]. Available: www.icrepq.com/icrepq07/326-cruz.pdf, paper 326.

MATLAB: Neural Network Toolbox User's Guide, (2009), Online-Available

http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/nnet/nnet.pdf.

Memari A. R. ve Janischewskyj W., (1996), "Mitigation of Magnetic Field Near Power Lines," IEEE Trans. on Power Delivery, 11: 1577-1586.

Moreno, P. ve Olsen, R. G., (1997), "A Simple Theory for Optimizing Finite Width ELF Magnetic Field Shields for Minimum Dependence on Source Orientation", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 39(4) :340-348.

Mthombeni L. T., Pillay P. ve Strnat R., (2005), "A New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements at High Frequencies and High Flux Densities", IEEE International Conference on Electric Machines and Drives 2005, 15-15 May 2005, San Antonio, TX, 597-600.

Ögel, E. G, Özen, Ş. ve Helhel, S., (2010), "Orta Gerilim Enerji Nakil Hatları Çevresindeki Elektrik ve Manyetik Alan Seviyelerinin Halk Sağlığı Bakımından Değerlendirilmesi", BIYOMUT2010, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, Antalya, 23-27 Nisan 2010.

Olsen, R.G., Istenic, M. ve Zunko, P., (2003), "On Simple Methods for Calculating ELF Shielding of Infinite Planar Shields", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 45(3): 538-547.

Özen Ş., (2007), "Yüksek Gerilim Trafo Merkezlerinde Manyetik Alan Seviyeleri ve Mesleki Maruz Kalmanın Değerlendirilmesi", 12. Ulusal Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Kasım, Eskişehir

Reta-Hernandez M. ve Karady G. G., (1998), "Attenuation of Low Frequency Magnetic Fields Using Active Shielding", Electric Power Systems Research, 45(1):57-63.

Salinas E., (2000), "Passive and Active Shielding of Power-Frequency Magnetic Fields from Secondary Substation Components", International Conference on Power System Technology, PowerCon 2000, 2:855-860.

Sandström, M., Mild, K. H., Sandström, M. ve Berglund, A. (1993), "External Power Frequency Magnetic Field Induced-jitter on Computer Monitors", Behaviour and Information Technology, 12(6):359-363.

Savitz D. A. and Loomis D. P., (1995), "Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers", American Journal of Epidemiology 141(2): 123-134.

Schelkunoff, S.A., (1938), The Impedance Concept and its Application to Problems of Reflection, Refraction, Shielding and Power Absorption, Bell. Sys. Tech. J., 17:17-49.

Schelkunoff, S.A., (1943), Electromagnetic Waves, New York: Van-Nostrand, 223-225,303-306.

Schultz, R. B. , Plantz V. C. ve Brush D. R., (1988), "Shielding Theory and Practice", IEEE Trans. Electromag. Compat., 30: 187-201.

Sergeant P., Adriano U., Dupré L., Bottauscio O., Wulf M. D., Zucca M. ve Melkebeek J. A. A., (2004), "Passive and Active Electromagnetic Shielding of Induction Heaters", IEEE Transactions on Magnetics 40 (2):675-678.

Sergeant P., Dupré L. ve Melkebeek J., (2008), "Magnetic Shielding of Buried High Voltage Cables by Conductive Metal Plates", COMPEL, 27(1):170-180.

Sergeant P., Dupré L., Vandenbossche L. ve Melkebeek J., (2005), "Analytical Formulation

for Magnetic Shields Taking into Account Hysteresis Effect in the Rayleigh Region”, COMPEL, 24:1470-1491.

Sergeant P., Zucca M., Dupré L. ve Roccato P. E., (2006), “Magnetic Shielding of a Cylindrical Shield in Nonlinear Hysteretic Material”, IEEE Transactions on Magnetics 42(10):3189-3191.

Sergeant, P. ve Dupre, L., (2006), “Software Control of an Active Magnetic Shield”, IET Science Measurement & Technology, 153(1):13-21.

Sergeant, P., Van den Bossche, A. ve Dupre, L., (2007), “Hardware Control of an Active Magnetic Shield”, IET Science Measurement & Technology, 1(3):152-159.

Sevgi, L., (2005), “Çevremizdeki Elektrik ve Manyetik Alanlar”, Endüstriyel & Otomasyon, Şubat 2005.

Tekin, I. ve Newman, E. H., (1996), “Moment Method Analysis of the Magnetic Shielding Factor of a Conducting TM Shield at ELF”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 38(4):585-590.

TS 4490 EN60404-2, (2003), Manyetik Malzemeler - Bölüm 2: Elektriksel Çelik Sac ve Şeritlerin Manyetik Özelliklerinin Epstein Çerçevesi Vasıtasıyla Ölçme Metotları, TSE, Mart 2006.

Umurkan N., (1995), Enerji İletim Hatlarında Elektrik ve Manyetik Alan Hesabı ve Biyolojik Etkilerinin Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Umurkan N., Koroglu S., Kilic O. ve Adam A. A., (2010), “A Neural Network Based Estimation Method for Magnetic Shielding at Extremely Low Frequencies”, Expert Systems with Applications, 37:3195–3201.

Wulf M. D, Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S. ve Harlet P., (2007), “Electromagnetic Shielding of High-Voltage Cables”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 316:908-911.

Xu X.-B. ve Liu G., (2002), “Investigation of the Magnetic Field Produced by Unbalanced Phase Current in an Underground Three-Phase Pipe-Type Cable”, Electric Power Systems Research, 62:153-160.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 10.02.1977

Doğum yeri BAYBURT

Lise 1990-1993 Bayburt Endüstri Meslek Lisesi
Elektrik Bölümü

Lisans 1993-1997 Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fak.
Elektrik Eğitimi Bölümü

Yüksek Lisans 1999-2002 Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı

Doktora 2003-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri
Enstitüsü, Elektrik Müh. Anabilim Dalı,
Elektrik Tesisleri Programı

Çalıştığı kurumlar

1998-2003 Pamukkale Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı
Araştırma Görevlisi

2003-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, Elektrik Müh. Anabilim Dalı
Elektrik Tesisleri Programı
Araştırma Görevlisi (35. Madde Kapsamında)

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; TÜBİTAK, Bilim İnsanı Destekleme Dairesi Başkanlığı'na yürütülmekte olan 2214-Yurt Dışı Araştırma Burs Programı kapsamında Belçika-Ghent Üniversitesi, Electrical Energy Laboratory'da 16/02/2009-16/02/2010 tarihleri arasında desteklenmiştir.