

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YER ALTI ENERJİ KABLOLARININ OLUŞTURDUĞU MANYETİK
ALANLARIN EKSPANLANMASI**

Niyazi İL

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

2015

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YER ALTI ENERJİ KABLOLARININ OLUŞTURDUĞU MANYETİK
ALANLARIN EKCRANLANMASI

Niyazi İL

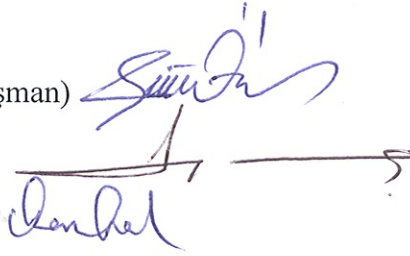
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 09/02/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)

Doç. Dr. Selçuk HELHEL

Yrd. Doç. Dr. Okan ORAL



ÖZET

YER ALTI ENERJİ KABLOLARININ OLUŞTURDUĞU MANYETİK ALANLARIN EKCRANLANMASI

Niyazi İL

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Şükrü ÖZEN

Şubat 2015, 68 sayfa

Gelişen teknoloji ile birlikte günlük yaşamda kullanılan elektrikli cihazların sayısı artmakta ve buna bağlı olarak da şebekeden çekilen güç miktarı sürekli artmaktadır. Şebekeden çekilen gücün, dolayısıyla akımın artması, bu gücü taşıyan kablolar etrafında meydana gelen manyetik alan seviyelerinin de artmasına neden olmaktadır.

Yerleşim alanlarında, özellikle kent merkezlerinde, enerji dağıtımında yer altı kablo hatlarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Enerji iletim hatları çevresinde manyetik alanlar meydana gelmekte ve artan enerji ihtiyacına paralel olarak oluşan yüksek manyetik alanlar insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu alanlar elektromanyetik girişim sonucunda hassas elektronik cihazlar üzerinde de bozucu etkiye neden olabilmektedir. Bu nedenle enerji dağıtım ağında kullanılan yer altı kablo hatları çevresinde oluşan manyetik alanların kontrolü önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada; yer altı kablo hatları ile elektrik dağıtımı sırasında oluşan manyetik alanların canlılar ve elektronik cihazlar üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek veya en aza indirmek amacıyla başvurulan yöntemlerden olan, yer altı kablo kanallarının ekranlanması konusu araştırılmıştır. Uygulamada kullanılan standart kanal tipleri üzerinde düz levha ve ters U tipi elektromanyetik ekranlar teorik ve pratik olarak incelenmiştir. En uygun ekran tipi araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Ekranlama Teorisi, Elektrik Alan, Elektromanyetik Uyumluluk, İnsan Sağlığı, Manyetik Alan, Yer Altı Enerji Kabloları

JÜRİ: Doç. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)

Doç. Dr. Selçuk HELHEL

Yrd. Doç Dr. Okan ORAL

ABSTRACT

SHIELDING OF THE MAGNETIC FIELDS WHICH IS GENERATED BY THE UNDERGROUND POWER CABLES

Niyazi İL

MSc Thesis in Electric-Electronic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

February 2015, 68 pages

With developing technology and the increasing number of electrical devices used in daily life, consequently the amount of power drawn from the electricity network is constantly increasing. Power which is taken from the network, and therefore the increase in current, leads to the increase of the magnetic field levels around that power carrying cables.

In urban areas, especially in city centers, underground power cable usage in power distribution lines is tremendously increasing day by day. Magnetic fields occur around power transmission lines and increasing energy demand occurs in parallel with the increasingly high magnetic fields can cause negative effects on human health. These areas also can cause deteriorating effects on sensitive electronic equipment by electromagnetic interference. For this reason, the control of the magnetic field that occurs around the underground cable lines that is used in the energy distribution network has become an important research topic. In this study, the shielding of underground power cable raceways is investigated, which is one of the referred methods to avoid the negative effects on the living and the electronic devices of magnetic fields that occurs while power transmission. The flat plate and reverse-U shape shielding screens are examined theoretically and practically on currently used cable raceways. The most suitable shielding type is investigated.

KEYWORDS: Electric Field, Electromagnetic Compatibility, Human Health, Magnetic Field, Shielding Theory, Underground Power Cables,

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Şükrü ÖZEN (Supervisor)
Assoc. Prof. Dr. Selçuk HELHEL
Asst. Prof. Dr. Okan ORAL

ÖNSÖZ

Hayatımızın vazgeçilmezi haline gelen elektronik cihazların sayısının ve çeşitliliğinin artmasıyla birlikte, enerji ihtiyacımız artmakta ve dolayısıyla günlük hayatta maruz kaldığımız elektromanyetik (EM) alan seviyeleri de giderek artmaktadır. EM dalgalar, bir yerden başka bir yere veri transferinde, haberleşmede, tıbbi tanı ve tedavi cihazlarında, savunma sisteminde kullanıldığı gibi; istenmeyen EM girişim problemleri olarak da karşımıza çıkabilmektedir.

Elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri yıllardır araştırılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar, EM alanlar ile bağdaştırılabilecek hastalıklar olduğunu göstermektedir ve bilim dünyası, bu alanların olumsuz etkileri olduğu konusunda hemfikirdir.

Elektrik iletimi için tesis edilen iletim hatları, yerleşim yerlerindeki insanların yüksek şiddetlerde EM alana maruz kalmalarına yol açmaktadır ve maalesef bu konudaki yönetmelikler, insan sağlığını risk altında bırakan etmenlerin ortadan kaldırılması konusunda yetersiz kalmaktadır. İletim hatları projelendirilirken, topraklama hesapları, gerilim düşümü hesapları gibi hesaplamaların yanı sıra kapsamlı biçimde elektromanyetik alan hesaplamaları da yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasında; başlıca elektromanyetik alan kaynakları, elektromanyetik girişim kaynakları ve elektromanyetik alanların olumsuz etkileri hakkında kısa bilgiler verilerek, yer altı enerji kablolarında oluşan elektromanyetik alanların ekranlanması konusundaki çözüm teknikleri araştırılmıştır. Enerji kabloları üzerinde metal plakalar ile yapılan farklı düzeneklerin elektromanyetik alanların ekranlanması konusundaki etkileri değerlendirilmiştir. Mevcut XLPE kablolarından oluşan ve çalışır durumdaki elektrik şebekesinde önce ekranlama olmaksızın ölçümler yapılmıştır. Ardından da aynı şebekedeki kablolar üzerine demir ve galvaniz levhalar kullanılarak yatay levha ve ters-U levha ekranlama düzenekleri ayrı ayrı oluşturularak yeni ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler neticesinde, farklı ekranlama düzeneklerinin manyetik alan üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.

Bana bu konuda çalışma olanağı veren, eğitimim boyunca desteğini hiç esirgemeyen ve araştırmam boyunca hoşgöründen hiç ödün vermeyen değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Şükrü ÖZEN'e; bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan ve en zor anlarımda bile hep yanımda olan aileme, eşime, dostlarıma ve ilham kaynağım kızıma sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın, konuyla ilgili kişilere yarar sağlaması ve geliştirilmesi dileğiyle...

Niyazi İL
Antalya, Şubat 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI.....	2
2.1. Temel Kavramlar.....	2
2.2. Yer Altı Enerji Kabloları.....	7
2.3. Enerji Kablolarının Elektriksel Özellikleri.....	8
2.3.1. Tek damarlı kablonun izolasyon direnci.....	8
2.3.2. Tek damarlı kablonun kapasitesi.....	9
2.4. Kabloların Kablo Kanallarına Döşenmesi.....	9
2.5. Elektromanyetik Alanların Biyolojik Etkileri.....	10
2.6. Özgül Soğurma Oranı (Specific Absorption Rate - SAR).....	13
2.7. Yasal Düzenlemeler ve Sınır Değerler.....	14
2.8. Elektromanyetik Uyumluluk ve Elektromanyetik Girişim (EMC-EMI).....	16
2.8.1. Elektromanyetik girişim kaynakları.....	16
2.8.2. Elektromanyetik girişim önlemleri.....	17
2.8.2.1. Ekranlama.....	17
2.8.2.2. Ekranlama etkinliği (SE).....	18
2.8.2.3. Elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) ekranlama etkinliği.....	26
2.9. Deri Kalınlığı (Skin Depth).....	27
2.10. Elektrik Alan ve Manyetik Alan Hesaplama Yöntemleri.....	28
2.10.1. Biot-Savart yasası.....	28
2.10.2. Amper Yasası.....	34
2.10.3. Yer Altı Enerji Kabloları için Biot-Savart Yasası Hesabı.....	35
3. MATERYAL VE METOT.....	37
3.1. Çalışmada İzlenilen Yol.....	37
3.2. Ekranlama İçin Kullanılan Malzeme Özellikleri ve Ölçüm Düzenekleri.....	45
4. BULGULAR.....	47
5. TARTIŞMA.....	60
6. SONUÇ.....	64
7. KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Amper
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
c	Işık hızı
C	Coulomb
D	Elektrik Akı Yoğunluğu
dB	Desibel
E	Elektrik Alan
<i>f</i>	Frekans
G	Gauss
<i>H</i>	Hertz
H	Manyetik Alan
Hz	Hertz
<i>J_c</i>	İletkenlik Elektrik Akım Yoğunluğu
<i>J_d</i>	Yer Değiştirme Elektrik Akım Yoğunluğu
<i>J_i</i>	Baskın Elektrik Akı Yoğunluğu
kg	Kilogram
km	Kilometre
kV	Kilovolt
m	Metre
<i>M_i</i>	Kaynak Manyetik Akım Yoğunluğu
<i>M_d</i>	Yer Değiştirme Manyetik Akım Yoğunluğu
S	Siemens
<i>T</i>	Periyot
T	Tesla
<i>U</i>	Gerilim
V	Hacim
V	Volt
W	Watt
ω	Açısal Hız
ρ_{ev}	Elektrik Yük Yoğunluğu
ρ_{mv}	Manyetik Yük Yoğunluğu
δ	Deri Kalınlığı
μ	Mikron (10^{-6})
η	Dalga Empedansı
σ	İletkenlik Katsayısı
Γ	Yansıma Katsayısı
α	Zayıflama Sabiti
β	Faz Sabiti
γ	Yayımlama Sabiti
λ	Dalga Boyu
Ω	Ohm

Kısaltmalar

ACGIH	Amerikan Endüstri ve Hükümet Hıfzıssıhha Kongresi
AG	Alçak Gerilim
CE	Avrupa Standartları
DC	Doğru Akım
dB	Desibel
DIN/VDE	Alman Standart Enstitüsü
EKAT	Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri
ELF	Çok Düşük Frekans
EM	Elektromanyetik
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	Elektromanyetik Girişim
EMR	Elektromanyetik Radyasyon
EMU	Elektromanyetik Uyumluluk
GSM	Cep Telefonu İletişim Protokolü
IARC	Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı
ICNRP	Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komitesi
IEEE	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IRPA	Radyasyon Korunma Uluslararası Birliği
INIRC	İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon Komitesi
MATLAB	Matris Laboratuvarı (Programlama Dili)
PVC	Polivinil Klorür
RF	Radyo Frekans
RMS	Karekök Ortalama
SAR	Özgül Soğurma Oranı
SE	Ekranlama Etkinliği
SI	Uluslararası Birimler Sistemi
TCO	İsveç Profesyonel Çalışanlar Komitesi
TLV	Eşik Limit Değeri
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
U.S. EPA	Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
URL	Standart Kaynak Bulucu
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
XLPE	Çapraz Bağlı Polietilen
YG	Yüksek Gerilim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Durağan bir yükün elektrik alanı	2
Şekil 2.2. Elektrik alanda farklı yüklere etkiyen kuvvetlerin yön ve doğrultuları	2
Şekil 2.3. Akım taşıyan bir telin etrafındaki manyetik alan.....	3
Şekil 2.4. Yerin Manyetik Alanı	3
Şekil 2.5. Elektromanyetik Dalga	4
Şekil 2.6. Elektromanyetik Spektrum	6
Şekil 2.7. Tek Damarlı ve Üç Damarlı XLPE Kablo.....	7
Şekil 2.8. Tek Damarlı Kablo Kesiti.....	8
Şekil 2.9. Standart Kablo Kanalı.....	10
Şekil 2.10. Elektromanyetik Girişim Modeli.....	16
Şekil 2.11. Düzlem dalga için ekranlamanın aşamaları	18
Şekil 2.12. Ekran Üzerinden Çoklu Yansımanın Gösterimi	21
Şekil 2.13. Uzayda tek faz için akım bileşenleri.....	29
Şekil 2.14. Üç iletkenli bir havai hattın manyetik alan hesabı.....	30
Şekil 2.15. Akım ve Manyetik Alan arasındaki ilişki	31
Şekil 2.16. Akım taşıyan bir tel etrafındaki manyetik alan.....	32
Şekil 2.17. Üç kablolu bir yer altı enerji nakil hattının gösterimi (Düz Yerleşim).....	36
Şekil 3.1. Ölçüm Yapılan A2 Trafo Binası	37
Şekil 3.2. YG Kablo kanalının ekransız durumunun temsili gösterimi	37
Şekil 3.3. YG Kablo kanalının ekranlı durumunun temsili gösterimi	38
Şekil 3.4. AG Kablo kanalının ekransız durumunun temsili gösterimi	38
Şekil 3.5. AG Kablo kanalının ekranlı durumunun temsili gösterimi	39
Şekil 3.6. Deri kalınlığı etkisi MATLAB kodu	39
Şekil 3.7. Demir, Bakır ve Aüminyum için deri kalınlığı etkisi	41
Şekil 3.8. Ekran zayıflatması MATLAB kodu.....	42
Şekil 3.9. 2 mm Kalınlığında Bakır Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi	42
Şekil 3.10. 2 mm Kalınlığında Demir Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi	43
Şekil 3.11. 2 mm Kalınlığında Gümüş Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi	43

Şekil 3.12. 2 mm Kalınlığında Alüminyum Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi	44
Şekil 3.13. 2 mm Kalınlığında Paslanmaz Çelik Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi	44
Şekil 3.14. Ters U Galvaniz Ekran ile YG Kanalda Ölçüm.....	45
Şekil 3.15. AG Kanalda Ekransız Ölçüm.....	45
Şekil 3.16. Ters U Galvaniz Ekran ile AG Kanalda Ölçüm.....	46
Şekil 3.17. Hioki FT3470 Manyetik Alan Ölçüm Cihazı	46
Şekil 4.1. YG Kablo Kanalındaki Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	47
Şekil 4.2. YG Kablo Kanalında Beton Blok Ekranlama Etkisi.....	48
Şekil 4.3. YG Kablo Kanalında Ters U Galvaniz Sac Ekranlama Etkisi.....	48
Şekil 4.4. YG Kablo Kanalında Galvaniz Sac Levha Ekranlama Etkisi.....	49
Şekil 4.5. YG Kablo Kanalında Demir Sac Levha Ekranlama Etkisi	49
Şekil 4.6. YG Kablo Kanalında Kullanılan Malzemelerin Ekranlama Etkinliği	51
Şekil 4.7. Ekranlamanın manyetik alan değişimine etkisi MATLAB kodu	52
Şekil 4.8. Kullanılan Farklı Ekranlama Malzemeleri için hesaplanan manyetik alan değerleri	53
Şekil 4.9. AG Kablo Kanalındaki Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	54
Şekil 4.10. AG Kablo Kanalında Beton Blok Ekranlama Etkisi	55
Şekil 4.11. AG Kablo Kanalında Galvaniz Sac Ekranlama Etkisi.....	55
Şekil 4.12. AG Kablo Kanalında Demir Sac Ekranlama Etkisi.....	56
Şekil 4.13. AG Kablo Kanalında Beton Blok+Demir Sac Ekranlama Etkisi	56
Şekil 4.14. AG Kablo Kanalında Kullanılan Malzemelerin Ekranlama Etkinliği	57
Şekil 4.15. AG Kablo Kanalı Temsili Gösterimi	58
Şekil 4.16. AG Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	59
Şekil 5.1. Antalya ili Serik ilçesi Şehir 1 Fideri YG Kablo Kanalında Ekransız Ölçüm	60
Şekil 5.2. Antalya ili Serik İlçesi Şehir 1 Fideri YG Kablo Kanalında Ekranlı Ölçüm..	61
Şekil 5.3. Antalya ili Serik İlçesi Şehir 1 Fideri AG Kablo Kanalında Ekransız Ölçüm	61
Şekil 5.4. Antalya ili Serik İlçesi Şehir 1 Fideri AG Kablo Kanalında Ekranlı Ölçüm..	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Elektromanyetik Spektrum Frekans Aralıkları	6
Çizelge 2.2. TSE'nin hazırladığı referans değerler	11
Çizelge 2.3. 50-60 Hz için elektrik ve manyetik alan referans değerleri.....	11
Çizelge 2.4. ICNIRP 2010 limit değerleri (50 Hz için)	14
Çizelge 2.5. Bazı ekranlama malzemelerinin elektriksel değerleri.....	17
Çizelge 2.6. Bazı metallere ait deri kalınlığı (δ) ve dalga empedansı (η) değerleri	28
Çizelge 3.1. Manyetik Kaynağın yakın alan bölgesinde bulunan ($r=80\text{cm}$) bazı ekran malzemelerinin çeşitli kalınlıkları için SE Bileşenleri (50 Hz frekansı) ...	40
Çizelge 4.1. YG Kablo Kanalında Ölçülen Manyetik Alan Değerleri.....	47
Çizelge 4.2. YG Kablo Kanalında Kullanılan Materyallerin Ekranlama Etkinliği.....	50
Çizelge 4.3. AG Kablo Kanalında Ölçülen Manyetik Alan Değerleri.....	54
Çizelge 4.4. AG Kablo Kanalında Kullanılan Materyallerin Ekranlama Etkinliği.....	57
Çizelge 4.5. AG Kablo Kanalında Ölçülen Manyetik Alan Değerleri.....	58

1. GİRİŞ

Teknolojik ilerlemeler ile birlikte günümüzde elektrik enerjisine olan talep giderek artmaktadır. Hızlı nüfus artışına paralel olarak yerleşim alanları kent merkezlerinden kırsal alanlara kadar uzanmakta ve bu durum, elektrik enerjisinin uzak mesafelere iletilmesi konusunu çok önemli kılmaktadır. Bilindiği gibi yüksek güç değerinin uzun mesafelere iletilmesi teknolojik ve ekonomik bakımdan yüksek gerilim tekniği ile mümkün olmaktadır.

Günümüzde özellikle kent merkezlerindeki enerji dağıtım ağında yer altı kablo kullanımı artmaktadır. Herhangi bir iletim hattından akım geçtiğinde hat yakınında elektrik ve manyetik alanlar oluştuğundan, günlük hayatımızı sürdürürken, aslında etrafımızda hep var olan elektromanyetik alanlarla yaşamaktayız. Bütün elektrikli cihazların da çevrelerine, güçleri oranında bir elektromanyetik alan yaydığı göz önünde bulundurulduğunda, artan teknolojik ürün kullanımına paralel olarak çevremizdeki elektromanyetik kirliliğin sürekli artması kaçınılmaz olmaktadır.

Elektromanyetik alanlara maruz kalan canlılara çarpan dalgalar, dokuların ve vücut ölçülerinin elektromanyetik özelliklerine bağlı olarak yansımaya veya girişime uğrarlar. Bu alanların, elektronik cihazlar üzerindeki bozucu etkilerinin örnekleri çok sayıdadır, ancak canlılar üzerindeki olumsuz etkileri konusunda çok sayıda araştırma mevcut olmasına rağmen, kanıtlanan somut örnekler bulunmadığından veya etkilerinin hemen ortaya çıkmaması nedeniyle bu konuya gereken önem verilmemekte ve göz ardı edilmektedir.

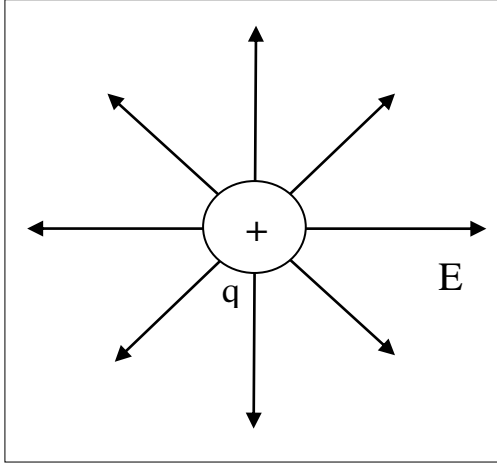
Akım taşıyan her iletkenin etrafında manyetik alan oluştuğundan ve manyetik alanların canlılar ve hassas aletler üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilindiğinden, oluşan bu elektromanyetik alanın kontrolü önemli bir konu haline gelmektedir. Elektromanyetik alanların sınır değerleri araştırılarak bu konudaki güvenlik standartlarının oluşturulması gerekmektedir.

Bu tez kapsamında, yer altı enerji kablolarının oluşturduğu elektromanyetik alan seviyeleri teorik ve pratik olarak incelenmiş, kablo kanal tipleri ile ekran malzemeleri analiz edilmiş ve uygun tipleri araştırılmıştır.

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

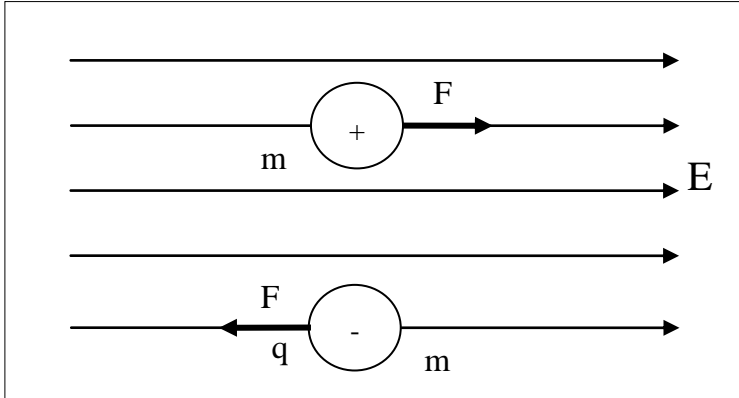
2.1. Temel Kavramlar

Elektrik Alan, elektrik yüklü parçacıkların birbirleri üzerinde yarattığı itme ya da çekme kuvveti olarak ifade edilebilir. Bu kavram Michael Faraday tarafından bilime kazandırılmıştır.



Şekil 2.1. Durağan bir yükün elektrik alanı

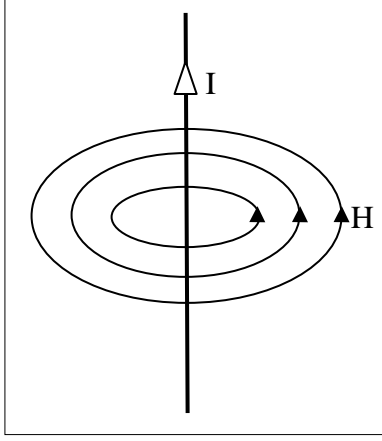
Elektriksel Alan, Uluslararası Birim Sistemi'ne (SI) göre, birimi *Volt / metre* ya da *Newton / Coulomb* olan bir vektör alanıdır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, durağan elektrik yükleri çevresinde elektrik alan oluşur.



Şekil 2.2. Elektrik alanda farklı yüklere etkiyen kuvvetlerin yön ve doğrultuları

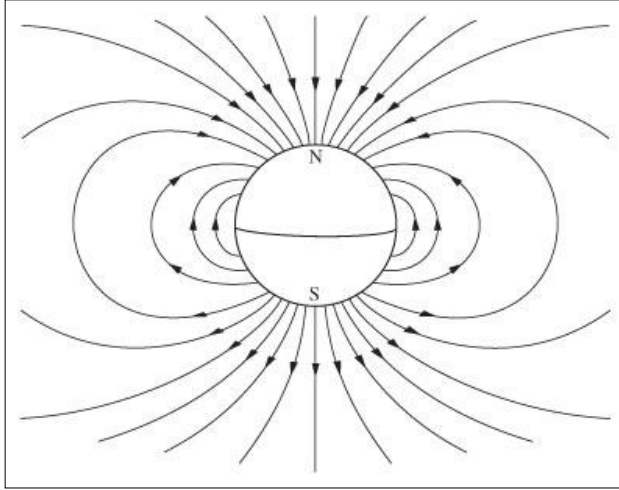
Şekil 2.2'de, elektrik alan içerisindeki farklı yüklere etkiyen kuvvetlerin yön ve doğrultuları gösterilmiştir. Yükler hareket halinde ise, bu elektrik yüklerinin çevresinde elektrik alanın yanı sıra manyetik alan da oluşur.

Manyetik Alan, elektrik yüklerinin hareketi neticesinde oluşan vektörel bir büyüklüktür. SI birimi *Tesla*'dır, ancak Tesla günlük olaylar için çok büyük bir birim olduğundan ($1T= 10^4 G$) pratikte *gauss (G)* kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te, akım taşıyan bir telin etrafında oluşan manyetik alan gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Akım taşıyan bir telin etrafındaki manyetik alan

Dünyanın merkezindeki sıvı demirin hareketi sonucunda oluşan elektrik akımı, yerin manyetik alanının oluşumuna sebebiyet verir. Yüklü metal parçacıklar manyetik alanlardan geçerek devamlı ve döngüsel bir elektrik akımı yaratır. Çekirdekdeki sıvı metalin daimi hareketine bağlı olarak da bir miktar manyetik alan daha oluşur ve bu alan çekirdekte yeni akımlar oluşturur. Yeni oluşan bu akımlar daha fazla manyetik alanın oluşmasına neden olur ve Şekil 2.4'teki gibi geri beslemeli bir döngü oluşur.

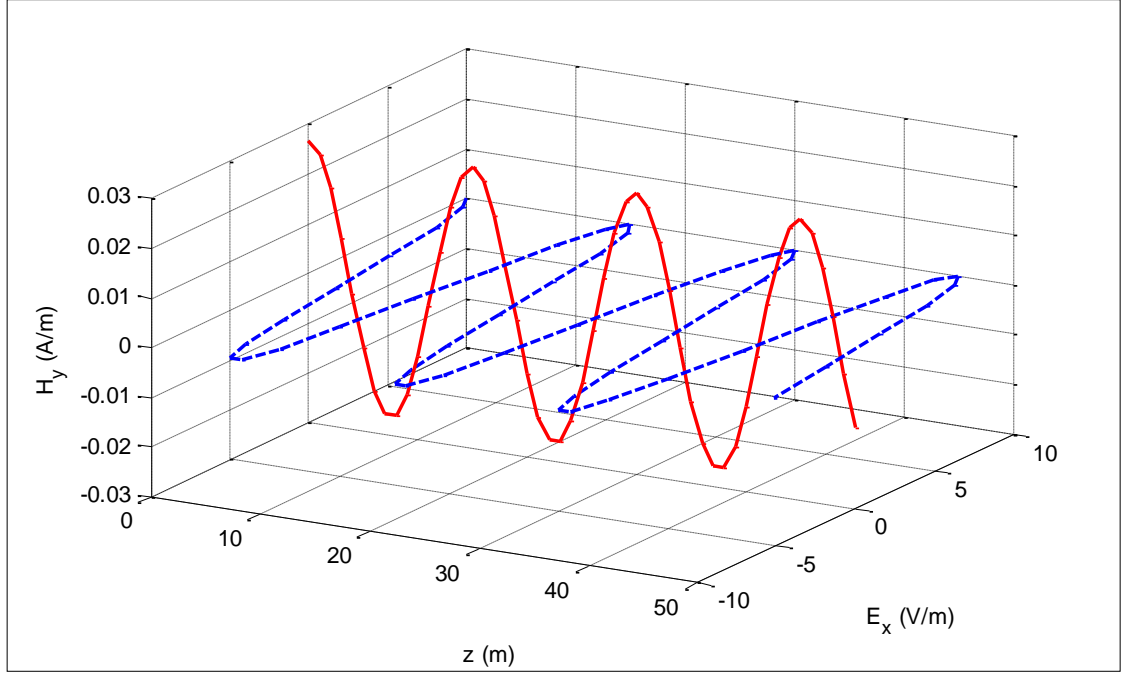


Şekil 2.4. Yerin Manyetik Alanı

Elektrik ve manyetik alanlar birbirinden bağımsız değildir. Zamana göre değişen bir elektrik alan, hareket eden yüklü parçacık nedeniyle, yerel bir manyetik alana sebep olur. Bu nedenle elektrik ve manyetik alanlar, elektromanyetik alan olarak birlikte incelenirler.

Elektrik alanı ile manyetik alanın etkileşimi sonucu oluşan elektromanyetik alan, belirli koşullar altında, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi elektromanyetik enerji taşıyan bir dalga hareketi olarak da tanımlanabilir. EM dalgalar, boş uzayda ışık hızıyla yayılan elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden oluşur ve her iki alanın da karakteristiğini içerisinde barındırırlar.

Elektromanyetik dalgalar biçiminde yayılan enerjiye elektromanyetik radyasyon (ışınım) denir. Elektrik alan vektörleri ile manyetik alan vektörlerinin değişimi sinüzoidal eğriler biçiminde ve birbirlerine dik olarak yayılırlar.



Şekil 2.5. Elektromanyetik Dalga

Elektromanyetik Alan teorisi James Clerk Maxwell tarafından dört temel nicelik ile (E, D, B, H) tanımlanmış ve Maxwell Denklemleri oluşmuştur. Bu dört denklem ile EM alan teorisi anlaşılır bir hale gelerek her türlü alan ve devre problemi çözümlerine gelmiştir (Arı ve Özen 2008, Balanis 2012, OSHA 1990).

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

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_i + \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_{ic} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_{ic} + \vec{J}_d \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_{ev} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = \rho_{mv} \quad (2.4)$$

burada;

$$\vec{J}_{ic} = \vec{J}_i + \vec{J}_c \quad (2.5)$$

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\vec{M}_d = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.7)$$

dir. Alan denklemlerindeki tüm bu niceliklerin zamanla değiştiği kabul edilmektedir. Niceliklerin tanımları ve birimleri ise aşağıdaki gibidir (Arı ve Özen 2008, Balanis 2012):

E = elektrik alan şiddeti (volt / m)

H = manyetik alan şiddeti (amper / m)

D = elektrik akı yoğunluğu (coulomb / m²)

B = manyetik akı yoğunluğu (weber / m²)

J_i = baskın (kaynak) elektrik akı yoğunluğu (amper / m²)

J_c = iletkenlik elektrik akım yoğunluğu (amper / m²)

J_d = yer değiştirme elektrik akım yoğunluğu (amper / m²)

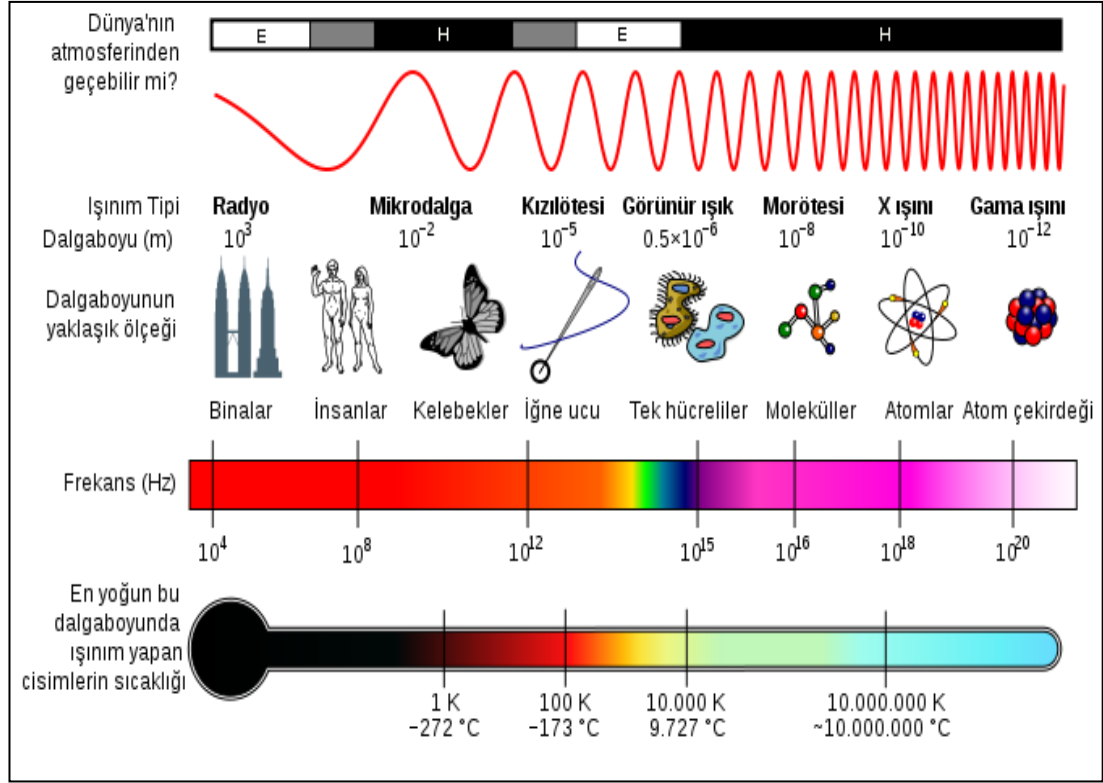
M_i = baskın (kaynak) manyetik akım yoğunluğu (volt / m²)

M_d = yer değiştirme manyetik akım yoğunluğu (volt / m²)

ρ_{ev} = elektrik yük yoğunluğu (coulomb / m³)

ρ_{mv} = manyetik yük yoğunluğu (weber / m³)

Elektromanyetik dalgalar, saniyedeki titreşim sayılarına (frekans) göre farklı isimlerle adlandırılırlar ve buna elektromanyetik spektrum (Şekil 2.6) denir.



Şekil 2.6. Elektromanyetik Spektrum

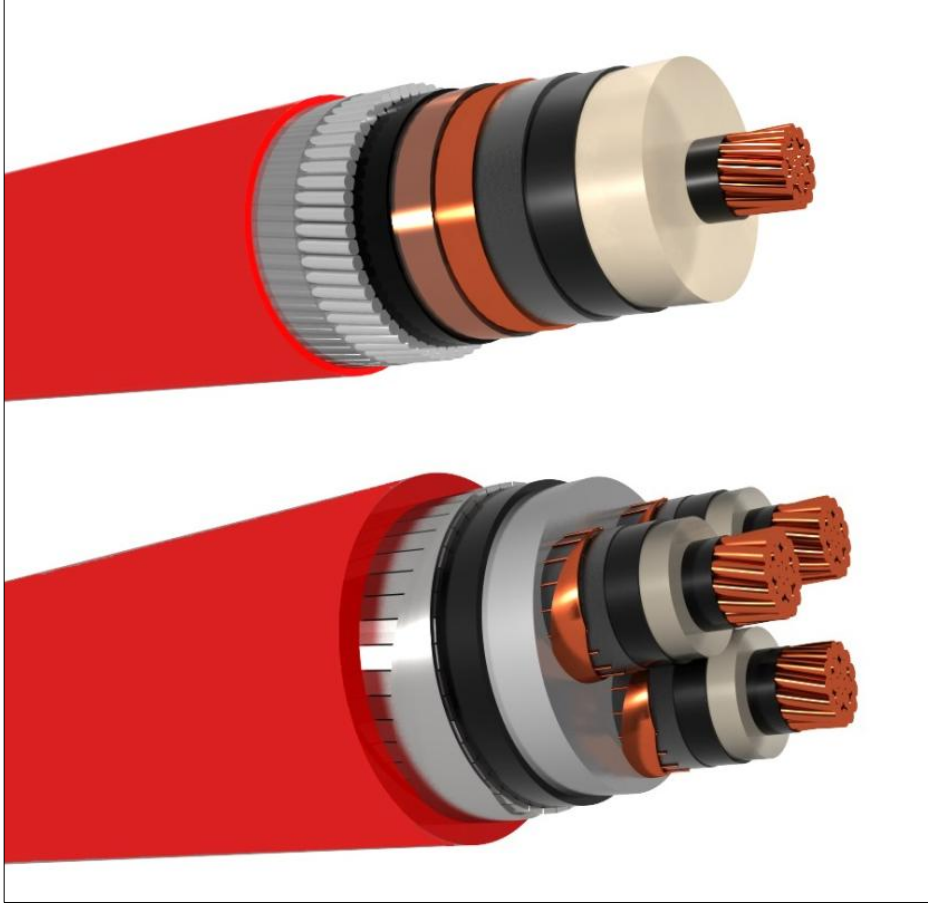
Çizelge 2.1'de elektromanyetik spektrum frekans aralıkları ve açıklamaları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Elektromanyetik Spektrum Frekans Aralıkları

Frekans Aralığı	Dalga Boyu	Açıklama	Kısaltma
3 – 30 kHz	100 – 10 km	Çok Düşük Frekans (Extra Low Frequency)	ELF
30 – 300 kHz	10 – 1 km	Düşük Frekans (Low Frequency)	LF
300 – 3000 kHz	1 km – 100 m	Orta Frekans (Medium Frequency)	MF
3 – 30 MHz	100 – 10 m	Yüksek Frekans (High Frequency)	HF
30 – 300 MHz	10 – 1 m	Çok Yüksek Frekans (Very High Frequency)	VHF
300 – 3000 MHz	1 m – 10 cm	Ultra Yüksek Frekans (Ultra High Frequency)	UHF
3 – 30 GHz	10 – 1 cm	Süper Yüksek Frekans (Super High Frequency)	SHF
30 – 300 GHz	1 cm – 1 mm	Ekstra Yüksek Frekans (Extra High Frequency)	EHF

2.2. Yer Altı Enerji Kabloları

Yer altı kablolarının imalatında genel olarak bakır veya alüminyum iletken ve 1-15 kV'a kadar protodur (PVC), 1-154 kV'a kadar protothen-x yalıtkan malzeme kullanılır. Protodur izolasyonunun altında ve üstünde dielektrik kayıpları azaltmak için iç ve dış iletken tabakalar vardır. Kısa devre akımlarına uygun kesitte bakır ekranlıdır. Üç damarlı kablolarda yassı çelik zırhlı ve bunun içinde helis şeklinde sarılmış çelik şeritten tutucu sargı bulunur. Mekanik dış tesirlere karşı çok dayanıklıdırlar. Çoğunlukla şehir şebekelerinde, şalt tesisleri, cadde aydınlatmalarında toprak altında kullanılır.



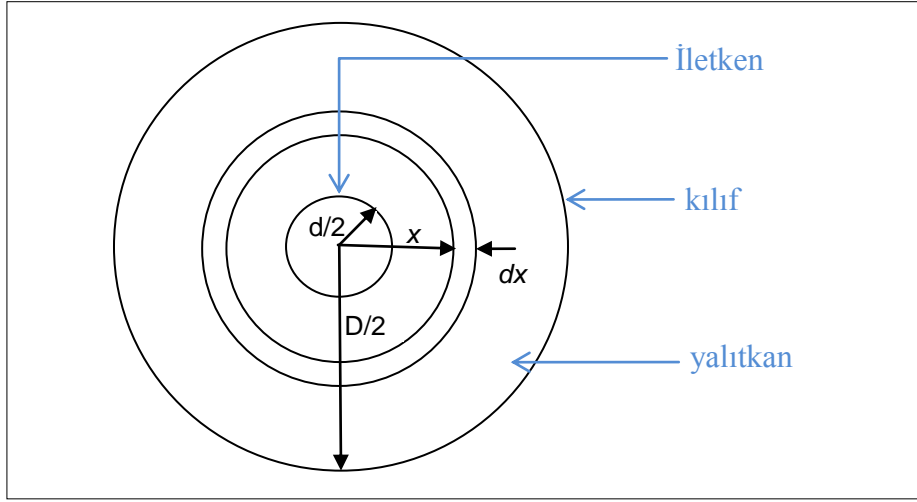
Şekil 2.7. Tek Damarlı ve Üç Damarlı XLPE Kablo

Orta ve yüksek gerilimde ise yer altında protothen-x yalıtkanlı kablolar bilhassa tercih edilir. Şekil 2.7'de, tek damarlı ve üç damarlı XLPE kablo örnekleri gösterilmiştir. Bu kabloların en üstün özelliği termik dayanıklılığıdır. Büyük sıcaklık farklarında dahi mekanik ve elektriksel değerler hemen hemen sabit kalır. Bundan dolayı protothen-x yalıtkanlı kablolarda devamlı işletme için iletken sıcaklığına 90°C'ye kadar müsaade edilir (Türk Standardı 2008).

2.3. Enerji Kablolarının Elektriksel Özellikleri

2.3.1. Tek damarlı kablonun izolasyon direnci

İzolasyon direnci, kablo iletkeninden kablo kılıfına doğru akan sızıntı akımına karşı kablo yalıtımının oluşturduğu dirençtir. İzolasyon direnci kablo uzunluğu ile ters orantılıdır.



Şekil 2.8. Tek Damarlı Kablo Kesiti

D ve d , Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, sırasıyla tek damarlı kablonun iç kılıf ve iletkenin çapları olsun. İletkenin x yarıçap uzağındaki ve dx kalınlığındaki dairesel kesitli yalıtkanın izolasyon direnci (ohm/metre) şu şekilde bulunur:

$$dR = \rho \frac{dx}{(2\pi x)} \quad (2.8)$$

$$\int dR = \rho \int_{d/2}^{D/2} \frac{dx}{2\pi x} = \frac{\rho}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (2.9)$$

burada ρ yalıtkanın öz direncidir. Kablonun l metre uzunluğunda olduğunu düşünürsek, izolasyon direnci şu şekilde değişir:

$$R_s = \frac{R}{l} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{D}{d}\right), (\Omega) \quad (2.10)$$

2.3.2. Tek damarlı kablonun kapasitesi

Şekil 2.8'deki tek damarlı kablo kesitine göre q iletken yükü olsun. İletkenin merkezinden x metre uzaklıktaki elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m²) D_x şu şekilde bulunur:

$$D_x = \frac{q}{(2\pi x)} \quad (2.11)$$

$$D_x = \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x, \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (2.12)$$

$$E_x = \frac{D_x}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \cdot \frac{1}{2\pi x}, \text{ (V/m)} \quad (2.13)$$

burada E_x , radyal elektrik stresi (veya potansiyel gradyan), ε_0 boşluğun dielektrik sabiti, ε_r yalıtkanın dielektrik sabitidir. İletken ve kılıf arasındaki potansiyel farkı V ise şu şekilde ifade edilir:

$$V = \int E_x dx \quad (2.14)$$

$$V = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \int_{d/2}^{D/2} \frac{dx}{x} = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \ln\left(\frac{D}{d}\right), \text{ (V)} \quad (2.15)$$

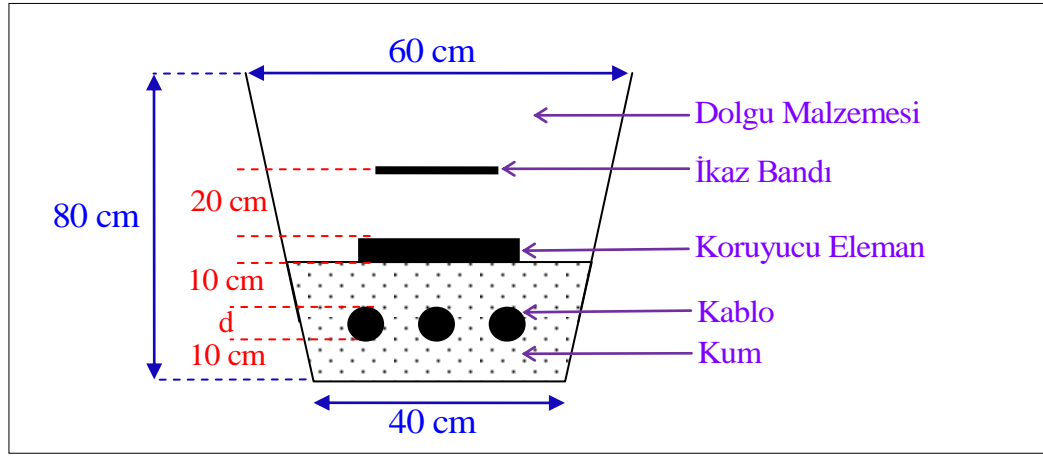
Bu denklemlerden, iletkenin kapasitesi hesaplanacak olursa şu ifade elde edilir (Ray 2008):

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}, \text{ (F/m)} \quad (2.16)$$

2.4. Kabloların Kablo Kanallarına Döşenmesi

Yer altı enerji kablolarının konulacağı kanallar hazırlanırken, kabloları herhangi bir mekanik, kimyasal, ısıl veya elektromanyetik tehlikeye sokmayacak şekilde hazırlanmalıdır.

Şekil 2.9’da gösterildiği gibi, standart kablo kanalının derinliği 80 cm, dip genişliği 40 cm, ağız genişliği 60 cm olmalıdır. Zorunlu durumlarda, ek koruma önlemleri alınarak kablo kanalı derinliği 40 cm dolaylarına çekilebilmektedir.



Şekil 2.9. Standart Kablo Kanalı

Toprak içerisindeki kimyevi maddelerin, çekilecek kablolarla olumsuz etkilerini önlemek amacıyla açılan kanalın zeminine 10 cm kalınlığında elenmiş kum serildikten sonra kablolar kanala döşenir. Döşenmiş kabloların üzerlerine yine 10 cm kalınlığında elenmiş kum dökülür. Kablonun üzerindeki kumun üzerine ve aynı kanala yan yana döşenen AG ve YG kabloları arasında tüm kablo boyunca dolu tuğla veya en az 6 cm kalınlığında beton plaka veya plastik vb. malzemeden yapılmış koruyucu elemanlar yerleştirilmelidir. Bu koruyucunun yaklaşık 30 cm üzerine ise en az 10 cm genişliğinde polietilenden yapılmış uyarı şeridi konulmalıdır. AG ve YG kablolarının üst üste döşenmesinde ise YG kablosu altta, AG kablosu da üstte kalacak şekilde döşenir, aralarında enine tuğla döşenir (Tedaş 2008, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı 2012).

2.5. Elektromanyetik Alanların Biyolojik Etkileri

Elektromanyetik alanlar duyu organları ile algılanamamakta, ancak ölçülerek değerlendirilebilmektedir. Yapılan ölçüm sonuçları ise uluslar arası ya da ulusların kendi belirledikleri insan sağlığına zarar vermeyeceği düşünülen sınır değerlere göre değerlendirilir. Sınır değer altındaki ölçümlerin insan sağlığına zarar vermeyeceği kabul edilmektedir. Oysa sınır değerler vücut sıcaklığını ortalama olarak 1°C arttıran elektromanyetik enerjinin zararlı ve 0,1°C artışın ise zararsız olduğu kabulünden yola çıkılarak belirlenmektedir. Bu kabul radyo frekans radyasyonunun salt ısı etkisini değerlendirmekte ancak biyolojik, kimyasal, psikolojik ve genetik etkileri göz ardı etmektedir. Göz ardı edilen bu etkilere yönelik henüz bir standart oluşturulamamıştır (Çerezci vd 2012, Özen vd 2014).

Enerji iletim hatları kaynaklı elektrik ve manyetik alanlara ilişkin ülkemizde sadece "İnsanların Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalması - Düşük Frekanslar (0 Hz-1 kHz)" isimli bir TSE standardı bulunmaktadır. Bu standart içinde, çeşitli frekanslardan kaynaklı elektromanyetik alanlar için referans değerler verilmektedir. TSE'nin hazırladığı referans değerler Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bunlara ek olarak,

elektromanyetik alanları referans almayan, yüksek gerilim hatlarına güvenli yaklaşımın sağlanabilmesi için, 30 Kasım 2000 tarih ve 24246 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren "Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği"nde (EKAT) emniyetli yaklaşım mesafe değerleri tanımlanmıştır. Bu yönetmeliğin 46. maddesinde yer alan yatay ve düşey mesafeler temel alınmak kaydı ile hattın tesisine izin verilmektedir.

Çizelge 2.2. TSE'nin hazırladığı referans değerler

Maruz Kalma Koşulları	Elektrik Alanı		Manyetik Alan
	Referans (kV/m)	Zaman (t, saat)	Referans (G)
Çalışanlar	30	$t \leq 80/E$	16G
Halk	10		6.4G
<i>E: ortamda ölçülen elektrik alan değerleri</i>			

Uluslararası anlamda; 1990 yılında, Radyasyon Korunma Uluslararası Birliği İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon Komitesi (IRPA/INIRC) ile Dünya Sağlık Örgütü (WHO) Çevre Sağlığı Bölümü'nün işbirliği ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) desteği ile 50/60 Hz'lik elektrik ve manyetik alanlar için sınır değerler belirlenmiştir (Bkz. Çizelge 2.3). Ancak daha sonra İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Uluslararası Komisyonu tarafından hazırlanan ICNIRP rehberinde, elektrik ve manyetik alanlar için daha önce belirlenen sınır değerlerinin aşılmasının sağlığa zararlı etkilerinin olacağı anlamına gelmediği, daha ayrıntılı araştırmaların yapılması gerektiği belirtilmektedir. Avrupa Birliği'nde kullanılan referans değerler de, TSE Standardı ile aynıdır (Ozen vd 2013, Ögel vd 2010).

Çizelge 2.3. 50-60 Hz için elektrik ve manyetik alan referans değerleri

Maruz Kalan Grup	Maruz Kalma Koşulları	Elektrik Alan (kV/m)	Manyetik Alan (G)
Çalışanlar	Tam mesai günü	10	5
	Kısa süre	30	50
	Uzuvlar (kol ve bacak gibi vücuda eklemle bağlı)	--	250
Halk	24 saat/gün	5	1
	Günde birkaç saat	10	10

Dünya Sağlık Örgütü, bağımsız ve kar amacı gütmeyen uzman kuruluşların araştırmalarını temel almaktadır. WHO, iyonlaştırmayan radyasyon konusunda ICNIRP'yi, kanser konusunda IARC Uluslararası Kanser Araştırmaları Kurumu'nu kabul etmektedir. Haziran 2001'de IARC, enerji iletim hatlarının yakın civarında oluşan manyetik (ELF) alanların kanserojen olabileceğini açıklamıştır. WHO'nun kanserle ilgili sınıflamasında ELF manyetik alanlar "Olası Kanserojen" (Grup-2B) olarak yer almıştır (Koşalay 2008, Özen 2007).

İnsan vücudunda bedensel fonksiyonların hepsi 1-250 mikrovolt gerilimli elektrik uyarılarıyla devam eder. Bu kadar hassas çalışan bir sisteme dışarıdan etki eden elektromanyetik enerji bu sistem tarafından tolere edilemeyebilir ve sistemin dengesi bozulabilir (Özen vd 2014).

İnsan vücudunun elektromanyetik alanlarla etkileşimini belirleyen faktör, vücuttaki dokuların özellikleridir. İnsan dokuları su içeriği ve kimyasal yapılarına göre değişik elektromanyetik özellikler alır. Zamanla değişen elektromanyetik alanlara maruz kalma, vücuttaki dokularda enerji yutulmasına ve vücut içi akımların akmasına neden olur. Dokulardaki bu akım yoğunluğu (J), doku iletkenliği (σ) ve elektrik alana (E) bağlı olarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$J = \sigma E, (A/m^2) \quad (2.17)$$

Dokuların bu özelliklerinden yararlanılarak, elektromanyetik alana maruz kalan bir vücudun birim kütle başına soğurduğu güç (SAR değeri) hesaplanabilir. Dokunun iletkenliği, dokularda ısıl yutulmaya neden olan parametredir. Hacmi V , iletkenliği σ (S/m) ve yoğunluğu ρ (kg/m^3) olan bir doku içerisindeki elektrik alan şiddeti E (V/m) ise, yutulan SAR değeri (W/kg) olarak şu eşitlikle verilir:

$$SAR = \iiint_v \frac{\sigma E^2}{\rho} dV, (W/kg) \quad (2.18)$$

Dokuların elektriksel özellikleri belirli bir frekansta doku direncine bağlıdır. Bundan dolayı dokuların elektriksel özellikleri insanlar arasında farklılık gösterir (Helhel ve Ozen 2007).

Elektromanyetik alanların insan vücudu üzerindeki etkilerinin araştırılması amacı ile insan vücudunu temsil eden matematiksel modeller geliştirilmiştir. Modelleme yapılırken, dokuların elektromanyetik özelliklerinden ve özgül soğrulma oranından yararlanılmaktadır. Geliştirilen bu matematiksel modeller, doğrudan insan üzerinde deneysel olarak yapılamayan durumlar için yararlı bilgiler vermektedir.

Bilim ve teknolojinin hızla geliştiği ve bunun sonucu olarak canlıların daha çok elektromanyetik alana maruz kaldığı günümüzde, yapılan epidemiyolojik çalışmalar yüksek gerilim hatları ve elektrikli ev aletlerinin kanser riskini arttırdığını göstermektedir.

Elektromanyetik alanların biyolojik etkileri kısa süreli hissedilen etkiler ve uzun zamanda hissedilen etkiler olarak ikiye ayrılır. Baş ağrıları, göz yanmaları, görüş alanında daralma, kulak çınlaması, yorgunluk, halsizlik, baş dönmeleri, gece uykusuzlukları gibi etkiler kısa süreliğine hissedilen etkiler olmakla birlikte; moleküler ve kimyasal bağlara, hücre yapısına ve bağışıklık sistemine etki eden etkiler uzun

zamanda ortaya çıkabilen etkilerdir (Foster ve Schwan 1996, Demir 2004, Elhasoğlu 2006, Markov 1994).

ELF manyetik alanların Ekim 2001'de IARC (International Agency for Research on Cancer-Uluslar arası Kanser Araştırma Ajansı) tarafından 2B sınıfı olası kanserojen olarak tanımlanması, Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nün 2004 tarihlerinde yaptığı 'Sensitivity of Children to Electromagnetic Fields – Çocukların Elektromanyetik Alanlara Hassasiyeti' toplantısında ELF manyetik alanların çocuk lösemisini 2 katı arttırdığını tüm dünyaya duyurması, ELF'nin sağlık etkilerine yönelik araştırmaların önemini bir kez daha vurgulamıştır.

Uluslararası Elektromanyetik Alanlar Güvenlik Komisyonu; göz ardı edilemez kanıtlara dikkat çekmekte, sınır değerler altında da sağlık etkileri olabileceğini, henüz farkına varılmamış olmasına karşın elektromanyetik alanların acil ve potansiyel halk sağlığı sorunu olarak ele alınması gerektiğini bildirmektedir (Çerezci vd 2012).

2.6. Özgül Soğurma Oranı (Specific Absorption Rate - SAR)

Elektromanyetik alanların, dokular içindeki iyonlara olan etkileri neticesinde onların hareketlerini arttırmaları neticesinde şiddetlerine bağlı olarak bir ısı enerjisi de ortaya çıkar. Bunun sonucunda da dokular içerisinde sıcaklık artışı görülür (Çerezci vd 2012).

Özgül Soğurma Oranı (SAR), elektromanyetik alana maruz kalındığında beden tarafından, vücudun birim doku kütlesi başına soğrulan enerji oranının bir ölçüsüdür. SAR birimi W/kg'dır ve,

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{2\rho}, \text{ (W/kg)} \quad (2.19)$$

formülü ile hesaplanır. Burada; E , doku üzerindeki elektrik alanının tepe genliği (V/m); σ , dokunun iletkenliği (S/m) ve ρ , dokunun (kg/m^3) cinsinden yoğunluğudur (El Dein ve Amr 2010).

(W/kg)'lık SAR aralığında gözlenen biyolojik etkinin ısı olduğu düşünüldüğünden, SAR eşitliğinin frekanstan bağımsız olduğu kabul edilmektedir. 4 W/kg'lık bir ışınım maruz bırakılan insanın vücut sıcaklığı 1°C 'den az yükselmektedir. EM ışınımın, insan sağlığı üzerinde zararlı etkilerinin başladığı SAR değeri 4W/kg olarak kabul edilir. EM ışınımın zararlı etkilerinin azaltılması için mesleki temel etkilenme sınırı, etkilenme SAR sınır değerinin 1/10'u olarak alınır. Yani meslekte ortalama etkilenme SAR sınırı, $4/10=0.4$ (W/kg)'dır. Burada güvenlik katsayısı olarak 1/10 alınmıştır. Genel halk sağlığı için güvenlik katsayısı 5 kat daha artırılarak 1/50 seçilmiştir ve ortalama etkilenme SAR sınırı, $4/50=0.08$ (W/kg) olarak belirlenmiştir.

İnsan vücudunda soğrulan enerji dağılımı homojen olmadığından ve EM ışınımın, etkilenme koşullarına bağılı olduğundan, ortalama SAR kesin sınır değildir. Tüm vücudun ortalama SAR değeri 0.4 (W/kg)'dan olmasına karşın soğrulan enerji sınırlı sayıdaki dokuda yığılabılır ve o dokudaki sıcaklık artışı yüksek olabilir (Düzgün 2009).

İnsan vücudunda herhangi bir dokunun kendi iç sıcaklığının 0.5°C den daha fazla artması, o dokunun tolere edemeyebileceğı bir değer olarak kabul edilmiştir. Bu değeri temel alarak geliştirilen bir sınır değer, tüm vücut ortalama özgül soğurma değeri olarak kabul edilmiştir. 4 W/kg olarak verilen bu limitin 10 kat düşük değeri (0.4 W/kg), ihtiyat ilkesi ışığında Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Elektrik-Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komitesi (ICNIRP) tarafından, insan vücudunun RF ve mikrodalga etkilerinin hissedilmeyeceğı sınır termal etkilerin başladığı değer olarak kabul edilmiştir (Çerezci vd 2012).

2.7. Yasal Düzenlemeler ve Sınır Değerler

Yüksek gerilim hatlarından yayılan elektromanyetik radyasyon konusunda her ülke kendi standartlarına göre limit değerler belirlemiştir. Avrupa Birliğı'ne üye ülkeler ve ABD dahil olmak üzere birçok dünya ülkesinde ortak olarak kabul gören ve uygulanan limit değerler bulunmaktadır. Bu limit değerler Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da tanınan ve uluslar arası bir komisyon olan ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – İyonize olmayan radyasyondan karuma komisyonu) tarafından belirlenmiştir. Limit değerler (Bkz. Çizelge 2.4) yayılan elektromanyetik radyasyonun frekansına bağılı olarak değışmektedir. ICNIRP tarafından ELF bandına dahil olan 50 Hz frekansında genel halk için belirlenen 2010 limit değerleri şu şekildedir:

Çizelge 2.4. ICNIRP 2010 limit değerleri (50 Hz için)

Elektromanyetik Kirlilik Kaynağı	Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Manyetik Akı Yoğunluğu (µT)
Yüksek Gerilim Hatları, Trafolar ve Güç Üniteleri (Genel Halk İçin)	5000	200

YG hatlarından kaynaklanan EMR ile ilgili düzenlemeler ülkemizde 24.07.2010 tarihli resmi gazetede yayınlanan Çevre ve Orman Bakanlığı'nın yönetmeliğı ile belirlenmiştir. Daha önceki yıllarda ise ülkemizde yüksek gerilim hatları ve trafolardan kaynaklanan EMR konusunda herhangi bir yasal düzenleme yoktur (Türkistani ve Baykal 2012).

Enerji nakil hatları ve diğerelektrik tesisleri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 30.11.2000 tarih ve 24246 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan 'Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliğı'ne göre kurulmaktadır. Bu yönetmelik ise EMR etkisini göz önüne almadan hazırlanmış olmakla birlikte konuya 5, 6 ve 7. maddelerde dolaylı olarak değinildiğı düşünülebilir. Bu yönetmeliğın ilgili maddeleri aşağıdaki gibidir.

(Kuvvetli akım tesislerinin güvenliği) Madde 5 – Kuvvetli akım tesisleri her türlü işletme durumunda, cana ve mala herhangi bir zarar vermeyecek ve tehlike oluşturmayacak bir biçimde yapılmalıdır. Herhangi bir kimsenin dikkatsizlikle de olsa yaklaşabileceği uzaklıktaki kuvvetli akım tesislerinin gerilim altındaki bölümlerine (aktif bölümler) dokunulması olanaksız olmalıdır ve ilerideki bölümlerde belirtilen emniyet mesafeleri ile koruma önlemleri sağlanmalıdır.

(Elektromanyetik alanlara karşı duyarlı tesislerin gözetilmesi) Madde 6 – Elektrik tesisleri, yakınlarında bulunan elektromanyetik alanlara karşı duyarlı tesislere etkileri, ilgili standartlarda müsaade edilebilir sınırlar içinde olacak biçimde yapılmalıdır. Enerji tesislerinin oluşturdukları rahatsız edici elektrik ve manyetik alanlar müsaade edilen sınırlar içinde kalacak şekilde zayıflatılmalı ve yüksek harmoniklerden temizlenmiş olmalıdır.

(Doğanın korunması) Madde 7 – Kuvvetli akım tesislerinin tasarımılanmasında ve yapımında, teknik ve ekonomik bakımlardan birbirine çok yakın birkaç çözümün bulunması durumunda, bunlar arasından doğaya en az zarar veren çözüm seçilmelidir.

Hava hattı iletkenleri ile yanından geçtikleri yapıların en çıkıntılı bölümleri arasında, en büyük salınım konumunda bulunması gereken en küçük yatay uzaklıklar 44. maddede 34,5kV'luk hatlar için 2 m, 154kV'luk hatlar için 4 m ve 380kV'luk hatlar için 5 m olarak belirlenmiştir. Düşey mesafelerin tanımlandığı 46. maddede ise, hatların evlerin teras ve çatılarından 8,7 m yükseklikte olması yeterli görülmüştür. EMR etkisinin dikkate alınmadığı bu yönetmelikte, mesafeler doğrudan temasın önlenmesi amacıyla yönelik olarak belirlenmiştir. Yönetmeliğin çeşitli maddelerinde yer alan, elektrik tesislerinde çalışanların güvenliğine ilişkin maddelerde de EMR etkisini içeren bir madde bulunmadığı görülmektedir.

Yönetmeliklerdeki bu eksiklik 24.07.2010 tarihli resmi gazetede yayınlanan Çevre ve Orman Bakanlığı'nın yönetmeliği ile giderilmeye çalışılmış olsa da, enerji nakil hatları yakınlarında yaşayanları elektromanyetik alanların olumsuz etkilerinden koruyucu olmaya yönelik güven vermemektedir. Yeni yönetmeliğe göre ülkemizde 200µT olan sınır değeri; İsviçre'de yüksek gerilim ve trafo kaynaklı elektromanyetik alanların ev, ofis, okul, hastane ve çocuk parkı gibi hassas mekanlarda özel uygulanan 1µT limit değerine kıyasla çok yüksektir. İtalya, Hollanda ve bazı Avrupa ülkelerinde yeni kurulacak hatlar için yeni yerleşim bölgelerinde limit değerler 0,4µT ve 0,2µT seviyelerine çekilmiştir.

Çok düşük frekanslarda manyetik alanlar için dünya çapında mevcut standartlar ve tavsiyelerin bazıları şu şekildedir:

- ACGIH (American Congress of Governmental and Industrial Hygienists – Amerikan Endüstri ve Hükümet Hıfzıssıhha Kongresi) mesleki TLV (Threshold Limit Value – Eşik Limit Değeri): 200 µT
- DIN/VDE (German Standards Institute – Alman Standart Enstitüsü): mesleki 500 µT, genel halk 400 µT

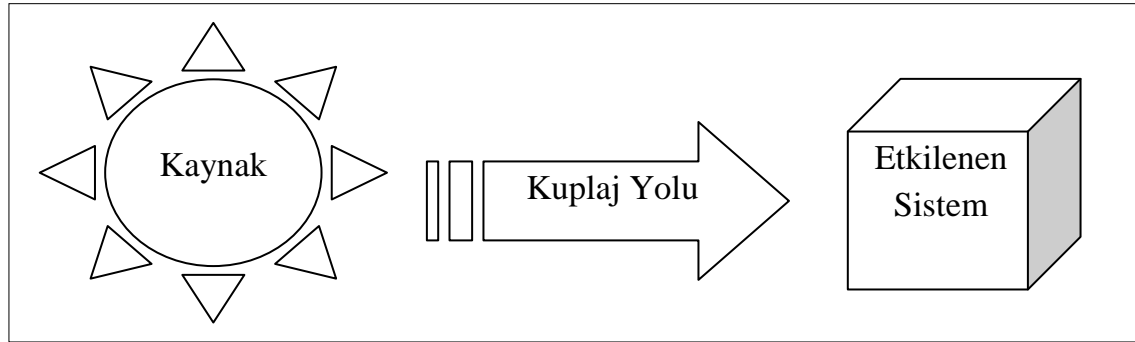
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komitesi): 200 μ T
- TCO (Swedish Confederation of Professional Employees – İsveç Profesyonel Çalışanlar Konfederasyonu): 0,2 μ T
- WHO (World Health Organization – Dünya Sağlık Örgütü): 0,3-0,4 μ T
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency – Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı): 0,2 μ T

ELF elektromanyetik alanların risklerinin azaltılması için kullanılan iki bilimsel yöntem vardır. Bunlardan birincisi ve en önemlisi yüksek gerilim hatlarının altında ve çevresinde bir güvenlik koridoru bırakılarak bina yerleşimi yapılmasıdır. Diğer bir yöntem ise yüksek gerilim hatlarını yer altına alınmasıdır. Hatların yer altına alınması uygulamasında ülkemizde maalesef manyetik alanı perdeleyici özel önlemler alınmamaktadır (Çerezci vd 2012).

2.8. Elektromanyetik Uyumluluk ve Elektromanyetik Girişim (EMC-EMI)

Bir aygıt, donanım veya sistemin, bulunduğu elektromanyetik çevre içinde, bu çevreyi veya diğer donanımları rahatsız edecek düzeylerde elektromanyetik gürültü oluşturmadan ve ortamdaki diğer sistemlerin oluşturduğu girişimden etkilenmeden, kendisinden beklenen işlevlerini yerine getirme yeteneğine *Elektromanyetik Uyumluluk (EMU, EMC)* adı verilir (Özen 2008).

Şekil 2.10’da gösterildiği gibi, bir elektromanyetik girişimin oluşabilmesi için üç temel unsur gereklidir: Kaynak, Kuplaj Yolu ve Etkilenen Sistem. Kuplaj yolu uzaysal ışımda hava, iletkenlik yoluyla girişimlerde ise kaynak ile etkilenen sistem arasındaki iletkenlerdir.



Şekil 2.10. Elektromanyetik Girişim Modeli

2.8.1. Elektromanyetik girişim kaynakları

Elektromanyetik dalgalarla veri iletimi sırasında, haber taşıyan EM işaretin başka EM işaretle karışması olayına *Elektromanyetik Girişim (EMI)* adı verilir. Bozucu etkiye sahip elektromanyetik girişim işaretleri, doğal ve yapay kaynaklar tarafından üretilir. Güneşte meydana gelen patlamalar, atmosferik olaylar, kozmik dengesizlikler gibi doğada, insanın müdahalesi dışında meydana gelen olaylar sonucu oluşan işaretler

doğal kaynaklıdır. İnsanlar tarafından yapılan; enerji hatları, TV ve GSM vericileri, aydınlatma araçları, endüstriyel uygulamalar gibi tüm diğer bozucu işaret kaynakları yapay kaynaklardır (Bodur ve Özşar 2008).

2.8.2. Elektromanyetik girişim önlemleri

Elektromanyetik girişimin önlenmesi, elektromanyetik girişim oluşturan üç temel unsur üzerinde farklı şekillerde yapılabilir. Girişim kaynağında, etkilenen sistemde ve girişim yolunda yapılan farklı uygulamalar ile istenmeyen girişim ortadan kaldırılabılır. Bu girişim önlemleri şu şekilde sıralanabilir:

- Topraklama
- Ekranlama
- Filtreleme
- Kablolama
- Bağlama

2.8.2.1. Ekranlama

Elektromanyetik girişimi ekranlama, elektromanyetik dalganın bir materyal tarafından soğrulması veya yansıtılması, dolayısıyla dalganın içeri girmesine engel olunmasıdır. Günümüzde elektronik cihazların sosyal yaşamdaki rolünün artması ve yaygın kaynaklarındaki hızlı gelişim EMC sorunlarının giderilmesinde ekranlamayı stratejik açıdan önemli hale getirmiştir. Ekranlamada kullanılan bazı malzemelerin elektriksel özellikleri Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Bazı ekranlama malzemelerinin elektriksel değerleri

Materyal	Özdirenç (ρ) (Ωm)	İletkenlik (σ) (Siemens/m)	Manyetik Geçirgenlik (μ_r)	Deri Kalınlığı		
				Frekans 50 Hz	Frekans 60 Hz	Frekans 100 Hz
Alüminyum	2.82×10^{-8}	3.5×10^7	1	0.012	0.01	0.008
Bakır	1.68×10^{-8}	5.58×10^7	1	0.0092	0.0084	0.0065
Demir	9.58×10^{-8}	1.04×10^7	500	0.0031	0.0028	0.0022
Çelik	1.61×10^{-7}	6.21×10^6	100	0.0029	0.0026	0.0020
Kuru Beton	150	6.67×10^{-3}	1	872	796	617

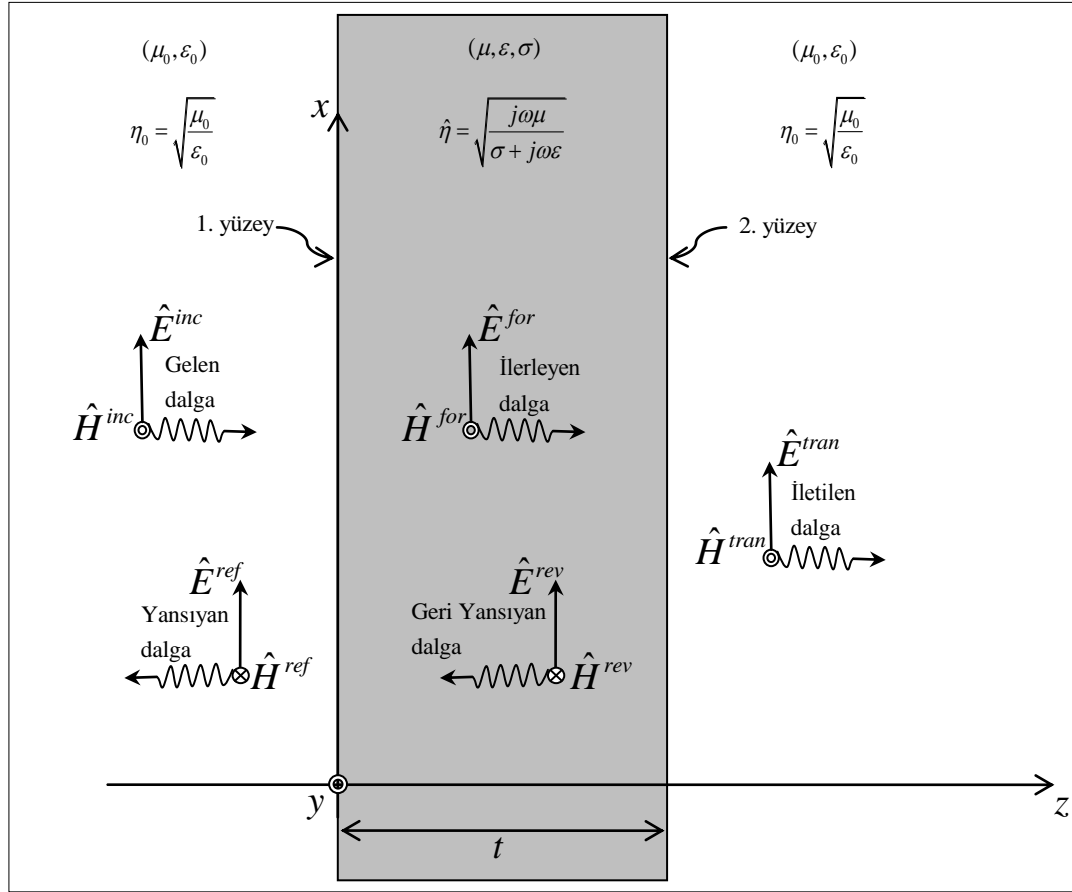
Ekranlamada göz önüne alınması gereken iki önemli parametre; ekran materyalinin kendi ekranlama etkinliği ile ekrandaki boşluklar ve süreksizliklerin oluşturduğu ekranlama etkinliğidir.

Ekranlamanın etkinliği belirlenirken ilk olarak boşluk veya ek yerleri olmayan bir ekranın ekranlama etkinliği belirlenir ve daha sonra boşluk ve süreksizliklerin etkisi göz önüne alınır. Ekranlama etkinliği frekansla, ekranın geometrisiyle, ekran içinde ölçüm yapılan konuma, zayıflamanın olduğu alan tipine, gelen alanın yönüne ve polarizasyonuna bağlıdır (Arı ve Özen 2008, Blattenberger 1999, Bodur ve Özşar 2008, Cengiz 2009).

2.8.2.2. Ekranlama etkinliği (SE)

Ekranlama Etkinliği, (SE, Shielding Effectiveness), kaynak ile elektronik sistem arasında ekran yokken var olan alan şiddetinin, ekran varken oluşan alan şiddetine desibel (dB) olarak oranına denir. Ekranlama Etkinliği ne kadar yüksek olursa ekranlamanın da o kadar iyi olduğu sonucunu çıkarılabilir. SE'nin negatif olmasına ise çınlama (rezonans) denir.

Frekans kaynaklarından istenmeyen yerlere yayılım yapılmasını önlemek amacıyla uygulanan ekranlamalarda, başarılı sonuçlara ulaşmak için ekranlama etkinliğini istenen değerlerde sağlamak gerekir. Bu amaçla, istenmeyen yayınımların kaynağı olan cihaz veya sistemlerin bir ekran ile çevrenmesi veya mağdur durumdaki cihazların çevresinin istenmeyen yayınımlardan etkilenmemesi için ekranlanması gerekir.



Şekil 2.11. Düzlem dalga için ekranlamanın aşamaları

Şekil 2.11'de, düzlem dalga için ekranlamanın aşamaları gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, gelen dalga $z=0$ düzleminde 1. yüzeyle karşılaştığında dalganın bir kısmı yüzeyden yansır, kalan kısmı ise metalin içine iletilir ve dalga metalin içinde ilerlerken sönmülmeye başlar. Metal içerisinde ilerleyen dalganın bir bölümü $z=t$ düzleminde 2. yüzeyden ters bir dalga gibi yansır iken, kalan bölümü hava bölgesine

($z > t$) iletilir. İki yüzeydeki yansımaya ve iletim işlemi, teoride sonsuz sayıda yansımış, ilerlemiş, geri yansımış ve iletilmiş dalga bileşenleri oluşturur.

Düzlemsel ekranın elektrik alan ekranlama etkinliği (SE_E) ve manyetik alan ekranlama etkinliğine (SE_M) aşağıdaki formüllerle ulaşılır:

$$SE_E = 20 \log_{10} \left| \frac{\widehat{E}^{inc}}{\widehat{E}^{tran}} \right|, \text{ (dB)} \quad (2.20)$$

$$SE_M = 20 \log_{10} \left| \frac{\widehat{H}^{inc}}{\widehat{H}^{tran}} \right|, \text{ (dB)} \quad (2.21)$$

Burada E ve H, elektrik ve manyetik alan şiddetlerini; inc gelen dalgayı, tran ise iletilen dalgayı ifade etmektedir. E (V/m) ile H ise (A/m) ile ifade edilir. SE, bir frekans fonksiyonudur.

Ekranlamada, elektromanyetik dalganın zayıflatılması gelen dalganın hava/iletken yüzeyiyle ve ekran iletken ortamıyla girdiği etkileşimle ilgili olarak üç aşamadan gerçekleşir. Bunlar; Yansımaya Kayıpları (R_{dB}), Soğrulma Kayıpları (A_{dB}) ve Çoklu Yansımalarıdır (M_{dB}).

Ekranlamanın öncelikli aşaması yansımadır. Ekranlama ile dalganın yansımaya için, ekranın birbirini etkileyen taşıyıcı yüklere (elektron ve delikler) sahip olması gerekir. Sonuç olarak ekranın elektriksel iletkenliğinin olması gerekir. Genelde üzerlerinde bulunan serbest elektronlar dolayısıyla yansımaya sebep olduklarından, en sık kullanılan ekranlama materyalleri metallerdir.

İki farklı ortamın dalga empedanslarındaki farklılık yansımaya sebep olur. Gelen dalganın bir kısmı 1. yüzeyden yansır. Havadan iletkene gelen dalgalar için yansıyan dalganın değeri, gelen dalganın yansımaya katsayısıyla (Γ_{a-c}) çarpımına eşittir.

$$\widehat{\Gamma}_{a-c} = \frac{\widehat{\eta} - \eta_0}{\widehat{\eta} + \eta_0} \quad (2.22)$$

Ekranlamanın ikinci mekanizması soğrulmadır. Bir EM dalga yeni bir ortama giriş yaptığında zayıflamaya uğrar.

İletken ekranın içinde ilerleyen ve geri dönen dalgaların hepsi iletken ekranın zayıflama sabitine göre belirli bir şekilde zayıflar. Dalganın bu zayıflaması ısı biçiminde dalga enerji kaybına karşılık gelir. İletken ekran içindeki yayılım sabiti şu şekilde verilir:

$$\hat{\gamma} = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (2.23)$$

Burada α [Np/m] ekran malzemesinin zayıflama sabiti, β [rad/m] ise faz sabitidir. 1. ve 2. yüzeyde içeriden yansıyan dalgaların değerleri, iletkenin havaya geçen dalganın yansıma sabitiyle (Γ_{c-a}) orantılıdır ve aşağıdaki şekilde verilir:

$$\hat{\Gamma}_{c-a} = \frac{\eta_0 - \hat{\eta}}{\eta_0 + \hat{\eta}} \quad (2.24)$$

$$\hat{\eta} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}, (\Omega) \quad (2.25)$$

İyi iletkenler için, zayıflama sabiti deri kalınlığının (δ) yaklaşık olarak tam tersi ile değerlendirilir:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.26)$$

$$\alpha \approx \frac{1}{\delta} \quad (2.27)$$

Soğurma kaybı ekranın kalınlığına bağlı olarak değişir. Ekran kalınlığı, bir frekans fonksiyonu olan, deri kalınlığına da bağlı olarak dalganın ekran içerisinde ne kadar zayıfladığını belirler. Yüksek frekanslarda elektromanyetik ışığa sadece iletken maddenin yakın yüzey bölgesini deler. Bu durum deri etkisi olarak bilinir.

Yansıma ve soğrulmanın dışında diğer bir ekranlama mekanizması çoklu yansımalar. Çoklu yansımalar, ekran içerisinde çeşitli yüzey veya yüzeylerden oluşur. Bu mekanizma ekran içerisinde geniş bir yüzey alan veya ara yüzey alanının varlığına ihtiyaç duyar.

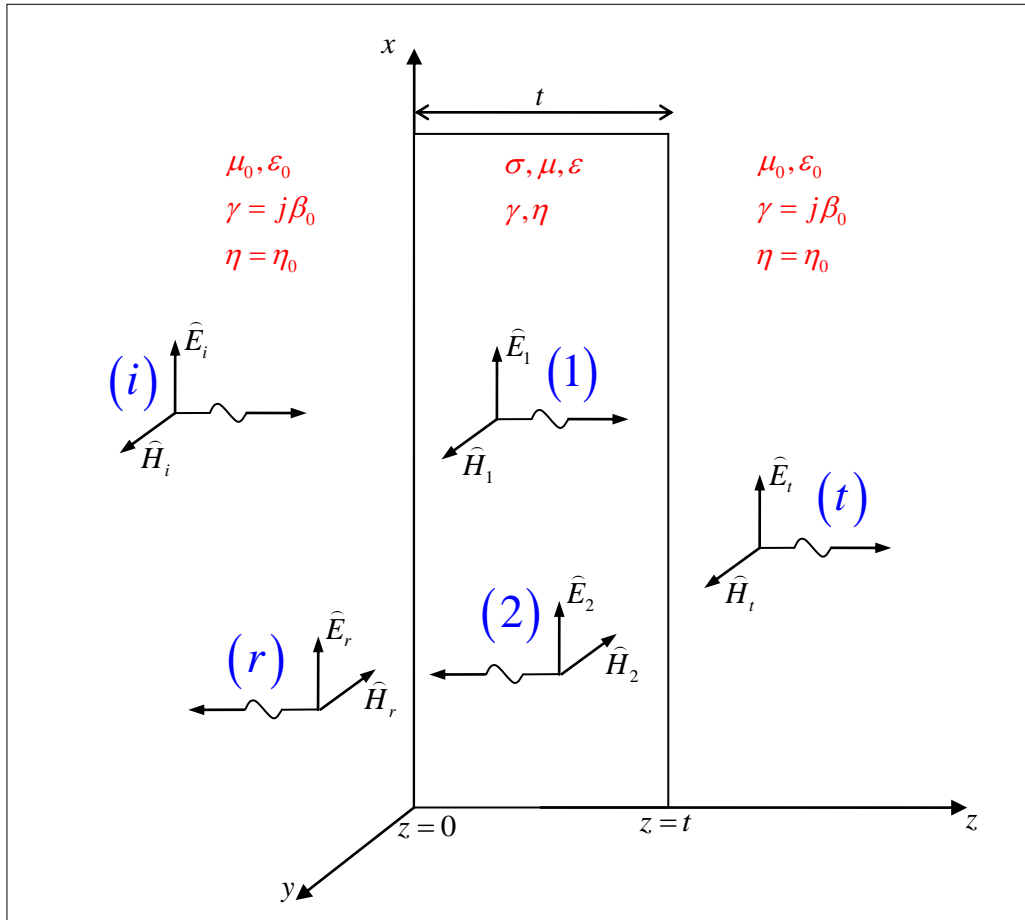
Düzlemsel ekran içerisinde ilerleyen her dalganın bir bölümü hava bölgesine ($z > t$) iletilir. Ekranlama etkinliğinin hesaplanmasında kullanılan iletilmiş alanlar, bu ilerleyen dalgalarla bağlantılı olan alanların vektör toplamıdır. Ayrıca düzlemsel ekranın içinde geri dönen bütün dalgaların bir kısmı hava bölgesine ($z > 0$) iletilir. Düzlemsel ekrandan geriye dışarı çıkan bu dalgalar ekranlama etkinlik değerini arttıran ek kayıpları belirtir. İletilen tüm bu dalgalar, iletkenin havaya geçen dalgaların iletim katsayısıyla (T_{c-a}) orantılıdır:

$$T_{c-a} = 1 - \hat{\Gamma}_{c-a} = \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \hat{\eta}} \quad (2.28)$$

Çoklu yansımanın değeri, düzlemsel ekranın deri kalınlığına bağlı olan kalınlığı ile ilgilidir. Eğer ekran birkaç deri kalınlığıdaysa, gelen dalgayı iletirken çoklu yansımalar etkisinin ihmal edilmesini sağlayabilecek kadar belirgin bir zayıflama olur. Ancak alçak frekanslarda, çoklu yansımaların etkisi önem taşımaktadır.

Geniş yüzey alan ile ekranlamaya örnek gözenekli veya sünger materyallerdir. Geniş ara yüzey ile ekranlamaya örnek olarak ise kompozit materyaller gösterilebilir. Çoklu yansılardan kaynaklanan kayıplar yansıma yüzeyleri ve ara yüzeyleri arasındaki mesafe deri kalınlığı ile karşılaştırıldığında fazla ise ihmal edilebilir. Yansıma soğurma veya yansımalar genellikle dB cinsinden ifade edilir. Tüm bu kayıpların toplamı ekranlama etkinliğini verir.

Ekranlama empedansı frekans ile artmasından dolayı yansıma kayıpları frekansla azalır. Düşük frekanslı manyetik alanlar düşük dalga empedansına sahiptir ve çoklu yansılardan dolayı düşük yansıma kayıpları oluşur. Bu yüzden öncelikli kayıp mekanizması soğurulmadır. Şekil 2.12’de, ekran üzerinde çoklu yansıma gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Ekran Üzerinden Çoklu Yansımanın Gösterimi

$$\beta_0 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}, \text{ (rad/m)} \quad (2.29)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}, \text{ (\Omega)} \quad (2.30)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (2.31)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} = |\eta| \angle \theta_\eta \quad (2.32)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{E}_i &= E_i e^{-j\beta_0 z} \hat{a}_x \\ \hat{H}_i &= \frac{E_i}{\eta_0} e^{-j\beta_0 z} \hat{a}_y \end{aligned} \right\} i \quad (2.33)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{E}_r &= E_r e^{j\beta_0 z} \hat{a}_x \\ \hat{H}_r &= -\frac{E_r}{\eta_0} e^{j\beta_0 z} \hat{a}_y \end{aligned} \right\} r \quad (2.34)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{E}_1 &= E_1 e^{-\gamma z} \hat{a}_x \\ \hat{H}_1 &= \frac{E_1}{\eta} e^{-\gamma z} \hat{a}_y \end{aligned} \right\} 1 \quad (2.35)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{E}_2 &= E_2 e^{\gamma z} \hat{a}_x \\ \hat{H}_2 &= -\frac{E_2}{\eta} e^{\gamma z} \hat{a}_y \end{aligned} \right\} 2 \quad (2.36)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{E}_t &= E_t e^{-j\beta_0 z} \hat{a}_x \\ \hat{H}_t &= \frac{E_t}{\eta_0} e^{-j\beta_0 z} \hat{a}_y \end{aligned} \right\} t \quad (2.37)$$

Bkz. Şekil 2.12’de, $z=0$ ve $z=t$ noktalarındaki sınır koşulları belirlendiğinde;

$$\begin{cases} \hat{E}_{i(z=0)} + \hat{E}_{r(z=0)} = \hat{E}_{1(z=0)} + \hat{E}_{2(z=0)} \\ \hat{E}_{1(z=t)} + \hat{E}_{2(z=t)} = \hat{E}_{t(z=t)} \\ \hat{H}_{i(z=0)} + \hat{H}_{r(z=0)} = \hat{H}_{1(z=0)} + \hat{H}_{2(z=0)} \\ \hat{H}_{1(z=t)} + \hat{H}_{2(z=t)} = \hat{H}_{t(z=t)} \end{cases} \quad (2.38)$$

$$\begin{cases} E_i + E_r = E_1 + E_2 \\ E_1 e^{-\gamma t} + E_2 e^{\gamma t} = E_t e^{-j\beta_0 t} \\ \frac{E_i}{\eta_0} - \frac{E_r}{\eta_0} = \frac{E_1}{\eta} - \frac{E_2}{\eta} \\ \frac{E_1}{\eta} e^{-\gamma t} - \frac{E_2}{\eta} e^{\gamma t} = \frac{E_t}{\eta_0} e^{-j\beta_0 t} \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(\eta_0 + \eta)^2}{4\eta_0\eta} \left[1 - \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta} \right)^2 e^{-2\alpha t} e^{-j2\beta t} \right] e^{\alpha t} e^{j\beta t} e^{-j\beta_0 t} \quad (2.40)$$

Ekranlama için kullanılan malzemenin iyi iletken malzemedden olduğu düşünülürse;

$$\begin{aligned} \beta &= \alpha = \frac{1}{\delta} \\ \eta \ll \eta_0 &\Rightarrow \frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta} \approx 1 \Rightarrow \frac{(\eta_0 + \eta)^2}{4\eta_0\eta} \approx \frac{\eta_0}{4\eta} \end{aligned} \quad (2.41)$$

(2.41) ifadesindeki varsayımlar, (2.40) ifadesinde yerlerine yazılırsa;

$$\frac{E_i}{E_t} \approx \frac{\eta_0}{4\eta} \underbrace{\left[1 - e^{-2t/\delta} e^{-j2t/\delta} \right]}_{M \angle \phi_M} \underbrace{e^{t/\delta} e^{j(\beta - \beta_0)t}}_A \quad (2.42)$$

$$\left| \frac{E_i}{E_t} \right| \approx \frac{\eta_0}{4\eta} e^{t/\delta} \left| 1 - e^{-2t/\delta} e^{-j2t/\delta} \right| = R \times A \times M \quad (2.43)$$

Ekranlama Etkinliğinin (dB) olarak ifadesi ise şu şekli alır:

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB} \quad (2.44)$$

$$SE_{dB} \approx \underbrace{20 \log_{10} \left| \frac{\eta_0}{4\eta} \right|}_{R_{dB}} + \underbrace{20 \log_{10} e^{t/\delta}}_{A_{dB}} + \underbrace{20 \log_{10} \left| 1 - e^{-2t/\delta} e^{-j2t/\delta} \right|}_{M_{dB}} \quad (2.45)$$

Bu ifadede, deri kalınlığı $t \gg \delta$ olan ekranlar için çoklu yansımaya kaybı M_{dB} ihmal edilebilir.

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \approx \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \angle 45^\circ \quad (2.46)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \quad \text{ve} \quad |\eta| = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r}{\sigma}} \quad (2.47)$$

İfadelerini kullanarak yansımaya ilişkin aşağıdaki ifade elde edilir:

$$R_{dB} \approx 20 \log_{10} \left| \frac{\eta_0}{4\eta} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{4 \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r}{\sigma}}} \right| = 20 \log_{10} \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu_r\epsilon_0}} \right] \quad (2.48)$$

Ekran malzemesi için bakıra bağlı iletkenlik $\sigma = \sigma_r \sigma_{cu} \rightarrow \sigma_{cu} = 5.8 \times 10^7 S/m$ olarak yazılır. Burada $\sigma_r \rightarrow$ bakıra göre bağlı iletkenliği temsil eder. Bu durumda bağlı iletkenlik ve $\omega = 2\pi f$ için yansımaya ve soğurma kayıplarına ilişkin pratik ifadeleri elde edebiliriz.

$$R_{dB} = 168 + 10 \log_{10} \left[\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right] \quad (2.49)$$

Bu ifadeden de görüldüğü gibi yansımaya ilişkin ekran etkinliği, düşük frekanslarda yüksek iletkenliğe sahip malzemelerde daha yüksek olmaktadır.

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{f \mu_r \mu_0 \sigma_{cu} \sigma_r}} = \frac{0.06609}{\sqrt{f \mu_r \sigma_r}}, \text{ (m)} \quad (2.50)$$

$$(\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m ve } \sigma_{cu} = 5.8 \times 10^7 \text{ S / m})$$

Soğurma etkisi için,

$$A_{dB} = 20 \log_{10} e^{t/\delta} = 20(t/\delta) \log_{10} e = 20(t/\delta)(0.4343) = 8.6859 \frac{t}{\delta} \quad (2.51)$$

$\delta = \frac{0.06609}{\sqrt{f \mu_r \sigma_r}}$, (m) ifadesi eşitlikte yazılırsa,

$$A_{dB} = 131.4t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \rightarrow (t \rightarrow \text{ m boyutunda}) \quad (2.52)$$

denklemleri elde edilir.

Noktasal bir manyetik alan kaynağına yakın bölgede dalga empedansı ifadesi yaklaşık olarak şu şekildedir:

$$|\eta_w|_H = \eta_0 \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right) \quad (2.53)$$

Burada r , kaynağa olan uzaklık (metre); $\lambda = c/f$ dalga boyu; $c = 3 \times 10^8 [m/s]$ ışık hızıdır. Manyetik alan için yansıma kaybı ifadesi şu şekilde ifade edilir:

$$S_{RH} = 20 \log \frac{|\eta_w|_H}{4|\eta_s|} = 20 \log \left(\frac{\eta_0 \cdot \pi f r}{2c |\eta_s|} \right), \text{ (dB)} \quad (2.54)$$

İletken ortam için dalga empedansı ifadesi dikkate alınır, $\eta_0 = 377 \Omega$ için logaritma özelliklerinden yararlanılarak, yakın alanda Manyetik alan için yansıma kaybı ifadesinin yaklaşık değeri şu şekilde ifade edilir:

$$S_{RH} = 14.6 + 10 \log \left(\frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right), \text{ (dB)} \quad (2.55)$$

Bu üç aşamadaki ekranlama etkinliği değerlerinin toplanması ile Ekranlama Etkinliği (SE) elde edilir (Bansal 2006, Arı ve Özen 2008, Cengiz 2009, Blattenberger 1999, URL 2).

2.8.2.3. Elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) ekranlama etkinliği

Bir kaynaktan EM ışınım yayılması sonucu oluşan girişim, elektrik alan E ışınımı ve manyetik alan H ışınımı ile gerçekleşir. Alıcı sistem EM kaynağa yakın ise (yakın alan) elektrik alan ve manyetik alan ayrı ayrı olarak ele alınır.

Alıcı sistem kaynaktan uzakta ise (uzak alan) EM ışınım, E ve H alanların birleşimi olarak veya Elektromanyetik ışınım olarak tanımlanır.

E elektrik alanının, H manyetik alana oranı dalga empedansı olarak tanımlanır. Uzak alan bölgesinde bu oran, ortamın karakteristik empedansı adını alır.

$$\eta_0 = \frac{E}{H} = 120\pi = 377\Omega \quad (2.56)$$

Yakın alan bölgesinde E/H oranı kaynağın özelliklerine bağlı olarak değişim gösterir. Kaynak yüksek akım, düşük gerilim karakterli ise yakın alan bölgesinde manyetik alan baskındır ve $E/H < 377\Omega$ olur. Bu bölgede kaynaktan uzaklaştıkça H $1/r^3$ ve E $1/r^2$ ile azalır. Kaynak yüksek gerilim, düşük akım karakterli ise yakın alan bölgesinde elektrik alan baskındır ve $E/H > 377\Omega$ olur. Bu bölgede kaynaktan uzaklaştıkça H $1/r^2$ ve E $1/r^3$ ile azalır.

Yakın alanda E ve H alanlarının dalga empedansları şu şekilde bulunur:

$$\eta_E = \frac{\eta_0 \lambda_0}{2\pi r} \gg \eta_0 \quad (2.57)$$

$$\eta_H = \frac{\eta_0 2\pi r}{\lambda_0} \ll \eta_0 \quad (2.58)$$

Alanların ayrı ayrı yansıma kayıpları:

$$\frac{\eta_E}{\eta_m} \gg 1 \quad \text{için,}$$

$$\alpha_E = 20 \log \left(\frac{\eta_E}{4\eta_m} \right) \quad (2.59)$$

$$= 332 - 10 \log \left(\frac{\mu_r r^2 f^3}{\sigma_r} \right) \quad (2.60)$$

ve $\frac{\eta_H}{\eta_m} \ll 1$ için,

$$\alpha_H (dB) = 15 - 10 \log \left(\frac{\mu_r}{r^2 \sigma_r f} \right) \quad (2.61)$$

denkleminde bulunur. Burada η_H : H alanın dalga empedansı, η_E : E alanın dalga empedansı, η_m : ekran empedansı, α : zayıflama sabiti, μ_r : Bağıl geçirgenlik, σ_r : Bağıl iletkenlik ve r : Kaynak ile ekran arasındaki mesafedir.

Bakır ve demir için frekans değişimi ve ekranlama etkinliği değerleri incelendiğinde, bakır ve demir için frekans arttıkça, E alan ve düzlem dalganın yansıma kayıpları azalmakta; fakat manyetik alanın yansıma kayıpları artmaktadır. Düşük frekanslarda bakırın toplam ekranlama etkinliği, demirin ekranlama etkinliğinden yüksektir. Yüksek frekanslarda ise E ve H alan düzlem dalgaya dönüşmekte olup, bakırın ekranlama etkinliği demirinkinden düşüktür. Bunun sebebi, demirin yüksek frekanslarda soğrulma kaybının artmasıdır (Cengiz 2009, Arı ve Özen 2008).

2.9. Deri Kalınlığı (Skin Depth)

Akım taşıyan bir iletken üzerinde elektrik yükleri, DC ve alçak frekanslarda, iletken kesitine yayılmış olarak iletilmektedir. Frekans yükseldikçe bu yükler tel kesitinde yüzeye doğru hapsolmeye başlar. Yüzeydeki yük yoğunluğunun, bir başka deyişle dalganın genliğinin e^{-1} veya %36,8'lik bir çarpan kadar zayıfladığı mesafe *deri kalınlığı* olarak adlandırılır. Deri kalınlığı,

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}, (m) \quad (2.62)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada; δ (m) deri kalınlığı, $\omega=2\pi f$ (f dalganın frekansı), σ (Siemens/m) ortam iletkenliği, μ (Henry/m) ortamın manyetik geçirgenliği, ρ (Ωm) öz dirençtir. Bazı metallere ait deri kalınlığı ve dalga empedansı değerleri Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Bazı metallere ait deri kalınlığı (δ) ve dalga empedansı (η) değerleri

Frekans F, (Hz)	Bakır		Çelik		Alüminyum	
	η ($\cdot 10^{-3}$)	δ	η ($\cdot 10^{-3}$)	δ	η ($\cdot 10^{-3}$)	δ
50	0.0026	9.43	0.0738	2.64	0.0034	12.22
10^2	0.00372	6.67	0.1044	1.87	0.0048	8.644
10^4	0.037	0.667	1.044	0.187	0.048	0.864
10^5	0.012	0.21	3.3	0.059	0.15	0.27
10^6	0.37	0.067	10.44	0.019	0.48	0.086
10^7	1.18	0.021	33.030	0.006	1.53	0.027
10^8	3.72	0.0067	104	0.0019	4.833	0.0086
10^9	11.8	0.0021	330	0.0006	15.3	0.0027
Formül	$0.372 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$	$66.68 \frac{1}{\sqrt{f}}$	$10.44 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$	$18.7 \frac{1}{\sqrt{f}}$	$0.483 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$	$86.44 \frac{1}{\sqrt{f}}$

Deri kalınlığı genel olarak frekans veya iletkenlik yükseldikçe küçülür. Elektromanyetik dalganın, dielektrik içinde ilerlediği her deri kalınlığı uzunluğunda şiddeti 1 Neper (=8,686 dB) azalır (Cengiz 2009, Davis vd 2003, Blattenberger 1999, URL 1).

2.10. Elektrik Alan ve Manyetik Alan Hesaplama Yöntemleri

Bir iletken üzerinden geçen akım şiddeti ve gerilim seviyesine bağlı olarak, bu iletkenin bulunduğu ortama elektrik ve manyetik alanlar yayılır. Elektrik alan, durgun haldeki bir elektrik yükünün başka bir elektrik yükü üzerinde yarattığı çekme ya da itme kuvveti etkisi olarak tanımlanır. Manyetik alan ise, elektrik yüklerinin yer değiştirmesi sonucu oluşan alandır (Liao vd 2004).

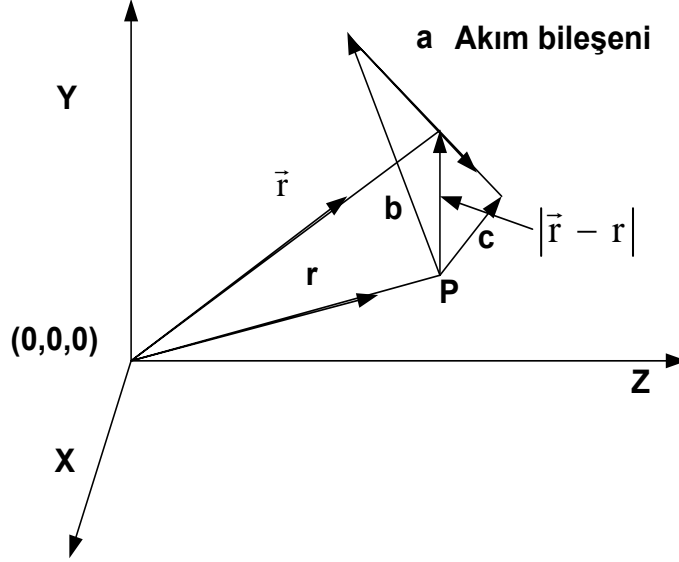
2.10.1. Biot-Savart yasası

Manyetik alanlar zamanla değişen elektrik alanlardan üretilir ve hareket eden yük üzerindeki kuvvet terimleri ile tanımlanır. Elektrik alan tarafından üretilen manyetik alan Biot-Savart Yasası ile hesaplanır.

Bu yasaya göre, manyetik alan içine yerleştirilen bir iletkenin akım geçtiğinde bu iletkeni bu alan içinde hareket ettirmeye çalışan bir kuvvet etkiler. Uzayda herhangi bir P noktasındaki manyetik alan vektörel ifade olarak

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\vec{J} \times \vec{Z}_{rr}}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} dV \quad (2.63)$$

şeklinde bulunur. \vec{r} , akım bileşen vektörü; r , P noktasının vektörel bileşeni; \vec{J} , akım yoğunluğu; \vec{Z}_{rr} , akım bileşeniyle P noktası arasındaki vektördür.



Şekil 2.13. Uzayda tek faz için akım bileşenleri

Şekil 2.13'te b ve c vektörleri, P noktası için durum vektörleridir. Eşitlik 2.63'den Biot Savart Yasası'nın integrali alınarak P noktasındaki manyetik alan şu şekilde bulunur:

$$\vec{H} = \frac{\vec{i}}{4\pi} \frac{\vec{c} \times \vec{a}}{|\vec{c} \times \vec{a}|^2} \left\{ \frac{\vec{a} \cdot \vec{c}}{|\vec{c}|} - \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{b}|} \right\} \quad (2.64)$$

n tane akım bileşenine göre manyetik akı yoğunluğu ise

$$\vec{B}(n) = (B_x(n)\vec{i} + B_y(n)\vec{j} + B_z(n)\vec{k}) \quad (2.65)$$

şeklinde bulunur. Burada i, j ve k ; X, Y ve Z düzlemlerindeki birim vektörler; $B_x(n)$, $B_y(n)$ ve $B_z(n)$, ise n akım iletkenine bağlı olarak manyetik akın yoğunluğunun X, Y ve Z düzlemlerindeki bileşenleridir.

N tane akım bileşeni için X, Y ve Z düzlemlerinde akı yoğunluğu:

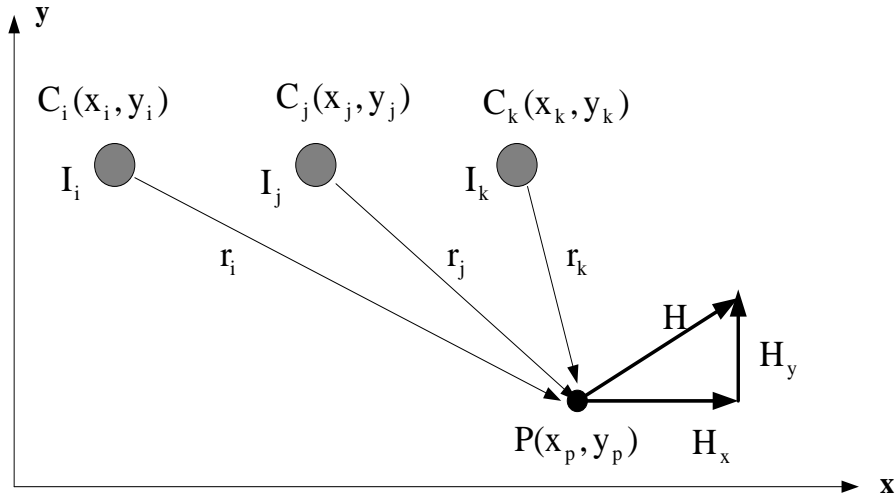
$$\overline{B}_x = \sum_{n=1}^N \overline{B}_x(n) \quad (2.66)$$

$$\overline{B}_y = \sum_{n=1}^N \overline{B}_y(n) \quad (2.67)$$

$$\overline{B}_z = \sum_{n=1}^N \overline{B}_z(n) \quad (2.68)$$

olarak bulunur. Herhangi bir b_t noktasında anlık toplam manyetik alan büyüklüğü ise şu şekilde hesaplanır:

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (2.69)$$



Şekil 2.14. Üç iletkenli bir havai hattın manyetik alan hesabı

Şekil 2.14'teki gibi üç farklı iletkenen geçen akımın, koordinatları (x_p, y_p) olan bir P noktasında yarattığı manyetik alan şu şekilde hesaplanabilir:

P noktasının iletkenlere uzaklıkları r_i , r_j , r_k ayrı ayrı şu şekilde hesaplanır:

$$r_n = \sqrt{(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2} \quad (2.70)$$

İletkenlerden geçen I_i, I_j, I_k akımlarının P noktasında oluşturduğu manyetik alanın yatay (H_x) ve düşey (H_y) bileşenleri ayrı ayrı şu şekilde hesaplanır:

$$H_{xn} = \frac{I_n}{2\pi} \frac{y_p - y_n}{r_n^2} \quad (2.71)$$

$$H_{yn} = \frac{I_n}{2\pi} \frac{x_p - x_n}{r_n^2} \quad (2.72)$$

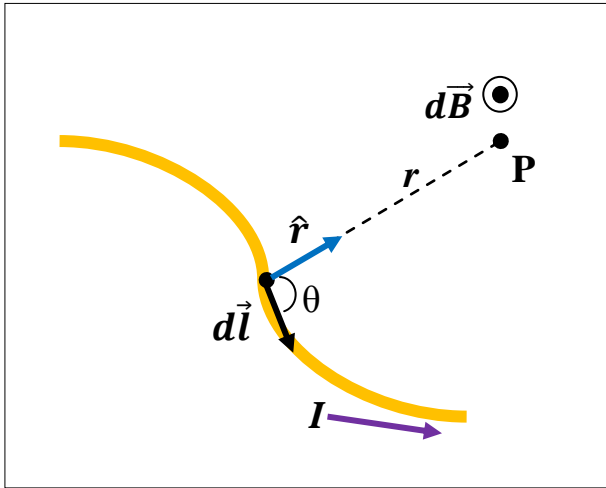
Buna göre n tane iletkenli sisteminin herhangi bir noktada oluşturduğu toplam manyetik alan (H) ise şu şekilde bulunur:

$$H = \sqrt{\left(\sum_{a=1}^n H_{xa}\right)^2 + \left(\sum_{a=1}^n H_{ya}\right)^2} \quad (2.73)$$

Manyetik alan (H) ve manyetik akı yoğunluğu (B) arasında şu bağıntı bulunmaktadır:

$$B = \mu_0 H \quad (2.74)$$

burada μ_0 serbest uzayın elektromanyetik geçirgenliğidir ve değeri $4\pi 10^{-7}$ dir (Ozen vd 2013).



Şekil 2.15. Akım ve Manyetik Alan arasındaki ilişki

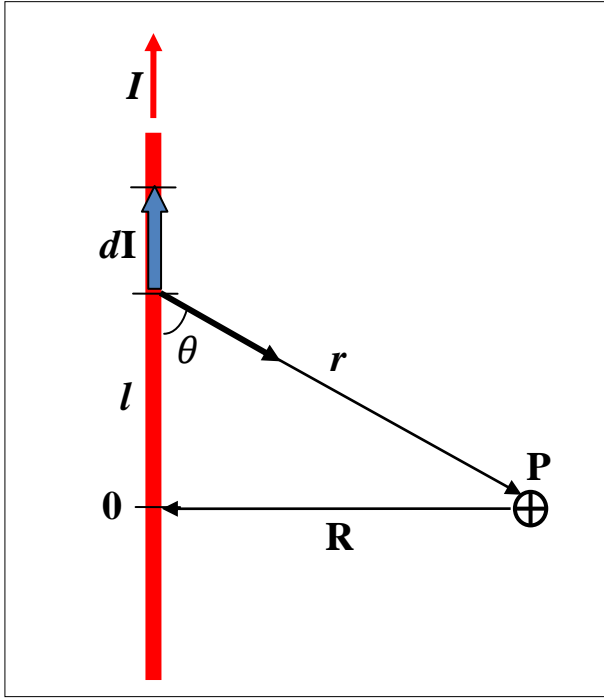
Biot-Savart Yasası'na göre, Şekil 2.15'teki P noktasında, I akımı tarafından oluşturulan $d\vec{B}$ manyetik alanın trigonometri ve matematiksel ifadeler kullanarak tanımı şu şekildedir:

$$d\vec{B} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (2.75)$$

Sağ el kuralına göre $d\vec{B}$ manyetik alanın yönü $d\vec{l}$ ve \vec{r} tarafından oluşan düzleme dik olan eksenin yönündedir ve büyüklüğü şu şekilde ifade edilir:

$$d\vec{B} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) \frac{I |d\vec{l}| \sin \theta}{r^2} \quad (2.76)$$

burada θ açısı, $d\vec{l}$ çizgi elemanı ve \vec{r} yarıçap vektörü arasındaki açıdır.



Şekil 2.16. Akım taşıyan bir tel etrafındaki manyetik alan

I akımı taşıyan uzun, düz bir telden R uzaklığında bulunan bir P noktasındaki manyetik alan (Bkz. Şekil 2.16) şu şekilde bulunur:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I |d\vec{l}| \sin \theta}{r^2} \quad (2.77)$$

$$B = \int \frac{\mu_0 I dl \sin \theta}{4\pi r^2} \quad (2.78)$$

$$B = I \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{dl \sin \theta}{r^2} \quad (2.79)$$

Bu telin, sonsuz uzunlukta olduğunu düşünelim;

$$B = I \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dl \sin \theta}{r^2} \quad (2.80)$$

Telin yarısını alarak entegral sınır değerlerimiz şu şekilde değişir:

$$\frac{1}{2} B = I \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \theta}{r^2} dl \quad (2.81)$$

burada trigonometri kurallarına göre;

$$r^2 = \sqrt{R^2 + l^2} \quad (2.82)$$

ve

$$r = \frac{R}{\sin \theta} \quad (2.83)$$

olduğundan denklem şu şekli alır:

$$\frac{1}{2} B = I \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \theta}{\left(\frac{R}{\sin^2 \theta}\right)} dl \quad (2.84)$$

Yine trigonometrik tanımlardan yararlanarak dl diferansiyel ifadesi için:

$$\tan \theta = \frac{R}{l} \quad (2.85)$$

$$l = R \cot \theta \quad (2.86)$$

$$dl = -R \csc^2 \theta d\theta \quad (2.87)$$

$$dl = -\frac{R}{\sin^2 \theta} d\theta \quad (2.88)$$

tanımı yapılabilir ve integral alma işlemine geçilebilir. Burada diferansiyel değiştiği için integral sınırları da değişmelidir.

$$\frac{1}{2} B = I \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \left(\frac{\sin^3 \theta}{R^2} \right) \left(-\frac{R}{\sin^2 \theta} \right) d\theta \quad (2.89)$$

$$\frac{1}{2} B = I \frac{\mu_0}{4\pi R} \int_{\frac{\pi}{2}}^0 -\sin \theta d\theta \quad (2.90)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (2.91)$$

Formülü Biot-Savart yasası ile bulunmuş olur (Arfken vd 1984, Atmaca 2013 a, Belhadj ve El-Ferik 2009, Habiballah vd 2006, Hamza 2002, Nave 2000, Ögel 2012).

2.10.2. Amper Yasası

Andre-Marie Ampere tarafından keşfedilen ve Maxwell denklemlerinden biri olan Amper yasasına göre, üzerinden akım geçen bir iletkenin etrafında manyetik alan oluşur ve bu iletkenin etrafındaki manyetik alan şiddeti, o iletken üzerinden geçen akımla doğru orantılıdır. Bu tanım matematiksel olarak;

$$\oint H dl = \sum i \quad (2.92)$$

denklemleri ile ifade edilir. Yani bir iletkenin etrafındaki manyetik alan şiddetinin sonsuz küçük bir kapalı dl yolu boyunca integrali, o iletken tarafından çevrelenen toplam akımı verir.

Bu denklemde eğer,

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (2.93)$$

bağlantısı yerine yazılırsa ($\mu_r = 1$ olduğunu düşünelim):

$$\oint B dl = \mu_0 \sum i \quad (2.94)$$

bağlantısı elde edilir ve böylece akım (I) ile manyetik alan (B) doğrudan ilişkilendirilmiş olur. Burada B , H ve integrali alınan yol olan l vektörel büyüklüklerdir (Arfken vd 1984, Nave 2000, Atmaca 2013 b).

2.10.3. Yer Altı Enerji Kabloları için Biot-Savart Yasası Hesabı

Yer altı kablolu enerji nakil hattı sistemindeki kabloların taşıdığı akımın büyüklüğü ve faz açıları biliniyorsa Amper Yasası ile herhangi bir noktadaki manyetik alan hesabı yapılabilir.

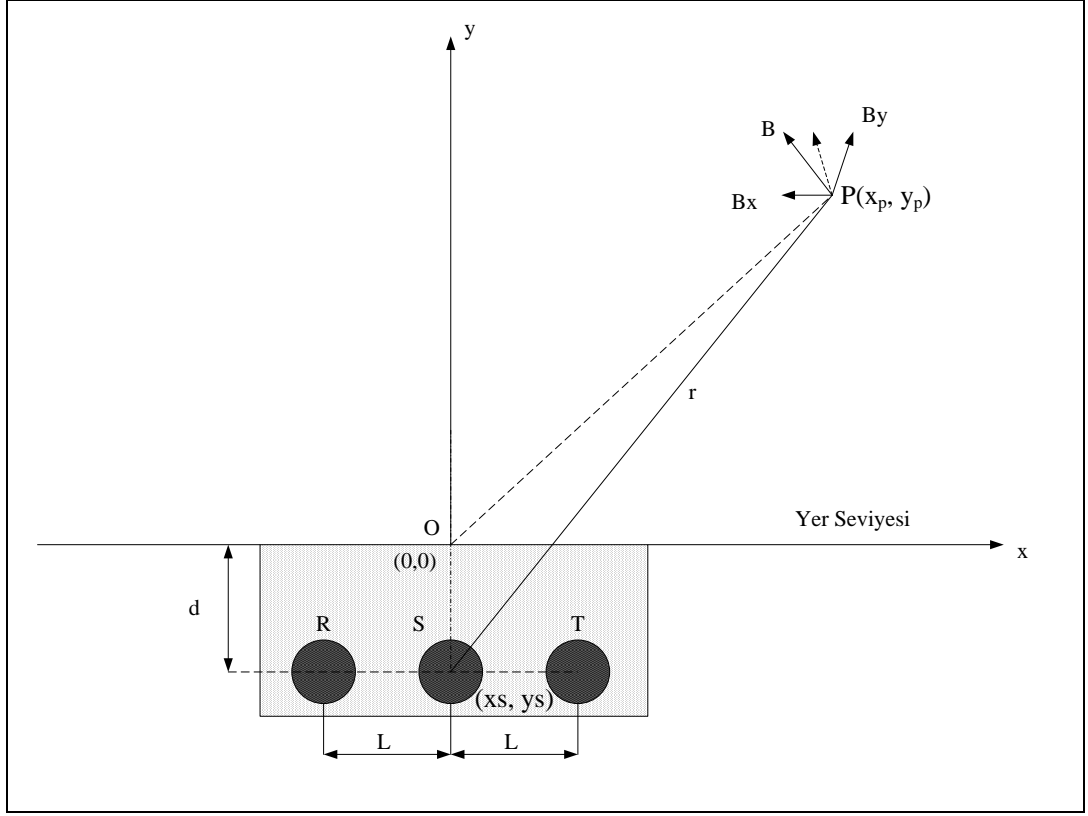
$$B = \mu_0 H = 4\pi 10^{-7} \cdot \frac{1}{2\pi r} \quad (2.95)$$

Yer seviyesinden d kadar derinliğe gömülü ve merkezleri arası L kadar uzaklık bulunan üç kablolu bir sistemin (Bkz. Şekil 2.17) S fazından r kadar uzaklıktaki bir P noktasındaki manyetik akı yoğunluğunun bileşenleri şu şekilde hesaplanır:

$$B_x = \frac{-\mu_0 I}{2\pi r^2} (y_p + d) \quad (2.96)$$

$$B_y = \frac{-\mu_0 I}{2\pi r^2} (x_p + O) \quad (2.97)$$

$$r^2 = (x_p - O)^2 + (y_p + d)^2 \quad (2.98)$$



Şekil 2.17. Üç kablolu bir yer altı enerji nakil hattının gösterimi (Düz Yerleşim)

Şekil 2.17'deki üç kablolu bu sistemin P noktasında oluşturduğu toplam manyetik alan B ise,

$$B = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^3 B_{xn} \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^3 B_{yn} \right)^2} \quad (2.99)$$

şeklinde hesaplanır.

Bu hesaplamalar yapılırken kablo tarafından üretilen manyetik alana toprağın etki etmediği, her bir iletkeninden akan akımın ürettiği manyetik alanın toplam alana doğrusal olarak etki ettiği, kablo kılıf ve ekranında indüklenen akımların manyetik alana etkisi olmadığı ve her bir kablonun düz ve sonsuz uzunlukta olduğu varsayımları yapılmıştır (Habiballah vd 1997, Bascom vd 2005).

3. MATERYAL VE METOT

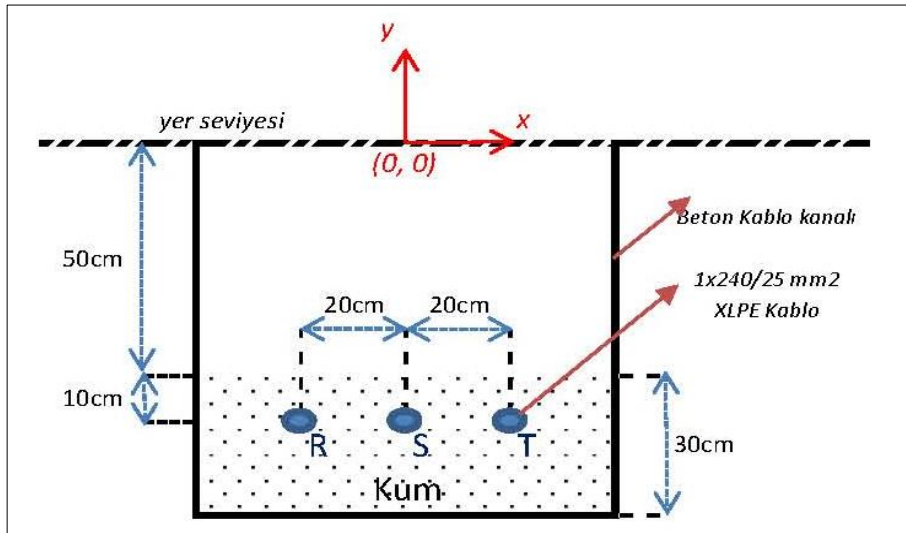
3.1. Çalışmada İzlenen Yol

Elektromanyetik alan ölçümleri için Akdeniz Üniversitesi Hastanesi A2 Bloğa enerji sağlayan trafo binalarının (Bkz. Şekil 3.1) kablo kanalları belirlenmiştir. Trafo tesisinde AG ve YG enerji kablolarının bulunduğu iki farklı kablo kanal tipi bulunmaktadır.

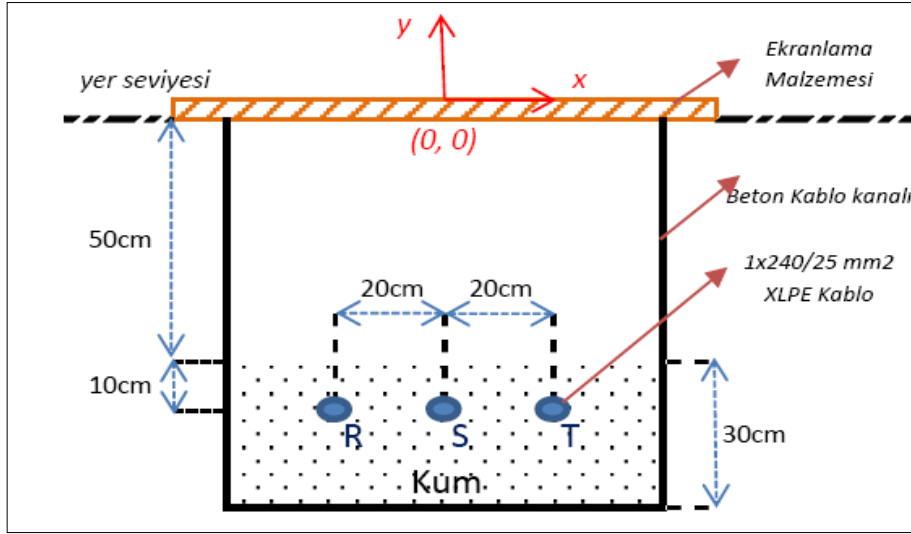


Şekil 3.1. Ölçüm Yapılan A2 Trafo Binası

YG kablolarının bulunduğu kablo kanalı (Bkz. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3) 80 cm derinliğinde ve 66 cm genişliğindedir. İçerisinde R, S, T fazları için 3 adet 1x240/25 mm² kesitinde XLPE kablo bulunmaktadır. Tesisin şebeke gerilimi 31,5 kV olup, ölçüm esnasında yükün 400 kW ($\cos\Phi=0,97$) olduğu gözlemlenmiştir.

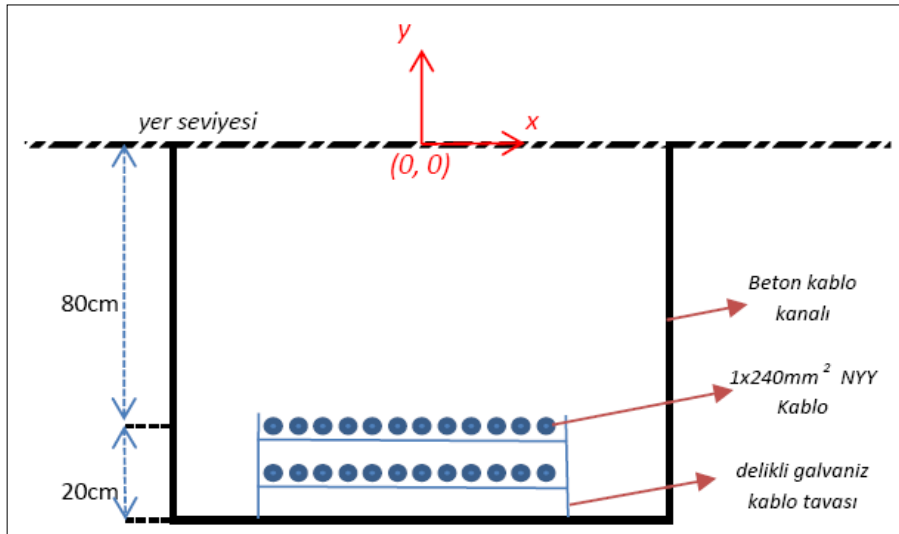


Şekil 3.2. YG Kablo kanalının ekransız durumunun temsili gösterimi

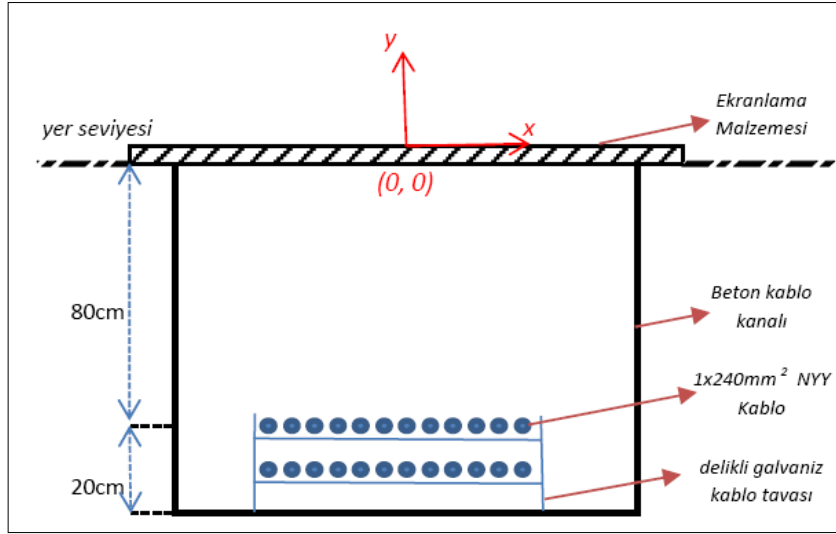


Şekil 3.3. YG Kablo kanalının ekranlı durumunun temsili gösterimi

AG kablolarının bulunduğu kablo kanalı (Bkz. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5) 100 cm derinliğinde ve 70 cm genişliğindedir. Trafoların AG çıkışları her faz için $1 \times 240 \text{ mm}^2$ kesitinde NYY kablo ile yapılmıştır. Bu kablolar delikli galvaniz kablo tavasına 2 sıra halinde sabitlenmiştir. Tesisin AG çıkışı dengeli olarak yüklenmiştir ve ölçüm esnasında her fazda yaklaşık 38 kW yük bulunmaktadır.



Şekil 3.4. AG Kablo kanalının ekransız durumunun temsili gösterimi



Şekil 3.5. AG Kablo kanalının ekranlı durumunun temsili gösterimi

Kablo kanallarında kullanılan farklı ekranlama malzemelerinin kalınlıklarına bağlı olarak hesaplanan deri kalınlığı değerleri (Bkz. Çizelge 3.1) referans alınarak oluşturulan Şekil 3.6'daki MATLAB kodu ile demir, bakır ve alüminyum için deri kalınlığı etkisi grafiği oluşturulmuştur.

```
%Deri Kalınlığı Etkisi

SEdBAl=[30 30 31 32 33 33 34 35 36 36] %(Alüminyum)
SEdBcu=[33 34 35 36 37 38 39 39 40 41] %(Bakır)
SEdBFe=[12 21 29 38 47 56 65 74 82 91] %(Demir)

d=1:1:10;%ekran kalınlığı (milimetre)

plot (d,SEdBAl, 'b', 'LineWidth',3); hold on;
plot (d,SEdBcu, 'r', 'LineWidth',3);
plot (d,SEdBFe, 'm', 'LineWidth',3);

title('Malzeme Kalınlığına Bağlı Ekran Etkinliği
SE[dB]', 'Fontweight', 'Bold' );
xlabel ( 'Ekran Kalınlığı [mm] ', 'Fontweight', 'Bold' );
ylabel ( 'SE (dB) ', 'Fontweight', 'Bold' );
grid on;
hold on;

gtext('Alüminyum ', 'color', 'b', 'FontSize', 12, 'Fontweight', 'Bold')
gtext('Bakır ', 'color', 'r', 'FontSize', 12, 'Fontweight', 'Bold')
gtext('Demir ', 'color', 'm', 'FontSize', 12, 'Fontweight', 'Bold')
```

Şekil 3.6. Deri kalınlığı etkisi MATLAB kodu

Çizelge 3.1. Manyetik Kaynağın yakın alan bölgesinde bulunan (r=80cm) bazı ekran malzemelerinin çeşitli kalınlıkları için SE Bileşenleri (50 Hz frekansı)

Materyal	Ekran Kalınlığı (mm)	İletkenlik (σ) (Siemens/m)	Manyetik Geçirgenlik (μ_r) (H/m)	Ekranlama Etkinliği		
				R _{dB}	A _{dB}	SE _{dB}
Alüminyum	1	3.5×10^7	1	29	1	30
	2			29	1	30
	3			29	2	31
	4			29	3	32
	5			29	4	33
	6			29	4	33
	7			29	5	34
	8			29	6	35
	9			29	7	36
	10			29	7	36
Bakır	1	5.8×10^7	1	32	1	33
	2			32	2	34
	3			32	3	35
	4			32	4	36
	5			32	5	37
	6			32	6	38
	7			32	7	39
	8			32	7	39
	9			32	8	40
	10			32	9	41
Demir	1	1.04×10^7	500	3	9	12
	2			3	18	21
	3			3	26	29
	4			3	35	38
	5			3	44	47
	6			3	53	56
	7			3	62	65
	8			3	71	74
	9			3	79	82
	10			3	88	91

Kullanılan ekranlama materyalinin kalınlığının, ekranlama etkinliğine etkisi Şekil 3.7’de açıkça görülmektedir.



Şekil 3.7. Demir, Bakır ve Alüminyum için deri kalınlığı etkisi

Kablo kanallarında kullanılan ekranlama malzemesinin kalınlığına ve materyalin elektriksel özelliklerine bağlı olarak toplam ekranlama etkinliği hesabı yapan Şekil 3.8’deki MATLAB programı şu şekilde oluşturulmuştur:

```
%Ekran Zayıflatması
d=2*10^-3; %ekran kalınlığı (metre)

mu0=4*pi*10^-7;
mur=1; %(Bakır:1, Demir:150, Gümüş:1, Alüminyum:1, Paslanmaz
Çelik:500)
mu=mu0*mur;

sigma=5.8*10^7; %(Bakır:5.8*10^7, Demir:1.64*10^6, Gümüş:6.3*10^7,
Alüminyum:3.5*10^7, Paslanmaz Çelik:1.1*10^6)

f=1:10:10^6;
RdB=168.2+10*log(sigma ./ (mu*f)); %Yansıma Kaybı
AdB=131.8*d.*sqrt(f.*mu.*sigma); %Soğurulma Kaybı
SEdB=AdB+RdB;

%subplot(3,1,1);
plot(f,RdB,'m','LineWidth',2);
title('Malzemeye Bağlı Yansıma R[dB]','Fontweight','Bold');
xlabel('F [Hz]','Fontweight','Bold');
```

```

ylabel ( ' R(dB) ', 'Fontweight' , 'Bold' ) ;
grid on;
hold on;

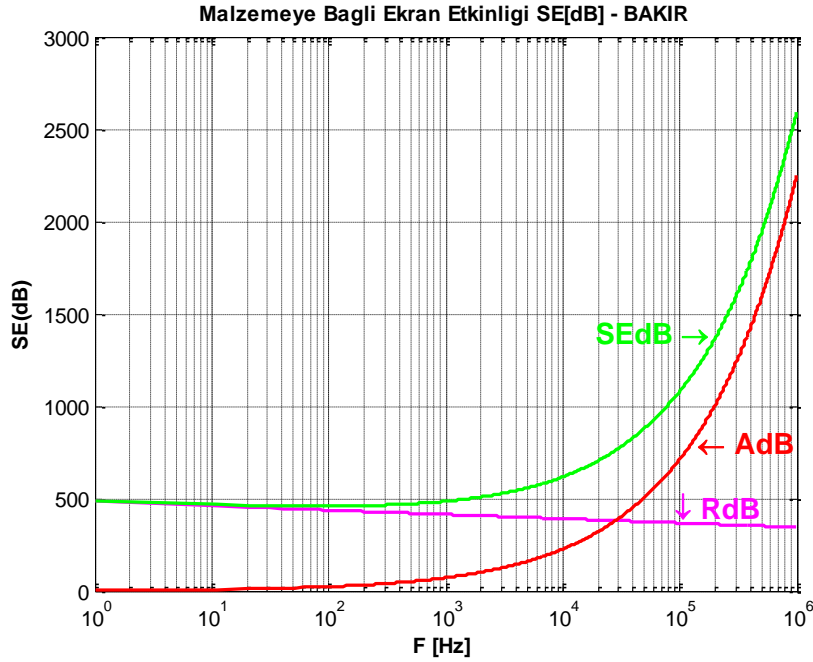
%subplot(3,1,2);
plot (f,AdB, 'r', 'LineWidth',2);
title('Malzemeye Bagli Sogurulma A[dB]', 'Fontweight', 'Bold' ) ;
xlabel ( ' F [Hz] ', 'Fontweight' , 'Bold' );
ylabel ( ' A(dB) ', 'Fontweight' , 'Bold' ) ;
grid on;
hold on;

%subplot(3,1,3);
plot (f,SEdB, 'g', 'LineWidth',2);
title('Malzemeye Bagli Ekran Etkinligi SE[dB] -
BAKIR', 'Fontweight', 'Bold' ) ;
xlabel ( ' F [Hz] ', 'Fontweight' , 'Bold' );
ylabel ( ' SE(dB) ', 'Fontweight' , 'Bold' ) ;
grid on;
hold on;
gtext('SEdB\rightarrow', 'color', 'g', 'FontSize',14, 'Fontweight', 'Bold')
gtext('\leftarrow AdB', 'color', 'r', 'FontSize',14, 'Fontweight', 'Bold')
gtext('\downarrow RdB', 'color', 'm', 'FontSize',14, 'Fontweight', 'Bold')

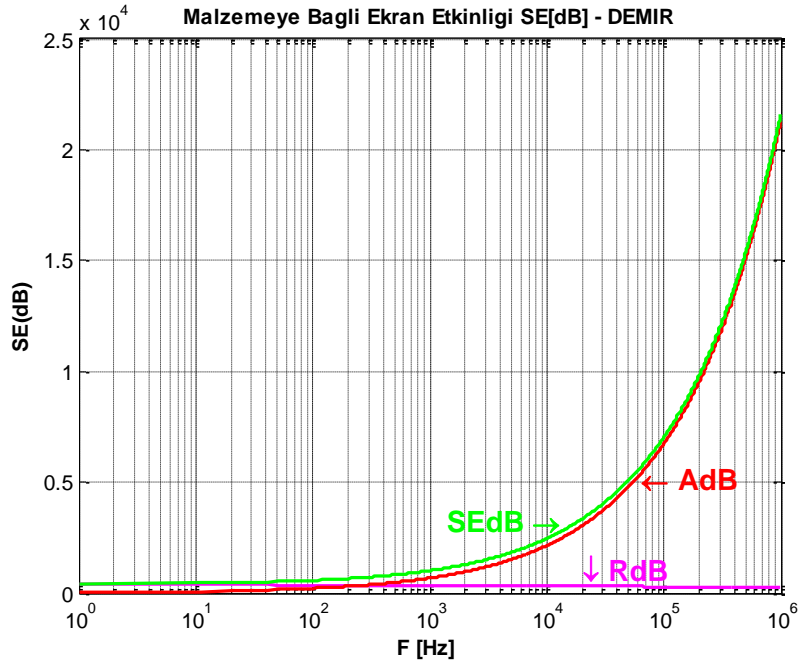
```

Şekil 3.8. Ekran zayıflatması MATLAB kodu

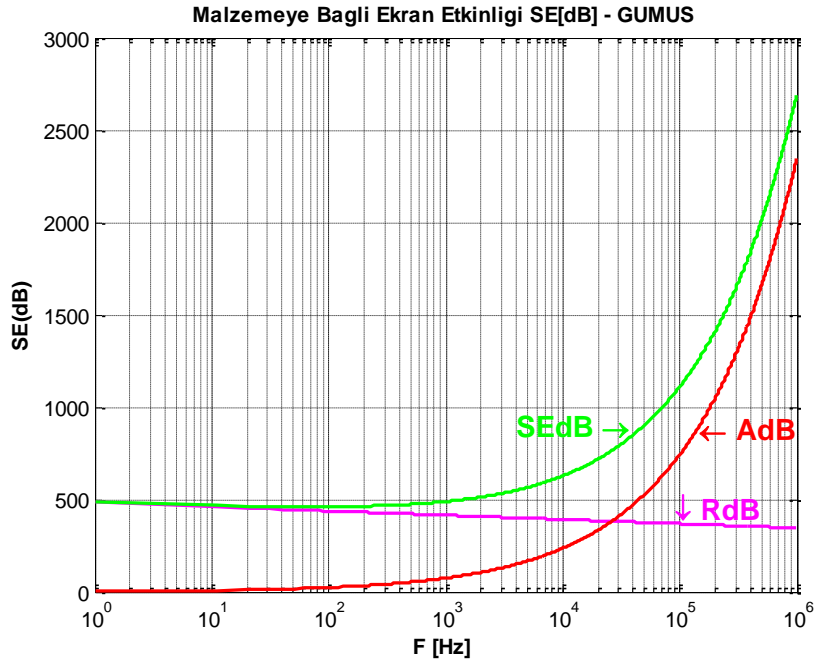
MATLAB programı (Bkz. Şekil 3.8) bakır, demir, gümüş, alüminyum ve paslanmaz çelik için ayrı ayrı çalıştırıldığında oluşan ekran etkinliğinin frekansa bağlı değişimi sırasıyla aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



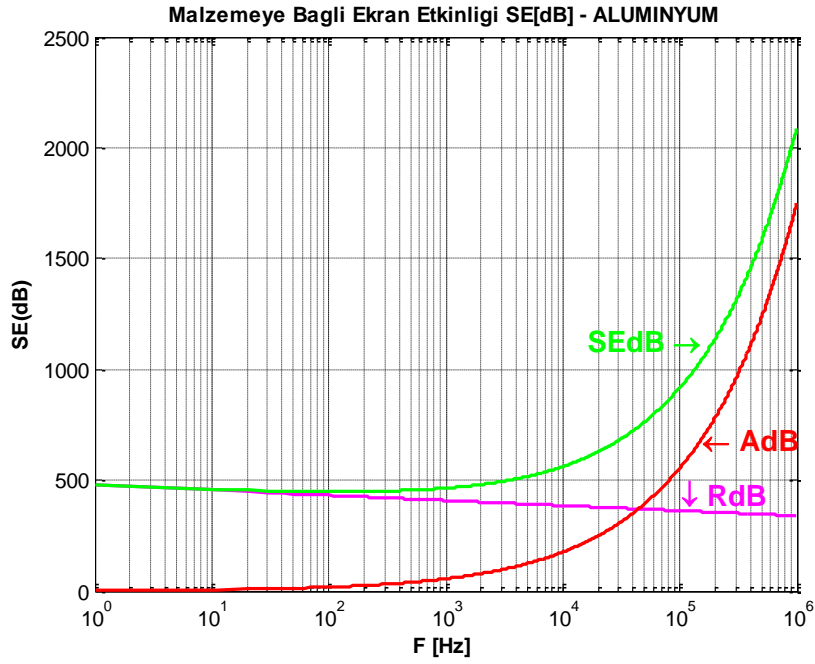
Şekil 3.9. 2 mm Kalınlığında Bakır Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi



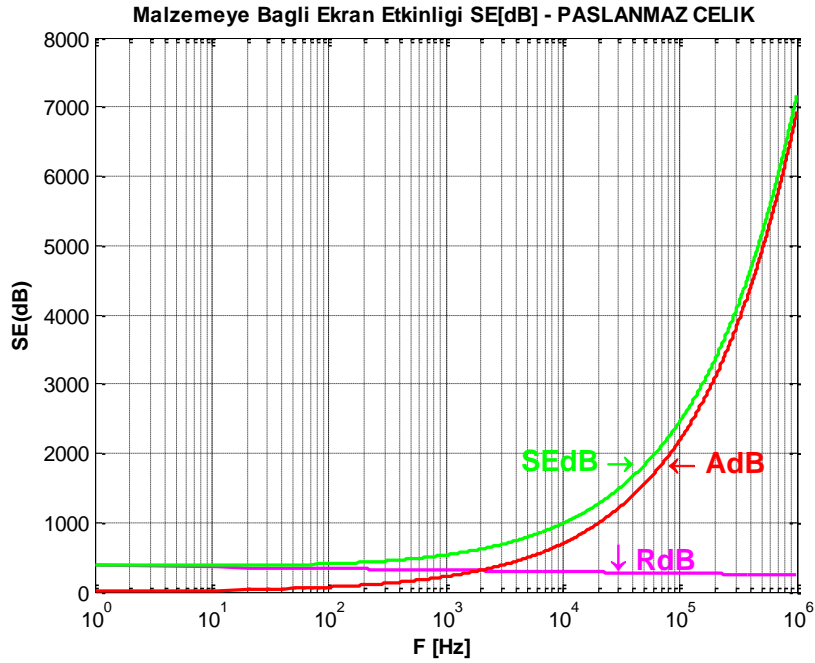
Şekil 3.10. 2 mm Kalınlığında Demir Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi



Şekil 3.11. 2 mm Kalınlığında Gümüş Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi



Şekil 3.12. 2 mm Kalınlığında Alüminyum Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi



Şekil 3.13. 2 mm Kalınlığında Paslanmaz Çelik Ekran için $SE=R_{dB}+A_{dB}$ Ekran Etkinliğinin Frekansa Bağlı Değişimi

3.2. Ekranlama İçin Kullanılan Malzeme Özellikleri ve Ölçüm Düzenekleri

Kablo kanallarındaki ölçümlerde elektromanyetik alan ekranlama malzemesi olarak 2 mm kalınlığında galvaniz düz levha, 2 mm kalınlığında düz demir levha ve 2 mm kalınlığında ters U şeklinde galvaniz levha (Bkz. Şekil 3.14) kullanılmıştır. Ayrıca kablo kanalı üzerinde halihazırda bulunan 7 cm kalınlığında beton bloklar varken ve yokken de elektromanyetik alan ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.14. Ters U Galvaniz Ekran ile YG Kanalda Ölçüm

AG ve YG kablo kanalının ikisinde de, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterildiği gibi, yer seviyesinden itibaren her ekranlama malzemesi için ayrı ayrı her 10 cm yükseklikte alınan ölçüm değerleri kaydedilmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.15. AG Kanalda Ekransız Ölçüm



Şekil 3.16. Ters U Galvaniz Ekran ile AG Kanalda Ölçüm

Ölçüm işlemlerinde üç eksenli Hioki FT3470 marka manyetik alan ölçüm cihazı kullanılmıştır (Bkz. Şekil 3.17). Bu cihaz 2 Mikro Tesla - 2 mili Tesla, 0.5 mili Gauss - 20 Gauss, 0.040A/m - 1592 A/m aralıklarında 250 milisaniyelik periyotlarla X, Y, Z eksenlerinde $\pm\%3.5$ doğruluk ile RMS ölçüm yapabilmektedir. 10 Hz'den 400 kHz'e kadar frekans bandı bulunmaktadır ve CE standartlarına uygundur.



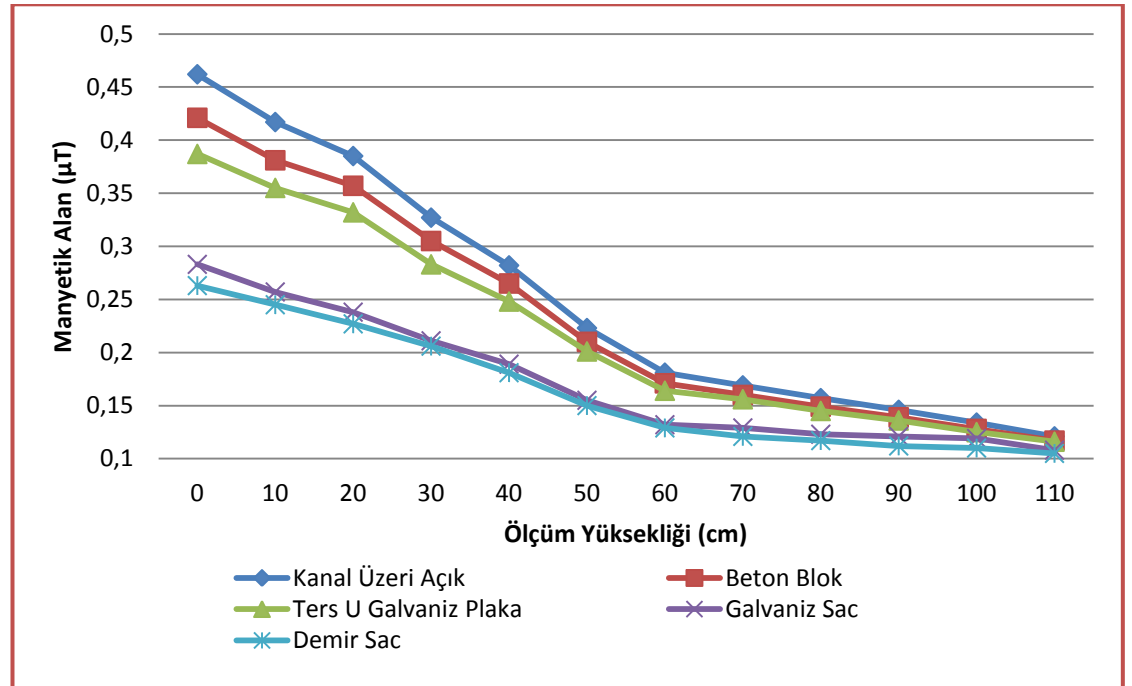
Şekil 3.17. Hioki FT3470 Manyetik Alan Ölçüm Cihazı

4. BULGULAR

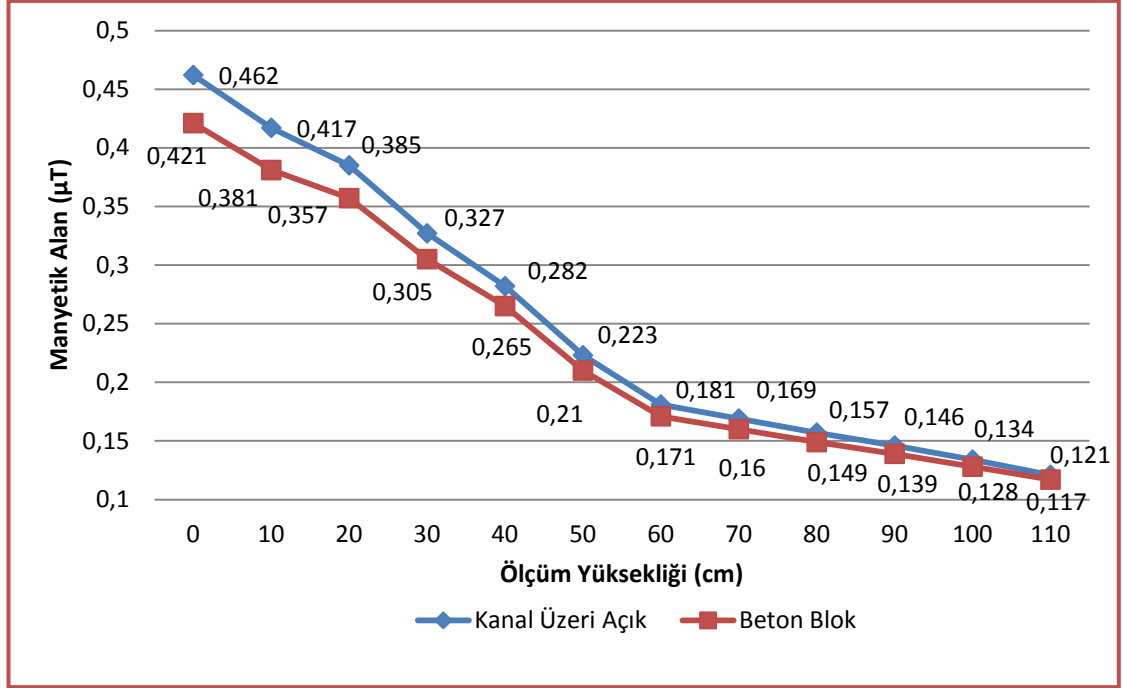
YG kablo kanalının üzeri açık iken, kanal üzeri galvaniz ve demir saclar ile kapalı iken, ayrıca kanal üzerinde beton bloklar var iken manyetik alan ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm esnasında yükün 400 kW ($\cos\Phi=0,97$) ve akımın yaklaşık 7,55 A olduğu gözlemlenmiştir. Her ekranlama malzemesi için, kablo kanalı orta ekseninden dikey düzlemde yer seviyesinden itibaren 10'ar cm aralıklarla ölçümler alınmış ve değerler kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. YG Kablo Kanalında Ölçülen Manyetik Alan Değerleri

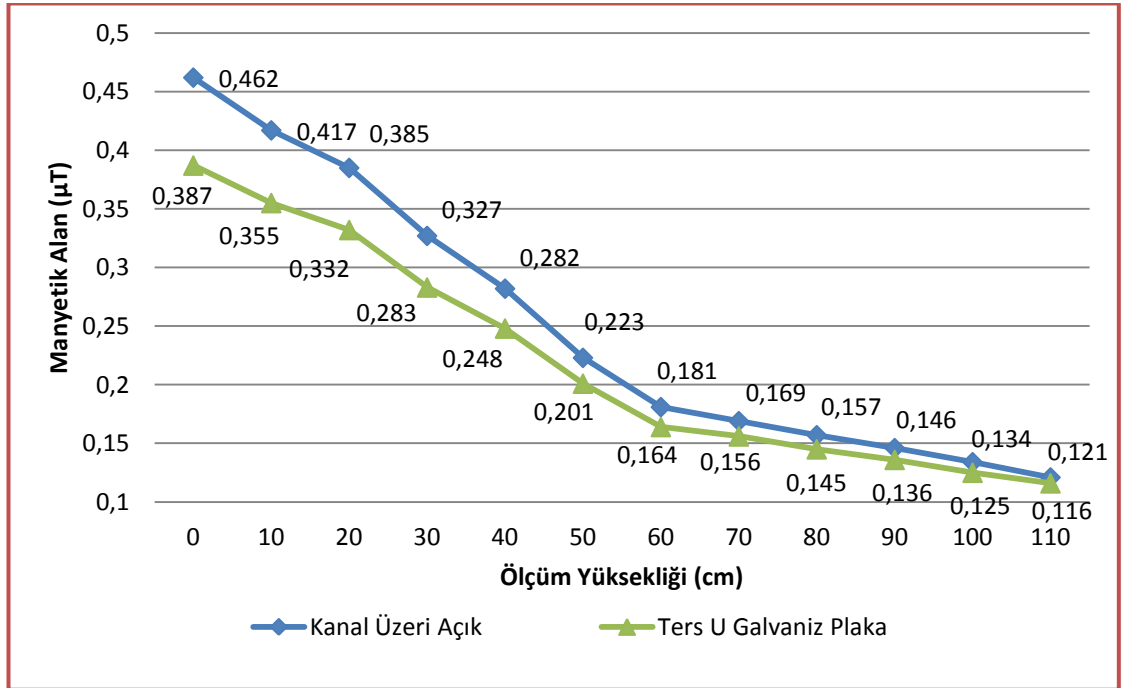
YÜKSEKLİK	Kanal Açık iken (μT)	7cm Beton Blok Kullanıldığında (μT)	Ters U şeklinde Galvaniz Sac Kullanıldığında (μT)	2mm Galvaniz Sac Kullanıldığında (μT)	2mm Demir Sac Kullanıldığında (μT)
0 cm	0,462	0,421	0,387	0,283	0,263
10 cm	0,417	0,381	0,355	0,257	0,245
20 cm	0,385	0,357	0,332	0,238	0,227
30 cm	0,327	0,305	0,283	0,211	0,206
40 cm	0,282	0,265	0,248	0,189	0,181
50 cm	0,223	0,21	0,201	0,155	0,15
60 cm	0,181	0,171	0,164	0,132	0,129
70 cm	0,169	0,16	0,156	0,129	0,121
80 cm	0,157	0,149	0,145	0,123	0,117
90 cm	0,146	0,139	0,136	0,121	0,112
100 cm	0,134	0,128	0,125	0,119	0,11
110 cm	0,121	0,117	0,116	0,108	0,105



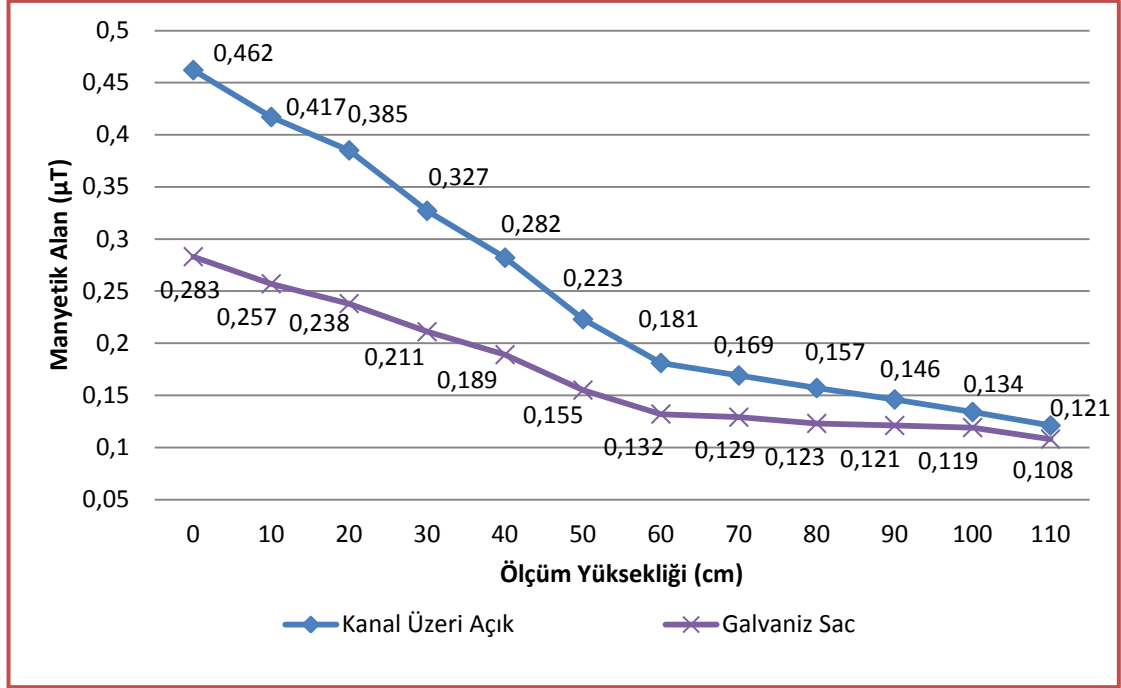
Şekil 4.1. YG Kablo Kanalındaki Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması



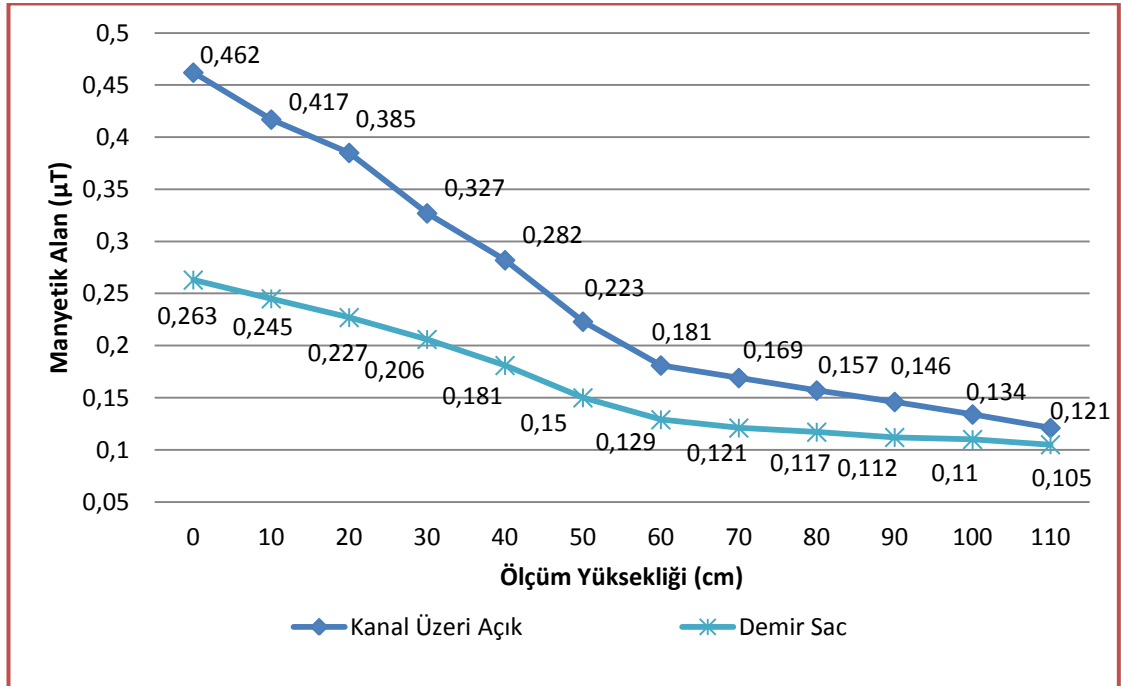
Şekil 4.2. YG Kablo Kanalında Beton Blok Ekranlama Etkisi



Şekil 4.3. YG Kablo Kanalında Ters U Galvaniz Sac Ekranlama Etkisi



Şekil 4.4. YG Kablo Kanalında Galvaniz Sac Levha Ekranlama Etkisi



Şekil 4.5. YG Kablo Kanalında Demir Sac Levha Ekranlama Etkisi

YG Kablo kanallarındaki elektromanyetik alan ölçümlerinde, ekranlama malzemesi olarak düz demir levha kullanıldığında en düşük alan değerlerine ulaşılmıştır.

Ekranlama malzemeleri için ekranlama etkinliğine (SE) aşağıdaki formüllerle ulaşılır:

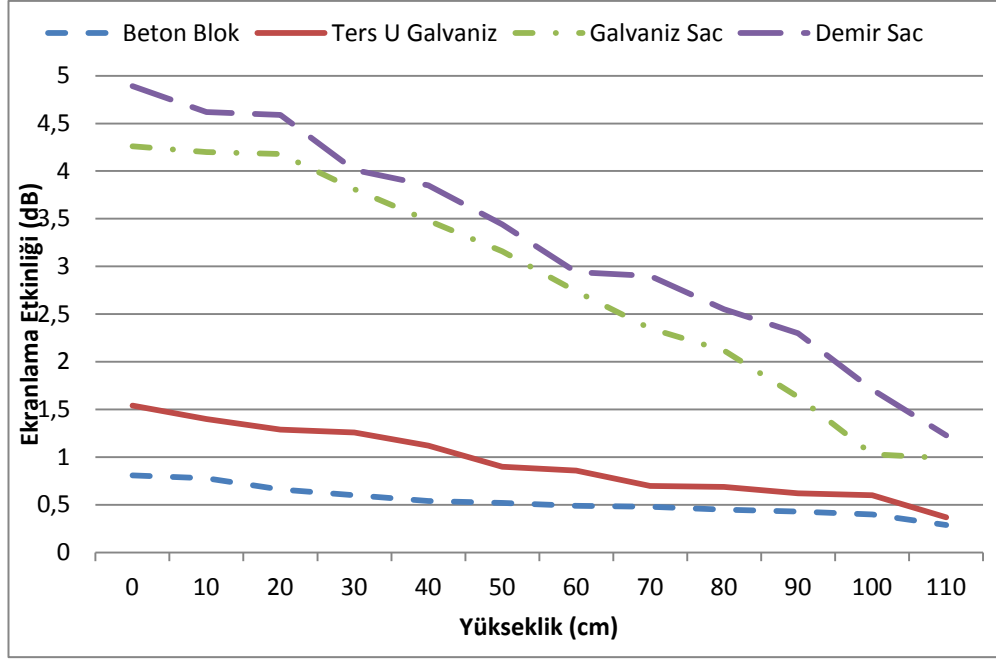
$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{H^{ekransız}}{H^{ekranlı}} \right| (dB) \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1'deki, YG Kablo kanalında ölçülen manyetik alan değerleri ile, her ekran malzemesi için ayrı ayrı ekranlama etkinliği bu eşitlik ile hesaplandığında Çizelge 4.2 elde edilir:

Çizelge 4.2. YG Kablo Kanalında Kullanılan Materyallerin Ekranlama Etkinliği

YÜKSEKLİK	Beton Blok için Ekranlama Etkinliği (dB)	Ters U Galvaniz için Ekranlama Etkinliği (dB)	Galvaniz Sac İçin Ekranlama Etkinliği (dB)	Demir Sac İçin Ekranlama Etkinliği (dB)
0 cm	0,81	1,54	4,26	4,89
10 cm	0,78	1,40	4,20	4,62
20 cm	0,66	1,29	4,18	4,59
30 cm	0,60	1,26	3,81	4,01
40 cm	0,54	1,12	3,48	3,85
50 cm	0,52	0,90	3,16	3,44
60 cm	0,49	0,86	2,74	2,94
70 cm	0,48	0,70	2,35	2,90
80 cm	0,45	0,69	2,12	2,55
90 cm	0,43	0,62	1,63	2,30
100 cm	0,40	0,60	1,03	1,71
110 cm	0,29	0,37	0,99	1,23

Şekil 4.6'da da görüldüğü gibi, ekranlama malzemesi olarak demir sac levha kullanıldığında en yüksek ekranlama etkinliği değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.6. YG Kablo Kanalında Kullanılan Malzemelerin Ekranlama Etkinliği

YG kablo kanalında kullanılan ekranlama malzemelerin ekranlama etkinliği değerleri kullanılarak oluşturulan Şekil 4.7'deki MATLAB kodu şu şekilde oluşturulmuştur:

```
%Ekranlamanın Manyetik Alan Değişimine Etkisi
I=7.558;
Xc=-3:0.2:3;
Yc=1;
Xr=-0.25;Xs=0;Xt=0.25;
Yr=-1;Ys=-1;Yt=-1;
muo=4*pi*10^-7;

rkr=(Xc-Xr).^2+(Yc-Yr).^2;%rk r nin karesi R fazı
rks=(Xc-Xs).^2+(Yc-Ys).^2;%S fazı
rkt=(Xc-Xt).^2+(Yc-Yt).^2;%T fazı

%R fazı Sol tarafta orijine yakın
Brx=(muo*0.5*I/pi)*(Yc-Yr)./rkr
Bry=(muo*0.5*I/pi)*(Xc-Xr)./rkr
Br=sqrt(Brx.^2+Bry.^2)
%S fazı -orta kablo- Alan hesapları
Bsx=(muo*0.5*I/pi)*(Yc-Ys)./rks;
Bsy=(muo*0.5*I/pi)*(Xc-Xs)./rks;
Bs=sqrt(Bsx.^2+Bsy.^2);
%T fazı
Btx=(muo*0.5*I/pi)*(Yc-Yt)./rkt;
Bty=(muo*0.5*I/pi)*(Xc-Xt)./rkt;
Bt=sqrt(Btx.^2+Bty.^2);

BX=(Bsx+Brx+Btx)*10^6; %muT
BY=(Bsy+Bry+Bty)*10^6;%muT
Btop=sqrt(BX.^2+BY.^2)%mutesla
```

```

plot(Xc,Btop,'b','Linewidth',2);
hold on;
xlabel('Toprak düzlemi');
ylabel('Manyetik Alan B, \mu T');

%Ekranlama Etkinliği
%Hesaplanan Ekranlama Etkinliği Değerleri:
SE=0.81; %Beton Blok SE:0.81dB
K=(10^(SE/20)); %K=(10^(SE/20))sabite ata
B2=Btop/K; %ekranlama sondaki alan değişimi B2
plot(Xc,B2,'-.g','Linewidth',2);
hold on;

SE=1.54; %Ters U Galvaniz SE:1.54dB
K=(10^(SE/20)); %K=(10^(SE/20))sabite ata
B2=Btop/K; %ekranlama sondaki alan değişimi B2
plot(Xc,B2,'-.m','Linewidth',2);
hold on;

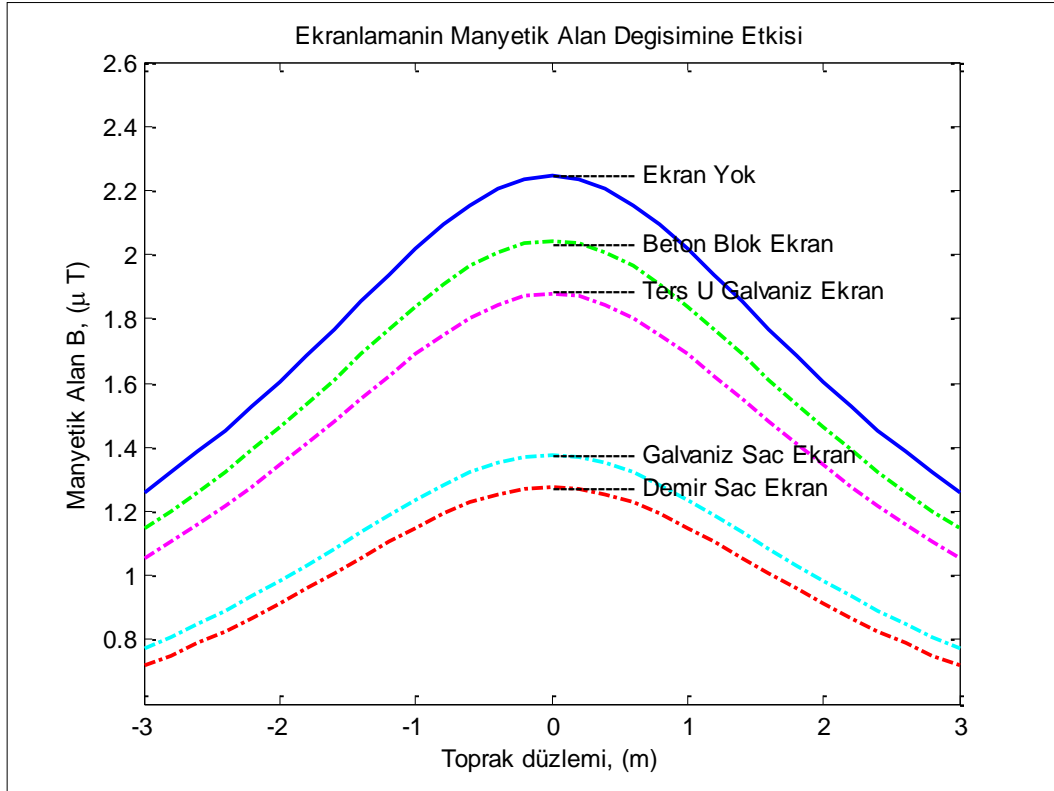
SE=4.26; %Galvaniz Sac SE:4.26dB
K=(10^(SE/20)); %K=(10^(SE/20))sabite ata
B2=Btop/K; %ekranlama sondaki alan değişimi B2
plot(Xc,B2,'-.c','Linewidth',2);
hold on;

SE=4.89; %Demir Sac SE:4.89dB
K=(10^(SE/20)); %K=(10^(SE/20))sabite ata
B2=Btop/K; %ekranlama sondaki alan değişimi B2
plot(Xc,B2,'-.r','Linewidth',2);
hold on;

title('Ekranlamanın Manyetik Alan Değişimine Etkisi')
gtext('----- Ekran Yok')
gtext('----- Beton Blok Ekran')
gtext('----- Ters U Galvaniz Ekran')
gtext('----- Galvaniz Sac Ekran')
gtext('----- Demir Sac Ekran')

```

Şekil 4.7. Ekranlamanın manyetik alan değişimine etkisi MATLAB kodu



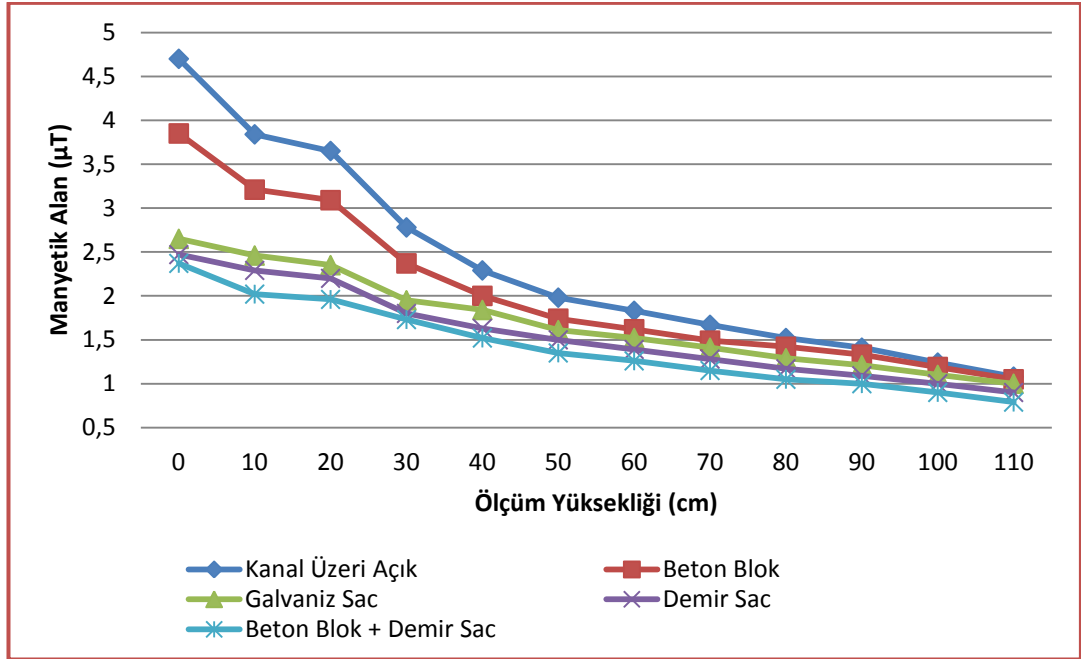
Şekil 4.8. Kullanılan Farklı Ekranlama Malzemeleri için hesaplanan manyetik alan değerleri

Oluşturulan MATLAB programı ile yapılan teorik hesaplarda da, ölçülen değerlere çok yakın sonuçlar elde edilmiş ve Şekil 4.8’de de görüldüğü gibi, demir sac levhanın ekranlama etkinliği ön plana çıkmıştır.

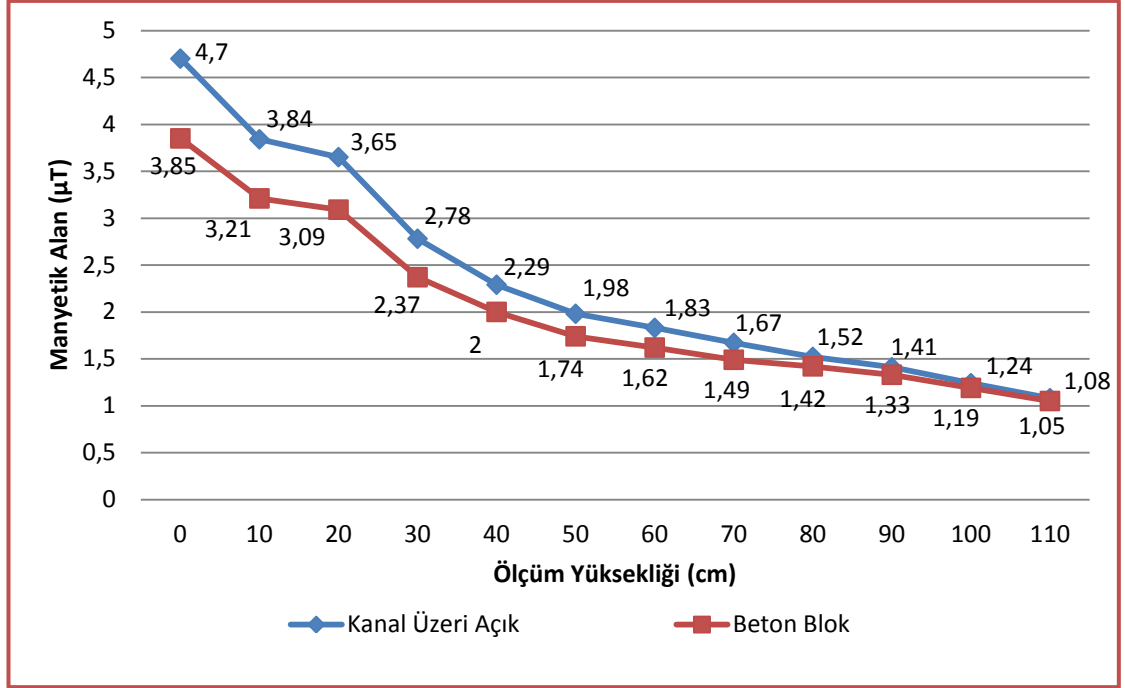
AG kablo kanalında da kanalının üzeri açık iken, kanal üzeri galvaniz ve demir saclar ile kapalı iken, ayrıca kanal üzerinde beton bloklar var iken manyetik alan ölçümleri yapılmıştır. Tesisin AG çıkışı dengeli olarak yüklenmiştir ve ölçüm esnasında her fazda yaklaşık 38 kW yük bulunmaktadır. Çoklu kablo düzeni kullanıldığından, her kablo için ayrı ayrı bir akım değeri ölçülemediği için, Her ekranlama malzemesi için, kablo kanalı orta eksenini üzerinden dikey düzlemde yer seviyesinden itibaren 10’ar cm aralıklarla ölçümler alınmış ve değerler kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.3’de ve devamındaki şekillerde gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. AG Kablo Kanalında Ölçülen Manyetik Alan Değerleri

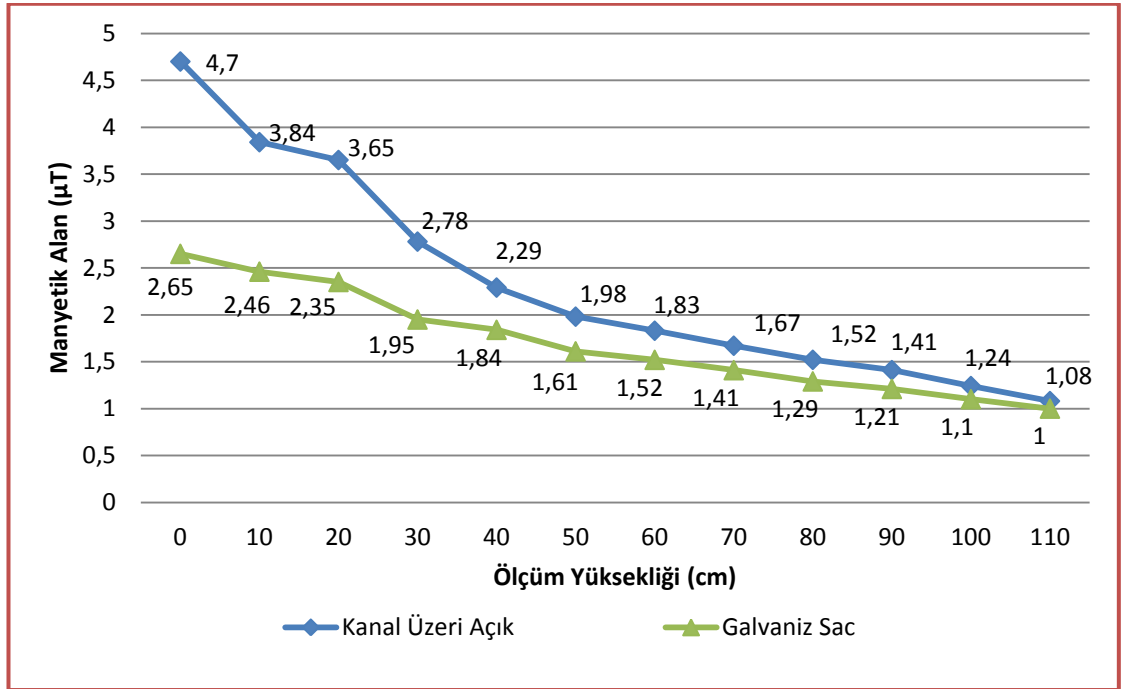
YÜKSEKLİK	Kanal Açık İken (μT)	7cm Beton Blok kullanıldığında (μT)	2mm Galvaniz Sac Kullanıldığında (μT)	2mm Demir Sac Kullanıldığında (μT)	7cm Beton Blok + Demir Sac kullanıldığında (μT)
0 cm	4,7	3,85	2,65	2,47	2,37
10 cm	3,84	3,21	2,46	2,29	2,02
20 cm	3,65	3,09	2,35	2,2	1,96
30 cm	2,78	2,37	1,95	1,8	1,73
40 cm	2,29	2	1,84	1,63	1,52
50 cm	1,98	1,74	1,61	1,5	1,35
60 cm	1,83	1,62	1,52	1,39	1,26
70 cm	1,67	1,49	1,41	1,28	1,15
80 cm	1,52	1,42	1,29	1,17	1,05
90 cm	1,41	1,33	1,21	1,09	1
100 cm	1,24	1,19	1,1	1	0,9
110 cm	1,08	1,05	1	0,9	0,79



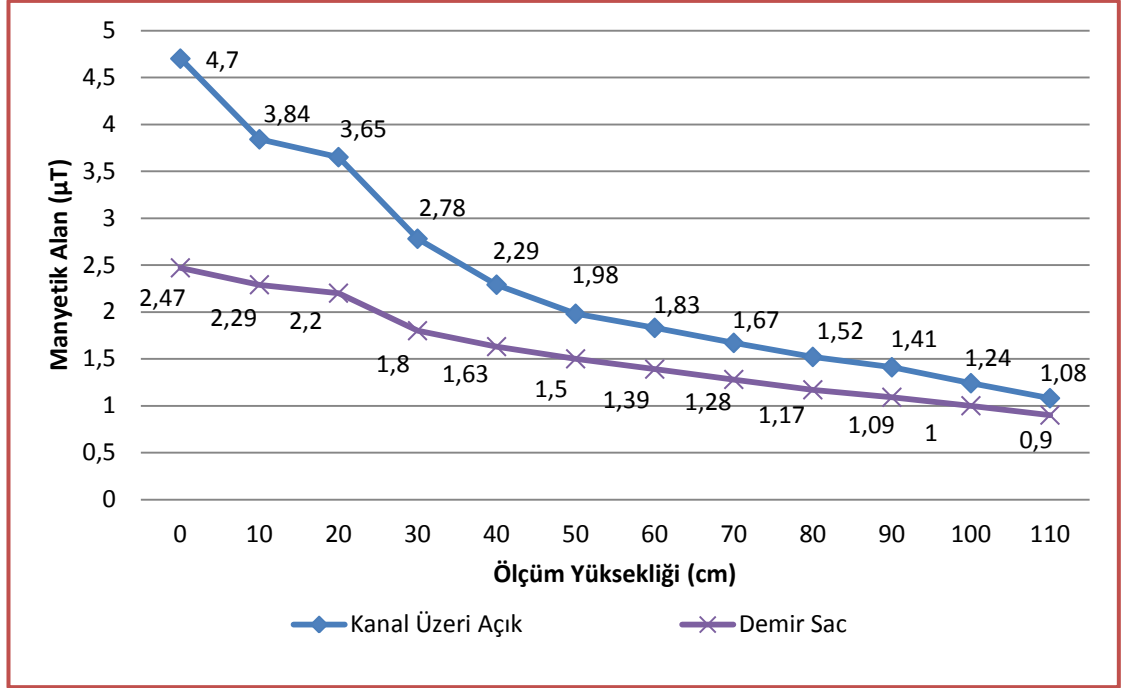
Şekil 4.9. AG Kablo Kanalındaki Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması



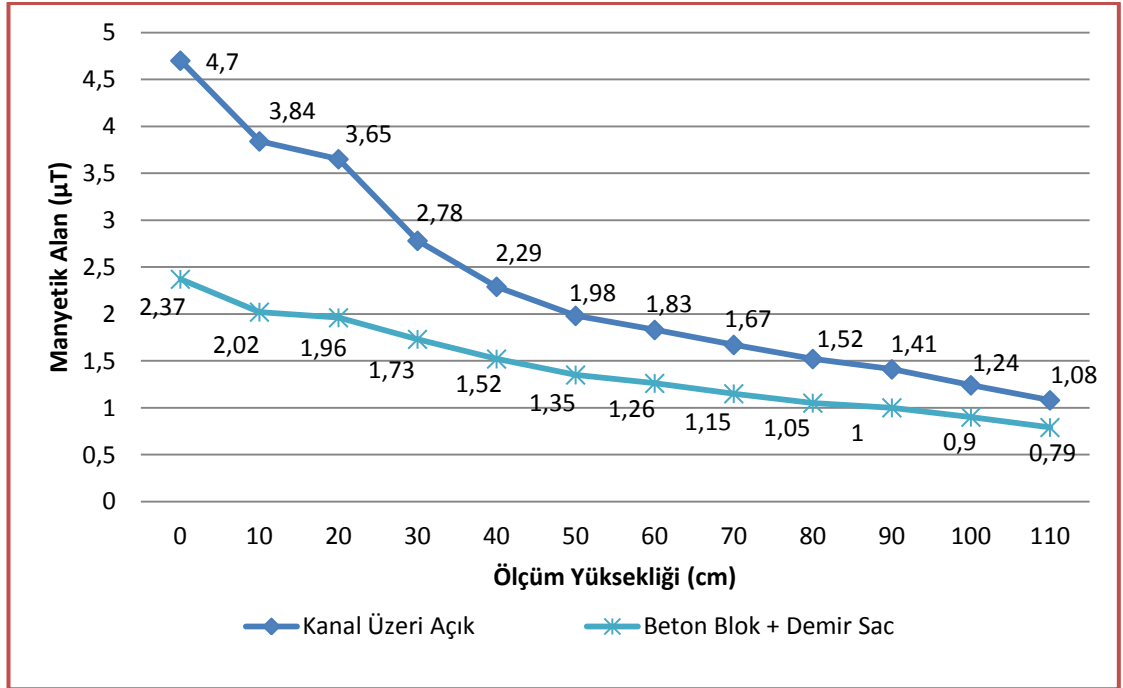
Şekil 4.10. AG Kablo Kanalında Beton Blok Ekranlama Etkisi



Şekil 4.11. AG Kablo Kanalında Galvaniz Sac Ekranlama Etkisi



Şekil 4.12. AG Kablo Kanalında Demir Sac Ekranlama Etkisi



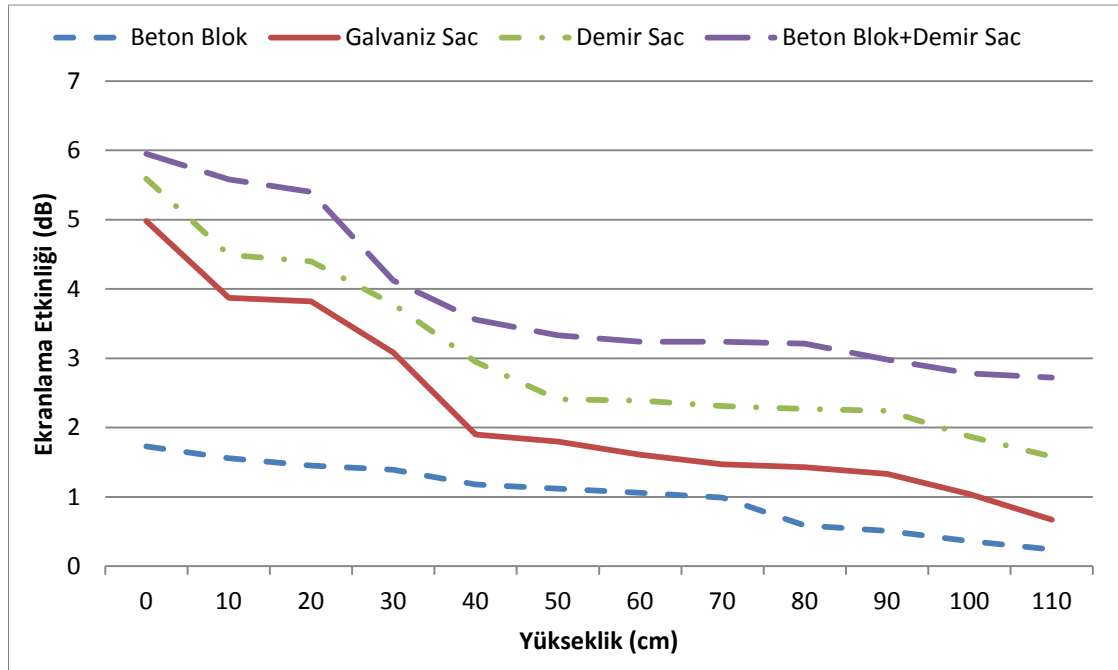
Şekil 4.13. AG Kablo Kanalında Beton Blok+Demir Sac Ekranlama Etkisi

AG Kablo kanallarındaki elektromanyetik alan ölçümlerinde de, tek bir ekranlama malzemesi için, düz demir levha kullanıldığında en düşük manyetik alan

değerlerine ulaşılmıştır. Materyallerin hesaplanan ekranlama etkinlikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. AG Kablo Kanalında Kullanılan Materyallerin Ekranlama Etkinliği

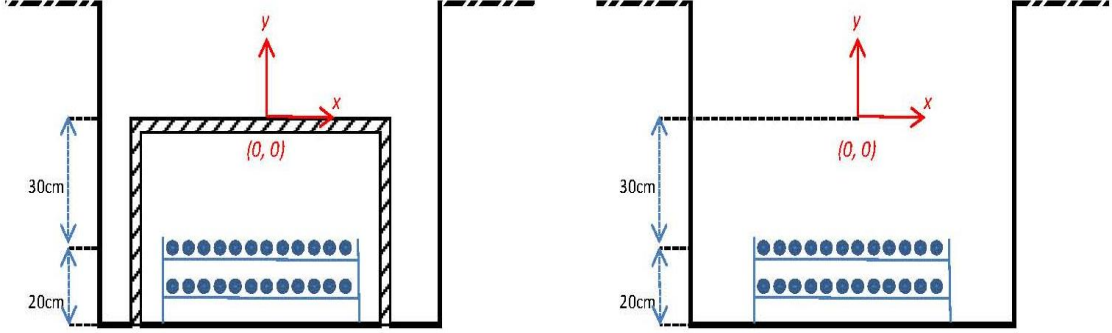
YÜKSEKLİK	Beton Blok için Ekranlama Etkinliği (dB)	Galvaniz Sac İçin Ekranlama Etkinliği (dB)	Demir Sac İçin Ekranlama Etkinliği (dB)	Beton Blok+Demir Sac İçin Ekranlama Etkinliği (dB)
0 cm	1,73	4,98	5,59	5,95
10 cm	1,56	3,87	4,49	5,58
20 cm	1,45	3,82	4,40	5,40
30 cm	1,39	3,08	3,78	4,12
40 cm	1,18	1,90	2,95	3,56
50 cm	1,12	1,80	2,41	3,33
60 cm	1,06	1,61	2,39	3,24
70 cm	0,99	1,47	2,31	3,24
80 cm	0,59	1,43	2,27	3,21
90 cm	0,51	1,33	2,24	2,98
100 cm	0,36	1,04	1,87	2,78
110 cm	0,24	0,67	1,58	2,72



Şekil 4.14. AG Kablo Kanalında Kullanılan Malzemelerin Ekranlama Etkinliği

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi, ekranlama malzemesi olarak tek bir malzeme kullanıldığında, demir sac levha ile en yüksek ekranlama etkinliği değerine ulaşılmıştır.

AG kablo kanalı üzerindeki ölçüm ve gözlemlerden sonra aynı kablo kanlının içerisine, kabloların üzeri tamamen ters U şeklindeki galvaniz plaka ekran ile kapalı iken ölçümler yapılmıştır ve kabloların üzeri açık olduğunda ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır.



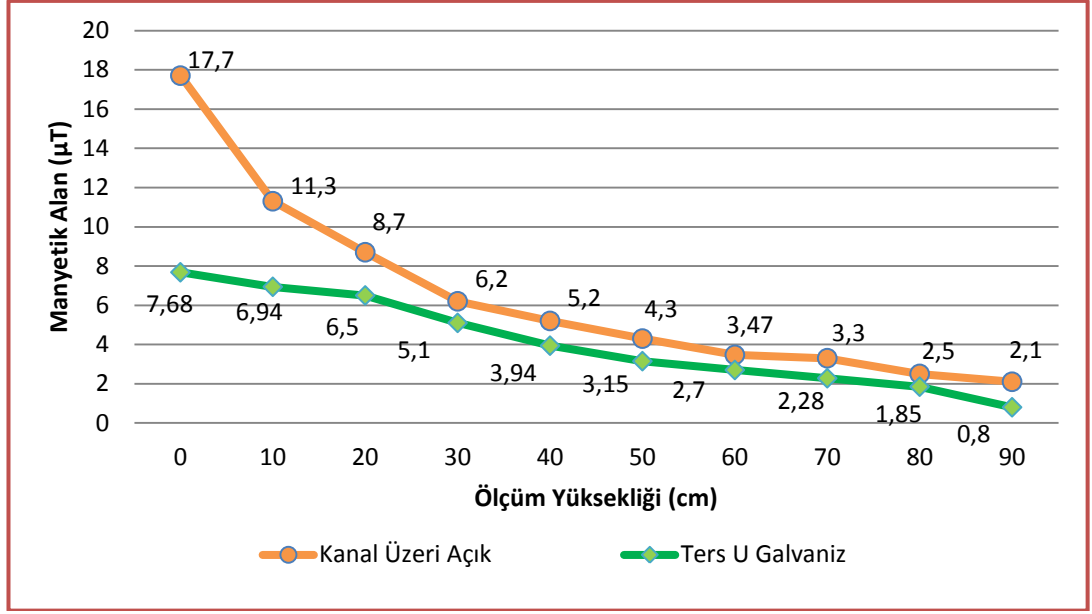
Şekil 4.15. AG Kablo Kanalı Temsili Gösterimi

AG kablo kanalında ayrıca, kanal üzeri açık iken ve ters U şeklindeki galvaniz plaka Şekil 4.15'te de görüldüğü gibi, kabloların etrafını da kaplayacak biçimde yerleştirilmiş iken, kablo kanalı merkezinden dikey düzlemde her 10 cm yükseklikte ölçümler yapılmıştır. Ölçülen değerler ile Çizelge 4.5 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.5. AG Kablo Kanalında Ölçülen Manyetik Alan Değerleri

YÜKSEKLİK	Ters U galvaniz ile (μT)	Kablo Kanalı Üzeri Açık İken (μT)
0 cm	7,68	17,7
10 cm	6,94	11,3
20 cm	6,5	8,7
30 cm	5,1	6,2
40 cm	3,94	5,2
50 cm	3,15	4,3
60 cm	2,7	3,47
70 cm	2,28	3,3
80 cm	1,85	2,5
90 cm	0,8	2,10

Bu ölçüm düzeneği ile ölçümler yapıldıktan sonra ters U şeklindeki galvaniz malzeme, kabloların etrafını kapladığında ekranlama etkinliğinin ne kadar yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 4.16).



Şekil 4.16. AG Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

5. TARTIŞMA

AG ve YG kablo kanallarında farklı ekranlama malzemeleriyle kurulan düzenekler ile yapılan ölçümler ve araştırma bulguları incelendiğinde, ekranlamada kullanılan malzemenin ve ekranlama malzemesi ile elektromanyetik dalga kaynağı arasındaki mesafenin ekranlama etkinliğini doğrudan etkilediği sonuçlarına varılmıştır.

Ekranlamada istenilen sonuçların alınması ekranlama etkinliğine bağlıdır ve bu durumda ekranlama malzemesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Kullanılacak olan ekranlama malzemesi amaçlanan frekans aralığına uygun olmalı ve elektromanyetik girişim kaynağına karşı konumuna dikkat edilmelidir.

Yapılan ölçümler neticesinde, manyetik alan ekranlama malzemesi olarak demir levha kullanıldığında en yüksek ekranlama etkinliği değerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Demir levhanın ekranlama etkinliğini teyit etmek amacıyla Akdeniz Üniversitesi Hastanesi A2 trafo binasının yanı sıra Antalya ili Serik ilçe merkezi girişinde bulunan Şehir 1 fideri giriş trafo binasında da AG ve YG kablo kanallarında manyetik alan ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 5.1. Antalya ili Serik ilçesi Şehir 1 Fideri YG Kablo Kanalında Ekransız Ölçüm

YG kablo kanalının üzeri açık iken ölçülen manyetik alan değeri Şekil 5.1’de gösterildiği gibi $20\mu T$ civarında iken, kablo kanalının üzeri demir levha ile kapatıldığında bu değer $7\mu T$ sınırına düşmektedir (Bkz. Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Antalya ili Serik İlçesi Şehir 1 Fideri YG Kablo Kanalında Ekranlı Ölçüm

Aynı trafo binasında AG kablo kanalının üzeri açık iken Şekil 5.3'deki ölçülen manyetik alan değeri $9\mu T$ civarında iken, kablo kanalının üzeri demir levha ile kapatıldığında bu değer Şekil 5.4'te görüldüğü gibi $3\mu T$ sınırına düşmektedir.



Şekil 5.3. Antalya ili Serik İlçesi Şehir 1 Fideri AG Kablo Kanalında Ekransız Ölçüm



Şekil 5.4. Antalya ili Serik İlçesi Şehir 1 Fideri AG Kablo Kanalında Ekranlı Ölçüm

Serik ilçesindeki bu trafo binasında yapılan ölçüm sonuçlarına göre demirin ekranlama etkinliğinin 9-11 dB aralığında olduğu görülmektedir.

Şehir merkezlerinde mevcut durumda bulunan yer altı kablo kanallarının üst bölgelerinde, kaldırımlarda, yakınında trafo merkezleri bulunan oyun parklarında, iş merkezlerinde ve enerji ihtiyacı olan daha birçok yaşamsal alanda yüksek manyetik alanlar oluşabilmektedir. Oluşan bu yüksek manyetik alanların azaltılması ile ilgili basit bir teorik hesap yapılacak olursa, ekranlamanın önemi daha net anlaşılabilir olacaktır. Biot Savart yasasına göre I akımı taşıyan uzun, düz bir telden R uzaklığında bulunan bir P noktasındaki manyetik alan şu şekilde bulunur:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (5.1)$$

Örneğin, şehir şebekesinde 30kV gerilime sahip, ortalama 300 A akım taşıyan 3x(1x240/25) mm² kesitli XLPE kablolu bir yer altı enerji nakil hattı düşünelim. Bu hattın 1 metre uzaklıktaki bir noktada tek bir kablonun oluşturduğu alanı hesaplayacak olursak;

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 300}{2\pi \times 1} = 60 \mu T \quad (5.2)$$

sonucu bulunur. Çizelge 4.4'e göre, demir levha ekran için 1 metredeki ekranlama etkinliği 1,87 dB olarak hesaplanmıştı. Bu şehir şebekesindeki kablo kanalının üzerine düz demir levha ile ekranlama yapılmış olsa, (5.2) denkleminde hesaplanan bu değer

yaklaşık olarak $49\mu\text{T}$ değerlerine düşer, yani elektromanyetik alanda ortalama %19 oranında bir düşüş sağlanır.

Şehir şebekesinin çok küçük bir bölümü için yapılan bu basit hesap, tüm enterkonnekte sistem için düşünüldüğünde, kablo ekranlaması ile elektromanyetik alanda hatırı sayılır bir azaltma sağlanacaktır.

Farklı ekranlama malzemeleri ile yapılan denemeler sonucunda demirin ekranlama etkinliğinin yüksek olduğu ve ekranlamada daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak elektromanyetik girişimi önlemede, ekranlamaya ilişkin bu güne kadar elde edilen teorik sonuçlar, saha uygulamalarında daha çok denenmeli ve doğrulanmalıdır. Elektromanyetik alan şiddetlerinin istenilen değer aralığında tutulabilmesinin yanı sıra, kullanılan ekran malzemesi için maliyet ve performans değerlendirmeleri yapılmalıdır. Ayrıca, bu ekran malzemelerinin yer altında korozyona uğramaması için ilgili diğer bilim dallarından görüşler alınmalıdır.

6. SONUÇ

Çevre ve sağlık bilincinin artmasıyla birlikte, iletim hatlarının etrafında oluşan elektrik ve manyetik alanların canlılar üzerindeki olumsuz etkileri araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında, elektromanyetik alanların sağlık üzerindeki olumsuz etkileri tam olarak kanıtlanamamış olsa da ulaşılan sonuçlar insanları kaygılandırmaya yetmektedir ve bazı ülkelerde elektromanyetik alanlar konusunda güvenlik standartları oluşturulmuştur.

Ülkemizde Türk Standartları Enstitüsü 1996 yılında elektromanyetik alan sınırlamaları konusunda bir adım atmıştır ancak bunun devamı uzun yıllar getirilmemiştir. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği'nde havai hatlara yaklaşma emniyet mesafeleri tanımlanmış ancak manyetik alan etkisinden ve yeraltı enerji hatlarının emniyetinden ise hiç söz edilmemiştir. Günümüzde enerji nakil hatlarının yer altına alınma çalışmaları devam etmekte ve Türkiye'de kurulan elektrik tesisleri EKAT Yönetmeliği'ne göre tesis edilmektedir. Bu yönetmelik yer altı enerji kablolarının elektromanyetik radyasyon etkisini göz önüne alınmadan hazırlandığından, yönetmeliğin yer altı enerji kablolarının döşendiği kablo kanallarının genişlik ve derinlik ölçüleri dışında bir bağlayıcılığı bulunmamaktadır.

Yönetmeliklerdeki bu eksiklik 24.07.2010 tarihli resmi gazetede yayınlanan Çevre ve Orman Bakanlığı'nın yönetmeliği ile giderilmeye çalışılmıştır fakat ülkemizde alan şiddeti için $200\mu\text{T}$ olan sınır değeri, diğer Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında çok da güven vermemektedir.

Sonuç olarak;

- Daha sağlıklı bir yeni nesil ve daha güvenilir elektronik sistemler için elektromanyetik girişimleri kontrol etmeye yönelik çalışmalara önem verilmelidir. Elektromanyetik radyasyon konusunda halk bilinçlendirilmelidir.
- Kabul edilen manyetik alan sınır değerleri gözden geçirilmeli ve son yapılan araştırmaların ışığında, dünya genelinde genel eğilim $0,3-0,4\ \mu\text{T}$ seviyelerinin altına indirilecek şekilde yönetmelikler güncellenmelidir.
- Yerleşim yerlerinin elektromanyetik radyasyon haritaları çıkarılmalı, gerekli görülen yerlerde enerji altyapısı yenilenmelidir.
- Üniversiteler, meslek odaları ve ilgili bakanlıkların desteğiyle sürekli bir ölçüm ve denetleme mekanizması oluşturulmalıdır. Denetlemeler sırasında manyetik alanlarla ilgili periyodik ölçüm raporları istenilmeli ve bu uygulama iş sağlığı ve güvenliği yönetmelikleri ile desteklenmelidir.
- Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği'ne göre yeni projelendirilecek olan havai enerji nakil hatları için, iletkenlerin en büyük salınım durumunda, üzerinden geçtikleri yerlere olan en küçük düşey uzaklıkları bölümü, elektromanyetik alan etkisi de hesaba katılarak yeniden düzenlenmeli ve hatların bir güvenlik koridorundan geçmesi sağlanmalıdır.

- Yeni kurulacak olan tesisler ve enerji nakil hatları projelendirilirken kablo kanallarının ve tavalarının manyetik alan hesapları da yapılmalıdır. Dağıtım şirketleri ve belediyeler tarafından da, bu tesislerin kabul işlemleri sırasında topraklama, tesisat kontrol vb. raporların yanı sıra elektromanyetik alan ölçüm raporları da istenilmelidir. Manyetik alan seviyeleri, güncellenen yönetmeliklerdeki sınır değerlerin altına çekilmeden kabul işlemleri tamamlanmamalıdır.
- Yüksek güçlü binaların bina içi kablo tesisatlarında ekranlama çözümü, binanın tasarımı aşamasında düşünülmeli ve tesisin mimari, elektrik ve statik projeleri ile birlikte projelendirilmelidir.
- Hastane, okul, alışveriş merkezi, ticaret ve iş merkezleri gibi insanların toplu olarak bulunduğu yüksek güç kapasiteli yapılarda bina trafo ve güç dağıtım odalarının ekranlama projeleri yapılmalı ve bu yapılarda manyetik alan kontrolü sağlanmalıdır.
- Ekranlama uygulanacak hatlar için ekran malzemelerinde oluşacak güç kayıplarının analizi, bu alanda yapılabilecek ileri bir çalışma konusu olarak önerilmektedir.

Elektromanyetik alanların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz sonuçlarının yıllar sonra görülebileceği beklenmektedir ve yıllar sonra görülebilecek bu etkilenimi yalnızca elektromanyetik alanlara mal etmek doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Ancak giderek artan elektromanyetik kirliliğin gelecek kuşakları tehdit ettiği bir gerçektir ve korunma önlemlerinin geç olmadan hayata geçirilmesi gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

- ARI, N. ve ÖZEN, Ş. 2008. Elektromanyetik Uyumluluk. Palme Yayıncılık, 224 s, Ankara.
- ARFKEN, G., GRIFFIN, D.F., KELLY, D.C. and PRIEST, J. 1984. University Physics. Academic Press, 332 p, Florida.
- ATMACA, G. 2013 a. Biot-Savart Yasası. <http://www.kuark.org/2013/07/biot-savart-yasasi/> [Son erişim tarihi: 11.08.2014]
- ATMACA, G. 2013 b. Ampere Yasası. <http://www.kuark.org/2013/07/ampere-yasasi/> [Son erişim tarihi: 11.08.2014]
- BALANIS, C.A. 2012. Advanced Engineering Electromagnetics. Wiley, 1008, 1024 p, Canada.
- BANSAL, R. 2006. Fundamentals of Engineering Electromagnetics. Taylor & Francis Group, 390 p, Boca Raton.
- BASCOM, E.C., COOPER, J.H., BANKER, W., PITEO, R., REGAN, A.M. and BOGGS, S.A. 2005. Magnetic Field Management Considerations for Underground Cable Duct Bank. New Orleans.
- BELHADJ, C.A. and EL- FERIK, S. 2009. Electric and Magnetic Fields Estimation for Live Transmission Line Right of Way Workers Using Artificial Neural Network. ISAP'09. 15th International Conference, Intelligent System Applications to Power Systems, 978-1-4244-5097-8: 1-6 pp.
- BLATTENBERGER, K. 1999. Skin Depth (Skin Effect) as a Function of Frequency, Permeability, & Concuctivity. <http://www.rfcafe.com/references/electrical/skin-depth.htm> [Son erişim tarihi: 17.12.2014]
- BODUR, A. ve ÖZŞAR, Ç. 2008. EMC/EMI Gürültü Azaltma ve Korunma, Ekranlama, Topraklama ve PCB Tasarımı. EMO, 216 s, Ankara.
- CENGİZ, S. 2009. Elektromanyetik Girişimden Korunmada Ekranlama Etkinliği ve Elektromanyetik Ekranlama Uygulamaları. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 63 s, Isparta.
- ÇEREZCİ, O., KARTAL, Z., PALA, K. ve TÜRKKAN, A. 2012. Elektromanyetik Alan ve Sağlık Etkileri. Özsan Matbaacılık, 132 s, Bursa.
- DAVIS, J., HUANG, Y., MILLARD, S.G. and BUNGEY, J.H. 2003. Determination of Dielectric Properties of Insitu Concrete at Radar Frequencies. Bam International Symposium, Liverpool, UK.

- DEMİR, A. 2004. Elektromanyetik Alanların İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkisi. Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, 62 s, Elazığ.
- DÜZGÜN, S. 2009. Elektromanyetik Alanların İnsan Sağlığı Üzerindeki Zararlı Etkileri. Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, 135 s, Adana.
- EL DEIN, A.Z. and AMR, A. 2010. Specific Absorption Rate (SAR) Induced in Human Heads of Various Sizes When Using a Mobile Phone. World Congress on Engineering, 5p, London, U.K.
- ELHASOĞLU, D. 2006. Elektromanyetik Kirliliğin Zararlı Etkileri. Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, 122 s, Adana.
- FOSTER, K. and SCHWAN, H. 1996. Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields. CRC Press, pp. 25-101, Florida.
- HABIBALLAH, I.O., FARAG, A.S., DAWOUD, M.M. and FIROZ, A. 1997. Underground Cable Magnetic Field Simulation and Management Using New Design Configurations. Elsevier, pp. 141-148, Saudi Arabia.
- HABIBALLAH, I.O., ABDEL-GALIL, T.K., DAWOUD, M.M., BELHADJ, C.A., ABDUL-MAJEED, M.A. and AL-BETAIRI, T.A. 2006. ELF Electric and Magnetic Fields Exposure Assessment of Live-Line Workers for 132 Kv Transmission Line of SEC. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America, 1-4244-0287-5: 1-6 pp.
- HAMZA, H.A., MAHMOUD, S.A. and GHANIA, S.M. 2002. Environmental Pollution by Magnetic Field Associated With Power Transmission Lines. Energy Conversion and Management, Elsevier, 43: 2443- 2452 pp.
- HELHEL, S., and OZEN, S. 2007. Assessment of Occupational Exposure to Magnetic Fields in High-Voltage Substations (154/34.5 kV). Oxford University Press, Radiation Protection Dosimetry, pp. 1-7
- KOŞALAY, İ. 2008. Enerji İletim Hatlarının Meydana Getirdiği Elektromanyetik Alanlar ve Değerlendirmeler. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008, 10 s, İstanbul.
- LIAO, S.B., DOURMASHKIN, P. and BELCHER, J. 2004. Introduction to Electricity and Magnetism. Pearson Publish.
- MARKOV, M. 1994. Physics and Engineering Approaches Toward Environmental Importance of Electromagnetic Fields. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineerins, Rio de Janeiro, Brazil.
- NAVE, C.R. 2000. Electricity and Magnetism. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/emcon.html#emcon> [Son erişim tarihi: 11.08.2014]

- OSHA Cincinnati Technical Center. 1990. Electromagnetic Radiation and How It Affects Your Instruments. Cincinnati, Ohio.
- OZEN, S., OGEL, E.G. and HELHEL, S. 2013. Residential Area Medium Voltage Power Lines; Public Health, and Electric and Magnetic Field Levels. Gazi University Journal of Science 26(4):573-578.
- ÖGEL, E.G., ÖZEN, Ş. ve HELHEL, S. 2010. Orta Gerilim Enerji Nakil Hatları Çevresindeki Elektrik ve Manyetik Alan Seviyelerinin Halk Sağlığı Bakımından Değerlendirilmesi. Akdeniz Üniversitesi, 5 s, Antalya.
- ÖGEL, E.G. 2012. Enerji Nakil Hatları Çevresinde Oluşan Elektrik ve Manyetik Alanların Yapay Sınır Ağları İle Belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, 85 s, Antalya.
- ÖZEN, Ş. 2007. Yüksek Gerilim Trafo Merkezlerinde Manyetik Alan Seviyeleri ve Mesleki Maruz Kalmanın Değerlendirilmesi. 12. Ulusal Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 5s, Eskişehir.
- ÖZEN, Ş. 2008. Elektromanyetik Uyumluluk ve Girişim. Elektromanyetik Uyumlulukta Topraklama ve Ekranlama Semineri, 63 s, İzmir.
- ÖZEN, Ş., HELHEL, S., KAHYA, G., ÇAKIR, M., ve YALÇIN, S. 2014. Hastane Ortamlarında Manyetik Alan Seviyeleri ve Mesleki Maruz Kalmanın Değerlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, EMANET 2013 Özel Sayısı, 4 s, Denizli.
- RAY, S. 2008. Electrical Power Systems: Concept, Theory and Practice. PHI Learning Limited, 664 p, New Delhi.
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. 2012. Elektrik Elektronik Teknolojisi, Yer Altı Enerji Hatları. 131 s, Ankara.
- TEDAŞ Proje ve Tesis Dairesi Başkanlığı. 2008. Elektrik Dağıtım Şebekeleri Enerji Kabloları Montaj (Uygulama) Usul ve Esasları. 34 s, Ankara.
- TÜRK STANDARDI TS 621. 2008. Kablo (Genel Esaslar). 17 s, Ankara.
- TÜRKİSTANİ, M ve BAYKAL, Y. 2012. Kentsel Dönüşüm Şehirlerin Yapılandırılması Sempozyumu Tebliğler, 14s, İstanbul.
- URL 1: Eddy Current Technology Incorporated. 2013. Conductivity of Metals Sorted by Resistivity. <http://eddy-current.com/conductivity-of-metals-sorted-by-resistivity/> [Son erişim tarihi: 17.12.2014]
- URL 2: The Clemson University Vehicular Electronics Laboratory. EMC Information. http://www.cvel.clemson.edu/emc/calculators/SE_Calculator/nearfieldSE.html [Son erişim tarihi: 10.01.2015]

ÖZGEÇMİŞ



Niyazi İL 1983 yılında Adana’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla 23 Nisan İlköğretim Okulu, Karşıyaka İlköğretim Okulu ve Enver Kurttepelı Lisesinde tamamladı. 2002 yılında başladığı Çukurova Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü lisans öğrenimini 2007 yılında tamamladı. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında tezli yüksek lisans öğrenimine 2009 yılında başladı. Halen Elektrik Mühendisleri Odası Antalya Şubesi’nde Teknik Müdür olarak çalışmaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır.