İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROMANYETİK DARBELERDEN KORUNMA

Anabilim Dalı: DAP - Disiplinlerarası Programlar
Programı: Savunma Teknolojileri

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Müh. Fatih IŞIK

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROMANYETİK DARBELERDEN KORUNMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Müh. Fatih IŞIK
(514021101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ
Diğer Jüri Üyeleri: Doç.Dr. Cevdet IŞIK
Doç.Dr. Nurettin UMURKAN (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Yıllardır bu tezin bitmesini isteyen, İTÜ'deki hayatımın sebebi, hayatın gerçeklerini her zaman en açık biçimde önüme koyan, canımdan çok sevdiğim babam Mimar Abdurrahim Işık'a ve beni benden çok seven annem Fikriye Işık'a teşekkür ederim. Ayrıca, en zor anlarımda desteğini hiç bir zaman esirgemeyen, bana katlanan ve sürekli moral vererek bu tezin bitmesinde en büyük etken olan sevgili eşim Elif Işık'a; yoğun zaman diliminde bana zaman ayırma inceliğini göstererek bu çalışmanın kısa sürede bu duruma gelmesinde yardımlarını, bilgi birikimini ve yol göstericiliğini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Özcan Kalenderli'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2008 Fatih Işık

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
ÖZET **x**
SUMMARY **xi**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Amaç 1
1.2. Problem 1
1.3. Kapsam 2

2. ELEKTROMANYETİK ALAN TANIMLARI **4**
2.1. Elektrik Alan 4
2.2. Manyetik Alan 7
2.3. Elektromanyetik Dalga 9
2.3.1. Maxwell Denklemleri 10
2.3.2. Elektromanyetik Dalga Yayılımı 11
2.3.3. Frekans ve Dalga Boyu 12
2.3.4. Elektromanyetik Spektrum 13

3. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM **15**
3.1. Elektromanyetik Girişim Etkileri 15
3.2. Elektromanyetik Girişim Kaynakları 17
3.2.1. Yıldırım 17
3.2.2. Dünya'nın Manyetik Alanı 21
3.2.3. Kozmik ve Güneş Kaynakları 21
3.2.4. Elektrostatik Boşalmalar (ESD) 21
3.2.5. Elektromanyetik Darbe (EMP) 22

4. ELEKTROMANYETİK DARBE ÜRETEÇLERİ **33**
4.1. Patlayıcı Biçimde Pompalanmış Akı Pompalama Üreteçleri (FCG) 34
4.2. Virtuel Katot Osilatörleri (Vircator) 37
4.3. Patlayıcı ya da İtişli Yönlendirilen Magneto Hidrodinamik Üreteçler(MHD) 40

5. ELEKTROMANYETİK DARBELERDEN KORUNMA **42**
5.1. Genel Savunma Sisteminde EMP Kavramı 43
5.1.1. Alçak İrtifada NEMP 43
5.1.2. Yüksek İrtifada NEMP 44
5.2. EMP'den Korunma İçin Temel Teknik Adımlar 46

5.2.1. Direkt Etkilere Karşı Korunma 47
5.2.2. Dolaylı Etkilere Karşı Korunma 48
5.3. EMP Dayanıklılık Testleri 49

6. ELEKTROMANYETİK DARBELERDEN KORUNMA TEKNİKLERİ 52
6.1. Ekranlama 55
6.1.1. Manyetik Alan Ekranlama 57
6.1.2. Elektrik Alan Ekranlama 57
6.1.3. Kablolarda Ekranlama Etkinliği 59
6.2. Topraklama 64
6.3. Kablo ve Bağlayıcılar 66
6.4. Filtre ve Koruyucu Devreler 71
6.4.1. Elektronik Filtreler 71
6.4.2. Ferrit Filtreler 74

7. BENZETİM 76
7.1. HFSS Programı Hakkında Genel Bilgi 76
7.2. Benzetim Sonuçları 79

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 100

KAYNAKLAR 102

ÖZGEÇMİŞ 105

KISALTMALAR

EMP	: Elektromanyetik Darbe (Electromagnetic Pulse)
EMI	: Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference)
NEMP	: Nükleer Elektromanyetik Darbe (Nuclear Electromagnetic Pulse)
ESD	: Elektrostatik Boşalmalar (Electrostatic Discharge)
EM	: Elektromanyetik (Electromagnetic)
HFSS	: Yüksek Frekanslı Yapı Simülatörü (High Frequency Structure Simulator)

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1	Elektromanyetik Büyüklükler……	10
Tablo 2.2	Elektromanyetik Spektrum……	12
Tablo 2.3	Mikrodalga Frekans Bantları..……	12
Tablo 2.4	Birimler……	13
Tablo 3.1	NEMP Karakteristik Özellikleri……	26
Tablo 4.1	Deney Üreteci Performansı……	40
Tablo 5.1	Düşük İrtifada NEMP'den Korunma……	43
Tablo 5.2	Yüksek İrtifada NEMP'den Korunma……	44
Tablo 6.1	Kontrol Sistemi……	61
Tablo 6.2	Kontrol Sistemi Ekranlama Etkinliği……	62
Tablo 7.1	Farklı Şekillerdeki Yapılarda EM Dağılım Tablosu……	78
Tablo 7.2	Farklı Malzemelerle Kaplanmış Küpün EM Dağılım Tablosu……	82
Tablo 7.3	Farklı Kalınlıkta Kaplanmış Küpün EM Dağılım Tablosu……	83
Tablo 7.4	Küpün Yüzeylerine Yerleştirilmiş Bir Pencerenin EM Dağılım Tablosu……	85
Tablo 7.5	Küpün Yüzeylerine Yerleştirilmiş Çok Sayıda Pencerenin EM Dağılım Tablosu……	89
Tablo 7.6	Farklı Boyutlarda Aynı Cismin EM Dağılım Tablosu……	93
Tablo 7.7	Kompleks Bir Cismin Farklı Frekanslarda EM Dağılım Tablosu…	95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Pozitif Bir Yükün Elektrik Alan Vektörleri ve Çizgileri…….. 5
Şekil 2.2 : Eşit Büyüklükte Zıt İşaretli İki Yükün Elektrik Alan Çizgileri… 5
Şekil 2.3 : Eşit Büyüklükte İki Pozitif Yükün Elektrik Alan Çizgileri…….. 5
Şekil 2.4 : Eşit Olmayan Yüklerin Oluşturduğu Elektrik Alan Çizgileri…... 5
Şekil 2.5 : Elektrik Alan İçinde Artı ve Eksi Yüklere Etkiyen Kuvvet……. 6
Şekil 2.6 : Statik Elektrik Alan Çizgileri...……. 7
Şekil 2.7 : Üzerinden Akım Geçen Telin Pusulaya Etkisi…….……. 7
Şekil 2.8 : Manyetik Kuvvet……...…… 8
Şekil 2.9 : Dünyanın Manyetik Alan Çizgileri……...…… 8
Şekil 2.10 : Elektromanyetik Dalga Yayılımı…….…… 10
Şekil 3.1 : Yıldırım Akım Zaman Grafiği……... 16
Şekil 3.2 : Yıldırım EMP Elektrik Alan Grafikleri …… 17
Şekil 3.3 : NEMP Sonucu Oluşan Gamma Işıması…..……...……... 24
Şekil 3.4 : NEMP Oluşum Geometrisi……....……...……... 25
Şekil 3.5 : EMP Dalga Şekli……...……...……...…… 27
Şekil 3.6 : NEMP ve Yıldırım Dalga Şekli…… 29
Şekil 3.7 : NEMP Etki Alanı…….. 30
Şekil 3.8 : EMP Çalışmalarında Kullanılan Deney Darbesinin Şekli…… 30
Şekil 4.1 : EMP Üretecinin Uçakla Hedefe Atılması..……...…… 32
Şekil 4.2 : FCG Üretecinin Füzeye Yerleştirilmesi…….……...…… 34
Şekil 4.3 : FCG Çalışma İlkesi……...….... 35
Şekil 4.4 : Üreteç Çıkış Akım ve Akı Gelişim Grafiği…….. 35
Şekil 4.5 : Virkatör……. 36
Şekil 4.6 : Eksenel Virkatör Deney Kurulumu…….. 37
Şekil 4.7 : Tipik Dalga Şekilleri…… 37
Şekil 4.8 : Mikrodalga Frekans Değeri…….. 38
Şekil 4.9 : MHD'nin Manyetik Alanda İletken Akışkan Davranışı İlkesi…. 39
Şekil 4.10 : MHD Çalışma İlkesi…… 39
Şekil 5.1 : EMP Karşılaştırılması…….……... 41
Şekil 5.2 : İtalya CISAM EMP Simülatörü……..…….. 49
Şekil 5.3 : ABD EMPRESS 1 EMP Simülatörü……. 50
Şekil 6.1 : EMP'den Korunma Şematik Diyagramı…… 52
Şekil 6.2 : Faraday Kafesi……... 53
Şekil 6.3 : Ekranlamanın İletim Hattı Modeli……. 54
Şekil 6.4 : Ekranlama Ölçümü……...……. 55
Şekil 6.5 : Elektrik ve Manyetik Dipoller İçin Ekranlama Etkinliğinin Karşılaştırması……... 56
Şekil 6.6 : Delik ve Yarıklar İçin Frekansla Ekranlama Etkinliği Değişimi.. 57
Şekil 6.7 : Açıklık Ekranlama Örneği…….……..……..58
Şekil 6.8 : İletim Hatlarının Ekranlama Etkinliği……...……...……... 58
Şekil 6.9 : Test Modeli……...……...…….. 59

Şekil 6.10 : Kontrolör Giriş ve Çıkış Kapıları (I/O Portları)..... 59
Şekil 6.11 : HEMP ve Manyetik Alan Darbe Simülatörleri..... 60
Şekil 6.12 : Simülatörlerin Dalga Şekilleri..... 60
Şekil 6.13 : EMP Simülatöründe İndüklenen Gerilim..... 61
Şekil 6.14 : Korunmamış Kontrol Sisteminin Etkilendiği Elektrik Alan..... 62
Şekil 6.15 : Topraklama Ortak ve Farksal Mod Akımları..... 64
Şekil 6.16 : Topraklamada Yıldırım Etkisi..... 64
Şekil 6.17 : Tek ve Çift Ekranlı Kablolar..... 66
Şekil 6.18 : Kablo Ekranlaması ve Ekran Kesim Frekansı..... 67
Şekil 6.19 : Kablolarda Toprak Bağlantı Özellikleri..... 67
Şekil 6.20 : Elektriksel Ekranlama Açısından Eşdeğer Kanallar..... 68
Şekil 6.21 : Enerji ve İşaret Kablolarının Kanal İçinde Yerleşimi..... 69
Şekil 6.22 : Enerji ve İşaret Kablolarının Aynı Kanal İçinde Yerleşimi..... 69
Şekil 6.23 : Temel Filtreler ve Frekans Karakteristikleri..... 70
Şekil 6.24 : Temel Devre Elemanları ve Frekans Karakteristikleri..... 71
Şekil 6.25 : Ferrit Bilezik Filtre Eşdeğeri..... 73
Şekil 7.1 : Analitik Modele Dayalı Yaklaşım..... 74
Şekil 7.2 : Sayısal Modele Dayalı Yaklaşım..... 75
Şekil 7.3 : EM Analizlerinde Kullanılan Yöntemler..... 75
Şekil 7.4 : RF Yükselticisi Çıkış Rezonatöründe EM Dağılımı..... 76
Şekil 7.5 : Küpün 0,5 GHz'de EM Dağılımı..... 78
Şekil 7.6 : Küpün 1 GHz'de EM Dağılımı..... 78
Şekil 7.7 : Küpün 2 GHz'de EM Dağılımı..... 79
Şekil 7.8 : Dikdörtgenler Prizmasının 0,5 GHz'de EM Dağılımı..... 79
Şekil 7.9 : Dikdörtgenler Prizmasının 1 GHz'de EM Dağılımı..... 79
Şekil 7.10 : Dikdörtgenler Prizmasının 2 GHz'de EM Dağılımı..... 80
Şekil 7.11 : Kürenin 0,5 GHz'de EM Dağılımı..... 80
Şekil 7.12 : Kürenin 1 GHz'de EM Dağılımı..... 80
Şekil 7.13 : Kürenin 2 GHz'de EM Dağılımı..... 81
Şekil 7.14 : Silindirin 0,5 GHz'de EM Dağılımı..... 81
Şekil 7.15 : Silindirin 1 GHz'de EM Dağılımı..... 81
Şekil 7.16 : Silindirin 2 GHz'de EM Dağılımı..... 82
Şekil 7.17 : Polyamid ile Kaplanmış Küpün 0,5 GHZ'de EM Dağılımı..... 82
Şekil 7.18 : Paladium ile Kaplanmış Küpün 0,5 GHZ'de EM Dağılımı..... 83
Şekil 7.19 : Bakır ile Kaplanmış Küpün 0,5 GHZ'de EM Dağılımı..... 83
Şekil 7.20 : 1 cm Polyamid ile Kaplanmış Küpün EM Dağılımı..... 84
Şekil 7.21 : 2 cm Polyamid ile Kaplanmış Küpün EM Dağılımı..... 84
Şekil 7.22 : 3 cm Polyamid ile Kaplanmış Küpün EM Dağılımı..... 84
Şekil 7.23 : Kare Pencere Önde 85
Şekil 7.24 : Yuvarlak Pencere Önde..... 86
Şekil 7.25 : Kare Pencere Arkada..... 86
Şekil 7.26 : Yuvarlak Pencere Arkada..... 86
Şekil 7.27 : Kare Pencere Sağda..... 87
Şekil 7.28 : Yuvarlak Pencere Solda..... 87
Şekil 7.29 : Yuvarlak Pencere Üstte..... 87
Şekil 7.30 : Kare Pencere Altta..... 88
Şekil 7.31 : Yuvarlak Pencere Altta..... 88
Şekil 7.32 : Kare Pencereler Önde..... 89
Şekil 7.33 : Yuvarlak Pencereler Önde..... 90
Şekil 7.34 : Kare Pencereler Arkada..... 90

Şekil 7.35 : Yuvarlak Pencereler Arkada……..…..…… 90
Şekil 7.36 : Kare Pencereler Sağda……..…..…… 91
Şekil 7.37 : Yuvarlak Pencereler Sağda..……..…..……. 91
Şekil 7.38 : Kare Pencereler Solda…….....…..……..……. 91
Şekil 7.39 : Yuvarlak Pencereler Solda……...…....…..……. 92
Şekil 7.40 : Kare Pencereler Üstte……..…..…… 92
Şekil 7.41 : Yuvarlak Pencereler Üstte..……..…..…..……. 92
Şekil 7.42 : Kare Pencereler Altta……..…..…… 93
Şekil 7.43 : Yuvarlak Pencereler Altta...……..…..……. 93
Şekil 7.44 : 50 cm x 50 cm x 50 cm Boyutunda Küp..……..…..……. 94
Şekil 7.45 : 30 cm x 30 cm x 30 cm Boyutunda Küp..……..…..……. 94
Şekil 7.46 : 10 cm x 10 cm x 10 cm Boyutunda Küp..……..…..……. 94
Şekil 7.47 : Kaplanmamış Yarıklı Cisimde 0,5 GHz'de EM Dağılımı...…… 95
Şekil 7.48 : Kaplanmamış Yarıklı Cisimde 1 GHz'de EM Dağılımı…...…… 95
Şekil 7.49 : Kaplanmamış Yarıklı Cisimde 2 GHz'de EM Dağılımı.....…… 96
Şekil 7.50 : Polyamid Kaplanmış Yarıklı Cisimde 0,5 GHz'de EM Dağılımı 96
Şekil 7.51 : Polyamid Kaplanmış Yarıklı Cisimde 1 GHz'de EM Dağılımı... 96
Şekil 7.52 : Polyamid Kaplanmış Yarıklı Cisimde 2 GHz'de EM Dağılımı... 97

ELEKTROMANYETİK DARBELERDEN KORUNMA

ÖZET

Bu çalışmada, teknolojinin ilerlemesi ile birlikte insanlık tarafından çeşitli amaçlar için kullanılan elektrik-elektronik elemanların, devrelerin ve sistemlerin, elektromanyetik darbelerden (EMP) korunma yöntemleri incelenmiştir.

Elektrik alan, manyetik alan ve elektromanyetiğin temeli olan Maxwell denklemleri incelenerek konu ile ilgili çıkarımlarda bulunulmuştur. EMP'den korunmanın en iyi biçimde anlaşılması için temel kuram ve bilgilerin çok iyi kavranması gerekmektedir.

EMP tanımı yapılarak elektromanyetik spektrumdaki yeri belirtilmiş ve temel kavramlardan söz edilmiştir. Doğal yollarla oluşan ya da yapay yollarla üretilen EMP dalga şekilleri incelenerek çıkarımlarda bulunulmuştur.

EMP'nin hangi amaçlarla ve hangi yöntemlerle elde edildiği bilimsel anlamda incelenmiştir. EMP üreteçleri konusunda bilgiler sunulmuştur. Ülkelerin savunma sistemlerinde bir savaş aracı olarak kullanmaya başladığı darbe etkisi ayrıntılı olarak incelenerek, hedef üzerinde amaçlanan zararlar etraflıca tartışılmıştır.

Son bölümde tanımı, üretim amaçları, üretim yöntemleri belirlenen EMP'nin sistemlere ve elektronik devrelere verebileceği zararları en aza indirmek için var olan korunma yöntemleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Ülkelerin savunma stratejileri teknolojik gelişmelere paralel olarak değişmektedir. Bu değişim sırasında, elektromanyetik enerji kullanımı konusunda baş döndürücü gelişmeler yaşanmaktadır. Bu gelişmeler alınması gereken önlemlerin farklılaşması anlamına gelmektedir. Bu çalışmanın amacı, EMP'nin savunma ve savaş stratejileri içinde yer alması için yapılan çalışmalar hakkında bilgi vermek ve bu tehdide karşı elektrik-elektronik devrelerde ve sistemlerde alınması gereken korunma önlemleri konusunda yeni yaklaşımlarda bulunmak olmuştur.

PROTECTION AGAINST ELECTROMAGNETIC PULSES

SUMMARY

In this study, the methods of protection against electromagnetic pulses (EMP) of electric, electronic equipments, circuits and systems will be examined which are used for many different purposes by humanity.

Inferences will be suggested concerned with the subject that examines the Maxwell equations, which are the fundamentals of electric field, magnetic field, and electromagnetic field. Basic theories and knowledge should be grasped very well in order to understand protection against EMP clearly.

The position of EMP in the electromagnetic spectrum will be determined making EMP's definition and basic concepts will be explained. EMP wave types that occur via the natural or artificial ways will be examined and inferences will be suggested.

EMP will be researched for what reasons and in which methods as scientific mean will be given information concerning EMP generators. By studying on the impact effect that was begun to use at states defense systems, the damages aimed on target detailed discussed.

In the last part, the protection methods available to decrease damages could be caused to electronic equipments, circuits and systems to minimum level, the definition, production goods and manufacturing ways of EMP shall be researched.

Defense strategies of the countries are changed with parallel to technological developments. In this period, incredible developments are obtained about the use of electromagnetic energy. These developments mean that protection precautions that must be taken are changed. The purpose of this study is to give information about the studies that include EMP's contribution to the defense and war strategies and to suggest new approaches about protection precautions that must be taken in electric and electronic circuits and systems against this threat.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç

Bu tezin amacı, doğal yollardan oluşan ya da üreteçler ile oluşturulan EMP'den çeşitli elektrik-elektronik elemanların, devrelerin ve sistemlerin korunma yöntemlerinin incelenmesidir. Bu çalışmada, EMP üreteçleri ve etkileri incelenerek, ülke savunma sistemi üzerinde oluşturduğu tehdidin en aza indirgenmesi için alınması gereken önlemlerden söz edilecektir.

1.2 Problem

Bilim ve teknolojideki ilerlemeler, insanların yaşamını her alanda büyük ölçüde kolaylaştırmıştır. Bu değişim süreci sonucunda savaş teknolojilerinde de büyük değişimler ortaya çıkmıştır. Orduların savaşları kazanmasında ya da üzerine gelen tehditleri yok etmesinde en önemli etken insan sayısı iken, artık orduların sahip olduğu teknolojik silahlar ve bu silahlara karşı korunma yöntemleri çok daha önemli bir hal almıştır.

19. yy sonlarında Maxwell tarafından bulunan ve Maxwell denklemleri olarak bilinen denklemlerle elektromanyetizmanın temelleri atılmıştır. Bilimin bu alandaki ilerlemesi ise oldukça hızlı olmuştur.

İlk olarak 20. yy ortalarında yüksek irtifada yapılan nükleer silahların denenmesi sırasında EMP etkisi gözlemlenmiştir. Nükleer silahların patlaması ile çok güçlü bir elektromanyetik alan oluşmaktadır. Elektromanyetik alan, binlerce voltluk kısa süreli yüksek darbe gerilimleri üretmektedir. Aslında bu etki insanlık tarihi boyunca bir doğa olayı olarak bilinen yıldırım etkisi ile büyük ölçüde aynıdır.

Bilimdeki gelişmeler sonucunda, insanların yaşamının her alanına giren elektrik ve elektronik sistemler doğal yollarla ya da üreteçler ile ortaya çıkan EMP etkisi ile kalıcı ya da geçici zararlar görebilmektedir. Fark edilen bu etki ile insanlık EMP etkisini çeşitli yollarla kendi amaçları doğrultusunda kullanmak için üretme yollarına

gitmişlerdir. Kendi sistemlerinin güvenliğini deneme ve sınama, deneysel amaçlar gibi masum nedenlerin yanında savaş teknolojilerinde de EMP üreteçlerini kullanma çalışmaları vardır. Bir savaş uçağını havada iken düşürme, ülkelerin haberleşme sistemlerini çökertme gibi düşmana karşı üstünlük sağlama ve savuşturma amacı da EMP'yi kontrollü olarak üretmek için çok önemli nedenlerdendir.

EMP üreteçlerinin ayrıntılı olarak incelenmesi ve EMP darbe biçiminin tanımlanması, korunması gereken elektronik sistemlerin ve devrelerinin nasıl korunacağını bilmek açısından oldukça önemlidir. Ülke savunma sisteminde EMP etkilerine karşı önem derecesine göre sistemlerimizin korunma düzeylerinin belirlenmesi ve önem derecesine göre korunma katsayısının arttırılması oldukça önemlidir. Bu tezde bilimin savaş teknolojilerinde vardığı noktalardan biri olan EMP üreteçlerine karşı elektronik sistemlerin korunma problemlerine çözümler incelenmiştir.

1.3 Kapsam

Bu çalışmada birinci bölümde, tezin amacı, problemin tanımı ve bölümlerin kapsamı hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, elektromanyetizmanın temel kavramları üzerinde durulmuştur. Ayrıca, elektromanyetik spektrum hakkında bilgiler verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, elektromanyetik girişim (EMI) tanımı yapılmıştır. EMI etkilerinden ve sistemler üzerinde deneyim kazanılan problemlerden söz edilmiştir. Ayrıca, EMI kaynakları anlatılmıştır. EMI kaynaklarından olan EMP tanımı yapılmış ve ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, EMP üreteçleri hakkında bilgiler verilmiştir. EMP üreteçlerinin çeşitleri ve üreteçler kullanılarak yapılan çalışmaların sonuçlarından söz edilmiştir.

Beşinci bölümde, EMP'den korunma yönetimsel anlamda irdelenmiştir. Korunması gereken bölgeler ya da donanımlar genel savunma politikaları içinde ve ülkelerin en yetkili kurumlarınca ele alınarak, tehdidin savuşturulması ya da EMP etkilerinin en aza indirgenmesi için alınması gereken öncelikler hakkında yaklaşımlarda bulunulmuştur. Ayrıca, EMP test düzeneklerinden ve amaçlarından söz edilmiştir.

Tezin altıncı bölümünde, EMP ve nükleer elektromanyetik darbelerinin (NEMP) savunma sistemleri üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek veya yok etmek için korunma tekniklerinden söz edilmiştir. Etki altında kalınabilecek darbe etkisi karşısında alınması gerekli olan önlemler ekranlama ve topraklama, kablo ve bağlayıcılar, filtreler ve tasarım ilkeleri konu başlıkları altında incelenmiştir.

Tezin yedinci bölümünde, yüksek frekansta, yapıların dışından kaynaklanan elektromanyetik alanların yapılar içinde oluşturacakları elektromanyetik (EM) alan dağılımları, Yüksek Frekanslı Yapı Simülatörü (HFSS) adlı, sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapan bir bilgisayar programı ile incelenmiştir. Bilgisayar benzetimlerinde, farklı yapılar ve frekanslar için elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve yapıların tasarımının EMP'ye karşı dayanıklılığın arttırılması için oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır.

Tezin sekizinci ve son bölümü olan sonuç kısmında, ülke savunma sistemlerinin EMP'ye karşı analiz edilerek önem derecesine göre sınıflandırılması ve bu sınıflandırmaya göre korunmalarının sağlanmasının ya da dayanıklılıkların arttırılmasının ülke savunma stratejisi açısından oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır. Yapılacak benzetimler ile hayati öneme sahip elektrik-elektronik elemanların, devreler ve sistemlerin, gövdesini, kasasını, kutusunu oluşturan yapıların tasarımda yapı geometrisi, yapı üzerindeki açıklıklar ve açıklıkların boyutu gibi etkenlerin kontrolü sağlanarak EMP'ye karşı dayanıklı hale getirilebileceği belirtilmiştir.

2. ELEKTROMANYETİK ALAN TANIMLARI

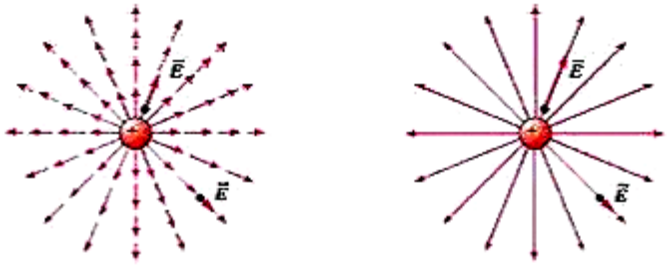
Elektrik ve manyetik alanlarla ilgilenmekte olan alan kuramı, akım ve gerilim tanımları ile ilgilenmekte olan devre kuramı elektrik mühendisliği disiplininin temel iki kuramıdır. Bu iki temel kuram ile elektrik mühendisliğinin tüm konuları yakından ilgilidir. Birbirinden bağımsız olmayan bu iki kuram değişkenlerini birbiri cinsinden tanımlamak zor değildir. Herhangi bir elektrik problemi hem alan kuramı hem de devre kuramı ile çözülebilir [1].

Elektromanyetik uyumluluk (EMC), elektromanyetik girişim (EMI), elektromanyetik darbe (EMP), elektromanyetik radyasyon gibi günümüz elektrik, elektronik sistemlerin sonucu olarak ortaya çıkan etkileri daha iyi anlayabilmek için elektromanyetik tanımların bilinmesi gerekmektedir.

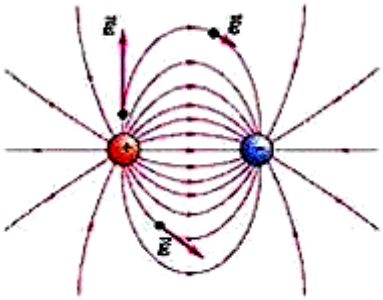
2.1 Elektrik Alan

Elektrikli bir cismin çevresindeki bölgeye elektrik alan adı verilir. Alanın varlığı, herhangi bir noktaya getirilen elektrikli bir cisme etki eden kuvvet yardımıyla anlaşılabilir [2].

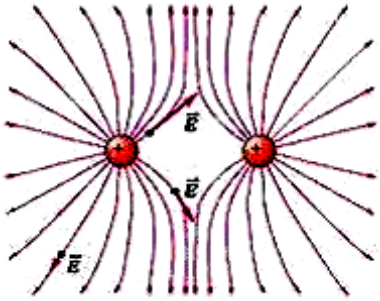
Elektrik alanı açıklamanın iki yolu vardır. Birincisi, uzayın her noktasına, o noktadaki pozitif birim yüke etki edecek olan elektrik kuvvetini, büyüklük ve yönce temsil eden bir vektörün, o noktadan başlayacak şekilde yerleştirilmesidir. İkinci yöntem ise, test yükünün herhangi bir noktada serbest bırakılması halinde izleyeceği yolun çizilmesidir. Şekil 2.1'de, pozitif bir yükün elektrik alanı, vektör ve çizgi yöntemleriyle gösterilmiştir. Şeklin birinci kısmında, herhangi bir noktadaki elektrik alan, yön ve büyüklükçe, o noktadan başlayan vektör tarafından temsil edilmektedir. İkinci kısmında ise, herhangi bir noktadaki elektrik alanının yönü, o noktadan geçen alan çizgisine teğet iken, büyüklüğü, nokta civarındaki alan çizgilerinin sıklığıyla doğru orantılıdır. Eşit büyüklükteki zıt işaretli iki yükten oluşan bir elektrik dipolünün yol açtığı elektrik alan çizgileri ise Şekil 2.2'de verilmiştir. Şekil 2.3'te, büyüklüğü eşit iki pozitif yükün elektrik alan çizgileri gösterilmiştir [3].



Şekil 2.1: Pozitif Bir Yükün Elektrik Alan Vektörleri ve Çizgileri [3]

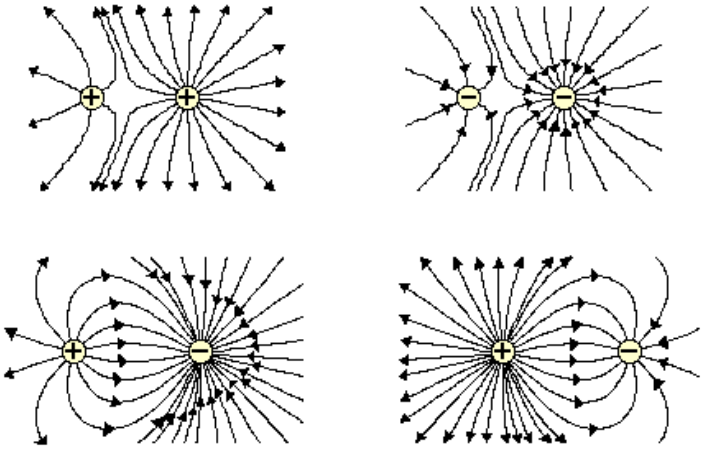


Şekil 2.2: Eşit Büyüklükte Zıt İşaretli İki Yükün Elektrik Alan Çizgileri [3]



Şekil 2.3: Eşit Büyüklükte İki Pozitif Yükün Elektrik Alan Çizgileri [3]

Elektrik alan içinde eşit olmayan yüklerin durumu Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



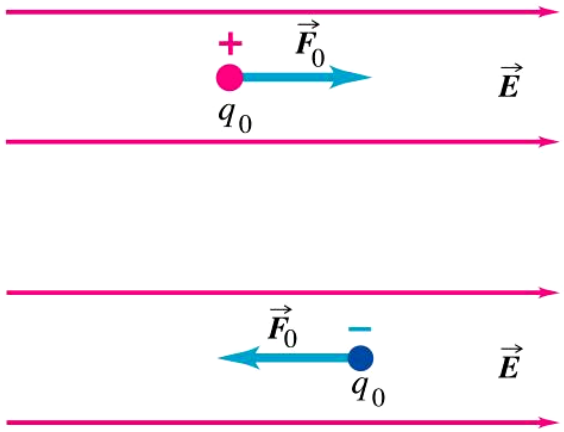
Şekil 2.4: Eşit Olmayan Yüklerin Oluşturduğu Elektrik Alan Çizgileri [3]

Elektrik alan içinde bulunan, boyut ve değerce alanı bozmayacak küçüklükte olduğu düşünülen q yüküne etki eden kuvvet denklemi, denklem (2.1)'de verilmiştir. Kuvvet q yükü ve yükün konumu ile doğru orantılıdır.

$$F = q \times E \tag{2.1}$$

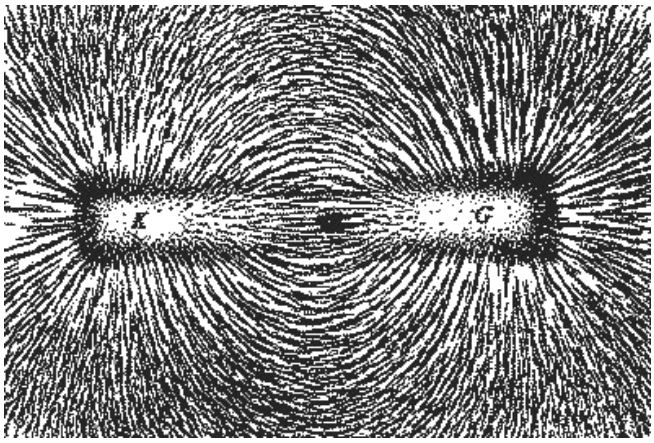
Denklem (2.1)'de E ile gösterilen büyüklük, yükün yerine göre değişmektedir. Elektrik alanını belirtilen büyüklüğe alan şiddeti de denir. q = +1 C için alan şiddeti değerce kuvvete eşit olacağından alan şiddeti herhangi bir noktada pozitif birim yüke etki eden kuvvetle aynıdır. Alan şiddetinin MKSA birimi N/C'dir. 1 N = 1 J/m ve 1 J = 1 CV olduğundan elektrik alan şiddetinin birimi V/m olur.

Elektrik alan için de (+) ve (–) yüklere etkiyen kuvvet Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Eğer q yükü pozitif ise E (elektrik alan) ve F (kuvvet) aynı yönlüdür. Diğer durum olan q yükü negatif ise E (elektrik alan) ve F (kuvvet) zıt yönlüdür [4].



Şekil 2.5: Elektrik Alan İçinde Artı ve Eksi Yüklere Etkiyen Kuvvet [4]

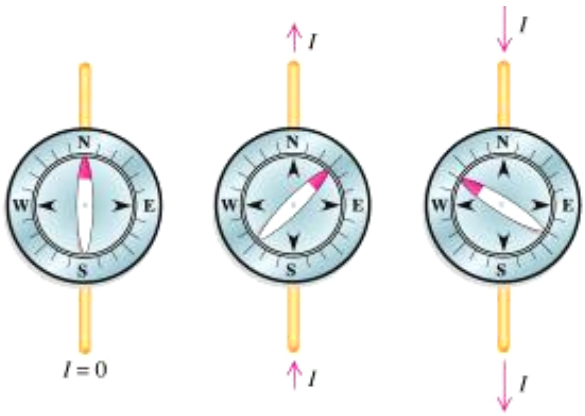
Elektrik alanı zamana bağlı olup olmamasına göre, statik ve dinamik alan olarak adlandırılır. Hiçbir fiziksel büyüklüğün sonsuza kadar durağan kalması düşünülemez. Zaman değişimi küçük ise o fiziksel büyüklüğün statik yani durağan olduğu söylenir. Statik elektrik alanı içeren bir uzay bölgesine sürekli olarak, minik test yükleri taşıyan tozlar püskürtüldüğünde, tozlar üzerinde bulundukları elektrik alan çizgileri boyunca hareket ederek, Şekil 2.6'daki gözle görülebilen çizgileri oluşturur [3].



Şekil 2.6: Statik Elektrik Alan Çizgileri [3]

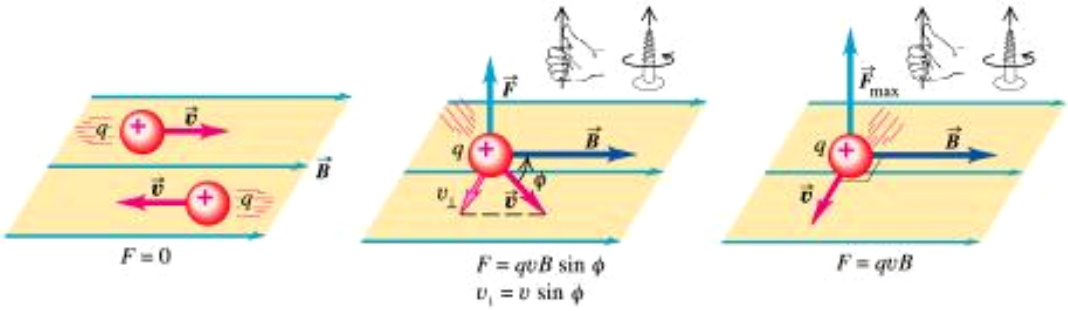
2.2 Manyetik Alan

Hareket halindeki bir elektrik yükü, etrafındaki uzayda bir manyetik alan oluşturur. Elektrik akımları ile manyetik alan arasındaki ilişki ile ilgili olarak ilk gözlemler Oersted tarafından 1820 yılında yapılmıştır. Rastlantıyla yapılan bu keşif, aslında bilim için oldukça önemliydi. Bir telden akım geçtiğinde yakındaki bir pusulanın iğnesinin yönü de değişiyordu. Teldeki akım pusula iğnesini çeker ya da iter gibi görünmüyordu; bunun yerine iğne tele hep dik konuma geliyordu. Şekil 2.7'de içinden akım geçen bir telin altında pusulanın iğnesinin tele dik olacak biçimde hareket ettiği gösterilmiştir [5].



Şekil 2.7: İçinden Akım Geçen Telin Pusulaya Etkisi [6]

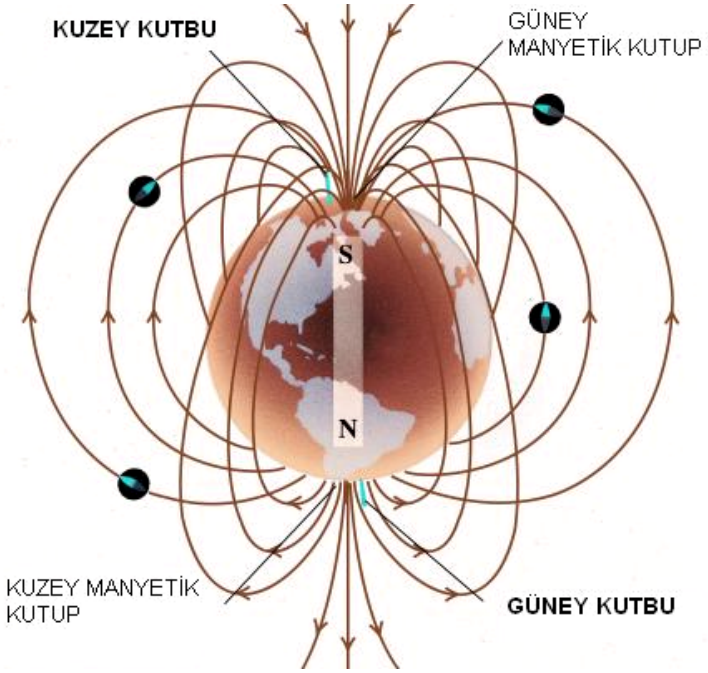
Manyetik alan doğrudan kuvveti vermez. Çünkü manyetik kuvvet, manyetik alan şiddetiyle yükün ve manyetik alan vektörüne dik olan hız bileşeninin çarpımına eşittir ($\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$). Bir manyetik alan içerisinde hareket eden yüklere bir kuvvet etki eder [3].



Şekil 2.8: Manyetik Kuvvet [6]

Dünya'nın manyetik kutupları, kuzey ve güney kutbu olarak adlandırılan coğrafi kutuplarla tam olarak aynı yerde değildir. Gerçekte manyetik kutuplar çok yavaş da olsa yer değiştirmektedir.

Dünya'nın manyetik alanının manyetik akı çizgileri manyetik kutuplar arasında eğriler çizer. Bu çizgiler Dünya'nın yüzeyini izlemez; yeryüzüne değişik açılarla girip çıkarlar. Bu açıya batma açısı denir. Dünya'nın manyetik alanının manyetik akı çizgileri Şekil 2.9'da gösterilmiştir [5].



Şekil 2.9: Dünya'nın Manyetik Alan Çizgileri [6]

2.3 Elektromanyetik Dalga

Daha önceki bölümlerde elektrik alan ve manyetik alan kavramları tanımlanmıştır. Aslında elektrik ve manyetik alanları, birbirinden ayırmak doğru değildir. Aynı ve

tek bir EM alanın iki farklı belirtisidir. Hareketli yükler zamanla değişiyorsa hem elektrik hem de manyetik alan oluşur. Buna elektromanyetik alan adı verilir [1].

Dalga şeklinde yayıldığı için elektromanyetik dalga da denilen elektromanyetik alanın oluşum biçimini şu şekilde açıklayabiliriz. Halka şeklindeki bir iletkenin içinden değişken I akımının geçtiğini düşünelim. Bu akım halka biçimli bir B manyetik alanı yaratır. I akımına bağlı olarak değişen B manyetik alanı, kendisine dik konumlu olarak değişen E elektrik alanını yaratır. E alanındaki değişim yeni B alanları yaratır ve bu durum sürekli olarak devam eder [7].

2.3.1 Maxwell Denklemleri

Elektromanyetik teorinin temel denklemleri 1873 yılında James Clerk Maxwell tarafından bulunmuştur. Bu nedenle Maxwell denklemleri olarak bilinmektedir.

$$\nabla \times \overline{E}(\bar{r},t) + \frac{\partial}{\partial t}\overline{B}(\bar{r},t) = 0 \qquad \textbf{(2.2)}$$

$$\nabla \times \overline{H}(\bar{r},t) - \frac{\partial}{\partial t}\overline{D}(\bar{r},t) = J(\bar{r},t) \qquad \textbf{(2.3)}$$

$$\nabla.\overline{B}(\bar{r},t) = 0 \qquad \textbf{(2.4)}$$

$$\nabla \cdot \overline{D}(\bar{r},t) = \bar{\rho}(\bar{r},t) \qquad \textbf{(2.5)}$$

Maxwell denklemlerinde kullanılan vektörler zaman ve konumun fonksiyonlarıdır. Maxwell denklemleri aşağıdaki yapısal (bünye) denklemleri ile tamamlanır.

$$\overline{D}(\bar{r},t) = \varepsilon \overline{E}(\bar{r},t) \qquad \textbf{(2.6)}$$

$$\overline{B}(\bar{r},t) = \mu\ \overline{H}(\bar{r},t) \qquad \textbf{(2.7)}$$

Denklem (2.2)'de verilen denklem Faraday Yasası ve denklem (2.3)'de verilen denklem Amper devre yasası olarak bilinmektedir. Denklem (2.4) ve (2.5), sırasıyla manyetik ve elektrik alan için Gauss yasalarıdır. Denklem (2.3)'ün diverjansı alınıp denklem (2.5)'e uygulandığında denklem (2.8) elde edilir [8].

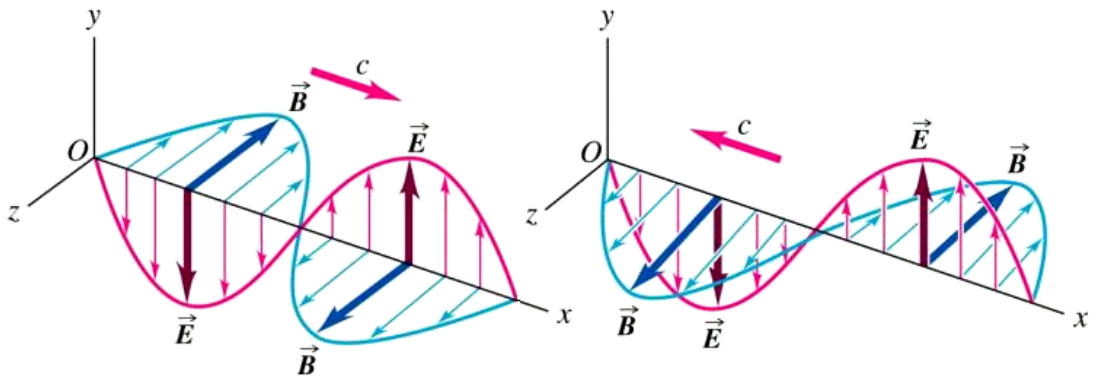
$$\nabla \cdot \bar{j}(\bar{r},t) + \frac{\partial}{\partial t}\rho(\bar{r},t) = 0 \qquad \textbf{(2.8)}$$

Maxwell denklemlerindeki büyüklüklerin adları ve birimleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Elektromanyetik Büyüklükler

SEMBOL	BÜYÜKLÜK	BİRİM
$\overline{E}(\bar{r},t)$	Elektrik Alan Şiddeti	V/m
$\overline{B}(\bar{r},t)$	Manyetik Akı	Weber/ m^2
$\overline{H}(\bar{r},t)$	Manyetik Alan Şiddeti	A/m
$\overline{D}(\bar{r},t)$	Elektriksel Akı	C/m^2
$j(\bar{r},t)$	Yüzeysel Akım Yoğunluğu	A/m^2
$\rho(\bar{r},t)$	Hacimsel Yük Yoğunluğu	C/m^3
ε	Dielektrik Katsayısı	F/m
μ	Manyetik geçirgenlik	H/m

Alan kuramındaki elektrik alan, manyetik alan ve yüzeysel akım yoğunluğu büyüklükleri vektör boyutundadır. Yani hem şiddetleri, hem doğrultuları hem de yönleri vardır. Denklem (2.2) elektrik alanın konuma göre davranışının manyetik alanın zamana göre davranışını etkilediğini, denklem (2.3) ise manyetik alanın konuma göre değişiminin elektrik alanın zamana göre davranışından bağımsız olmadığını göstermektedir [1].



Şekil 2.10: Elektromanyetik Dalga Yayılımı [6]

2.3.2 Elektromanyetik Dalga Yayılımı

Şekil 2.10, bir elektromanyetik dalgada elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin durumunu göstermektedir. Burada bir EM dalga hem t = 0 anında hem de yönleri farklı iken görülmektedir [6].

2.3.3 Frekans ve Dalga Boyu

Elektromanyetik dalgaların dalga boyları ve dolayısıyla frekansları farklı olduğu halde, yayınım (propagasyon) hızları aynıdır. Bu hız boşlukta ışık hızına eşittir ve yaklaşık olarak c = 300000 km/s'dir. Elektromanyetik dalganın dalga boyu, frekansı ve hızı arasında denklem (2.9)'daki bağıntı vardır.

$$c = \lambda \cdot f \qquad \textbf{(2.9)}$$

Uzaklığın hız ve zamanın çarpımı olduğu bilinmektedir. Bu formül elektromanyetik dalgaya uygulandığında uzaklık yerine λ dalga boyu, zaman yerine T periyot zamanı, hız yerine c ışık hızı yerleştirilebilir. Dalga boyu ile frekans arasında ters orantı vardır. Bu da frekansı büyük olan dalganın dalga boyu küçük, frekansı küçük olan dalganın dalga boyu büyük olduğu anlamına gelmektedir [10].

2.3.4 Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik dalga yayılımı dalga boylarına göre çeşitli kategorilerde incelenmektedir. Elektrik enerjisi, radyo, mikrodalga, infrared, ultraviole, X ışınları ve Gamma ışınları olarak kategorilere ayrılmıştır. Elektromanyetik spektrumda 380-750 nm dalgaboyu aralığı insan gözü tarafından görülebilmektedir. Yüksek frekanslar küçük dalga boyuna, alçak frekanslar ise büyük dalga boyuna sahiptir. Elektromanyetik spektrum Tablo 2.2'de verilmiştir. Mikrodalga frekans bant gösterimleri ise Tablo 2.3'de gösterilmiştir. 300 GHz'den yukarı frekanslar iyonlaştırmayan ışınım bölgesi olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2.2: Elektromanyetik Spektrum

Tanım	**Açıklama**	**Frekans**	**Dalgaboyu**
Gamma	Gamma Işınları	30 EHz – 300 EHz	10 pm-1 pm
HX	Hard X Işınları	3 EHz - 30 EHz	100 pm-10 pm
SX	Soft X Işınları	30 PHz - 3 EHz	10 nm-100 pm
EUV	Extreme Ultraviolet	3 PHz – 30 PHz	100 nm-10 nm
NUV	Near Ultraviolet	300 THz - 3 PHz	1 μ-100 nm
NIR	Near Infrared	30 THz – 300 THz	10 μ-1 μ
MIR	Moderate Infrared	3 THz - 30 THz	100 μ-10 μ
FIR	Far Infrared	300 GHz – 3 THz	1 mm-100 μ
EHV	Extremely High Frequency	30 GHz - 300 GHz	1 cm-1 mm
SHV	Super High Frequency	3 GHz – 30 GHz	1 dm-1 cm
UHF	Ultra High Frequency	300 MHz - 3 GHz	1 m-1 dm
VHF	Very High Frequency	30 MHz– 300 MHz	1 dam-1 m
HF	High Frequency	3 MHz - 30 MHz	1 hm-1 dam
MF	Medium Frequency	300 kHz – 3 MHz	1 km-1 hm
LF	Low Frequency	30 kHz - 300 kHz	10 km-1 km
VLF	Very Low Frequency	3 kHz – 30 kHz	100 km-10 km
VF	Voice Frequency	300 Hz - 3 kHz	1 Mm-100 km
ELF	Extremely Low Frequency	30 Hz – 300 Hz	10 Mm-1 Mm

Tablo 2.3: Mikrodalga Frekans Bantları

Frekans	**Dalga Boyu**
1-2 GHz	30-15 cm
2-3 GHz	15-10 cm
3-4 GHz	10-7.5 cm
4-6 GHz	7.5-5 cm
6-8 GHz	5-3.75 cm
8-10 GHz	3.75-3 cm
10-12.4 GHz	3-2.42 cm
12.4-18 GHz	2.42-1.67 cm
18-20 GHz	1.67-1.5 cm
20-26.5 GHz	1.5-1.13 cm
26.5-40 GHz	1.13 cm-7.5 mm
40-300 GHz	7.5-1 mm

Elektromanyetik spektrumda kullanılan birimler ve karşılık düşen salınım miktarı Tablo 2.4'de gösterilmiştir. Frekans, elektromanyetik dalgaların saniyede yaptığı salınım sayısına yani kendilerini tekrarlama sıklığına denir. Elektromanyetik dalgaların bir salınımda aldıkları yola ise dalga boyu denmektedir [10].

Tablo 2.4: Birimler

Birim	**Salınım Miktarı**
1 hertz (Hz)	1
1 kilohertz (kHz)	1.000
1 megahertz (MHz)	1.000.000
1 gigahertz (GHz)	1.000.000.000
1 terahertz (THz)	1.000.000.000.000

3. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM (EMI)

Elektromanyetik girişim (EMI), bir elektriksel sinyal üzerinde yüksek frekanslı elektriksel sinyalin binmesi veya girişmesi olayıdır. Örneğin güç elektroniği anahtarlamaları ile ortaya çıkan istenmeyen yüksek frekanslı elektriksel sinyaller, elektromanyetik girişim kaynaklarına bir örnektir. Bu sinyaller kablolar boyunca iletimle (450 kHz – 3 MHz) ya da yayılımla taşınarak (30 MHz – 40 GHz) kontrol ya da diğer elektronik devrelerinde girişim yaparlar ve onların çalışmasını olumsuz etkileyebilirler [10]. EMI konusunda elektronik devrelerin ya da elektrik sistemlerinin birbiri üzerine etkileri de incelenmektedir. Özellikle 2. Dünya savaşından sonra daha önceleri bilinen bu gerçeklik çok daha önemli hale gelmiştir. Bu da aslında hayatın her alanına giren teknolojik donanımların tahrip edilmesi ya da bozucu etkilerle karşı karşıya kalması durumunda oldukça hassas ve zayıf oldukları anlamına gelmektedir [12].

3.1 Elektromanyetik Girişim Etkileri

EMI konusu elektronik sistemlerin ortaya çıkışı ile fark edilmiş olmasına rağmen özellikle 2. dünya savaşından sonra önemi artmıştır. Her alana yayılan elektronik devreler EMI problemlerini ortaya çıkarmıştır. Askeri sistemlerde kullanım oranı oldukça artan elektronik devrelerin girişim problemleri ya da askeri sistemlere yönelik bilinçli bozucu etkenler oluşturulması EMI problemine karşı önlemler alınmasını zorunlu hale getirmiştir. EMI problemlerine bilimin bu denli çözüm bulmaya çalışmasının temelinde yatan asıl neden istenmeyen sonuçlarıdır. Bu sonuçların neler olabileceği ve insan hayatını nasıl etkileyeceğini birkaç örnekle belirtmeye çalışalım.

Bilgisayar başında çalışırken veya müzik setinden müzik dinlerken cep telefonumuzun çalması, bilgisayar ekranında bozulmalara ya da müzik setinin hoparlöründe cızırtılara yol açar. Bu da bir çeşit elektromanyetik girişim örneğidir.

Büro donanımı üreticilerinden biri yeni bir kopyalama makinesinin ilk prototipini iş yerine yerleştirir. İşyerindeki bir yönetici, birisi bir kopyalama işlemi yaptığında, koridordaki dijital saatlerin bazen sıfırlandığını ya da değiştiğini fark eder. Problemin kopyalama makinesinin güç regülatör devresindeki silikon kontrollü doğrultucular (SCR) yüzünden olduğu anlaşılır. Bu elemanlar düzenli DA akım üretmek amacıyla AA akımı kıymak için açılıp kapanırlar. Bu işaretler de akımdaki ani değişim yüzünden spektral içerik bakımından zengindirler ve kopyalama makinesinin AA güç kablosu yoluyla binanın ortak güç hattına bağdaşır. Bu da saatlerin, bu işaretleri sıfırlama işareti olarak algılamasına sebep olur.

1982'de İngiltere bir destroyerini bir Exocet füze yüzünden Falkland savaşında kaybeder. İngiltere ile haberleşme için kullanılan destroyerin radyo sisteminin, geniş anti-füze algılama sistemi çalışıyorken, iki sistem arasındaki girişim yüzünden uygun şekilde çalışamadığı ortaya çıkar. İngiltere ile bir haberleşme sırasında girişimi önlemek için anti-füze sistemi geçici olarak kapatılır. Bu sırada da karşı taraftan fırlatılan bir füze destroyerin batmasına neden olur.

1982'den beri ABD ordusundaki Black Hawk helikopterlerinin kazalarının çoğuna helikopterlerin radyo vericilerine ve muhtemelen bir halk bandı (CB) vericisine çok yakın uçuşlar olduğunu göstermektedir. Bu kazalarda yirmi iki kişinin öldüğü rapor edilmektedir. Helikopterin elektronik olarak kontrol edilen uçuş kontrol sisteminin bu elektromanyetik yayınımlara duyarlı olmasının bu kazalara neden olduğu değerlendirilmiştir.

1967'de Kuzey Vietnam'da bir ABD uçak gemisinde bulunan uçaklardaki füzelerden biri istemeyerek harekete geçer ve bir başka uçağa çarpar. Bunun sonucunda yakıt tankları patlar ve 134 görevli ölür. Problemin sebebinin geminin yüksek güçlü arama radarının ekranlanmamış bir bağlayıcının kontakları arasında yarattığı radyo frekanslı gerilimlerinden kaynaklandığı sanılmaktadır [13, 14].

Verilen örneklerde de görüleceği üzerine hayatın her alanına giren elektrik, elektronik devrelerin güvenirliliğinin ve korunmasının önemi oldukça büyüktür. İstenmeyen sonuçlar doğurabilecek elektromanyetik girişim kaynaklarının bilinmesi gereklidir. Yapay ya da doğal yollarla oluşan elektromanyetik girişim kaynakları incelenmelidir. Bununla birlikte, kontrollü bir biçimde üretilebilecek elektromanyetik girişimler istenilen hedefe ya da amaca yönelik olarak kullanılmak suretiyle sistemlere zarar verebilir. Bir ülkenin haberleşme sistemini kesmek, uçağını

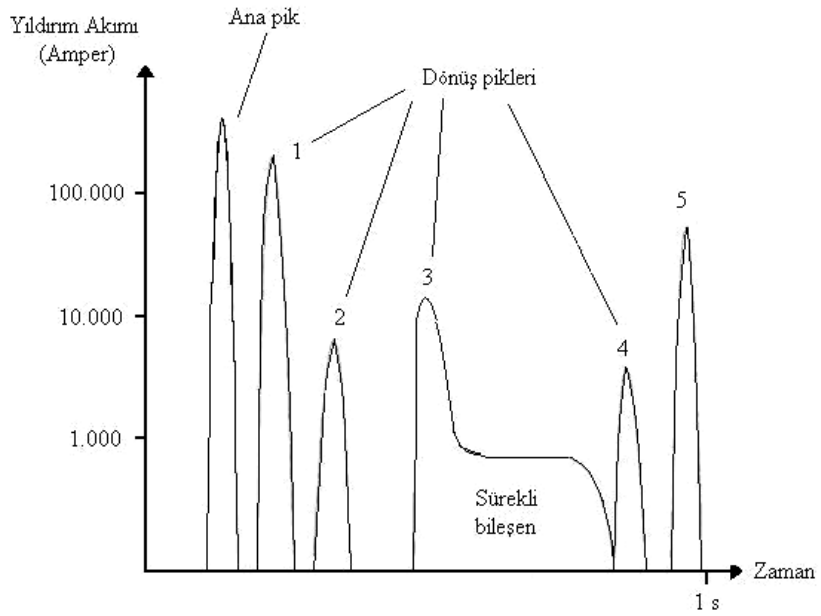
düşürmek, çok önemli bilgisayar verilerinin kaybolmasını sağlamak gibi amaçlarla elektromanyetik girişim kaynağı üretilebilir.

3.2 Elektromanyetik Girişim Kaynakları

Elektromanyetik girişim kaynakları oluşum biçimlerine göre doğal ve yapay kaynaklar olarak incelenir. Girişim kaynaklarının karakteristiklerinin bilinmesi alınabilecek önlemlerin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

3.2.1 Yıldırım

Yıldırım doğal bir EMI kaynağıdır. Elektrik ile yüklenmiş bulutlardan meydana gelen yıldırımın güç kabloları, telefon kabloları ve uçaklar için istenmeyen etkileri vardır. Birinci darbe, aşırı derece güçlü olmakla beraber sıklıkla 100.000 Amper mertebelerine ulaşır. Birinci darbeyi yaklaşık 1 saniyelik süre içinde 10.000 Amper mertebelerindeki diğer darbeler izler. Birinci darbe mikrosaniye süresinde (saniyenin milyonda biri) yükselir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Yıldırım Akım-Zaman Grafiği [12]

Fransız araştırmacılar yıldırım yapısını öğrenmek amacıyla belirlenen uygun özellikte bir buluta 2,5 kg ağırlığında bir roket fırlatmışlar, roket daha yükselme aşamasında 0,2 mm çapındaki bir kablosunun 40 A civarında akıma maruz kalması nedeniyle düşmüştür [10].

Yıldırım akımından dolayı EMP oluşur. Elektrik alan üç parçadan oluşur. Dikey atmosfer elektrik alanı $E(t)$ ile tanımlanan denklem (3.1) yıldırım sonucu oluşur.

$$E(t) = E_s(t) + E_i(t) + E_r(t) \quad \textbf{(3.1)}$$

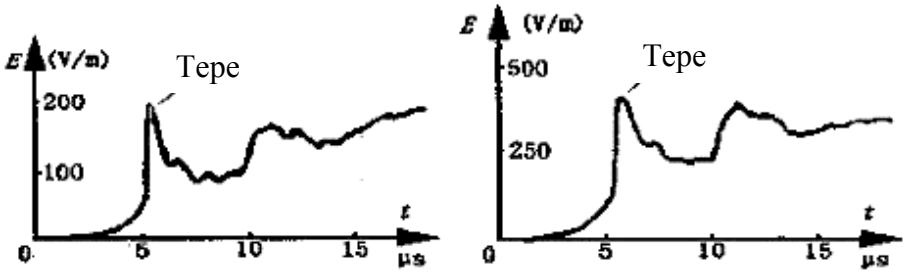
Denklem (3.1)'de bileşenler elektrostatik alan terimi $E_s(t)$, indüklenen alan terimi $E_i(t)$ ve radyasyon alan terimi $E_r(t)$'dir.

$$\mathrm{E_s(t)} = \frac{1}{4\pi\varepsilon r^3}\mathrm{M}(t - r/c) \quad \textbf{(3.2)}$$

$$\mathrm{E_i(t)} = \frac{1}{4\pi\varepsilon c r^2}\frac{dM(t - r/c)}{dt} \quad \textbf{(3.3)}$$

$$\mathrm{E_r(t)} = \frac{1}{4\pi\varepsilon c^2 r}\frac{d^2M(t - r/c)}{dt^2} \quad \textbf{(3.4)}$$

Denklemlerde kullanılan r yıldırıma olan uzaklık, ε havanın dielektrik sabiti, c ışık hızı ve $M(t - r/c)$ zamanla değişen yıldırım elektrik moment değeridir. Bulut yeryüzü tipi yıldırımların %85,4 enerjisi 12 kHz altında, %22 enerjisi 1 kHz altında ve %11,3 enerjisi 0,5 kHz altında yoğunlaşmaktadır. Yıldırım sonucu oluşan EMP'nin yükselme zamanı birkaç mikrosaniye civarındadır. Yakın geçmişte, nanosaniye mertebelerinde yükselme zamanına sahip yıldırımlar gözlemlenmiştir. Darbe genişliği yüzlerce mikrosaniye mertebelerindedir. Yıldırım darbesini en iyi simüle etme yolu yıldırım darbe üreteçleridir. Şekil 3.2'de 1,7 km mesafeden yıldırım EMP'sinden alınan manyetik alan ve elektrik alan ölçümleri görülecektir [15].



$E(t)$ Elektrik Alan $E(t)$ Elektrik Alan

Şekil 3.2: Yıldırım EMP Elektrik Alan Grafikleri [15]

Yıldırımlıklar (paratonerler), yıldırımın binalara zarar vermeden toprağa akmasını sağlayarak canlıları ve binaları korumada bilinen en etkin korunma yöntemidir. Yapılan araştırmalar sonucunda ilk büyük darbenin yarısı kadar olan yaklaşık 50.000 Amper civarındaki bir akım değerinin yıldırımlığa ulaştığı belirlenmiştir [10].

Yıldırım boşalmasının meydana gelmesinde temel olarak iki neden vardır. Bunlardan birincisi atmosferde yüksek miktarda nem bulunması, ikincisi ise sıcak hava akımları yardımıyla yüklü bulutların oluşmasıdır. Özetle, yıldırım oluşumu için neme ve yüklü bulutlara gereksinim vardır. Hava akımları, yere yakın hava tabakalarının iyice ısınması ile oluşur. Çok yükseklerden aşağı inen soğuk hava ile bu sıcak hava tabakası yer değiştirerek hava akımlarını meydana getirir. Nem ise yüksek sıcaklıkta buharlaşma ile meydana gelir. Hava, yukarı çıkışı sırasında soğur ve belirli bir yükseklikte su buharına doyacağı bir sıcaklığa erişir. Daha fazla yükselmesi yoğuşmaya sebep olur ve bulut oluşur. Yıldırım bulutunun oluşumunda üç aşama söz konusudur: Gençlik, Olgunluk ve Yaşlılık.

Gençlik aşamasında aşağıdan yukarı doğru ve kenarlardan ortaya doğru hava akımları artar. Bu durum yaklaşık 10 – 15 dakika sürer**.** Olgunluk aşamasında yağmurlar oluşur. Sıfıra yakın sıcaklık derecelerinde iyice azalan bulut kaldırma kuvveti, şiddetli yağmurlara sebep olur. Bu sırada yukarıdan aşağıya hareket eden soğuk rüzgarlar görülür. Bu rüzgarlar yere ulaştıklarında kısa süreli, şiddetli fırtınalara sebep olurlar. Bu aşama yaklaşık 15 – 30 dakika sürer. Yaşlılık aşamasında ise hava akımları artık son bulmuştur. Bu aşama da yaklaşık 30 dakika sürer.

Yıldırımın oluşması için öncelikle elektriksel olarak yüklenmiş yıldırım bulutunun oluşması gerekir. Yıldırım bulutu oluştuktan sonra yük birikimleri oluştukça, zamanla bulutla yeryüzü arasındaki potansiyel farkı artar. Bu artış nedeniyle yeryüzü ile yıldırım bulutu arasında kalan havanın da delinmesi kolaylaşır ve belli bir değerden sonra havanın delinmesiyle oluşan iletken kanal boyunca buluttan toprağa veya topraktan buluta doğru bir elektriksel boşalma başlar. Elektrik alan şiddetinin 25 kV/cm değerine ulaştığı andan itibaren artık yıldırım gözlenebilmektedir.

Buluttaki elektrik alan şiddeti yeterince yükseldiğinde elektriksel boşalmalar başlar. Bu boşalmalar birkaç şekilde meydana gelebilir. Bunlardan iki bulut arasında meydana gelenlere bulut – bulut türü, bulutun kendi içinde meydana gelen türüne bulut içi tür, bulut ve yeryüzü arasında meydana gelen türüne de bulut – yeryüzü türü

yıldırım boşalmaları adı verilir. Bu boşalmalardan toprak ile bağlantılı olanlara yıldırım, bulut içinde veya bulutlar arası olan türlerine ise şimşek adı verilir.

Yeryüzündeki elektrik alanı çeşitli sebeplerden ötürü eğer (yüksek kuleler, gökdelenler, v.b.) bozulmuşsa bu durumda bulut – yeryüzü boşalması görülebilmektedir. Bulut – yeryüzü boşalması, bulutun pozitif veya negatif yüklü bölgelerinden yere veya yeryüzündeki pozitif veya negatif yüklü sivri uçlarından buluta başlayabilir.

Fiziksel nedenlerden ötürü, bulutun yüklenmesi sırasında yere yakın olan kısmında %70-%90 olasılıkla negatif elektrik yükleri yer alır. Bu durumda yerin de bulutun negatif yüklerine bakan bölümünde pozitif yükler toplanır. Bazı koşullarda bunun tersi yüklenme de olabilmektedir (%10-%30 olasılıkla) [16]. Fırtınanın, hava akımlarının artmasıyla buluttaki negatif yük oranı ve buna bağlı olarak da yerdeki pozitif yük toplanması hızlanarak devam eder. Aradaki bu fark belli bir eşik değerine ulaştığında kararsız bir ortam oluşur ve yıldırım görülür.

Yıldırımın iki temel etkisi vardır; doğrudan etkiler ve dolaylı etkiler. Yıldırımın oluşturduğu akım yoluna doğrudan maruz kalma sonucu; bir sistemin fiziksel yapısının; elektrik-elektronik donanımların hasar görmesi yıldırımın doğrudan etkileri olarak değerlendirilir. Bu etkiler delinme, yırtılma, bükülme, yanma, buharlaşma ve donanımın patlamasını içerir. Yıldırımın dolaylı etkileri ise yıldırım akımının oluşturduğu elektromanyetik alanların iletkenler üzerinde indüklediği geçici elektriksel işaretlerin elektrik-elektronik devre ve sistemler üzerindeki girişim etkisidir.

Doğrudan etkiler genelde yıldırım akım yolunda bulunan unsurların elektriksel davranışları ile ilgilidir. Akımı taşıyabilecek bir iletken herhangi bir fiziksel zarara uğramazken yüksek dirençli iletken malzemeler veya yalıtkan malzemelerin yıldırımın izlediği yola bağlı olarak fiziksel zarara uğramaları olasıdır.

Doğrudan etkilerin testinde iki unsur değerlendirilir:

- Yalıtkan unsurlar üzerindeki iletkenlerin yıldırım akımını iletimi
- İletken yapıların yıldırım akımını taşıyabilme kapasiteleri

Birinci maddenin doğrulaması yüksek gerilim deneyleri ile ikinci maddenin doğrulaması ise yüksek akım deneyleri ile gerçekleştirilir.

3.2.2 Dünyanın Manyetik Alanı

Diğer bir doğal girişim kaynağı da dünyanın sahip olduğu kendi manyetik alanıdır. Değeri yaklaşık 19-54 A/m mertebelerindedir. Manyetik fırtınaya eşlik eden elektrik alanın normal seviyesinden 1000 kez azaltılmış halidir. Dünyanın elektrik alan değeri oldukça küçüktür. Bununla beraber, 20 mV/km olan değer okyanuslarda daha da düşmektedir. Fakat elektromanyetik fırtınalar 10 V/m ile 500000 kere çarpılmış hali olabilir. Transatlantik kabloları üzerinde bu nedenle 1000 V ve üzerinde bir girişim oluşabilmektedir. Daha önceki bölümde Şekil 2.9'da dünyanın manyetik alan çizgileri gösterilmiştir [10].

3.2.3 Kozmik ve Güneş Kaynakları

Doğal girişim kaynaklarından bir diğeri ise kozmik ve güneş kaynaklı girişimlerdir. Güneşteki ışımadan dolayı iyonosferde oluşan değişiklikler, iyonosferdeki yansımanın değişmesine (2-30 MHz bantları içinde) göre, radyo iletişiminde ve yine iyonosferik yansımanın değişmesine (150-500 MHz bantları içinde) göre uydu haberleşmesinde problemler doğurmaktadır. Diğer kozmik kaynakların ışıması ise geri planda kalır ve 100-1000 MHz aralığında oldukça önemli olan RF sinyalleri üretir [12].

3.2.4 Elektrostatik Boşalmalar (ESD)

Yapay girişim kaynağıdır. Birbiriyle temas ve biri diğerine göre hareket halinde olan cisimler, diğerine zıt yükleyecek şekilde elektron değiş tokuşu yapabilecek kapasitededir. Bu şekildeki yüklemeler birkaç mJ'luk gizli enerjileri olan önemli potansiyeller (10-25 kV) doğurabilir ve bu tür yüklerin boşalması, hızlı yükselen akım darbeleri oluşturur. Bu darbeler insanlara ve elektriksel cihazlara zarar verebilir. Büyük tankerlerde tankların temizlenmesi sırasında oluşan patlamalar, mikroçiplerin personel tarafından kullanımı sırasında oluşan hasarlar, uçakların yakıt ikmalleri sırasında oluşan patlamalar ve araçların elektronik devrelerinde meydana gelen hasarlar ESD etkisi ile oluşan problemlere başlıca örneklerdir [12].

Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tarafından elektromanyetik etkilere karşı sistem gereksinimleri hakkında hazırlanan askeri standart MIL-STD-464A kapsamında elektrostatik boşalma konusunda iki farklı yapı dikkat çekmektedir. Biri

personel (insan) kaynaklı ESD tehdidi diğeri ise dikine havalanan hava araçları (helikopterler) kaynaklı ESD tehdididir.

Helikopter dikine kargoyu kaldırma sırasında; havayla sürtünme sonucu oluşan elektriksel yük; kargoyu alırken kanca ile kargo arasında veya kargoyu indirirken asılı kargoyla yer arasında elektriksel ark oluşmasına neden olur. Uçuş sırasında yakıt ikmali yaparken, tanker uçak ve yakıt alacak uçak farklı gerilim seviyelerinde bulunabilir ve iki uçağın birbirine bağlanması sırasında olası ark oluşabilir. İki uçak arasında bu iki halde beklenen maksimum boşalma gerilimi düzeyi 300 kV'tur. Meydana gelecek elektriksel geçici darbeler hem uçağı ve hem de asılı kargoyu etkiler.

Personel kaynaklı ESD deneyi için ticari olarak rahatça temin edilebilen 25 kV'luk üreteçler yeterlidir. Ancak helikopter kaynaklı ESD testi için 300 kV'luk üreteçlere ihtiyaç vardır.

Helikopter ESD deneylerinde; büyük boyutta bir helikopteri temsilen 1000 pF'lık bir kondansatör kullanılır. Uçuş sırasında yakıt ikmali deneylerinde yakıt hortumu bağlantı yerine küçük bir Marx üretecinden boşalma oluşturulur. Her iki deneyde hem pozitif ve hem de negatif darbe gerilimleri kullanılır. Deneyler sırasında uçaktaki cihazların algılanıp algılanmadıkları gözlenir. Dikine havalandırılan kargo deneyinde küçük bir Marx üretecinden; taşıma düzenine bağlı olarak doğrudan kargo sistemine veya kargo taşıyıcısına darbe gerilimi uygulanır. Kargo taşıyıcısına taşıyıcı çevresinde belli noktalardan darbe uygulandıktan sonra sistemin uygun çalışıp çalışmadığı kontrol edilir [17].

3.2.5 Elektromanyetik Darbe (EMP)

EMP, en temel anlamda doğal yollardan oluşan veya yapay yollardan oluşturulan, tahrip edici elektromanyetik etkisi bulunan bir darbedir [18]. EMP yapay bir girişim kaynağıdır. Üretim biçimlerine göre, nükleer patlamalar sonucu oluşan darbeler (NEMP) ve nükleer olmayan yollarla üretilen darbeler (EMP) olarak iki ana başlıkta toplamak mümkündür.

Bir nükleer silahın patlatılması sonucunda nötron, elektron, bölünmüş parçalar, bomba döküntüleri, alfa parçacıkları, gamma fotonları ve X ışınları birçok biçimde direkt olarak ortaya çıkar. Ayrıca, gamma ve X ışınlarının atmosferde oluşturduğu dolaylı etki sonucunda NEMP oluşur.

NEMP aslında gamma ışınımı ile oluşan elektron akışının patlamasıdır. Nano saniye ve mikrosaniye mertebesindeki çok kısa sürelerde güçlü bir elektromanyetik alandır. Elektromanyetik dalgaların uzayda ışınım ve yayılımları daha önceki bölümlerde söz ettiğimiz gibi Maxwell denklemlerine uygundur. Dalga uzaklardaki devrelere küçük miktarda enerji taşır. Bununla birlikte, bölüm oranı mikrosaniye ve nanosaniye düzeyinde olduğundan enerji değeri aşırı biçimde yükselmektedir. NEMP etkisinde kalmış elektrik-elektronik sistemlerde istenmeyen gürültü, geçici hasarlar, güç sistemlerinin gidip gelmesi ve kalıcı zararlar gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkmaktadır [19].

NEMP son derece kısa bir süre içinde oluşan elektromanyetik enerji darbesidir. NEMP, 1 kHz ile 100 MHz arasında değişen eşzamanlı radyo dalgalarına ve maksimum değeri 50 kV/m genlikteki alanlara oldukça benzediğinden başlangıçta radyo parlaması (radio flash) olarak isimlendirilmiştir. NEMP nükleer patlama sonucu yayılan gamma fotonlarının birbirleriyle çarpışması ve atmosfer üzerindeki atomlar ile etkileşimi sonucu oluşur. Elektronların saçılması ve güçlü iyonize olmuş bölge sonucu kaynak alan bölgesi oluşur. Bu karmaşık süreç birkaç nanosaniye ve 1 mikrosaniye arasında medyana gelir. Bu sırada çok güçlü bir elektrik alan üretilir ve kaynak bölgeden dışarı doğru yayılır. Patlamanın yüksekliği, atmosferdeki asimetrisi ve patlamanın konumuna bağlı olarak göreli olarak değişen manyetik alanın etkisi, NEMP'nin şeklini ya da etki alanını ve gücünü direkt olarak etkiler. Temelde yapılan çok çeşitli kombinasyonlara bağlı analizler ışığında dört çeşit oldukça önemli NEMP vardır.

Birincisi, kaynak bölge NEMP (SREMP)'dir. Birkaç yüz metre yüksekliğe yeryüzünden atılan ateş topu (fireball) sonucu oluşan NEMP'dir. SREMP patlama noktasından 5 km uzaklığa etki edebilir. Patlamanın olduğu bölgeden dışarı doğru gamma ışınları harekete başlar. Compton elektronları harekete geçerek, geride hareketsiz pozitif iyonlarını bırakır. İki ya da üç nanosaniye içerisinde elektrik alan ortaya çıkar. Sonuç olarak, atmosferde akım değerlerinde olağan üstü dalgalanmalar meydana getirerek haberleşme donanımlarının kullanılamaz hale gelmesine neden olur.

İkinci çeşit NEMP ise, sistem üretimi NEMP (SGEMP). X ışınlarının ya da gamma ışınlarının bir metal nesne üzerindeki bir atom ile etkileşmesi sonucu ortaya çıkar. Uzayın dışındaki bir nükleer patlama gamma ya da x ışınlarının tüm yönlere doğru

gönderilmesine neden olur. Bu ışınlar korunmasız bir uydu ya da füzeye atmosfer üzerindeki hareketi sırasında çarparsa, metal üzerindeki atomların elektronlarının bulunduğu yerden fırlatır. Bu hareket EMP'nin oluşmasına ve uydu ya da füzenin kullanılamaz hale gelmesine neden olur.

Üçüncü çeşit ise yeryüzüne yakın yükseklikte meydana gelen nükleer patlama sonucu oluşan NEMP. Yeryüzünün üzerinde ya da 2 km kadar yükseklikte nükleer patlamanın gerçekleşmesi sonucu oluşur. Atmosferin toplam kütlesinin yarısının ilk 5 km içerisinde olması nedeniyle alçak kısımlarındaki yoğunluk yüksektir. Bundan dolayı, patlama noktasından 10-20 km uzaklığa kadar dalgalar ancak yayılabilir. Bu nedenle göreceli olarak etkileri önemli değildir. Taktik nükleer savaşlar için ise oldukça önemlidir.

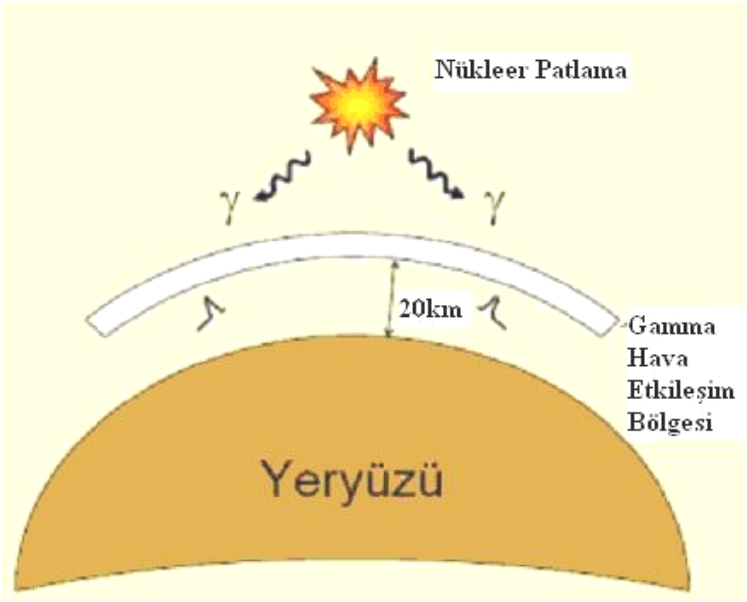
Atmosfer içinde meydana gelen nükleer patlama yeryüzünün birkaç kilometre yüksekliğinde ani gamma ışınların her yöne saçılmasını sağlar. Gamma ışınları atmosferdeki atomlarla etkileşerek Compton saçılımını oluşturur ve büyük çoğunlukla fotonların enerjisi elektronlara geçer. Ardından büyük bir hızla atomdan dışarı çıkar. Pozitif iyonlar ve atılmış elektronlar etrafında radyal hareketler Compton akımını meydana getirir. Bu radyal elektrik alanlar, patlama noktasından direkt dışarı doğru atılır. Oldukça az miktarda gamma fotonları 2-3 km'den fazla yol katedebilir. Bu nedenle, atomlarından atılan elektronlar patlamanın etrafında 2-3 km çaplı bir alanda hareket ederler. Buna kaynak bölge (source region) denir [20].

Elektrik alanın değeri birkaç nanosaniye içinde onlarca kV/m değerlerine ulaşır. Tepe değerine ise elektron ayrılma miktarının maksimum olduğu anda ulaşacaktır. Bundan sonra, elektrik alanı elektronları az önce ayrılmış oldukları yerlerine geri dönmeleri için zorlar. Bu da elektrik alanın zaman içinde değişimine sonucunda ise manyetik alanın oluşmasına neden olur. Bu olaylar kaynak bölge içinde meydana gelir ve manyetik alan değeri 100 amper/metre mertebesinde tepe değerlerine ulaşır. Bununla beraber, manyetik alanlar elektromanyetik dalgayı meydana getirir ve kaynak bölgenin az bir miktar dışına kadar etkili olabilir. Olası olmayan bir biçimde yeryüzü üzerinde bir etkisi olmaz. Atmosfer içinde meydana gelen nükleer patlamalar sonucu çok güçlü alanlar meydana gelirken, bu alanların kuvvetleri kaynak bölgenin içinde kaldığından güçlenemezler [20].

Sonuncusu ise, yüksek irtifada meydana gelen nükleer patlama sonucu oluşan NEMP'dir. Ulusal güvenlik sistemlerine en önemli potansiyel tehdit olarak

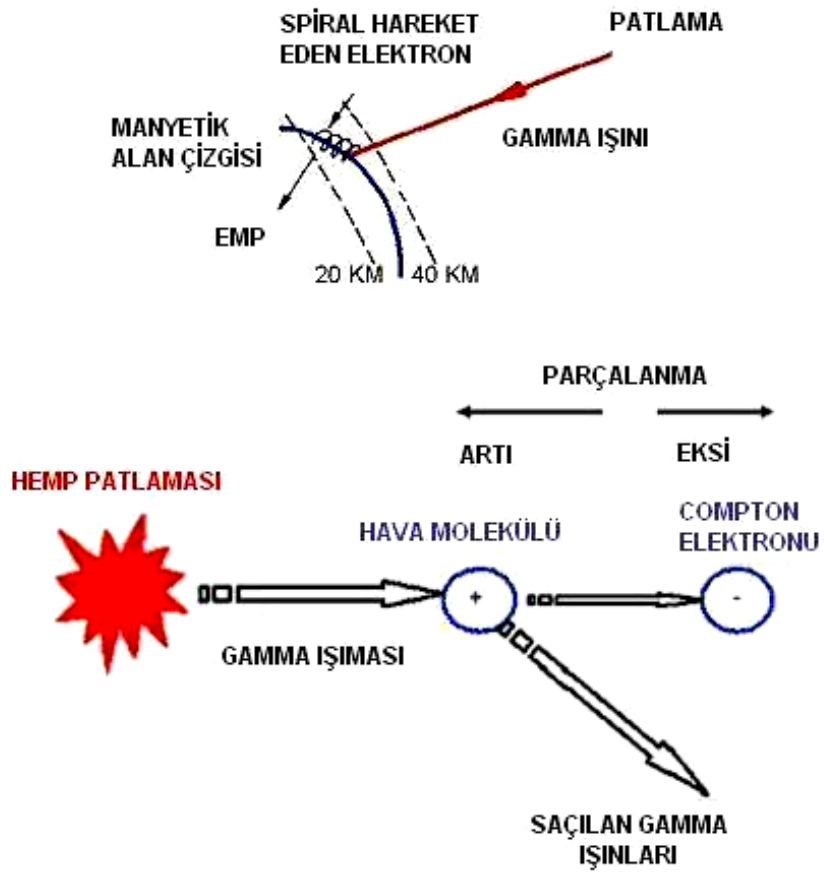
görülmektedir. Yüksek irtifada meydana gelen nükleer patlama sonucu yeryüzünü etkileyen NEMP'den başka diğer nükleer etkiler yeryüzünde görülmez [21].

Dünya yüzeyinin 30 km üzeri ve 500 km üzeri arasında meydana gelen nükleer patlama sonucu oluşan NEMP farklı geometri izler. Belirtilen yüksekliklerde, atmosfer tabakasının ince ve var olmaması (yoğunluğunu oldukça az olması) gamma ışınlarının patlama noktasından her yöne doğru çok uzun mesafelere yayılmasına neden olur. Atmosferin ötesinde bir patlama gerçekleştirildiği zaman, gamma ve X ışınları düz hatlar halinde, atmosferin yoğun akımların bulunduğu üst tabakalarına kadar yayılır. Bu ışınlar, iyonizasyon sebebiyle iki farklı yüksekliğe dizilirler. İkincil elektronlar ise, çok büyük radyo parazitleri oluşturan ve ışık hızında akan akımlar doğururlar (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: NEMP Sonucu Oluşan Gamma Işıması [17]

Gamma ışınlarının yayılımı 20 ile 40 km'ler arasında atmosferdeki moleküllerle girdiği etkileşim sonucu parçalanarak sona erer. Bu parçalanmalar, Compton elektronlarının dünyanın manyetik alanı etkisiyle yeryüzüne doğru yayılmasına neden olur ve elektromanyetik dalgayı oluşturur (Şekil 3.4). Sonucunda, Compton akımlarının enine bileşeni her elektronun hareketi yönünde elektromanyetik dalgaları üretir. Gamma ışınları ve radyo dalgaları aynı hızda yüzlerce metre yeryüzüne doğru hareket ettiğinden aşama aşama her kaynak birbirini kuvvetlendirir. Sonucunda çok kuvvetli alan kuvvetleri yeryüzüne ulaşıncaya kadar hareket ederler [17].



Şekil 3.4: NEMP Oluşum Geometrisi [25]

Nükleer patlama sonucunda ek olarak, nükleer patlamanın ardında kalan yıkıntılar yüksek iletkenlikte bir plazma biçimini alır. Dünyanın manyetik alan çizgileri etkisiyle magnetohidrodinamik dalgalar ismi verilen dalgalanmalar meydana gelir. Bu dalgalar dünyanın çevresinde genlikleri 1 V/m seviyelerinde parçalanarak 100 saniye civarında yayılır. Oldukça düşük genliğe sahip olan bu dalgalar askeri donanımlar açısından önemsiz olmasına rağmen, ulusal güç dağıtım sistemleri gibi kapsamlı sistemlerdeki güç trafoları gibi bileşenler üzerinde büyük ve tek yönde akımlar ürettiğinden ciddi sorunlar doğurabilir.

Atmosfer dışında meydana gelen nükleer patlama sonucu oluşan NEMP'nin en dikkat çekici özelliği çok geniş alanlarda etkili olmasıdır. Patlama noktasından görülebilen ufuk çizgisine kadar olan bölgedeki elektrik-elektronik korunmamış donanımlar üzerinde tahrip edici etkiye sahiptir. Örneğin, 400 km yükseklikte meydana gelen bir nükleer patlama sonucu oluşan NEMP'nin etkisi, 2200 km uzaklığa kadar her yönde etkilidir.

Atmosfer dışında meydana gelen nükleer patlama sonucu oluşan NEMP yukarıda belirtildiği gibi oldukça geniş bir alanda etkilidir. Bu nedenle sadece tekil korunma yapılmamış nesneler üzerinde değil, o bölge içinde bulunan tüm sistemleri olumsuz yönde etkileyecektir. Telefon şebekeleri, ulusal güç merkezleri, tüm elektrikli sistemler, bilgisayar ağları örnekler içinde sayılabilir. Tablo 3.1'de NEMP'nin karakteristik özellikleri verilmiştir [22].

Tablo 3.1: NEMP Karakteristik Özellikleri

Etkili Çapı	Kazanç	1 MT	10 MT
	HOB 100 km	470 km	620 km
	HOB 200 km	700 km	1100 km
Yeryüzü Üzerinde Etkili Çapı	$R \cong 1100 \cdot \sqrt{HOB/100km}$		
Yeryüzü Üzerinde Alan	Güçlü Elektromanyetik Alanlar, 10 kV/m		
Yükselme Zamanı (10%...90%)	2…5 ns < 10 ns asıl alan, > 10 ns sınır bölge		
Frekans Bölgesi	10 kHz, …. 100 MHz		
Enerji Yoğunluğu	≅ 1 joule/m^2		

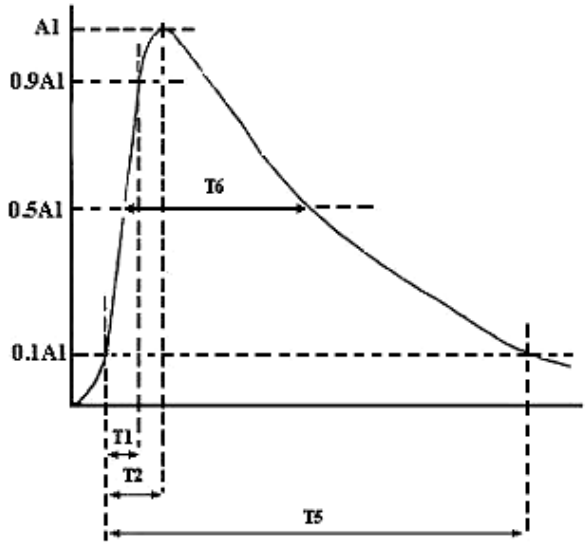
EMP etkileri ilk yapılan atomik patlamalar öncesinde biliniyor ve nükleer testler sonucunda tahmin edilebiliyorken ancak yıllar sonra EMP'nin ciddi olumsuz sonuçlar doğurabileceği fark edildi. Johnson adasının 400 km üzerinde 1963 yılında 1.4 Megatonluk nükleer patlamaya bağlı olarak bir çok olumsuz etki meydana geldi. Patlamanın olmasıyla birlikte patlamaya yaklaşık 1300 km uzaklıkta bulunan Oahu ve Hawai adalarında birçok elektrik kesintisi, yüzlerce hırsızlık alarmının kendiliğinden uyarı vermesi ve sokak aydınlatmalarında kısa devreler görüldü.

EMP günümüzde en ilgi duyulan konular içerisinde yer almaktadır. Bugünün tümleşik mikroelektronik devrelerinde vakum tüp teknolojisi devrimiyle meydana gelen gelişmeler EMPye karşı duyarlılığın çok önemli miktarda artmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, modern haberleşme sistemleri ve elektronik donanımlar EMP'nin oluşturacağı güç dalgalanmalarına karşı yüksek seviyede savunmasız kalmışlardır [21].

Bir nükleer bombanın patlatılmasının birincil amacı elektromanyetik darbe üretmek değildir. NEMP, patlamanın sonucunda ortaya çıkar. Askeri açıdan ise nükleer

patlama sonucu oluşan NEMP etkisi bilindiğinden beri, komutanların öncelikli olarak ilgilendiği konu insan ölümlerinden çok elektrik-elektronik donanımların ya da bu donanımların kullanıldığı sistemlerin güvenilirliği olmuştur. Bir nükleer silah yeryüzünde ya da belirli bir irtifada patladığında güçlü bir radyo frekanslı enerji darbesi üretir. NEMP olarak isimlendirilen bu darbe nükleer silahın toplam sahip olduğu enerjinin sadece %0.01'ini oluşturur. Nükleer silahın patlatılmasının öncelikli amacı olmayan NEMP, gamma ışınları ve atmosferin etkileşimi sonucu oluşmaktadır. NEMP, insanlar için tehlike oluşturmamaktadır. Asıl tahrip edici etkisi kilometre karelerce alan içinde bulunan korunmamış elektrik-elektronik donanımlar üzerinedir. NEMP etkisi yüksekliğe bağlı olarak iki ana grupta incelenebilir: 30 km irtifa altında atmosferin içinde meydana gelen nükleer patlamalar sonucu ve 40 km üzerindeki atmosfer dışındaki patlamalar sonucu oluşan NEMP olarak gruplandırılabilir [20].

EMP dalga şekli Şekil 3.5'de gösterilmiştir. NEMP dalgasının en dikkat çekici özelliği çok kısa yükselme zamanıdır. Genel olarak NEMP 5-10 nanosaniye mertebelerindeyken, yarı değere düşme süresi 50 nanosaniyeden mikrosaniye mertebelerine kadar değişebilir [23].



Şekil 3.5: EMP Dalga Şekli [23]

Şekil 3.5'de kullanılan kısaltmaların anlamları aşağıdaki gibidir:

A1 Elektrik Alan = 50 kV/m

T1 Darbe Yükselme Süresi = 5 nanosaniye

T2 Tepe Süresi = 10 nanosaniye

T5 0,1 A1'de Darbe Genişliği = 600 nanosaniye

T6 0,5 A1'de Darbe Genişliği = 200 nanosaniye

Çok hızlı bir yükselme zamanına sahip olan darbenin analitik olarak denklemi;

$$E(t) = a(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \text{ V/m} \quad \textbf{(3.1)}$$

şeklindedir. Bu denklemde kullanılan sabitler ise;

$$a = 5.25 \times 10^4 \quad \textbf{(3.2)}$$

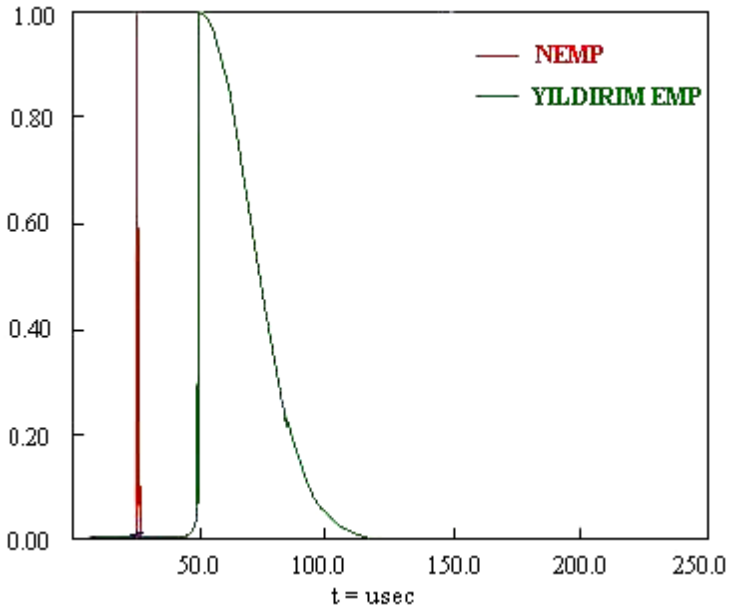
$$\alpha = 4.00 \times 10^6 \quad \textbf{(3.3)}$$

$$\beta = 4.76 \times 10^8 \quad \textbf{(3.4)}$$

EMP kaynaklı güç dalgalanmalarının önemi, doğal bir girişim kaynağı olan yıldırımla karşılaştırıldığında daha iyi anlaşılacaktır. İkisi de bir ani enerji darbesi ve bilinçli ya da bilinçsiz biçimde toplayıcıları ve antenleri olumsuz etkileyen bir durumdur. Bununla beraber, EMP ve yıldırımın 4 çok önemli farkı vardır (Şekil 3.6).

- EMP çok daha hızlıdır. EMP darbe zamanı birkaç nanosaniye iken, yıldırım darbe zamanı mikrosaniye mertebesindedir.
- Alan güçleri farklıdır. Yıldırım birkaç bin volt/metre iken EMP 50.000 V/m olabilir.
- EMP darbesinin süresi genellikle kısadır. Saniyenin yüz binde biri kadar süren EMP darbesi, yıldırım için yüzlerce milisaniye kadar olabilir.
- Yıldırım düşük frekanslarda meydana gelir. Bu da askeri haberleşme sistemlerinin kullandığı frekans bandının oldukça altındadır. Bununla beraber, EMP çoğunlukla askeri taktik iletişim sistemlerinin kullandığı frekans bantlarında meydana gelir [21].

Nanosaniye mertebesindeki ömür gigahertz mertebesinde frekansa karşılık düşer ki bu yüksek güçlü mikrodalganın yönlendirilmesi akıl sınırlarını zorlayacak etkilere neden olabilir [18, 24].

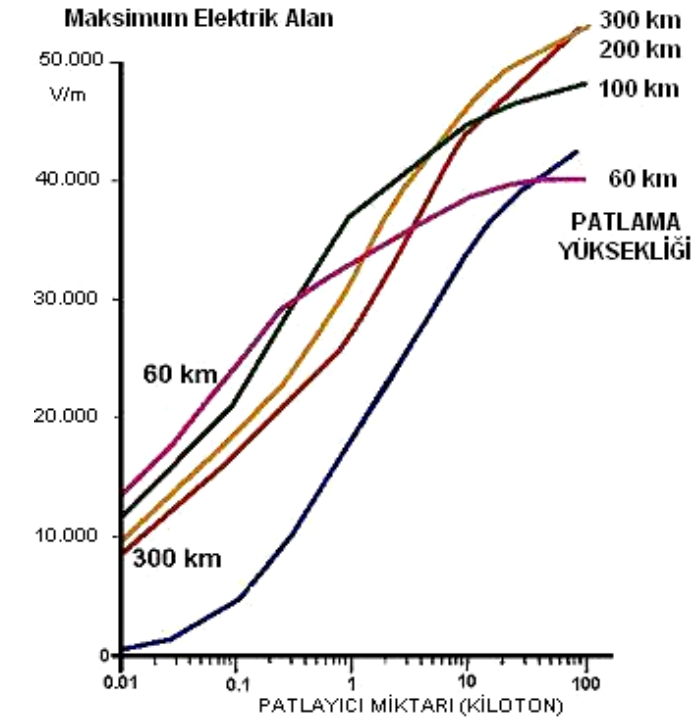


Şekil 3.6: NEMP ve Yıldırım Dalga Şekli [20]

NEMP olağan bir olay olmamakla birlikte bilimsel araştırmalar ya da nükleer patlamalar sonucu ortaya çıkar. 100 km mesafeye kadar güçlü elektrik alanları 5-10 nanosaniye içinde 50 kV/m mertebelerine ulaşabilir. Bu 200 nanosaniyelik süre içinde toplam gücün yarısı kadardır. Sonucunda uzun bir kabloda yeryüzü üzerinde binlerce amper mertebesinde akım darbesi oluşturur. Darbenin büyüklüğü ve etkilenen alan eksoatmosferik patlamaların ilgi alanına girer.

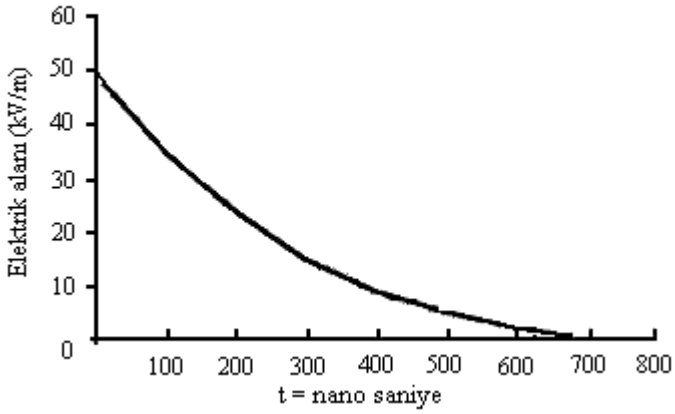
Örneğin, Şekil 3.7'de 3500 mil uzaklıktan dahi olumsuz etkilerinin algılandığı 1962 yılının Haziran ayında Pasifik'teki Johnson adasının 250 mil ötesinde patlatılan ve Starfish adındaki bir deneyin sadece bir parçası olan 1,4 Megatonluk bir bombanın elektrik alan grafiği görülmektedir [10].

Herhangi bir noktada gözlenen NEMP'nin büyüklüğü, patlamada yayılan gamma ve X ışınlarının miktarına, patlama ısısına ve ışımanın atmosfere geliş açısına göre değişir. Dalga kaynağının çapı, birkaç yüz kilometre ve dünya yüzeyindeki elektrik alanların değeri ise 50 kV/m olabilir. Bu denli yoğun alanlar etkileşiminde oldukları iletkenlerde oldukça yüksek akım indükleyebilecekleri gibi, çok ciddi girişimlerde doğurabilir. Güç ve haberleşme hatları gibi sistemler, bu tür olaylar ile ciddi biçimde tehdit altındadır.



Şekil 3.7: NEMP Etki Alanı [25]

Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, yükselme zamanı yaklaşık 10 ns olan EMP darbesini kullanarak yapılan deneylerde, sistemlerin bu tür olaylara verdiği cevaplar test edilebilir. Işıma kaynağının genişletilmesi patlamadan birkaç yüz kilometre uzaklıktaki alanların, ısı veya patlama gibi hiçbir nükleer silah ile direkt temasa geçmemiş olsalar dahi, ciddi EMP etkisine maruz kalmaları sunucunu doğurur. Bu nedenle sivil ve askeri otoriteler planlarına EMP'yi dahil etmek zorundadırlar [12].



Şekil 3.8: EMP Çalışmalarında Kullanılan Deney Darbesinin Şekli [12]

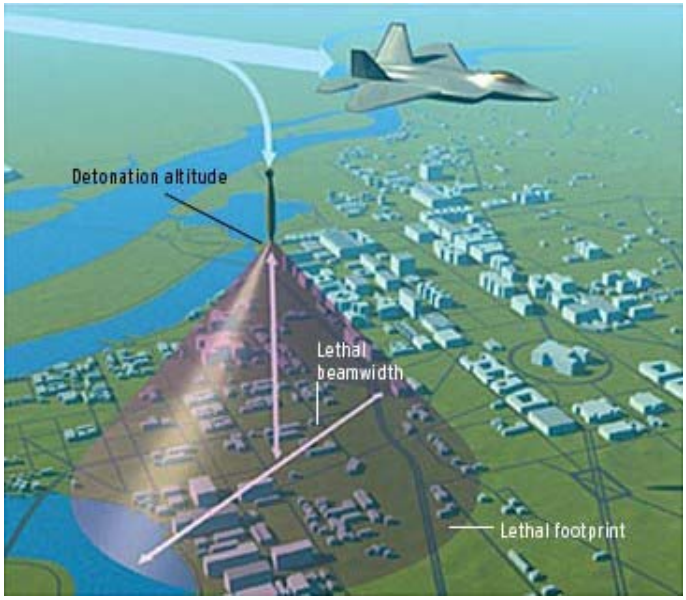
EMP güç yoğunluğu 1.000.000 watt/m^2 iken radyo alıcılarının tipik sinyal gücü 0.001 watt/m^2 olduğu düşünüldüğünde tasarımda dikkat edilmesi gereken bir unsur

olduğu görülecektir. Dolayısıyla alıcının sinyalinden 1 milyar kat güçlü olan EMP dikkate alınmalı ve bir çözüm bulunmalıdır [21].

EMP'nin diğer üretim yolu, nükleer silahlar kullanılmayarak üreteçler yardımıyla üretilmesidir. EMP üretimi ile ilgili olarak çok sayıda aygıt kullanılabilir ve bu alandaki deneyler ve çalışmalar oldukça gelişmiştir. Patlayıcı biçimde pompalanmış akı pompalama üreteçleri (FCG), patlayıcılı ya da itişli yönlendirilen magneto hidrodinamik üreteçler (MHD) ve virtuel katot osilatörleri oldukça gelişmiştir [25].

4. ELEKTROMANYETİK DARBE ÜRETEÇLERİ

Amerika Birleşik Devletleri'nin Kosova savaşı sırasında Los Alamos laboratuarında geliştirdiği gizli bir silahı elektronik donanımları tahrip etmek için denediği konusunda Rus yetkililer tarafından iddialar ortaya atılmıştır. Rus yetkililer B2 bombardıman uçağı ile gizlice atılan bombanın amacının EMP üretmek olduğunu belirtmesine rağmen ABD yetkilileri sıklıkla bu iddiaları reddetmiştir. İddialar gerçekse, bomba bir füze ya da hava aracı vasıtasıyla (Şekil 4.1) hedeflenen bölgenin üzerinde belli bir yükseklikte patlatılmakta ve patlama sonucunda oluşan EMP ile donanımlarda bulunan elektronik devrelerin ve haberleşme donanımlarının kullanılamaz hale gelmesini hedeflemektedir [26].



Şekil 4.1: EMP Üretecinin Uçakla Hedefe Atılması [24]

EMP üreteçlerinin temel amacı 20. yy'ın ortalarında yapılan yüksek irtifada nükleer silahların denenmesi sırasında ilk olarak gözlemlenen darbe etkisini benzer biçimde nükleer patlamalar olmaksızın gerçekleyebilmektir. EMP radyoaktif özelliğe ve geleneksel savaş araçları gibi öldürücü etkiye de sahip değildir. Bu nedenle askeri sistemlerde gün geçtikçe bir savaş aracı olarak kullanılması konusunda çalışmalar hızla devam etmektedir. EMP üreteçleri etkileri itibariyle gelecekte bir savaş aracı olarak kullanılacağı düşünülmektedir. Amerika önceliğindeki birçok ülke bu konuda

çalışmalar yapmakta ve nükleer patlama olmaksızın üreteçler vasıtasıyla EMP üretebilmektedir. Askeri anlamda EMP üreteçlerinin birincil amacı, askeri ya da sivil iletişim sistemlerine zarar vermek ya da bu sistemleri bütünüyle tahrip etmektir. Tasarlanma amacı öncelikle askeri muharebe alanlarında sınırlanmış bölgelerde kullanılabilmesidir.

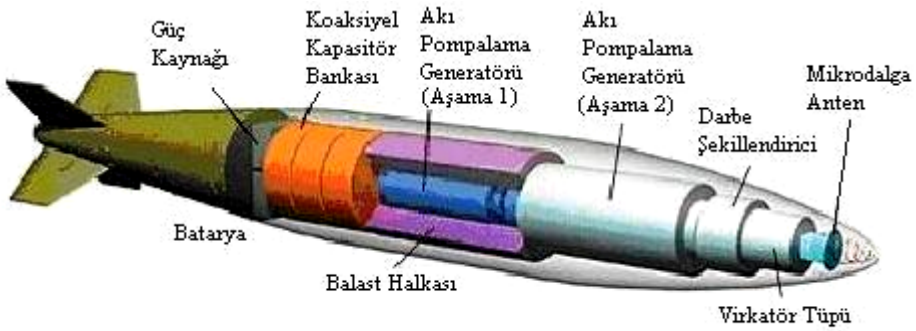
Yüksek güçlü elektromanyetik güç üretme teknikleri ve yüksek güçlü mikrodalga teknolojilerindeki gelişmeler teknik olarak elektromanyetik üreteçlerin stratejik ve taktiksel anlamda bir savaş gereci olarak kullanılmasını uygun hale getirmiştir. Yüksek sıcaklığa dayanabilecek süper iletken malzemelerdeki gelişmeler ile yüksek manyetik alanların oluşumu için gerekli olan akım değerlerine çıkılabilecektir. Bu nedenle, EMP üreteçleri insan ölümlerine direkt olarak sebebiyet vermeden düşmanın yenilmesinde bir araç olarak kullanılabilecektir [27].

Askeri sistemlerin her alanına giren teknolojik donanımların rolü oldukça önemlidir. Özellikle 2. Dünya Savaşı sonrasında teknolojideki gelişmelere paralel olarak askeri sistemlerin her alanında kullanılan elektrik, elektronik devrelere karşı oluşabilecek doğal veya yapay bozucu etkiler oldukça önem kazanmıştır. 20. yy'ın ortalarında yapılan yüksek irtifada nükleer silahların denenmesi sırasında EMP etkisi görülmüştür. Hareket halindeki bir uçağın düşmesi, radarların çalışmaması, askeri haberleşme sistemlerinin çökmesi gibi askeri konularda orduları zaafa düşüren ve savaşların kaybedilmesine neden olabilecek etkilerden biri EMP etkisidir. Bu da EMP'nin kontrollü olarak üretilerek geleceğin bir savaş aracı olması konusundaki çalışmaları hızlandırmıştır. Dolayısıyla askeri savunma sistemlerinde artık EMP etkisini göze alma gereği kaçınılmazdır. Bir savaş aracı olarak kullanılmak ve EMP karşısında sistemlerin dayanıklılığının denenebilmesi için EMP üreteçleri geliştirilmiştir [24].

4.1 Patlayıcı Biçiminde Pompalanmış Akı Pompalama Üreteçleri (FCG)

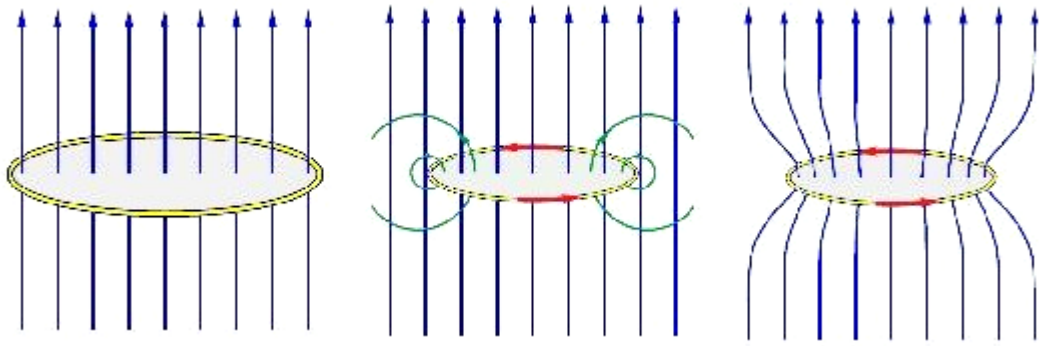
50'li yılların sonunda ilk FCG denemeleri Los Alamos Ulusal laboratuvarında, New Mexico, USA yapılmıştır. Bugünün teknolojik olarak en fazla tamamlanmış EMP üreteç teknolojisi olması muhtemeldir. Yıldırımın ürettiği akımın 100 katı büyüklüğünde akım üretilebilmektedir. 100 mikrosaniye süresi içinde megaJoullerce enerji üretilebilmektedir. 10'larca megaamper değerinde akım tepe değerlerine ulaşılabilmektedir.

Bir füzenin içine yerleştirilmiş FCG üreteci Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Silindirik bakır tüp şeklinde yapının içine yüksek enerjili patlayıcı doldurulmaktadır. Armatür ismi verilen kısmın etrafı stator ismi verilen sarmal bakır bobin ile çevrelenmiştir. Stator üzerinde kablolar ile yarıklar oluşturularak elektromanyetik endüktansın armatürde en iyi şekilde kullanılması amaçlanmıştır. Yapısal kılıf epoksi reçine ile güçlendirilerek şiddetli manyetik alan karşısında ilk aşamada FCG'nin parçalara ayrılmasını engellemek amacıyla kullanılmıştır. Bombanın ağırlığı, başlangıç akım kaynağı ve yükün taşınması FCG'nin esas teknik konularıdır. Başlangıç akımı maksimum değerine ulaştığı zaman patlama başlar ve patlama armatür içinde olur. Başlangıç akımı ayrılmış ve akım armatür içinde durdurulur. Böylece manyetik alan sıkıştırılarak endüktansın düşmesine neden olur. Bu sayede maksimum değerine parçalanmadan önce ulaşan çok yüksek bir akım darbesi üretilir. FCG genelde 1 MHz frekans değerini aşamaz. Hedef olarak belirlenen sistemlerin kullandığı frekans değeri 1 MHz değerinin oldukça ötesinde olduğundan, FCG saldırıcı amacıyla kullanılması zordur [26].



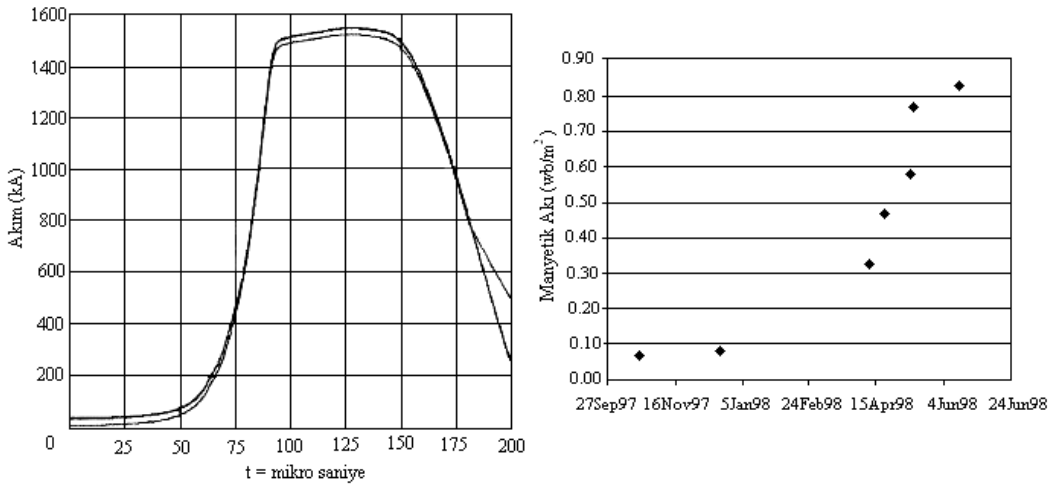
Şekil 4.2: FCG Üretecinin Füzeye Yerleştirilmesi [24]

Dış manyetik alan çizgileri kapalı yüzük şeklindeki mükemmel iletkenden geçmektedir. Yüzüğün çapı azaltıldığında, aynı oranda manyetik akı sayısı da azalır. Manyetik akı sayısındaki azalma kırmızı ile gösterilen bir akımın yüzük üzerinde oluşmasına neden olur ve yeni manyetik alan çizgileri oluşturur. Böylece yüzük içindeki toplam akı korunmuş olur. Dış manyetik alan ve oluşan alan yüzükteki manyetik akının miktarı değişmeden mükemmel iletken yüzükte bir akımın doğmasına neden olur (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: FCG Çalışma İlkesi [28]

Şekil 4.4'de 1995 yılında yapılan bir deneyde elde edilen FCG üreteci akım şekli görülmektedir. Bu deneme için 12,6 kA besleme akım kaynağı kullanılmıştır. Bu da 120 kA'e kadar akım elde etme olanağı vermiştir. Günümüzde akım ve enerji miktarları oldukça yüksek değerlere ulaşmakla beraber, bir diğer önemli nokta da yapılan denemeler sonucunda akı değerlerinde gün geçtikçe belirgin bir ilerleme olduğudur [28].



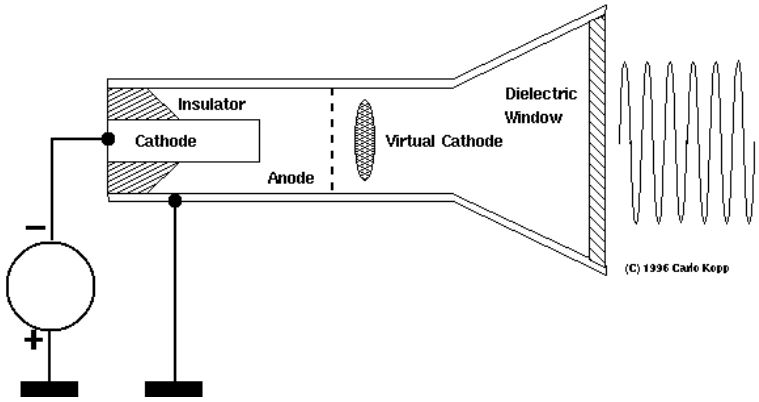
Şekil 4.4: Üreteç Çıkış Akım ve Akı Gelişim Grafiği [28]

Darbe güç teknolojisinde ileri hedef senaryoları yüksek güç ve enerji elde etmeyi başarmaktır. Patlayıcıların doğasında bulunan yüksek enerji yoğunluğu, açıkça daha kompakt olmalarını gerektirmektedir. Yükler yüksek empedans, yüksek gerilim darbeleri beklerken FCG, daha yavaş, düşük empedans, yüksek akım aygıtları besler. Sarmal FCG'de yapılan deneyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu araştırma sonucunda yeni nesil FCG tasarımında bozulma, üretecin sonunda yükün yakınlarındadır. Yeni nesil FCG çalışmaları araştırmalar ışığında devam etmektedir [28].

4.2 Virtuel Katot Osilatörleri (Virkatör)

Virkatörlerle çok güçlü tekil darbeler üretebilir ve bu araçlar nispeten daha geniş band mikrodalga frekanslarında çalışmaya olanak verir. Bu özelliği ile Virkatörler elektromanyetik bomba olarak kullanılmaya en uygun üreteçlerdir.

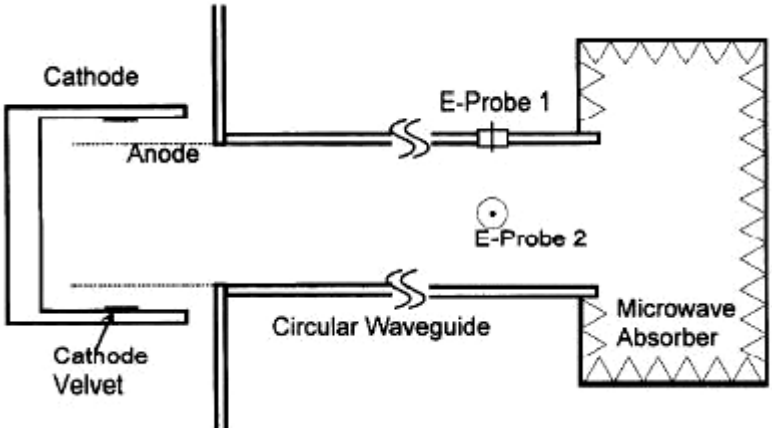
Virkatör'ün temel fikri yüksek akımlı elektron ışınlarını anot ızgarasına doğru hızlandırmaktır. Birçok elektron anot ızgarasını geçerek anodun arkasında uzay yükü bölgesini oluşturacaktır. Uzay yükü bölgesi ayarlı ve doğru olarak rezonans boşluğu içinde oluşursa, çok yüksek güç üretilir ve mikrodalga gücü ortaya çıkar. 3 GHz ile 30 GHz frekans bantlarında, 170 kiloWatt değerinden 40 GigaWatt değerlerine kadar yüksek güçlere ulaşılmıştır. Çıkış darbesi anot eridiğinden mikrosaniyeler mertebesini aşmaz (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: Virkator [21]

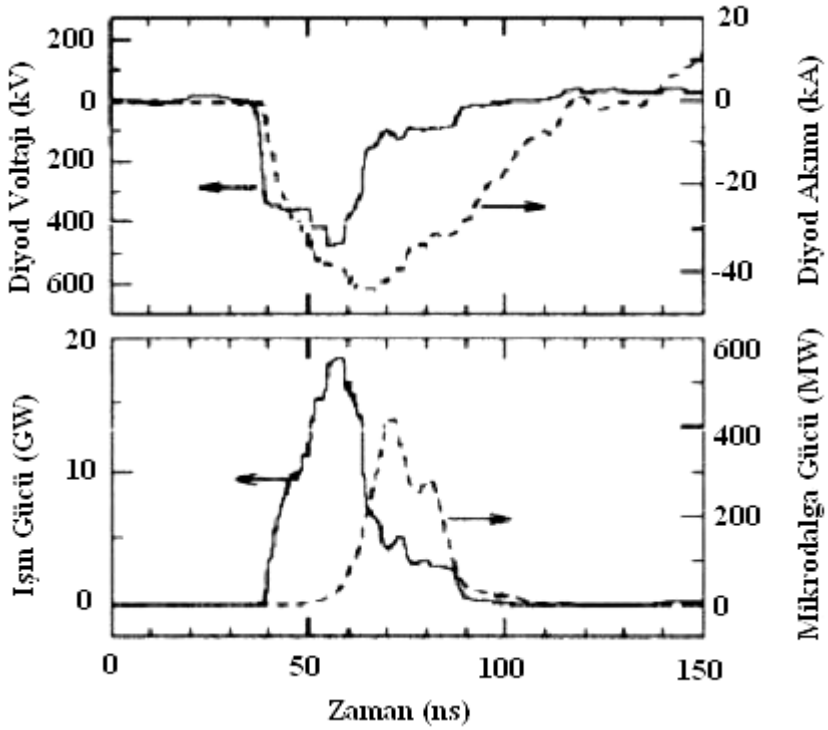
Şekil 4.6'da eksenel virkatör ile yapılan bir deneyin montaj şeması görülmektedir. Bu çalışmada Rus bilim adamları virkatörün farklı bir uygulamasını gerçekleştirmiştir. Eş eksenli olarak yerleştirilmiş anot ve katot, elektron ışınlarını dairesel frekans yönlendiricisine enjekte etmektedir. Elektron ışın akımı ve elektrik alanının kesiştiği yerde mikrodalga üretilmektedir. Bu yeni çalışmanın daha önceki virkatörlere göre bazı üstünlükleri vardır:

- Elektrik alan ve akım kesişim alanı frekans yönlendiricisinin uzantısında diyot alanın içinde gerçekleşmektedir.
- Elektron ışıması yalnızca enine (radyal) olduğundan, elektron ışıması boyunca yaşanan kayıpları ortadan kaldırır.
- Diyot alanının kesitinin büyük olmasına bağlı olarak, akım yoğunluğu daha önceki çalışmalara göre oldukça azalmıştır.



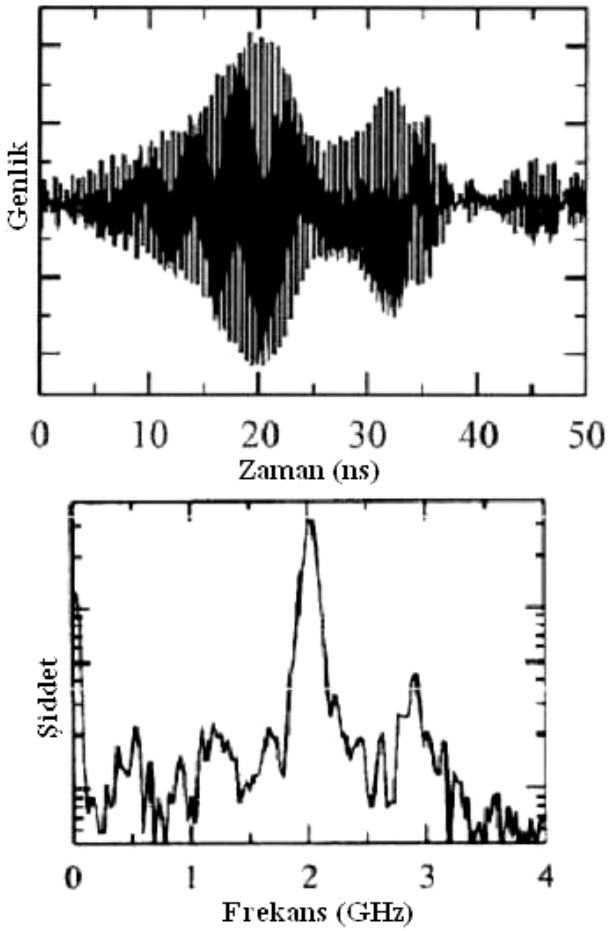
Şekil 4.6: Eksenel Virkatör Deney Montajı [29]

Teksas Teknik Üniversitesinde yapılan eş eksenli virkatör denemesinde, 500 kV ve 40 kA değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, 30 nanosaniye içinde elektron ışını diyoda ulaşmıştır. Çalışma sonucunda, elde edilen değerler Şekil 4.7'de verilmiştir. Diyot tepe gerilim değeri 500 kV ve tepe akım değeri 40 kA mertebelerindedir. Işımanın maksimum gücü 18 GW ve mikrodalganınki 400 MW civarındadır. Diyot ve mikrodalga gücü 25 ns'de tam gücüne ulaşmıştır. Mikrodalga gücünün tepe değeri elektron ışımasından 10 ns sonra gerçekleşmiştir. Fiziksel olarak meydana gelen bu gecikmenin sebebi bu çalışmada tam olarak anlaşılamamıştır [29].



Şekil 4.7: Tipik Dalga Şekilleri [29]

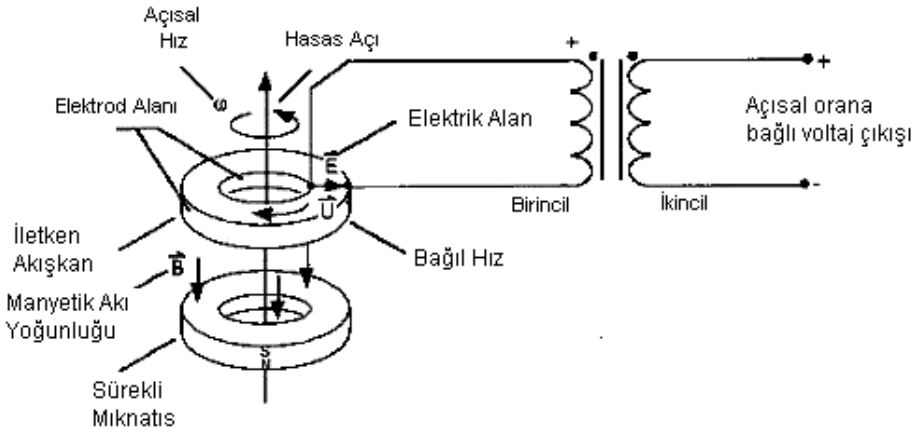
Şekil 4.8'de ise 8 GS/s örnekleme hızına sahip bir osiloskop ile alınan ölçüm şekilleri gösterilmiştir. Görüleceği üzere 2 GHz'lik mikrodalga frekans değeri elde edilmiştir [29].



Şekil 4.8: Mikrodalga Frekans Değeri [29]

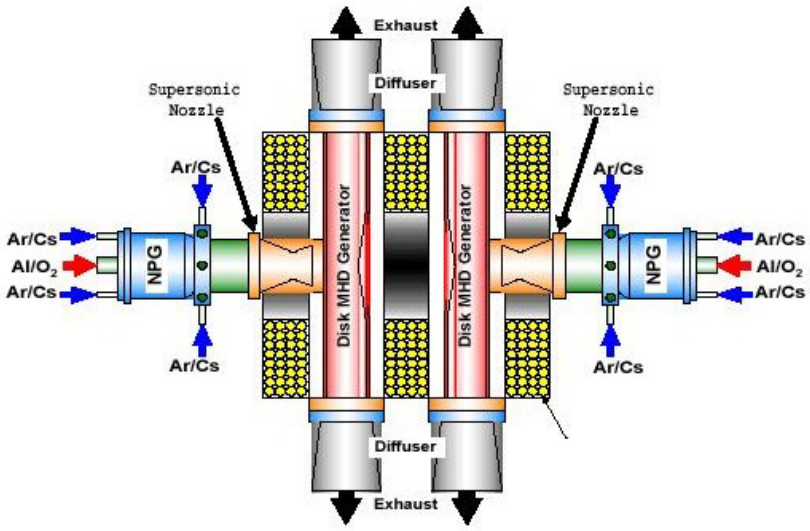
4.3 Patlayıcı ya da İtişli Yönlendirilen Magneto Hidrodinamik Üreteçler (MHD)

Bu üreteçler ısıl ya da kinetik enerjiyi doğrudan elektriğe çevirirler. En iyi yönü, yoğunluğu ve hareketli kısmının olmamalarıdır (Şekil 4.9). MHD manyetik alan ve akışkan bölümleri, elektriği yönetmek ve birbirine etkileşim içinde bulunmak amacıyla bulunur. Üretecin çalışması temel elektromanyetik ilkelerine dayanmaktadır. Manyetik alan ve elektrik akımı akışkan içinde kesiştiğinde, ikisine dik bir kuvvet ile akışkanı ileriye doğru harekete geçirmektedir.



Şekil 4.9: MHD'nin Manyetik Alanda İletken Akışkan Davranışı İlkesi [30]

Bölünmüş Faraday üreteçleri (segmented faraday generator), Hall üreteçleri (hall generator), köşegen üreteçleri (dioganal generator) ve disk üreteçleri (disk generator) olarak çeşitleri mevcuttur. Bu konu ile ilgili çalışmalar devam etmekte ve farklı yollar bulunmaya çalışılmaktadır.



Şekil 4.10: MHD Çalışma İlkesi [30]

Şekil 4.10'da taşınabilir alternatif kapalı çevrim disk MHD görülmektedir. Magnet bobini, disk kanalları arasına üç bölümde yerleştirilmiştir. Disk kanallarından biri bütün magnet bobinlerini uyarmaktadır. Diğer disk kanalı ise sadece güç çıkışı için kullanılmaktadır. Bu nedenle, çıkış gücü uyarma sisteminden bağımsızdır [30].

MHD üreteci düşük gaz sıcaklığı ile yüksek elektrik verimine bağlı olarak daha dayanıklı ve güvenilir bir tasarımdır. 5 saniyeden daha kısa bir yükselme zamanı beklenmektedir. Gaz sıcaklığının 2000 K'den düşük olması nedeniyle seramik

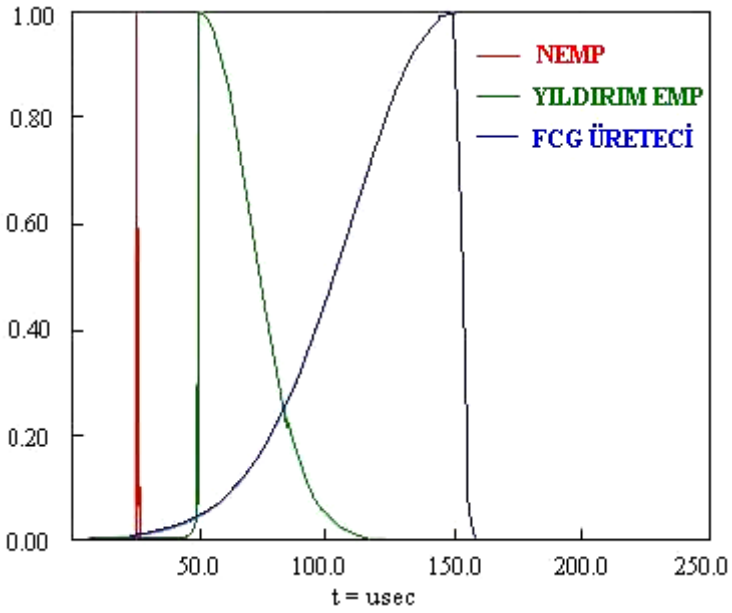
izolatör elektrik performansı sonucu oluşan 5000 K mertebelerindeki yüksek sıcaklığa problemsiz olarak dayanabilmektedir. Faraday ve disk üretecindeki elektrotlar karşılaştırıldığında, Faraday üretecinin biraz daha az dayanıklı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, kapalı çevrim disk MHD sistemi kullanılarak sağlamlık oldukça arttırılabilir. Bununla beraber, hareketsiz gazı ısıtma problemi mevcuttur. Bu amaçla, 1992'den beri dengesiz plazma üreteçleri (Non-equilibrium plasma generator) üzerinde çalışılmaktadır. Tablo 4.1'de bu çalışma ile ulaşılan değerler verilmiştir [30].

Tablo 4.1: Deney Üreteci Performansı

BÜYÜKLÜK	**DEĞER**
Termal Giriş	4,5 GW
Elektrik Çıkışı	0,5 GW
Entalpi	31 %
Çıkış Akımı	700 kA
Gaz sıcaklığı	2500 K
Gaz Basıncı	0,61 MPa
En Küçük Parça	0,0001
Manyetik Alan	5,0 T (Sabit)
İç Disk Çapı	2,4 m
Dış Disk Çapı	4,6 m
Kanal Yüksekliği	1 m

5. ELEKTROMANYETİK DARBELERDEN KORUNMA

Daha önceki bölümlerde söz edildiği üzere yapay yollarla üretilen elektromanyetik darbeler genel anlamda iki farklı kategoride incelenebilmektedir. Bunlar nükleer patlamalar sonucu oluşan elektromanyetik darbeler (NEMP) ve üreteçler vasıtasıyla üretilen elektromanyetik darbeler (EMP)'dir. Doğal yollardan üretilen yıldırım da aslında benzer bir elektromanyetik darbe şekline sahiptir.



Şekil 5.1: EMP Karşılaştırılması [21]

Şekil 5.1'de görüleceği üzere yıldırım, NEMP ve üreteçler ile üretilen EMP darbe şekilleri birbirine benzerlik göstermektedir. Aralarındaki en belirgin fark yükselme zamanlarıdır.

EMP'den korunma tamamen farklı bir mühendislik dalını oluşturmaktadır. Özellikle savunma sistemlerine yönelik korunma için yapılması gereken en önemli konu tehdidin tam olarak belirlenmesi gerekliliğidir. Tehdidin büyüklüğüne ve çeşidine göre alınacak önlemler farklılık gösterebilir. Örneğin, yüksek irtifada meydana gelecek bir nükleer patlama sonucu oluşabilecek elektromanyetik darbe ile karşı karşıya kalındığında öncelikli amaç haberleşme sistemlerinin tamamen devreden çıkmasına karşı alınacak önlemler olmalıdır. Daha önceden hazırlanmış sığınakların

tüm tehditlere karşı korunma düzeyleri arttırılmış yerler olması gerekmektedir. Bununla beraber daha yerel bir tehdit olarak bir ülke savunma sistemini sağlayan bir füze kalkanına atılacak olan bir elektromanyetik bombaya karşı alınması gereken önlemler farklılık gösterecektir. Bu durumda tehdit unsuru ile karşı karşıya olan sistemin EMP'den korunması gerekmektedir. Bu konu ile ilgili olarak çok çeşitli senaryolar yazılabilir. Senaryoya göre tüm öncelikli korunması gereken sistemler değişebilmektedir.

5.1 Genel Savunma Sisteminde EMP Kavramı

EMP etkisi ile oluşacak istenmeyen sonuçların önüne geçilebilmesi ya da zararlarının en aza indirgenmesi için, yapılan değerlendirmeler sonucunda ana stratejik hedefler, ülkenin sahip olduğu genel güvenlik politikaları içinde tanımlanmalıdır. Bunlar;

- Barış ve kriz durumlarında savunma stratejisinin belirlenmesi.
- Savunma sisteminde sahip olunacak caydırıcılık etkisi ile savaş tehdidinden uzak durmak (caydırıcılık).
- Savaş yönetimi.
- Zararların istenilen sınırlarda tutulması ve yaşamsal güvenlik.
- Düşman güçlerinin işgaline karşı direnç gösterebilme.

Genel savunma politikalarının başarıya ulaşabilmesi yetkililerin sorumluluğundadır. Genel savunma programı içerisinde EMP'nin yeri ve başarıya ulaşabilmesi bazı temel prensiplerin rehberliğinde ancak sağlanabilir. İki ana başlık altında bu durumlar incelenebilir.

5.1.1 Alçak İrtifada NEMP

Ülkelerin askeri savunma kapasiteleri ve hayatta kalmaları, korunma yapılarının ve askeri donanımlarının EMP'ye karşı korunma düzeylerine bağlıdır. Aşırı basınç ve şok gibi etkilerin yarattığı sonuçlar örnekler içerisinde verilebilir.

Askeri savunma yetkilileri ve ulusal yöneticiler aşağıda belirtilen öncelik sıralamasına göre sistemlerin ve yapıların yeterince korunduğunun garantisini vermek zorundadır.

- Askeri korunmuş yapılar (komuta merkezleri, kolordu, lojistik binalar, sığınaklar vb.).
- Askeri silah sistemleri ve hava kuvvetleri.
- Sivil savunma olanakları (korunaklı yapılar), sivil savunma organizasyonları (hastane, postane) kişisel barınaklar haricindeki genel barınaklar.
- Ulusal, bölgesel ve yerel yayınlar.
- Ulusal bilgisayar merkezleri.

Tablo 5.1'de amaçlar, yönetimsel ilkeler ve EMP koruma ölçümleri için öncelikler özetlenmiştir.

Tablo 5.1: Düşük İrtifada NEMP'den Korunma

Amaç	Ülkenin ve askeri savunma sisteminin kontrolünün korunması ve yaşamların korunması
Yönetim İlkesi	Zorunlu sistemlerin en üst sınırlarda NEMP'ye karşı korunması
Öncelikler	1. Ulusal, bölgesel ve yerel yayınlar 2. Genel savunma sistem haberleşmesi 3. Ulusal güç dağıtım merkezlerinin korunması 4. Ulusal ulaşım sistemlerinin korunması 5. Askeri silah sistemlerinin korunması 6. Sivil üretim olanakları, ekonomik kaynaklar 7. Ulusal bilgi merkezleri 8. İş hayatı elektronik sistemleri, ticaret ve endüstri

5.1.2 Yüksek İrtifada NEMP

Yüksek irtifada meydana gelecek bir nükleer patlama sonucu oluşacak darbe (NEMP) etkilerine karşı korunma biçimi, ancak askeri savunma kapasitelerinin ve ülkenin kontrolünün garanti edilebilmesi sayesinde amacına ulaşabilecektir. Bu noktada önemli olan unsur, zorunlu yapılması gereken işlevlerin en az limitleri karşılayabilecek şekilde belirlenmesidir.

Ulusal temel sistemlerin korunmasının ekonomik önem derecelerine göre sıralaması aşağıda yapılmıştır.

- Ulusal, bölgesel ve yerel yayınlar
- Genel savunma sistemleri
- Ulusal güç dağıtım merkezleri
- Ulusal ulaşım sistemi
- Askeri silah sistemleri ve hava kuvvetleri
- Önemli sivil endüstri merkezleri ve ulusal ekonomik merkezler
- Ulusal bilgi bankaları
- Elektronik ve bilgisayar sistemleri (iş hayatı, ticaret ve endüstri)

Tablo 5.2'de amaç, ilke ve öncelikler bakımından yüksek irtifada oluşacak NEMP'ye karşı korunma beklentileri belirtilmiştir.

Tablo 5.2: Yüksek İrtifada NEMP'den Korunma

Amaç	Askeri savunma kapasitelerinin ve halk yaşamının korunması
Yönetim İlkesi	NEMP ve diğer nükleer silah etkilerine karşı korunma
Öncelikler	1. Askeri korunaklı yapılar 2. Askeri silah sistemleri 3. Sivil savunma olanakları 4. Ulusal, bölgesel ve yerel yayınlar 5. Ulusal bilgisayar merkezleri

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'den görüleceği gibi, alçak ve yüksek irtifada bir nükleer patlamada oluşacak NEMP etkileri bir çok sistemi etkilemektedir. Fakat buradaki farklılıklar önceliklerin değişmesidir. Yüksek irtifada meydana gelecek bir nükleer patlama etkisi sanayileşmiş ülkeler için geniş, tehlike potansiyeli oldukça yüksek zararlı etkiler içermektedir. Bunun nedeni, nükleer patlama sonucu oluşan NEMP'nin etkilerinin yeryüzünde görünecek olmasıdır.

5.2 EMP'den Korunma İçin Temel Teknik Adımlar

Yüksek irtifada meydana gelebilecek nükleer patlamalar sonucu oluşacak NEMP, düşük irtifada meydana gelebilecek nükleer patlamalar sonucu oluşacak EMP ve üreteçler vasıtasıyla üretilen EMP'ye karşı korunma amaçlarının belirlenmesi öncelikle önceliklerin belirlenmesi ile mümkündür. Bu üç farklı senaryoya göre belirlenen öncelikler korunma amacına ulaşabilmek için alınması gereken önlemler için oldukça gereklidir.

Bir nükleer patlama sonucu oluşabilecek darbe etkisine karşı alınabilecek önlemlerden birisi yayın yoluyla halka ve liderlere bilgi verilmesidir. Halka verilecek bilginin çok büyük önemi vardır.

Bir diğer alınabilecek önlem ise, tüm haberleşme sisteminin olumsuz yönde etkileneceği ve çalışamaz hale geleceği düşüncesiyle oluşturulacak acil durum haberleşme sistemleridir. Bu sisteme, savunma komitesi olarak belirlenen önemli kişiler dahil edilmelidir. Fiber optik kablolar vasıtasıyla kurulacak olan haberleşme sistemi sayesinde ilgili acil durum haberleşmesi zarara uğramayacaktır.

Elektrik güç sistemlerinin korunması da oldukça önemlidir. Bununla beraber, tüm güç sistemini teknik yollarla korumak maliyet açısından uygun değildir. Bu noktada kontrol merkezlerinin korunması oldukça önemlidir.

Bir diğer önemli konu ise ulaşım sistemidir. Ulaşım ekonomi için oldukça önemli olmakla birlikte, askeri savunma sistemi için de oldukça önemlidir. Bu nedenle, acil durum ulaşım sistemi denemeleri yapılmalı ve bu konuda çalışmalara yoğunluk verilmelidir. Ulusal demiryolu sistemlerinde çalışan trenlerin ilgili testler altında çalışmaları kontrol edilerek prosedürler oluşturulmalıdır.

Bilgisayar sistemleri NEMP etkisine karşı oldukça duyarlıdır. Bununla beraber, sanayileşmiş toplumlarda varlıklarını her durumda devam etmeleri gerekmektedir. Bu nedenle EMP'den tamamen korunmuş bilgisayar merkezlerinin yönetici konumundaki kişiler için yapılması bir zorunluluktur [31].

Yukarıda söz edilen savunma kategorileri aslında yönetimsel anlamda önem derecesine göre alınması gereken önlemlerin nerelerde yoğunlaşması gerektiği konusunda yapılan planlamalardır. Bu planlamaların ülke yöneticileri tarafından ilgili teknik personel ile birlikte yapılması gerekmektedir.

EMP'nin direkt etkileri ele alındığında ekranlamanın iyi bir çözüm olacağı bilinmektedir. Fakat EMP'nin iletken malzemeler ile yapılmış borularda indüklediği elektriksel işaretleri kontrol altına alabilmek genelde zordur.

Yalıtkan malzemeler kullanılarak yapılmış borular kullanıldığında indüklenen EMP'den korunmak mümkündür. Güç sistemlerinin korunmasında da fazla zorluk bulunmamaktadır. Fakat haberleşme sistemlerinin EMP'nin indüklediği elektriksel işaretlere karşı korunması zordur. Çok küçük kayıplar parametre değerlerini değiştireceğinden sistem çalışması yıkıma uğrayacaktır. Bu nedenle telefon hatları fiber optik kablo ile döşenmelidir.

EMP'ye karşı ekranlama etkinliğinin ölçülebilmesi için gerçekte bir EMP sinyali ya da analiz değeri kullanılmalıdır. Genel olarak darbeyi üretmek oldukça zordur. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki ekranlanmış yapıların darbeye karşı etkinliği, sürekli dalgaya göre daha yüksektir. Bu nedenle sürekli dalga kullanılarak ekranlama etkinliği ölçümü yapılmalıdır.

5.2.1 Direkt Etkilere Karşı Korunma

Yüksek irtifada ya da yeryüzüne yakın bölgelerde meydana gelen nükleer patlamalar sonucu oluşan NEMP korunma için önemlidir. Yeryüzüne yakın yerlerde meydana gelecek nükleer patlamalar sonucunda yüksek değerde manyetik alan oluşturur, buna karşı korunacak bölge tamamen çelik plakalar ile kaplanmamalıdır. Çelik plaka kalkanı doyuma ulaşabileceğinden koruma etkisini kaybedebilir. Bu nedenle korunması düşünülen bölge (sığınak) genellikle yapısal anlamda güçlendirilerek inşa edilmelidir. Yapının her bölgesi eşit değerde ekranlama etkinliğine sahip olmalıdır. Başka bir deyişle, düşük ekranlama alanı oluşturulmalıdır. Bazı donanımlar EMP'ye karşı çok daha duyarlıdır. Bunlar bilgisayar ve elektrik, elektronik sistemlerdir. Duyarlılığı yüksek donanımların kurulduğu bölge ya da alanlar, bölgesel olarak ekranlanmalıdır. Genellikle bu tip odalar çelik plakalar ile kaplanmak suretiyle ekranlama etkinliği çok yüksek hale getirilir.

Sığınakların her alanının ekranlanmasında çok dikkatli olunmalıdır. Hiçbir ayrıntı gözden kaçırılmamalıdır. Her alan için eşit değerde ekranlama etkinliği olduğu garanti edilmelidir. Kapılar, aralar ve boru hatları gibi farklı alanlar eşit olarak ekranlanmalıdır. Ortalama ekranlama etkinliği düşmemelidir.

5.2.2 Dolaylı Etkilere Karşı Korunma

EMP tarafından oluşan yüksek akım değerlerinin oluşturduğu elektromanyetik alanların metal boru hatları üzerinde indüklediği geçici elektriksel işaretlere karşı korunma gerekliliği vardır.

İndüklemenin azaltılması için mümkün olduğunca metal olmayan malzemeler kullanılmalıdır. Genel olarak sadece epoksi reçine ile yalıtımı arttırılmış parçalar girişte kullanılmaz. Çıkışlarda yalıtımı yapılmış metal kısımlar topraklanır. Böylece indüklenen geçici işaretlerin toprağa yönlenmesi sağlanmış olur. Normalde giriş ve çıkış yarıiletken bez parçası ile sarılır. Fakat en iyi yol havalandırma borularının içinin metal olmayan malzeme ile kaplanmasıdır. Örneğin, cam elyaf kaplama bunun için uygundur.

Duyarlılığı yüksek sistemlerin indüklenen EMP'ye karşı korunması önemli bir zorunluluktur. Bunlar, güç dağıtım sistemleri ve haberleşme sistemleridir. Bu iki sistemi başlangıçta birbirinden bağımsız olacak biçimde kurmak gerekmektedir. Komple ayrım noktaları çelikten yapılan ve topraklanan kısımlar ile birbirinden ayrılmalıdır. Güç hattı sistemi çelik borulardan tamamen yalıtılmış olmalıdır. Bunun için filtreleme ve elektronik koruyucu devreler kullanılmalıdır. Gerçekte bir dizi korunma yöntemi vardır. Güç dağıtım sistemi dışında oluşan indüklenen EMP topraklama ile elektromanyetik yayılımın toprağa doğru akması sağlanmalıdır.

Koruyucu elektronik devreler çeşitli bölgelere konulabilir. Güç beslemesi girişine, dağıtım panolarına ve dağıtım kutularına koruyucu elektronik devrelerin konması sistem güvenilirliği için gereklidir. Besleme sistemine ait güç faktörünü yükseltme amacıyla kullanılan kompanzasyon panoları sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu panolarda kondansatörler genel olarak üçgen bağlantılıdır. İndüklenen EMP'den korunmak isteniyorsa üçgen bağlantı yıldız bağlantı olarak değiştirilmelidir.

Haberleşme sistemi de güç dağıtım sistemlerinde olduğu gibi benzer biçimde bağımsız çelikten bir kafesle kaplanmış, topraklanmış ve komple ayrılmış bağımsız bölümlerden oluşturulmalıdır. Filtreleme ve elektronik koruma devreleri adımları güç sistemleri korumasına benzerdir. Bununla birlikte haberleşme sistemlerinin talep ettiği elektronik devre koruma sistemleri güç dağıtım sistemlerinde uygulanandan çok daha yüksek koruma duyarlılığına sahip olmalıdır. Bunun nedeni haberleşme sistem kayıplarının olabildiğince düşük olma gerekliliğidir. Aksi takdirde, anten

besleme parametreleri değişecek ve sonucunda haberleşme sisteminin normal olarak çalışması yıkıma uğrayacaktır. Aynı şekilde sistemin normal olarak çalışabilmesi için kullanılacak filtreler de oldukça önemlidir. Ayrıca haberleşme sistemleri için zor olan diğer bir problem ise telefon kablolarıdır. Telefon hatları oldukça fazla yaygın olduğundan sistemi korumak oldukça zordur. Bu nedenle telefon hatları için en ideal çözüm fiber optik kabloların kullanılmasıdır.

5.3 EMP Dayanıklılık Testleri

NEMP ve EMP'ye karşı donanımların korunması için gerekli olan en önemli unsurlardan biri söz edildiği gibi gerekli önlemlerin alınıp, sistemlerin dayanıklılıklarının arttırılması gerekliliğidir. Donanımların dayanıklılıklarının arttırılmasında aşağıda belirtilen adımlara dikkat edilmelidir.

1. Sistem dayanıklılığını arttırırken gelecek sistem değişikliklerini dikkate almak.
2. Bakım, gözetme, test prosedürleri ile sistem dayanıklılığından iyice emin olmak.
3. Elektromanyetik dayanımı arttırılmış sistemler çalışırken ya da çalışmıyorken yapılacak ölçümlerle dayanıklılığından emin olmak.
4. Belgelemenin her aşamada dikkatlice yapılarak amaca ulaşılmış olduğunu kabul etmek [21].

Yukarıda belirtilen adımların en önemlisi yapılan iyileştirme ve hazırlıklar sonucunda yapılanların amacına ulaşıp ulaşılmadığının test edilmesidir. Cihazların ve sistemlerin EMP'ye karşı dayanıklılığı özellikle kritik askeri sistemler için bir zorunluluktur. Sistemlerin dayanıklılığı ise ancak platform seviyesinde uygulanacak ışıma yoluyla yapılan testlerle gerçekleştirilir. Bunun için EMP'ye benzer elektromanyetik dalgalar EMP simülatörleri ile test edilmek istenen sistem ve donanımlara çalışıyorken ve çalışmıyorken uygulanmalıdır. Işıma yoluyla elektromanyetik enerjinin hedefe yönlendirildiği EMP simülatörleri üç farklı tipte olabilir:

- Kılavuzlanmış dalga
- Dipol anten

- Hibrit sistem

Kılavuzlanmış dalga simülatörleri daha düşük gerilimlerle daha yüksek alanların üretilmesi için idealdir. Ancak platformun boyutu büyüdükçe kaçınılmaz olarak dipol anten tipi simülatörler de kullanım alanı bulmuştur.

EMP simülatörlerinde genelde "Marx Üreteçleri" kullanılmaktadır. Dünyada gerçek sistemler üzerindeki deneyleri yapabilecek EMP simülatörü sayısı 50'nin altında olup bunların ancak yarısı hava araçları testinde kullanılabilir. Sistem testlerinde kullanılan EMP simülatörlerinin üreteç tepe gerilimleri en az 1 MV olup 8 MV'a kadar çıkanları mevcuttur.

Ülkemizde bu konuda somut test talepleri haberleşme şalterlerinin testiyle ilgi olarak gündeme gelmiştir. İtalya'da kurulu CISAM EMP simülatörü kara araçları testi için yeterli bir örnek olarak dikkati çekmektedir.

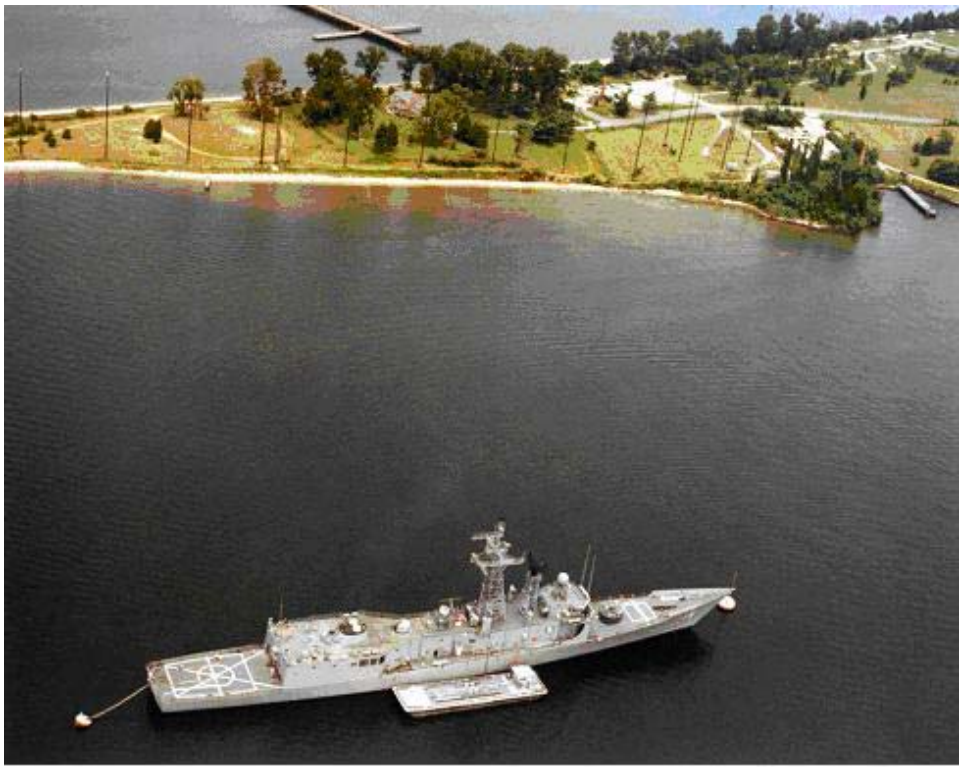


Şekil 5.2: İtalya CISAM EMP Simülatörü [17]

Bu simülatörde 6 m yüksekliğinde, 10 m uzunluğunda ve 10 m genişliğindeki boyutlara kadar boyutları olan sistemlerin testi yapılabilmektedir. Simülatörün en yüksek noktası 22 m'dir. Uzunluğu ise 120 m'dir. Simülatörde kullanılan üreteç 1,3 MV'luk bir Marx üretecidir [17].

Bu konuda ABD'deki çalışmalar oldukça ileri seviyededir. 1980 yılında ilk olarak test çalışmaları için Nex Mexico'da TRESTLE ismiyle bir tesis kurmuştur. Yeni hava araçlarının EMP'ye karşı testi amacıyla kurulmuştur. Daha sonra EMPRESS 1 ismiyle ikinci bir tesis Maryland'da kurulmuştur. Bu tesiste de firkateynler ve küçük destroyerler EMP etkisine karşı dayanıklı olup olmadıkları test edilmektedir. Fakat

deniz kuvvetlerinin EMPRESS 1'i yeterli görmemesi üzerine tüm boyutlarda gemileri EMP'ye karşı test edebilmek için EMPRESS 2 kurulmuştur. Ayrıca, Harry Diamond laboratuarında ve Savunma Nükleer Şubesinde çalışmalar EMP etkilerini etkisiz kılmak için devam etmektedir [21].



Şekil 5.3: ABD EMPRESS 1 EMP Simülatörü [25]

Ülkemizde ise EMP simülatörü bulunmamaktadır. Askeri helikopterler, fırkateynler, destroyerler, uçaklar gibi önemli askeri araçlar EMP etkisine karşı güçlendirilmiş olarak imal edildikten sonra, ilgili araçların EMP simülatörleri ile test edilmesi gerekmektedir. Bu testlerin yurtdışında yaptırılması güvenlik açısından sorun teşkil etmektedir [17].

6. ELEKTROMANYETİK DARBELERDEN KORUNMA TEKNİKLERİ

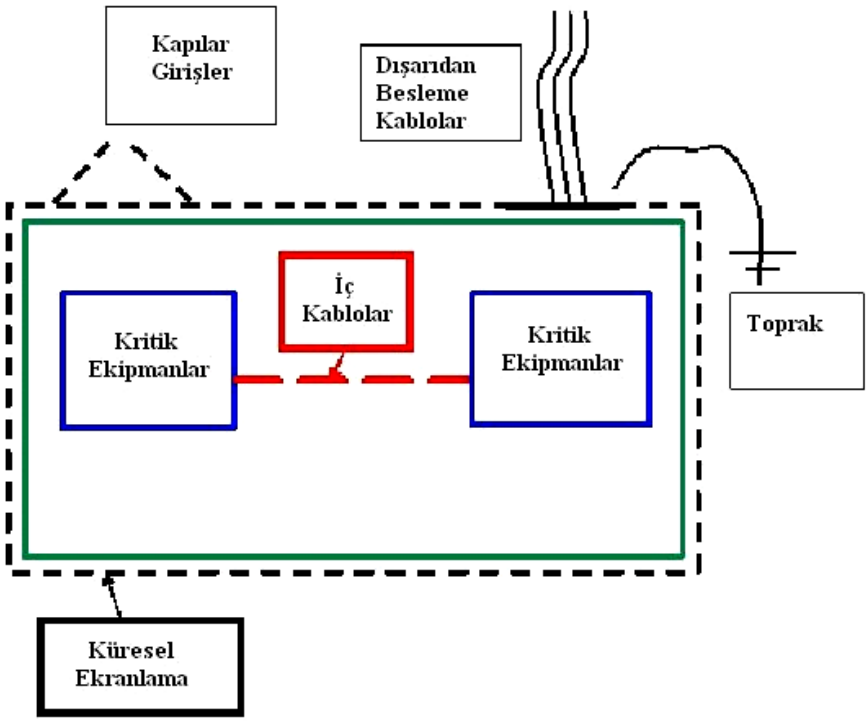
EMP'nin iki temel etkisi vardır; doğrudan etkiler ve dolaylı etkiler. EMP'nin oluşturduğu akım yoluna doğrudan maruz kalma sonucu; bir sistemin fiziksel yapısının; elektrik-elektronik cihazlarının hasar görmesi doğrudan etkileri olarak değerlendirilir. Bu etkiler delinme, yırtılma, bükülme, yanma, buharlaşma ve donanımın patlamasını içerir. EMP'nin dolaylı etkileri ise EMP'nin oluşturduğu elektromanyetik alanların iletkenler üzerinde indüklediği geçici elektriksel işaretlerin elektrik-elektronik devreler üzerindeki girişim etkisidir.

EMP etkisiyle elektrik-elektronik sistemlerde ya kalıcı hasarlar ya da bir süre donanımın kullanılamayacağı geçici hasarlar meydana gelir.

Yüksek güç ve yüksek gerilim yarı iletken aygıtları, tümleşik devreler, yarı iletken aygıtlar, bilgisayarlar, dijital devreler, alarm sistemleri ve elektronik sensörler EMP'ye karşı en dayanıksız elektronik donanımlardır. Genel olarak elektronik donanım boyutundaki küçülmeler gerilim ve akım emilimi yeteneğini azaltır. Sonuç olarak, EMP'ye karşı duyarlılığı artmış olur. Vakum tüplü donanımlar, indüktörler, tüplü vericiler ve alıcılar, düşük akım röleleri ve anahtarlamaları daha az hassastır. Yüksek gerilim için tasarlanmış olan motorlar, transformatörler, radarlar, röleler, lambalar ve devre kesicileri EMP'ye karşı dayanıklı donanımlardır.

Diğer düşünülmesi gerekli olan değişkenler EMP enerjisini üzerine daha fazla çeken yapılar ve malzemelerdir. Bunlar kablolar, teller, antenler, borular, metal yapılar ve demiryolları gibi malzemelerdir. Maddenin elektrik özelliğine, boyutuna ve şekline göre EMP enerjisini çekme kapasitesi artar. EMP enerjisi toplayıcı malzemelerin üzerinden fiziksel olarak doğrudan duyarlı donanıma ulaşır ya da dolaylı olarak indükleme ile duyarlı donanıma iletilir [21].

Şekil 6.1'de şematik olarak EMP'den korunma yerleri gösterilmiştir. EMP etkisi ile dolaylı ya da doğrudan etkilenebilecek devreler öncelikli olarak duyarlılık ve önem derecesine göre sınıflandırılması gerekmektedir. Alınması gereken önlemler yatırım maliyetini arttıracağından duyarlılık sınıflandırması oldukça önemlidir.



Şekil 6.1: EMP'den Korunma Şematik Diyagramı [21]

EMP'ye karşı en etkili korunma yöntemi aslında EMP kaynağının yok edilmesidir. Bu çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, EMP'den etkilenecek sistemler elektromanyetik etkilere karşı güçlendirilerek gerekli önlemler alınmalıdır.

Teknoloji, 1960'ların başından beri EMP etkilerine çare bulmaya çalışmaktadır. Elektronik donanımları EMP'ye karşı korumak için iki temel sistem vardır. Birincisi ekranlama diğeri ise EMP'ye karşı donanımların dayanıklılıklarını arttırma çalışmalarıdır. Ekranlama için birçok farklı yaklaşım vardır. Birinci yöntem hacimsel ekranlamadır. Korunma için en etkili yöntem, kritik devreleri içeren bölgenin tamamının Faraday kafesi olarak bilinen iletken bir kutunun içine alınmasıdır. Şekil 6.2'de yapılan bir deneyde içinde insan bulunan Faraday kafesine uygulanan etki karşısında korunması gösterilmiştir. Van de Graaff generatörü ile üretilen yüksek gerilimin uygulanması sonucu oluşan elektrik alan kafes şeklindeki iletkenden geçemeyerek içindeki insana zarar verememektedir. Aslında Faraday kafesinin günümüzde bilinen en güzel örneği uçaklardır. Uçaklara sıklıkla meydana gelen yıldırım çarpması sonucu yolcular ve uçak zarar görmez. Uçağın metal gövdesi içinde bulunan canlıları ve devreleri korumaktadır. Bu nedenle güçlü bir yanıcı ya da patlayıcının olmadığı bir araba fırtınalı havalarda güvenilir bir yerdir [32].



Şekil 6.2: Faraday Kafesi [32]

Bununla beraber, devrelerin büyük bir çoğunluğu güç beslemelerini ve haberleşmelerini iletkenlerle yapmaktadır. Bu da giriş noktalarında oluşabilecek geçici gerilimlere karşı devrelerin korunması gerekliliğini doğurmaktadır. Aksi halde geçici olumsuz etkiler devrelerin dış sistemlerle bağlantısını sağlayan besleme ve iletişim kabloları vasıtasıyla sistemlere zarar verebilir.

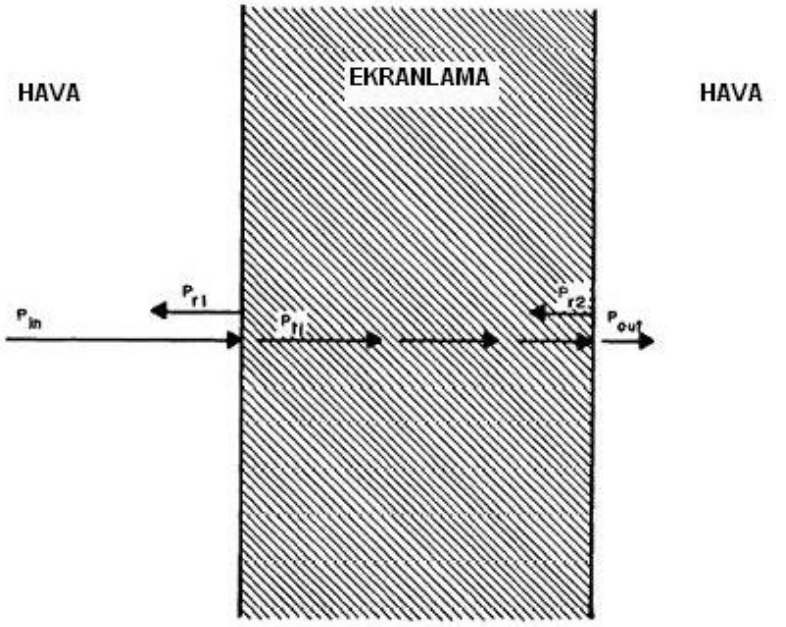
Ekranlama için ikinci yöntem yerel ekranlamadır. Kablolar, elektronik devreler kendi ekranı içinde ekranlanır. Her donanım kendi başına elektromanyetik korunmaya sahip olur. Sonucunda EMP'nin donanım ve kablo üzerinde indüklediği akım yönü değiştirilerek kablo ekranı üzerinden toprağa verilerek hassas donanımlar korunmuş olur. Ekranlama, hassas donanımların elektromanyetik alanlara karşı korunmasında gerilimin azaltılarak elektronik donanıma doğru yeniden oluşmasını engeller [21].

Diğer bir süreç ise EMP'ye karşı hassas elektrik-elektronik sistemlerin dayanıklılık seviyelerinin arttırılmasıdır. Yerel olarak donanımların dayanıklılıklarının arttırılması, aslında yerel olarak yapılmış ekranlama olarak sayılabilir. EMP'den korunmak için teknik yaklaşımlar şöyledir.

6.1 Ekranlama

Ekranlama teorisi mühendislik hesaplamaları içinde analog iletim hatları kuramını temel alan en iyi uygulamalardan biridir. Şekil 6.3'de P (watt/m^2)'ye sahip olan bir elektromanyetik dalganın ekranlı bir duvara çarptığı görülmektedir. Dalga ekranın birinci yüzeyine ulaştığında giriş gücü olan P_{in}, P_{rl} olarak kaynağa doğru yansır. P_{tl} gücü ekrana girer ve ekran içinde yayılmaya devam eder. Yansıyan güç ile başlangıç

gücünün oranı (P_{r1} / P_{in}), ekranlama malzemesinin öz empedansına ve dalganın empedansına (elektrik alan şiddetinin manyetik alan şiddetine oranına) bağlıdır. Ekran içinde iletilen kısım (P_{t1}), iletim sırasında ısıya dönüşerek bir kısmını kaybeder. Buna enerjiye soğurma kaybı denir. Ekranın ötesinde yüzey boyunca hareket eden yansımış olan güç P_{out} olarak adlandırılır. Soğurma kaybı 10 desibelden küçük ise ikinci yüzeydeki yansıyan gücün önemli kısmı birinci yüzeye tekrar geri döner. Her iki yüzeyde de gücün bir kısmı iletilirken bir kısmı yansımaya uğrar. Bu da ekranlama üzerindeki yayılan toplam enerjinin artmasına neden olur [33].



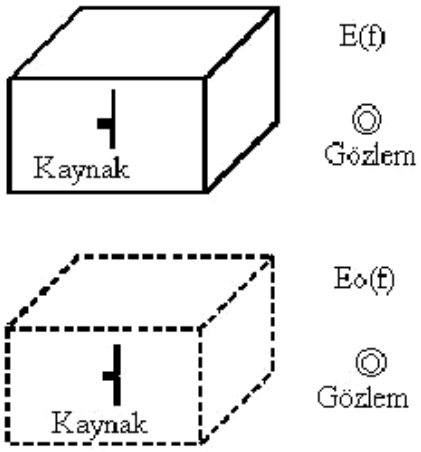
Şekil 6.3: Ekranlamanın İletim Hattı Modeli [31]

Ekranlama etkinliği ne kadar elektromanyetik alan şiddetini sönümleyebildiği ile ilgilidir. Ekranlama etkinliği (SE) ekranlama yapılmadan önceki elektromanyetik alan şiddetinin ekranlama yapıldıktan sonraki elektromanyetik alan şiddetine oranı olarak tanımlanır. Desibel olarak etkinlik değeri Denklem (6.1)'de verilmiştir.

$$SE = 20 \cdot \log \frac{E_1}{E_2} = 20 \cdot \log \frac{H_1}{H_2} = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \qquad \textbf{(6.1)}$$

E_1 elektrik alan şiddeti, H_1 manyetik alan şiddeti ve P_1 elektromanyetik dalga güç yoğunluğu değerleridir. Etkinlik değeri (SE), Şekil 6.4'te gösterildiği gibi kaynak ile etkilenen öğe arasında ekran yok iken ölçülen (ya da hesaplanan) elektrik alan şiddetinin ekran varken oluşan alan şiddetine desibel (dB) olarak oranı şeklinde

tanımlanmaktadır. Yüksek SE iyi ekranlama etkinliği anlamına, negatif SE ise rezonans yani ekranlama bir yana işaretin kuvvetlenmesi anlamına gelmektedir [27].



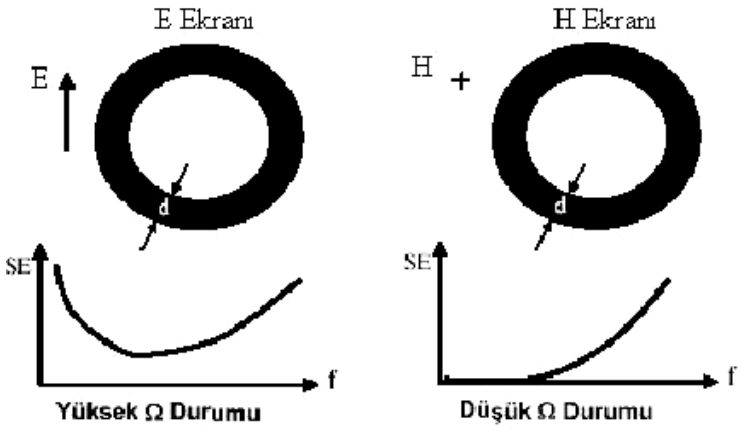
Şekil 6.4: Ekranlama Ölçümü [27]

Ekranlama; kart, devre ya da cihaz düzeyinde iki ortamı birbirinden elektromanyetik anlamda yalıtmak olarak tanımlanır. Ekranlamanın etkili olması ekranlanacak kaynağın cinsine bağlıdır. İki tip girişim kaynağı söz konusudur;

- Elektrik dipolü gibi davranan kaynaklar.
- Manyetik dipol gibi davranan kaynaklar.

İçinden akım akan iletkenler elektrik dipol gibi, içinden akım akan halka şeklindeki iletkenler ise manyetik dipol gibi davranır. Elektrik dipol yakınında güçlü elektrik alan, manyetik dipol yakınında ise güçlü manyetik alan oluşur. Uzak alanda iki kaynağın etkileri açısından bir fark yoktur. Bu nedenle, elektrik dipol gibi davranan girişim kaynağı yakınında elektriksel ekranlama, manyetik dipol gibi davranan girişim kaynağı yakınında manyetik ekranlama gereklidir.

Ekranlama etkinliği açısından bu iki kaynağın karşılaştırması Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Özdeş ve kalınlığı d olan iki metal silindir görülmektedir. Silindirlerden birinin yakınında yüksek elektrik alan yaratan elektrik dipolü bulunurken diğerinin yanında ise yüksek manyetik alan yaratan bir manyetik dipol yer almaktadır. Her iki silindir için ekranlama etkinliğinin frekansla değişimi Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Metal silindirin ekranlama etkinliği elektrik dipol tipi girişim kaynakları için alçak frekanslarda yüksek iken manyetik dipol tipi girişimler için ekranlama etkinliği neredeyse yok olmaktadır. Yüksek frekanslara çıkıldığında ise her iki tip kaynak için de ekranlama etkinliği frekans arttıkça artmaktadır [1].



Şekil 6.5: Elektrik ve Manyetik Dipoller İçin Ekranlama Etkinliğinin Karşılaştırılması [1]

6.1.1 Manyetik Alanı Ekranlama

Uygulama bakımından ekranlama düşük frekanslarda (f < 30 MHz) önemlidir. Manyetik ekranlama da zayıflama frekansla artar. Ekran içindeki direnç mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Delikler ve açıklıklar daha az önemlidir [34].

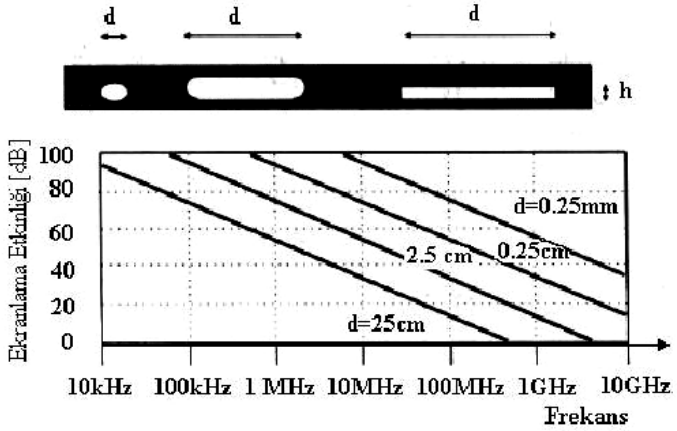
6.1.2 Elektrik Alanını Ekranlama

Uygulama bakımından ekranlama yüksek frekanslarda da (f > 30 MHz) önemlidir. Delikler ve açıklıklar frekansa bağımlı olarak önemlidir. Kablo bağlantısı ya da havalandırma nedeniyle bırakılan açıklıklar ekranlamayı etkiler. Değişik kaynaklarda verilen yaklaşık formüller genelde yarık sayısı ve uzaklığa bağlı olarak ekranlama etkinliğini verir. Sorun bu formüllerin birkaç ölçme ile test edilememesidir. Çoğunlukla teori ile uygulama arasında 30 dB'den büyük farklar gözlenir. Bunun nedeni verilen formüllerin hangi uzaklık ve konumda geçerli olduğunun belirtilmemesidir. Deneyimler 10 MHz'e kadar malzeme ve bağlantının 10 MHz'in üstünde ise açıklık geometrisinin ekranlama etkinliğini belirlediğini söylemektedir. Ekranlama amacıyla kullanılan malzemeler yüksek, standart ve zayıf performanslı malzemeler olarak sınıflandırılır. Bunlar;

- Yüksek performanslı malzemeler (80-120 dB ekranlama etkinliği)
- Standart performanslı malzemeler (20-40 dB ekranlama etkinliği)
- Zayıf performanslı malzemeler (15-30 dB ekranlama etkinliği)

30 dB ekranlama etkinliği ortalama değer olarak kabul edilmektedir. Uygulamada birçok sorunu 40 dB ekranlama etkinliği çözebilir. Askeri sistemlerde 100-120 dB ekranlama etkinliği istenebilmektedir. Telefon kabloları için şartnamelerde istenen değerler 80-90 dB civarındadır.

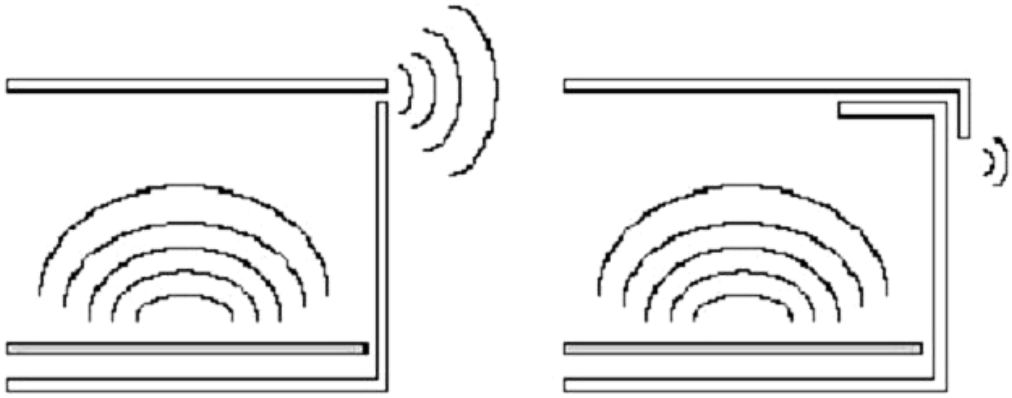
Ekranlama performansını ekran duvarındaki süreksizlikler (bağlantılar, lehimler, perçinler) ve ekran duvarında zorunlu bırakılan açıklıklar (havalandırma delikleri, düğmeler, sinyal lambaları, görüntü ekranı, vb) azaltmaktadır. Bu açıklıkların tasarımında özel dikkat gösterilmelidir. Pratikte kullanılan çeşitli açıklık türleri küçük ya da dar yarıklar, delik ve yarık dizileri, ızgara ya da örgülü tabakalar ve kafes yapılar olarak sıralanabilir. Açıklıkların boyutları engellenmek istenen elektromanyetik ışınımın dalga boyundan küçük olmalıdır. Burada "küçük" ten kastedilen dalga boyunun en az onda biridir (l/10). Açıklığın (kesitin) en büyük boyutu önemlidir. Engellenmek istenen ışınımın en yüksek frekansı göz önüne alınmalıdır. Şekil 6.6'da delik ve yarıklar için frekansla ekranlama etkinliğinin değişimi gösterilmiştir [1].



Şekil 6.6: Delik ve Yarıklar İçin Frekansla Ekranlama Etkinliği Değişimi [1]

Görüldüğü gibi, 25 cm boyunda bir yarık 10 kHz frekansında 90 dB ekranlama sağlarken bu değer 500 MHz'in üstüne çıkıldığında 0 dB'ye düşmektedir. 600 MHz'de işaret dalga boyu 50 cm olduğundan yarık boyu dalga boyunun yarısına denk düşer. Bu durumda da işaret olduğu gibi yarıktan öteye sızar. Özellikle binalarda, içlerinde yüksek güçlü trafoların bulunduğu odalarda soğutma ve ekranlama aynı anda gerçeklenmek istendiğinde Şekil 6.7'deki yaklaşım kullanılabilir. Havalandırma panelindeki delik sayısına, derinliğe ve delik çaplarına bağlı olarak formülden ekranlama etkinliği hesaplanabilir. Şekil 6.6'daki örnekten

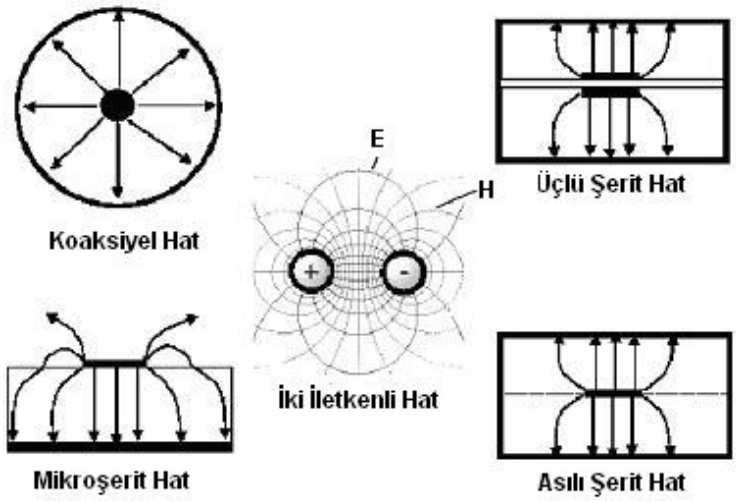
görüleceği üzere 100 dB civarında ekranlama etkinlikleri sağlamak olanaklıdır. Şekildeki çözümün kesim frekansının oldukça (birkaç kat) üstünde geçerli olduğu unutulmamalıdır [13].



Şekil 6.7: Açıklık Ekranlama Örneği [13]

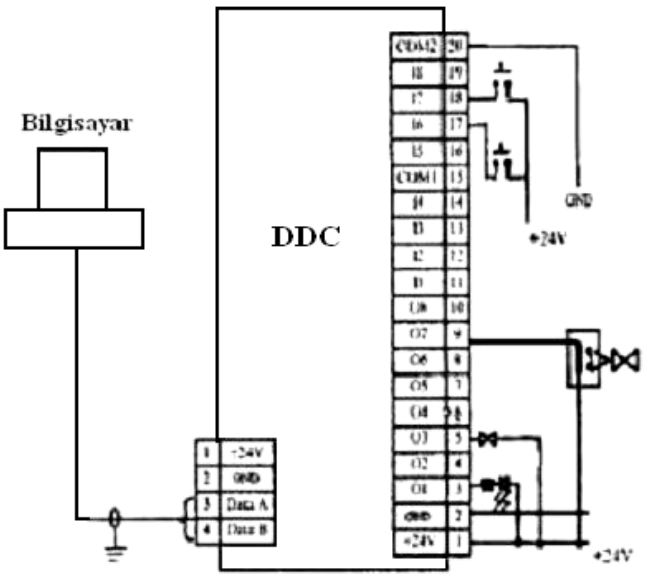
6.1.3 Kablolarda Ekranlama Etkinliği

Ekranlama etkinliği açısından bir karşılaştırma da hemen her türlü elektriksel cihazda kullanılan bağlantı elemanları, yani kablolardır. Şekil 6.8'de değişik tipte kablo ve iletim hatları ve oluşan elektrik alan çizgileri gösterilmiştir. Şekilde gösterilen alan çizgileri dağılımından da iletim hatlarının ekranlama etkinlikleri belli olmaktadır. Örneğin, iki iletkenli hat ile mikroşerit hatlar açık hatlar olduklarından ekranlama etkinlikleri kötüdür. Oysa koaksiyel ve diğer hatlar doğal ekranlamalara sahip olduklarından iyi ekranlama etkinliği göstermektedirler.

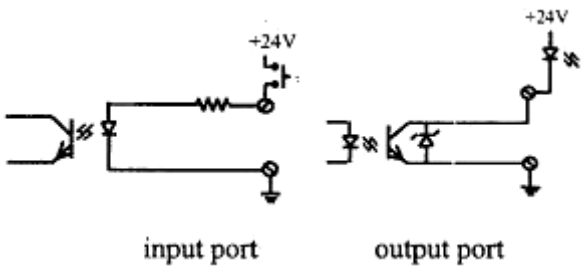


Şekil 6.8: İletim Hatlarında Ekranlama Etkinliği [1]

Kabloların uygun bir biçimde ekranlanması, sistemlerin EMP etkisine maruz kaldığında ya da EMP simülatörleri deneylerine tabi tutulduğunda sistemde kullanılan elektronik aygıtların tahrip olmamasını böylece işlevlerinin devam etmesini sağlayacaktır. Blok diyagramı Şekil 6.9'da verilen bilgisayar, haberleşme ağı ve dijital kontrolörlerin olduğu bir DDC sistemi test edilmiştir. Kontrolör dijital I/O kanalları ile motor ve elektrik tahrikli valflerin ve bu donanımların ekranda görüntülenmesini sağlamaktadır. Ekranlama bilgisayar ve kontrolör arasındaki kabloda kullanılmıştır. EMI'yi önlemek amacıyla I/O kapıları Şekil 6.10'da gösterilen optik izolatörler ile korunmuştur [35].



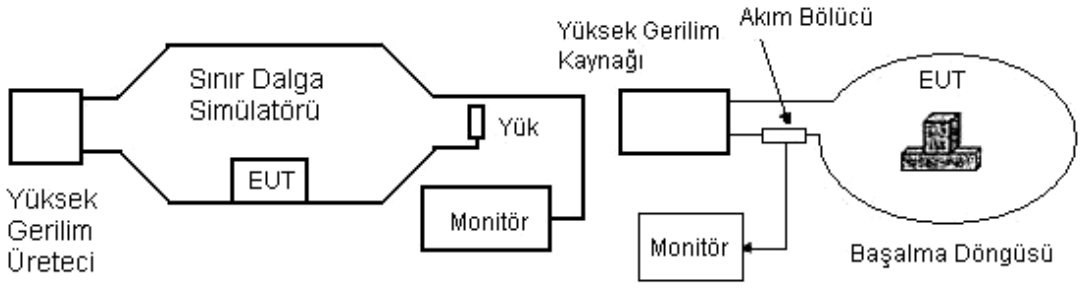
Şekil 6.9: Test Modeli [35]



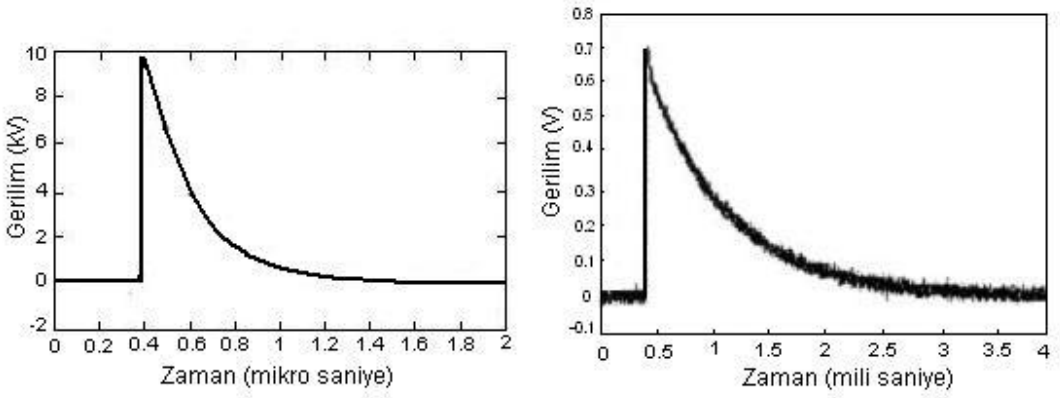
Şekil 6.10: Kontrolör Giriş ve Çıkış Kapıları (I/O kapıları) [35]

Yukarıda tanımlanan test modeli Şekil 6.11'de gösterilen sırasıyla HEMP simülatörü ve manyetik alan darbesi ile test edilmiştir. Simülatörlerin ürettiği dalga şekilleri ve değerleri Şekil 6.12'de verilmiştir. Elektrik alanın yükselme zamanı 10 ns ve darbe

genliği 1 μs'dir. Manyetik alanın yükselme süresi 2 μs ve genişliği 3 ms'dir. Elektrik alanın maksimum değeri 34 kV/m ve manyetik alanın maksimum değeri 3 mT'dır.



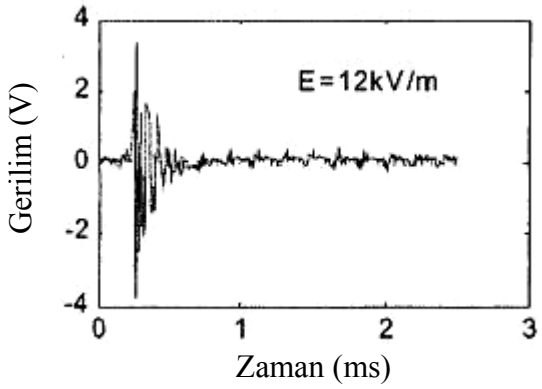
Şekil 6.11: HEMP ve Manyetik Alan Darbe Simülatörleri [35]



Şekil 6.12: Simülatörlerin Dalga Şekilleri [35]

Yapılan deney sonucunda bir Dell 486 marka bilgisayarın elektrik alan değeri 12,5 kV/m ve manyetik alan değeri 2,7 mT değerine ulaşıncaya kadar normal çalıştığı gözlenmiştir. Elektrik alan 33,7 kV/m ve manyetik alan 2,9 mT olduğunda bilgisayar klavyesinin ve faresinin zarara uğradığı görülmüştür.

İletişim kablosu etrafında HEMP simülatörü devreye alındığında oluşan alanın indüklediği geçici işaretler oluşmuş ve ekranlı kablonun bir kısmı patlamıştır. Patlayan kablonun 45 metre uzağında ölçülen gerilim değeri Şekil 6.13'de gösterilmiştir. Patlayan kısım 30 cm'ye ulaştığında, ölçülen maksimum gerilim değeri 3 Volt civarında ölçülmüştür. Bu da patlayan kablo miktarının artması daha yüksek alan kuvveti anlamına gelecek ve daha büyük bir gerilim değerinin kuple olmasını sağlayacaktır.



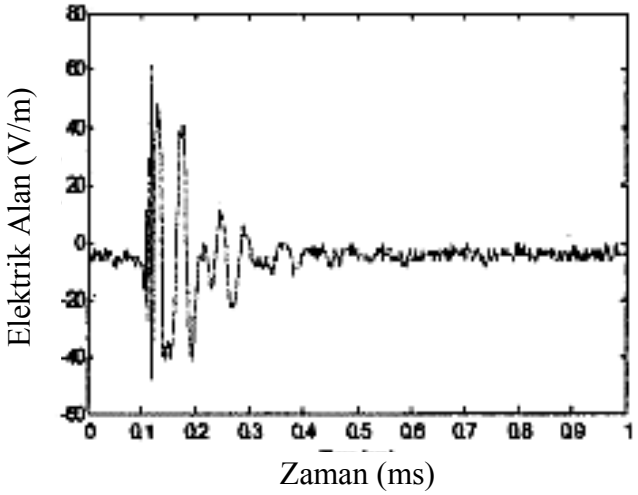
Şekil 6.13: EMP Simülatöründe İndüklenen Gerilim [35]

Kontrol sisteminde elektrik alan değeri 34 kV/m ve manyetik alan değeri 4,7 mT oluncaya kadar herhangi bir problem görülmemiştir. Tablo 6.1'de kontrol sisteminin yapılan deney sonucunda hangi değerlerde girişime uğradığı belirtilmiştir.

Tablo 6.1: Kontrol Sistemi

Test Amacı	**Test Durumu**	**Minimum Elektrik Alan (kV/m)**	**Minimum Manyetik Alan (mT)**
Kabloda İndüklenen Girişim	Ekranlama Topraklanmış	17,5	1,8
	Ekranlama Topraklanmamış	< 11,3	1,4
Direkt Etki	Kablo yok	16,2	4,7

Test sonuçları doğrudan ve dolaylı etkiler olarak iki ana başlıkta incelenmelidir. Kabloda indüklenen girişim incelendiğinde, ekranlama alanın direkt etkisini ortadan kaldırmıştır. Kontrol donanımı güç kablosunun bir kısmında meydana gelen patlama, indüklenen elektrik alanın fiber optik kablolar ile ölçülmesi sonucu Şekil 6.14 elde edilmiştir. Maksimum değeri 62 V/m olan elektrik alan etkisiyle kontrol sistemi sapıtarak istenmeyen geçici olumsuz çıkışlar vermiştir. Bu alan korunmamış kontrol sistemlerinin zayıflığını göstermektedir.



Şekil 6.14: Korunmamış Kontrol Sisteminin Etkilendiği Elektrik Alan [35]

Sonuç olarak yapılan çalışma göstermiştir ki sistemlerin EMP'ye karşı korunması için iletişim kablolarına çift ekranlama yapılmalı ve sistemden dışarı verilen güç hattı ile iletişim hattı mesafesi azaltılmalıdır. Teorik olarak, güç hat girişleri ve çıkışları ekranlanmış kabinde filtreler ile korunmalıdır. Fakat pratikte birçok hatta filtre koymak maliyeti oldukça arttıracaktır. Tablo 6.2'de farklı ekranlama durumları altında elektrik alanın maksimum değerleri verilmiştir. Haberleşme hattına ve güç hattına yapılacak ekranlama EMP girişimlerine karşı kontrol donanımlarının dayanıklılığını oldukça arttıracaktır. Kontrol sisteminin ekranlamasından sonra, güç hattı bağlanmış ve iletişim hattına çift ekranlama uygulanmıştır. Tüm sistemin dayanıklılığı oldukça artmıştır [35].

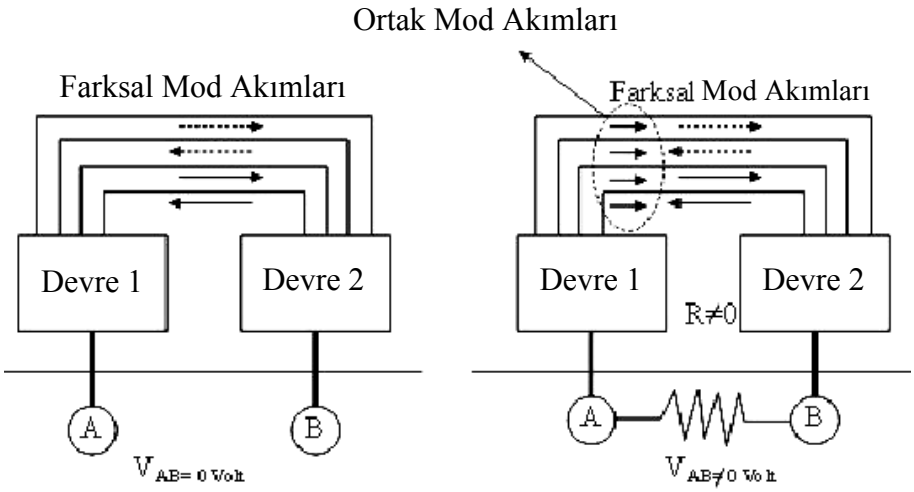
Tablo 6.2: Kontrol Sistemi Ekranlama Etkinliği

Güç Hattı	**İletişim Kablosu**	**Girişime Neden Olan Maksimum Elektrik Alan (kV/m)**
Boru ile ekranlanmamış	Boru ile ekranlanmamış	17,5
Boru ile ekranlanmamış	Boru ile ekranlanmış	25
Boru ile ekranlanmış	Boru ile ekranlanmış	> 37,5

6.2 Topraklama

Elektriksel potansiyel, iki nokta arasında iş yapabilme kapasitesidir. Volt birimiyle anılan elektriksel potansiyel bir noktanın belirlenen bir başka noktaya göre potansiyel farkı olarak tanımlanır. Örneğin AB V gerilim farkı dendiğinde A noktasının B noktasına göre potansiyel farkı kastedilir. Ancak bu iki noktanın gerçek potansiyel değerlerinin bilinmesi, belirlenen bir referans noktasının varlığına bağlıdır. Bu referans noktası, bir baskı devresi üzerinde taban yüzeyi olabileceği gibi, cihazın metal kutusu, bina içerisinde bir nokta ya da mutlak referans diye bilinen yeryüzü olabilir. Mutlak referans, sıfır volt olarak kabul edilen yeryüzüdür. Gerçek anlamda bir topraklama için tüm cihazların bu mutlak sıfır noktasına getirilmesi zorunludur. Uluslararası yetkin kurum olan IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) topraklama tanımını, "bir elektrik devresi ya da cihazının, iletken bir ara bağlantı ile istemli ya da istem dışı olarak, yeryüzü (toprak potansiyeline) ya da toprak yerine geçebilecek büyüklükte referans olan bir yüzeye bağlanması" şeklinde vermektedir. Topraklama gereksinimleri ve teknikleri temel olarak mantık devreleri, yıldırımdan koruma sistemleri, AA sistemleri, şebeke dağıtım sistemleri ve arıza önleme, elektromekanik cihaz tasarımları gibi hem yüksek hem de düşük frekanslı sistemlerle, analog tasarımlarda söz konusudur. Uygulamada çelik kafes binalar, araç gövdeleri, topraklama levhası gibi yapılar toprak yerine geçebilir. Elektrik güç dağıtım şebekelerindeki toprak referansı dışında diğer sistemlerde de toprak gereken şekilde kullanılır. Topraklamada en önemli problem yeryüzünün her noktasında eşit potansiyelde olmamasıdır. Farklı noktalardan yapılan bağlantılar, farklı potansiyellere ulaşılmasına neden olur. Bunun nedeni yeryüzü empedansının sıfır olmaması ve önemli değişiklikler göstermesidir. Sonuçta, toprağa akan bu akımlar potansiyel farkı oluştururlar. Bu durum özellikle yıldırım gibi şiddetli boşalmalarda ya da yüksek akımlarda gözlenir. Toprağa akan akımlar, topraklama empedansının farklı olması nedeni ile farklı potansiyel değişimleri yaratırlar.

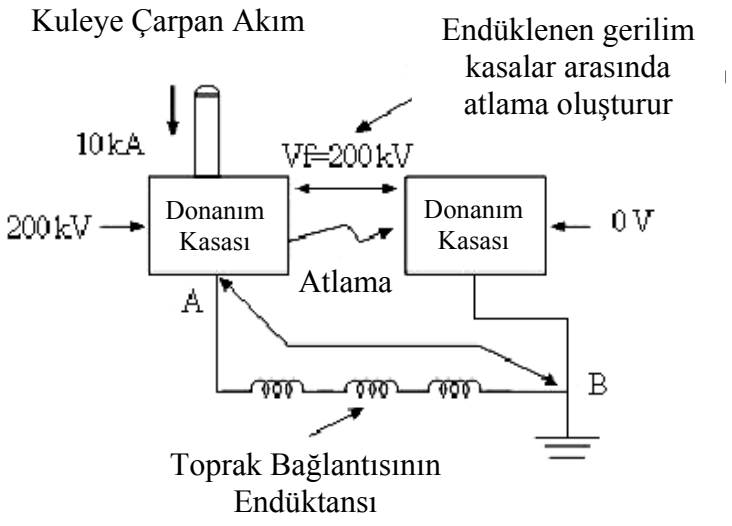
Şekil 6.15'de ideal topraklama durumu ve pratikte yaşanan durum resmedilmiştir [1]. Bu şekilde, iki devre ve arasındaki işaret kablolarından akan akım (farksal mod akımları) gösterilmiştir. Devreler A ve B noktalarından toprak yerine geçecek bir referans seviyeye bağlanmışlardır. AB noktaları arasında potansiyel farkı oluşmadığı



(a) İdeal durum (b) Pratik durum

Şekil 6.15: Topraklama Ortak ve Farksal Mod Akımları [1]

sürece topraklama gerçeklenmiş olur. Ancak uygulamada A ve B noktaları aynı potansiyelde olamazlar. Bu iki nokta arasındaki empedansın sıfır olmaması nedeniyle oluşacak gerilim farkı işaret kabloları ile toprak arasında aynı yönde (ortak modda) akımların akmasına neden olur [1].



Şekil 6.16: Topraklamada Yıldırım Etkisi [9]

Yetersiz topraklamanın neden olabileceği olumsuz etkilere bir örnek Şekil 6.16'da verilmiştir. Şekildeki iki kasalı bir yerleşimde kasalar arası 10-15 m uzaklık olsun. Mikrosaniyelerde birkaç on kiloamperler akım boşaltan bir yıldırım çarpması sonucu oluşacak potansiyel farkı şekilde gösterilmiştir. Yüksek frekanslarda endüktans etkisi

sonucu 16-17 m'lik bir topraklama kablosunun neden olacağı potansiyel farkı 200 kV'lara kadar çıkabilmektedir. Bu ise iki kasa arasında güçlü bir atlamanın olması anlamına gelir [10, 36].

A-B arası mesafe l = 15,24 m iken, toprak iletkeni öz endüktansı $L_g = 0{,}4.10^{-6}$, kuleye çarpan akım;

$$\frac{\partial}{\partial t} I(t) = \frac{10kA}{\mu s} \qquad \textbf{(6.1)}$$

iken topraklama iletkenleri üzerinde oluşan endüktif gerilim;

$$V_f = L_g \cdot l \cdot \frac{\partial}{\partial t} I(t) = 0.4 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot \frac{10^4}{10^{-6}} = 200kV \qquad \textbf{(6.2)}$$

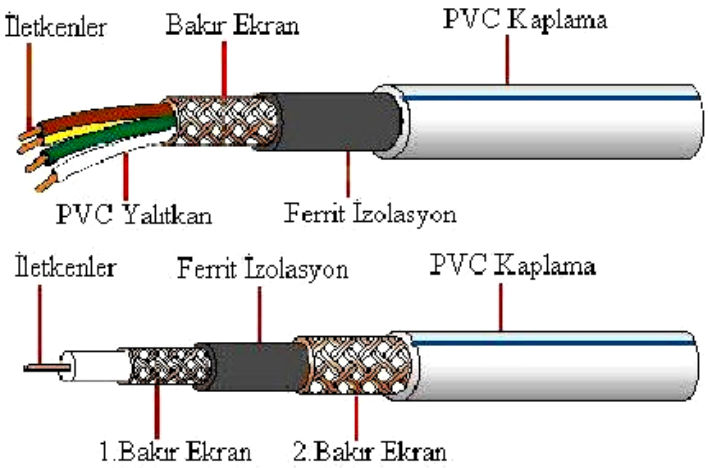
olmaktadır.

Bu örnek bize uygun topraklama olmaması durumunda zaman zaman düşen bir yıldırım sonucu, örneğin, bir işletmenin tüm bilgisayarlarının ağ bağlantı kartlarının niçin yandığını açıkça göstermektedir [36].

6.3 Kablo ve Bağlayıcılar

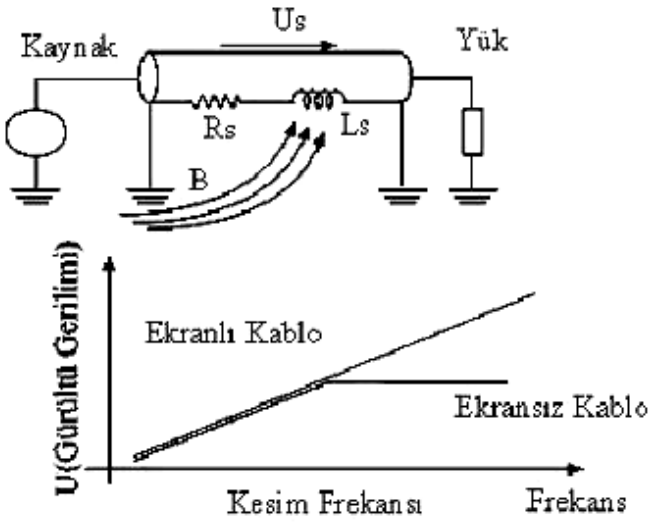
Kablolar istenmeyen işaretleri bir noktadan diğerine ilettikleri gibi (iletkenlik yoluyla girişim), üzerlerinde dolaşan işaretleri bir anten gibi uzaya da yayarlar (ışıma yoluyla girişim). Bir devrede, bir sistemde değişik boylardaki kablolar farklı frekanslarda rezonansa gelen yarım dalga dipol anten gibi davranırlar (geniş bandlı girişim). Ayrıca, yine bir devrede ya da sistemde en geniş çevrimi oluşturduklarından halka anten gibi de davranırlar. Bu nedenle kablolar hem güçlü elektrik hem de güçlü manyetik girişim kaynağı gibi etki edebilirler. Kablo etkileşimi söz konusu olduğunda kuplajın tipi (manyetik, elektrik) ve gerek duyulan performans önem kazanmaktadır. Kablo performansını belirleyen iki temel unsur ekranlama malzemesi kalitesi ve kablo ekran topraklamasıdır. Kablo, işarete sistemdeki son noktaya (yüke) kadar kılavuzluk eder. Çevre girişiminin önem kazandığı durumlarda kablolar ekranlanır ya da ekranlı kablo kullanılır. Koaksiyel hatlar doğal ekranlı kablolardır (ekran iletim hattının bir parçasıdır). Bunların dışında ekranlanmış çoklu kablolar da kullanılır. Şekil 6.17'de günümüzde kullanılan tek ve çift ekranlı kablolara örnekler gösterilmiştir. Üstte bakır ekran koruması altında imal edilmiş çoklu iletkenli bir

kablo gösterilmektedir. Dışarıdan gelebilecek girişimlere karşı iyi bir elektriksel ekranlama sağlayan bu kablolar yakınında oluşan manyetik alan girişimlerine karşı korumasızdır. Şekil 6.17'de, iki bakır ekran arasında ferrit yalıtım bulunan çok iletkenli bir kablo örneği görülmektedir. Bakır ekran elektriksel koruma sağlarken ferrit bilezik manyetik ekranlama etkisi göstermektedir [36].



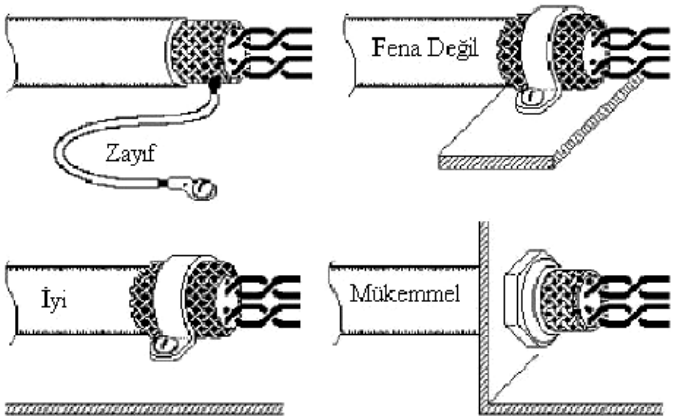
Şekil 6.17: Tek ve Çift Ekranlı Kablolar [34]

Kablo ekranının etkin olması ekranda endüklenen akımların iç iletkene kuplajının engellenmesine ve elektrik alanlarının (açıklıklardan ekran üzerinde endüklenen gerilim) durdurulmasına bağlıdır. Her iki durumda da içten dışa enerji girişimini engellemek gerekir. Kablolarda ekranlama bozukluğu uygun filtre kullanılmaması ve iyi ekranlama yapılmaması sonucu oluşur. Belli bir manyetik alan içerisinde bulunan bir kablo üzerinde, birim uzunluk direnci ve birim uzunluk endüktansı ile belirlenen bir gerilim düşümü oluşur. Bu gerilim düşümü ekransız kablolarda frekans arttıkça artar ve yüksek frekanslarda kabul edilemez gürültü gerilimleri oluşturur. Oysa ekranlı kablolarda bu durum kablo kesim frekansına dek söz konusudur. Yani, kablo direnci ve endüktansının belirlediği kesim frekansı üstünde ekranlı kabloda gürültü gerilimi frekansla artmaz. Dolayısıyla kullanılan kablonun kesim frekansının bilinmesi gerekir. Bu frekanstan düşük frekanslarda ekranlama etkili değildir. Ancak frekans kesim frekansının üstüne çıkınca ekranlama etkili olmaya başlar. Uygulamada iyi bir manyetik ekranlama ancak frekans kesim frekansının beş katından büyük olunca sağlanmaktadır. Şekil 6.18'de kablo ekranlaması ve kesim frekansı tanımları verilmiştir [36].



Şekil 6.18: Kablo Ekranlaması ve Ekran Kesim Frekansı [1]

Şekil 6.19'daki kablonun kendi ekranı hem başından hem sonundan toprağa bağlanmış durumdadır.



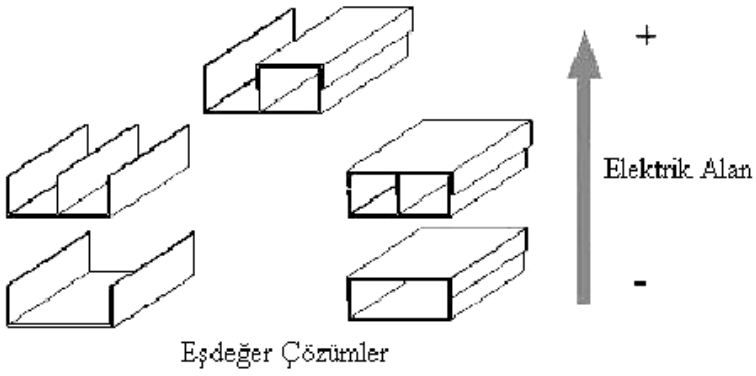
Şekil 6.19: Kablolarda Toprak Bağlantı Özellikleri [1]

Sadece ince bağlantı elemanlarıyla gerçeklenen topraklama genelde işe yaramaz, sıkı geçme ve şerit hatlarla gerçekleşen topraklamalar ise mükemmele yakın etki yapmaktadır. Kablo, genelde kaynak ile yük arasında işaret iletiminde kullanıldığından ekranlamanın ne tarafta yapılacağı ve topraklama önemlidir. Sadece yük tarafından ekranlanmış bir kabloda istenmeyen elektrik alanlar iyi ekranlanır. Ancak bu manyetik alanların ekranlanmasına yetmez. Hem yük hem de kaynak tarafında topraklama uygulandığında elektrik alan ekranlaması daha iyi olur (10-20 dB ekranlama etkinliği artar) ve manyetik ekranlama da sağlanmış olur. Burgulu çift iletken kullanarak (iletkenler arasındaki alan küçültülerek ve burgu sayesinde zıt

yönlü akımlar akması sağlanarak) manyetik etki azaltılır. Her iki taraftan da topraklama uygulandığında elektrik ve manyetik ekranlama etkin biçimde sağlanmış olur.

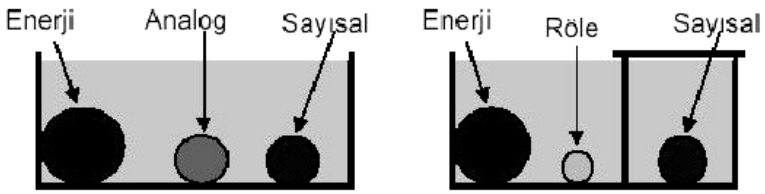
Alınması gereken önlemlerde kablolar kadar önemli olan diğer elemanlar bağlayıcılardır. Elektromanyetik sızıntı su ve ışık gibidir. Yarıklardan, çatlaklardan ya da aralık bırakılmış ayrıtlardan su ve ışık nasıl sızarsa elektromanyetik enerji de (frekansına bağlı olarak) öyle sızar. Bu nedenle olası bütün sızıntı yerleri kapatılmalıdır. Elektronik devrelerde ve cihazlarda kapaklar, gövdeler, giriş panelleri, havalandırma yarıkları, vb birçok süreksizlik kaçınılmaz olarak bırakılır. Bu durumda bu süreksizliklerden elektromanyetik sızıntıyı önlemek için kontak ve bağlantı elemanlar kullanılır [36].

Kablo cihaz ekranının tek taraftan bağlanması alçak frekanslarda etkilidir, yüksek frekanslarda bu tip bir bağlantı etkili olmaz. Ekranın çift taraftan topraklanması en şiddetli parazitlere karşı (YF ortak mod) koruma için kullanılır. Çift taraflı bağlantılarla ilgili sorun, alçak frekanslarda ekranlama üzerinden bir akımın akabilmesidir. Bu akım, bazı durumlarda "vınlama" adı verilen bir alçak gerilim veya 50 Hz gürültüsü yaratır. Tüm sayısal veya elektrik kablolarında dış ekranlamaların her iki ucu, cihaza giriş noktalarında cihaz toprağına bağlanmalıdır. Tek bir uca sadece düşük seviyeli alçak frekanslı ekransız bağlantılar yapılabilir. Şebeke, besleme, güç, analog - sayısal işaret kabloları, mümkünse topraklanmış kanallar içine döşenmelidir. Mümkün olan her yerde biri enerji, röle ve hız kontrol cihazı kabloları ve diğeri sinyal kabloları (sensörler, veri, haberleşme, vb.) için iki metal kanal kullanılmalıdır. Bazı kablo kanalı örnekleri Şekil 6.20'de gösterilmiştir [36].



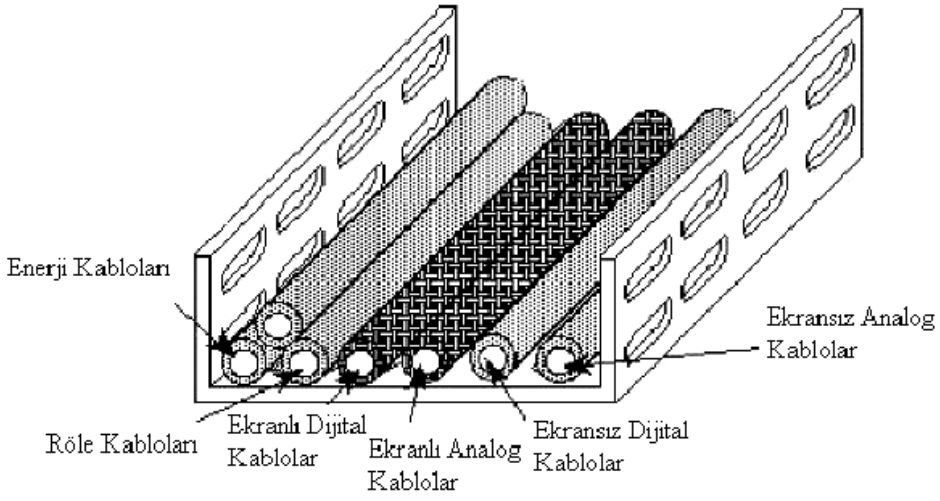
Şekil 6.20: Elektriksel Ekranlama Açısından Eşdeğer Kanallar [34]

Görüldüğü gibi, elektriksel alanın düşey polarizasyonlu olması durumunda kanalların üstünün açık ya da kapalı olması ekranlama performansını fazla etkilememektedir. Ancak, dairesel polarizasyonlu elektriksel alanların olabileceği ortamlarda kanalların tümden kapalı olması gerekmektedir. Günümüzde akıllı binalar, haberleşme ve bilgisayar ağları, internet bağlantıları, kablolamanın önemini açıkça ortaya koyan sistemlerdir. Bir yandan ağ içerisinde hassas haberleşme kabloları döşenirken diğer yandan yüksek güçlü besleme kabloları döşenmektedir. Ekonomik olması açısından birlikte döşenmesi zorunlu olduğundan enerji kablolarının olası olumsuz etkilerine karşı işaret kablolarının korunması önem kazanmaktadır. Şekil 6.21'de tipik kablo kanalı ve döşeme tipleri gösterilmiştir.



Şekil 6.21: Enerji ve İşaret Kablolarının Kanal İçinde Yerleşimi [1]

Tipik olarak kablo kanal uzunlukları 30 metreden kısa ise kanallar birbirine ve kablolara temas edebilir. Kanal uzunluğu 30 – 300 m arasında ise aralarında yan yana veya üst üste 10 cm boşluk bırakılmalıdır. Uzunluk 300 m'yi aştığında aralarında 30 cm boşluk olmalıdır.



Şekil 6.22: Enerji ve İşaret Kablolarının Aynı Kanal İçinde Yerleşimi [1]

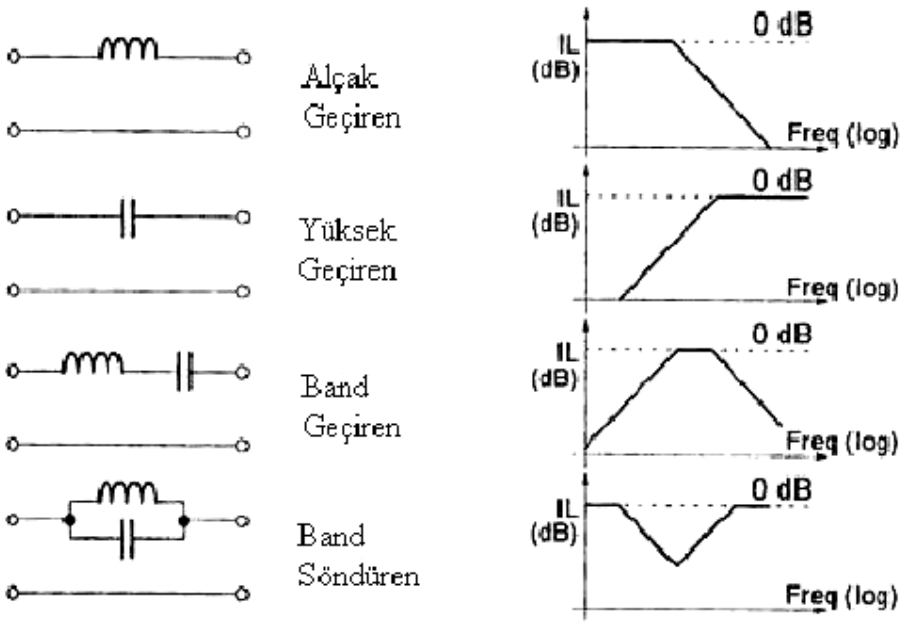
Şekil 6.22'de görüldüğü gibi, işaret kabloları ile enerji ve röle kabloları birbirlerine olabildiğince uzak yerleştirildiği gibi, aralarında daha dayanıklı olan ekranlı analog kablolar döşenerek yalıtım arttırılmaya çalışılır [36].

6.4 Filtre ve Koruyucu Devreler

Yararlı olsun, istenmeyen olsun, tüm elektriksel işaretler frekans bölgesinde belli bir bölge kaplar. Eğer yararlı işaret ile istenmeyen işaret farklı frekanslarda ise filtre kullanarak istenmeyen işaretler süzülebilir. Filtreler elektronik filtreler ve ferrit filtreler olarak sınıflandırılabilir [10].

6.4.1 Elektronik Filtreler

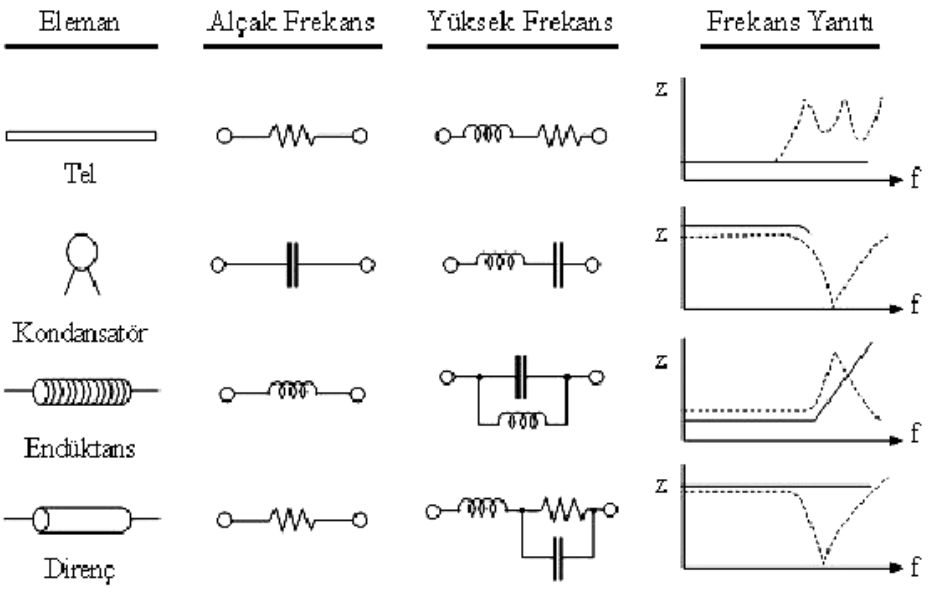
Şekil 6.23'de temel devre elemanlarının seri, paralel kullanımı ile elde edilebilecek basit, 2-kapılı filtre düzenleri gösterilmektedir.



Şekil 6.23: Temel Filtreler ve Frekans Karakteristikleri [1]

İki kapılı bir devrede giriş çıkış arasına bağlanan seri bir endüktans alçak frekansları geçirir, endüktansın değerine bağlı olan belli bir kesim frekansından ötesini geçirmez, hızla zayıflatır. Benzer şekilde yine seri bağlı bir kondansatör yüksek geçiren bir filtre gibi davranır. DC ve alçak frekanslarda kondansatör açık devre gibi davrandığından alçak frekanslar bloke edilir. Kondansatörün sığasına bağlı olarak belli bir frekansın üstü geçirilir. Giriş çıkış arasına seri bağlanan LC elemanları band

geçirirken, paralel LC elemanları band söndüren karakteristiğe sahiptirler. Filtrelerin Şekil 6.23'deki davranışları ideal durumu yansıtmaktadır. Uygulamada ise bu davranışlar belli bir frekanstan sonra tamamen farklı olabilir. Bunun nedeni temel pasif elektronik devre elemanlarının ideal davranış gösterememesidir. Şekil 6.24'de temel elemanlar ve pratikteki davranışları gösterilmektedir [1].



Şekil 6.24: Temel Devre Elemanları ve Frekans Karakteristikleri [1]

Görüldüğü gibi, bir tel parçası alçak frekanslarda bir direnç etkisi yaratırken yüksek frekanslarda endüktans etkisi de göstermeye başlar ve seri RL devresi gibi davranır. Direnç elemanı için de davranış benzer şekildedir. Bir kondansatör yüksek frekanslara doğru gidildiğinde bağlantı ve lehim noktalarındaki istenmeyen kaçak etkiler nedeniyle seri bir LC devresi gibi davranır. Bir endüktans ise, yine yüksek frekanslarda bağlantı noktaları arasında oluşan kaçak kapasite etkileri nedeniyle paralel LC devresi gibi etki yapar. Yani hiçbir basit devre elemanı yüksek frekanslarda sadece kendisinden beklenen etkiyi gösteremez.

Filtre seçiminde çalışma özellikleri (gerilim, akım ve sıcaklık), güvenilirlik (maksimum sızıntı akımı, nem sınırları, aşırı yük akımı), elektriksel özellikler (yüksek gerilim karakteristikleri, yalıtım direnci) ve mekanik özellikler (boyutlar, montaj sorunları) en önemli seçim parametreleridir. Filtre performansını belirleyen en önemli faktör, filtrenin ekrana monte ediliş şeklidir. Bu nedenle iyi bir performans için filtre, ekranlı gövdeye, güç kablosunun girdiği noktada monte edilir. Giriş

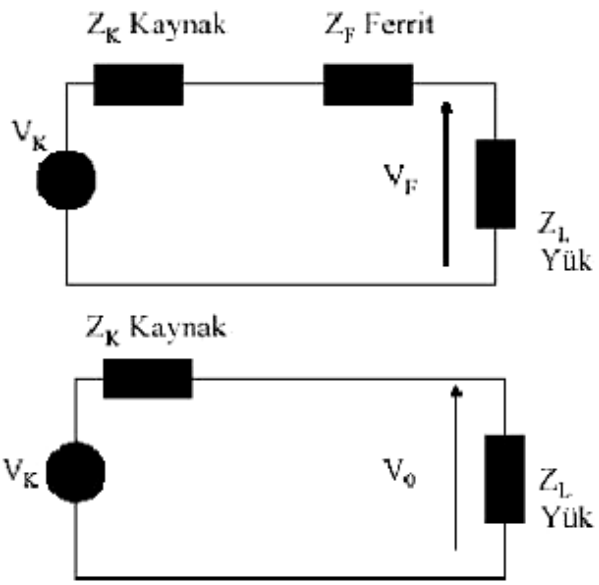
kabloları, çıkış kablolarından oldukça iyi dekuple edilmelidir. Gövde montajlı filtreler tercih edilir. Aksi halde filtreyi ekranlayıp giriş ve çıkışları birbirinden yalıtmak gerekir. Filtre gövdesi ile toprak arasında iyi bir elektriksel temas sağlanmalıdır. Bağlantı teli kullanılmamalıdır. Galvanik uyumluluğa dikkat edilmelidir [1].

6.4.2 Ferrit Filtreler

Elektronik devrelerde istenmeyen yayınımların önemli bir kısmı bağlantı kabloları ve işaret yolları üzerinde oluşur. Kablolar, yüksek frekanslarda birer anten gibi davranır. Bu nedenle, elektronik devrelerde elektromanyetik sızıntının önlemini almak bağlantı kabloları ve işaret yollarındaki gürültüleri azaltmak anlamına gelir. Ferrit filtreler kablolara bilezik gibi geçirilerek kullanıldıklarından tercih edilmektedir. Ayrıca bilgisayarların iç ve dış veri kablolarında (ekran, yazıcı, klavye, CPU), taşınabilir ve sabit disklerin plastik şerit kablolarında, elektronik devrelerin iç ve dış enerji kablolarında ve kartlar arası bağlantılarda da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kabloların ekranlamasında ferrit kullanıldığında alçak frekanslar fazla etkilenmezler. Bu frekanslarda, ferrit endüktansı sabit ve az kayıplıdır. Bu nedenle toplam empedansı az arttırır. Yüksek frekanslarda ferritin manyetik kayıpları hızla artar ve ferromanyetik rezonans denen bir frekans bölgesinde manyetik geçirgenlik hızla düşer, empedans maksimum olur. Bir hatta filtre ile gürültüyü süzerken işareti korumak için ortak mod davranışından yararlanılır. Yani işaret hattının hem gidiş hem de dönüş iletkeni aynı ferrit filtre halkasından geçirilir. Bu hatlarda işaret (gidiş-dönüş) zıt fazlı olduğundan birbirini yok eden zıt manyetik alan oluştururlar. Oysa gürültü her iki iletkende de aynı fazlı olduğundan filtre ile süzülürler.

Şekil 6.25'de ferrit filtre eşdeğeri verilmiştir. Ferrit bilezik kaynak ile yük arasına seri bir empedans gibi etki yapar. Bu durumda eşdeğer devreden de görüleceği gibi araya girme kaybı ferrit bilezik varken ve yokken basit devredeki yük gerilimlerinin logaritmik oranından elde edilir. Bu durumda araya girme kaybı, kaynak ve yük empedansları ve ferrit bilezik eşdeğer empedansı tarafından belirlenir. Ferrit bilezik empedansı diğer ikisine göre ne kadar büyük olursa o kadar iyi araya girme kaybı elde edilir [1].



Şekil 6.25: Ferrit Bilezik Filtre Eşdeğeri [1]

V_f ferrit varken yükün uçlarındaki gerilim ve V_0 ferrit yokken yükün uçlarındaki gerilim olarak isimlendirilerek denklem (6.3);

$$IL = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_0}{V_f} \tag{6.3}$$

$$IL = 20 \cdot \log_{10} \frac{Z_k + Z_f + Z_l}{Z_k + Z_l} \tag{6.4}$$

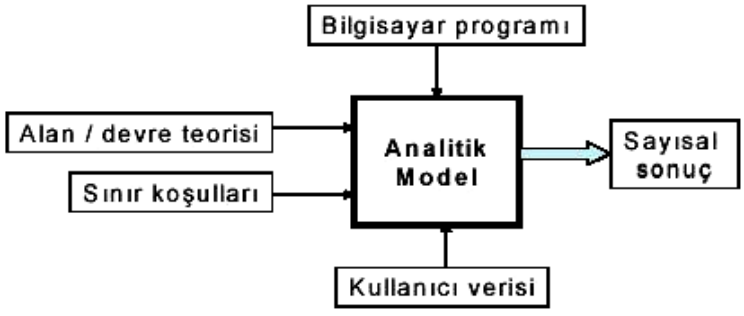
araya girme kaybı olarak tanımlanır.

7. BENZETİM

Bu bölümde elektromanyetik darbelerden korunma adına alınabilecek önlemlerden biri olan ekranlamanın, örneğin bir aygıtın gövdesini veya kasasını oluşturan yapının yapı geometrisi, yapı üzerindeki açıklıklar, boyutları, sayıları, konumları, malzeme özellikleri ve alanın frekansı gibi birçok etken göz önüne alınarak yapılan benzetimlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri sunulmuştur.

7.1 HFSS Programı Hakkında Genel Bilgi

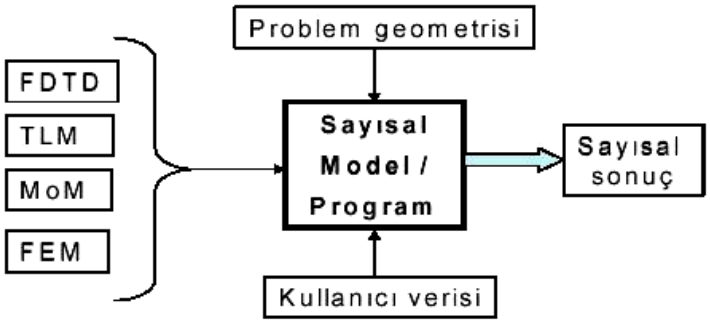
Bu bölümdeki analizlerde HFSS (High Frequency Structure Simulator) adlı bilgisayar programından yararlanılmıştır. HFSS programı sonlu eleman yöntemi ile elektromanyetik alan problemlerinin çözümünde kullanılan bir bilgisayar programıdır. EM problemleri genel anlamda analitik modele dayalı yaklaşım ve sayısal modele dayalı yaklaşım olarak iki ana grupta çözümlenmeye çalışılmaktadır. Şekil 7.1'de analitik modelleme yaklaşımı anlatılmaktadır. Alan ya da devre teorisinin verilen problem geometrisi (sınır koşulları) altında bilinen matematiksel fonksiyonlar cinsinden çözülmesi anlamına gelmektedir. Çözümün, probleme özgü olduğu, yapı (problem geometrisi) değişince yeni bir çözümün bulunması gerektiği görülmektedir. Analitik çözümde bilgisayar kullanmak sadece sayısal değerleri en hızlı olarak elde etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 7.1: Analitik Modele Dayalı Yaklaşım [37]

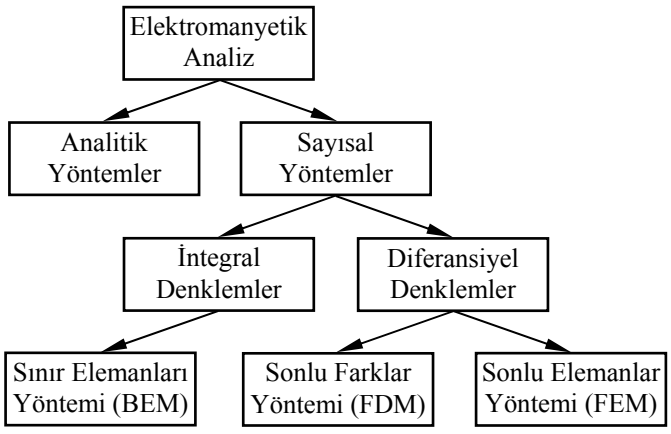
Sayısal modelleme yaklaşımı Şekil 7.2'de gösterilmiştir. Bu yaklaşımda bilgisayar doğrudan problemin çözümünde kullanılmaktadır. Hazırlanan bilgisayar algoritmaları daha başlangıçta alan ya da devre teorilerinin sayısal modellerini, belli

bir problem geometrisine bağlı kalmaksızın oluşturmaktadır. Bu nedenle sayısal model geneldir ve model kurulduktan sonra istenen bir probleme ait sınır koşulları eklenerek çözüme gidilir.



Şekil 7.2: Sayısal Modele Dayalı Yaklaşım [37]

Günümüzde modelleme ve benzetim, tasarımda, testlerde, kısacası başlangıçtan son aşamaya kadar her alanda çok etkili bir araç haline gelmiştir. Eldeki hızlı ve yüksek kapasiteli bilgisayarlarla hemen her türlü karmaşık EM problemi bilgisayar benzetimleriyle çözülebilmektedir. Bilgisayar simülatörleri mühendislerin vazgeçemeyecekleri araçların başında gelmektedir. Bir sistemin tasarımda veya gerçekleştirilmiş bir sistemin incelenmesinde veya sistemle ilgili EM test ve deneylerin pahalı ya da tehlikeli olması durumlarında benzetimler en yararlı araçlardır. EM problem çözümlerinde, Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD, Finite-Difference Time-Domain), İletim Hattı Modeli (TLM, Transmission Line Matrix), Moment Yöntemi (MoM, Method of Moments), Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM, Finite Element Method) gibi güçlü zaman ve frekans domeni yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektromanyetik analizlerde kullanılan çözüm yöntemleri Şekil 7.3'de genel olarak verilmiştir [37].

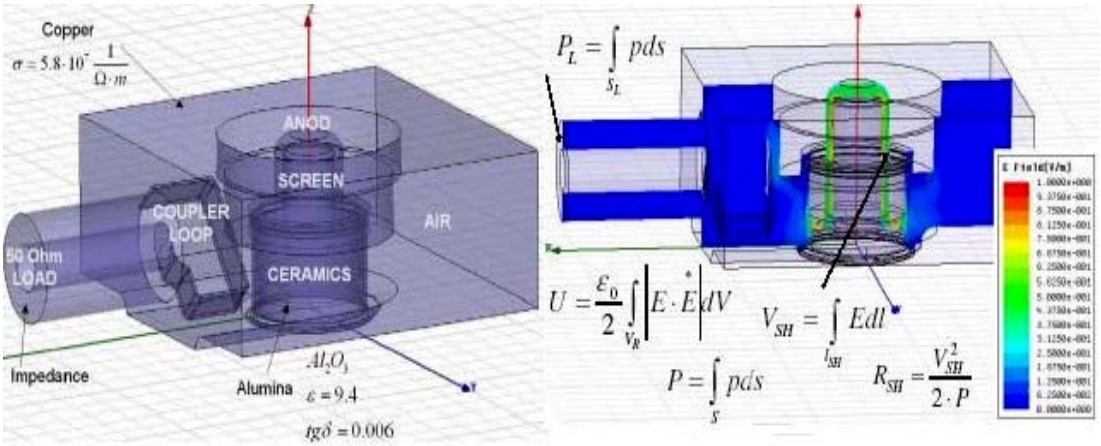


Şekil 7.3: EM Analizlerinde Kullanılan Yöntemler [38]

HFSS programında sonlu elemanlar yöntemi (FEM: Finite Element Method) kullanılmaktadır. FEM, karmaşık bir problemi basit elemanlara (sonlu elemanlara) ayırarak çözme esasına dayanmaktadır. FEM yazılımı mekanik (gerilme, bükülme, titreşim), aerodinamik, akışkan, termal ve elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılabilir. HFSS programı benzetimleri yapar, canlandırır, katı modelleme ve otomasyon yapma olanağı sağlar ve üç boyutlu olarak EM problemlerini doğru ve hızlı olarak çözer. Tüm EM problemlerinin kolayca anlaşılmasını sağlar. Parametrelerin hesaplanmasında s domeni, rezonans frekansları ve alanlar gibi çözümler sunar. HFSS programı ile frekans yönlendiricisi benzetimi, anten benzetimi, EM uyumluluk çalışmaları ve RF (radyo frekanslı) tümleşik devre tasarımları yapılabilir. Yapılan tüm tasarımlar test edilebilir.

HFSS program akışı öncelikli olarak problem yapısının geometrik olarak tanıtılması ile başlar. Daha sonra üç boyutlu olarak çizim tamamlanır. Sınır koşulları girildikten sonra çözüm için sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Ardından program çözümü yapar. Çözüm sonuçları kullanıcı tarafından analiz edilir [38].

Sistemlerin gerçekleştirilmesi ve geliştirilmesi için öncelikle birçok değişkene göre değerlendirilerek optimize edilmesi gerekmektedir. Şekil 7.4'de verilen ve HFSS'de modeli kurularak "Eigenmode" çözümü ile elde edilen ve çalışma frekansı olan 92 MHz'de simule edilen RF yükselticisinde (RF booster amplifier) elektrik alanın maksimum değerinin vakum tüpünün içinde olduğu görülecektir.



Şekil 7.4: RF Yükselticisi Çıkış Rezonatöründe EM Dağılımı [39]

Yapılan çalışmalar sonucunda zaman alıcı ve maliyetli olan prototipler yerine HFSS programı ile elde edilen benzetim sonuçlarına göre tasarım geliştirilerek daha önce kullanılan ve maksimum elektrik alan değerinin oluştuğu vakum tüpünün yerine

başka bir tüp kullanılarak, daha güvenli bir yapının oluşmasının yanı sıra yedekleme maliyetleri de düşürülmüştür [39].

7.2 Benzetim Sonuçları

HFSS programı kullanılarak farklı üç boyutlu cisimlerin içlerinde oluşan EM dağılımları incelenerek kullanılacak yapıların ekranlama açısından ne kadar uygun olup olmadığını gösterecektir. Özellikle yüksek frekanslarda yapılacak benzetimler EMP açısından sistemlerin dayanıklılığın arttırılması anlamına gelmektedir. Analizler ile elde edilen sonuçlar yapının şeklinin, boyutunun, dışarıya açılacak pencerenin ya da pencerelerin hangi konumda ve şekilde olacağının, dış kaplamada kullanılacak malzemenin özelliklerinin ve et kalınlığının, kullanılacak yarık ve köşelerin EMP'nin dolaylı etkilerine karşı sistemlerin dayanıklılığını arttırmada önemli faktörler olduğunu gösterecektir.

Benzetimlerde sınır koşulları mükemmel iletken olarak belirlenmiştir. HFSS programı, üç boyutlu tasarımı kullanıcı tarafından yapılan yapının tamamının mükemmel iletken bir duvarla sarıldığı varsayımına göre çözümlemelerini yapar. Elektrik alan yüzeylerde ve köşelerde normal koşullardaymış gibi ele alınır. Son alan çözümü yapılırken elektrik alanın teğet bileşenlerinin mükemmel iletken sınır koşullarında sıfıra giderkenki durumu dikkate alınmalıdır.

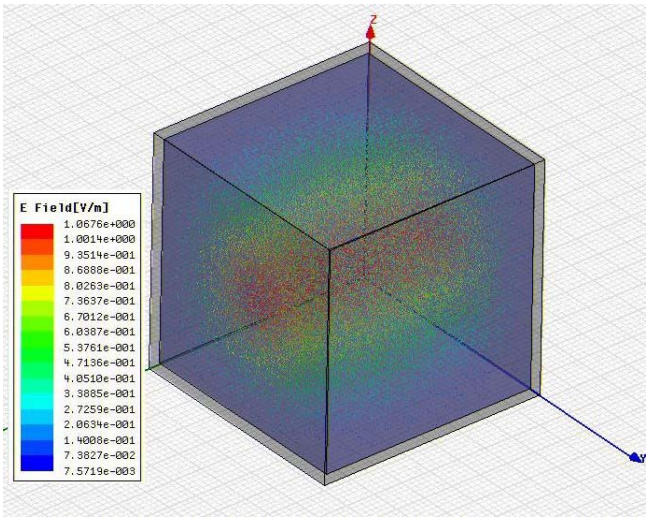
Benzetimlerde "Eigenmode" çözüm tipi kullanılmıştır. Bu modda, yapının rezonans frekansları ve bu frekanslardaki alan dağılımları bulunur. Bu modda port, gerilim kaynağı, akım kaynağı, manyetik alan ön kaynağı tanımlanmaz. Radyasyon sınırları ve frekans tarama aralıkları da tanımlanamaz. Çözüm sırasında belirlenen minimum frekans değerinin üstünde girilecek rezonans frekansı adeti (benzetimlerde 3 adet seçilmiştir) kadar HFSS programı rezonans frekansını belirler ve bu frekanslarda yapının içinde oluşacak EM dağılımını grafik olarak kullanıcıya sunar.

Yapılan analizlerde aynı hacme sahip farklı üç boyutlu şekillerin içinde farklı frekans değerlerinde EM dağılımları Tablo 7.1'de verilmiştir. Yapılar, çokça kullanıldığı düşünülerek örnek olarak 1 cm et kalınlığında polyamid malzeme kaplanmış ve içleri hava ile dolu alınmıştır. EM dağılımları incelendiğinde küp, küre, dikdörtgenler prizması ve silindirde frekans değeri yükseldikçe EM alan dağılımları tüm hacme yayılmaktadır. Bununla beraber maksimum elektrik alanının etkilediği bölge azalmaktadır. Küp ve kürede EM dağılımı merkezde yoğunlaşmakta, dikdörtgenler

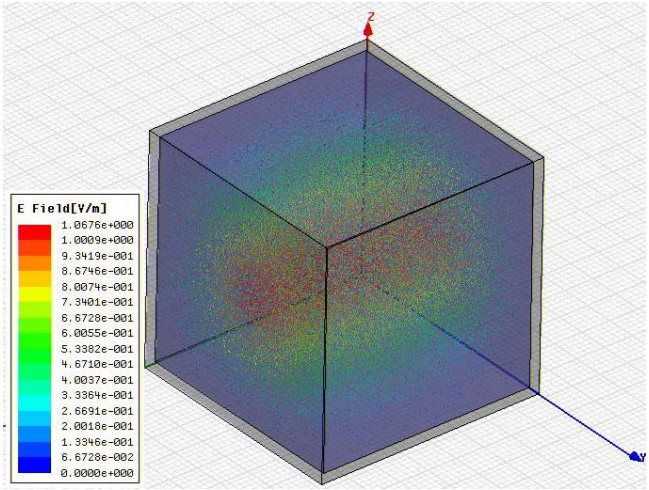
prizmasında iki merkezde toplanmakta, silindirde ise düşük frekanslarda daha az hacimde etkili olmakla beraber 2 GHz frekansında tüm hacme dağılmaktadır.

Tablo 7.1: Farklı Şekillerdeki Yapılarda EM Dağılım Tablosu

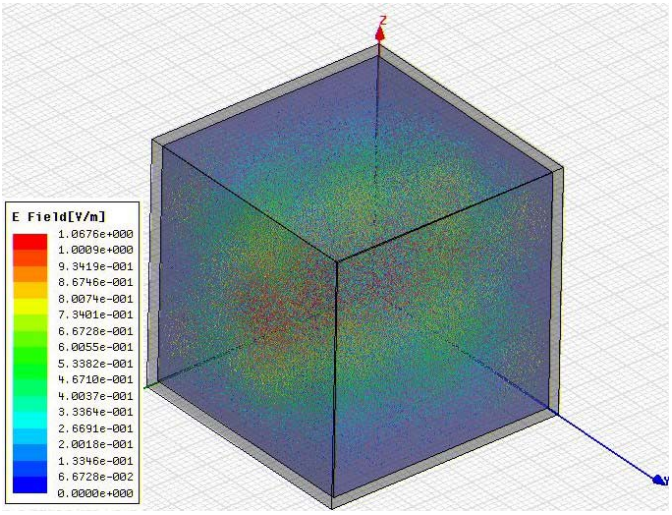
Şekil	**Boyut (cm)**	**Hacim (cm^3)**	**f = 0,5 GHz**	**f = 1 GHz**	**f = 2 GHz**
Küp	a = 37	50653	Şekil 7.5	Şekil 7.6	Şekil 7.7
Dikdörtgenler Prizması	a = 37 b = 21 c = 60	46620	Şekil 7.8	Şekil 7.9	Şekil 7.10
Küre	r = 23	49957	Şekil 7.11	Şekil 7.12	Şekil 7.13
Silindir	r = 23 h = 30	49857	Şekil 7.14	Şekil 7.15	Şekil 7.16



Şekil 7.5: Küpün 0,5 GHz'de EM Dağılımı

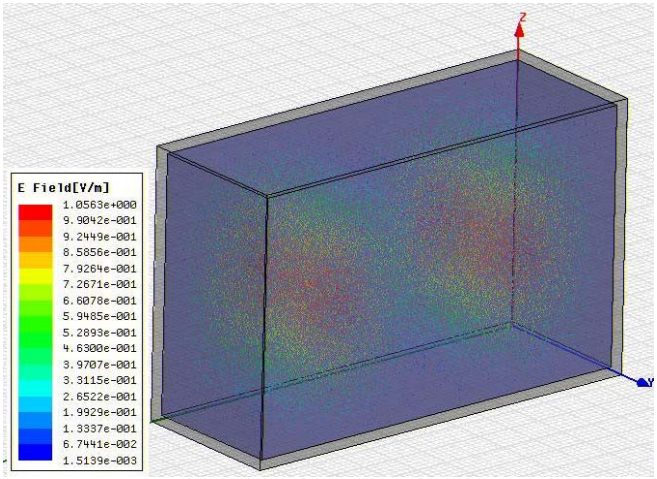


Şekil 7.6: Küpün 1 GHz'de EM Dağılımı

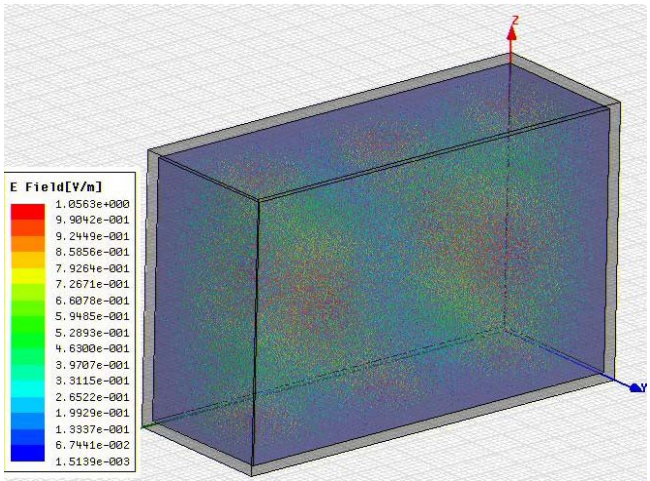


Şekil 7.7: Küpün 2 GHz'de EM Dağılımı

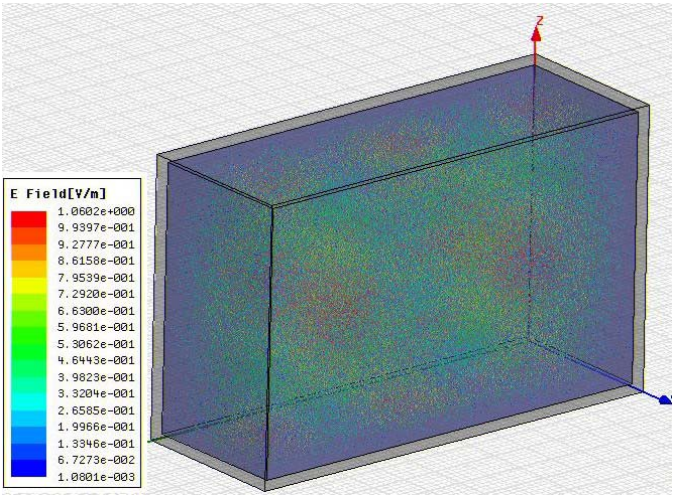
Diktörtgenler prizması biçiminde bir yapıda EM dağılımı iki farklı bölgede yoğunlaşmaktadır. Frekans arttıkça daha fazla hacimde EM dağılımı görülmektedir.



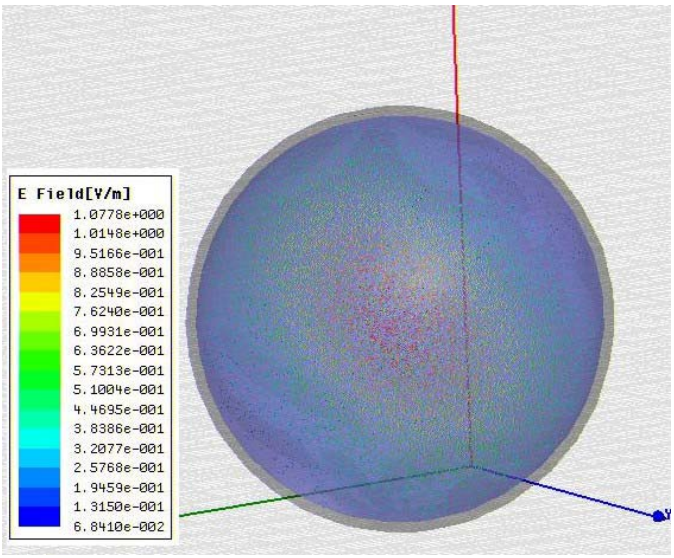
Şekil 7.8: Dikdörtgenler Prizmasının 0,5 GHz'de EM Dağılımı



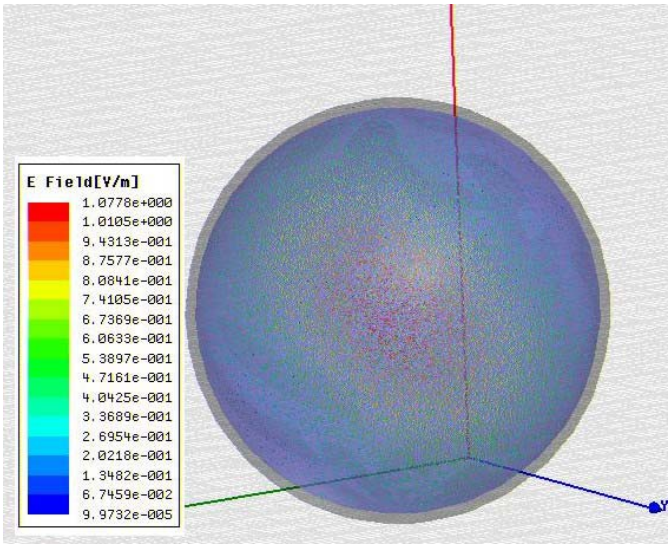
Şekil 7.9: Dikdörtgenler Prizmasının 1 GHz'de EM Dağılımı



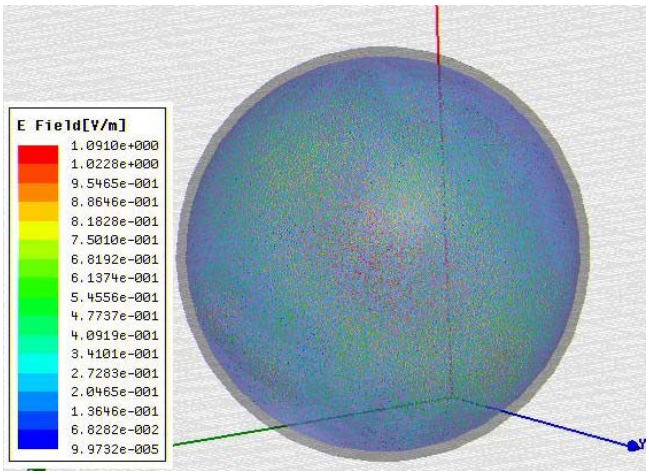
Şekil 7.10: Dikdörtgenler Prizmasının 2 GHz'de EM Dağılımı



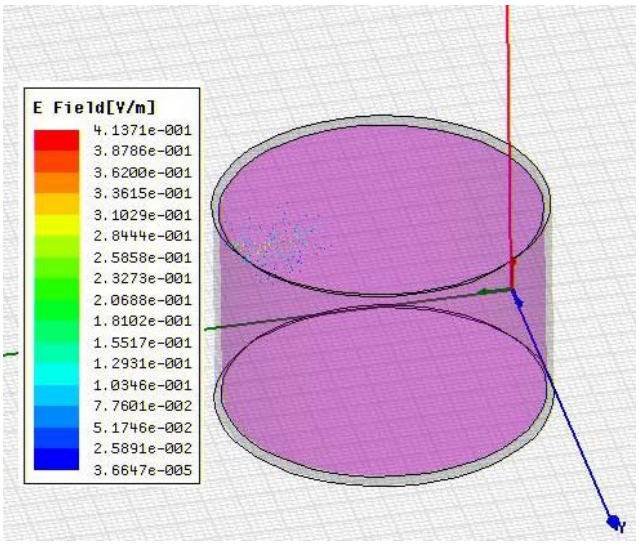
Şekil 7.11: Kürenin 0,5 GHz'de EM Dağılımı



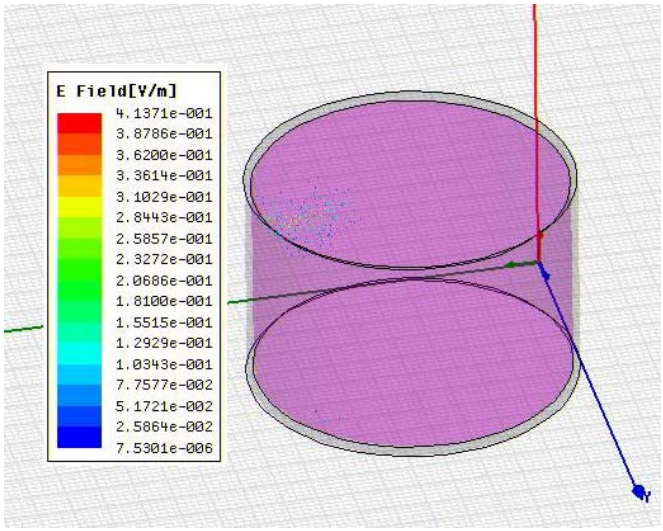
Şekil 7.12: Kürenin 1 GHz'de EM Dağılımı



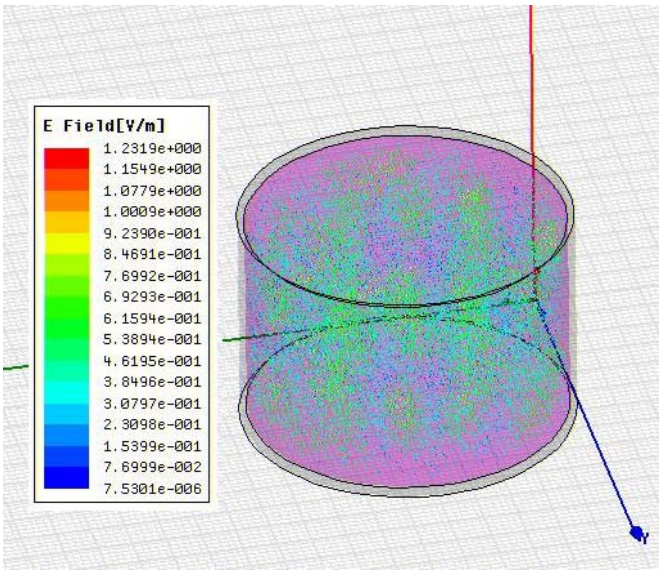
Şekil 7.13: Kürenin 2 GHz'de EM Dağılımı



Şekil 7.14: Silindirin 0,5 GHz'de EM Dağılımı



Şekil 7.15: Silindirin 1 GHz'de EM Dağılımı

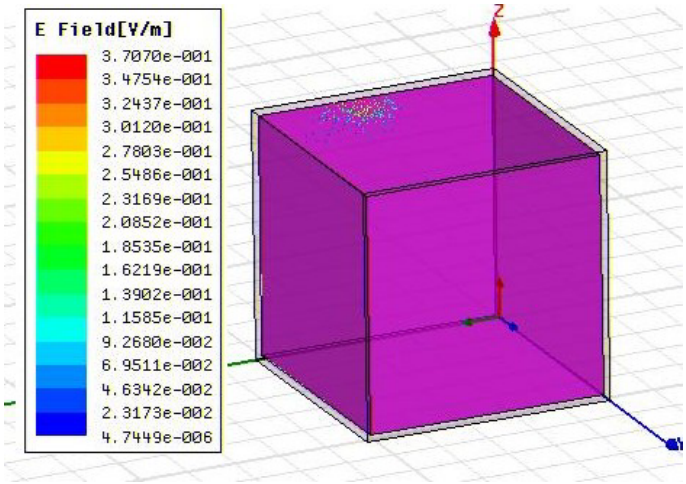


Şekil 7.16: Silindirin 2 GHz'de EM Dağılımı

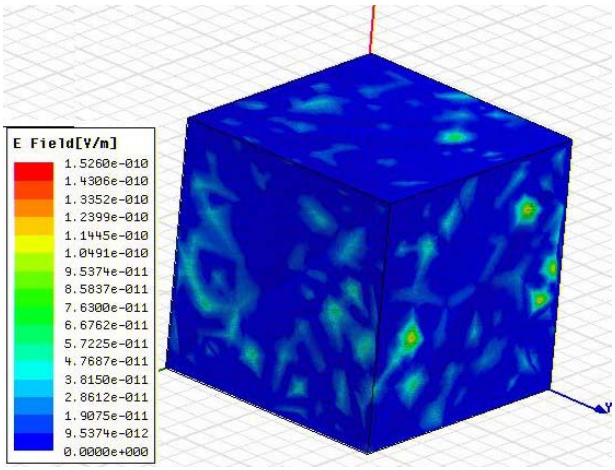
Üç boyutlu bir cismi (küp) çevreleyen 1 cm et kalınlığı olan farklı malzemelerle aynı frekansta (0,5 GHZ'de) oluşan EM dağılımları Tablo 7.2'de verilmiştir. Elektriksel iletkenliği yüksek malzemeler ile hacim çevrelendiğinde içeride oluşan EM alanlar azalmakta ya da hiç olmamaktadır.

Tablo 7.2: Farklı Malzemelerle Kaplanmış Küpün EM Dağılım Tablosu

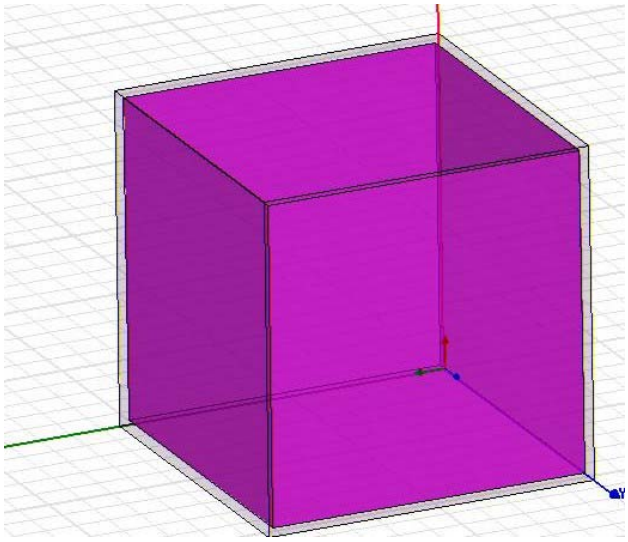
Malzeme	**Boyut (cm)**	**Hacim (cm^3)**	**f = 0,5 GHz**
Polyamid	a = 50	125000	Şekil 7.17
Paladium	a = 50	125000	Şekil 7.18
Bakır	a = 50	125000	Şekil 7.19



Şekil 7.17: Polyamid ile Kaplanmış Küpün 0,5 GHz'de EM Dağılımı



Şekil 7.18: Paladium ile Kaplanmış Küpün 0,5 GHz'de EM Dağılımı

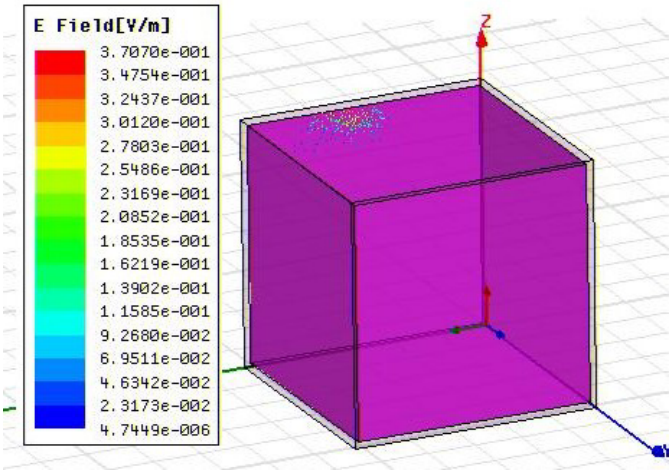


Şekil 7.19: Bakır ile Kaplanmış Küpün 0,5 GHz'de EM Dağılımı

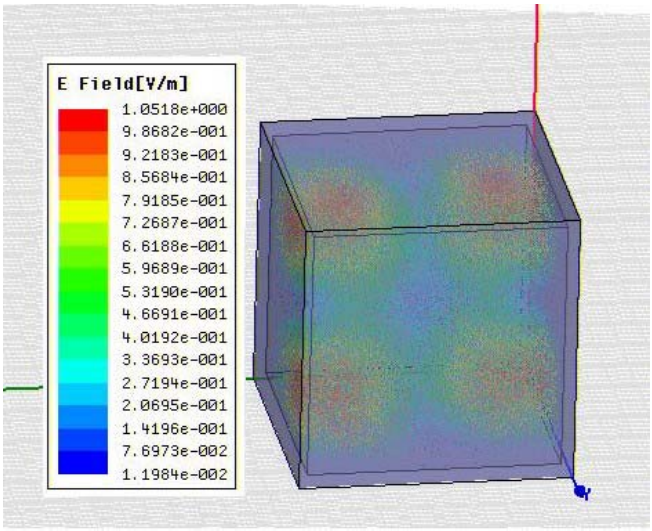
Üç boyutlu bir cismi (küp) çevreleyen farklı et kalınlığı olan aynı malzemelerin aynı frekansta içerisinde oluşan EM dağılımları Tablo 7.3'de verilmiştir. Polyamid elektriksel iletkenliği yaklaşık sıfır olan, bağıl dielektrik sabiti 4.3 ve bağıl manyetik geçirgenliği 1 olan bir malzemedir. Et kalınlığı arttıkça EM dağılımları hacmin daha fazla kısmında etkili olmakla birlikte, maksimum elektrik alan değeri azalmaktadır.

Tablo 7.3: Farklı Kalınlıkta Kaplanmış Küpün EM Dağılım Tablosu

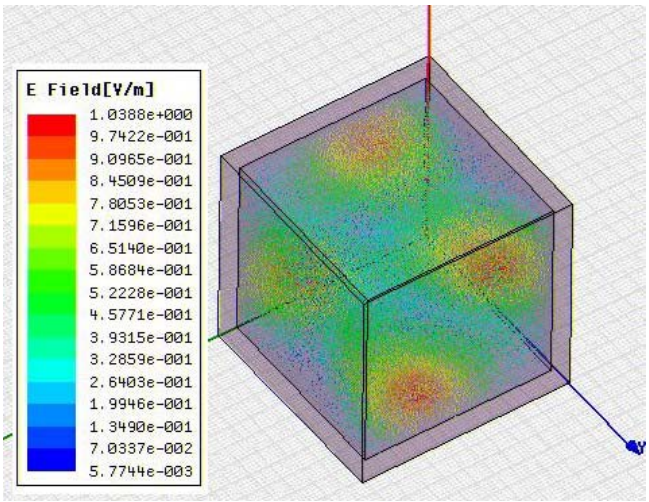
Et Kalınlığı	Boyut (cm)	Hacim (cm^3)	f = 0,5 GHz
1 cm Polyamid	a = 50	125000	Şekil 7.20
2 cm Polyamid	a = 50	125000	Şekil 7.21
3 cm Polyamid	a = 50	125000	Şekil 7.22



Şekil 7.20: 1 cm Polyamid ile Kaplanmış Küpün EM Dağılımı



Şekil 7.21: 2 cm Polyamid ile Kaplanmış Küpün EM Dağılımı

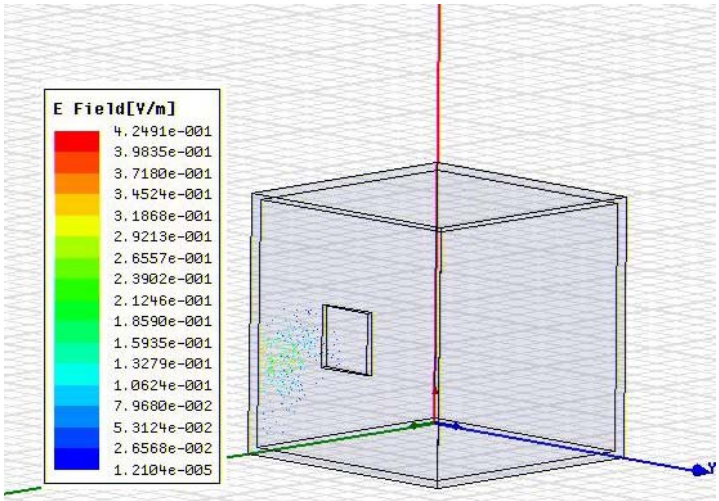


Şekil 7.22: 3 cm Polyamid ile Kaplanmış Küpün EM Dağılımı

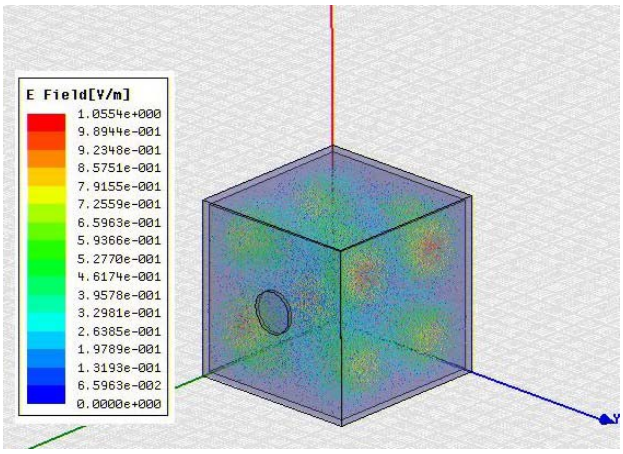
Üç boyutlu bir cismin (küp) her bir yüzeyinin merkezine açılmış eşit alandaki farklı pencere şekillerinin aynı frekansta içlerinde oluşan EM dağılımları Tablo 7.4'de verilmiştir. Açılan pencere 100 cm^2 alanında kare ve 78 cm^2 alanında daire şeklinden oluşmaktadır. Ayrıca benzetimde kullanılan küp 40 cm x 40 cm x 40 cm boyutundadır. Et kalınlığı 1 cm olan polyamid ile kaplanmıştır. Kare gibi köşeli pencereler EM dağılımlarının daha az hacimde etkili olmasını sağlamaktadır. Köşesi olmayan daire gibi şekiller ise EM dağılımlarının tüm hacme yayılmasını sağlamaktadır. Yapı üzerinde aynı tipten ve aynı sayıda pencerenin bulunduğu ve yapının çeşitli yönlerinden alanın gösterildiği şekiller beklendiği gibi birbirinden farklı değildir. Çünkü alan kaynağı dışarıda ve yapı dışında homojen olarak var olduğundan çözüm sonuçları simetriktir, aynıdır.

Tablo 7.4: Küpün Yüzeylerine Yerleştirilmiş Bir Pencerenin Oluşturduğu EM Dağılım Tablosu

Yüzey	**Pencere Şekli**	**Pencere Alanı** (cm^2)	**f = 1 GHz**
Ön	Kare	100	Şekil 7.23
Ön	Daire	78	Şekil 7.24
Arka	Kare	100	Şekil 7.25
Arka	Daire	78	Şekil 7.26
Sağ	Kare	100	Şekil 7.27
Sol	Daire	78	Şekil 7.28
Üst	Daire	78	Şekil 7.29
Alt	Kare	100	Şekil 7.30
Alt	Daire	78	Şekil 7.31

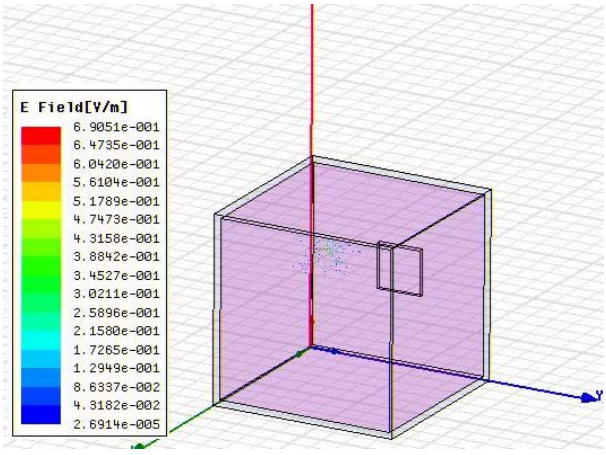


Şekil 7.23: Kare Pencere Önde

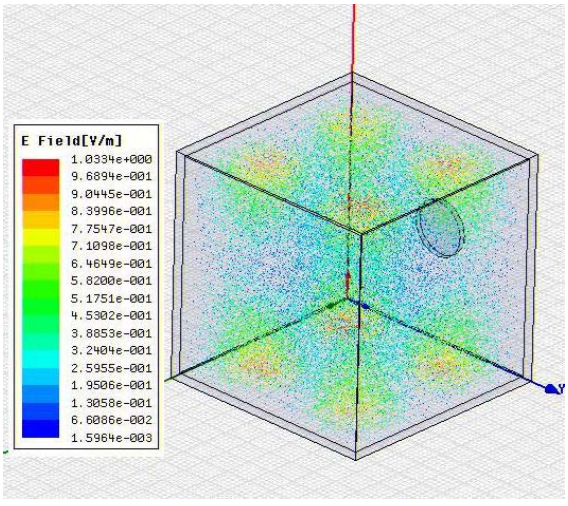


Şekil 7.24: Yuvarlak Pencere Önde

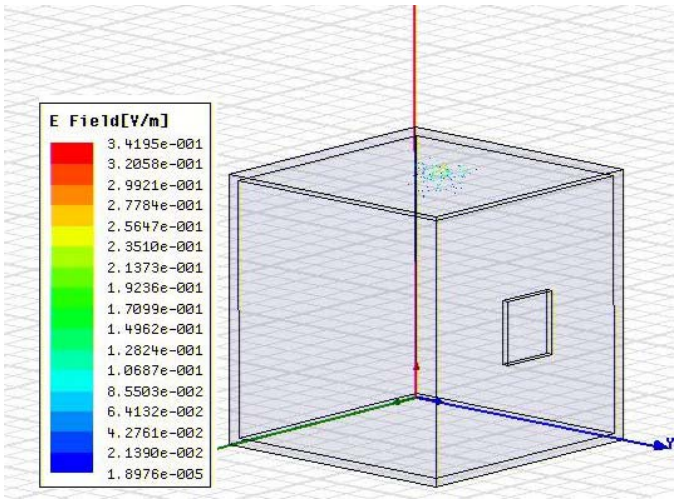
Yapının üzerinde açılan pencerenin şekli yuvarlak olduğunda yapının iç bölgesinin büyük bir kısmında EM dağılımı görülmektedir. Açılan pencere şekli kare olduğunda yalnızca küçük bir hacimde EM dağılımı vardır.



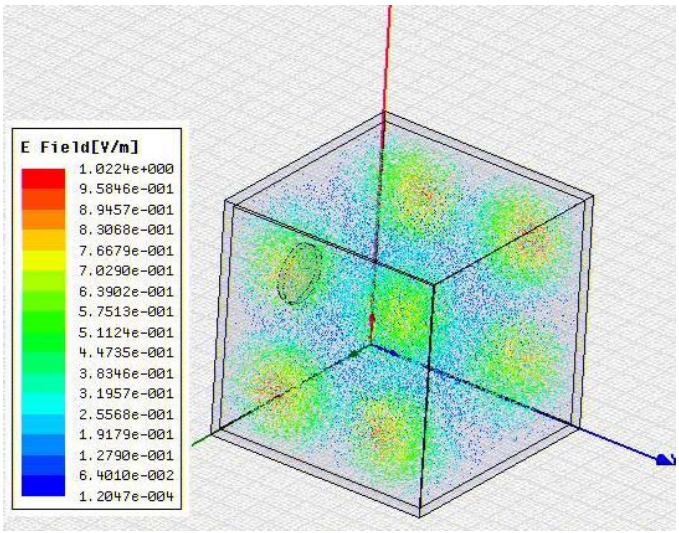
Şekil 7.25: Kare Pencere Arkada



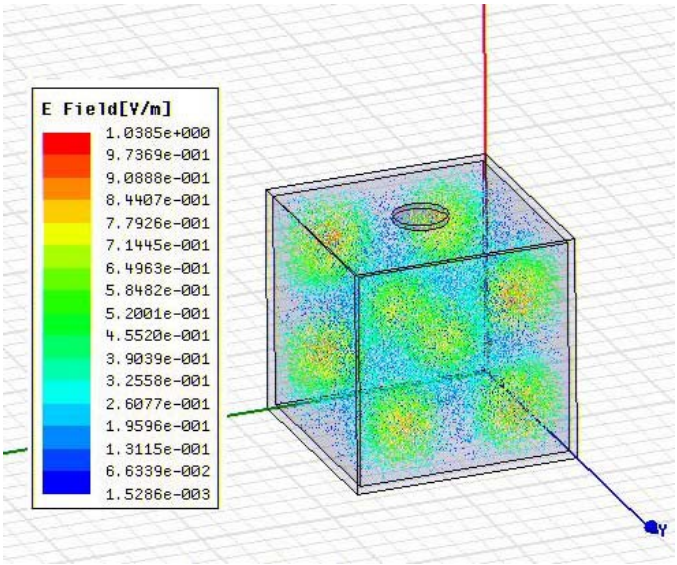
Şekil 7.26: Yuvarlak Pencere Arkada



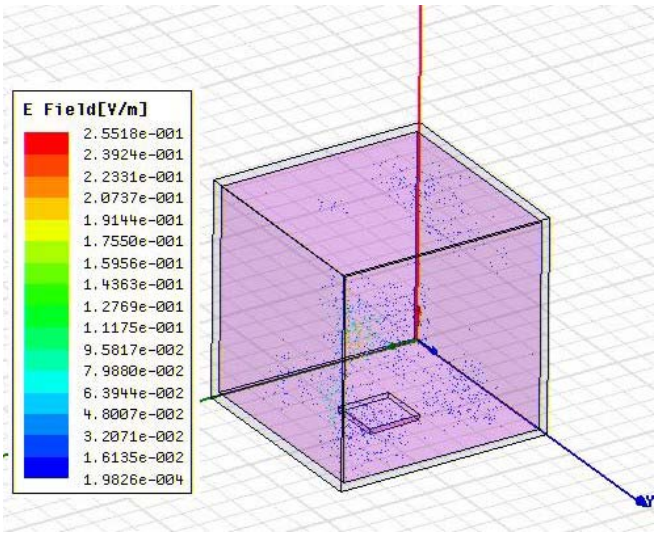
Şekil 7.27: Kare Pencere Sağda



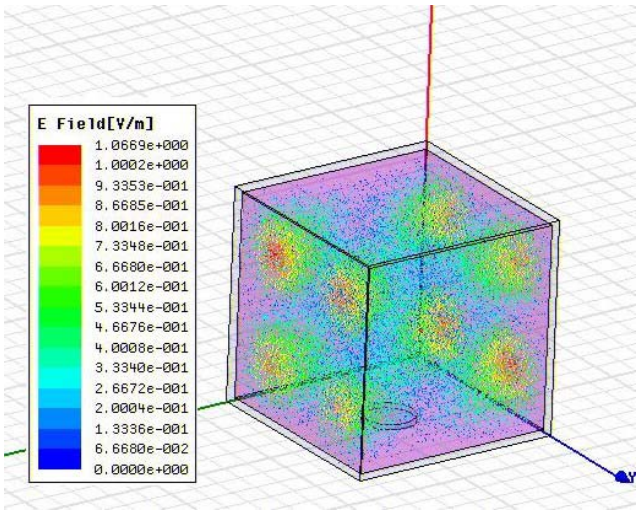
Şekil 7.28: Yuvarlak Pencere Solda



Şekil 7.29: Yuvarlak Pencere Üstte



Şekil 7.30: Kare Pencere Altta



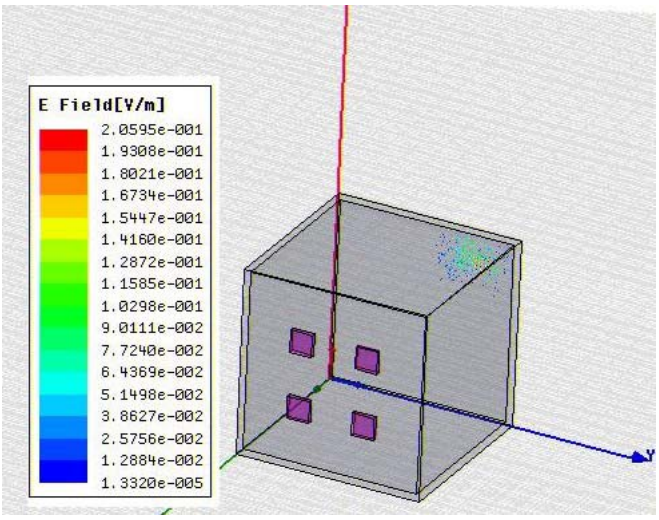
Şekil 7.31: Yuvarlak Pencere Altta

Üç boyutlu bir cismin 40 cm x 40 cm x 40 cm boyutunda bir küpün aynı frekansta her bir yüzeyine dört adet eşit alanda kare pencere ve üç adet yuvarlak pencerelerin yerleştirilmesi ile küpün içinde oluşan EM dağılımı Tablo 7.5'de verilmiştir. Kare pencerelerin EM dağılımlarını küpün içinde köşelere doğru ve dairelerin ise küpün iç kısımlarına doğru yoğunlaştırdığı görülmektedir. Şekil 7.32 ile Şekil 7.23 kıyaslandığında aynı toplam alana sahip pencere açılmak istendiğinde 1 adet yerine 4 adet pencere açılması durumunda EM dağılımının maksimum değeri azalacaktır. Ayrıca Şekil 7.33 ve Şekil 7.24 kıyaslandığında tek bir daire şeklinde pencere açmak küp içinde hacmin tamamında EM dağılımının etkili olacağı, buna rağmen 3 adet daire biçiminde pencere açıldığında EM dağılımının çok daha az hacimde etkili olacağı görülmektedir. Fakat, maksimum elektrik alan değeri artmaktadır. Sonuç

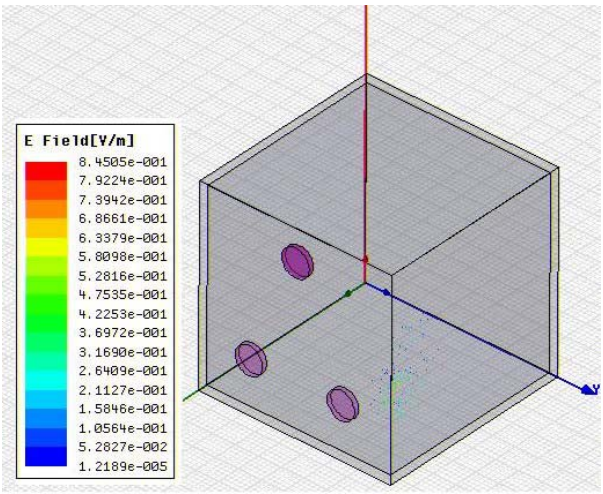
olarak açılacak pencerelerin sayısının fazla olması tasarım açısından daha önemlidir. EM dağılım oluşmayan bölgelere duyarlı elektrik, elektronik sistem ve devreler kurulabilir.

Tablo 7.5: Küpün Yüzeylerine Yerleştirilmiş Çok Sayıda Pencerenin EM Dağılım Tablosu

Yön	Pencere Şekli	Pencere Alanı (cm^2)	f=0.5 GHz
Ön	Kare	4 x 25	Şekil 7.32
Ön	Daire	3 x 28	Şekil 7.33
Arka	Kare	4 x 25	Şekil 7.34
Arka	Daire	3 x 28	Şekil 7.35
Sağ	Kare	4 x 25	Şekil 7.36
Sağ	Daire	3 x 28	Şekil 7.37
Sol	Kare	4 x 25	Şekil 7.38
Sol	Daire	3 x 28	Şekil 7.39
Üst	Kare	4 x 25	Şekil 7.40
Üst	Daire	3 x 28	Şekil 7.41
Alt	Kare	4 x 25	Şekil 7.42
Alt	Daire	3 x 28	Şekil 7.43

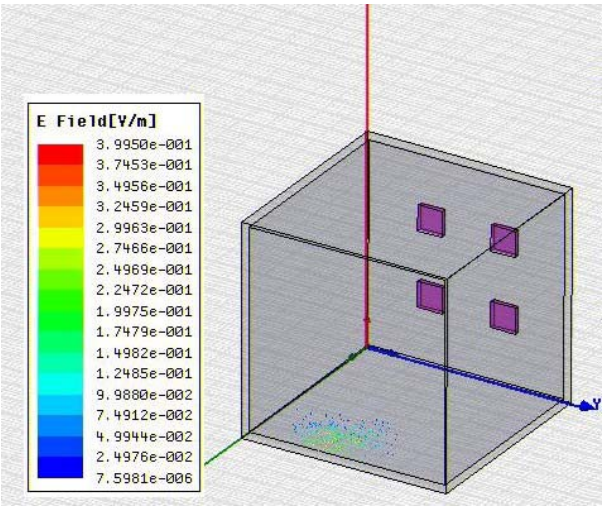


Şekil 7.32: Kare Pencereler Önde

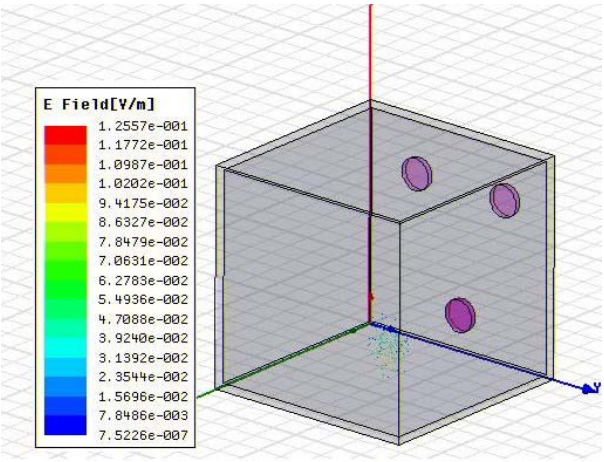


Şekil 7.33: Yuvarlak Pencereler Önde

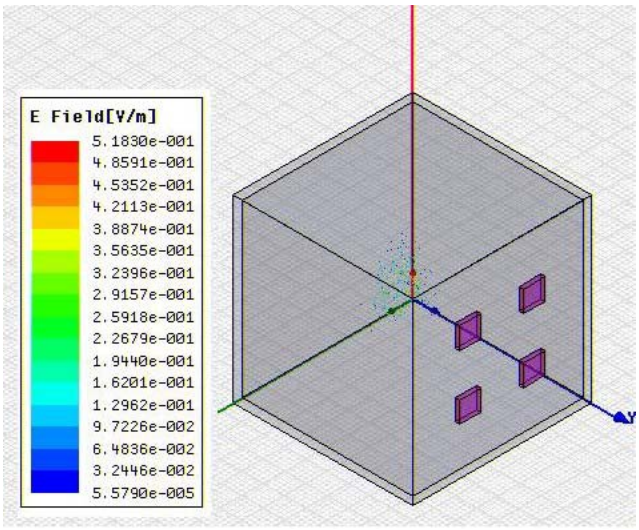
Yapının üzerinde açılan pencere sayısı arttığında özellikle tek yuvarlak pencere ile kıyaslandığında oldukça az bir hacimde EM dağılımı görülmektedir.



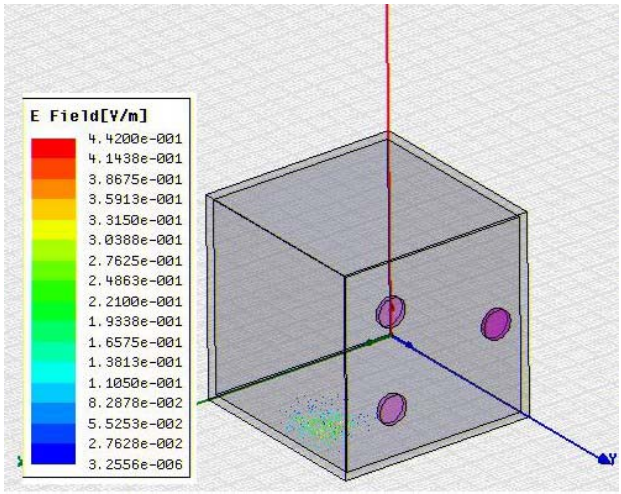
Şekil 7.34: Kare Pencereler Arkada



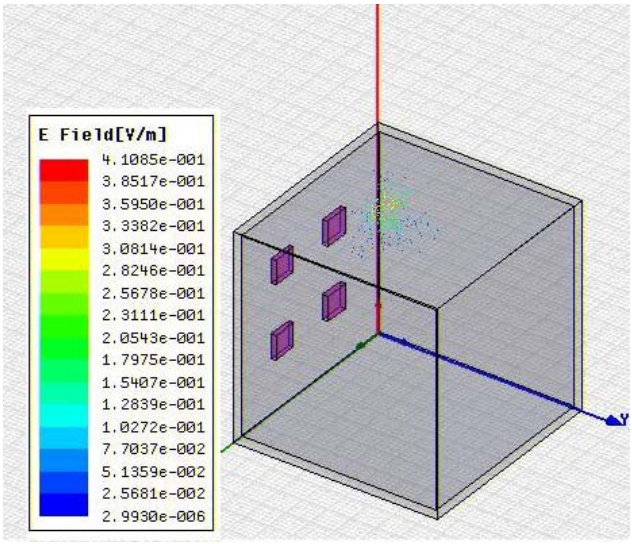
Şekil 7.35: Yuvarlak Pencereler Arkada



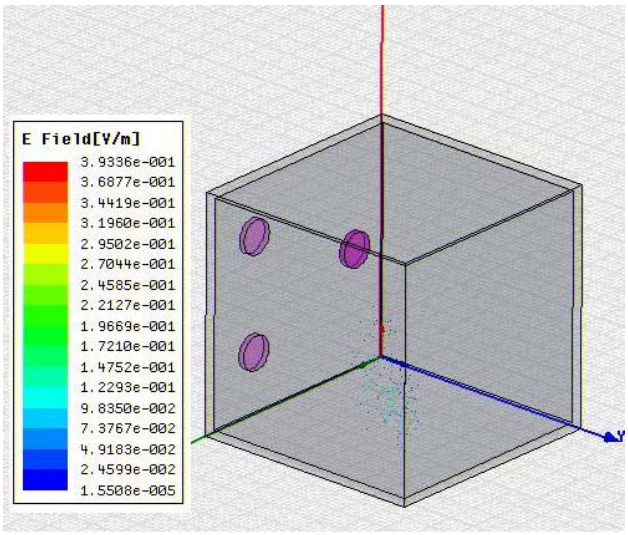
Şekil 7.36: Kare Pencereler Sağda



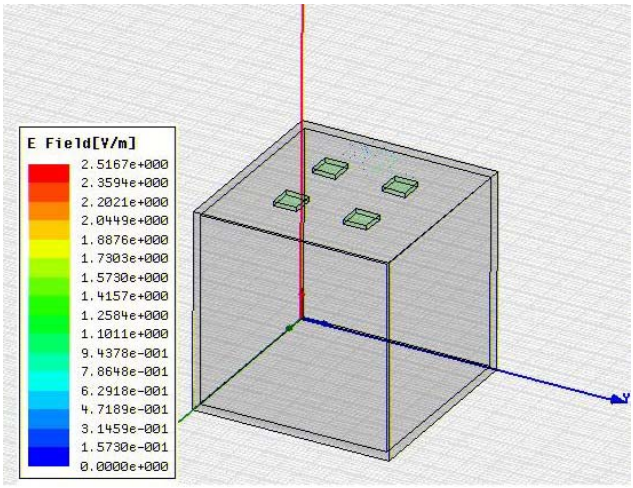
Şekil 7.37: Yuvarlak Pencereler Sağda



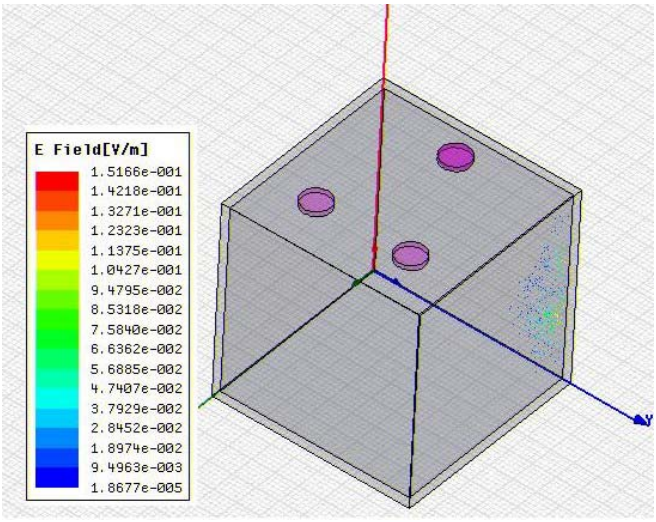
Şekil 7.38: Kare Pencereler Solda



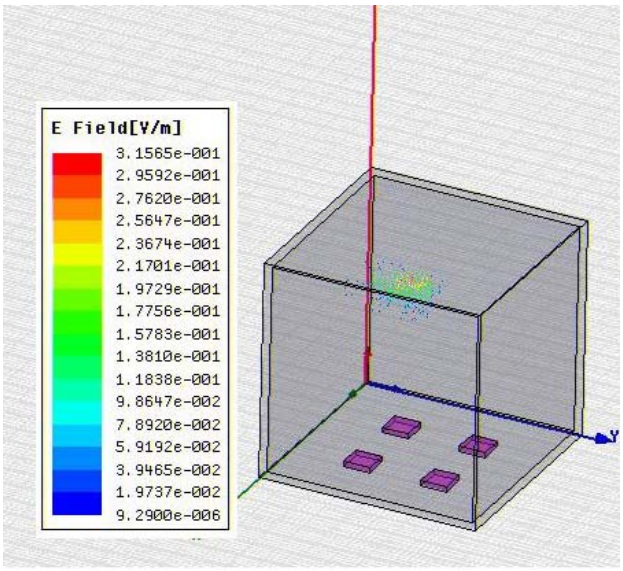
Şekil 7.39: Yuvarlak Pencereler Solda



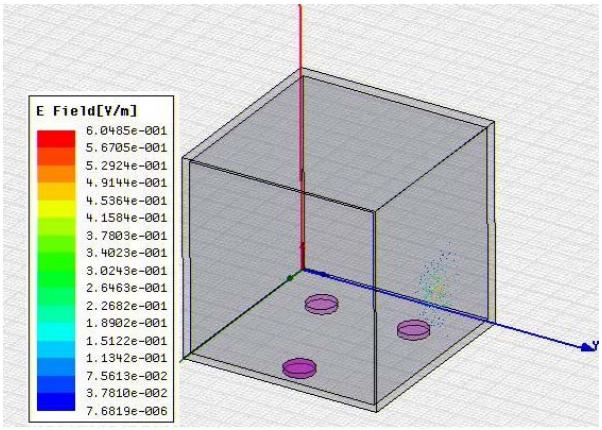
Şekil 7.40: Kare Pencereler Üstte



Şekil 7.41: Yuvarlak Pencereler Üstte



Şekil 7.42: Kare Pencereler Altta

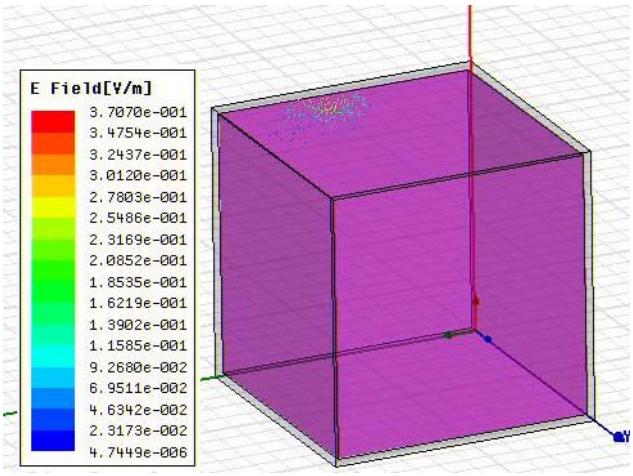


Şekil 7.43: Yuvarlak Pencereler Altta

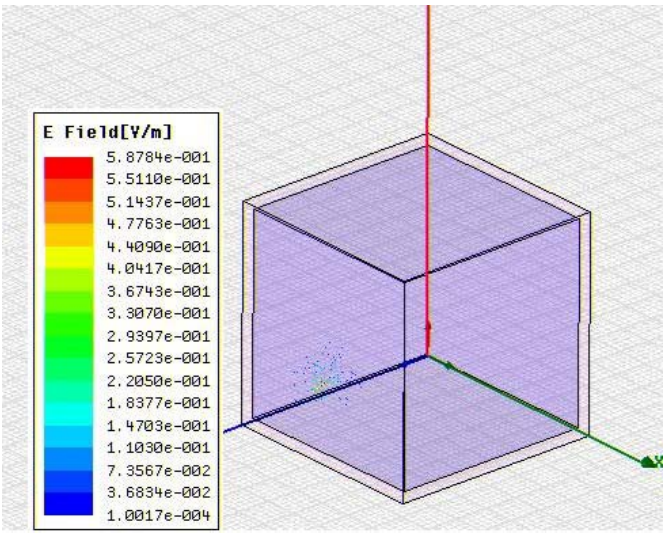
Üç boyutlu 1 cm polyamid kaplı bir cismin (küp) farklı boyutlarda aynı frekansta içerisinde oluşan EM dağılımları Tablo 7.6'da verilmiştir. Bununla beraber benzetimde her boyut için 1 cm et kalınlığında polyamid kullanıldığından, hacim et kalınlığı oranı aslında malzeme hacmi küçüldükçe artmaktadır.

Tablo 7.6: Farklı Boyutlarda Aynı Cismin EM Dağılım Tablosu

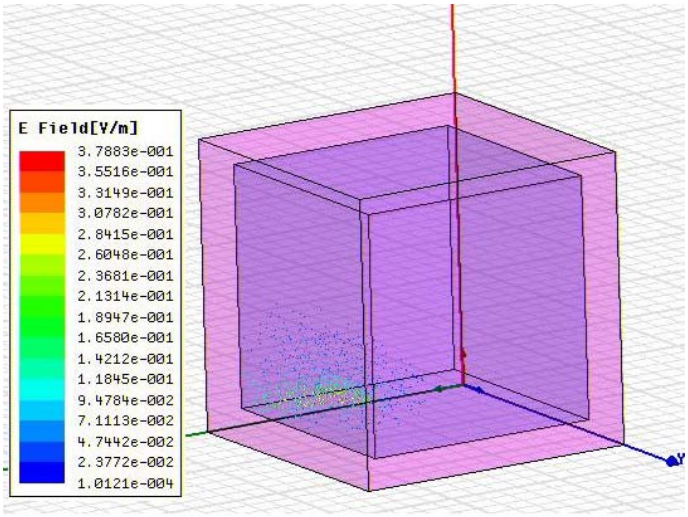
Cisim	**Boyut (cm)**	**Hacim (cm^3)**	**f = 0,5 GHz**
Küp	a = 50	125000	Şekil 7.44
Küp	a = 30	125000	Şekil 7.45
Küp	a = 10	125000	Şekil 7.46



Şekil 7.44: 50 cm x 50 cm x 50 cm Boyutunda Küp



Şekil 7.45: 30 cm x 30 cm x 30 cm Boyutunda Küp

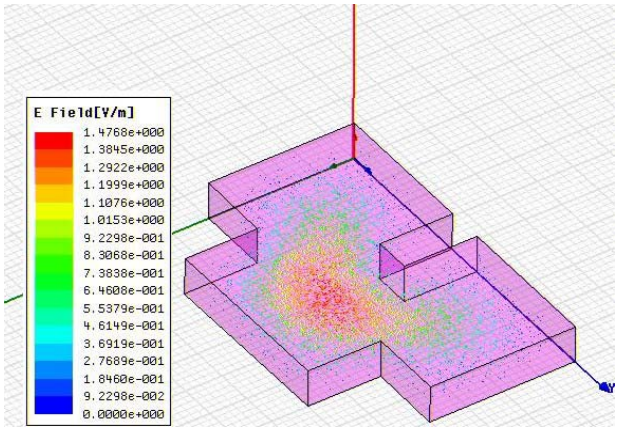


Şekil 7.46: 10 cm x 10 cm x 10 cm Boyutunda Küp

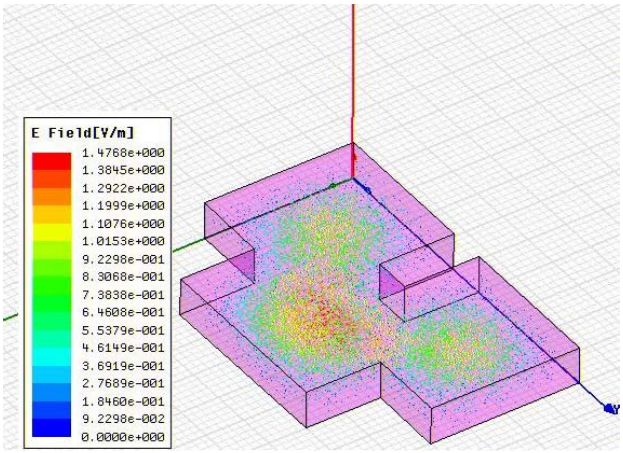
Kompleks üç boyutlu bir cismin (5500 cm^3) kaplama olmadan ve 1 cm polyamid kaplı farklı frekanslarda, içerisinde meydana gelen EM dağılımları Tablo 7.7'de verilmiştir. Frekans değeri arttıkça maksimum elektrik alan değeri azalmaktadır. Ayrıca, polyamid malzeme ile kaplamak maksimum elektrik alan değerini azaltmaktadır. Yarıklı olan kısım EM dağılımlarını ön kısmında yoğunlaştırmaktadır. Bu da köşeler ile ya da tasarım ile aslında istenilmeyen bölgede EM dağılımlarının olmamasının sağlanabileceği anlamına gelmektedir.

Tablo 7.7: Kompleks Bir Cismin Farklı Frekanslarda EM Dağılım Tablosu

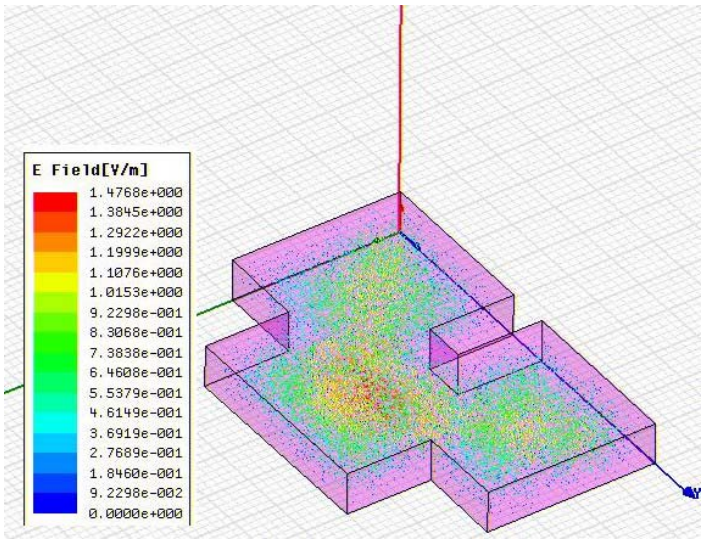
Cisim	Malzeme	Hacim (cm^3)	f = 0,5 GHz	f = 1 GHz	f = 2 GHz
Yarıklı Cisim	Kaplı Değil	5500	Şekil 7.47	Şekil 7.48	Şekil 7.49
Yarıklı Cisim	Polyamid	5500	Şekil 7.50	Şekil 7.51	Şekil 7.52



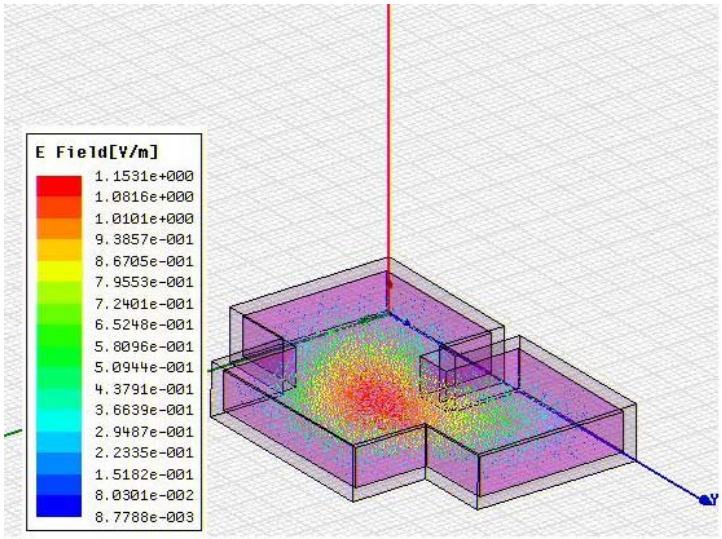
Şekil 7.47: Kaplanmamış Yarıklı Cisimde 0,5 GHz'de EM Dağılımı



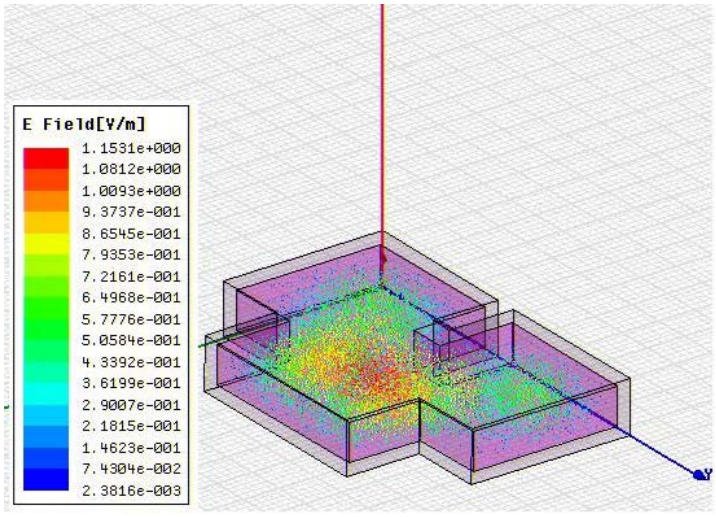
Şekil 7.48: Kaplanmamış Yarıklı Cisimde 1 GHz'de EM Dağılımı



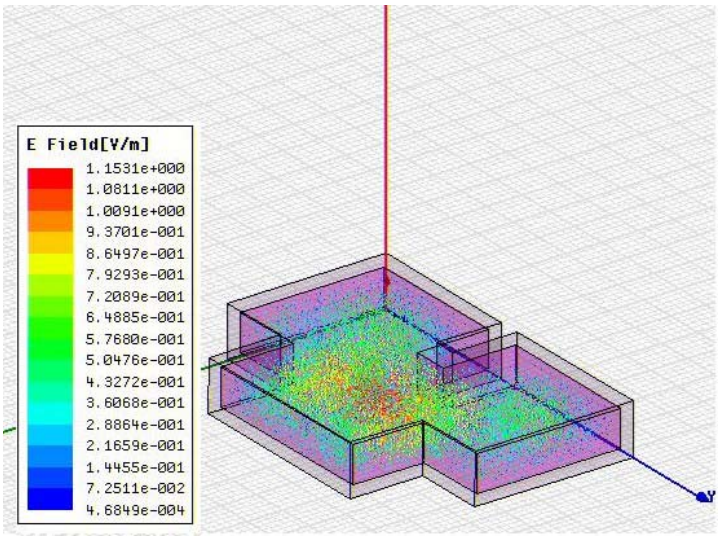
Şekil 7.49: Kaplanmamış Yarıklı Cisimde 2 GHz'de EM Dağılımı



Şekil 7.50: Polyamid Kaplanmış Yarıklı Cisimde 0,5 GHz'de EM Dağılımı



Şekil 7.51: Polyamid Kaplanmış Yarıklı Cisimde 1 GHz'de EM Dağılımı



Şekil 7.52: Polyamid Kaplanmış Yarıklı Cisimde 2 GHz'de EM Dağılımı

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yakın geçmişe kadar bilinmeyen EMP etkisi, elektrik-elektronik elemanların, devrelerin ve sistemlerin, insan yaşamına girmeye başladığı 19.yy'ın ortalarında yapılan bir nükleer deneme sonucunda fark edilmiştir. Etkisinin büyüklüğü ve önemi bilimin ilgisini çekmiş ve o günden bugüne çalışmalar yapılmıştır. Kontrol edilebilir bir EMP'nin ülkeler arasındaki güç yarışında kullanılabilecek bir unsur olduğu oldukça açıktır. EMP'nin elektrik-elektronik elemanlar, devreler ve sistemler üzerindeki bozucu ya da tahrip edici etkisi, üretilebilir bir duruma gelmesi gün geçtikçe ülkelerin, savunma sistemlerinde EMP'yi dikkate almalarını zorunlu hale getirmiştir.

Sistemlerin öncelikle önem derecesine göre sınıflandırılması ve bu sınıflandırmaya göre EMP'ye karşı korunması ya da dayanıklılığının arttırılması gerekmektedir. Sistem tasarımından başlayarak sistemin devreye alınmasına kadar geçen her aşamada EMP etkisi dikkate alınmalıdır. Ekranlama, topraklama, filtre ve koruyucu devreler gibi korunma teknikleri dikkate alınarak tasarlanan sistemler, EMP deney düzenekleri ile denenmeli ve EMP'ye karşı dayanıklılığı onaylanmalıdır.

Tez çalışmasının sonuçları incelendiğinde, elektromanyetik darbelerden korunma adına alınabilecek önlemlerden biri olan ekranlamanın yapı geometrisi, yapı üzerindeki açıklıklar, açıklıkların boyutu, sayıları, konumları, malzeme özellikleri ve alanın frekansı gibi birçok etken göz önüne alınmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan benzetimlerin analizleri incelendiğinde, yapı üzerine açılması gereken pencerelerin sayısının artması elektrik alanın daha az bir hacimde etkili olması sonucunu doğurduğundan tercih edilmelidir. Ayrıca açılacak pencerelerin köşeli olması daire gibi köşesiz şekillerle kıyaslandığında, daha az bir hacimde elektrik alanın etkili olması sonucunu doğurduğundan yapıların tasarımında dikkate alınmalıdır. Benzetimler incelendiğinde, yapıların tasarımında benzetimlerin sistem dayanıklılığını arttırmak için oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre sistemler EMP'ye karşı en dayanıklı biçimde tasarlanabilir.

Böylece, hayati öneme sahip elektrik-elektronik elemanlar, devreler ve sistemler, tasarımda yapı geometrisi, yapı üzerindeki açıklıklar ve açıklıkların boyutu gibi etkenlerin kontrolü ile kurulum maliyetlerini arttırmadan EMP'ye karşı dayanıklı hale getirilebilirler.

KAYNAKLAR

[1] **Sevgi, L.**, 2000. Elektromanyetik Uyumluluk Elektromanyetik Kirlilik, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İstanbul, Türkiye.

[2] **Akhunlar A.**, 1971. Elektrik Alanlarına Giriş 1 Statik Elektrik Alan, Teknik Üniversite Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.

[3] http://www.biltek.tubitak.gov.tr/merak_ettikleriniz/index.php?kategori_id id=2&soru_id=5180, Aralık, 2007.

[4] http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51//e_and_v.htm, Aralık, 2007.

[5] **Adamczyk, A., Law, P. F.**, 2005. Elektrik ve Manyetizma, TUBİTAK Popüler Bilim Kitapları (8. Basım), Ankara.

[6] http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51//mag_field.htm, Becker J. F., San Jose State University, 2007.

[7] **Jordan, E. C., Balmain K. G.**, 1968. Electromagnetic Waves and Radiating Systems, Prentice Hall, Englawood Cliffs, New Jersey.

[8] **Kong, J. A.**, 1990. "Electromagnetic Wave Theory", Chapter 1, Wiley-Interscience, New York.

[9] **Akkaya, İ.**, 2002. Elektromagnetik Alan Teorisi, Alternatif Kitap, İstanbul.

[10] **Scott, J. S., Zyl, C. V.**, 1997. Introduction to EMC, Newnes, London.

[11] **Laplante, P. A.**, 2000. Electrical Engineering Dictionary, CRC Press LLC, Boca Raton.

[12] **Şeker, S., Çerezci O.**, 1994. Elektromagnetik Dalgalar ve Mühendislik Uygulamaları, Boğaziçi Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

[13] **Williams, T.**, 2001. EMC for Product Designers, Newnes, London.

[14] **Goedbloed, J. J.**, 1992. Electromagnetic Compatibility, Prentice-Hall, New York.

[15] **Ying, W., Chemerys V., Dongsheng X.**, 1999. "The Multi-Function EMP Simulator", IEEE 12th International Pulsed Power Conference, California, USA, June 27-30.

[16] **Kim, T., Lin, C.**, 2004. "Physically Based Animation and Rendering of Lightning", Proc. of Pacific Graphics, Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill.

[17] **Üstüner, F., Araz, İ.**, 2007. "Elektromanyetik Ortam Etkilerinin Benzetiminde Yüksek Gerilim Kaynağı İhtiyaçları", Yüksek Gerilim Ulusal Çalıştayı, 24-26 Ekim 2007, Kocaeli.

[18] **Committee on National Security**, 1997. Thread Proposed By EMP to US Military System and Civil Infrastructure Military Research and Development Subcommittee, Washington.

[19] **Patel, M. R.**, 2005. Spacecraft Power Systems, CRC Press, Florida.

[20] http://www.caps.org.pk/Papers/April2002.htm, Ocak, 2008.

[21] http://www.globalsecurity.org/military/library/report/1996/apjemp.htm , Mart, 2008.

[22] **Gut, J.**, 1987. "The Swiss EMP Concept of General Defense", IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, Zurich, Switzerland, December 1987.

[23] **Sebastiani, S.**, 1991. "Protecting VHF Antennas from EMP", IEEE International Symposium, pp. 297-300, Cherry Hill, NJ, USA, 12-16 Aug. 1991.

[24] **Taylor, T. B.**, 1987. "Third Generation Nuclear Weapons", Scientific American, Vol. 256. No. 4, pp. 22-31.

[25] http://www.en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_pulse, Aralık, 2007.

[26] **Ghosh C. N.**, 2000. EMP Weapons, Strategic Analysis: A Monthly Journal of the IDSA, Vol. 24, No. 7.

[27] http://www.doh.wa.gov/ehp/rp/factsheets/factsheets-htm/fs41elecpuls.htm, Şubat, 2008.

[28] **Lehr, M., Bamert, L., Bell, K., Cavazos, T., Chama, D., Coffey, S., Degnan, J., Gale, D., Kiuttu, G., Pellitier, P., Sommars, W.**, 1999. "Helical Explosive Flux Compression Generator Research at the Air Force Research Laboratory", IEEE 12th International Pulsed Power Conference, California, USA, June 27-30.

[29] **Jiang, W., Woolverton, K., Dickens, J., Kristiansen, M.**, 1999. "High Power Microwave Generation by a Coaxial Vircator", IEEE 12th International Pulsed Power Conference, California, USA, June 27-30.

[30] **Harada, N.**, 2001. "MHD Pulsed Power Generation and Applications", IEEE 13th International Pulsed Power Conference, Las Vegas, Nevada USA, June 17-22.

[31] **Deju, L., Youliang, C.**, 1999. "The Research of Protection from EMP of Civil Shelter", Power Engineering and Automation and Research Office, Nanjing Engineering Institute, Nanjing, PRC.

[32] http://www.physics.gla.ac.uk/, Aralık, 2007.

[33] **Herndon, R. L.**, 1990. "Engineering and Design - Electromagnetic Pulse (EMP) and Tempest Protection for Facilities", Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers, Washington, USA, December 31.

[34] **Weston, A. D**., 1991. Electromagnetic Compalibity – Principles and Applications, Markel Dekker Inc., Canada.

[35] **Lihua, S., Bin, C., Cheng, G., Zhengdong, L., Hailin, C.**, 2003. "Experiments on the Susceptibility of the Direct Digital Control System to EMP in

Intelligent Buildings", Asia-Pasific Conference on Environmental Electromagnetics CEEM'2003, Hangzhou, China, Nov. 4-7.

[36] **Morrison, R.**, 1998. Grounding and Shielding Techniques in Instrumentations, 4th Edition, Wiley, USA.

[37] **Sevgi L.**, 2003. EMC-BEM Mühendisliği: Fizik Temelli Yaklaşım, Uygulamalı Eğitim ve Modelleme, Endüstriyel Otomasyon, Kasım 2003.

[38] download.intel.com/education/highered/signal/ELCT762/**class08**.ppt, Şubat, 2008.

[39] **Zvyagintsev, V., Bylinski Y.**, 2005. "HFSS Simulation of Vacuum Tube RF Power Amplifier", Particle Accelerator, Tennessee, USA, May 16-20.

ÖZGEÇMİŞ

Fatih Işık 1979 yılında Afyon'da doğdu. Orta öğretimini Antalya Aksu Anadolu Öğretmen Lisesi'nde 1997 yılında tamamladı. 1997 yılında kazandığı İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2002 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Savunma Teknolojileri Yüksek Lisans Programına kabul edildi. 2003 yılından beri ERDEMİR'de Elektrik Mühendisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.