



**PLAZMA HÜCRELERİNİN YAYGIN OLARAK KULLANILDIĞI BİR
İŞLETMEDE ELEKTROMANYETİK KİRLİLİK ANALİZİNİN
YAPILMASI**

Nihan Merve SARIKAHYA

**DOKTORA TEZİ
KAZALARIN ÇEVRESEL VE TEKNİK ARAŞTIRMASI ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nihan Merve SARIKAHYA

08/06/2023

PLAZMA HÜCRELERİNİN YAYGIN OLARAK KULLANILDIĞI BİR İŞLETMEDE ELEKTROMANYETİK KİRLİLİK ANALİZİNİN YAPILMASI

(Doktora Tezi)

Nihan Merve SARIKAHYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesi ile elektrik ve elektronik cihazların kullanımı hızla artmakta olup günlük hayatta vazgeçilmez hale gelmiştir. İnsanların hayatını hemen hemen her aşamada kolaylaştıran bu cihazlar birçok avantajının yanı sıra oluşturdıkları elektromanyetik alanlar ile de istenmeyen problemlere ve etkilere neden olmaktadır. Öncelikle bir ortamda meydana gelen elektromanyetik alandan korunmak için kaynaktan uzak durmak gerekir. Aynı zamanda bilim ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte elektromanyetik alan maruziyetini azaltmak amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de elektromanyetik girişimi önlemek, istenmeyen etkileri minimize etmek amacıyla ekranlama yapılmasıdır. Bu çalışmada yeni tasarlanan ve üretilen plazma cihazının elektromanyetik alan ölçümleri ve ekranlama çalışmaları yapılmıştır. Cihaz, dolum gazı basıncına bağlı olarak 10 kV'a kadar yüksek gerilimle çalışmaktadır ve düşük basınçlı hücrede elektrik ve manyetik alan yardımıyla plazma yapıları oluşturmak için bir çift elektrot içermektedir. Basit bir torus geometrisi olan hazneye sahip plazma, Helyum gazı ile çalıştırılmaktadır. Söz konusu cihazdan farklı mesafelerde ve yönlerde elektrik alan ölçümü yapılmış ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonu önlemek için petek, kare ve sineklik tipi farklı ekranlama malzemeleri kullanılarak yapılan ölçümler tekrarlanmıştır. Söz konusu malzemelerle yapılan elektrik alan ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, optimum ekranlama değeri elde etmek için ekranlama malzemesinin tipinin çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 90516
Anahtar Kelimeler : Plazma, ekranlama, elektromanyetik girişim (EMG), iyonlaştırıcı olmayan radyasyon
Sayfa Adedi : 95
Danışman : Prof. Dr. Erol KURT

PERFORMING ELECTROMAGNETIC POLLUTION ANALYSIS IN A WORKPLACE
WHERE PLASMA CELLS ARE WIDELY USED

(Ph. D. Thesis)

Nihan Merve SARIKAHYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Nowadays with the rapid progress of technology, the use of electrical and electronic devices is increasing rapidly and has become indispensable in daily life. These devices, which make people's lives easier at almost every stage, cause unwanted problems and effects with the electromagnetic fields they create, as well as many advantages. First of all, it is necessary to stay away from the source in order to be protected from the electromagnetic field that occurs in an environment. At the same time, with the development of science and technology, many methods have been developed to reduce electromagnetic field exposure. One of these methods is shielding in order to prevent electromagnetic interference and to minimize undesirable effects. In this study, electromagnetic field measurements and shielding studies of the newly designed and manufactured plasma device were performed. The device operates with a high voltage of up to 10 kV depending on the charge gas pressure and includes a pair of terminals to create plasma structures by the help of electric and magnetic fields in the low pressure chamber. Plasma, which has a simple torus geometry chamber, is powered by Helium gas. Electric field measurements were made at different distances and directions from the device and the measurements were repeated using different shielding materials such as honeycomb, square and swatter to prevent the non-ionizing radiation. When the electric field measurement results made with these materials are compared, it is concluded that the types of the shielding materials are very important in order to obtain the optimum shielding value.

Science Code : 90516

Key Words : Plasma, shielding, electromagnetic interference (EMI), nonionizing radiation

Page Number : 95

Supervisor : Prof. Dr. Erol KURT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince değerli bilgi ve birikimleriyle akademik gelişimime katkı sağlayan ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Erol KURT' a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması boyunca desteklerini esirgemeyen ve her zaman olumlu katkılarda bulunan tez izleme komitemde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Mustafa Necmi İLHAN' a ve Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU' na teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen rahmetli babam Hasan AKGÜL' e ve annem Fatma AKGÜL' e başta olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkür ederim. Doktora sürecinin yoğun çalışma süresince her zaman yanımda olan sevgili eşim Mehmet SARIKAHYA' ya, hayatımızın neşesi canım oğlum Kerem Buğra SARIKAHYA' ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL KAVRAMLAR	3
2.1. Elektromanyetik Alanlar	3
2.1.1. Zamana göre değişen elektromanyetik alanlar	5
2.1.2. Radyasyon yayan elektromanyetik alanlar	5
2.2. Elektromanyetik Spektrum.....	6
2.3. Maxwell Denklemleri.....	7
2.3.1. Faraday yasası	7
2.3.2. Amper yasası	7
2.3.3. Gauss yasası.....	8
2.3.4. Manyetik alan için Gauss yasası.....	9
2.4. Özgül Soğurma Hızı (SAR)	9
2.5. Elektromanyetik Girişim (EMG)	10
2.5.1. Işıma yoluyla elektromanyetik girişim	12
2.5.2. İletkenlik yoluyla elektromanyetik girişim	12
2.6. Elektromanyetik Uyumluluk.....	13

	Sayfa
2.7. Elektromanyetik Uyumluluğun Sağlanması	14
2.7.1. İletimsel bağlantı	15
2.7.2. Manyetik bağlantı.....	15
2.7.3. Kapasitif bağlantı.....	16
2.7.4. Yayınımsal bağlantı.....	17
3. EKCRANLAMA	19
3.1. Elektromanyetik Girişimden Korunma Yöntemleri.....	19
3.1.1. Filtreleme.....	19
3.1.2. Topraklama.....	22
3.1.3. Bağlama	25
3.1.4. Kablolama.....	25
3.1.5. Devre tasarımında elektromanyetik girişim çözümleri	28
3.2. Elektromanyetik Ekranlama.....	30
3.2.1. Ekranlama etkinliği ölçümü	33
3.2.2. Ekranlama mekanizması.....	36
3.2.3. Ekranlama etkinliği	38
3.2.4. Yansıma, soğurma ve çoklu yansıma ile ekranlama ilişkisi.....	39
3.2.5. Çoklu yansıma kayıpları.....	42
3.2.6. Mevcut EMG ekranlama malzemeleri.....	43
3.3. Yakın ve Uzak Alan	45
3.3.1. Dalga empedansı	47
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	49
4.1. Plazma Dinamiği.....	49
4.2. Plazma ve Füzyon ile İlgili Genel Bilgiler.....	49

	Sayfa
4.2.1 Toroidal plazma cihazı (TPC) modeli.....	51
4.3. Magnetron Teorisi.....	53
4.3.1 Magnetronun çalışma prensibi	56
4.4. DC Kapasitif Deşarj Plazma Benzetimi.....	56
4.5. Ölçüm Cihazı ve Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler	59
4.5.1. Ölçüm cihazı	59
4.5.2. Ölçüm yöntemi.....	61
4.6. Ölçüm Sonuçları.....	61
4.6.1. Magnetron cihazı ölçüm sonuçları	62
4.6.2. Toroidal plazma cihazı ölçüm sonuçları	69
4.7. Deneysel Sonuçlar.....	73
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Koruyucu malzemelerin iletkenlik ve manyetik geçirgenlik sabitleri	48
Çizelge 4.1. Mesafeye bağlı olarak ölçülen elektrik alan değerleri	63
Çizelge 4.2. Mesafeye bağlı olarak ölçülen güç yoğunluğu değerleri	64
Çizelge 4.3. Mesafeye bağlı olarak ölçülen güç yoğunluğu değerleri	65
Çizelge 4.4. Açısal yönde elektrik alan değerleri	66
Çizelge 4.5. Açısal yönde güç yoğunluğu değerleri	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Pozitif Q yükünün oluşturduğu elektrik alan.....	3
Şekil 2.2. Elektrik alan çizgileri.....	3
Şekil 2.3. Elektromanyetik alanlar.....	5
Şekil 3.1. Filtre örnekleri	21
Şekil 3.2. Topraklama örneği.....	23
Şekil 3.3. Topraklama örneği.....	24
Şekil 3.4. Bağlama örnekleri.....	25
Şekil 3.5. Kabloların konnektöre bağlantı performansı	28
Şekil 3.6. Baskı devre yerleşim planı.....	29
Şekil 3.7. Alıcı ve kaynak için ekranlama uygulaması.....	31
Şekil 3.8. Ekranın içinde ve dışında bulunan ortamın girişimden korunması	32
Şekil 3.9. Açıklık yöntemi ile SE ölçümü.....	33
Şekil 3.10. Korumalı kutu ile SE ölçümü	34
Şekil 3.11. Eşeksenli iletim hattı spektrumu.....	35
Şekil 3.12. Ekranlı oda yöntemi.....	36
Şekil 3.13. Elektromanyetik ekranlama mekanizması.....	37
Şekil 3.14. Düzlem dalgada SE tanımlaması	37
Şekil 3.15. Yutucu bir ortamda ilerleyen bir dalganın üssel zayıflaması	41
Şekil 3.16. Düzlem dalganın ekranlama etkinliği.....	42
Şekil 3.17. Yakın ve uzak alan geçiş bölgeleri	45
Şekil 3.18. Dalga empedansı ve kaynaktan uzaklık arasındaki ilişki	47
Şekil 4.1. Poloidal ve toroidal sargılı plazma cihazı.....	52
Şekil 4.2. TPH'nin genel görüntüsü ve transformatörlü deney düzeneği	52

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Magnetronun yapısı	54
Şekil 4.4. a) Yarık tipi, b) Daire sektörü tipi, c) Doğan güneş tipi, d) Delik tipi çınlayıcı	55
Şekil 4.5. Anot bloğundaki çınlayıcı.....	55
Şekil 4.6. Tasarlanan TPH cihazının a) y eksen, b) z eksen c) tam görüntüsü.....	57
Şekil 4.7. Tasarlanan TPH cihazındaki potansiyel dağılımı	58
Şekil 4.8. Tasarlanan TPH cihazındaki elektrik alan dağılımı.....	58
Şekil 4.9. Elektromanyetik alan ölçüm cihazı	60
Şekil 4.10. Frekansa bağlı değişen elektromanyetik alan ölçüm problemleri	60
Şekil 4.11. Deneysel düzenek	62
Şekil 4.12. Elektromanyetik alan ölçüm cihazı ile magnetron değerlerinin ölçümü	63
Şekil 4.13. 16,25 kV'ta yapılan elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçüm değerleri.....	64
Şekil 4.14. 16,25 kV'ta elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçüm değerleri	65
Şekil 4.15. 16,25 kV'ta açısal yönde elektrik alan değerleri	66
Şekil 4.16. 16,25 kV'ta açısal yönde güç yoğunluğu değerler	67
Şekil 4.17. $\theta=0$ noktasında uzaklığa bağlı elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçümleri ...	68
Şekil 4.18. Açısal güç yoğunluğu ölçümleri kutupsal çizimi	69
Şekil 4.19. Plazma cihazının deneysel seti	70
Şekil 4.20. Plazma sistemi çalışırken ekranlamasız yapılan ölçüm.....	70
Şekil 4.21. Sineklik tipi ekranlama malzemesi.....	71
Şekil 4.22. Petek tipi ekranlama malzemesi	72
Şekil 4.23. Kare tipi ekranlama malzemesi	72
Şekil 4.24. Plazmada üstten alınan ölçüm noktaları	73
Şekil 4.25. Plazma sistemi çalışırken ekranlamasız önden ölçümler.....	74
Şekil 4.26. Plazma sistemi çalışırken ekranlamasız yandan ölçümler.....	74

Şekil	Sayfa
Şekil 4.27. Plazma sistemi çalışırken ekranlamasız üstten ölçümler.....	75
Şekil 4.28. Plazma sistemi çalışırken petek tipi ekranlamalı önden ölçümler.....	76
Şekil 4.29. Plazma sistemi çalışırken petek tipi ekranlamalı yandan ölçümler	77
Şekil 4.30. Plazma sistemi çalışırken petek tipi ekranlamalı üstten ölçümler	77
Şekil 4.31. Plazma sistemi çalışırken kare tipi ekranlamalı önden ölçümler.....	78
Şekil 4.32. Plazma sistemi çalışırken kare tipi ekranlamalı yandan ölçümler.....	79
Şekil 4.33. Plazma sistemi çalışırken kare tipi ekranlamalı üstten ölçümler.....	79
Şekil 4.34. Plazma sistemi çalışırken sineklik tipi ekranlamalı önden ölçümler.....	80
Şekil 4.35. Plazma sistemi çalışırken sineklik tipi ekranlamalı yandan ölçümler	81
Şekil 4.36. Plazma sistemi çalışırken sineklik tipi ekranlamalı üstten ölçümler	81
Şekil 4.37. Plazma sistemi çalışırken uzaklığa göre elektrik alan değerleri	82
Şekil 4.38. İç ve dış elektromanyetik alan değerleri	83
Şekil 4.39. Plazma sisteminin farklı yöntemlerde ekranlama etkinliği.	84

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
B	Manyetik akı yoğunluğu
c	Işık hızı
D	Elektriksel akı yoğunluğu
dk	Dakika
dB	Desibel
E	Elektrik alan şiddeti
F	Farad
f	Frekans
GHz	Gigahertz
q	Yük miktarı
H	Manyetik alan şiddeti
Hz	Hertz
J	Akım yoğunluğu
L	Endüktans
MHz	Megahertz
ms	milisaniye
N	Newton
P	Güç
R	Direnç
rpm	Devir sayısı
S	Siemens
s	saniye
T	Tesla
t	Süre
V	Volt
v	Hız

Simgeler**Açıklamalar****W**

Watt

Wb

Weber

Z

Empedans

 μ

Manyetik geçirgenlik (permeability)

 ϵ

Elektriksel geçirgenlik (permittivity)

 λ

Dalga boyu

 π

Pi sayısı

 ω

Açısal frekans

 σ

Elektriksel iletkenlik

 Ω

Direnç birimi

 δ

Deri kalınlığı

Kısaltmalar**Açıklamalar****CM**

Ortak Mod

DM

Fark Mod

EMG

Elektromanyetik girişim

EMC

Elektromanyetik uyumluluk

IEEE

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü

SE

Kalkanlama etkinliği

SE_A, A

Soğurma kaybı

SE_R, R

Yansıma kaybı

SE_M, M

Çoklu yansımalar kaybı

TPH

Toroidal Plazma Hücresi

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte elektrik elektronik cihazların kullanımı hızla hayatın her alanına yayılmaktadır. Bununla birlikte cihazların performansını etkileyen elektromanyetik girişimin neden olduğu istenmeyen durumların yaşandığı elektromanyetik uyumluluk problemleri yaşanmaktadır. Örneğin; cep telefonu çaldığı zaman TV ekranlarının karıncalanması, elektrikli matkap kullanıldığı zaman radyo yayının parazit yapması gibi günlük hayatta herkesin yaşadığı birtakım problemler elektromanyetik girişim olarak nitelendirilmektedir.

Tarihte elektromanyetik girişimin neden olduğu büyük çapta maddi ve manevi zarara neden olan olaylar da yaşanmıştır. 1963 yılı aralık ayında B-707 uçağı Philadelphia havalimanına iniş yaparken yıldırım çarpmasıyla sol kanatta yer alan yakıt deposu ateşlenmiş ve uçak düşmüştür. Yaşanan bu kazada 81 kişi ölmüştür [1]. 1967 yılında USS Forrestal bir uçak gemisinin radarından yayılan elektromanyetik alanın bu uçağa takılı bir roketi ateşlemesi ile 134 kişi ölmüş, 172 milyon \$'dan fazla maddi hasar ve 32 uçak yanmıştır. Bu iki örnek gibi tarihte yaşanmış büyük maddi ve manevi zarara neden olan kazalar az değildir [1].

Elektromanyetik uyumluluk, cihazların ya da sistemlerin kendi içinde uyumlu olması, diğer cihaz ya da sistemlerle herhangi bir elektromanyetik girişime neden olmaması ve karşı taraftan gelen yayınlara karşı duyarlı olmaması demektir [2]. Literatür incelendiğinde elektromanyetik uyumluluğu sağlamak için birçok çalışma bulunmaktadır. 2000 yılında Chung tarafından yapılan çalışmada elektromanyetik alan kaynaklarında girişimi önlemek için yapılan ekranlamada kullanılan kompozit malzemeler ve yüksek frekanslarda radyasyon yansıtması ile kalkanlama yapan malzemeler incelenmiştir [3]. 2004 yılında Shim tarafından yapılan çalışmada elektromanyetik alan kaynaklarından korumak amacıyla üzerinde açıklıklar bulunan kutuların ekranlama etkinlik değerleri hesaplanarak değerlendirilmiştir [4].

2008 yılında Geetha ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada elektromanyetik alanın kontrol edilebilmesi için kullanılan metal, iletken plastikler ve iletken polimerler gibi malzemeler incelenmiştir [5]. 2011 yılında Başyigit tarafından yazılan Elektromanyetik Ekran Verimliliğinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi konulu tezde 100MHz-1GHz ile 6-

13GHz aralığında bulunan cihaz ve sistemler için elektromanyetik alan ekranlama verimliliği incelenmiştir. Ekranlama açıklığı ile geniş band ekranlama verimi incelenmiştir [6].

2019 yılında Anjaneyalu tarafından yapılan çalışmada hibrit polimer nanokompozitlerdeki ikincil dolgu malzemelerinin elektriksel iletkenlik, dielektrik ve elektromanyetik girişim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Birçok çalışmada polimer matrislerin düşük kütle yoğunluğu ve elektriksel süzülme eşiği ve yüksek en boy oranı nedeniyle çok duvarlı karbon nanotüpler birinci iletken nanotüp malzemesi olarak kullanılmaktadır. İkinci iletken olarak elektromanyetik girişimin ekranlama üzerindeki etkisini incelemek için polimer bazlı manyetik ve dielektrik nano doldurucular kullanılmaktadır. Eriyik karıştırma ve çözelti gibi karıştırma teknikleri de bulunmaktadır. Ayrıca ikincil nano doldurucuların geometrisi ve en boy oranına bağlı olarak nanokompozitlerin ekranlama özellikleri hibrit dolgu maddeleri ile sinerjik etki yoluyla geliştirildi. Çalışmada düşük dolgu içeriğine ve kalınlığa sahip iletken polimer nanokompozitler en yüksek ekranlama etkinliğini göstermiştir [7]. 2020 yılında Mathur ve Raman tarafından yapılan çalışmada elektromanyetik alan ölçüm ve azaltma teknikleri anlatılmaktadır. Elektromanyetik alan ölçüm teknikleri emisyon ve bağışıklık testi, korunma yolları ise filtreler, devre topolojisi modifikasyonu ve yayılma spektrumu ile sağlanmaktadır [8].

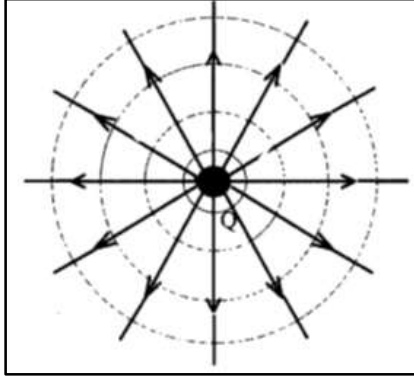
Bu tez çalışmasında elektromanyetik girişimin neden olduğu performansı etkileyen, istenmeyen etkilerini azaltacak uygulamalardan ve bunların içinde etkinliği yüksek olan ekranlama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Tez çalışmasının ikinci bölümünde, elektromanyetik alanlar ile ilgili temel kavramlar anlatılmıştır. Elektromanyetik girişimin sebepleri, önleme yolları ve elektromanyetik uyumluluk ile ilgili bilgilere yer verilmiştir. Tez çalışmasının üçüncü bölümünde elektromanyetik girişimden korunma yöntemleri, ekranlama ve ekranlama etkinliği ölçme yöntemleri anlatılmıştır. Tez çalışmasının dördüncü bölümünde ise plazma hücreleri, toroidal plazma cihazı, magnetron ve çalışma şekli, ölçüm cihazı, ölçüm düzeneği ve yapılan ölçümlere yer verilmiştir. Son bölümde ise geliştirilen uygulamalar neticesinde alınan ölçüm sonuçları ve elde edilen ekranlama etkinliğinden bahsedilmiştir. Yine literatürde yer alan çalışmaların farklı yönleri irdelenmiş gelecek çalışmalar için bir yol haritası belirlenmiştir.

2. TEMEL KAVRAMLAR

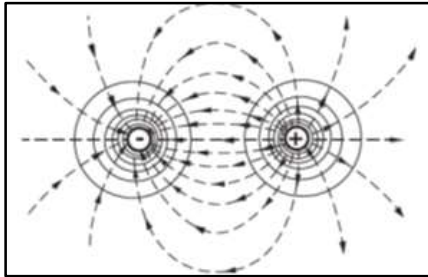
2.1. Elektromanyetik Alanlar

Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle birlikte çevresel etkilerden biri olan elektromanyetik alanlara maruziyetin artması tüm canlılar için endişe vericidir. Esasen elektromanyetik alanların en bilinen örneği ışık evrenin doğuşundan itibaren var olmuştur.

Elektromanyetik alan; elektrik yüklerinin hareketi ile oluşan, elektrik (E) ve manyetik alan (H) bileşenlerine sahip iki vektörel alandan meydana gelir. Alandaki diğer yüklü nesnelere kuvvet uygulayan pozitif ya da negatif yükler tarafından Şekil 2.1’de yer aldığı gibi elektrik alan meydana gelir ve V/m ile ifade edilir. Elektrik alanlar cep telefonu vb. gibi elektromanyetik alan yayan cihazlara yaklaştıkça artar. Yani mesafe ile elektrik alanlar ters orantılıdır. Küresel koordinat sisteminin merkezindeki bir Q yükü için, Şekil 2.2’de yer aldığı üzere herhangi bir P noktasındaki elektrik alan şiddeti aşağıdaki formül ile verilir [9].



Şekil 2.1. Pozitif Q yükünün oluşturduğu elektrik alan



Şekil 2.2. Elektrik alan çizgileri

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0 r^2} \hat{a}_r \text{ (V/m)} \quad (2.1)$$

$\vec{E}$: Elektrik alan şiddeti (V/m)

Q : Q yükü (C)

r : P noktası ile Q yükü arasındaki mesafe (m)

ϵ_0 : Boşluğun elektriksel geçirgenlik sabiti (F/m)

Manyetik alanlar ise elektrik yüklerinin hareketi ile meydana gelir ve A/m ile ifade edilir. Manyetik alanın yönü ile akım yönü arasındaki ilişki sağ el kuralı ile belirlenir [6]. Birim alana düşen manyetik alanın büyüklüğü manyetik akı yoğunluğu olarak bilinir ve T ile gösterilir. Manyetik alanlar da elektrik alanları gibi genellikle kaynağın yakınında en güçlüdür ve mesafe arttıkça azalır [10]. Ancak herhangi bir akım olmadığında dahi elektrik alanlar mevcut olsa da manyetik alanlar sadece akım varsa (örneğin; bir cihaz açıldığında) oluşur. Manyetik alan şiddeti H (A/m), yalnız hareketli yüklere bağlı olarak değişebilir ve ortamdan bağımsızdır. Manyetik alan şiddeti denklemi aşağıdaki gibidir [9,10]:

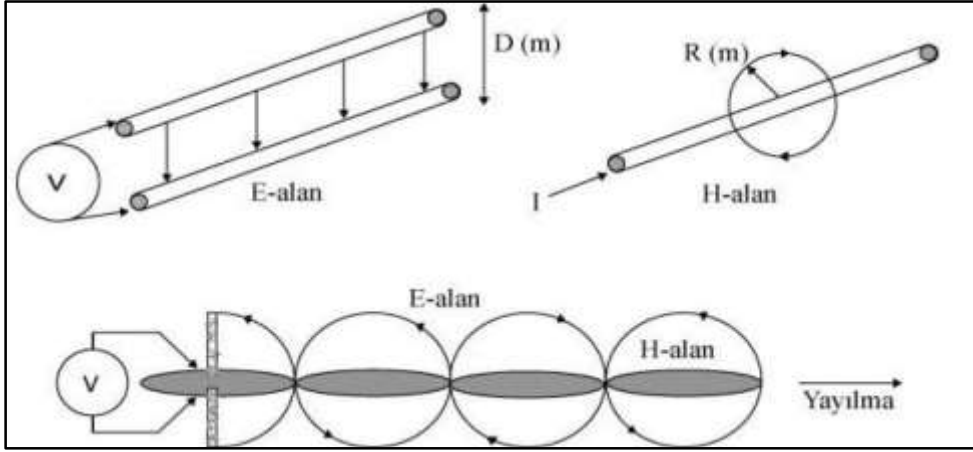
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \text{ (A/m)} \quad (2.2)$$

$\vec{H}$: Manyetik alan şiddeti (A/m)

$\vec{B}$: Manyetik akı yoğunluğu (T)

μ : Ortamın manyetik geçirgenlik sabiti (H/m)

Yüklerin hareketlerine bakıldığında Şekil 2.3'te yer aldığı üzere durgun olan yükler elektrik alanı, hareket eden yükler ise manyetik alanı oluştururlar. Bu iki yapı bir araya gelerek de Şekil 2.3'te görülen elektromanyetik dalgayı oluşturur. Herhangi bir elektromanyetik alanda, elektrik ve manyetik alan birbirine dik şekilde yer alır.



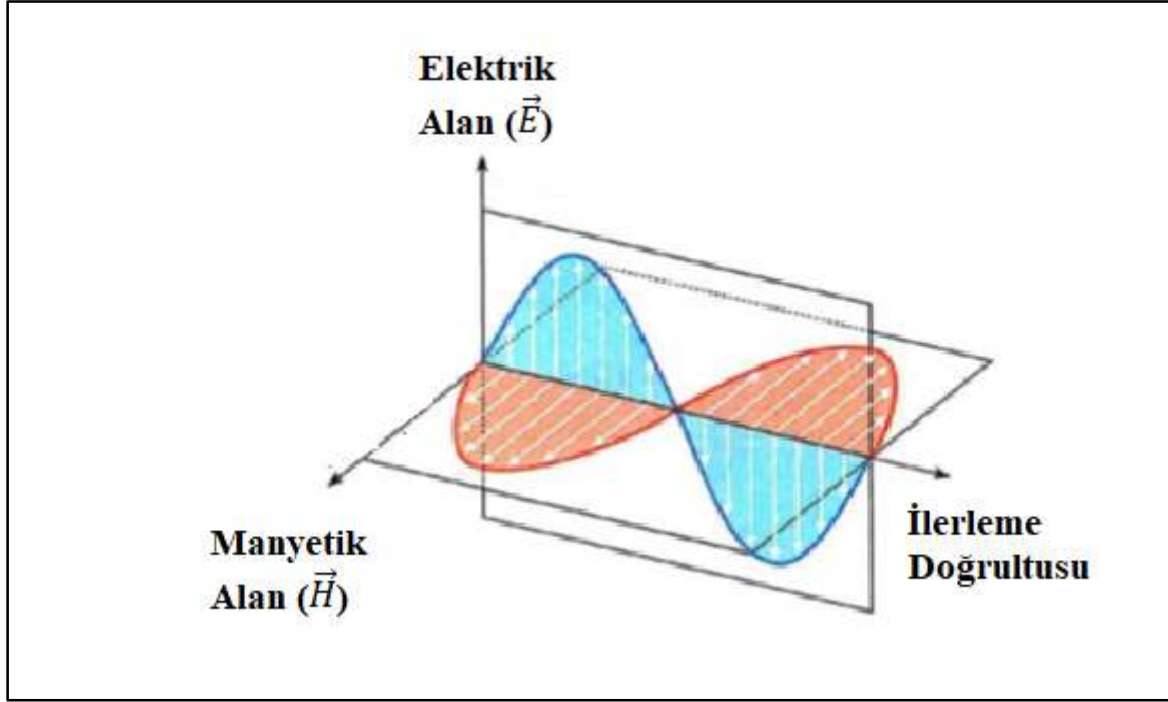
Şekil 2.3. Elektromanyetik alanlar

2.1.1. Zamana göre değişen elektromanyetik alanlar

Q yükü veya akım zamana bağlı olarak değişirse o cisim etrafında zamana bağlı alanlar oluşur. Bu tür alanlar frekansa bağlıdır. Düşük frekanslı olan bölgelerde elektrik alan ve manyetik alan ayrı ayrı değerlendirilebilir [11]. Elektromanyetik spektrumda radyo-frekans alanında ise zamanla değişen elektrik alan manyetik alanı indükleyerek birbiri ile daha kolay etkileşime geçer. Elektrik ve manyetik alan arasındaki bu etkileşim ile elektromanyetik dalga çok uzun mesafede yol alır [12].

2.1.2. Radyasyon yayan elektromanyetik alanlar

Elektromanyetik spektrumda yer alan radyofrekans bölgesinde elektrik ve manyetik alanlar arasında meydana gelen etkileşim, enerjinin üretildiği noktadan uzağa yayılmasına neden olur. Elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri uzak alanda ışık hızıyla aynı hızda Şekil 2.4'te görüldüğü gibi birbirlerine ve dalga'nın hareket ettiği yöne dik açılarda salınır. Vericinin tasarımı ile ortaya çıkan radyasyonun belirli bir yöne ya da her yönde yayılması sağlanabilir [13,14].



Şekil 2.4. Elektromanyetik radyasyon

2.2. Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik spektrum; radyo dalgaları, x ışınları, kızılötesi, görünen ışık, gama ışınları, ultraviyole ve mikrodalgaların yer aldığı, kısa dalga boyundan uzun dalga boyuna kadar uzanan geniş bir aralığı kapsar. Elektromanyetik spektrum; elektromanyetik dalgaları, frekansları ve dalga boylarını tanımlar ve tüm elektromanyetik dalgaları bir arada gösterir. Elektromanyetik spektrumun bir ucunda nanometre düzeyinde dalga boyu olan ve yüksek enerjili gama ışınları yer alırken diğer ucunda kilometreler düzeyinde dalga boyu olan, düşük enerjili ve çok düşük frekanslı ışınlar yer alır [12].

Radyo dalgaları dalga boyuna bağlı olarak farklı vericiler tarafından oluşturulur ve elektromanyetik spektrumun 300 GHz'e kadar olan kısmını oluşturur. Ayrıca yıldızlar, yıldırımlar ve kıvılcımlar tarafından yayınlanır ve şimşek çakması ile de oluşurlar. Bu yüzden fırtına sırasında radyo dinlerken parazit sesi duyulur. Aşırı dozda radyo dalgalarına maruz kalmanın çeşitli kanser türlerine neden olduğu bilinmektedir [15].

2.3. Maxwell Denklemleri

Maxwell, elektrik ve manyetik alanlar bir araya gelmesiyle meydana gelen elektromanyetik alanlar ve elektromanyetik dalgaların oluşumunu dört yasa ile açıklamıştır ve bu dört denklem Maxwell denklemleri olarak bilinmektedir.

2.3.1. Faraday yasası

Faraday Yasası'na göre, herhangi kapalı bi yol boyunca değişen manyetik alan etrafında elektrik alan meydana gelir. Yani herhangi bir yüzey çevresindeki elektrik alanın integrali, aynı yüzeydeki manyetik akının değişimine eşittir. Faraday yasasına örnek olarak elektrik jeneratörleri verilebilir [14,16].

Diferansiyel form:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

İntegral form:

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

Burada;

$\vec{E}$ = Elektrik alan şiddeti (V/m)

$\vec{B}$ =Manyetik akı yoğunluğu (Tesla veya Weber/metre-kare)

$\vec{l}$ =C yolunun teğetsel diferansiyel vektör elemanı (metre)

Φ =Manyetik akı yoğunluğu (Weber) olarak verilmektedir.

2.3.2. Amper yasası

Amper Yasası'na göre, kapalı bir yüzeyden akım geçmesiyle oluşan manyetik alan ile değişen elektrik alan arasındaki ilişki tanımlanır [14,16]. Yani bir yüzeydeki manyetik alan

şiddetinin sınır integrali aynı yüzeydeki toplam akım yoğunluğu vektörünün akısına eşittir [17].

Diferansiyel form:

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.5)$$

İntegral form:

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \vec{d_s} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

Burada;

$\vec{D}$ =Elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/metre-kare)

ρ =Elektrik yük yoğunluğu (Coulomb/metre-küp)

$\vec{E}$ =Elektrik alan şiddeti (Volt/metre)

ds =S yüzeyinin sonsuz küçük diferansiyel vektör elemanı (metre-kare)

Q =Yük miktarı (Coulomb)

2.3.3. Gauss yasası

Gauss Yasası'na göre herhangi kapalı bir yüzeydeki elektrik akısının toplamı ile o yüzeyin içerisinde kalan elektrik yükü arasındaki ilişki tanımlanır [14].

Diferansiyel form:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.8)$$

İntegral form:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho dv = Q \quad (2.9)$$

Burada;

$\vec{D}$ =Elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/metre-kare)

ρ =Elektrik yük yoğunluğu (Coulomb/metre-küp)

$\vec{E}$ =Elektrik alan şiddeti (Volt/metre)

$d\vec{s}$ =S yüzeyinin sonsuz küçük diferansiyel vektör elemanı (metre-kare)

Q =Yük miktarı (Coulomb)

2.3.4. Manyetik alan için Gauss yasası

Bu yasaya göre kapalı bir yüzeyden geçen manyetik akı her zaman sıfıra eşittir. Çünkü manyetik alan her zaman kendi üzerinde son bulur [14,17,18].

Diferansiyel form:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.10)$$

İntegral form:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2.11)$$

$\vec{B}$ =Manyetik akı yoğunluğu (Tesla veya Weber/metre-kare)

$d\vec{s}$ =S yüzeyinin sonsuz küçük diferansiyel vektör elemanı (metre-kare)

2.4. Özgül Soğurma Hızı (SAR)

Özgül soğurma hızı, elektromanyetik enerjinin vücuttaki bir birim doku kütlesi tarafından soğurulma hızıdır ve birimi W/kg'dır. Bir kilogram doku başına 4W güç soğurulması ile insan vücudunda bir derece sıcaklık artışı meydana gelmekte olup bu değerin 50'de biri olan 0,08 W/kg SAR sınır değeri olarak kabul edilmektedir [14,19].

SAR değerinin doğrudan ölçölmesi çok zordur. Dolayısıyla sınır değerlerin belirlenmesinde elektrik alan şiddeti, manyetik alan şiddeti ve güç yoğunluğu gibi kolay ölçölen parametreler kullanılmaktadır SAR değeri arttıkça dokunun ısınma ihtimali artar ve bu da olumsuz sağlık etkilerine yol açar [14,20].

2.5. Elektromanyetik Girişim (EMG)

Günümüzde elektronik uygulamalarının çoğu eş zamanlı birden çok işlemleri gerçekleştiren binlerce aktif ve pasif bileşenin olduğu kompakt cihazlardır. Bu kadar yüksek hızlı, çok işlevli cihazların çok küçük boyutlarda tasarlanabilmesine rağmen üretici ya da mühendislerin en büyük yaşadığı zorluk sadece kompakt bir ürün olması değil aynı zamanda elektromanyetik uyumlu olmasıdır. Elektromanyetik uyumluluk, diğer bir deyimle elektromanyetik bir ortamda istenmeyen girişimlere karşı cihazın sahip olduğu bir bağışıklık ölçüsüdür [21].

Elektromanyetik girişim elektrik-elektronik ve elektromekanik sistemlerin çalışmalarında istenmeyen durumlara sebep olabilecek kaynaklardan yayılan elektromanyetik enerjidir. Elektromanyetik girişim sonucunda sistemlerin çalışma performanslarında bozulma meydana gelmekte veya tamamen çalışamaz hale gelmektedir. Çevremizde elektrik ile çalışan TV, telefon, anten, radar, RF verici vb gibi bütün cihazlar ile yıldırım, güneş ışınları, elektrostatik deşarj, kozmik yayınlar vb gibi doğal kaynaklar cihaz performanslarına etki eden elektromanyetik girişim için potansiyel kaynaktır [22]. Günlük yaşamda karşılaşılan bazı elektromanyetik girişim olaylarına cep telefonu çaldığı zaman TV ekranında bozulma olması, telsizlerde frekans karışması, elektrik süpürgesi çalışırken televizyon ekranında bozulma olması, yıldırım düşmesi sonucu elektrikli cihazların bozulması, arabalarda bulunan ABS sisteminin cep telefonundan etkilenmesi örnek olarak verilebilir.

Elektromanyetik girişim süresine göre ikiye ayrılır:

Sürekli girişim: Genellikle bu elektromanyetik girişim türünde sürekli bir sinyal yayan kaynak bulunur. Elektrik motoru, vericiler, çeviriciler, sayısal devreler düzelticiler, güneş ve kozmik kaynaklı gürültü bu girişim türüne örnektir. Bu EMG gürültüleri en iyi frekans bölgesinde gözlemlenir [23].

Dürtü gürültüsü: EMG'nin bir şekli olan dürtü gürültüsüne insan yapımı veya doğal olarak ortaya çıkan yıldırım, ESD, EMP, gerilim hattı hataları vb. durumlar örnektir. Bu tip dürtü gürültüleri en iyi zaman bölgesinde gözlemlenir [23].

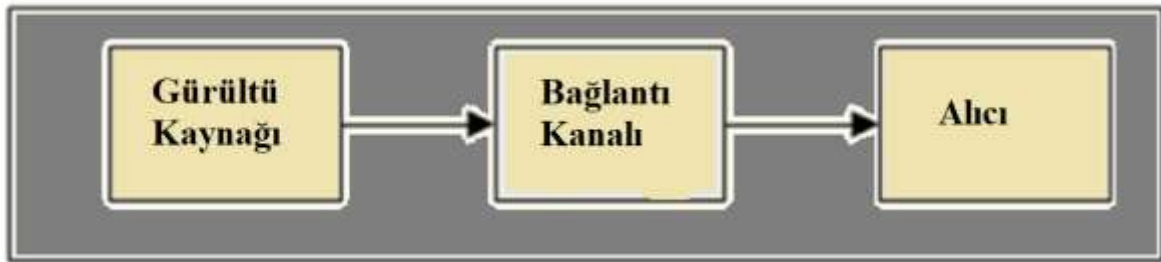
Band genişliğine göre farklı elektromanyetik girişim türleri aşağıdaki gibidir:

Dar band: Genellikle tek bir taşıyıcı kaynak olan bu EMG formuna bir osilatör devresi örnek verilebilir. Dar bant EMG'nin başka bir formu ise, WiFi yönlendiricisinin bir cep telefonu gibi bir vericide intermodülasyon ve diğer bozulma şekillerinin neden olduğu sahte sinyallerdir. Bu sahte sinyaller yelpazedeki farklı noktalarda görünerek radyo spektrumundaki başka bir kullanıcıda parazite neden olabilir. Bu gibi sahte sinyaller belirli sınırlar içerisinde tutulmalıdır [24].

Geniş band: Çok çeşitli kaynaklar buna neden olmakta olup bir kıvılcımın sürekli olarak üretildiği ark kaynağı insan kaynaklı geniş bant parazitlerine örnek verilebilir. Güneş ise doğal olarak ortaya çıkan geniş bant gürültüsüne örnektir [25].

Ürün tasarım aşamasında elektromanyetik girişimin azaltılması iki yolla mümkündür [26]:

- 1-Kaynaktan boşaltılan RF enerjisini azaltmak,
- 2-Bağlantı yollarından kurtulmak koşuluyla emisyonu önlemek.



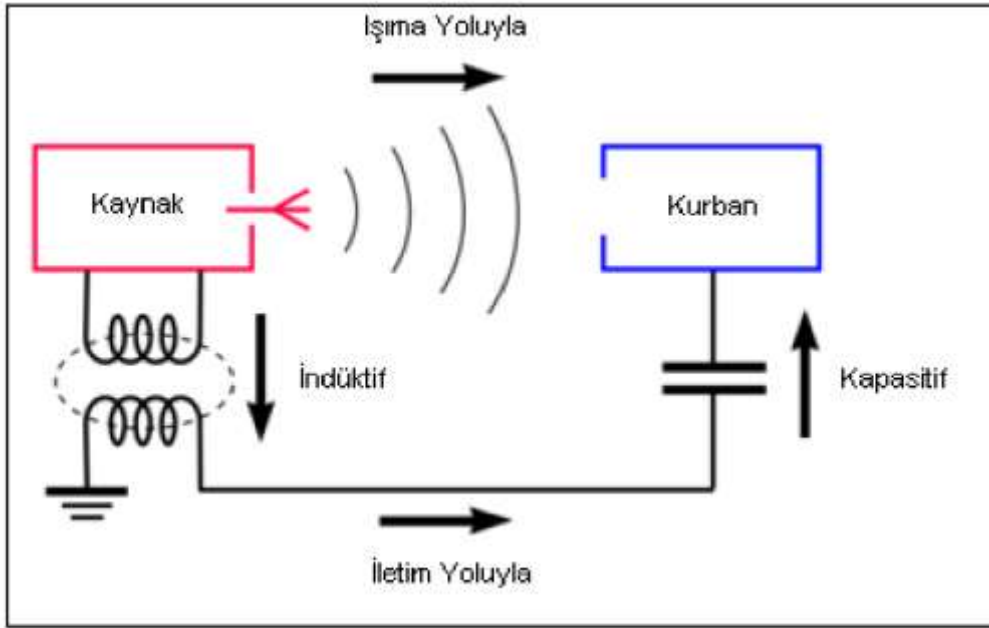
Şekil 2.5. Elektromanyetik girişim modeli

Şekil 2.5'te yer alan elektromanyetik girişim modeline göre gürültü probleminin ortaya çıkması için gereken unsurlar [26]:

- Gürültü kaynağı
- Gürültüye duyarlı alıcı devre

- Gürültüyü kaynaktan alıcıya iletecek bağlantı kanalı

Elektromanyetik girişim bağlantısı Şekil 2.6’da görüldüğü üzere ısıma ve iletim yoluyla iki şekilde gerçekleşir.



Şekil 2.6. Elektromanyetik bağlantı yolları

2.5.1. Işıma yoluyla elektromanyetik girişim

Işıma yoluyla elektromanyetik girişimde kaynak, istenen veya istenmeyen bir sinyal yayar ve alıcı bu sinyali performansını bozacak şekilde alır. En çok yaşanan EMG türü olup kaynak ve alıcı genellikle bir dalga boyundan büyük bir mesafe ile ayrıldığında yaşanır. İşaret kabloları, anten sürücüler, işaret hatları, toprak iletkenlikleri vs. üzerinden gider [25,26].

30 MHz altındaki frekanslarda ışımlar çok az düzeyde olduğu için genellikle 30 MHz’in üstündeki frekanslarda etkilidir. Farksal ya da ortak modda olabilir.

2.5.2. İletkenlik yoluyla elektromanyetik girişim

Sinyallerin yol boyunca ilerleyebileceği bir iletim yolu (güç kabloları veya diğer ara bağlantı kabloları) olduğu zaman emisyonlar oluşur. Tüm devrelerde hem fark hem de ortak akımlar

mevcut olabilir. Ancak iki akım tipi arasında önemli bir fark vardır. Fark mod, iletimde aranan bir koşul olan bilgi veya sinyal verilerini tutar [26,27].

İletim yollu yayınımlar ile ilgili problemlerin belirlenmesinde akım problemleri kullanılarak yayınının fark mod ya da ortak mod olduğu tespit edilmelidir. Yayınım fark mod ise kaynağın problemlili olması muhtemel olup ekranlama veya filtreleme yapılabilir. Eğer yayınım ortak mod ise bağlantı yollu olma ihtimali yüksek olup filtreler ile çözüm aranabilir [25,27].

2.6. Elektromanyetik Uyumluluk

Bir cihaz, ekipman veya sistemin elektromanyetik girişim yapmadan kendi elektromanyetik ortamında gürültüsüz bir şekilde istenen verimde çalışabilmesi elektromanyetik uyumluluk olarak tanımlanır. Yani elektromanyetik uyumluluk, yakındaki bir cihazın işlevinden veya kendi işlevinden dolayı rahatsız etmemesi demektir. Günümüzde çoğu insanın günlük olarak karşılaştığı bir takım elektromanyetik girişim olayları olmaktadır. Cep telefonu çaldığında radyo yayının bozulması, hastanede telsizlerin medikal cihazlarla etkileşmesi veya araba ile yüksek gerilim hatlarının yakınından geçerken radyonun parazit yapması bu duruma örnektir. Bir ekipman, cihaz ya da sistem;

- Öz uyumluluk ilkesine sahip olmalı yani kendi içinde girişime yol açmamalıdır.
- Çevresindeki elektronik cihazlarla elektromanyetik girişimde bulunmamalıdır.
- Etrafındaki elektronik cihazlardan kaynaklanan elektromanyetik girişime karşı bağımsız olmalıdır. Bu şartları sağladığı takdirde söz konusu cihaz ya da sistem elektromanyetik uyumludur [23,25].

Elektromanyetik uyumluluk 4 kategoride incelenebilir;

- İletimle yayının
- Işımayla yayının
- İletim yollu bağlantı
- Işıma yollu bağlantı

Herhangi bir cihaz ya da ekipmanda elektromanyetik uyumluluk şartlarının ayrı ayrı birim seviyesinde karşılanıyor olması söz konusu cihazın uyumlu olacağı anlamına gelmez. Bir sistemi meydana getiren bütün birimlerin bir arada çalışırken hem kendi içinde hem de sistemin işleyişine uyumlu olması gerekir. Genellikle bakıldığında bileşenler ya da sistemdeki devreler ideal olmayan davranışlar sergilerse elektromanyetik girişim gerçekleşir. Öncelikle iyi bir tasarım yapılmalıdır. Sonra tespiti yapılan problem ile ilgili tüm tanımlamalar doğru bir şekilde açıklanmalıdır. Problemin çözümünde sistem ile ilgili kısıtlamalar göz önünde bulundurulmalıdır. Toplanan veriler doğru bir şekilde listelenerek organize edilmelidir. Problemin nerede ne zaman ne şekilde ortaya çıktığı aynı durum tekrarladığında aynı problemin yaşanıp yaşanmadığı da gerekirse defalarca test edilerek problem ortaya net ve açık bir şekilde konmalıdır. Problemin çözümüne geçildiği zaman düşük maliyet her zaman göz önünde bulundurulmalıdır ve düşük frekanslarda yapılacak çözümler ile işe başlanmalıdır. 50 MHz ile 200 MHz frekans aralığında bir problem tespit ediliyorsa öncelikle kablolar değerlendirilerek test anteni ile olan yerleşimleri değiştirilerek problemli hatlar tespit edilmelidir [23].

İletim yollu bir problem tespiti yapılırsa iletkenlere bağlantı yapabilecek yüksek ışıma kaynakları ile güç sistemi incelenebilir. 300 MHz'den yüksek frekanslar için devre kartı, 30 MHz–300 MHz arasındaki frekanslar için kablolar ve 30 MHz ve altı frekanslar için iletim yollu etkileşimler incelenebilir. Tüm bu aşamalarda elektromanyetik uyumluluk değerlendirmeleri, testleri ve tasarımı gözden geçirilmelidir.

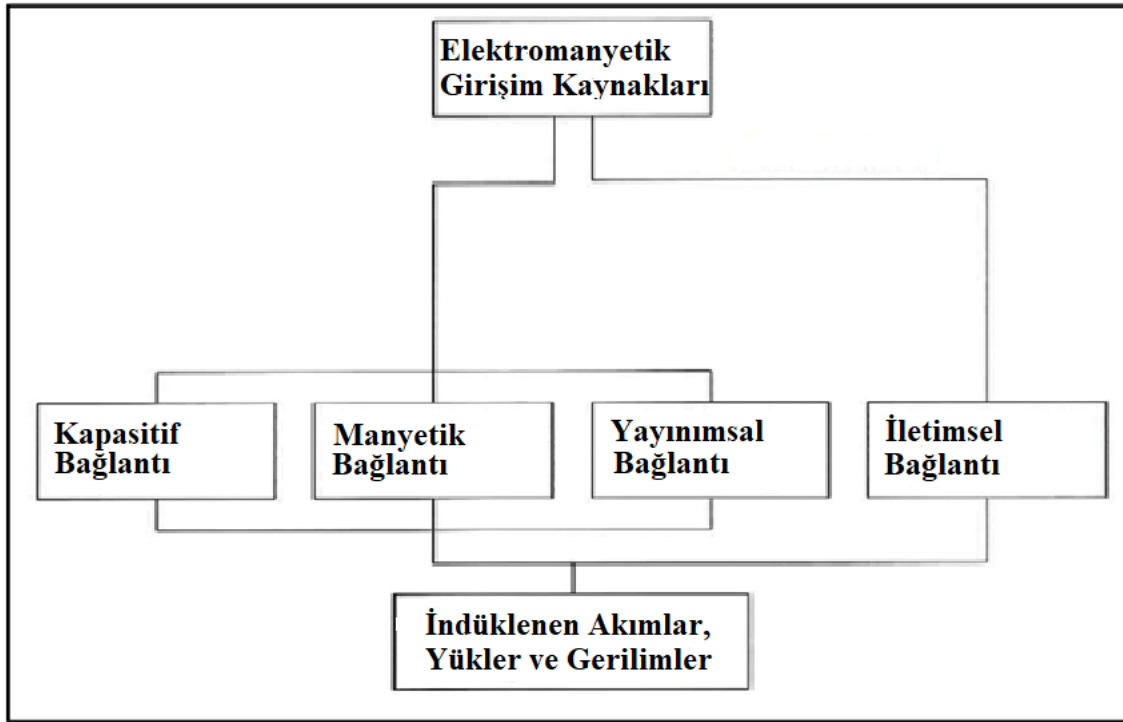
Yayınım açısından limit aşımı varsa yayınının çıkış noktası, neden olabilecek yapı, devre vs tespit edilerek kapasitörler, iletken folyolar, feritler gibi basit çözümler uygulanarak sonuçlar değerlendirilmelidir.

Bağışıklık açısından etkilenme söz konusuysa devre elemanları incelenmeli ve performansları değerlendirilmelidir. Bu durumdan etkilenen devre tespit edilirse kablolar, konektörler ve açıklıklar kontrol edilmelidir. Kapasitörler, feritler, iletken folyolar gibi basit çözümler uygulanarak sonuçlar değerlendirilmelidir [20,25].

2.7. Elektromanyetik Uyumluluğun Sağlanması

Elektromanyetik girişimin önlenmesi Şekil 2.7'de görüldüğü gibi;

- Kapasitif bağlantı
- Manyetik bağlantı
- Yayınimsal bağlantı
- İletimsel bağlantı nedeniyle ortaya çıkan istenmeyen akım yük veya gerilimlerin kaldırılmasıyla mümkün olur [26,27].



Şekil 2.7. Elektromanyetik girişim çeşitleri

2.7.1. İletimsel bağlantı

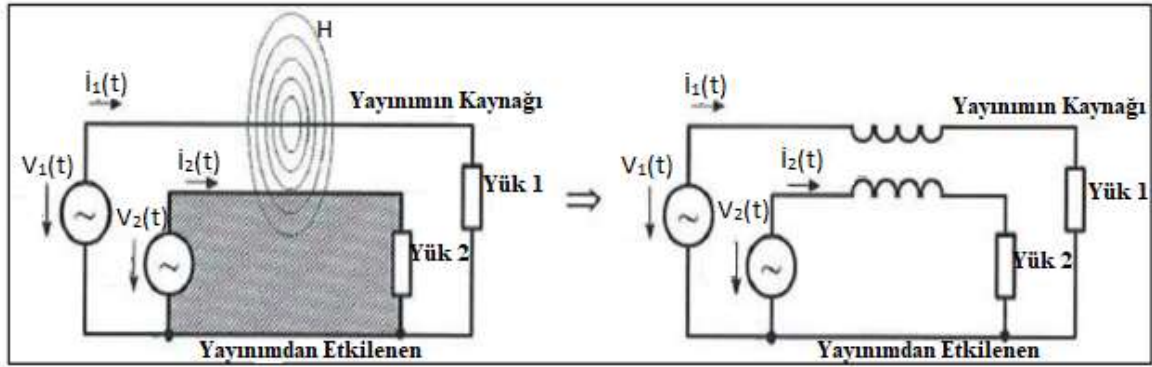
İletimsel bağlantının önüne geçebilmek için elektromanyetik girişimin olduğu devreler birbirinden uzaklaştırılmalı ve topraklamalarının kontrol edilmesi gerekir. Ama yine de parazit devam ediyorsa bağlantılar arasına kapasitans eklenebilir [25, 26].

2.7.2. Manyetik bağlantı

Manyetik bağlantının önlenmesi için bu bağlantılar arasındaki mesafeler arttırılmalı ya da toprak ile olan mesafesi azaltılmalıdır. Çünkü öz indüktans ve ortak indüktans değerleri bu mesafelere bağlıdır. Ayrıca Şekil 2.8’de görüldüğü gibi bağlantının görüldüğü birimler kısa

devre yapılabilir. Bu bağlantılar birbirine dik olarak uzanmalıdır. Etkilenen devrede bulunan bağlantılar sarmal hale getirilmeli ve ekranlanmalıdır.

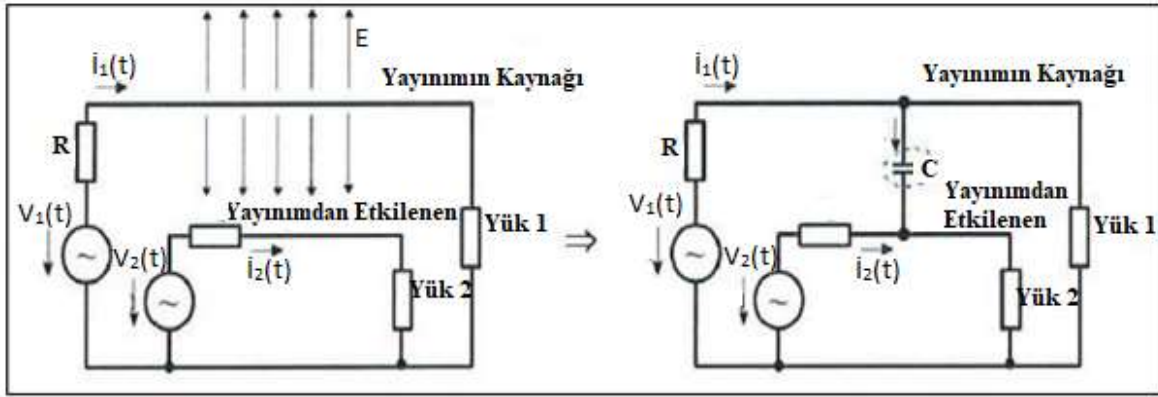
Manyetik veya indüktif bağlantıda bir dalga boyundan farklı iki paralel iletken arasında değişen bir manyetik alan olduğu zaman oluşur ve bu iletkenler boyunca gerilim değişikliği oluşur. Bu iletkenlerde indüklenen gerilim iletkenlerin ayrılmasına ve karşılıklı endüktansı oluşturan uzunluğa bağlı olup devre empedansına bağlı değildir [25-27].



Şekil 2.8. Manyetik bağlantı

2.7.3. Kapasitif bağlantı

Genellikle bir dalga boyundan daha küçük değişen bir elektrik alan olduğu zaman iki komşu iletken arasında kapasitif bağlantı oluşur ve alıcı iletken üzerinde gerilim değişikliği oluşturur. Bir sistemde kapasitif bağlantı söz konusu ise etkilenen bağlantı ya da devre ekranlanmalıdır. Bu etkilenme düşük frekanslarda ise ekranlama tek noktadan geçirilebilir ancak yüksek frekanslarda iki noktadan geçirilmesi gerekir. Şekil 2.9’da görüldüğü gibi karşılık kapasitesi özellikle iki kablo üzerindeki örtüşme alanı ile mesafenin uzaklaşmasından etkilenir [2,26,27].



Şekil 2.9. Kapasitif bağlantı

2.7.4. Yayınımsal bağlantı

Yayınım yollu bağlantıda da etkilenen devreler anten gibi davranır ve bunu önlemek için mümkün olduğu kadar düşük frekanslarda çalışılmalıdır. Diğer bağlantılarda olduğu gibi etkilenen devre ve sistemler arasındaki mesafe arttırılmalıdır [26,27].

3. EKRANLAMA

3.1. Elektromanyetik Girişimden Korunma Yöntemleri

Elektromanyetik girişimi hem kaynak hem de etkilenen cihaz açısından önlemek için çok sayıda çözüm oluşturulabilir. Birbirinden etkilenen iki cihazın arasına mesafe koymak bile bu çözümlerden biridir [28,29]. Ancak kaynaktan yayılan emisyonları en aza indirmek ve cihazın etkilenmesini minimuma getirilmesi amaçlanmaktadır. Söz konusu elektromanyetik girişimi etkilemek için aşağıdaki yöntemler mevcuttur:

- Filtreleme
- Kablolama,
- Ekranlama,
- Bağlama,
- Topraklama

3.1.1. Filtreleme

Elektromanyetik girişimi önlemenin verimli ve daha az maliyetli yöntemlerinden birisi de filtrelemektir. Genel anlamda istenmeyen sinyallerden kurtulmak için güç ya da sinyal hattında pasif filtreler kullanılmakta olup istenmeyen sinyallerin güç kaynağına veya elektrik devrelerine girmesini engelleyen AC hat filtreleriyle başlar. Böylece bu sinyallerin AC hattına eklenmesi engellenir [30,31].

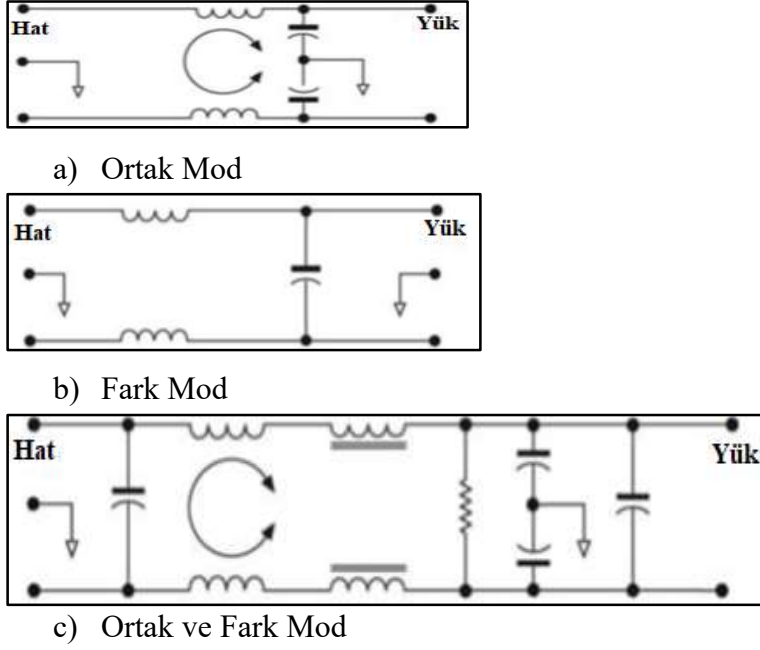
Bağlama, topraklama gibi diğer yöntemlerle kıyaslandığında bu yöntemler sistemdeki devreleri korumayı amaçlarken, filtreleme yöntemi bir devreye kablo giriş çıkışı varsa etkin çözümler sağlamaktadır. Eğer kullanılan bir filtre düzgün bir sinyal üzerinde minimum, elektromanyetik girişime neden olabilecek istenmeyen bir sinyal üzerinde maksimum etkiye sahip ise verimli bir filtre olarak nitelendirilir.

Filtre seçiminde dikkat edilecek hususlar aşağıdaki gibidir:

- Akım ve gerilim değerleri,

- Devrenin sınırları,
- Yük ve hat empedansları,
- Devrenin çalışma frekansları,
- Fark mod ya da ortak mod filtreleme,
- Sıcaklık

Filtrelerde görülen zayıflama büyük ölçüde kaynağa ve yük empedanslarına bağlıdır. Gerçek empedanslar genellikle reaktif ve frekansa göre önemli ölçüde değişirken üreticilerin verilerinde genellikle 50 ohm kaynak ve yük empedansları için yayınlanmaktadır. Bu nedenle filtrelerin seçiminin matematiksel yolla yapılması her zaman pratik değildir. Bu konuda alternatif bir yaklaşım ise empedans uyumsuzluğudur. Yani filtre kaynak ve yük empedansı ile uyuşmuyorsa sinyal gücü aktarımı tam olmayacaktır. Kaynak empedansı yüksekse filtre giriş empedansı düşük ya da paralel kapasitif olur. Kaynak empedansı düşük ise filtre giriş empedansı yüksek olmalı ya da seri reaktif olur. Aynı uyumsuzluk yük empedansı ve filtre çıkış empedansı arasında da gerçekleşir. Diğer bir husus ise ortak ve fark modlarda elektromanyetik girişimin olup olmadığı, ortak modda toprakta iki iletken üzerindeki gürültü voltajını, fark modda bir iletken diğerine gerilim varlığı olmasıdır. Her iki tipte de elektromanyetik girişim zayıflamış olmalıdır. Hemen hemen tüm hazır güç hattı filtreleri ortak mod gürültüsünü yönetmek için tasarlanır ve çoğu hem ortak hem fark modu filtrelemesini sağlar. Emisyon testi yapılmadan ekipmanın girişim modunun tespit edilmesi ve filtre tipinin belirlenmesi zordur [29,31].



Şekil 3.1. Filtre örnekleri

Filtre seçimi öncesinde bazı filtre tasarımları hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Ortak mod filtrenin kullanıldığı yerde hattın toprağa kapasitörler ve ortak çekirdekli indüktörleri kullanılmalıdır. Fark mod filtrenin kullanıldığı yerlerde hattın hatta kapasitörler ve ayırık seri indüktörler kullanılmalıdır. Şekil 3.1’de her iki filtre çeşidi de görülmektedir. Çoğu filtre üreticisi cihaz ve elektromanyetik girişim problemi hakkında bazı bilgiler vermekte ve bu sayede uygun filtre seçimi yapılır. Filtrenin performansı, elektromanyetik girişim seviyesini düşürdüğü seviye ile ölçülür. Bu sayede uygun maliyet, minimum zaman ve risk yaklaşımı sağlanmış olur. Bir filtrenin kurulumu da son derece önemlidir. Filtrenin toprak bağlantılarında frekans aralıklarında düşük empedansa, giriş çıkış uçlarında maksimum fiziksel izolasyona sahip olmalıdır. Giriş çıkış filtrelerinde ve güç hatlarında filtre hatları amaçlanan sinyal özelliklerinden etkilenmeyen kapasitör ve ferrit empedans giriş çıkış noktalarına mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır [30,31].

Anlık sinyaller sisteme zarar verebilecek çok kısa zamanda yükselen, yüksek genlikli ve çok kısa süreli sinyaller olması nedeniyle elektromanyetik girişime neden olabilirler. Bu sinyallere örnek olarak elektrostatik deşarjlar, nükleer patlamalar ve yıldırımlar verilebilir. Bu tip sinyaller mantıksal devrelerde birtakım hatalara, analog devrelerde ise sinyal bozulması, gürültü, sigortaların zarar görmesi ve P-N yarı iletkenlerinin yapısının bozulması gibi durumlara neden olabilir. Anlık sinyallerden seri yüksek empedanslı cihazlar için akım

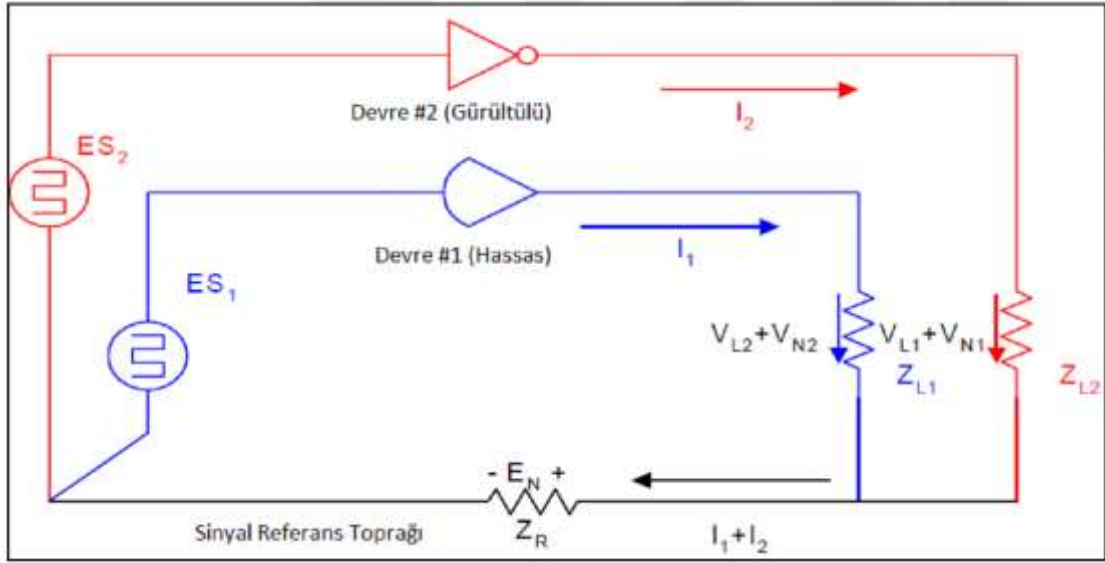
önlenmesi, doğrusal olmayan koruma cihazları ile gerilimin önlenmesi ve şönt düşük empedans cihazlar ile akım yönlendirilmesi şeklinde korunulabilir [31,32]. Anlık sinyallerin bastırılması sayesinde;

- Normal gerilim üzerinde herhangi bir gecikme olmaksızın iletim sağlanması
- Duruma göre açık ya da kapalı devre olması
- Gerilimin kesilmesi gereken durumlarda gerilimin yükselmesine izin verilmemesi
- Anlık sinyal sonrasında önceki duruma dönmesinin sağlanması
- Limitsiz akım ve güce dayanabilmesi
- Çalışma sonrasında normal değerlerine dönmesi sağlanmış olur.

3.1.2. Topraklama

Topraklama; elektromanyetik girişim etkisinin azaltılması, akım dönüş hattı oluşturması ve kişiye elektrik çarpmasının önlenmesi gibi farklı amaçlarla yapılır. Tek bir toprak bağlantısı sayesinde birçok amaca (yıldırım toprağı, elektrostatik toprağı, RF toprağı, EMG toprağı, güç toprağı vb gibi) ulaşılmış olur [32,33].

Topraklama, elektromanyetik girişime karşı korumada diğer yöntemlere de kıyasla en önemlisidir. Genellikle ilgili frekanslarda topraklama bağlantıları toprak hattı empedansı sıfır olmalıdır. Böylece üzerinde EMG'ye neden olabilecek hiçbir gerilim olmayarak devrede referans noktası olarak iş görür [33]. Yani bir devrede istenmeyen bütün akımları diğer devrelere aktarmayarak eş gerilim referansı olarak kabul edilir. Ancak uygulamaya geçildiğinde gecikme akımı sıfır olmayacağı için tüm iletkenler bir empedansa sahiptirler. Dolayısıyla optimum bir toprak referansı elde edilmeye çalışılır.



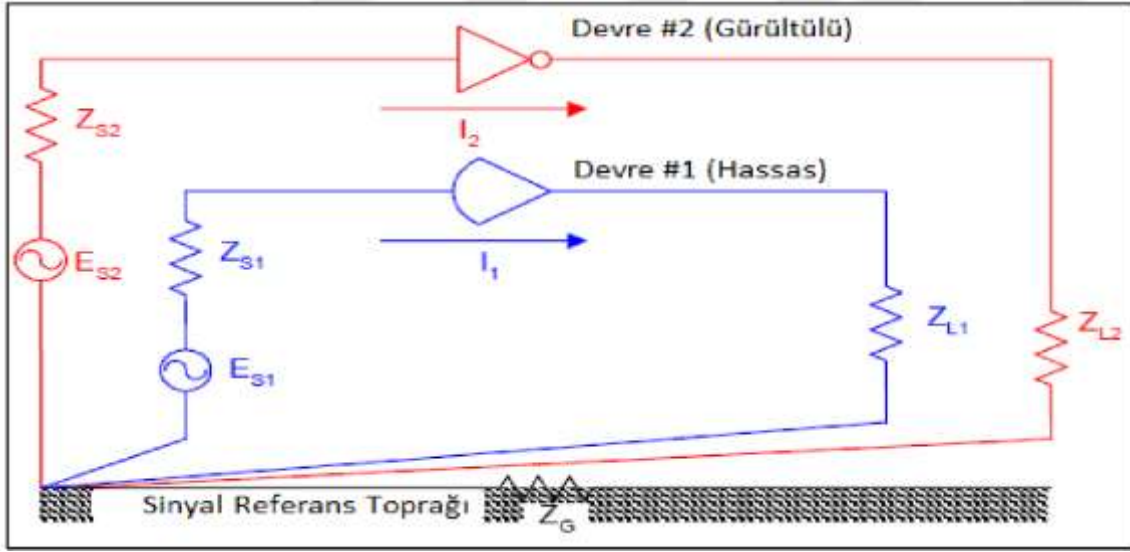
Şekil 3.2. Topraklama örneği

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere 2 numaralı devreden gelen istenmeyen akımlar 1 numaralı devrede sorunlara neden olabilir. Burada uygulanacak çözümlerde boyut, maliyet, güvenlik ve uygulanabilirlik her zaman göz önünde bulundurulmalıdır. 1 numaralı devrede dönüş hattı empedansı düşürülerek toprak gerilimi limit değerin altına düşürülmüş olur [34].

Ortak toprak empedansı düşürülerek topraklama tasarımı ve ortak empedans yollarından kaçınarak topraklama geometrisi değiştirilmesi ile topraklama optimizasyonu gerçekleştirilir.

Bir devrede topraklama empedansı aşağıdaki şekillerde düşürülebilir;

- Aynı topraklama noktaları arasındaki iletkenin çapının artırılması,
- Birden fazla paralel topraklama iletkeni kullanılması,
- Düşük indüktör değerine sahip topraklama iletkenlerinin kullanılması,
- Farklı topraklama noktaları arasında kullanılan iletkenlerin uzunluklarının azaltılması



Şekil 3.3. Topraklama örneği

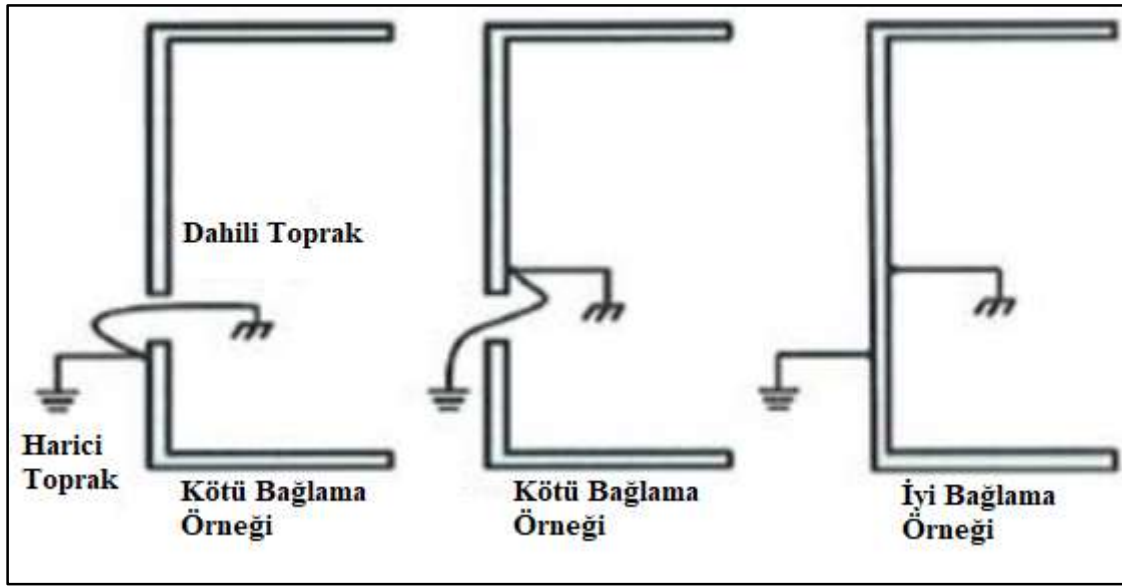
Topraklama geometrisi tasarımında; Şekil 3.3'teki gibi topraklama hatlarının uygun bir şekilde ayrılması, yerleştirilmesi ve topraklama döngülerinin ortadan kaldırılmasıyla hassas yollardaki topraklama akımı düşürülür [7,35]. Bir devrede yapılan topraklama ile;

- Yüksek güce sahip yükler için dönüş hatları diğer devrelerin dönüş hatlarından ayrı tutulmalıdır.
- Düşük güce sahip analog devrelerde gürültüsüz kendi dönüş hattı kullanılır. Dolayısıyla genellikle tek noktadan yıldız toprak bağlantıları için kablolar yerleştirilir.
- Dijital devreler için bütün frekanslarda düşük empedansa sahip, güç ve sinyal dönüş hatlarının aynı hatta bulunduğu yapıları tercih edilir.
- Filtrelerin dönüş hatları kablo ekranlamalarıyla etkileşimde bulunmamalıdır.

Ana güç dönüş hatları, RF eş eksenli ekranlama dönüş hatları, güvenlik topraklamaları, yüksek seviye sinyal dönüşleri, düşük seviye analog sinyal dönüşleri, yüksek hızlı mantıksal devreler, koruma ekranı topraklamaları ve yıldırım topraklamaları gibi topraklama çeşitlerinde mümkün seviyede döngü yapısını engellemek için tek bir ortak noktası bulunan ayrı topraklama hatları kullanılmalıdır [35].

3.1.3. Bağlama

Topraklama, filtreleme ve ekranlama gibi elektromanyetik girişime karşı koruyucu önlemlerin sağlıklı bir şekilde çalışması için bağlama son derece önemlidir. İyi düzeyde bir bağlama sağlanmaması takdirde alınan filtreleme önlemleri yetersiz kalır. Bağlama Şekil 3.4'teki gibi basit anlamda iki metal arasında minimum empedansa sahip bir yol sağlamaktır. Bağlamanın amacı bu iki metalin arasında meydana gelen elektriksel potansiyel farkın elektromanyetik girişime neden olmasını engellemektir. Ayrıca bağlama sayesinde RF gerilim farkları ve döngü akımlarının azaltılması sağlanır. İyi bir bağlama için DC' de 2,5 m Ω hedeflenir. Genellikle metal-metal bağlama tercih edilmekte olup lehim veya kaynak kullanılır. Bu iki yüzey arasında temizlik son derece önemli olup meydana gelebilecek kimyasal tepkimeler göz önünde bulundurulmalıdır [33,35].



Şekil 3.4. Bağlama örnekleri

3.1.4. Kablolama

Yüksek frekanslarda kablolar elektriksel anlamda uzun olup oluşturdıkları yayılım Maxwell denklemleri ile açıklanır. Söz konusu elektriksel uzunluk, taşıdığı sinyalin dalga boyunun yirmide birinden daha büyük ise uzun kabul edilir. Kabloların dipollerden gerçekleşen yayınımlar ve akım kapalı devrelerden gerçekleşen yayınımlar olmak üzere iki çeşit yayılım kaynağı vardır.

Düşük frekanslarda güç hatları gibi iletkenler yüksek frekansların tersine kısadır. Düşük frekanslarda manyetik alanın etkisini azaltmak için iletkenlerin arasındaki alanın azalmasını ve manyetik akının sıfırlamasını sağlayan sarmal yapıda kablolar kullanılması önerilir. Kablo ile toprak arasındaki alanın küçültülerek ve kablolar arası mesafeyi azaltarak manyetik alan indüklemesinin önüne geçilir [33,36].

Kablolar arasında iki tür indükleme meydana gelir:

1-Kapasitif indüklemeye;

- Komşu kablolar birbirine dik yönlendirilebilir.
- Kabloların arası açılabilir.
- Kabloların arasındaki ortak hatlar azaltılabilir.
- Kablo yönlendirme topolojisi iyileştirilebilir.
- Dengelenmiş ara yüzler kullanılabilir.
- Kabloların yüksek iletken ekranlama özelliğine sahip malzemelerle kalkanlaması yapılabilir.

2-İndüktif indüklenmede;

- Ferrit veya indüktör filtre kullanımı ile yük empedansı arttırılabilir.
- Sarmal yapı ve dengelenmiş ara yüzler kullanılabilir.
- Kablo yönlendirme topolojisi iyileştirilebilir.
- Kablolar yüksek geçirgen kalkanlama özelliğine sahip malzemeler ile ekranlanabilir.

Kablolarda ekranlama yapılması kullanılan malzeme ve yöntem itibariyle son derece önemlidir. Kabloya dışardan herhangi bir elektromanyetik girişim yapılmasını ve içerden dışarıya elektromanyetik yayılım yapılması kablolarda yapılacak ekranlama ile önlenir. Kablolarda ekranlama yapılmadığı takdirde elektrik ve manyetik yayınımlar söz konusu olur. Kablolarda bir uçtan topraklama yapıldığı zaman elektrik alan ekranlamada sönümlenir ancak manyetik alan dışına çıkabilir. Eğer her iki uçta topraklanırsa elektrik alan ve manyetik alan ekranlamada etkisiz hale gelir [36].

Kablolar sinyal kategorisine göre 5 kategoride sınıflandırılır:

Kategori 1

Bu kategoride güç ve kontrol hatları yer almaktadır. Buna ait devrelerde kablolar sarmal yapıda olmalıdır. Kabloların elektromanyetik alan yayan cihazlara yakınlığına göre ekranlama ihtiyacı duyulabilir.

Kategori 2

Bu kategoride yüksek seviye sinyal hatları yer almaktadır. Bu devrelere ait sinyal kabloları dönüş hatları da kategori 1'deki gibi sarmal yapıda olmalıdır. Bu kategoride bütün kabloların ekranlaması yapılmalıdır.

Kategori 3

Bu kategoride düşük seviye sinyal hatları yer almakta olup bu kablolarda sarmal yapıda olmalıdır.

Kategori 4

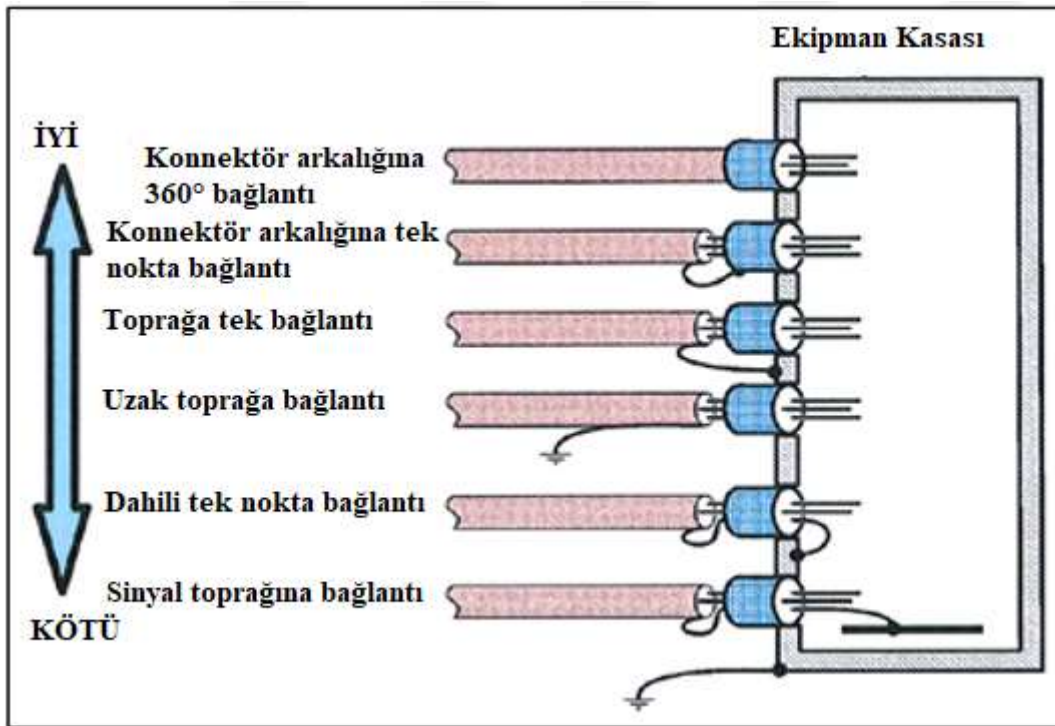
Bu kategoride elektriksel ateşlenen patlayıcı cihaz devre hatları yer almakta olup buna ait dönüş kabloları ve sinyal hatları sarmal yapıda olmalıdır. Bütün kabloların ekranlamasının yapılması gerekmektedir.

Kategori 5

Bu kategoride yüksek frekans sinyaller yer almaktadır. Dalga kılavuzu dışındaki devrelerde dengelenmiş ekranlı kablo, karakteristik empedansı 100 ohm'dan küçük dengelenmiş kablolar ya da eş eksenli kablo kullanılmalıdır.

Ayrıca yukarıda yer alan farklı kategorilerdeki kablolar birbirlerinden en az 30 mm mutlaka ayrılmalıdır. Elektriksel ateşlenen patlayıcı cihaz devre hatlarında kullanılan kablolar diğer kategorilerde yer alan kablolardan fiziksel olarak en az 30 mm uzağa konmalı ve diğer kablolar ile aynı konektörlerden çıkmamalıdır.

Kabloların birbirinden ayrı yerlere konumlandırılmaları mümkün olmadığı yerlerde elektromanyetik girişime karşı ekranlanmış kabloları kullanılmalıdır. Kullanılan konnektörler aşınmaya dayanıklı ve mümkün olduğunda fazla metalik olmalıdır [35]. Konnektörün içine pinler yerleştirilirken çapraz etkileşim en az seviyede olmalıdır. Sinyallerin özelliklerine göre ayrımı yapılabiliyorsa farklı sinyaller farklı konnektörler ile taşınmalıdır. Şekil 3.5'te yer aldığı gibi pinler ekipmana yakın yerleştirilmelidir. Hassas ve gürültülü olan bölgeler ayrılarak pinler ona göre yerleştirilmelidir. Boş hatlar konnektör içinde bir yerde topraklanarak ekranlama etkinliği artırılmış olur [36,37].



Şekil 3.5. Kabloların konnektöre bağlantı performansı

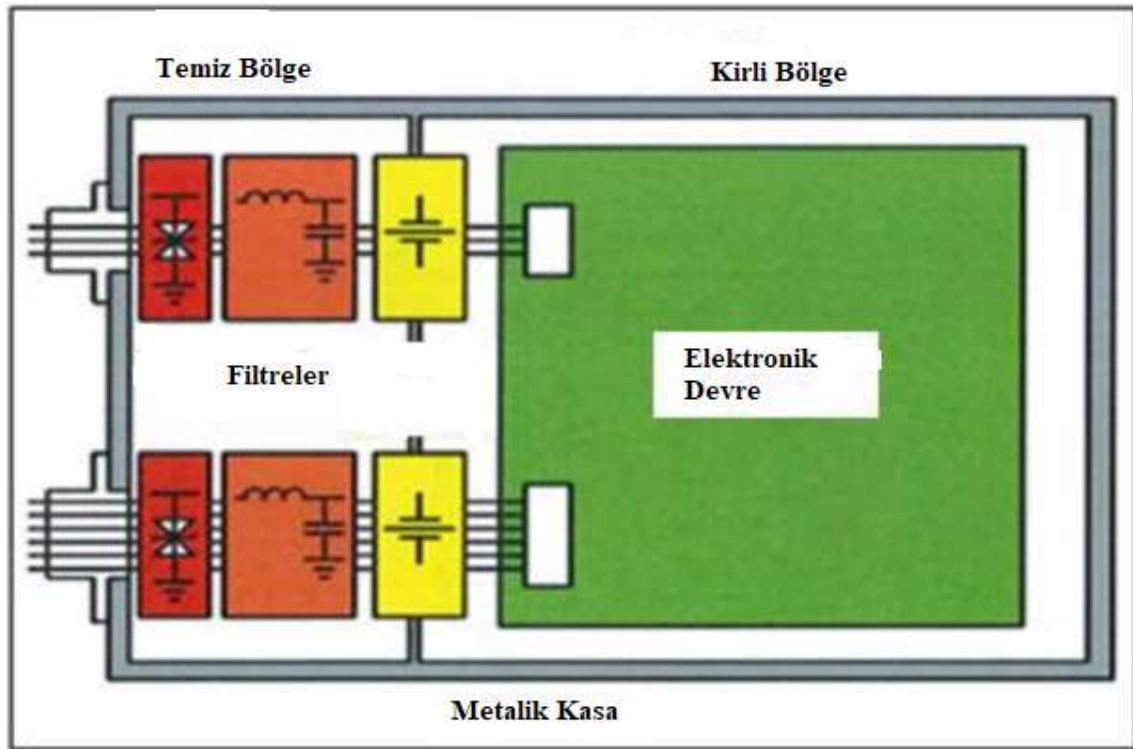
3.1.5. Devre tasarımında elektromanyetik girişim çözümleri

Sistemlerin ya da ekipmanların içinde yer alan devrelerde elektromanyetik girişime neden olabilecek bazı durumlar şu şekildedir:

- Farklı devrelere ait komşu kabloların birbirlerine bağlantılı olması,
- Empedans uyumsuzluğu olan yüksek hızlı iletim hatları,
- Ortak güç kaynaklarının ve kablolarının ortak empedans üzerinden bağlantılı olması,
- Düşük seviye yüksek kazançlı analog yükselteçlerin aralarında ışıma yollu bağlantılar,

- İndüktif anahtarlama sonucu devrede oluşan anlık sinyallerin komşu devrelere bağlantılı olması,
- Güç kaynağı tarafından meydana gelen gürültülerin hassas devreler ile etkileşimi,
- Toprak iletkenlerinin ortak empedans üzerinden bağlantılı olması,

Baskı devre üzerindeki ideal bir yerleşim planı Şekil 3.6’da verilmiştir [6].



Şekil 3.6. Baskı devre yerleşim planı

Şekil 3.6’da ideal yerleşimleri olan bir baskı devre örneği verilmektedir. Devre tasarım aşamasında elektromanyetik uyumluluk hususu mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Öncelikle;

- Devredeki ısıyıyla yayını engellenmesi,
- Farklı kartların ya da aynı karttaki devrelerin birbirleri ile etkileşimlerinin uygun metotlarla engellenmesi,
- Sistemde bulunan bütün devrelerin sessiz çalışması,
- Dışarıdan devreye gelebilecek elektromanyetik girişimlere karşı korunaklı olunması amaçlanmaktadır.

Genellikle devrelerde dijital elektronik bileşenler elektromanyetik girişime neden olmaktadır. Elektromanyetik girişimi kontrol altında tutmak için devrede gerekli ölçümler yapılmalıdır. Devrede en yavaş yükselme zamanlarına sahip bileşenler kullanılmalıdır. Güç ve dönüş hatlarının indüktansları iletim yoluyla aktarılan sinyallerin devrede ışıma yollu emisyonu dönüşmesine neden olur. İndüktans ile iletken boyu arasında logaritmik bir bağlantı vardır. Dolayısıyla iletken boyu ile oynanarak indüktans değeri ayarlanabilir [33,37]. Devrede oluşabilecek gürültünün azaltılması için şunlar yapılabilir;

- Düşük indüktanslı topraklama yapılması,
- Uygun cihaz korumasının seçilmesi,
- Yük kapasitansının düşürülmesi,
- Uygun devre kartı dizilim tekniklerinin uygulanması,
- Uygun mantık ailesinin seçilmesi.

Devre tasarımının en önemli hususlardan biri topraklama olup şase toprağı, RF sinyal toprağı, dijital sinyal toprağı ve analog sinyal toprağı birbirinden ayrılmalıdır. Tek topraklama noktası kullanılacaksa bir kapasitör yardımıyla şase toprağına bağlanabilir [34,38]. Dijital ve RF devreler için çok noktalı metal topraklama, düşük frekanslı analog ve dijital devrelerin bir arada bulunduğu sistemlerde ise tek noktadan kapasitör ile topraklama tercih edilir. Düşük ya da yüksek frekanslı devrelerde Schottky diyotlar kullanılabilir.

3.2. Elektromanyetik Ekranlama

Kalkan, bir bölgeden diğer bölgeye elektromanyetik alanların yayılmasını kontrol etmeyi amaçlayan, iki bölge arasına yerleştirilmiş bir bölmedir. Bir kalkanın iki amacı olup birincisi, ekranlaması yapılmış bölgeden çevreye elektromanyetik alanların yayılmasını önlemek, ikincisi ise harici kaynaklardan gelen emisyonların ekranlamasını yaparak bölgeye yayılan herhangi bir yayılımı önlemektir. Diğer bir deyişle ekranlamanın görevi dahili bozucuları içerde, harici bozucuları dışarda tutarak her türlü ışıma yollu yayılımı önlemektir [34,38].

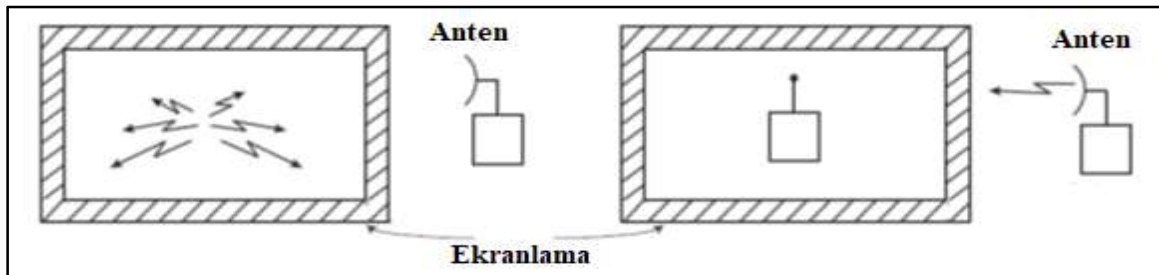
Günümüzde elektronik sistemlerin hızlı büyümesi nedeniyle, elektromanyetik spektrum giderek daha karmaşık hale geldi ve bir sistemden diğerine elektromanyetik yayılımın izole edilmesi ihtiyacı doğdu. Elektromanyetik girişim tüm spektrumda söz konusu olsa da RF

(Radyo Frekansı) emisyonları sıklıkla 100 kHz'in üzerinde karşılaşılmaktadır. 30 MHz ve 1 GHz arasındaki frekanslar da iletişim yayınlarına girişim yapma olasılıkları yüksek olduğundan çok önemlidir. Bu nedenle ABD'de Federal İletişim Komisyonu ve diğer ülkelerdeki ajanslar tarafından bu frekans bandındaki elektromanyetik yayan cihaz veya sistemlerle ilgili yönetmelikler yayınlamıştır. Bir ortamda emisyon yayılımı mevcut olduğunda uygun ekranlama teknikleriyle bu emisyonlar bastırılmak zorundadır [34,39].

Ekranlamanın etkinliği şunlara bağlıdır:

- Kullanılan malzeme,
- Malzeme kalınlığı,
- Elektromanyetik alanın sıklığı ve şiddeti.

Elektromanyetik girişim ile istenmeyen elektrik veya elektromanyetik enerji, beklenmeyen tepkilere neden olarak sistemde bozulma ya da ekipmanda arızalara neden olabilmektedir. Bu nedenle cihazları, ekipmanları ya da sistemleri elektromanyetik girişimden çeşitli metotlar ile korumak son derece önemlidir [36]. EMG girişimi etkilerinin bazı örnekleri şu şekilde verilebilir; yolcuların cep telefonu veya dizüstü bilgisayar gibi elektronik cihazların kullanımıyla meydana gelen arızalı uçuş kontrol sistemleri, elektrikli tıraş makinaları veya kahve makinasının çalışması nedeniyle anlık TV ya da radyo yayını arızası, ventilatör veya EKG ekranlarının diğer elektronik cihazların elektromanyetik girişim yapması nedeniyle bozulması. Elektronik kaynaktan etrafına yayılan EM dalgaları elektromanyetik uyumluluk kuralları çerçevesinde kalkanlaması yapılmalıdır. Elektromanyetik uyumluluk düzenlemelerine uygun olarak, Şekil 3.7' ve Şekil 3.8'de görüldüğü gibi söz konusu cihazların kendi ya da diğer cihazların çalışmalarını elektromanyetik girişimden etkilenmemesini sağlamak amacıyla uygun şekilde ekranlaması yapılmalıdır [35,40].

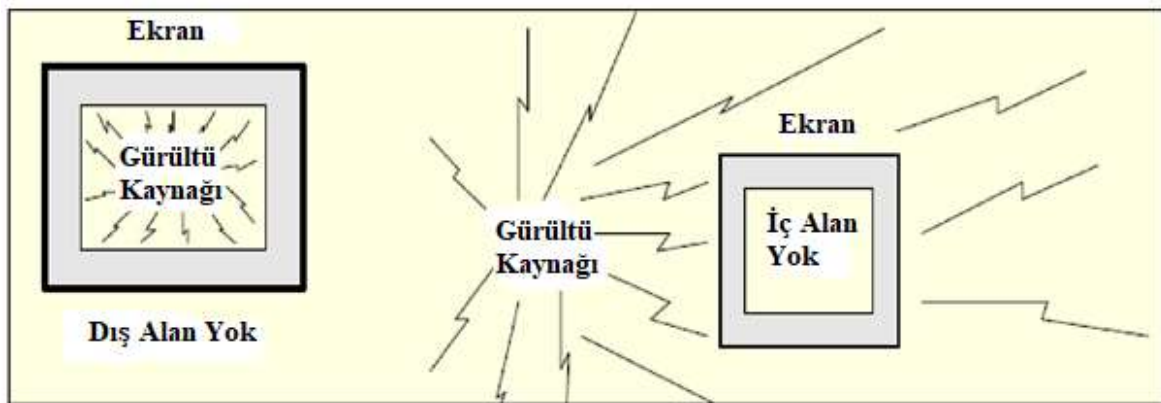


Şekil 3.7. Alıcı ve kaynak için ekranlama uygulaması

Bir sistemde yapılan ekranlama etkinliği; topraklama, filtreleme ve bağlama gibi diğer yöntemler ile arttırılabilir. Manyetik ekranlamada ekranlama etkinliği frekans ve μ katsayısına bağlı iken yüksek frekanslarda daha etkili olan elektrik alan ekranlamasının etkinliği ise kullanılacak malzemenin σ katsayısına bağlıdır. Eğer her iki durumda söz konusu ise yani hem elektrik alan hem manyetik alan ekranlaması gerekiyorsa alansal doymanın önüne geçebilmek için manyetik alan ekranlaması gerekli olur [37,40].

İç içe geçmiş sistemlerde; ekranlamada kullanılacak malzemenin kalınlığı arttırılmadan ekranlama etkinliği arttırılması gerekiyorsa sistem içinde yer alan farklı ekipmanlar için ayrı ayrı ekranlama teknikleri kullanılabilir. Ekranlama gereken bir sistemde havalandırma, görüntüleme, boşluklar ve gerekli ekipmanlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tür açıklıklarda petek, ađ vs. gibi diğer filtre elemanları eklenmelidir. Örneğin bir sistemin havalandırma boşluklarına petek kullanılarak ekranlama etkinliği arttırılabilir.

Bir sistem kurulurken ekipmanların birleşim yerleri mümkünse lehim ya da kaynak ile monte edilmeli ya da elektromanyetik girişim (EMG) önleyici contalar kullanılarak ekranlama etkinliği arttırılmalıdır. Birleşme noktaları birbiri üzerine denk getirilmelidir bu noktaların iç içe geçmesi ise ekranlama etkinliğini ciddi manada arttırır. Ayrıca ekranlaması yapılmış güç kaynakları, konektörler, güç anahtarları, sigortalar, güç hattı filtreleri ve sigortalar kullanılmalıdır.



şekil 3.8. Ekranın içinde ve dışında bulunan ortamın girişimden korunması

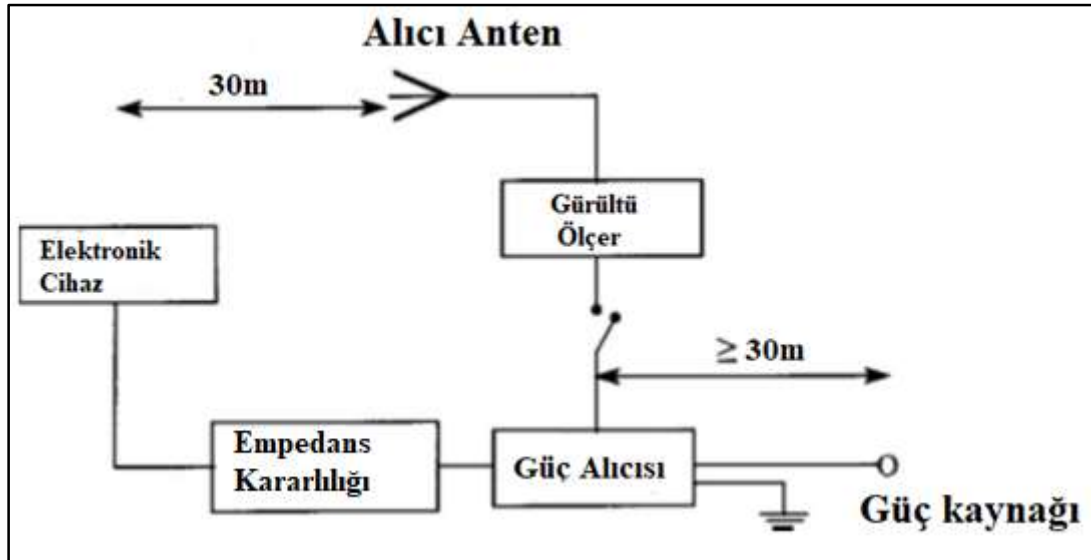
3.2.1. Ekranlama etkinliği ölçümü

Kalkanın ekranlama etkinliğini ölçmek için yaygın olarak kullanılan dört test yöntemi aşağıdaki gibidir:

- Açıklık Yöntemi
- Korumalı Kutu Yöntemi
- Eşeksenli İletim Hattı Yöntemi
- Ekranlı Oda Yöntemi

Açıklık yöntemi

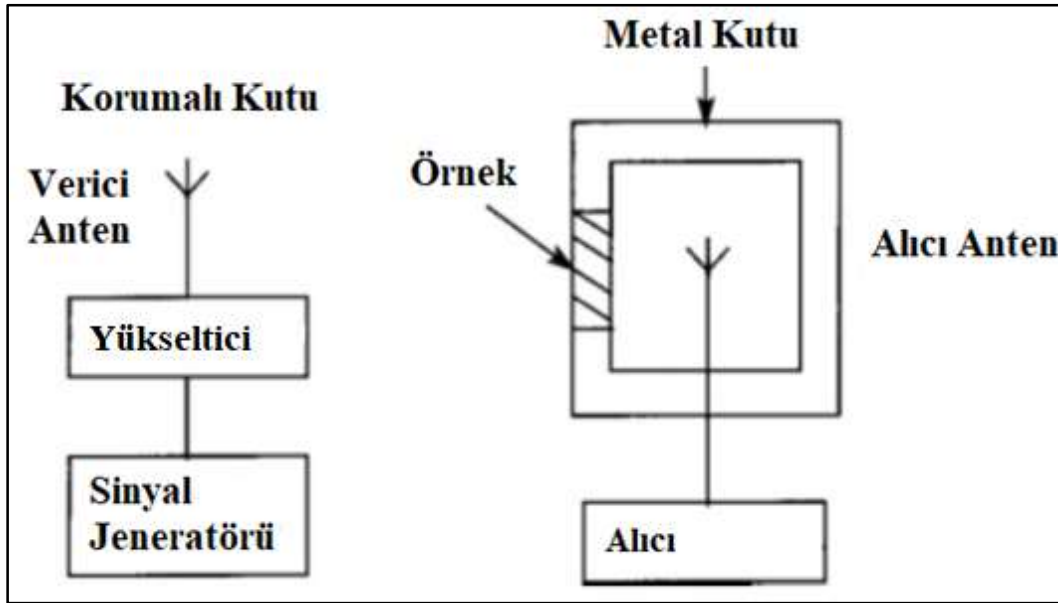
Elektronik bir devrenin tamamının ekranlama etkinliğinin değeriendirilmesi için açıklık metodu kullanılır. Böylece üretilmiş bir üründen sızan emisyonlar ölçülür. Bu yöntem herhangi bir materyalin performansını ölçmez ve bitmiş her bir ürünün farklılıklarından dolayı geniş çeşitliliğe sahiptir. Tasarımı ve üretimi bitmiş bir ürünün performansının değeriendirilmesi için doğru bir yöntemdir. Bu test metodu cihazın alıcı antenden 30 m uzaklığa konması gerekir ve Şekil 3.9’da gösterildiği gibi yayılan emisyonlar kaydedilir [5,38].



Şekil 3.9. Açıklık yöntemi ile SE ölçümü

Korumalı kutu yöntemi

Korumalı kutu yöntemi genellikle farklı kalkan malzemelerinin kıyaslanması amacıyla kullanılır. Bu yöntem metal bir kutu, bir duvarında elektriksel olarak sıkıca bağlanmış numune portu ve bir verici anten içerir. Verici anten kutunun dışına yerleştirilir ve anten tarafından alınan sinyallerin yoğunluğu açık port ve test numunesi takılı port üzerinden kaydedilir [5].

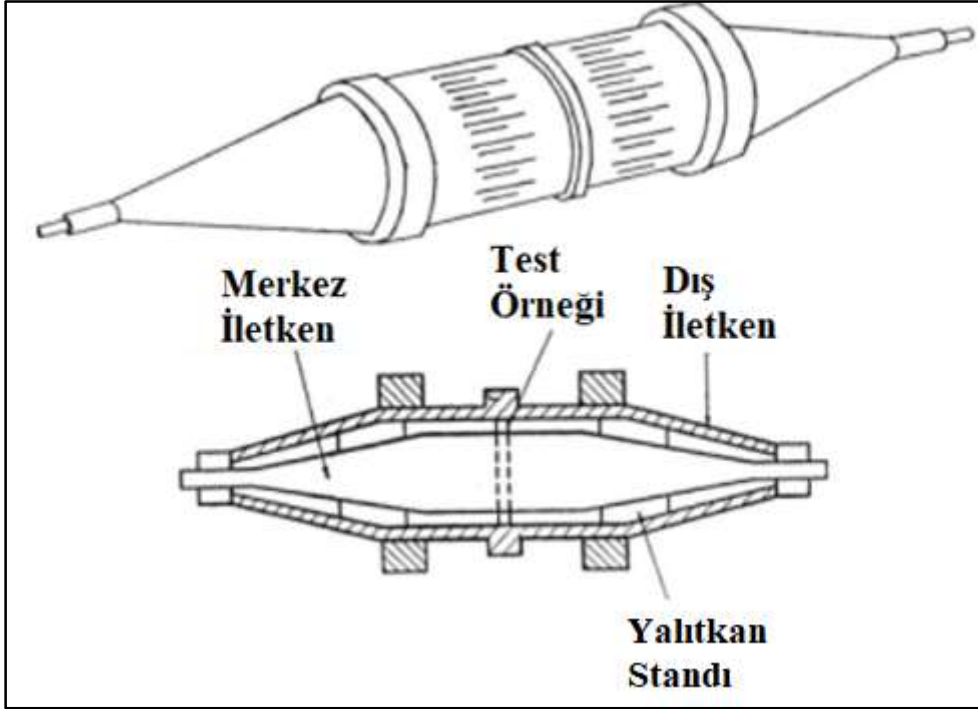


Şekil 3.10. Korumalı kutu ile SE ölçümü

Şekil 3.10’da gösterildiği gibi bu metotta test numunesi ile korumalı kutu arasında yeterli elektrik iletimi olup olmadığı bunu başarmak zordur. Bu yöntem yaklaşık 500 MHz frekans aralığı ile sınırlıdır.

Eşeksenli iletim hattı yöntemi

Ekranlama etkinliğinin ölçümü için eşeksenli iletim hattı yöntemi, korumalı kutu tekniğinin sınırlamasının üstesinden gelir ve artık daha çok tercih edilen bir yöntemdir. Bu tekniğin en büyük üstünlüğü farklı laboratuvarlarda elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesidir. Ayrıca eşeksenli iletim hattı yansıyan emilen ve iletilen bileşenlerin verilerini çözümlemek için de kullanılır [5,39].



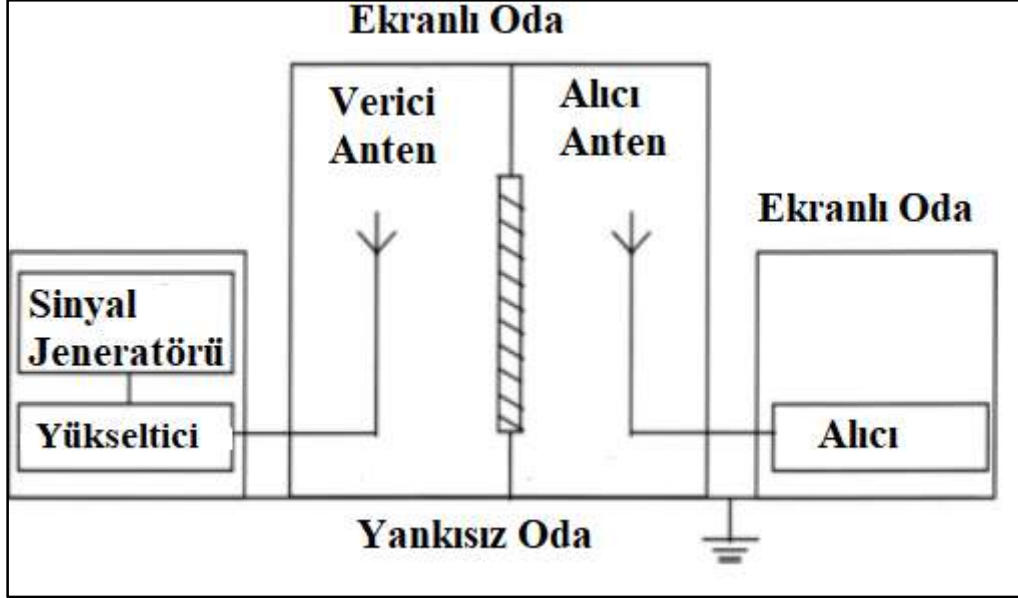
Şekil 3.11. Eşeksenli iletim hattı spektrumu

Testler küçük numunelerin ölçümleri ile olabilir. Şekil 3.11’de görüldüğü üzere ölçümler belirli frekanslardaki modüle edilmiş sinyal jeneratörleri, kristal dedektörleri ve ayarlı amplifikatör veya alıcı olarak spektrum analizöründe yapılabilir. Sistem önce belirli bir frekansta numune tutucu hatta bağlanmadan kurulur. Bu değişken zayıflatıcı maksimuma ayarlanmıştır ve sinyal seviyesi kaydedilir. Sonra hatta numune tutucu yerleştirilir zayıflatıcı önceki kaydedilen değere gelene kadar azaltılır. Farklı frekanslarda spektrumun işlemdeki yanıt değeri elde edilene kadar tekrar edilir. Açıkçası spektrum oluşturmak için noktadan noktaya yaklaşım zaman alıcıdır. Bir spektrum analizör tarafından süpürme modunda bir izleme jeneratörü ile yer değiştirir. Spektrum analizörü sistemin tepkisini birkaç dakika içinde görüntü ekranında tek bir eğri olarak sunar. Standart eşeksenli kablolar ile yaklaşık 80 dB elde edilebilir. Kullanılan ekipman iç çapı 50 mm ve dış çapı 125 mm küçük simit biçimli hücre içerir [5,38].

Ekranlı oda yöntemi

Ekranlama etkinliğinin ölçümü için geliştirilen metotlardan en gelişmiş Şekil 3.12’de yer alan ekranlı oda yöntemidir. Sistem bileşenlerinin her biri, sinyal jeneratörü, alıcı anten, verici anten ve kaydedici ayrı ayrı elektromanyetik girişim ihtimaline karşı izole edilmiştir.

Ayrıca antenler yankısız odalara yerleştirilir ve test numunesi yaklaşık 2.5m^2 ölçüsünde büyük oranda arttırılmıştır.



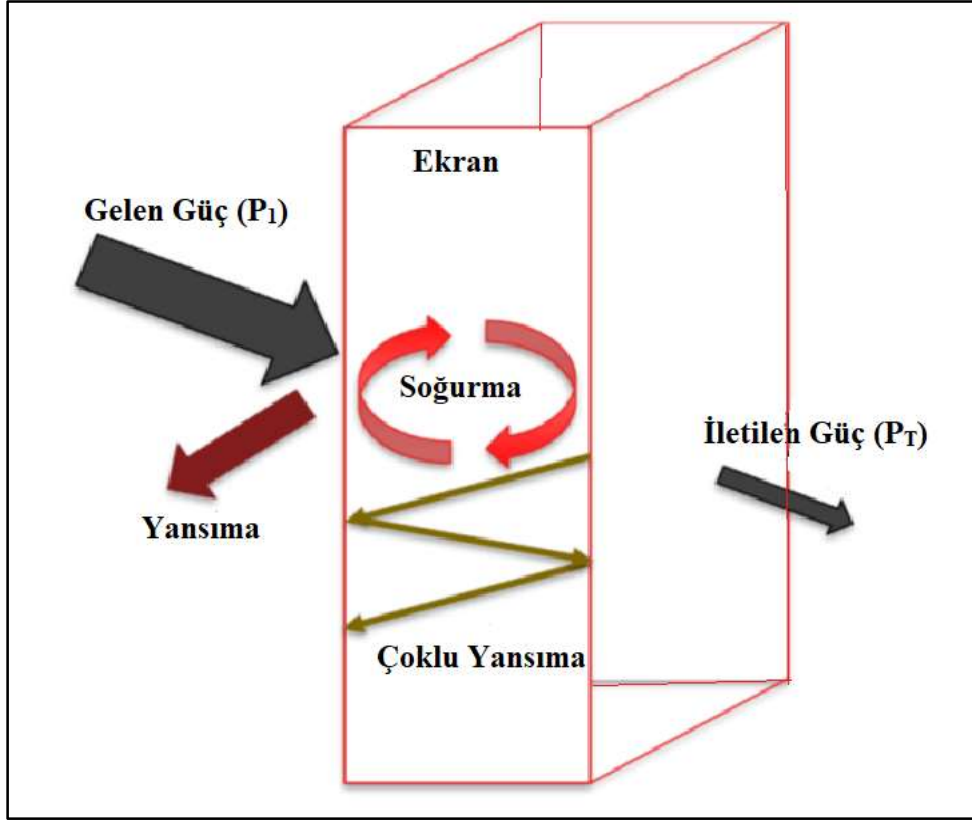
Şekil 3.12. Ekranlı oda yöntemi

3.2.2. Ekranlama mekanizması

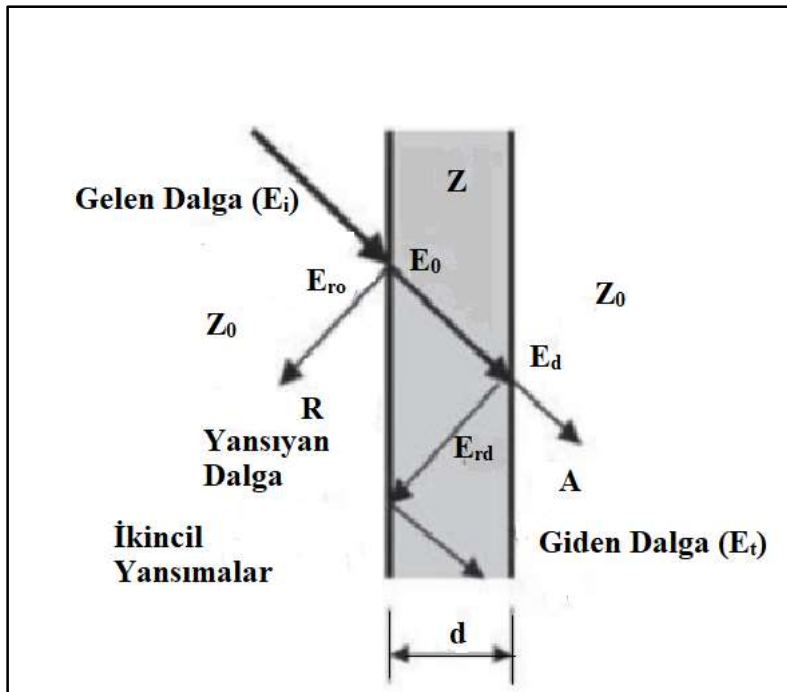
EMG ekranlama esas olarak radyasyon frekansı, kalkan malzemesinin elektriksel iletkenliği ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır. EM dalgaları, EMG kaynağı ile ekranlama muhafazası arasındaki mesafeye bağlı yakın alan veya uzak alan olarak sınıflandırılabilir. EM dalgalarının dalga boyu 2π 'ye bölünerek alanlar arasındaki geçiş noktası elde edilir. EM dalgası, uzak alanda elektrik ve manyetik alanlar birbirine dik olduğu bir düzlem dalgası olarak kabul edilir. Yakın alanda, dalga biçimi daha karmaşıktır [5]. Yakın ve uzak alanda EM dalgaları ekranlama malzemesine çarptığında bir kısım EM dalgası ekrandan iletir. Şekil 3.13'te de görülen malzemenin ekranlama etkinliği, gelen gücün (P_I) iletilen güce (P_T) logaritmik oranına göre hesaplanır.

Eş.3.1'de verilen denklem ile Şekil 3.14'te görülen kalkanın SE hesaplaması aşağıdaki gibidir:

$$SE = 10 \log(P_I/P_T) \quad (3.1)$$



Şekil 3.13. Elektromanyetik ekranlama mekanizması



Şekil 3.14. Düzlem dalgada SE tanımlaması

3.2.3. Ekranlama etkinliği

Ekranlama etkinliği açıklıklar haricinde bir iletim hattı modeli olarak düşünölebilir. İletim hatlarında olduğu gibi ekranlamada kayıp ve yansıma bileşenleri hesaba katılmalıdır. Ekranlamada bu kayıplarla ortaya çıkan ısı gelen dalğanın empedansı ile kalkanın empedansı arasındaki yansımadır [5,39]. Ekranlama etkinliği genellikle desibel (dB) cinsinden ölçölür.

Logaritmik desibel ifadesi aşğıdaki gibi ifade edilir:

$$dB = 10 \log(P_2/P_1) \quad (3.2)$$

Eş. 3.2 nolu denklem ile pozitif bir desibel değeri elde edilirse güç kazancı ($P_2 > P_1$) olduğu anlaşılır. Ancak bir negatif bir desibel değeri çıkarsa güç kaybı ($P_2 < P_1$) olduğunu gösterir.

Elektrik alan için ekranlama etkinliği aşğıdaki gibi ifade edilir:

$$SE = 20 \log(E_0/E_1) \text{ dB} \quad (3.3)$$

Manyetik alan için ekranlama etkinliği aşğıdaki gibi ifade edilir:

$$SE = 20 \log(H_0/H_1) \text{ dB} \quad (3.4)$$

Eş. 3.3 ve Eş. 3.4. nolu denklemlerde yer alan gelen dalga E_0 (H_0) ile temsil edilirken, ekrandan çıkan dalğanın şiddeti E_1 (H_1) ile temsil gösterilir. Ekranlamanın etkinliği için iki önemli husus vardır. Birinci kullanılacak malzeme diğeri ise montajdan kaynaklı ekranda oluşan açıklıklar, vs.dir. Elektronik parçaların tasarımından dolayı meydana gelen bu durumu yönetmek zordur. Ayrıca malzemenin ekranlama etkinliği ile ilgili olarak kafes yapısı nedeniyle grafen açıklığının analiz edilmesi gerekir [37,41].

Ekranlama etkinliği;

- Gelen dalğanın açısı
- Kutuplanma,
- Frekans,
- Alanın ekrandaki konumu,

- Alanın zayıflatılması,
- Ekran geometrisi ile değişir.

Ekranlamada kullanılan malzemelerin gösterdiği etkinliği hesaplamak için söz konusu ekranın sonsuz büyüklükte bir düzlemsel yapıya sahip olduğu kabul edilir. Gelen dalganın ortam değişimine gösterdiği tepki ile ekranın elektriksel parametreleri bu etkinlikte büyük rol oynar. Metalik bir yüzeye çarpan bir dalganın bir kısmı ekran sınırında Şekil 3.14'te görüldüğü üzere dalga şeklinde yansır. İletilen dalganın bir kısmı ekrandan geçerken zayıflar yani soğurulan dalga olarak adlandırılır. Ayrıca gelen dalga ekran içerisinde birçok yansımalara da uğrar. Yansıma kaybı ise dalga empedansı ve alan türüne bağlıdır [14,41]. Ekranlama etkinliği (SE), yansıma kaybı (R), soğurulma kaybı (A), ve çoklu yansıma kaybının (B) toplamına eşittir.

$$SE = (R + A + B) \text{ dB} \quad (3.5)$$

EMG SE , desibel (dB) cinsinden ifade edilir. 20 dB bir koruma etkinliği EMG radyasyonunun %99 zayıflamasına ($P_T = 0.01P_i$) karşılık gelir. Birçok ticari uygulamalarda 20 dB yeterli düzeyde ekranlama yapıldığı anlamına gelir. Ekranlama; yansıma, soğurma ve çoklu yansıma olmak üzere 3 kısımdan oluşur. Toplam (SE_T) ekranlama etkinliği; yansıma (SE_R), soğurma (SE_A) ve çoklu yansımanın (SE_{MR}) toplamı ile elde edilir.

$$SE_T(\text{dB}) = SE_R + SE_A + SE_{MR} \quad (3.6)$$

3.2.4. Yansıma, soğurma ve çoklu yansıma ile ekranlama ilişkisi

Yansıma ile ekranlama ilişkisi (SE_R)

Elektromanyetik girişimde SE hesaplamasında metal ekranlamada yansıma birincil mekanizmadır. Yansıma ile ilgili ekranlamada malzeme radyasyondaki EM alanı ile etkileşime giren elektron ve deşikler hareketli yük taşıyıcılara sahip olmalıdır [14,36]. Yüksek elektriksel iletkenlik gerekeceği halde malzeme iletken olma eğilimindedir. İletkenlik için iletim yolu ağı çok önemli iken ekranlama da önemi yoktur. Metallerin serbest elektronları daha fazla olduğu için yansıma yoluyla EM yayılımını büyük ölçüde azaltır [29]. İletken polimer nanokompozitlerde, polimer malzemedeki dolgu maddesinin yüzey alanı

arttırılarak yansıma ile ekranlama arttırılır. Dökme metal gibi homojen malzemeler yansıma ile ekranlama aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$SE_R = 39.5 + 10 \log(\sigma/2\pi f\mu) \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemde σ kalkan malzemesinin hacimsel iletkenliği, f radyasyon frekansı ve μ ekranlama malzemesinin manyetik geçirgenliği olarak ifade edilir. Bu denklem CPN gibi heterojen malzemeler için değişebilir.

Soğurma ile ekranlama arasındaki ilişki (SE_A)

Soğurma, EMG korumasının ikincil mekanizmasıdır Polimer nanokompozitlerde metallerin aksine esas olarak yansımayla koruma sağlanan durumlarda elektromanyetik alanın kontrol edilmesine yardımcı olan soğurma ile sağlanır. Soğurma yoluyla ekranlama için, kalkan gelen EM radyasyonu ile etkileşime giren elektriksel veya manyetik dipollerden birine sahip olmalıdır. Yüksek dielektrik sabitine sahip Çinko Oksit veya Baryum Titanat gibi malzemeler elektrik dipolleri sağlayabilirken yüksek manyetik geçirgenliğe sahip Ferrit veya Nikel gibi malzemeler manyetik dipoller sağlayabilir. Bu dipoller, EM radyasyonunun soğurma yoluyla zayıflamasına yardımcı olur. Soğurma yoluyla koruma, esas olarak malzemede üretilen akımdan (Ohmik kayıplar) ve manyetik histerezis kayıpları içindir [14, 30].

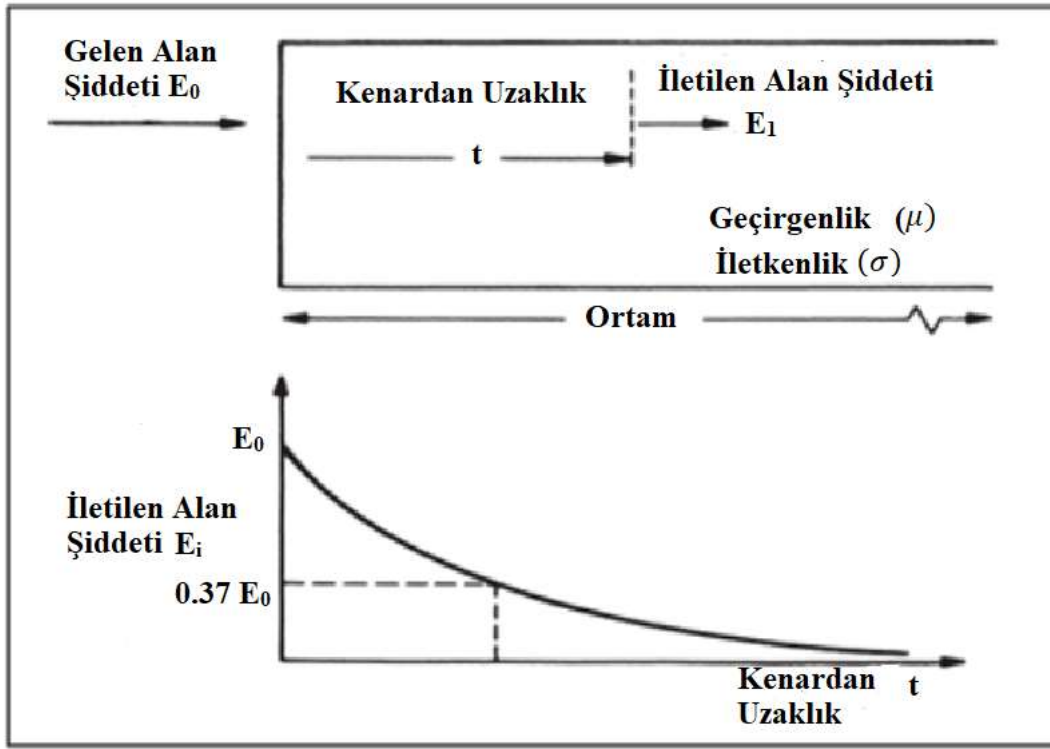
Homojen malzemeler için soğurma ile yapılan ekranlama denklemi aşağıdaki denklem gibidir:

$$SE_A = 8.7d/\delta = 8.7d\sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (3.8)$$

d : Ekranlama malzemesinin kalınlığı

δ : Deri kalınlığı

Bu nedenle, soğurma ile ekranlama, kalkan malzemesinin kalınlığı ile doğru orantılıdır. Olay frekansının artışı ile soğurma ile ekranlama artarken, olay frekansının artmasıyla yansıma ile ekranlama düşer.



Şekil 3.15. Yutucu bir ortamda ilerleyen bir dalganın üssel zayıflaması

Şekil 3.15.'te E_1 ve H_1 ile ekrandaki t mesafesinde dalga şiddeti gösterilir. Elektromanyetik dalganın genliğinin iletilen alan şiddetinin % 37'sine düştüğü mesafeye yüzey derinliği (deri kalınlığı) denir ve δ ile gösterilir

Çoklu yansımalar ile ekranlama arasındaki ilişki (SE_{MR})

Çoklu yansımalar, EM radyasyonunun zayıflamasına yardımcı olur. Gelen EM dalgalar kalkanın bitişik yüzeyinden (hava polimeri yüzeyi gibi) geçtiğinde defalarca ileri geri olarak yansır. Bu çoklu yansımalar ağırlıklı olarak gözenekli veya köpük gibi geniş bir yüzey alanına sahip ve çok katmanlı ekranlama malzemeleri gibi yüksek arayüz alanlarına sahip malzemelerde meydana gelir. İletilen dalga, çoklu yansımalar nedeniyle artar ve bunun genel EMG ekranlaması üzerinde negatif bir etkisi vardır [14,35]. Radyasyonun büyüklüğünün gelen radyasyonun büyüklüğünün $1/e$ değerine düştüğü kalınlık deri kalınlığı olarak adlandırılır. Aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3.9)$$

Yüzey derinliği malzeme kalınlığından büyük ise çoklu yansılardan kaynaklanan ekranlama aşağıdaki denklemle tahmin edilebilir:

$$SEMR = 20 \log(1 - e^{-2d/\delta}) \quad (3.10)$$

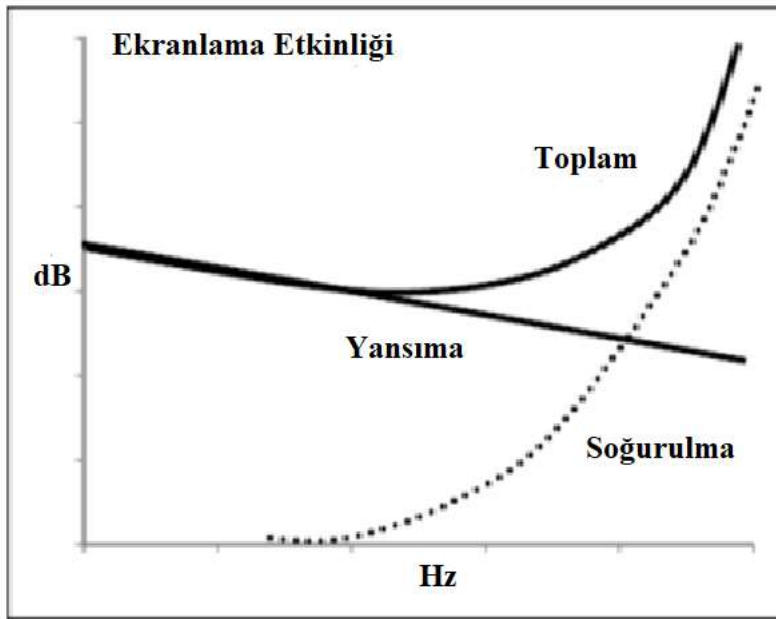
Ekranlama malzemesi, deri kalınlığından (δ) daha kalın olduğunda, çoklu yansılarda bu ekranlama ihmal edilebilir.

3.2.5. Çoklu yansıma kayıpları

Yansıma ve soğurulma kayıplarının birleşimidir.

Düzlem dalga

Düzlem dalgalarda olan toplam kayıp; uzak alanda Şekil 3.16'da da gösterildiği gibi soğurulma ve yansıma kayıplarının bileşimidir Düzlem dalgalarda yansıma kaybı çok yüksek ve çoklu yansıma kaybı çok küçük olduğu için çoklu yansıma kaybı normalde ihmal edilir [14,39].



Şekil 3.16. Düzlem dalganın ekranlama etkinliği

Şekil 3.16 ‘da görüldüğü üzere ekran empedansı arttıkça frekans artar, frekans arttıkça da yansıma kaybı azalır. Ayrıca deri kalınlığı frekansla azalır. Frekans arttıkça da soğurulma kaybı artar [10].

Elektrik alanlar

Elektrik alanlar için olan toplam kayıp, yansıma ve soğurulma kayıplarının bir bileşimidir. Elektrik alanlarda yansıma kaybı çok yüksek ve çoklu yansıma kaybı değeri küçük olduğu için çoklu yansıma kaybı ihmal edilir. Düşük frekanslarda ilk korunma mekanizması yansıma kaybında olup tam tersi yüksek frekansta ise soğurulma kayıplarındadır.

Manyetik alanlar

Manyetik alanlar için olan toplam kayıp da soğurulma ve yansıma kayıplarının bir bileşimidir. İnce bir ekranın çoklu yansıma kaybı ihmal edilirken kalın bir ekranda ise çoklu yansıma kaybı toplam kayba eklenir. Düşük frekanslarda manyetik alanların korunması zordur çünkü yansıma kaybı ve soğurulma kaybı küçük olduğu için toplam koruma etkinliği düşüktür. Düşük frekanslarda en etkin ekranlama yolu düşük relüktans ile sağlanır. Dolayısıyla ekranlama yapılırken yüksek manyetik geçirgenliğe sahip (mumetal, demir, vs) malzeme kullanılmalıdır.

3.2.6. Mevcut EMG ekranlama malzemeleri

Elektrikli bir cihazın EMG ekranlaması için bir Faraday kafesi kullanmak en temel çözüm yollarından biridir [14,35]. Bu durumda kafeste, metaller, iletken kaplı plastikler (plastik mahfazanın duvarlarının boya ile kaplanması, metalik kaplama veya vakumlu metalleştirme) ya da iletken dolgu termoplastik (polimerik iletken parçacıklarla enjeksiyonla kalıplanmış reçine) kullanılabilir. Ekranlama yapılırken söz konusu sistemin çalışma ortamının mekanik ve diğer elektriksel özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Aynı zamanda malzeme güneş radyasyonu, yağmur, nem, aşırı sıcaklıklar ve kimyasal reaksiyon gibi çevresel şartları da karşılamalıdır. [5,32-35]

Çelik

Çelik ekranlama malzemeleri, dayanıklılıkları ve çok iyi bağlantı elemanı tutuşu nedeniyle tercih edilir. Ancak zımbalanması veya işlenmesi en zor ekranlama malzemesidir. Köşeler ve kenarlar kolayca kaynaklanabilir ancak çelik kullanımında meydana gelecek korozyon nedeniyle ekranlama malzemesi boyanmalı ve kaplanmalıdır. Ayrıca çelik muhafazalar elektronik sistemin ağırlığını alüminyum veya plastikten daha fazla artırır [34,35]

Alüminyum

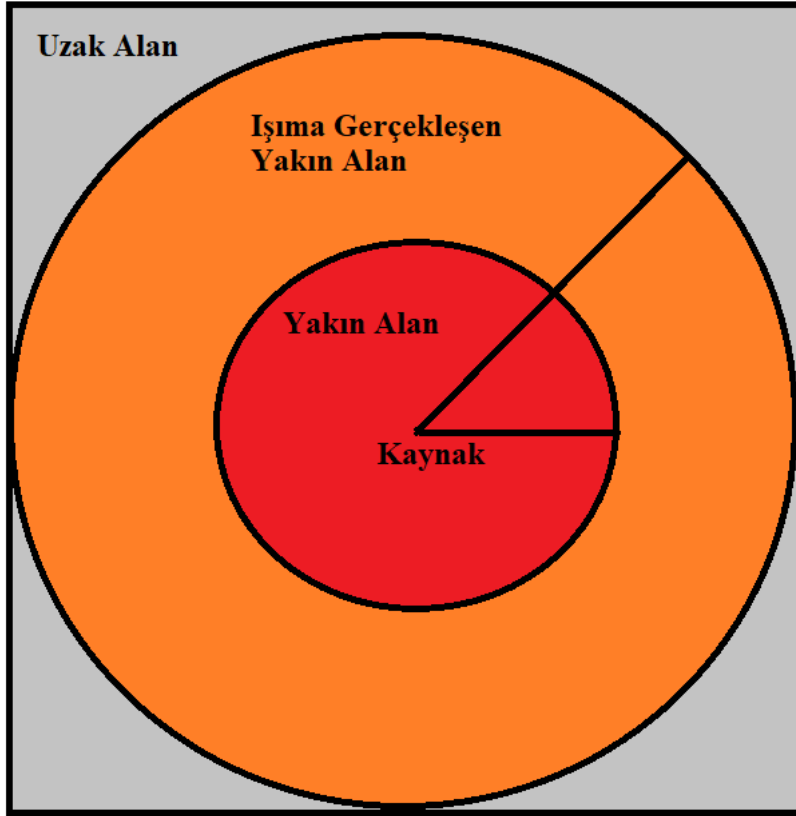
Alüminyum, yüksek iletkenlik sabitine sahip olmaları nedeniyle EMG ekranlama malzemesi olarak kullanılır. Alüminyumun yoğunluğunun düşük olması nedeniyle elektronik devre kartlarının ekranlamasının yapılmasında en önemli çözümdür. Ancak plastikten daha ağırdır ve en az dayanıklı metal muhafazadır. Alüminyum kullanımı korozyon riskini azaltır, ancak bazı çalışma alanlarında alüminyum muhafazanın işlenmesi veya kaplanması kaçınılmazdır.

Polimerik (Plastikler)

Plastikler, korozyon riski olmayan en hafif ekranlamayı sağlar. Genellikle polimerik malzemeler bir bağlantı elemanını veya sabitleme parçalarını tutma özelliğine ortalama bir seviyede sahiptir. Polimerik bir malzemenin dayanıklılığı nem, sıcaklık ve UV ışığı gibi ortam faktörlerinden etkilenebilir. Ancak, nispeten düşük kayıplı dielektrik oldukları için plastikler çok az EMG ekranlama özelliği sağlar. EMG koruması için uygun polimerik malzeme, iletken polimerik muhafazanın duvarlarının bir kaplama ile kaplanmasıyla ya da malzemelerin üretim sürecinde (enjeksiyon kalıplama veya ekstrüzyon) iletken madde eklenmesi ile elde edilebilir. Kaplama uygulamaları ile yapılan kalkanlamalar ince olma eğilimindedir. Plastiğin kaplanması iletken boyalar, alev/ark spreyi, vakumlu metalleştirme veya elektriksiz kaplama, kullanılarak gerçekleştirilir. Alüminyum ve çeliğin aksine çok çeşitli iletken malzemeler kullanılmaktadır. Ancak bir kaplamanın eklenmesi de ağırlık oluşturacağından yeni sorunları ortaya çıkarır. Termal döngüye maruz kalındığında katmanlara ayrılma/yapışma sorunları ortaya çıkmasıyla güvenilirlik problemi oluşur [35,42].

3.3. Yakın ve Uzak Alan

Bir alanın konumu radyasyon kaynağının konumu, kaynağı çevreleyen malzeme, kaynak ve onu çevreleyen malzeme arasındaki gözlem noktasındaki mesafeye göre belirlenir. Öncelikle kaynak özelliklerine bakılarak sonrasına kaynağa yakın bir noktada özellikleri belirlenir. Gözlem noktası kaynağa ne kadar yakınsa alan özellikleri o kadar açıya göre ayrıntılıdır. Kaynağa daha yakın olanlar yakın alanlar veya indüksiyon alanlar, kaynağa daha uzak alanlar uzak veya radyasyon alanları olarak tanımlanır [14,43]. Bu yakın veya uzak alanlarda yayılan kaynağın 2π 'ye bölünmesiyle elde edilen dalga boyunun (λ) ilişkisi geçiş bölgesi olarak adlandırılır ve Şekil 3.17'de görüldüğü gibidir [2]



Şekil 3.17. Yakın ve uzak alan geçiş bölgeleri

Şekil 3.17' de görüldüğü üzere bir antenden olan uzaklığa göre yakın alan, uzak alan ve fresnel alan olmak üzere üç kısımda incelenebilir.

Antene en yakın bölge olan bölgeye yakın (reaktif) alan denir. Bu bölgede enerji depolanması söz konusu olur.

$$r < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (3.11)$$

ile ifade edilir.

r : Anten ile gözlem noktası arasındaki uzaklık,

D : Antenin en büyük fiziksel boyutu,

λ : Dalga boyu

Işıma gerçekleşen yakın alan ise;

$$0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < r < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.12)$$

ile ifade edilir.

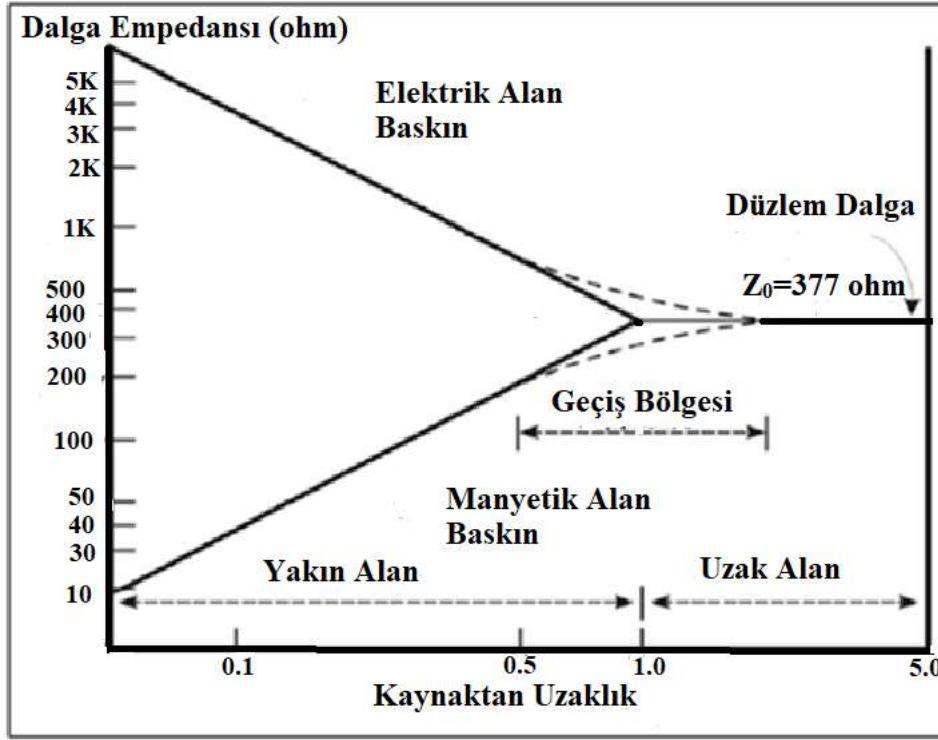
Uzak alan bölgesi ise;

$$r > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.13)$$

ile ifade edilir. Bu bölgede açısal alan dağılımı uzaklıktan bağımsız değerlendirilir. [8]. Bir elektromanyetik dalganın dalga empedansı, elektrik alanın (E) manyetik alana (H) oranıdır. Dalga empedansı Z_w sembolü ile gösterilir ve birimi ohm'dur.

$$Z_w = \frac{E}{H} \quad (3.14)$$

Uzak alanda, bu oran içinden geçtiği ortamın empedansı ile eşleşir. Boş alan veya hava için bu oran $377 \Omega'$ a eşittir [14,43,44]. Yakın alanda E ve H arasındaki oran ağırlıklı olarak kaynak tarafından belirlenir [14,45]. Kaynak ağırlıklı olarak elektrik ise, o zaman elektrik alan kaynaktan ($1/r^3$) oranında zayıflarken, manyetik alan ($1/r^2$) oranında zayıflar. Gözlemci bir elektrik kaynağından uzaklaştıkça ve geçiş bölgesine yaklaştıkça dalga empedansı azalır [14,46,47]. Kısa dipol anten bir elektrik kaynağı örneğidir. Manyetik kaynak için öncelikle tersi söylenebilir. Manyetik alan kaynaktan ($1/r^3$) oranında zayıflarken ilişkili elektrik alan ($1/r^2$) oranında zayıflar. Küçük bir çerçeve anten manyetik kaynağa örnektir.



Şekil 3.18. Dalga empedansı ve kaynaktan uzaklık arasındaki ilişki

Şekil 3.18’de görüldüğü üzere yakın alanda elektrik ve manyetik alanlar arasındaki oran düzensiz olduğu için elektrik alan ve manyetik alanlar ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Ancak, uzak alanda, dalga empedansı sabittir ve sonunda her iki alan bir düzlem dalga oluşturmak için birleşir [14,48].

3.3.1. Dalga empedansı

Düz dalga bir mahfazanın duvarlarından geçerken, düzlemin dalga empedansı, içinde bulunduğu ortamın empedansından etkilenir [14,49,50].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (3.15)$$

μ : Ekranlama malzemesinin geçirgenliği(H/m)

ϵ : Ekranlama malzemesinin dielektrik sabiti(F/m)

σ : Ekranlama malzemesinin iletkenliği (S/m)

ω : Açısal frekans

Boş uzay empedansı Z_0 ile gösterilir. Uzak alanda, havanın iletkenliğini kullanarak ($\sigma \approx 0$), dalga empedansı Z_0 , boş alan empedansı Z_0 'ya eşittir.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} = 377 \Omega \quad (3.16)$$

İletken malzemeler için ($\sigma \gg j\omega\epsilon$), kalkanlama malzemesinin empedansı Z_s olarak adlandırılır.

$$|Z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \quad (3.17)$$

Çizelge 3.1'de ekranlamada kullanılan bazı malzemelerin iletken sabiti ve manyetik geçirgenlik sabitleri verilmektedir.

Çizelge 3.1. Koruyucu malzemelerin iletkenlik ve manyetik geçirgenlik sabitleri

Malzeme	İletkenlik Sabiti, σ_r	Manyetik Geçirgenlik Sabiti, μ_r
Gümüş	1,05	1
Bakır	1	1
Altın	0,7	1
Alüminyum	0,61	1
Pirinç	0,26	1
Bronz	0,18	1
Teneke	0,15	1
Kurşun	0,08	1
Nikel	0,2	1
Paslanmaz Çelik (430)	0,02	500
Çelik (SAE 1045)	0,1	1000

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Plazma Dinamiği

Kütlesi ve hacmi olan her şey madde olup fiziksel hallerine göre katı, sıvı ve gaz olmak üzere üçe ayrılır. Katıların belli bir şekli ve kütlesi vardır. Sıvılar ise konuldukları kabın şeklini alırlar. Gazların ise belirli bir şekli ve hacmi bulunmayıp maddenin en düzensiz halidir.

Maddenin dördüncü hali olarak bilinen plazma ise ilk olarak 1929 yılında W. Crookes tarafından keşfedilmiştir [51]. Bir plazma manyetik veya elektrik alandan etkilenmediği durumlarda gaz özelliği gösterir. Yüksek sıcaklıkta atomlarına ayrılan gazların dış yörüngesinden elektronların kopması ile oluşan pozitif yüklü iyonlar ve elektronlara plazma denir. Plazmada yoğunluk arttıkça çekirdekler arası uzaklık azalır ve çarpmalar artar [33]. Plazmada elektron ve iyon yoğunlukları eşittir. Anot bölgesinde elektronlar yer alırken katot bölgesinde pozitif iyonlar yer alır. Bu iyon ve elektron dağılımları Maxwell denkleminde uygundur [4]. Sıcak ve soğuk plazmalar olarak ikiye ayrılan plazmalarda sıcak plazmada gaz tamamen iyonize olurken soğuk plazmada gazın % 10'luk kısmı iyonize olmaktadır [6]. Füzyon reaksiyonunda, sıcak plazmadaki enerji yoğunluğu ile nükleer çekirdeklerin kaynaşması sağlanır. Plazmalar, iyonosfer ve uzay boşluğundaki ortamlar için daha uygun olduğu için günlük yaşamda plazmalarla sık karşılaşmamaktadır. Ancak örneğin gece gökyüzünde görülen ışıltıların çoğu plazma kaynaklıdır [51,52].

4.2. Plazma ve Füzyon ile İlgili Genel Bilgiler

Döteryum gazı (D₂) verimli bir füzyon yakıtı olarak kullanılması nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Dünya çapında 1985 yılında en önemli proje olarak başlatılan ITER projesinden sonra, füzyon reaksiyonunda yakıt olarak kullanılan D₂'nin önemi artmıştır. Füzyon enerjisinin güç yoğunluğunun yüksek olması ve doğa dostu olması nedeniyle geleceğin en iyi enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Füzyon reaksiyonları, başlangıçta daha hafif iki atomun çekirdeğini birleştirip enerji açığa çıkararak daha ağır bir çekirdek oluşturmasıdır.

Nükleer füzyonun gerçekleşmesi oldukça karmaşık ve disiplinler arası bir çalışmadır. Literatüre göre Toroidal Plazma Hücresi (TPH), plazma odak, stelaratör vs. gibi az sayıda elektrik ve manyetik hapsedme süreçleri bulunmaktadır. Bu tür cihazlar sadece füzyon reaksiyonları için değil aynı zamanda nötron üretimi, plazma teşhisi, tıp alanında izotop üretimi, gama ve x ışını üretimi için de kullanılmaktadır [53,54,55].

Füzyon cihazlarının özellikleri arasında kararlı çalışması, basit konfigürasyonu ve ucuz bakımı önemlidir. Bu cihazlar yakıt olarak Hidrojen, Döteryum ve Tritiyum kullanıp nötron, proton ve x ışını gibi ürünler üretebilmektedir [56,57].

Bu çalışmadaki toroidal plazma hücresi önce 10^{-4} mbar' a kadar vakumlanır ve 10^{-1} mbar' a kadar operasyon gazı (örneğin D_2) ile doldurulur. İstenilen iyon yoğunluğunu ve iyonların hızını ayarlayan iyon tabancaları cihaza bağlanabilir [51,52].

Cihaz, yakıt olarak kullanılan iyonları cihazın toroidal çemberinin içinde katot terminaline doğru hızlandırır ve elektrik ve manyetik kuvvetler toroidal merkezi bölge içinde hareket etmelerine neden olur [57,58]. Böylece sistemde belli basınç altında füzyon reaksiyonu oluşur. Literatüre göre toroidal plazma hücresi kV ölçeğinde DC veya AC olarak çalışabilir [59,60]. Negatif elektrik potansiyeli iyonları katoda iterken plazma çekirdeği içinde maksimum füzyon olasılığı yakalanır. Reaksiyon sırasında, x ışınları ve gama ışınları yayılımı gözlenir. Daha iyi bir füzyon olasılığı için belirli kinetik enerjideki iyonların kaynaştırılması gerekir. Bu şekilde iyon enerjisi dağılımı, ürünlerin hızı için önemli bir rol oynar.

Benzer başka bir sistem olarak Elmore ve diğerleri tarafından plazma sistemlerinin kararlılıkları ve denge özellikleri incelenmiştir [61]. Hirsh tarafından farklı bir hareketsiz elektrostatik hapsedicide elektrik potansiyelinin etkisi incelenmiştir [62]. Swanson ve diğerleri tarafından elektron enjeksiyonu ve bunun yüzey potansiyeli üzerindeki etkisi incelenmiştir [63]. Wong ve diğerleri tarafından iyon yoğunluğu hesaplamaları ve enerji dağılımları araştırılmıştır. [60]. Nevins, füzyon olasılığını tahmin etmek için iyon çarpışmasının zamanını araştırmıştır [64]. 1990'larda Ohnishi ve arkadaşları füzyon olaylarının ilişkisini ve potansiyel kararlılıklarını incelemiştir [55]. Daha sonra, katoda daha yakın ve iyonların merkezde baskın olduğu potansiyel model bulunmuştur. Gerçekten de füzyon cihazının verimliliği için niteliksel bir değer ortaya çıkarılmıştır. Noborio ve diğerleri

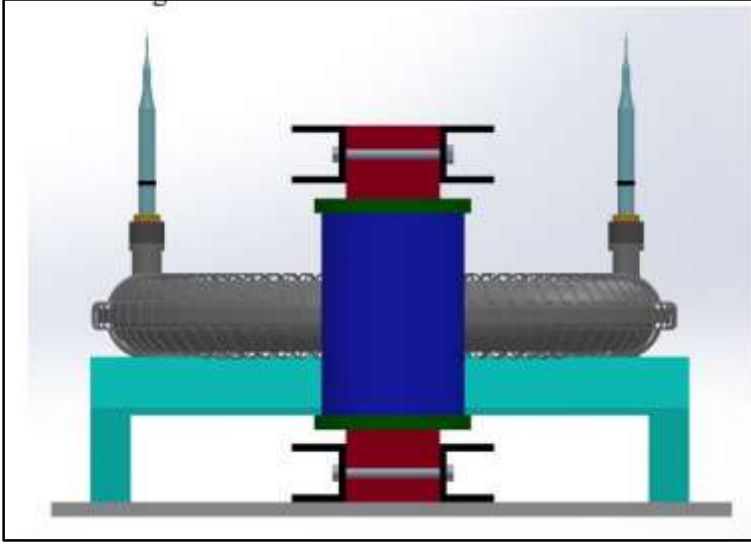
eylem verimliliği üzerine yapılan araştırmalara ek olarak, uzaysal dağılımlar ve parçacık yörüngeleri üzerinde çalışmıştır [58].

Katot geometrileri, iyon ve elektron enjeksiyonu, katot malzemesi ve şekli, manyetik alan uyarımı, DC ve RF güç beslemeleri gibi çeşitli füzyon cihazlarının yapısal özellikleri incelenmiştir [65, 66]. Mevcut çalışmalar, nötron üretimi, zenginleştirilmiş Uranyum tespiti ve bazı patlayıcı türleri gibi farklı mühendislik uygulamalarının füzyon sistemlerinde kullanıldığını kanıtlamaktadır [67,68].

Yakın tarihli çalışmalardan birinde Kurt, silindirik bir yüzey üzerinde parçacıkların yörüngelerini araştırdı [56]. Daha sonra bu silindirik modelden 3D silindirik bir yapı üzerinde momentum, elektrik ve manyetik denklemler çözümlenerek parçacık davranışı incelendi. Çok cisim yaklaşımıyla denklem seti çözüldü ve konumların gerçek zamanlı çözümleri ve hızları elde edilmiştir [69]. Silindirik 3D füzyon cihazına ek olarak Kurt ve arkadaşları, küresel geometride katot yapıların alanları da incelendi [52,59]. Özellikle katot dielektriklerinin etkileri ve yüzeydeki elektrik potansiyel üzerindeki şekiller ayrıntılı olarak incelenmiştir [52,54,59]. Yazarların araştırmalarına paralel olarak içi boş ve ızgaralı olmak üzere iki tür katot, farklı deney grupları tarafından incelenmiştir [68]. Dolan ve diğerleri tarafından başlangıçta ızgaralı olan uygulandı, ancak Miley, uzun eksenel reaksiyon için içi boş katot tipini önerdi [68,70]. Izgaralı elektrottan nötron emisyonunu çok verimliydi [70]. Böylece, bu gerçeklik altı çubuklu mevcut katot modeli ızgara yapısını kullanmaya zorlanmış olur.

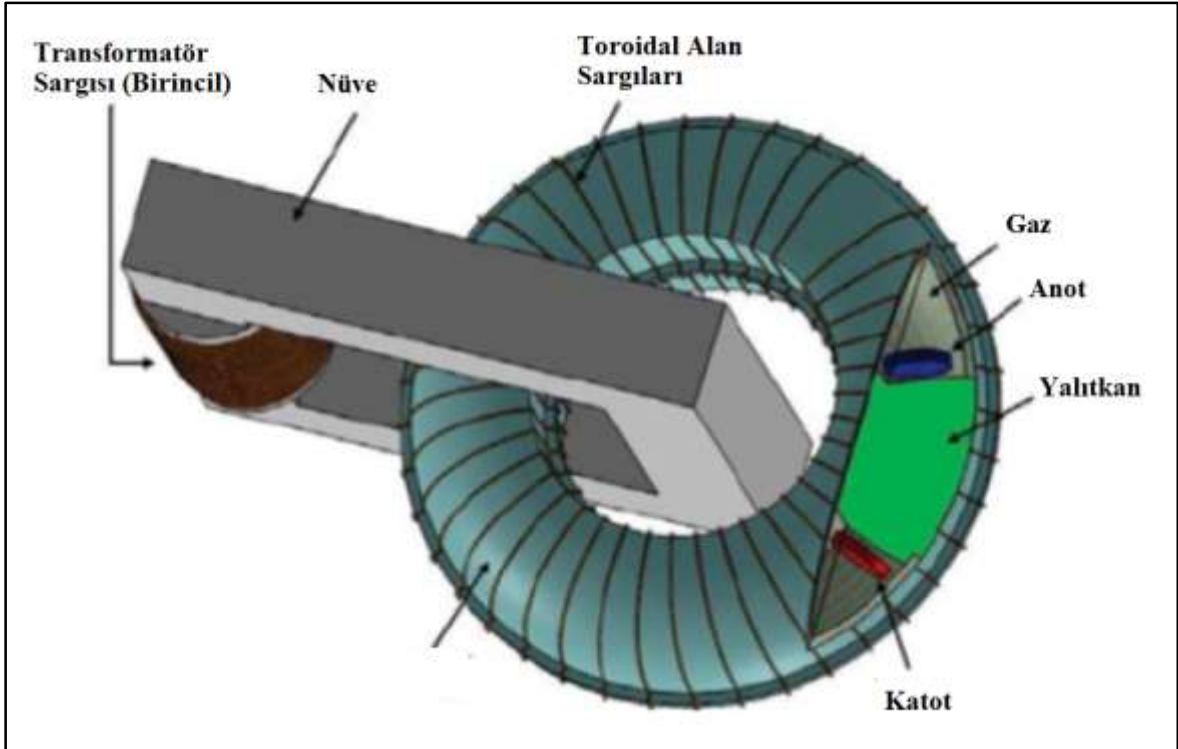
4.2.1. Toroidal Plazma Cihazı (TPC) modeli

Şekil 4.1’de 10^{-5} mbar altında vakum özelliği olan simit biçimli bir plazma hücresi yer almaktadır. Plazmanın içinde toroidal elektrik alanının oluşumunu sağlayan harici bir sistem vardır. Sarılmış dış sargılar, poloidal elektrik alan için olup çekirdek yapısı da homojen bir alan dağılımı sağlar [71].



Şekil 4.1. Poloidal ve toroidal sargılı plazma cihazı

Toroidal Plazma Hücresi (TPH)'nin genel görüntüsü Şekil 4.2'de yer almaktadır [71]

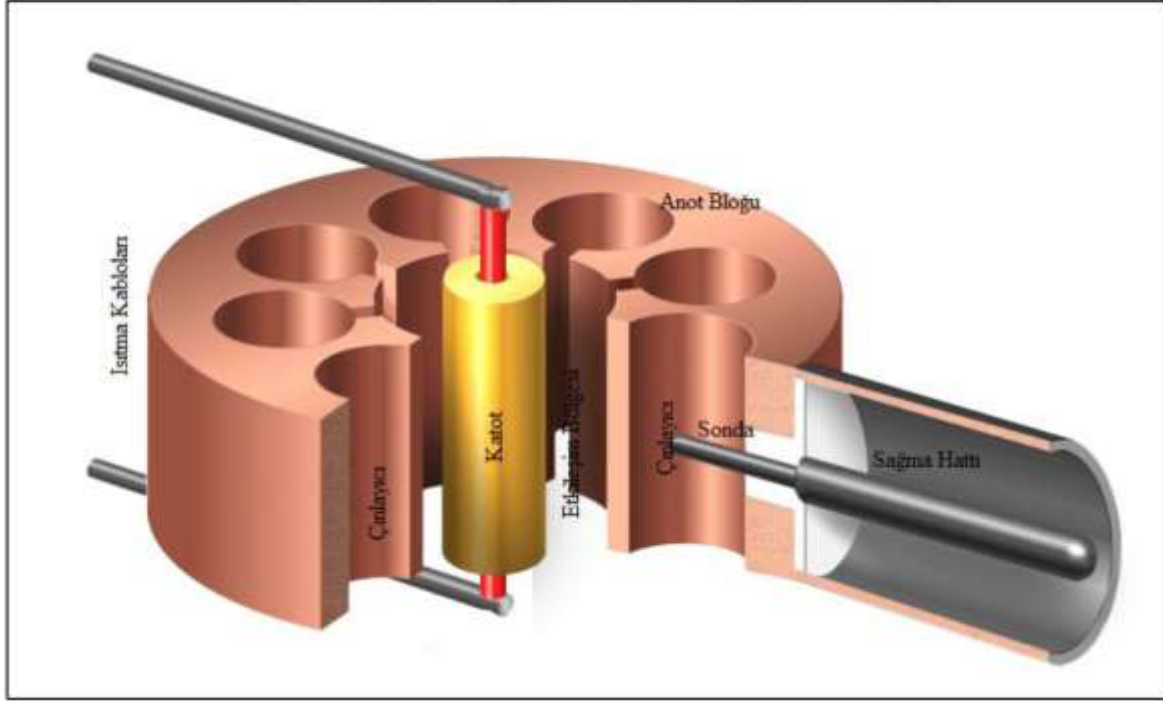


Şekil 4.2. TPH'nin genel görüntüsü ve transformatörlü deney düzeneği

4.3. Magnetron Teorisi

Magnetronlar, birçok farklı mühendislik alanında olduğu gibi mikrodalga endüstrisinde özellikle de radar ve nükleer füzyon endüstrilerinde önemli rol oynar. Örneğin, füzyon plazmalarında, vakum bölgesindeki plazmanın soğuk bölgelerini stabilize etmek için uyarıcı bir mikrodalga kaynağı gerekir. Plazma ortamı içindeki frekans aralığı parçacıkların salınımlarına bağlı olarak radyo frekansından (RF) daha yüksek frekanslara (örneğin; mikrodalga) değişebilir. Bu bağlamda, plazmadaki parçacıklar üzerine istenen elektromanyetik dalgayı çıkarmak için bir magnetron ve uygun dalga kılavuzu tasarlamak ve uygulamak gerekir. Elektronlar, proton ve nötronlara kıyasla daha hafif kütleleri nedeniyle daha yüksek frekanslarda salınırken, daha ağır parçacıklar daha düşük frekanslarda hareket ettiği unutulmamalıdır. Ayrıca, çıkış RF alanının, 1.32 GHz çalışma frekansında 12.77 dB'ye kadar kazançla çok yönlü yayıldığı da bildirilmektedir [72, 73]. Antenler, mikrodalga magnetronların kullanıldığı bir başka önemli uygulama alanıdır. Kurt ve diğerlerinin yaptığı çalışmada relativistik magnetron, hücre içi parçacık benzetimlerde 400 kV çalışma voltajı ile %70 cihaz verimliliği ve giga watt radyasyon elde edebilmektedir

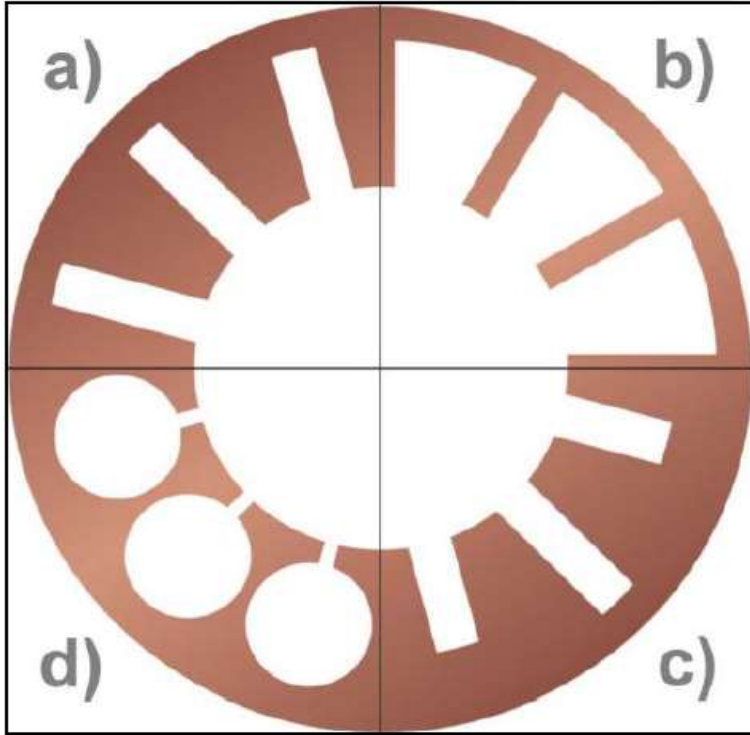
İlk magnetronlar vakum endüstrisi tarafından yapılmış olup iki tip mikrodalga elektron vakum tüpü vardır: Bunlardan biri mikrodalga doğrusal ışın tüpü (O-tipi) ve diğeri mikrodalga çapraz alan tüpüdür (M-tipi). Magnetron, genellikle silindirik, eksenine paralel bir manyetik alanla yüksek frekanslı salınımlar üreten, yüksek güçlü bir mikrodalga çapraz alan cihazıdır [3]. İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana çeşitli endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamaların yanı sıra havacılık, gıda ve iletişim endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek frekans ve güç gerektiren uygulamalarda önemi her geçen gün artmaktadır. Magnetronlar, verimli, küçük, düşük maliyetli ve yüksek çıkış güçleri nedeniyle giderek artan önem kazanmaktadır [73].



Şekil 4.3. Magnetronun yapısı

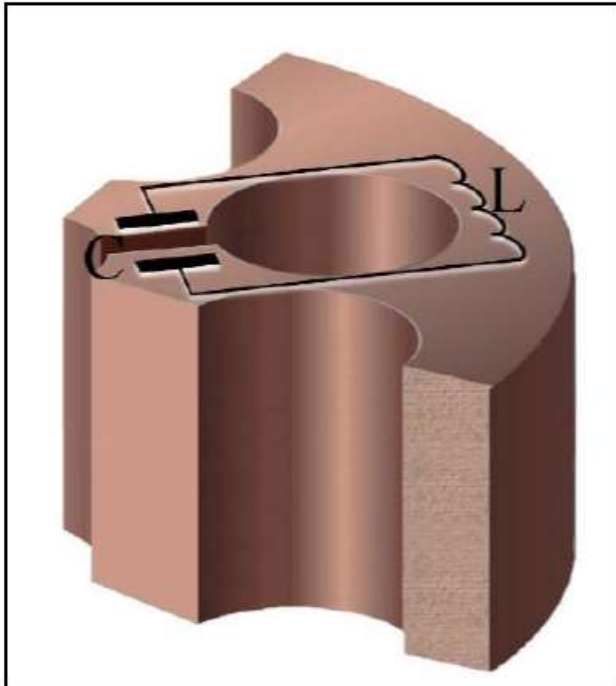
Aynı zamanda magnetronlar mikrodalga salınımlarının gerçekleştiği birimdir. Katot kısmı elektronların kaynağı olup Bakır ve Tungsten gibi metallerden yapılmıştır. Anot bloğunun topraklanmasından dolayı negatif gerilime sahiptir. Şekil 4.3'te magnetronun yapısı bulunmaktadır. Anot ve katot arasındaki bölge, plazma yapısının olduğu etkileşim bölgesi olarak adlandırılır. RF veya mikrodalga üretimi, elektronların enerjisinin RF veya mikrodalga salınımlarına aktarılmasıyla gerçekleşir. Bir magnetrondaki gerekli manyetik alan, cihazın eksenine paralel yerleştirilmiş bir solenoid veya harici mıknatıs tarafından üretilir. Manyetik alan sayesinde elektronlar etkileşim bölgesi içinde istenilen yöne yönlendirilir. Magnetronun çalışma frekansı, boşlukların şekli ve boyutları ile belirlenir. İlaveten magnetronun çalışma şekli boşluk sayısı ve fiziksel boyutları ile belirlenir. Bir magnetron rezonatör sisteminin kapalı yapısından dolayı, bir dönüşteki toplam faz kayması 2π 'nin tamsayı katı olmalıdır [73].

Magnetronun çalışma frekansını belirleyen ve anot bloğunda çift sayıda bulunan yapılara çınlayıcı denmektedir. Bu çınlayıcılar Şekil 4.4'te görüldüğü üzere delik tipi, daire sektörlü tipi, yarık tipi ve doğan güneş tipi olmak üzere 4 kategoride gruplandırılır.



Şekil 4.4. a) Yarık tipi, b) Daire sektörü tipi, c) Doğan güneş tipi, d) Delik tipi çınlayıcı

Şekil 4.5'te görülen çınlayıcılar paralel rezonant devre mantığıyla çalışmakta olup oyuğun yarık kısmı kapasitör görevi görmekte iken arka kısmı ise tek sarımlı bobin gibi endüktif bir görev üstlenmektedir [27,73].



Şekil 4.5. Anot bloğundaki çınlayıcı

4.3.1. Magnetronun çalışma prensibi

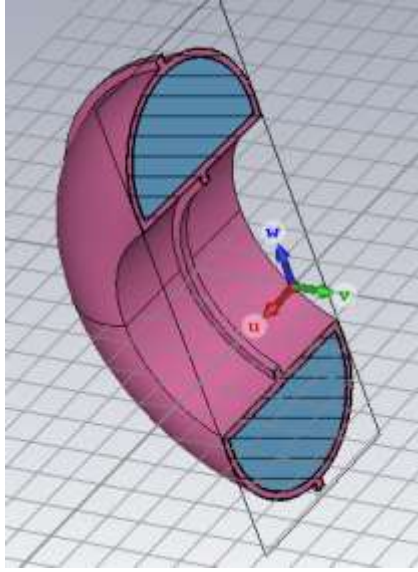
Öncelikle magnetrona gerilim verilerek ısıtıcı kablolar vasıtasıyla katotta sıcaklık artışı olur ve bu sayede elektron yayılımı başlar. DC elektrik ve manyetik alanların etkisi altında bulunan katot etrafında elektron kümesi oluşur. Sonra yüksek hıza sahip elektronlar daha yavaş elektronları yakalar ve bisiklet tekerinin dönmesiyle oluşan görüntüye benzer bir görüntüye ulaşana kadar elektronlar ve oyuklardaki RF alanları arasında enerji transferi gerçekleşir. Böylece magnetronda RF salınımı elde edilmiş olur [72,74,75].

4.4. DC Kapasitif Deşarj Plazma Benzetimi

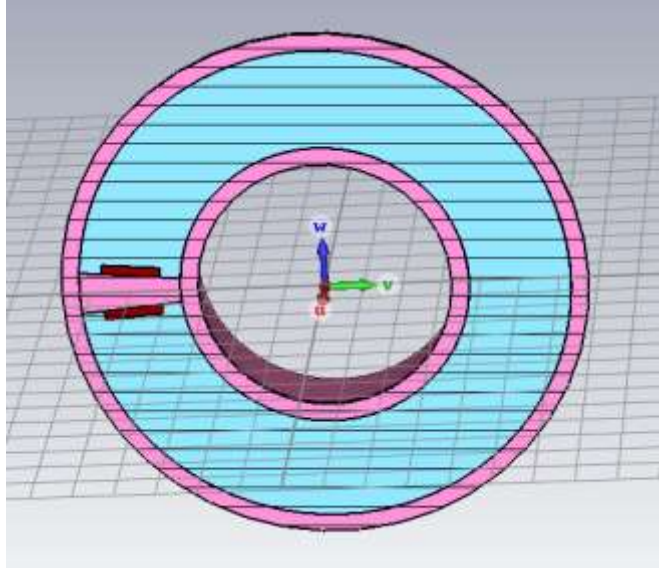
Günümüzde enerji tüketimi, endüstriyel üretim ve nüfusun hızla artması, enerji arzında bir açığa neden olmakta ve bu enerji talebinin ancak belirli bir kısmı, alternatif ve kısmen çevre dostu yenilenebilir enerji sektörü tarafından karşılanabilmektedir. Türbin, jeneratör, fotovoltaiik ve diğer ekipmanlar kısmen çevre dostu olarak nitelendirilmektedir. Konvansiyonel yakıtlar açısından, gelişmekte olan ülkelerin yaklaşık %80'i çevre kirliliği nedeniyle bu yakıtlardan kötü yönde etkilenmektedir. Dünyada yaşanan iklim değişikliğine tepki olarak alternatif ve geleceğin enerji kaynağı olan termonükleer füzyon enerjisi konusunda uluslararası girişimler her geçen gün artmaktadır [76-78].

Füzyon mühendisliği uygulamalarında, yıldızların enerjisinin kontrollü bir elektromanyetik ortam aracılığıyla laboratuvar koşullarında üretilmesi düşünülmektedir. Bu çerçevede, RF veya DC oluşumdaki plazmalar, füzyon koşullarını sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır [54]. Bu nedenle, elektriksel ve/veya manyetik sınırlama bu plazma sistemleri için hayati önem taşır. Plazmanın üretimi ve kontrolü, füzyon alanındaki ana görevleridir.

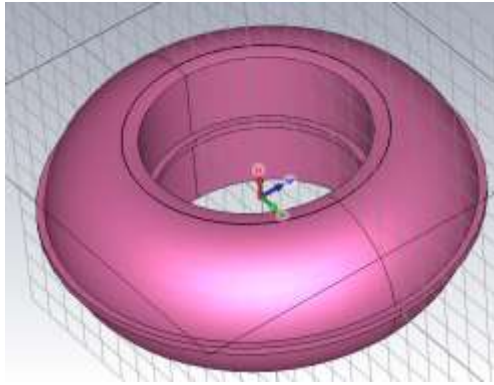
Bir Toroidal şekil hapsetme füzyonu olan TPH'nin nükleer füzyon reaktörleri arasında en tercih edilenidir. Şekil 4.8'de yer alan bu cihaz bir transformatör ile aynı çalışma prensibine sahiptir. Bu çalışma prensibinde TPH, elektrik akımını birincil bobinlerden geçirir, bu da toroidal plazma hücresinde transformatörün ikincil bobinlerinin rolünü oynayan bir akımın indüklenmesine neden olur [71,78].



a)



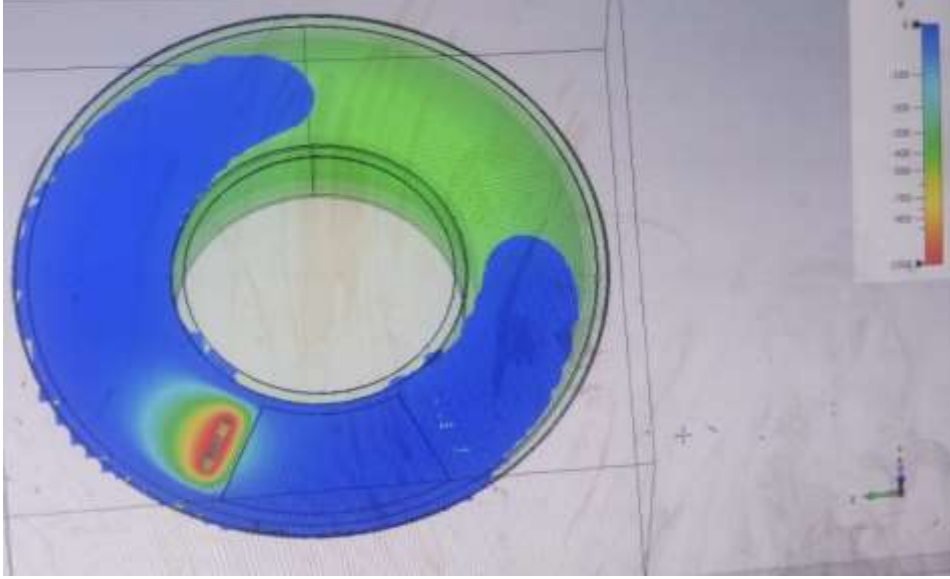
b)



c)

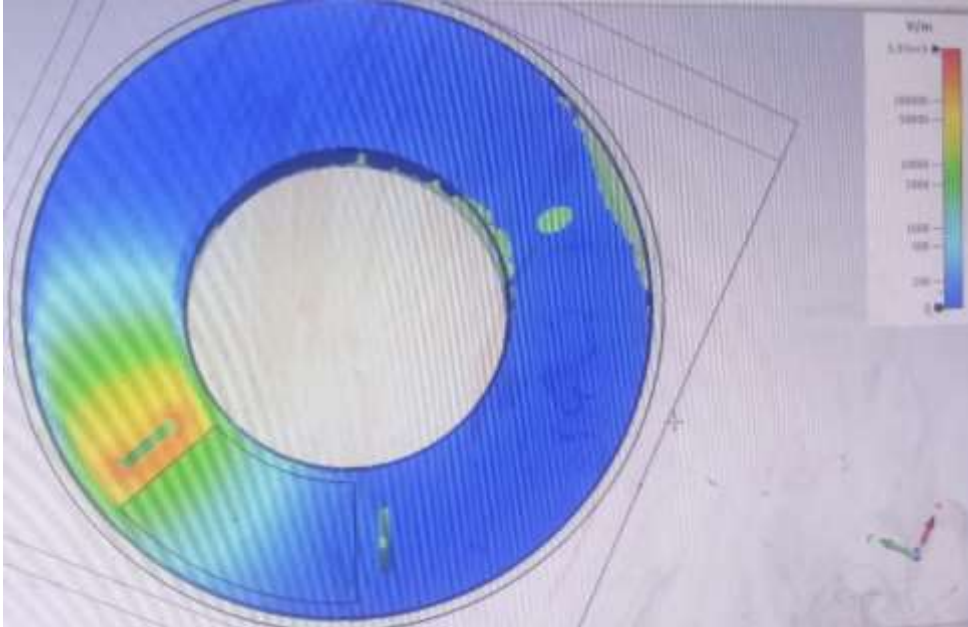
Şekil 4.6. Tasarlanan TPH cihazının a) y eksen, b) z eksen c) tam görüntüsü

TPH cihazının 3 boyutlu çizimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Plazma haznesi Tokamaklara benzeyen şekilde toroidal olup anot ve katot birimleri yalıtkan bir teflon tabakayla ayrılmıştır. TPH cihazının simülasyon ortamındaki farklı eksenlerden kesitleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir [71].



Şekil 4.7. Tasarlanan TPH cihazındaki potansiyel dağılımı

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de tasarlanan TPH içerisinde elde edilen gerilim ve elektrik alan dağılımları gösterilmiş olup katot çevresinde negatif alanlar elde edilirken anot tarafı topraklı olduğundan 0 potansiyeldedir.



Şekil 4.8. Tasarlanan TPH cihazındaki elektrik alan dağılımı

Vakum ortamında, elektrotlara -1500V gerilim uygulandığında potansiyel dağılım Şekil 4.7’de, elektrik alan dağılımı ise Şekil 4.8’de yer almaktadır. Elektrotlar arasında yalıtkan malzemesi teflondur.

4.5. Ölçüm Cihazı ve Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler

4.5.1. Ölçüm cihazı

Plazma sisteminde yapılan ölçümlerde Şekil 4.9’da görülen Wavecontrol SMP2 marka ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, endüstri, telekomünikasyon, enerji hatları, havacılık, tıp, savunma sanayi, laboratuvarlar, demiryolu, halk sağlığı ve çalışan güvenliği alanlarında kullanılmaktadır. Wifi, GSM baz istasyonları, yüksek gerilim hatları, trafolar ve radyo TV vericileri gibi farklı frekanslardaki elektromanyetik alan kaynaklarının elektrik alan, manyetik alan ve güç yoğunluğu gibi birçok parametrede Şekil 4.10’da görülen değişen problemler sayesinde ölçümleri yapılabilmektedir. Ölçüm cihazı portatif, hassas ve kesin sonuçlar vermekte olup cihaz hafızasına tüm ölçüm sonuçları kaydedilmektedir.



Şekil 4.9. Elektromanyetik alan ölçüm cihazı



Şekil 4.10. Frekansa bağlı değişen elektromanyetik alan ölçüm problemleri

4.5.2. Ölçüm yöntemi

Bu çalışmada yapılan ölçümlerde;

- IEEE Std-299 Standartı
- Elektronik Haberleşme Cihazlarından Kaynaklanan Elektromanyetik Alan Şiddetinin Uluslararası Standartlara Göre Maruziyet Limit Değerlerinin Belirlenmesi, Kontrolü ve Denetimi Hakkında Yönetmelik'te yer alan yöntem ve mevzuattan faydalanılmıştır.

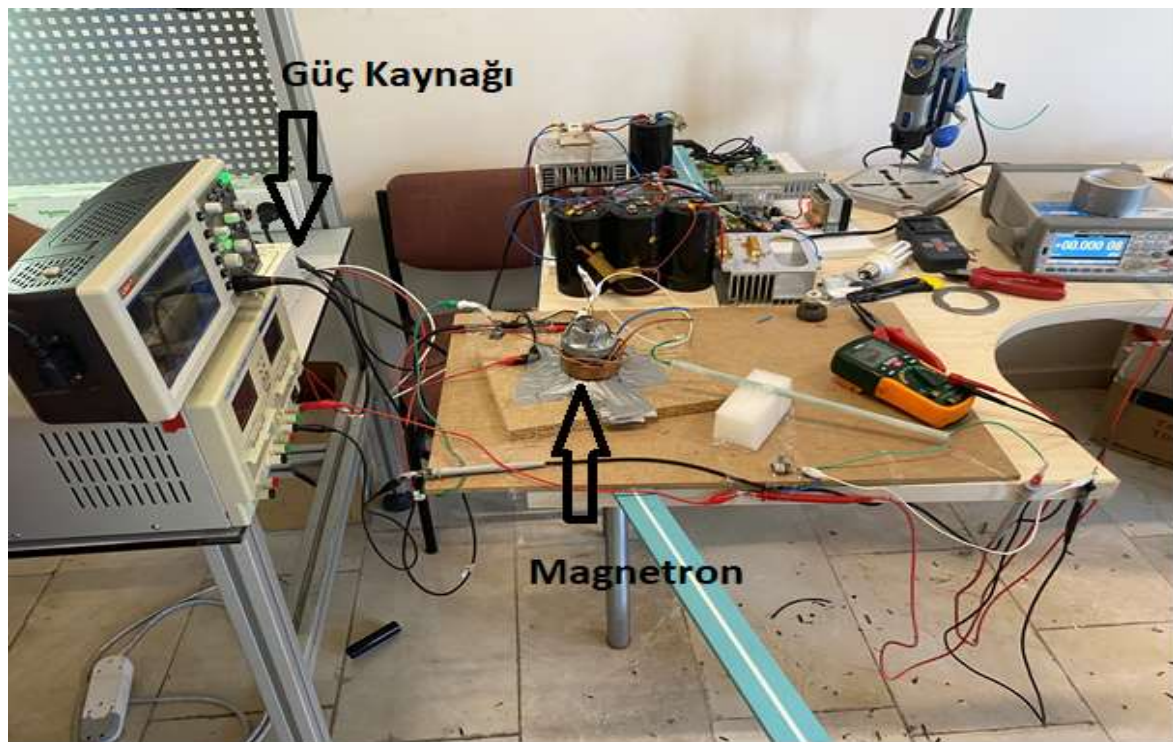
IEEE Std-299 Standartına göre ölçüm aralığı aşağıdaki gibidir:

- Düşük frekans: 9 kHz (50 Hz)- 20 MHz
- Rezonans frekans: 20- 300 MHz
- Yüksek frekans: 300MHz- 18GHz (100GHz)

4.6. Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde magnetron ve plazma cihazına ait ölçüm sonuçları ve değerlendirmeleri yer almaktadır.

4.6.1. Magnetron cihazı ölçüm sonuçları





Şekil 4.12. Elektromanyetik alan ölçüm cihazı ile magnetron değerlerinin ölçümü

Şekil 4.12’de yer alan magnetronda 10 cm aralıklarla mesafeye bağlı elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçümleri yapılmıştır. Kutupsal ölçümlerde ise yatayda 30 derecelik değişimlerle ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümlerde başlangıç noktası magnetrondan antene olan uzaklık $r=12$ cm uzaklıkta olacak şekilde belirlenmiştir.

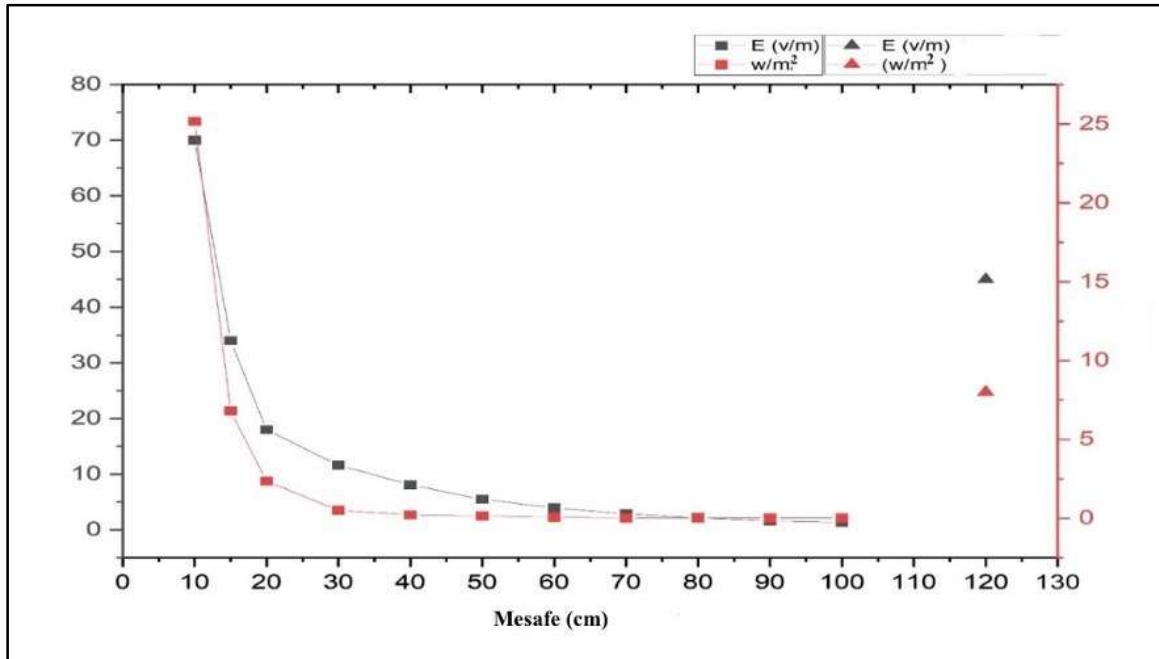
Çizelge 4.1. Mesafeye bağlı olarak ölçülen elektrik alan değerleri

Sıra No	Katot Gerilim Değeri	Uzaklık	Elektrik Alan Değeri
1	15,6 kV	10 cm	70 V/m
2	15,6 kV	15 cm	34 V/m
3	15,6 kV	20 cm	18 V/m
4	15,6 kV	30 cm	11,60 V/m
5	15,6 kV	40 cm	8,11 V/m
6	15,6 kV	50 cm	5,50 V/m
7	15,6 kV	60 cm	3,96 V/m
8	15,6 kV	70 cm	2,88 V/m
9	15,6 kV	80 cm	2,22 V/m
10	15,6 kV	90cm	1,60 V/m
11	15,6 kV	100 cm	1,40 V/m

Çizelge 4.1.'de anten tarafında yapılan elektrik alan ölçüm değeri 85 V/m'dir. Çizelge 4.1.'den görüldüğü üzere mesafe ile elektrik alan değeri azalmaktadır. Magnetrondan 10 cm uzaklıktaki ölçülen 70 V/m değeri, 1 m uzaklıkta 1,6 V/m'nin altına düşmektedir.

Çizelge 4.2. Mesafeye bağlı olarak ölçülen güç yoğunluğu değerleri

Sıra No	Katot Gerilim Değeri	Uzaklık	Güç Yoğunluğu Değeri
1	15,6 kV	10 cm	25,16 W/m ²
2	15,6 kV	15 cm	6,8 W/m ²
3	15,6 kV	20 cm	2,36 W/m ²
4	15,6 kV	30 cm	0,5 W/m ²
5	15,6 kV	40 cm	0,22 W/m ²
6	15,6 kV	50 cm	0,16 W/m ²
7	15,6 kV	60 cm	0,076 W/m ²
8	15,6 kV	70 cm	0,025 W/m ²
9	15,6 kV	80 cm	0,016 W/m ²
10	15,6 kV	90cm	0,012 W/m ²
11	15,6 kV	100 cm	0,005 W/m ²



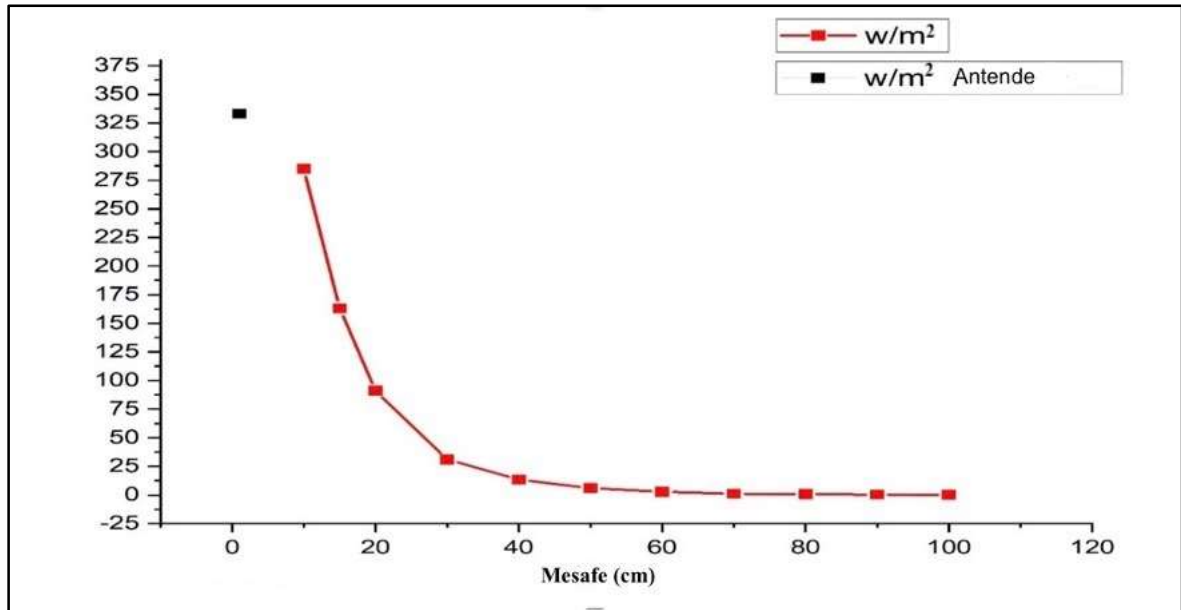
Şekil 4.13. 16,25 kV'ta yapılan elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçüm değerleri

Ölçümler, 16,25 kV 'de yüksek frekans (20 MHz-40 GHz) ölçüm başlığı ile yapılmış, uzaklığa bağlı olarak hem elektrik alan hem de güç yoğunluğu ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca; anten tarafı için aynı ölçümler tekrarlanmıştır. Çizelge 4.2'de antenin bulunduğu tarafta

yapılan güç yoğunluğu ölçüm değeri 8 W/m^2 'dir. Şekil 4.13'te görüldüğü üzere mesafeye bağlı olarak elektrik alan ve güç yoğunluğu değerleri azalma göstermektedir.

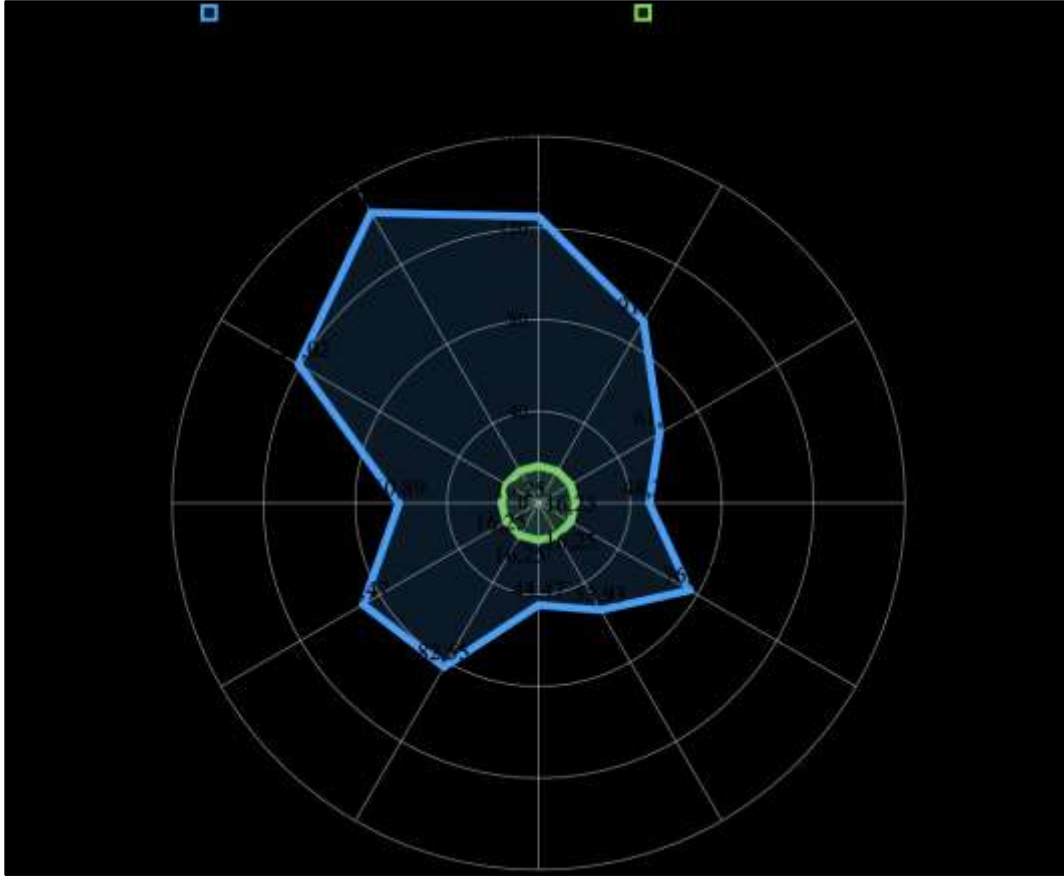
Çizelge 4.3. Mesafeye bağlı olarak ölçülen güç yoğunluğu değerleri

Sıra No	Katot Gerilim Değeri(kV)	Uzaklık	Güç Yoğunluğu Değeri
1	16,25 kV	10 cm	285 W/m^2
2	16,25 kV	15 cm	163 W/m^2
3	16,25 kV	20 cm	91 W/m^2
4	16,25 kV	30 cm	31 W/m^2
5	16,25 kV	40 cm	13,5 W/m^2
6	16,25 kV	50 cm	6 W/m^2
7	16,25 kV	60 cm	2,81 W/m^2
8	16,25 kV	70 cm	1,13 W/m^2
9	16,25 kV	80 cm	0,73 W/m^2
10	16,25 kV	90 cm	0,42 W/m^2
11	16,25 kV	100 cm	0,18 W/m^2



Şekil 4.14. 16,25 kV'ta elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçüm değerleri

Çizelge 4.14'te görüldüğü üzere 16,25 kV 'de alçak frekansta (1 Hz– 400 kHz) uzaklığa bağlı olarak hem elektrik alan hem de güç yoğunluğu ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca anten tarafı için aynı ölçümler tekrarlanmıştır. Şekil 4.14'te anten tarafında yapılan güç yoğunluğu ölçüm değeri 333 W/m^2 'dir. Şekil 4.14'te görüldüğü üzere mesafeye bağlı olarak elektrik alan ve güç yoğunluğu değerleri azalma göstermektedir.



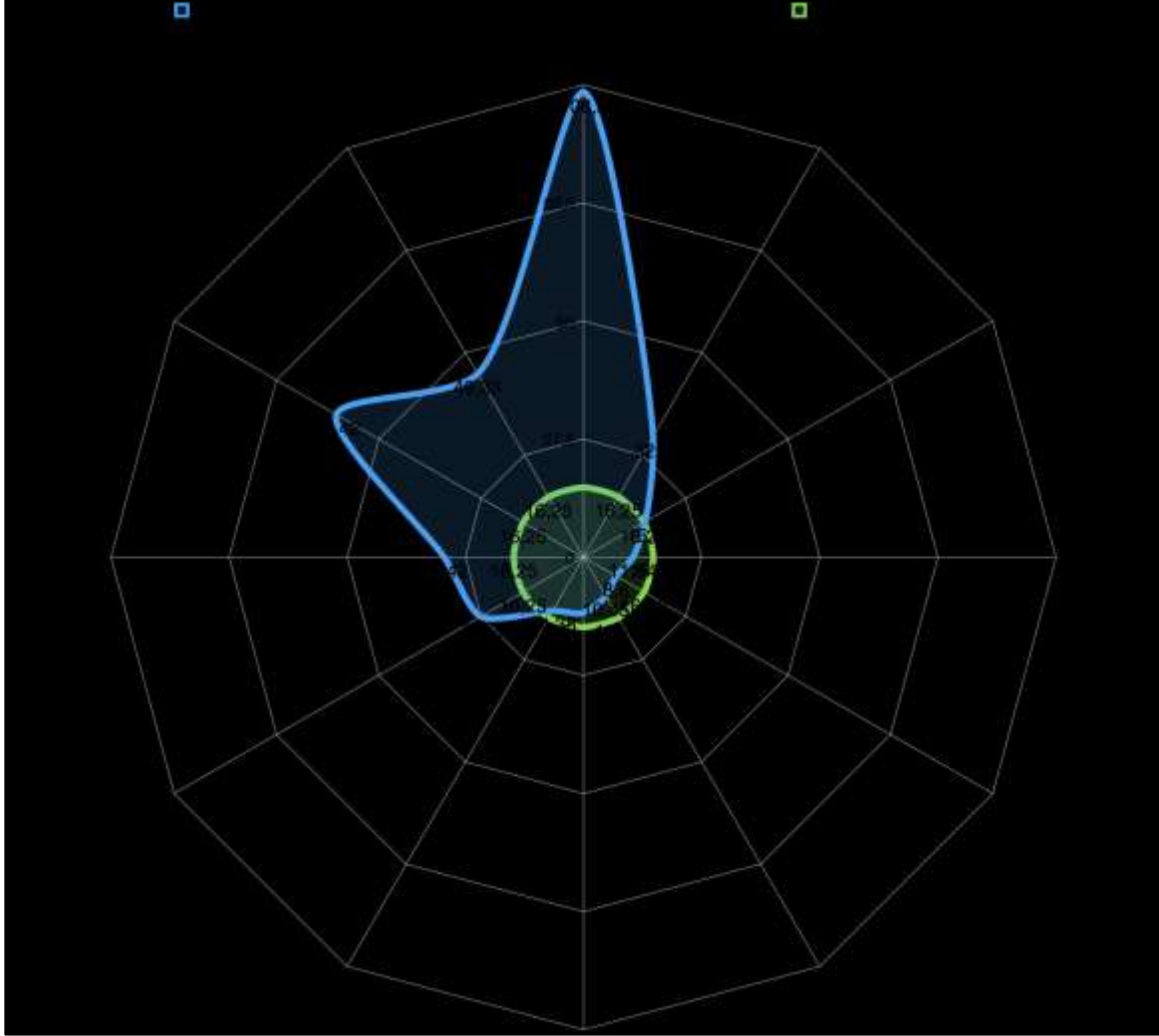
Şekil 4.15. 16,25 kV’ta açısal yönde elektrik alan değerleri

Şekil 4.15’te katot gerilim değeri 16,25 kV iken açısal yönde elde edilen elektrik alan değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.4. Açısal yönde elektrik alan değerleri

Sıra	Ölçüm Açısı	Katot Gerilim Değeri (kV)	Elektrik alan değeri
1	$\theta=0$	16,25 kV	125 V/m
2	$\theta=30$	16,25 kV	91,67 V/m
3	$\theta=60$	16,25 kV	61,08 V/m
4	$\theta=90$	16,25 kV	48,34 V/m
5	$\theta=120$	16,25 kV	76,12 V/m
6	$\theta=150$	16,25 kV	53,93 V/m
7	$\theta=180$	16,25 kV	44,47 V/m
8	$\theta=210$	16,25 kV	82,55 V/m
9	$\theta=240$	16,25 kV	88,47 V/m
10	$\theta=270$	16,25 kV	60,89 V/m
11	$\theta=300$	16,25 kV	121,02 V/m
12	$\theta=330$	16,25 kV	146,34 V/m

Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere $\theta=0$ noktasından başlayarak açısal olarak 30'ar derecelik değişimlerle elektrik alan ölçümleri alınmıştır.



Şekil 4.16. 16,25 kV'ta açısal yönde güç yoğunluğu değerler

Şekil 4.16'da katot gerilim değeri 16,25 kV iken açısal yönde elde edilen güç yoğunluğu değerleri verilmektedir.

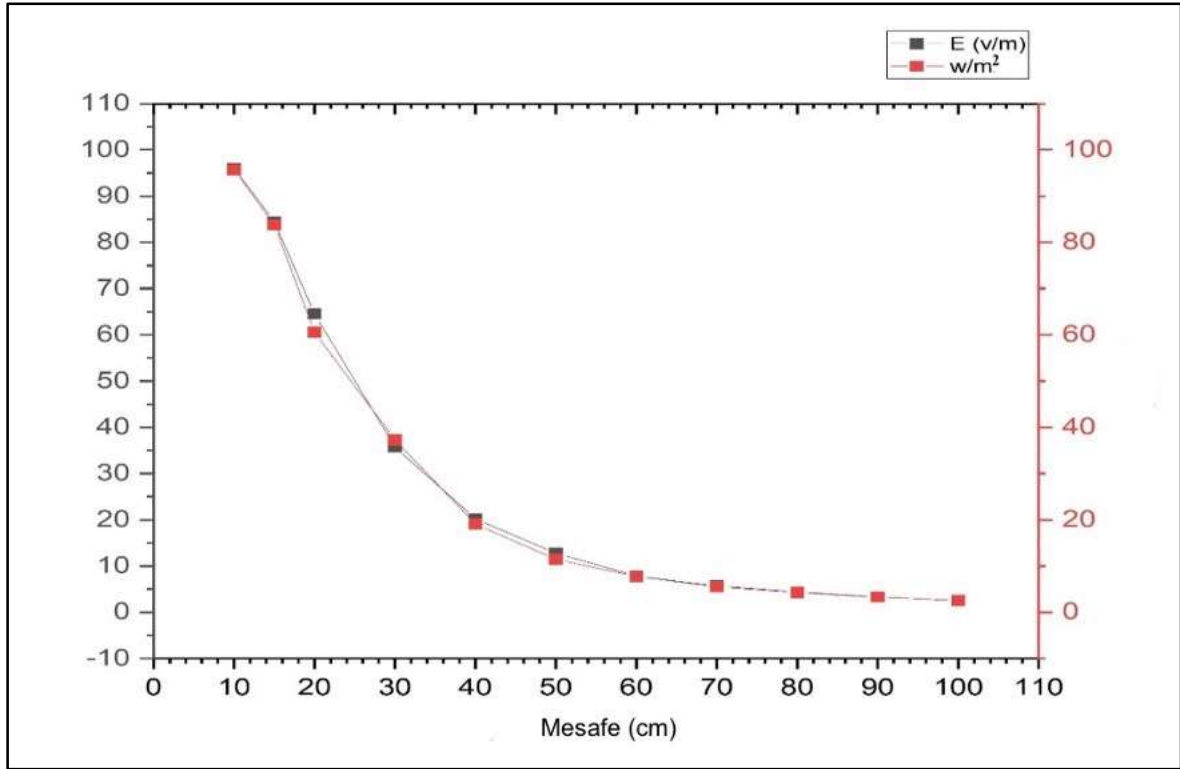
Çizelge 4.5. Açısal yönde güç yoğunluğu değerleri

Sıra No	Ölçüm Açısı	Katot Gerilim Değeri (kV)	Güç yoğunluğu değeri
1	$\theta=0$	16,25 kV	108,3 W/m ²
2	$\theta=30$	16,25 kV	32,4 W/m ²
3	$\theta=60$	16,25 kV	16,60 W/m ²
4	$\theta=90$	16,25 kV	11,54 W/m ²

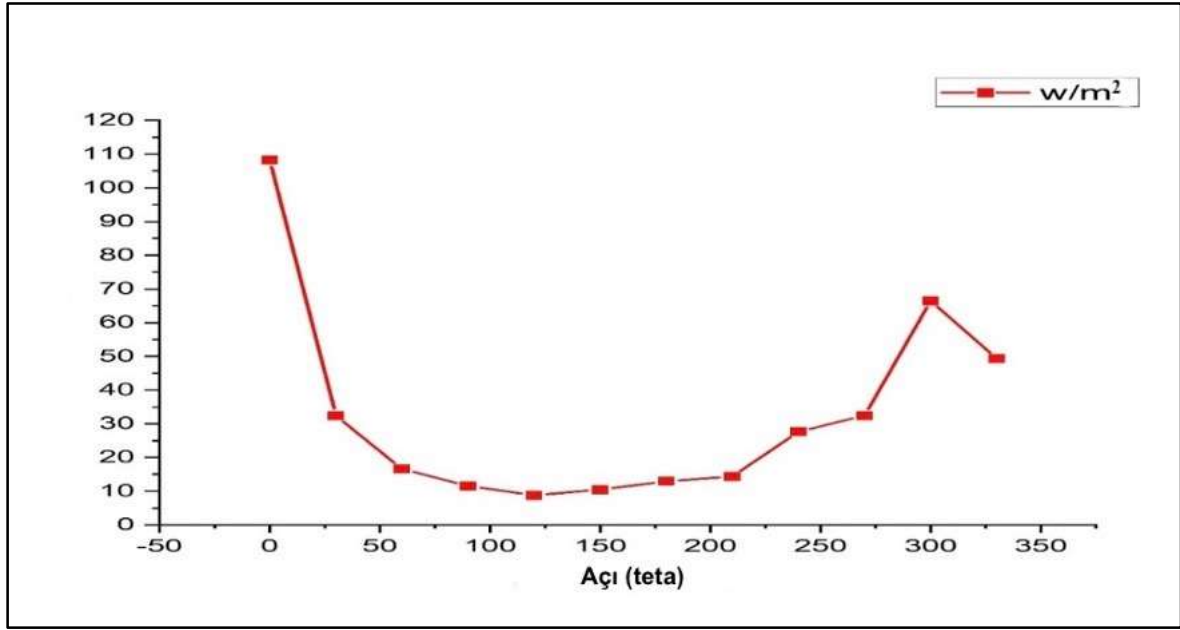
Çizelge 4.6. (devam) Açısal yönde güç yoğunluğu değerleri

5	$\theta=120$	16,25 kV	8,8 W/m ²
6	$\theta=150$	16,25 kV	10,45 W/m ²
7	$\theta=180$	16,25 kV	12,94 W/m ²
8	$\theta=210$	16,25 kV	14,38 W/m ²
9	$\theta=240$	16,25 kV	27,59 W/m ²
10	$\theta=270$	16,25 kV	32,42 W/m ²
11	$\theta=300$	16,25 kV	66,42 W/m ²
12	$\theta=330$	16,25 kV	49,33 W/m ²

Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere $\theta=0$ noktasından başlayarak açısal olarak 30'ar derecelik değişimlerle güç yoğunluğu ölçümleri alınmıştır.

Şekil 4.17. $\theta=0$ noktasında uzaklığa bağlı elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçümleri

Şekil 4.17'de görüldüğü üzere $\theta=0$ noktasında uzaklığa bağlı olarak hem elektrik alan hem de güç yoğunluğu ölçümleri alınmıştır. Ölçüm mesafesi arttıkça elektrik alan ve güç yoğunluğu değerleri azalmıştır.



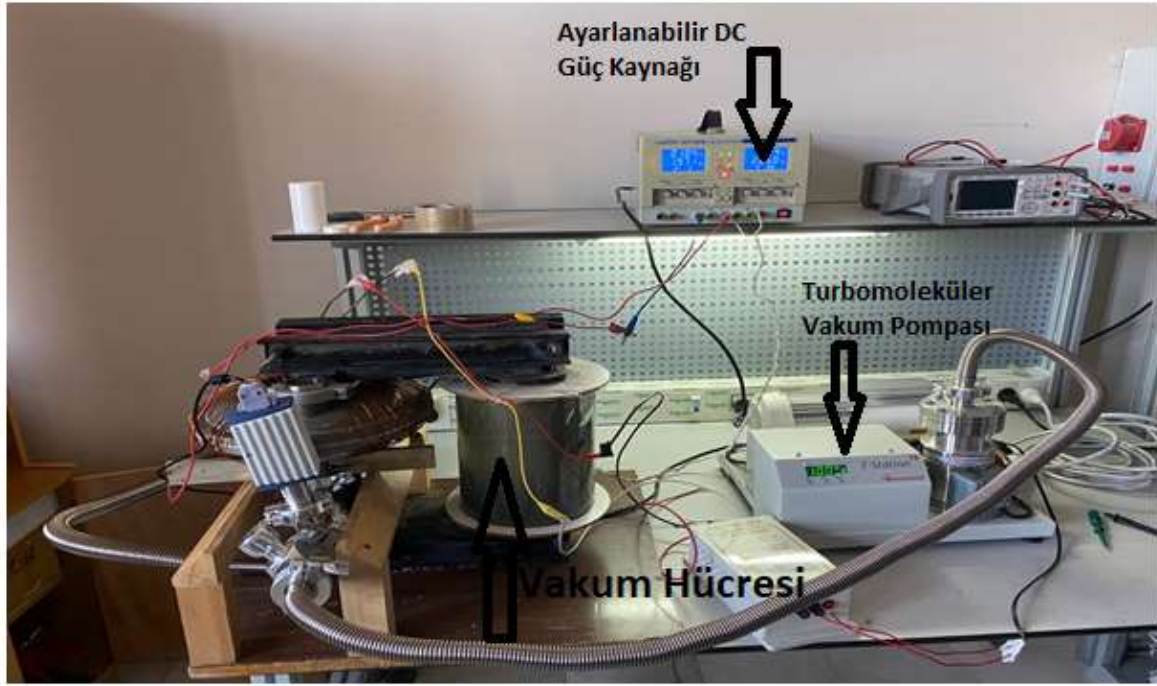
Şekil 4.18. Açısal güç yoğunluğu ölçümleri kutupsal çizimi

Şekil 4.18’de yatayda açısal olarak güç yoğunluğu ölçümleri alınmış olup en yüksek değer $\theta=0$ noktasında elde edilmiştir.

Çizelge 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5’te yer alan sonuçlar incelendiğinde elektrik alan da güç yoğunluğu değerleri de en yüksek anten noktasında elde edilmiştir.

4.6.2. Toroidal plazma cihazı ölçüm sonuçları

DC plazma cihazının kurulumu ve güç kaynakları Şekil 4.19’da gösterilmektedir. Plazma cihazı, torus şeklinde parlak paslanmaz çelik görünümü ile sol taraftadır. Cihazın ön kısmında basınç ölçümleri için Inficon vakum ölçer bulunmaktadır. Torus kısmının içindeki plazmanın kontrolü için poloidal ve toroidal sargılar da görülmektedir. En üstte toroidal ve poloidal sargılar için düşük voltajlı bir DC güç kaynağı bulunur. Vakum pompasının yanında, esas olarak plazmayı çalıştıran DC yüksek voltaj kaynağı bulunur. Ek olarak, sağ tarafta basınç düşürme ve ayarlama için bir vakum pompası bulunur. Plazma hücresinin hemen arkasında he gaz tüpü bulunmakta ve ikinci bir pompa hattının bir vakum valfi yoluyla kaba gazı içermektedir. Deney ünitesi, temel olarak bir vakum kabı, vakum pompası, düşük ve yüksek voltajlı güç kaynakları içerir.



Şekil 4.19. Plazma cihazının deneysel seti



Şekil 4.20. Plazma sistemi çalışırken ekranlamasız yapılan ölçüm

Şekil 4.20’de plazma sistemi çalışırken herhangi bir ekranlama malzemesi kullanılmadan yapılan ölçüm resmi verilmektedir.

Bu çalışmada, elektromanyetik alan ekranlama çalışmaları için farklı özelliklerde 60x60x40 cm boyutlarında üç çeşit kafes örneği kullanılmaktadır. Sistem çalıştırılmadan önce herhangi bir kaynaktan elektromanyetik alan yayılımı olmaması gerekir. Bu koşul sağlandıktan sonra ilk olarak plazma cihazı tarafından etrafa yayılan elektromanyetik alanın tespit edilebilmesi amacıyla herhangi bir kafes olmadan çalıştırılır. Sonra plazmadan eşit uzaklıkta ön, yan ve üst yüzeyler için sineklik, petek ve kare olmak üzere 3 çeşit kafes ile ölçümle yapılır. Ekranlama malzemesi olarak kullanılan sineklik Şekil 4.21’de görüldüğü üzere paslanmaz çelikten oluşur ve 0,1 cm genişliğe sahiptir.



Şekil 4.21. Sineklik tipi ekranlama malzemesi

Şekil 4.22’de gösterilen petek adı verilen kafes tipi ise çelikten ve 1 cm genişliğinde tel örgü yapısındadır.



Şekil 4.22. Petek tipi ekranlama malzemesi

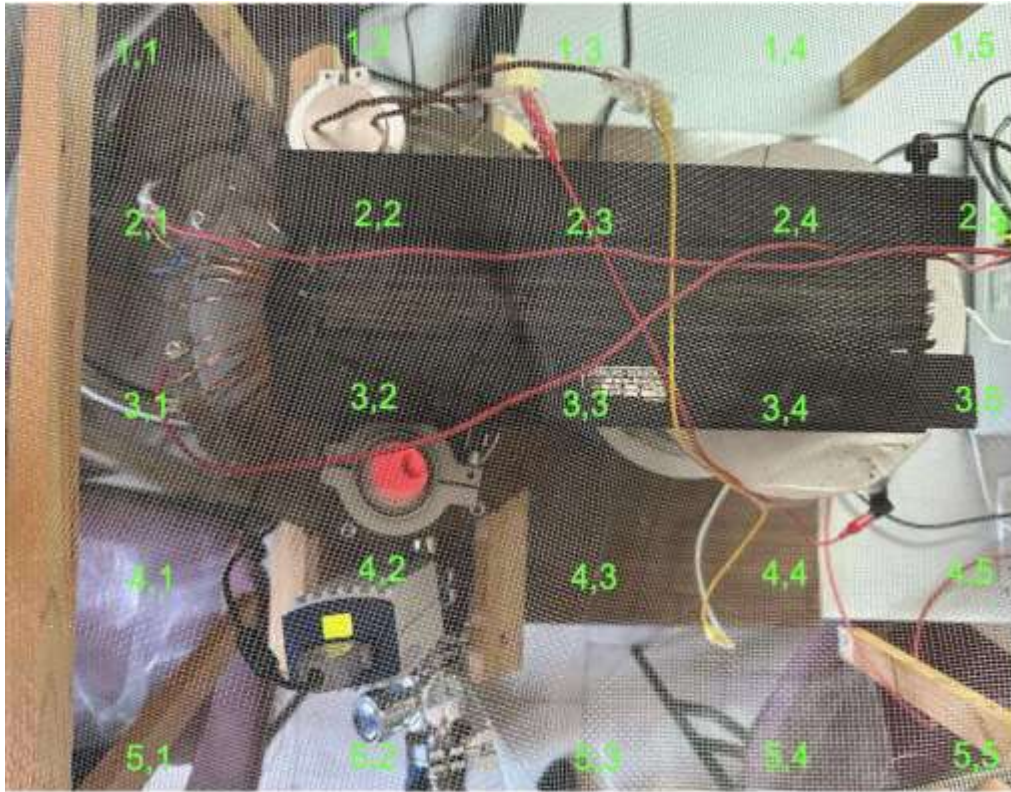
Şekil 4.23.'de gösterilen kare ekranlama malzemesi ise çelikten ve kare açıklığı 0,5 cm genişliğindedir.



Şekil 4.23. Kare tipi ekranlama malzemesi

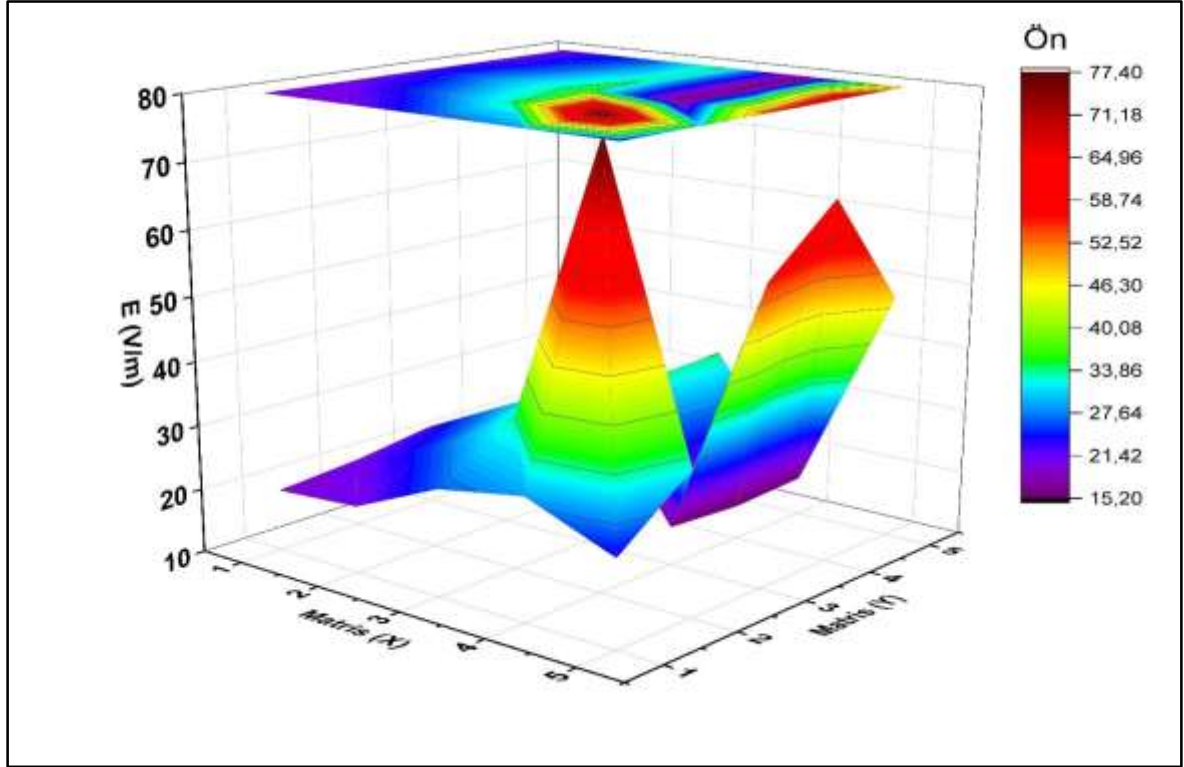
4.7. Deneysel Sonuçlar

Ekranlama malzemesi olarak kullanılan çelik, kare, sineklik ve petek olmak üzere kullanılan 3 tip kafes ile ekranlama bölgesinin ön, yan ve üst yönünden 10'ar cm aralıklı olmak üzere 25'şer noktada ölçümler alınır. Şekil 4.24.'de sineklik tipi ekranlama malzemesi ile üstten yapılan elektromanyetik alan ölçümleri temsili olarak gösterilmektedir.

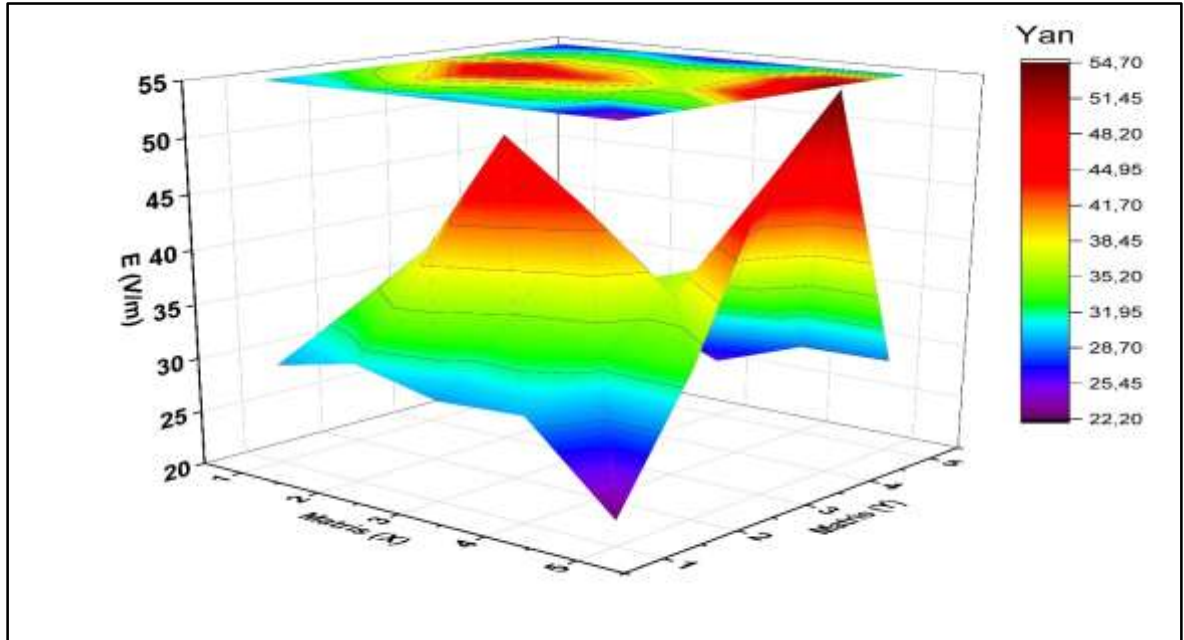


Şekil 4.24. Plazmada üstten alınan ölçüm noktaları

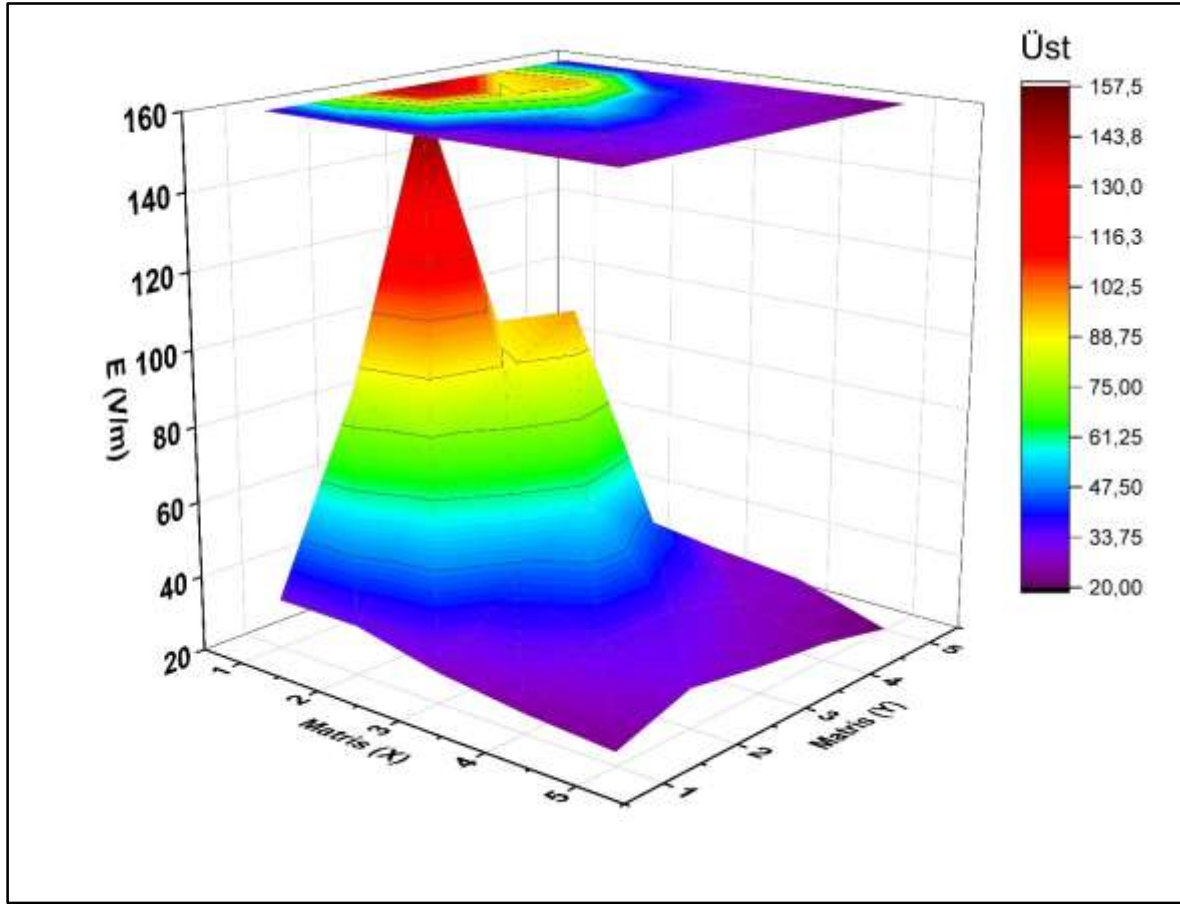
Şekil 4.25 ve Şekil 4.36 arasında yer alan önden yandan ve üstten olmak üzere yüzey çizimleri ile elektrik alan ölçüm sonuçlarının 3 boyutlu çizimleri gösterilmektedir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre, kafese olan uzaklık arttıkça tüm bölgeler için elektrik alan değerlerinin azaldığı kanıtlanmıştır.



Şekil 4.25. Plazma sistemi çalışırken ekranlamasız önden ölçümler



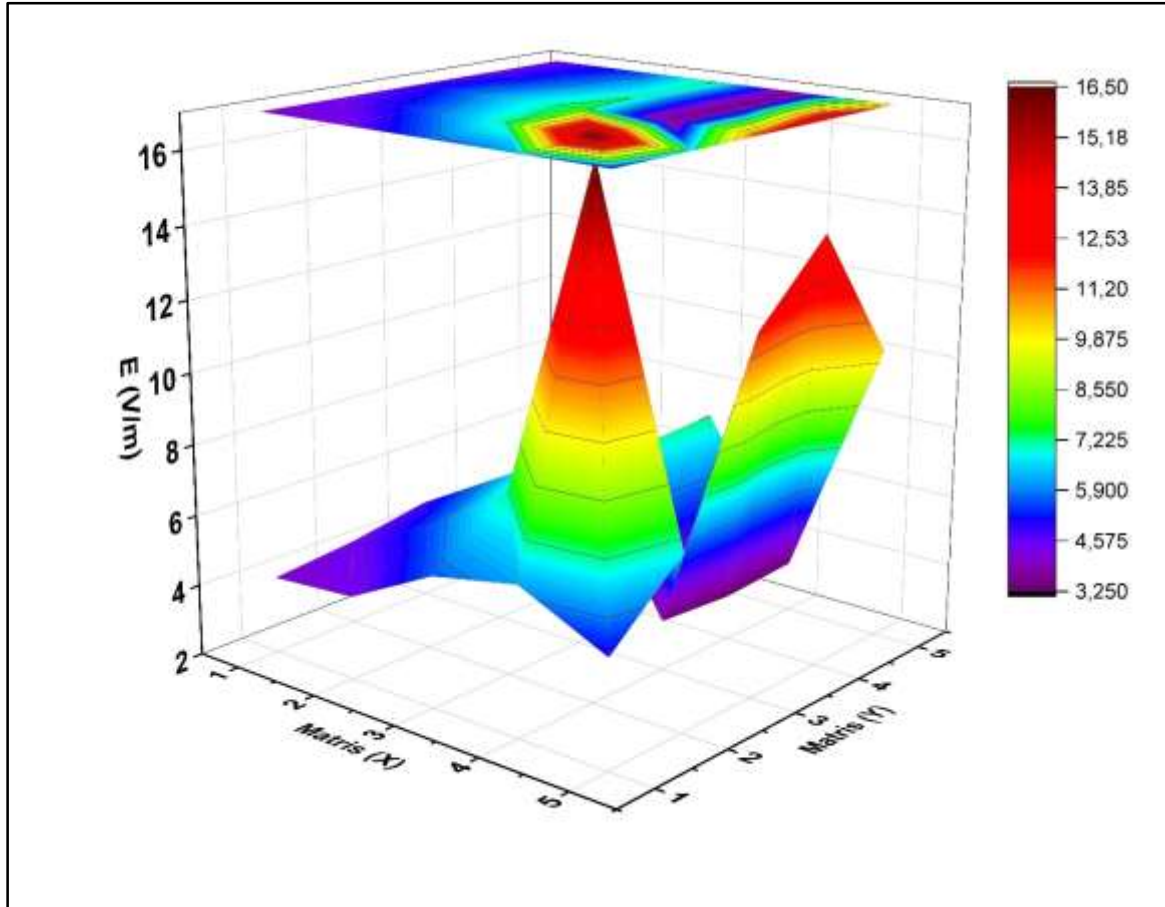
Şekil 4.26. Plazma sistemi çalışırken ekranlamasız yandan ölçümler



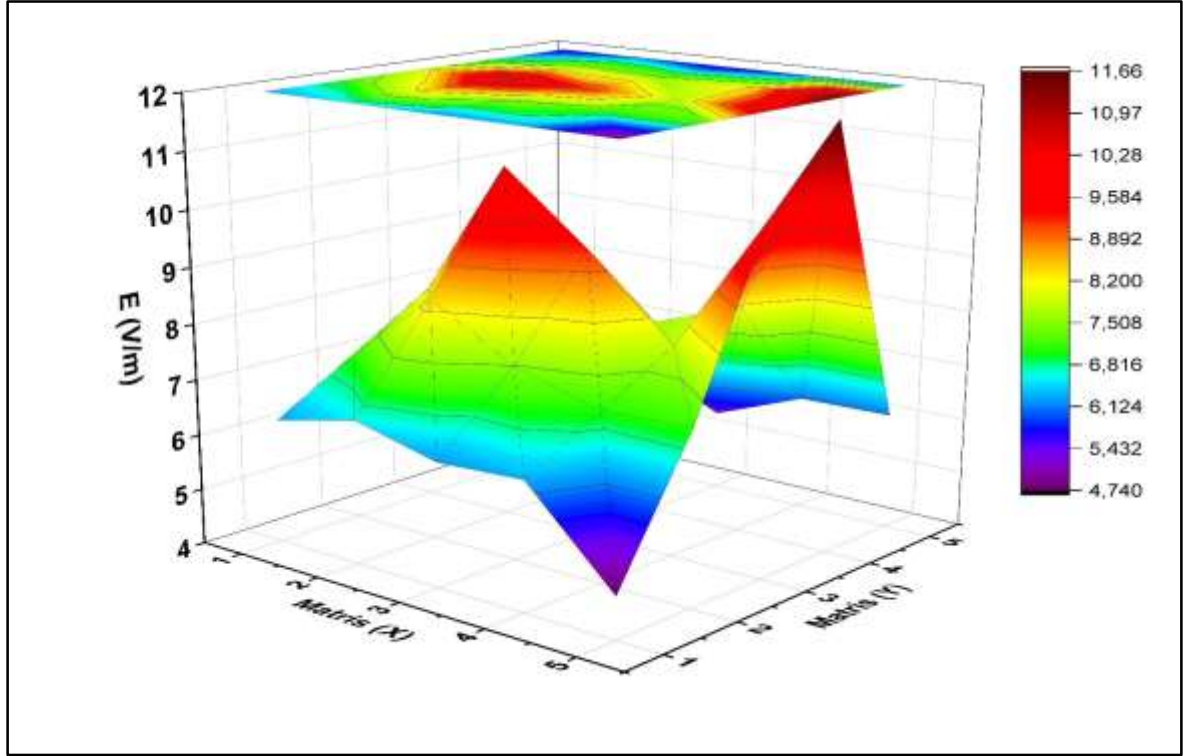
Şekil 4.27. Plazma sistemi çalışırken ekranlamasız üstten ölçümler

Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de, herhangi bir ekranlama yapılmadan plazma cihazı çalışırken ön, yan ve üstten ölçülen elektrik alan değerleri yer almaktadır. En yüksek elektrik alan değeri en üstte $E=157,5$ V/m, minimum değer ise ön tarafta $E =15.92$ V/m elde edilmiştir. Maksimum elektrik alan değeri torus şeklindeki plazma cihazının olduğu kısımda olup toroidal akım sargılarının olduğu kısma doğru kademeli olarak azalmaktadır. Özellikle Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 elektromıknatısın çekirdeğinden yayılan kaçak akı sistemin ön tarafında $E=25$ V/m değerinde ışımaya neden olmaktadır. Yan taraftan bakıldığında sargıların bulunduğu yerde elektrik alanın yatay bileşeni 23 V/m'dir. Boru kısmında paslanmaz çelik elektrik alanın yayılmasını kısmen engellediği için daha düşük değerler elde edilmektedir. Üst taraftan ölçüm alındığında boru kısmında yaklaşık 38 V/m elektrik alan değeri var iken çekirdek ve sargılar tarafında 67 V/m değerine ulaşmaktadır. Ayrıca sistemin çekirdek kısmı boru kısmından ziyade üst tarafa daha yakın olduğu için daha düşük elektrik alan değerine sahip olması mantıklıdır.

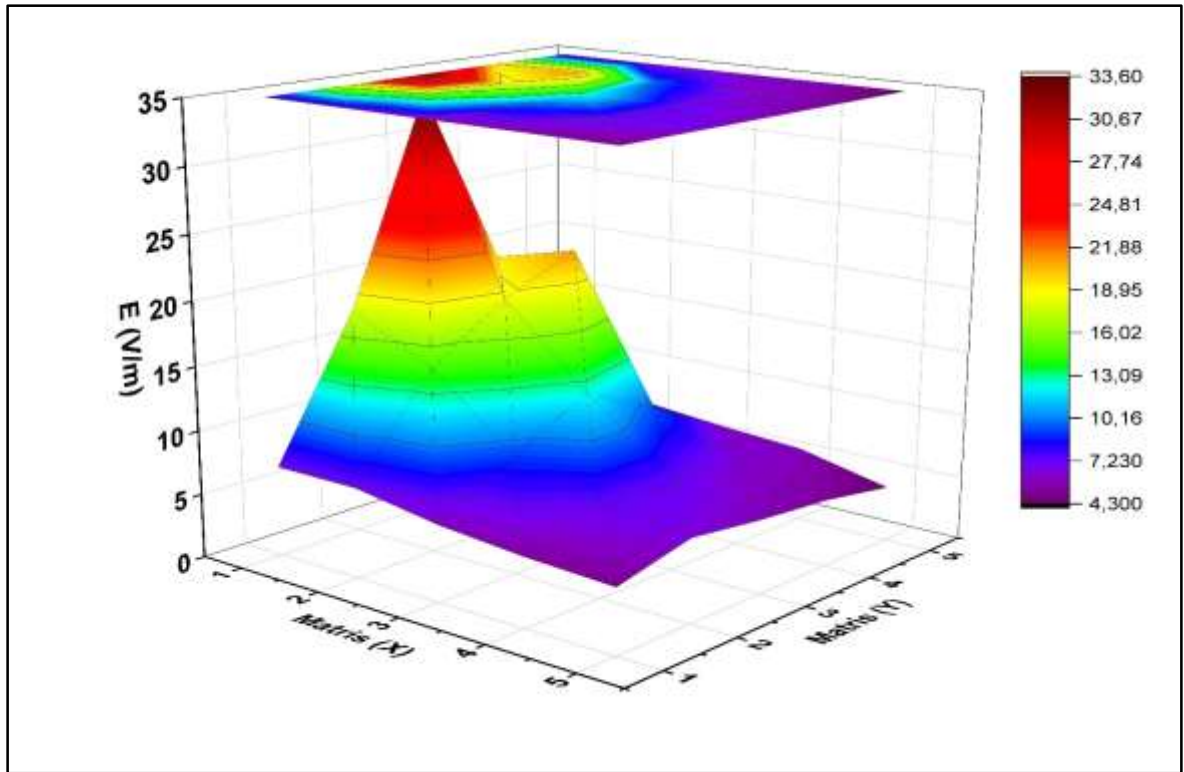
Şekil 4.28., Şekil 4.29. ve Şekil 4.30 plazma sistemi çalışırken petek tipi ekranlama malzemesi kullanılarak yapılan elektrik alan ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu şekilde yapılan ölçümlerde en yüksek elektrik alan üstten $E=33,6$ V/m, en düşük ise $E=3,2$ V/m önden elde edilmiştir. Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 kıyaslandığında çekirdek, sargılar ve boru kısmında maksimum değerler örtüşmektedir. Şekil 4.22'deki değer ile Şekil 4.25.'teki değer kıyaslandığı zaman elde edilen en yüksek değer ekranlama yapılmayan hale göre yaklaşık yarısı gibi bir elektrik alan yayılımı elde edilmektedir.



Şekil 4.28. Plazma sistemi çalışırken petek tipi ekranlamalı önden ölçümler

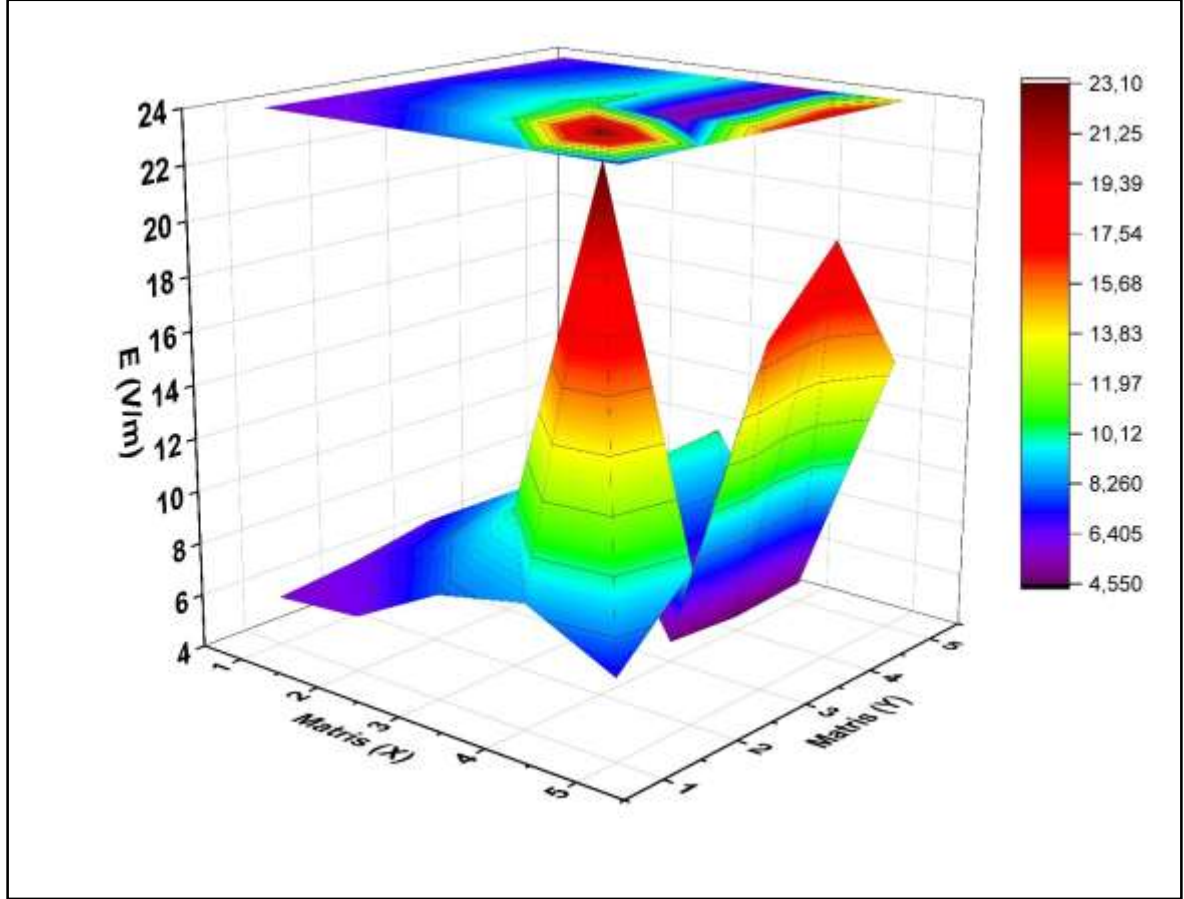


Şekil 4.29. Plazma sistemi çalışırken petek tipi ekranlamalı yandan ölçümler

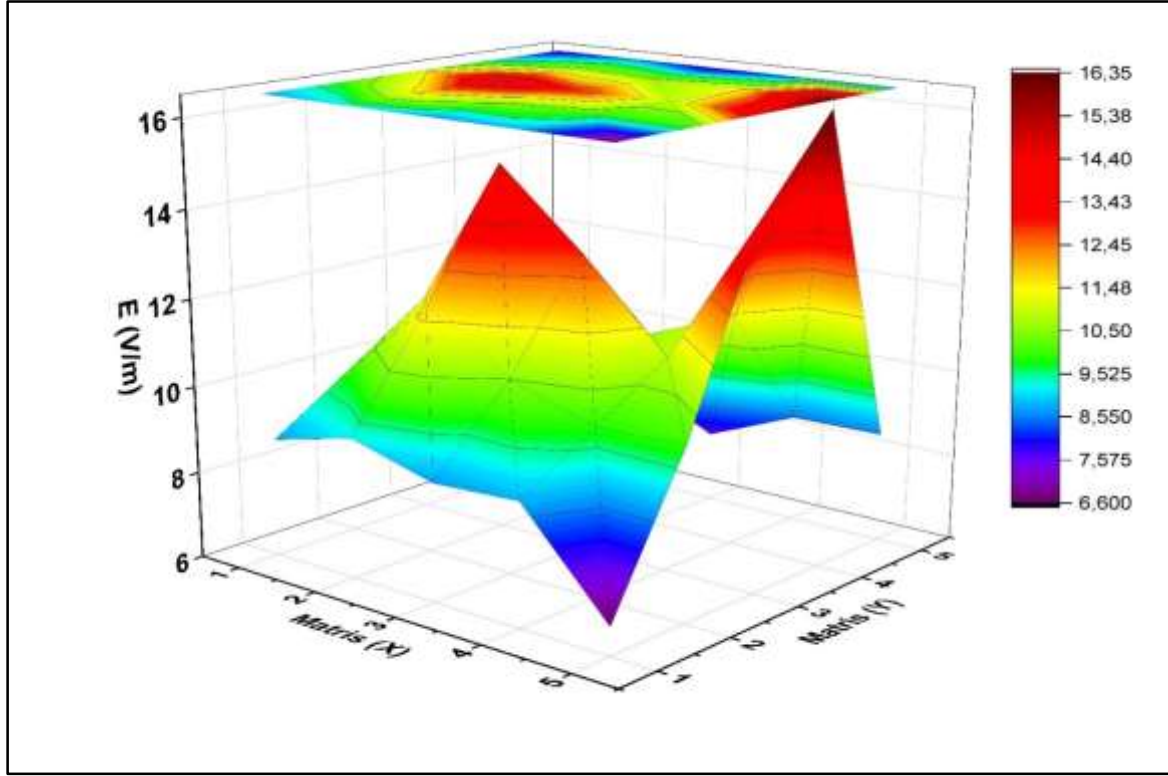


Şekil 4.30. Plazma sistemi çalışırken petek tipi ekranlamalı üstten ölçümler

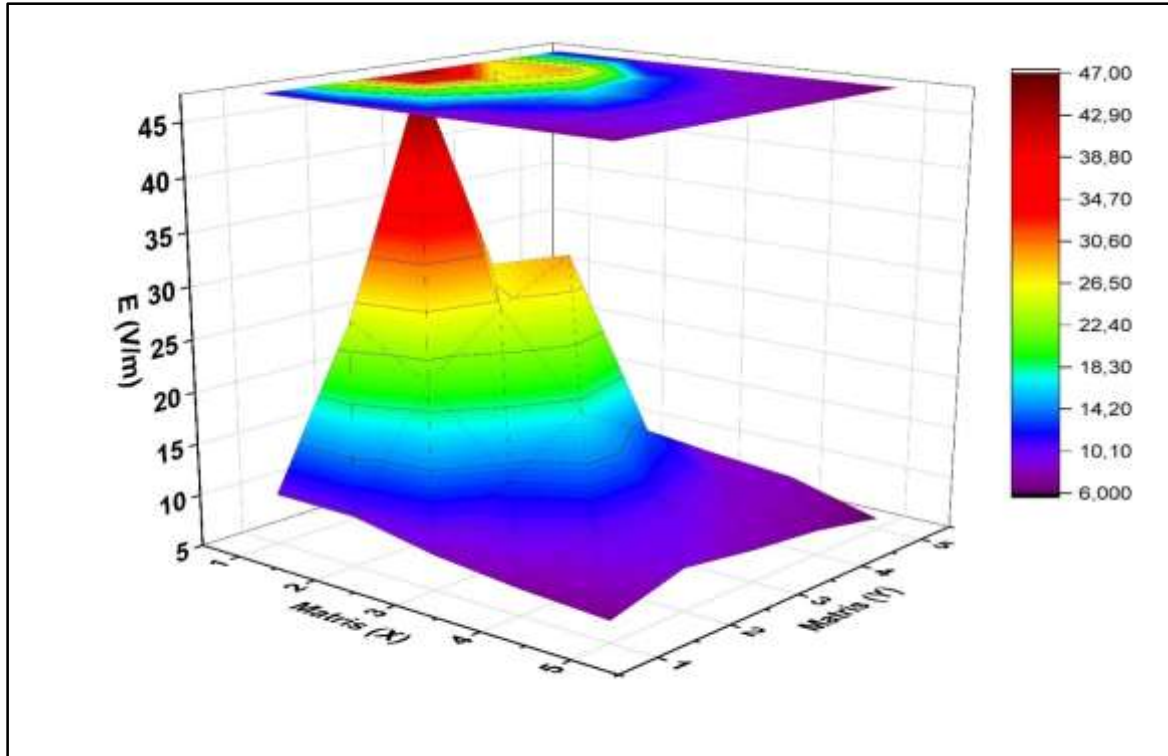
Şekil 4.31., Şekil 4.32. ve Şekil 4.33. plazma sistemi çalışırken kare tipi ekranlama malzemesi kullanılarak yapılan elektrik alan ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu şekilde yapılan ölçümlerde en yüksek elektrik alan üstten $E=47$ V/m, en düşük ise $E=4.55$ V/m önden elde edilmiştir. Maksimum elektrik alan değerleri daha önce yapılan ölçüm değerleriyle nitelik olarak çekirdek ve sargı kısmında örtüşmektedir.



Şekil 4.31. Plazma sistemi çalışırken kare tipi ekranlamalı önden ölçümler

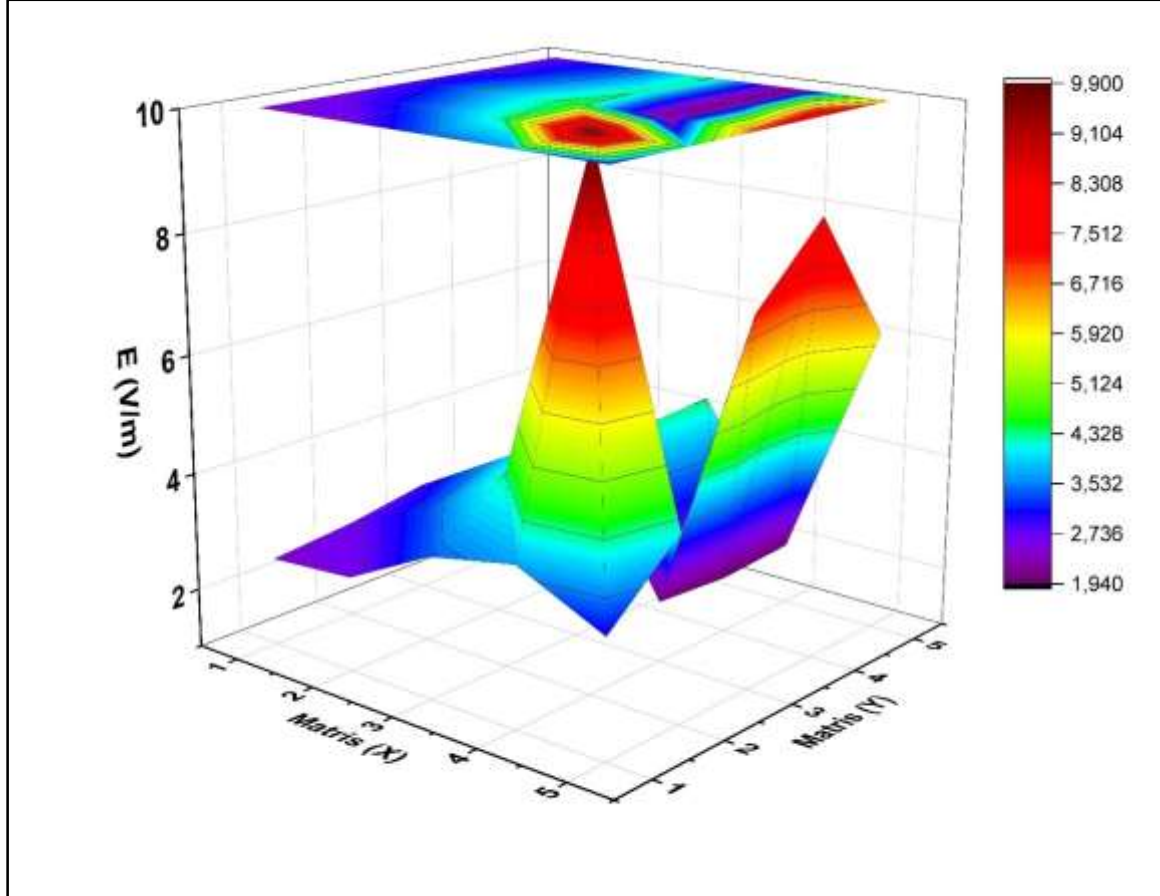


Şekil 4.32. Plazma sistemi çalışırken kare tipi ekranlamalı yandan ölçümler

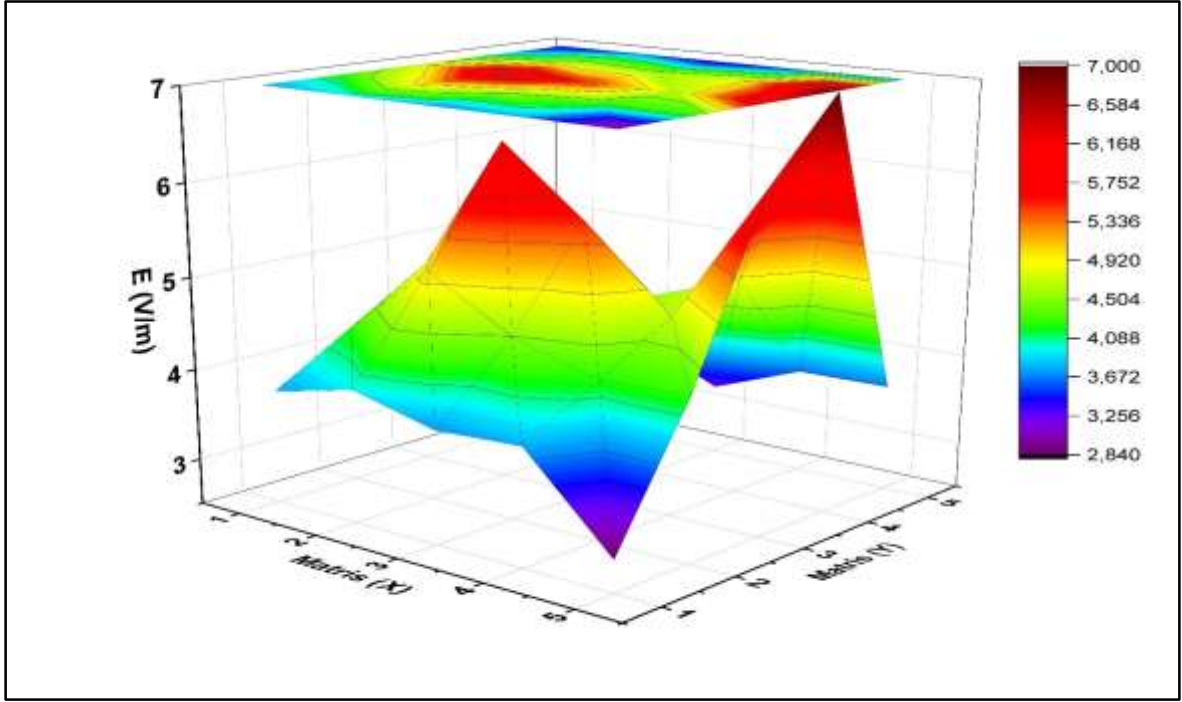


Şekil 4.33. Plazma sistemi çalışırken kare tipi ekranlamalı üstten ölçümler

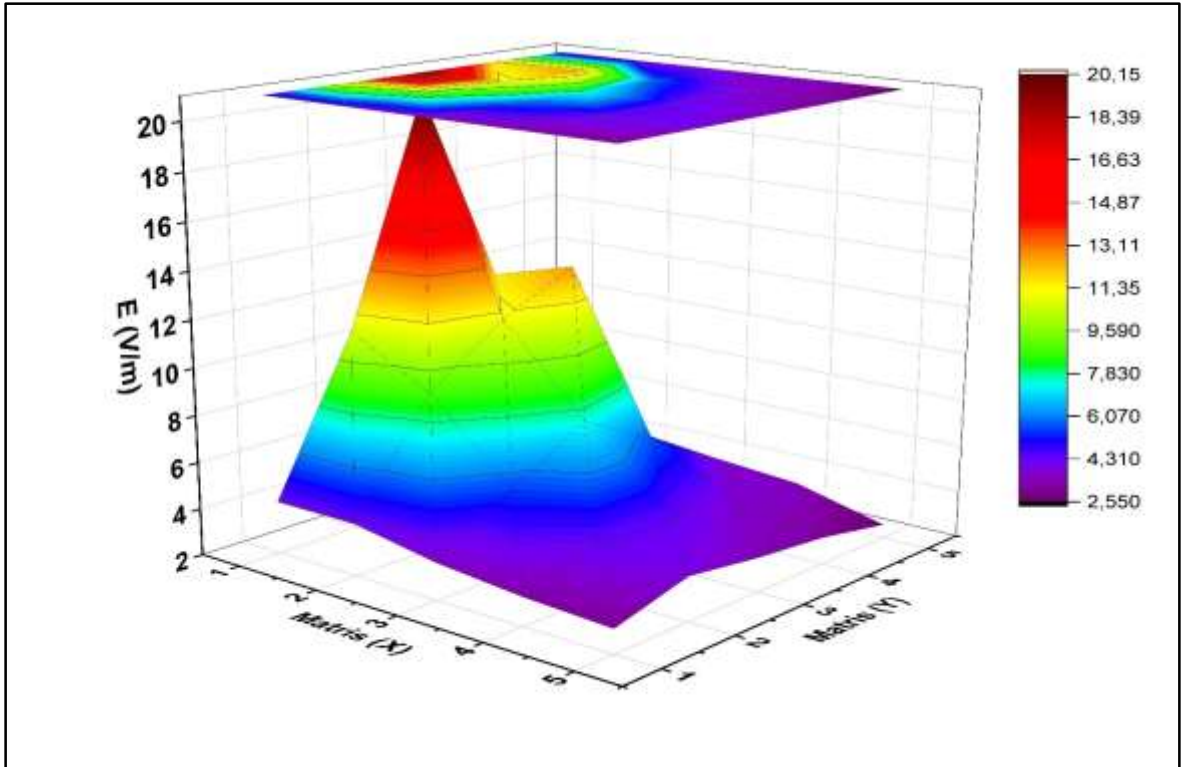
Şekil 4.34., Şekil 4.35. ve Şekil 4.36 plazma sistemi çalışırken sineklik tipi ekranlama malzemesi kullanılarak yapılan elektrik alan ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Plazma sisteminin ön tarafından yapılan ölçümlerde Şekil 4.34.'te görüldüğü üzere maksimum $E=9,9$ V/m, minimum ise $E=1,94$ V/m elde edilmiştir. Bu şekilde yapılan ölçümlerde en yüksek elektrik alan üstten $E=20,15$ V/m, en düşük ise $E=1,94$ V/m önden elde edilmiştir.



Şekil 4.34. Plazma sistemi çalışırken sineklik tipi ekranlamalı önden ölçümler



Şekil 4.35. Plazma sistemi çalışırken sineklik tipi ekranlamalı yandan ölçümler

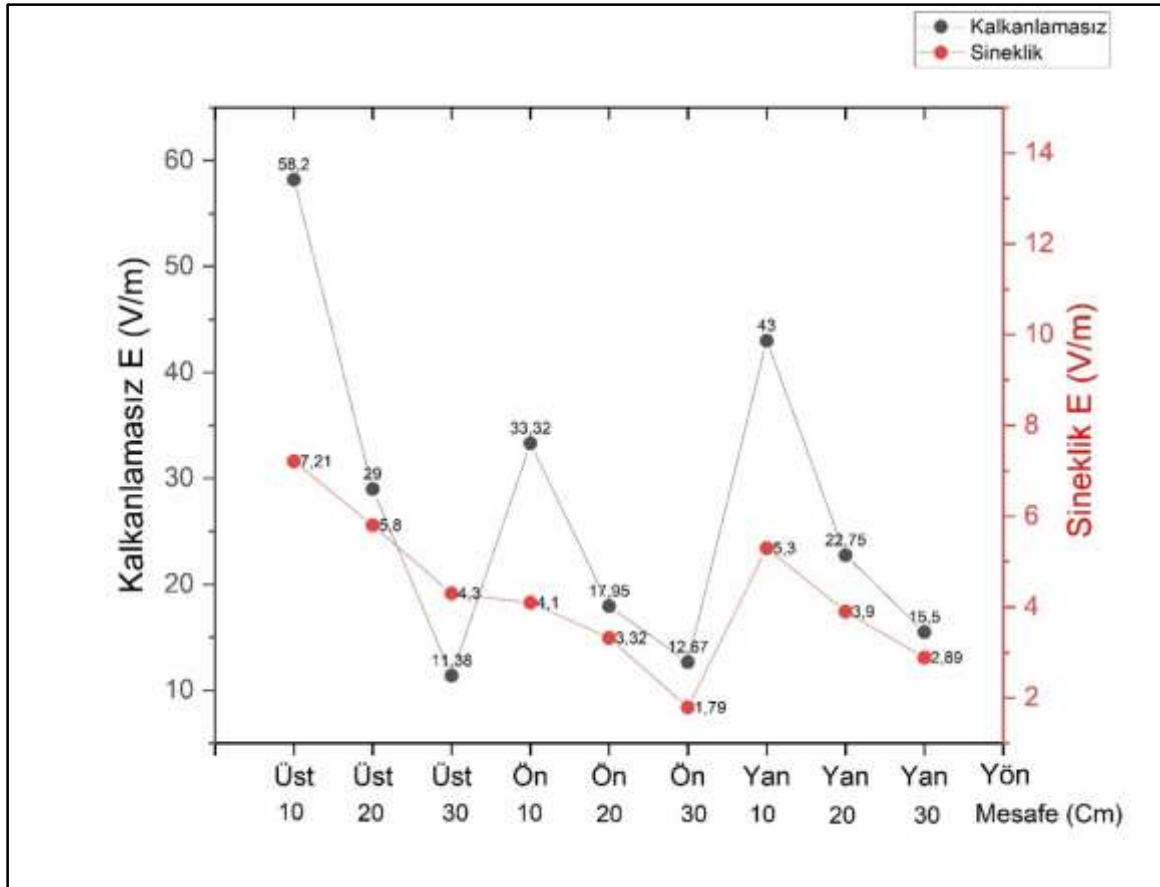


Şekil 4.36. Plazma sistemi çalışırken sineklik tipi ekranlamalı üstten ölçümler

Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36’de açıkça görüldüğü üzere en yüksek elektrik alan değeri üstten, sonra yandan, en düşük ise önden yapılan ölçümlerde elde edilmektedir. Yapılan tüm

elektrik alan ölçümleri dikkate alındığında yapılan ekranlama çeşitleri ile önemli ölçüde düşüş görülmektedir. Yapılan ekranlama modelleri incelendiğinde sineklik tipi ekranlama modelinin kare ve petek tipi ekranlamaya göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

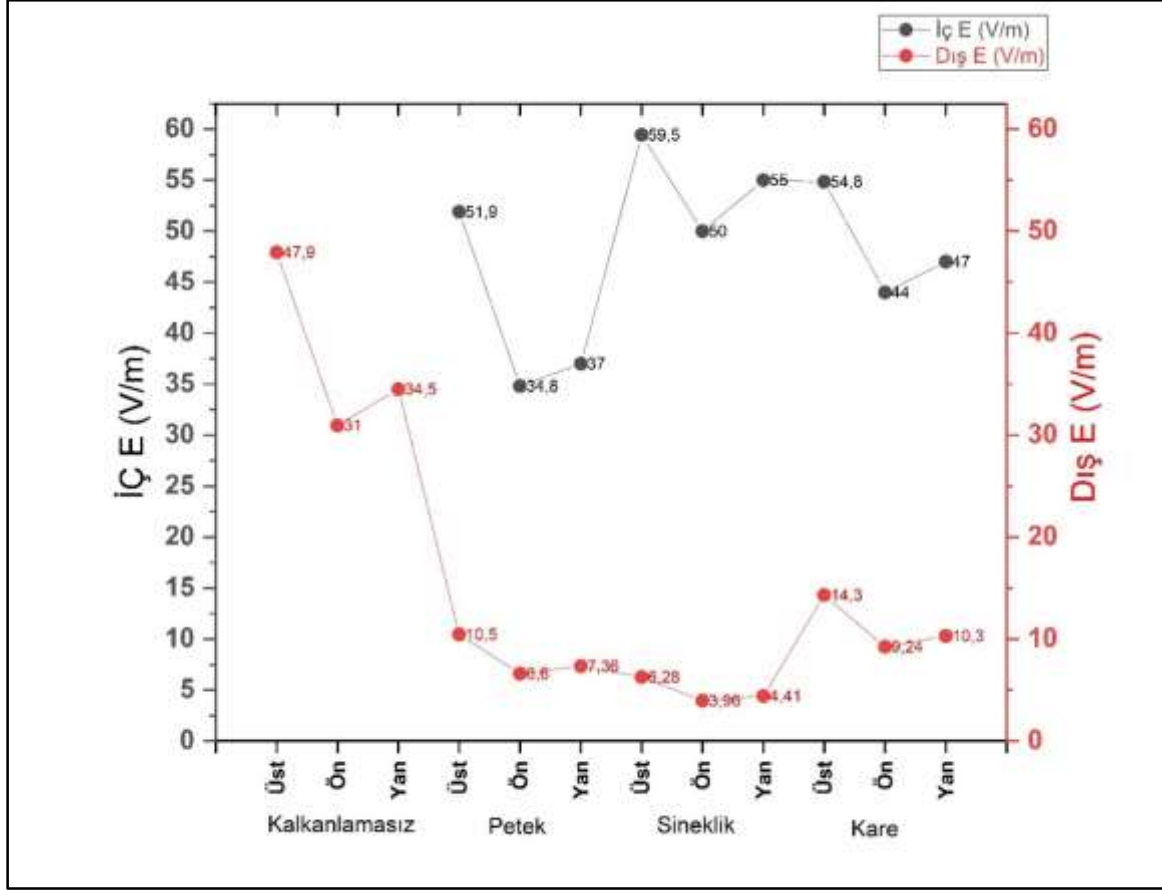
Şekil 4.37’de, plazma sistemi çalışırken ekrandan 0-30 cm uzaklıklarla hiçbir ekranlama yapılmamış ve sinekli tipi ekranlama ile yapılan elektrik alan ölçüm değerleri karşılaştırması verilmektedir. Kare, petek ve sineklik tipi yapılan ekranlamalarda alınan elektrik alan değerlerine göre en iyi ekranlama değerleri şekil olarak sineklikte elde edildiği için Şekil 4.37’de sineklik tipi ekranlama modeli kullanılmıştır.



Şekil 4.37. Plazma sistemi çalışırken uzaklığa göre elektrik alan değerleri

Şekil 4.37.’de yer alan sineklik tipi ve ekransız olmak üzere her iki durumda da elektrik alan değerinin mesafe ile azaldığı açıkça görülmektedir. En yüksek elektrik alan değerleri üstten 10 cm mesafe ile ölçülürken, en düşük elektrik alan önden 30 cm mesafede elde edilmektedir. Yapılan bu karşılaştırma elektromanyetik alandan korunmak için ekranlamanın olumlu etkisini açıkça kanıtlamaktadır.

Ekranlama etkisini belirlemek için, Şekil 4.38.'de görüldüğü üzere ekranlamanın iç kısmı da incelenmiştir.

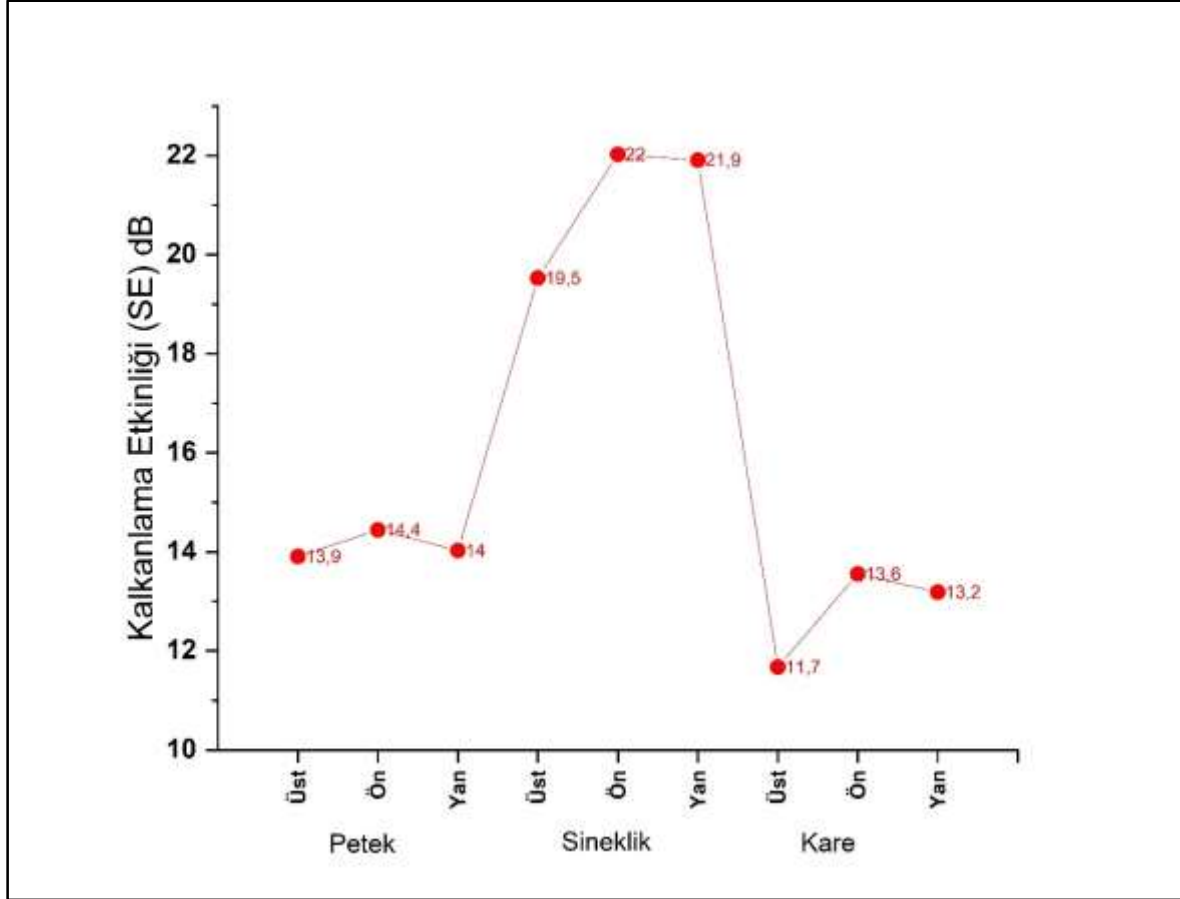


Şekil 4.38. İç ve dış elektromanyetik alan değerleri

Şekil 4.38.'de verilen iç ve dış elektromanyetik alan değerlerinde dış kısım için ortalama elektrik alan değerleri alınmıştır. Şekil 4.38.'de de görüldüğü üzere dış elektrik alan değeri en yüksek üstte ortalama $E = 47,9$ V/m olarak elde edilmiştir. Sisteme ekranlama uygulandıktan sonra ise dış kısımda elektrik alan doğrusal olarak azalmaktadır. Sineklik tipi ekranlamada en düşük değer ön kısımda $E = 3,96$ V/m'dir. Dış kısımda elektrik alan uygulanan bütün ekranlama modelleri için benzer eğilimi göstermektedir. Yapılan ölçümlerde en yüksek elektrik alan değeri üstte, en düşük elektrik alan değeri ise ön kısımda elde edilmektedir. Şekil 4.38.'de de görüldüğü üzere iç kısımda yapılan elektrik alan ölçümlerinde sineklik tipi ekranlamada üstte $E = 59,5$ V/m elde edilmiştir.

Şekil 4.39.'da plazma sistemi çalışırken uygulanan petek, kare ve sineklik tipi ekranlama modelleri için ön yan ve üst kısımda hesaplanan ekranlama etkinlik değerini özetlemektedir.

En yüksek ekranlama etkinlik değeri, farklı yönlerde sineklik tipi ekranlama modeli tarafından sağlanır. Sineklik için 20 dB'nin üzerinde bir ekranlama etkinlik değeri sağlanmıştır. Buna karşılık, petek ve kare tipi ekranlama modelleri için sırasıyla maksimum 14,4 dB ve 13,6 dB değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.39. Plazma sisteminin farklı yöntemlerde ekranlama etkinliği.

Plazma sistemi çalışırken geliştirilen bütün ekranlama modelleri kullanıldığında, sineklik tipi ekranlamanın geometrisi, meydana gelen elektrik alanın dalga boyunun daha uygun olması nedeniyle sineklik tipi ekranlama diğerlerine kıyasla daha verimli sonuçlar vermektedir.

Kullanılan tüm malzemeler dikkate alındığında sineklik geometrisi, üretilen alanın dalga boyundan dolayı uygun olup, diğer ekranlama çeşitlerine göre daha başarılı bulunmuştur. Aynı zamanda meydana gelen elektrik alan dalga boyunun bir cihazdan diğerine değişebilmektedir. Bu nedenle farklı cihazlar için en uygun ekranlama tipi üzerinde ayrı ayrı çalışılmaması gerektiği bu çalışma ile açık bir şekilde ifade edilmektedir. Ayrıca ekranlama

malzemesinin geometrisi dışında iletkenliği de son derece önemlidir. Özetle iletkenlik katsayısındaki artış ekranlama etkinliğinin performansını arttırır. Ancak burada en önemli nokta kullanılan ekranlama malzemesi ile dalga boyunun uyumudur. Sineklik tipi iletken malzemede yüzeydeki ardışık mesafe petek ve kare tipi malzemenin geometrisine göre daha azdır. Bu husus en iyi ekranlama malzemesinin sineklik tipi olmasının en önemli sebebidir.

Sonuç olarak, ekranlama etkinliği 90 dB ile 120 dB arasında olan bir malzemenin mükemmel ekranlama performansına sahip olduğu kabul edilmektedir. 100 dB'den büyük herhangi bir hesaplanmış ekranlama değeri malzemenin delinemez olduğunu gösterir. 10 dB'den düşük ekranlama etkinlik değeri zayıf ekranlama etkisi verirken, 10 dB- 30 dB ekranlama için kabul edilebilir seviyededir. Bu çalışmada sineklik tipi ekranlamada elde edilen 20 dB 'in üzerinde bir ekranlama etkinliğine elde edilmiştir. Böylece plazma sistemi tarafından meydana gelen elektromanyetik alan değerinin çevreye yayılımı yapılan ekranlama sayesinde önemli ölçüde zayıflamıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesiyle herhangi bir elektronik cihazın veya sistemin üretimi ya da kullanımı esnasında cihazın performansını da büyük ölçüde etkileyen en büyük zorluklardan biri elektromanyetik girişimdir. Bu durumda istenmeyen girişimlerin önlenmesi adına söz konusu cihazın elektromanyetik uyumluluk şartlarını yerine getirerek yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Literatüre göre istenmeyen elektromanyetik girişimlerin engellenerek elektromanyetik uyumluluğun sağlanabilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de ekranlama metodu ile mevcut elektromanyetik girişim azaltılmaktadır.

Bu tez kapsamında yeni tasarlanan ve kurulumu gerçekleştirilen bir DC deşarj plazma cihazlarının elektromanyetik alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek frekansta yapılan ölçümlerde hassasiyetin sağlanması için her bir yönden 25 farklı noktadan elektrik alan ölçümleri yapılmıştır. Sonra söz konusu plazma cihazına birbirinden farklı geometrilere sahip ekranlama malzemeleri uygulanmış olup her birinin ayrı ayrı ekranlama etkinlikleri hesaplanmıştır. Plazma cihazında yapılan uygulamalar karşılaştırıldığında en iyi ekranlama etkinliği sineklik tipi malzemede elde edilmiştir. Kare ve petek tipi diğer ekranlama malzemeleri ile kıyaslandığında sineklik tipi ekranlama malzemesinde hesaplanan SE değeri 20 dB üzerinde olup diğerlerine göre daha iyi performans sergilediği açıkça görülmektedir. DC deşarj plazmada toroidal elektrik alan sargılarını besleyen çekirdeğin bulunduğu üst kısımda en yüksek elektrik alan bulunmaktadır. Ayrıca boru kısmında yüksek elektrik alan bulunmaktadır. He gazı plazmasının çalışma voltajı, kaptaki dolu gaz basıncına bağlı olarak $U = 500 \text{ V}$ ile $U = 10 \text{ kV}$ arasında olduğundan, meydana gelen radyasyonun dalga boyu değişebilir. Ancak sineklik tipi ekranlama malzemesi ile oluşan elektrik alan değeri düşmektedir. Ayrıca korumasız model ile kalkanlama uygulanmış model kıyaslandığında büyük ölçüde elektrik alan değerinde azalma söz konusudur. Ayrıca yüksek frekansta plazma sisteminde gerçekleştirilen elektrik alan ölçümleri sonucunda ekranlama malzeme çeşidinin yanı sıra söz konusu malzemenin geometrisinin elektromanyetik ekranlama konusunda önemli bir parametre olduğunu gösterilmiştir.

Literatürde daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde ilk defa bu çalışmada yüksek frekansta petek, kare ve sineklik tipi 3 farklı ekranlama malzemesi kullanılarak ayrı ayrı

elektrik alan ölçümü yapılmış ve ekranlama etkinliği değeri bu 3 model için hesaplanmıştır. Ayrıca bu ölçümler tek tek ekransız baz model ile kıyaslanmıştır. Ekranlama etkinliği değerlerine göre en iyi *SE* değeri sineklik tipi malzemede elde edilen model belirlenmiş olup literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışma bu yönüyle gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutmaktadır. Bundan sonra bu konuda yapılacak çalışmalarda farklı ekranlama teknikleri ve malzemeleri kullanılarak elde edilen ekranlama etkinlikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Morgan, D. (2007). *A handbook for EMC testing and measurement*. (First Edition). Milton Keynes: IET, 1-14.
2. Balanis, C. A. (2012). *Advanced Engineering Electromagnetics*. (Second Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 2-20.
3. Chung, D.D.L. (2001). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, 39(2), 279-285.
4. Shim, J., Kim, H. T. (2004). An asymptotic solution of EM backscattering from a conducting sphere coated with a composite material. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(4), 1465-1472.
5. Geetha, S., Kumar, S. K. K., Chepuri, R. K. R., Vijayan M. and Trivedi D. C. (2008). EMI Shielding: Methods and Materials- A Review. *Journal of applied polymer science*, 112(4), 2073- 2086.
6. Başıyigit, İ. B. (2011). *Elektromanyetik ekran verimliliğinin teorik ve deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
7. Abilash, M. A. (2019). *Electromagnetic interference shielding effectiveness of hybrid polymer nanocomposites*. Master of Thesis , University of Calgary, Kanada.
8. Mathur, P., Raman, S.. (2020). Electromagnetic interference (EMI): Measurement and reduction techniques. *Journal of Electronic Materials*, 49(5), 2975-2998.
9. Derman, K (2006). *Şebeke frekanslı magnetik alan ekranlaması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
10. Arı, N., Özen, Ş. (2008). *Elektromanyetik Alanlar*. Ankara: Palme Yayıncılık, 51-53.
11. Cheng, D. K. (1989). *Field and Wave Electromagnetics*. (Second Edition). NY: Addison Wesley Publishing Company, 18-218.
12. Gonschorek, K. H., Vick, R. (2009). *Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration*. (First Edition). Berlin: Springer, 7-41.
13. Joffe, E. B., Lock, K. S. (2010). *Grounds for Grounding A Circuit to System Handbook*. (First Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 8-982.
14. Ott. H. W. (2011). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. (First Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 587-686.
15. Williams, T, Armstrong, K. (2000). *EMC for Systems and Installations*. (First Edition). Woburn: Reed Educational & Professional Publishing, 1-273.

16. Ilgar, T. M., Bulut, M., Saka, B. (2015). *Shielding effectiveness for metallic enclosures with various aperture shapes*. Presented at 1st URSI Atlantic Radio Science Conference, Gran Canaria, 1-4.
17. ICNIRP. (1998). Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4), 494-522.
18. Raveendran, A., Sebastian, M.T., Raman, S. (2019), *Electron Mater.* (First Edition). NY: Springer, 48-368.
19. Ivanus, K., Baric, A. (2014). *Application of TEM cell in measurement of electromagnetic fields of electronic modules*. Presented at 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 110–114.
20. Paul, C. R. (2006). *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. (Second Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 713-750.
21. Yang, S., Lozano, K., Lomeli, A., Foltz, H. D., Jones. R. (2005). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites. *Composites*, 36(5), 681-699.
22. Kolyer J. M. (1998). *Environmentally resistant, conductive adhesive bonds for radio frequency (RF) shielding*, Presented at 43rd International Sampe Symposium and Exhibition, California, 740-810.
23. Weston, D. A. (2001). *Electromagnetic compatibility principles and applications*. (Second Edition). New York: Marcel Dekker, 273-355.
24. Montrose, M. I., Nakauchi, E. M. (2004). *Testing for EMC Compliance Approaches and Techniques*. (First Edition). New Jersey: IEEE Press, 1-46.
25. Kayan, M. (2018). *An Optimization Study on Cavity Magnetron*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
26. Tong, X. C. (2009). *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*. (First Edition). Boca Raton: CRC Press, 34-66.
27. Morari, C., Balan, I. (2015). Methods for determining shielding effectiveness of materials. *Electrotehnica Electronica Automatica*, 63(2), 126-136.
28. Robinson, M. P., Benson, T. M., Christopoulos, C., Dawson, J. F., Ganley, M. D., Martin, A. C., Porter, S. J. and Thomas, D. W. P. (1998). Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 40(2), 241-249.
29. Zhou, J., Ghosh, K., Xiang, S., Yan, X., Hosseinbeig, A., Lee, J. and Pommerenke, L. (2018). Characterization of ESD risk for wearable devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(2), 265-290.

30. Bahadorzadeh, M., Moghaddasi, M.N. (2008). Improving the shielding effectiveness of a rectangular metallic enclosure with aperture by using extra shielding wall. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 1(3), 44-51.
31. Donald, R. J. W., Mardiguian, M. (1989). A handbook series on electromagnetic interference and compatibility, electromagnetic shielding. *Interference Control Technologies*, 3(2), 1-43.
32. Mainali, K. and Oruganti, R. (2010). Conducted EMI mitigation techniques for switch-mode power converters: A survey. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(9), 2344-2356.
33. Boonruang, S., Tarateeraseth, V. (2018). *Optimal damping circuits of Pi-filters for EMI filter designs*. Presented at 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Chiang Rai, 756–759.
34. Akiyama, T., Sasaki, M., Shinagawa, M., Tanaka, K., Sato, K. and Asahi, T. (2016). *Shielding effectiveness of multi-layered Cu and PET thin films from electromagnetic interference*. Presented at IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Taiwan, 1-6.
35. Güler, S., Yenikaya, S., Şimşek, M. (2019). *EMC design for Battery Electric Vehicle (BEV) propulsion system*. Presented at 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa: 286-289.
36. Hao, C., Li, D. (2014). Simplified model of shielding effectiveness of a cavity with apertures on different sides. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(2), 335-342.
37. Sebastian, M. T., Uvic, R., Jantunen, H. (2017). *Microwave Materials and Applications*. (First edition). New York: Wiley, 56-98.
38. Lee, K. W., Cheong, Y. C., Hong, I. P. and Yook, J. G. (2005), Design Equation of Shielding Effectiveness of Honeycomb. *Proceedings of the ISAP*, 4(5), 19-22.
39. Matsushima, S., Matsushima, T., Hisakado, T. and Wada, O. (2018). Trends of EMC standards for automotive network devices and communication quality of ethernet in relation to parameters of pulse disturbances. *IEEE Electromagnetic Compatibility*, 3(5), 8-49.
40. Gaier, J. R. (1992). Intercalated graphite fiber composite as EM shields in aerospace structures, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 4(7), 351-356.
41. Battacharya, S.K. (1986), *Metal-filled Polymers*. (Second Edition). New York: Marcei-Dekker, 164-225.
42. Henn, A.R., Cribb, R. M. (1992). Modelling the shielding effectiveness of metallized fabrics. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 282-287.

43. Miyazaki, M., Tanoue, K., (1990). Electromagnetic absorption of lossy composite layers. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 3(8), 369-375.
44. Angeli, M., Cardeli, E. (1997). Numerical analysis of diffracting perforated shields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 3(4), 250-257.
45. Planus, M.A. (1978), *Applied Electromagnetics*.(Second Edition). UK: McGraw-Hill Inc., 35-213.
46. Bossavit, A. (1988). Whitney Forms: a class of finite elements for three- dimensional computations in electromagnetism. *IEEE Proceedings*, 135(3), 492-499.
47. Trenkler, Y., McBride, L.E., (1990). *Shielding Improvement by Multi-layer Design*. Presented at IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Washington, 1-4.
48. Wallin, S.R. (1985). *Dielectric Properties of Heterogeneous Media*, Phd. Thesis, Wyoming University, ABD.
49. Balanis, C. A. (1997). *Antenna Theory Analysis and Design*. (Second edition). New York: John Wiley & Sons, 26-48.
50. Kodali, V. P. (1996). *Engineering Electromagnetic Compatibility*. (First edition). New Jersey: IEEE Press, 201-238.
51. Dursun, B., Kurt, E. (2016). Many-body solution to the D2 gas filled inertial electrostatic confinement device. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2), 12546-12554.
52. Kurt, E., Arslan, S., Güven, M. E. (2011). Effects of grid structures and dielectric materials of the holder in an inertial Electrostatic confinement (IEC) fusion device. *Journal of Fusion Energy*, 30(2), 404-412.
53. Kurt, E., Kurt, H., Bayhan, Ü. (2009). Ionization effects and linear stability in a coaxial plasma device. *Central European Journal of Physics*, 7(1), 123– 129.
54. Akgun, Y., Bolukdemir, A. S., Alacakir, A. (2013). Preliminary results of experimental studies from low pressure inertial electrostatic confinement device. *Journal of Fusion Energy*, 32(3), 565–565.
55. Ohnishi, M., Osawa, H., Yoshikawa, K., Masuda, K. and Yamamoto, Y. (2001). Particle-in-Cell simulation of inertial electrostatic confinement fusion plasma. *Fusion Technology*, 39(3), 1211–1216.
56. Kurt, E. (2011). A stationary multi-component cathode modeling and ion trajectories for an inertial electrostatic confinement fusion device. *International Journal of Energy Research*, 35(3), 89–95.
57. Buzarbaruah, N., Dutta, N.J., Bhardwaz J.K. and Mohanty, SR. (2015). Design of a linear neutron source. *Fusion Engineering and Design*, 90(3), 97-104.

58. Noborio, K., Sakai, T., Yamamoto, Y. (2003). Investigation of spatial distribution of neutron production rate and its dependency on pressure in spherical IECF by one-dimensional simulations. *Symposium on Fusion Engineering*, 20(4), 328-331.
59. Kurt, E., Arslan, S. (2012). An inertial electrostatic confinement (IEC) device modeling and the effects of different cathode structures to the fields. *Energy Conversion and Management*, 6(7), 55-62.
60. Wong S.K, Krall N.A.(1992). Potential well formation by injection of electrons with various energy distributions into a sphere or a slab. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*, 41(4), 40-52
61. Elmore, W. C., Tuck, J.L., Watson, K. M. (1959). On the inertial-electrostatic confinement of a plasma. *The Physics of Fluids*, 2(5), 239–246.
62. Hirsch, R. L. (1967), Inertial-electrostatic confinement of ionized fusion gases. *Journal of Applied Physics*, 38(7), 4522–4534.
63. Swanson, D. A., Cherrington, B.E., Verdeyen, J.T. (1973). Potential well formation in an inertial electrostatic plasma confinement device. *The Physics of Fluids*, 16(5), 1939-1945.
64. Nevins, W. M. (1995). Can inertial electrostatic confinement work beyond the ion-ion collisional time scale?. *Physics of Plasmas*, 2(3), 3804-3819.
65. Egle, B., Santarius, J.F., Kulcinski, G.L. (2007). Comparison of spherical and cylindrical cathode geometries in inertial electrostatic confinement devices. *Fusion Science and Technology*, 52(4), 1110-1113.
66. Tomiyasu, K., Yokoyama, K., Yamauchi, K., Watanabe, M., Okino, A., Hotta, E. (2009). Effects of cusp magnetic field in a cylindrical radially convergent beam fusion device. *Fusion Science and Technology*, 56(4), 967-971.
67. Radel, R.,F., Kulcinski, G.,L., Ashley R.P, Santarius J.F, Emmert G.A and Piefer G.R. (2007). Detection of highly enriched uranium using a pulsed D-D source. *Fusion Science and Technology*, 52(4), 1087-1091.
68. Miley, G., H., Murali, S., K. (2014). *Inertial Electrostatic Confinement (IEC) fusion: fundamentals and applications*. (First Edition). New York: Springer,18-356.
69. Dursun, B., Kurt, E. (2014). Electromagnetic design and simulation of a new fusion device. *Elektron Elektrotech*, 20(8), 34-38.
70. Dolan, T.J., Verdeyen, J.T., Meeker, D.J., Cherrington, B.E. (1972). Electrostatic inertial plasma confinement. *Journal of Applied Physics*, 43(3), 1590-1600.
71. Dursun B. , Kurt E. , Tekerek M.(2019). A power circuit design for the poloidal field coils in a torus shaped plasma system. *Journal of Energy Systems*, 3(3), 123-128.

72. Kurt, E., Yıldız, Y. (2022). Design and implementation of a X Band 9 GHz cavity magnetron for microwave applications. *Measurement*, 202(3), 45-54.
73. Kısa, Y. (2021). *Yeni Bir Magnetron Tasarımı ve Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Ankara.
74. İsenlik, T., Yeğin, K. (2013). Tutorial on the design of hole-slot-type cavity magnetron using CST Particle Studio, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(2), 296-304.
75. Dursun, B., Kurt, E. (2022). *Simulation of DC Capacitive Discharge Plasma*. ECRES Sempozyumunda sunuldu, İstanbul. 759-763.
76. Bizon, N., Lopez-Guede, J. M., Kurt, E., Thounthong, P., Mazare, A. G., Ionescu, L. M. and Iana, G. (2019). Hydrogen economy of the fuel cell hybrid power system optimized by air flow control to mitigate the effect of the uncertainty about available renewable power and load dynamics. *Energy Conversion and Management*, 179(3), 152-165
77. Srilatha, B., Sinha, A. K. (2009). *Design of Pulsed Power System for Fusion Reactor*. Presented at International Conference on Power Systems, Kharagpur, 1-6.
78. Goudarzi, S., Dadgarnejad, F., Babaei, H. (2015). Explanation of capacitive performance of the plasma in Damavand Tokamak. *Open Journal of Applied Sciences*, 5(4), 33-39.



Gazili olmak ayrıcalıktır