



**JENERATÖRLERİN YAYGIN OLARAK KULLANILDIĞI BİR
İŞLETMEDE İYONİZE OLMAYAN RADYASYON ÖLÇÜMLERİNİN
YAPILMASI VE KORUNMA YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Mehmet 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.

Mehmet SARIKAHYA

08/06/2023

JENERATÖRLERİN YAYGIN OLARAK KULLANILDIĞI BİR İŞLETMEDE
İYONİZE OLMAYAN RADYASYON ÖLÇÜMLERİNİN YAPILMASI VE
KORUNMA YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ
(Doktora Tezi)

Mehmet SARIKAHYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Günümüz teknolojilerinde kullanılan elektronikteki gelişmeler sonucunda ortaya çıkan elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik girişim (EMG) sorununu gündeme getirmiştir. Elektromanyetik girişimin kontrol edilmesi amacıyla iletken veya manyetik malzemelerden yapılmış bariyerlerle radyasyonunu bloke etmek için kullanılan EMG kalkanlama yöntemleri büyük önem kazanmıştır. Bu kapsamda bu tez çalışmasında yeni tasarlanmış ve üretilmiş bir eksenel/radyal akılı sabit mıknatıslı senkron jeneratörün elektromanyetik girişim (EMG) sorunları üzerine öneriler sunulmuştur. Eksenel/radyal akılı sabit mıknatıslı senkron jeneratörler daha düşük vuruş torku, ürettikleri faz gerilimleri doğrudan sinüzoidal olmaları ve yüksek mekanik tork üretebilme kabiliyetleri nedeniyle günümüz uygulamalarında yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Tez kapsamında ilk olarak EMG ölçümleri jeneratörün farklı mesafeleri ve yönleri için boş durumda gerçekleştirilmiştir. Ölçümler incelenmiş ve frekans etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca ölçülen değerlerin yüksek değerler olduğu ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasında ikinci olarak, farklı materyallerden yapılmış üç çeşit kalkanlama malzemesi için mesafe, yön ve frekans bazında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kalkanlama yöntemlerinin her biri incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Son olarak üç kalkanlama yöntemi için kalkanlama etkinliği (SE) değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar değerlendirilerek en iyi yöntem önerilmiştir. Optimum kalkanlama sonuçları için kalkanlama malzemesi şeklinin çok önemli olduğu sonucu ortaya konulmuştur.

Bilim Kodu : 90516

Anahtar Kelimeler : Kalkanlama, elektromanyetik girişim, eksenel akılı jeneratör, malzeme şekli

Sayfa Adedi : 83

Danışman : Prof. Dr. Erol KURT

MAKING OF NON IONIZING RADIATION MEASUREMENTS AND
DEVELOPMENT
OF PREVENTION METHODS IN A WIDELY GENERATORS USED WORKPLACE
(Ph. D. Thesis)

Mehmet SARIKAHYA

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

Electromagnetic radiation emerging as a result of developments in electronics used in today's technologies has brought the problem of electromagnetic interference (EMI) to the agenda. In order to control electromagnetic interference, EMI shielding methods used to block its radiation with barriers made of conductive or magnetic materials have gained great importance. In this context, suggestions on EMI problems of a newly designed and manufactured axial/radial flux permanent magnet synchronous generator are presented in this thesis. Axial/radial flux permanent magnet synchronous generators are used intensively in today's applications due to their low cogging torque, generation of ideal sinusoidal voltage and high mechanical torque. Within the scope of the thesis, EMI measurements were first carried out for different distances and directions of the generator. The measurements were analyzed and the frequency effects were evaluated. In addition, it has been revealed that the measured values are high values. In this thesis, secondly, measurements were made on the basis of distance, direction and frequency for three types of shielding materials made from different materials. Each of the shielding methods was examined and the results were evaluated. Finally, shielding efficiency (SE) values were calculated for three shielding methods in this thesis. The results were evaluated and the best method was suggested. It has been concluded that the shape of the shielding material is very important for optimum shielding results.

Science Code : 90516

Key Words : Shielding, electromagnetic interference; axial flux generator; material shape

Page Number : 83

Supervisor : Prof. Dr. Erol KURT

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen ve çalışmalarımda tıkanıdığım tüm noktalarda yönlendirmeleriyle ufkumu açan, değerli bilgi ve birikimleriyle akademik gelişimime katkı sağlayan, danışman hocam Prof. Dr. Erol KURT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması boyunca desteklerini esirgemeyen ve tezin geliştirilmesine yönelik olumlu katkılarda bulunan tez izleme komitemde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Mustafa Necmi İLHAN'a ve Prof. Dr. Adnan SÖZEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen babam Muvaffak SARIKAHYA ve annem Güler SARIKAHYA başta olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkür ederim. Doktora sürecinin yoğun ve tempolu çalışma süresince sabır ve anlayış gösteren ve her zaman yanımda olan sevgili eşim Nihan Merve SARIKAHYA'ya, hayatımıza tat katan 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. ELEKTROMANYETİK ALANLAR VE TEMEL KAVRAMLAR.....	5
2.1. Elektriksel Alan.....	5
2.1.1. Elektrik alan.....	5
2.1.2. Manyetik alan	6
2.1.3. Elektromanyetik alan.....	7
2.2. Elektromanyetik Spektrum	8
2.3. Elektromanyetik Girişim	10
2.4. Elektromanyetik Uyumluluk.....	14
2.5. Bölüm Değerlendirmesi	16
3. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA	19
3.1. Elektromanyetik Kalkanlamanın Önemi	19
3.2. Elektromanyetik Kalkanlamada Kullanılan Malzemeler	20
3.2.1. Metalik malzemeler	20
3.2.2. Kompozit malzemeler	22
3.2.3 Diğer malzemeler	24
3.3. Matematiksel Olarak Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliği.....	25

	Sayfa
3.3.1. Matematiksel denklemler	25
3.3.2. Uzak ve yakın alanlar için elektromanyetik alan	26
3.3.3. Kalkanlama etkinliği hesaplaması	27
3.4. Kalkanlama Etkinliğine Etki Eden Faktörler	31
3.5. EMG Kalkanlama Ölçüm Yöntemleri	34
3.6. EMG Kalkanlama Ölçüm Standartları.....	36
3.7. Literatür Taraması	37
3.8. Bölüm Değerlendirmesi	38
4. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON JENERATÖRLER.....	41
4.1. Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratörler	43
4.2. Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratörler	44
4.3. Ölçümü Yapılan Senkron Jeneratörün Özellikleri.....	46
4.4. Bölüm Değerlendirmesi	52
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	55
5.1. Kullanılan Malzemeler	55
5.2. Yöntem	58
6. BULGULAR	61
6.1. Jeneratör Ön Yüz Ölçümler	61
6.2. Jeneratör Sağ Yüz Ölçümler	63
6.3. Jeneratör Arka Yüz Ölçümler	65
6.4. Jeneratör Sol Yüz Ölçümler	67
6.5. Jeneratör Üst Yüz Ölçümler.....	69
6.6. Mesafeye Göre Ölçümler.....	71
6.7. Jeneratör Dış ve İç Elektromanyetik Alan Ölçümleri	72
6.8. Jeneratör Kalkanlama Etkinliği	73

	Sayfa
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Bazı malzemelerin elektriksel ve manyetik özellikleri.....	21
Çizelge 3.2. Çelik için geçirgenlik ve frekans ilişkisi	22
Çizelge 3.3. Kaplama değerleri.....	24
Çizelge 3.4. Kompozitlerde kalkanlama etkinliği.....	24
Çizelge 3.5. Bazı malzemelerin elektromanyetik değerleri	29
Çizelge 3.6. Deri kalınlıklarının frekansla değişim değerleri	30
Çizelge 4.1. Jeneratörün teknik özellikleri	51
Çizelge 4.2. Üç fazlı Jeneratörün anma değerleri	52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Pozitif yükte başlayıp negatif yükte sonlanan elektrik alan çizgileri	6
Şekil 2.2. Manyetik kuvvet yönünün sağ el kuralıyla gösterimi.....	7
Şekil 2.3. Elektromanyetik alanın yapısı	8
Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrumda dalga şekilleri	9
Şekil 2.5. EMG bileşenleri.....	11
Şekil 2.6. EMG filtreleme şeması	11
Şekil 2.7. Örnek bir EMG filtre devresi.....	12
Şekil 2.8. EMG kalkanlama örneği.....	13
Şekil 2.9. EMU'nun genel sınıflandırması	15
Şekil 2.10. EMU uyumlanmış elektronik sistem geliştirmede temel adımlar	16
Şekil 3.1. Ferrit malzemeler.....	23
Şekil 3.2. Elektromanyetik dalganın gösterimi.....	25
Şekil 3.3. Elektromanyetik alanları kaynaktan mesafeye göre gösterimi.....	27
Şekil 3.4. Elektromanyetik kalkanlama mekanizması	28
Şekil 3.5. Elektrik alan, düzlem dalga ve manyetik alan kalkanlama etkinliği	31
Şekil 3.6. Kalkanlama etkinliğinin frekansla değişimi	32
Şekil 3.7. Kalkan geometrisinin gösterimi.....	33
Şekil 3.8. Eşeksenli hat yönteminin şematik olarak gösterimi	35
Şekil 4.1. SMSJ'nin kesit yapısı	42
Şekil 4.2. Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörlerin sınıflandırması.....	42
Şekil 4.3. Radyal akı yüzeye monteli versiyonu.....	43
Şekil 4.4. Radyal akı gömülü versiyonu	43
Şekil 4.5. Geleneksel iç rotorlu radyal akı sürekli mıknatıslı jeneratör.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratör sınıflandırması.....	46
Şekil 4.7. Yeni tasarlanmış senkron jeneratör kesit yapısı	47
Şekil 4.8. M530-50A paslanmaz çelik için $B-H$ eğrisi	47
Şekil 4.9. Kullanılan bobin ve nüve yapısının sonlu elemanlar tasarımı.....	48
Şekil 4.10. Statorun iki taraftan görünüşü.	49
Şekil 4.11. Jeneratörün yandan ve genel görünüşü.....	50
Şekil 4.12. 1000 rpm'de fazların manyetik akıları	50
Şekil 4.13. Yüksüz durumda rotor hızı ve rms gerilim.....	51
Şekil 5.1. Ölçümleri gerçekleştirilen EASMSJ.....	55
Şekil 5.2. Sineklik kalkanlama malzemesi	56
Şekil 5.3. Petek kalkanlama malzemesi	57
Şekil 5.4. Kare kalkanlama malzemesi	57
Şekil 5.5. EASMSJ'nin frekans ve rotor hızı ilişkisi	58
Şekil 5.6. Ölçüm cihazı.....	59
Şekil 5.7. Örnek bir ölçüm.....	60
Şekil 6.1. Ön yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı	62
Şekil 6.2. Ön yüz iki boyutlu gösterim	63
Şekil 6.3. Sağ yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı	64
Şekil 6.4. Sağ yüz iki boyutlu gösterim	65
Şekil 6.5. Arka yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı	66
Şekil 6.6. Arka yüz iki boyutlu gösterim	67
Şekil 6.7. Sol yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı.....	68
Şekil 6.8. Sol yüz iki boyutlu gösterim.....	69
Şekil 6.9. Üst yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı	70

Şekil	Sayfa
Şekil 6.10. Üst yüz iki boyutlu gösterim	71
Şekil 6.11. 20 Hz için mesafeye bağlı elektrik alan değişimi	72
Şekil 6.12. 30 Hz için mesafeye bağlı elektrik alan değişimi	72
Şekil 6.13. Dış elektromanyetik alan ve kafes içi elektromanyetik alan	73
Şekil 6.14. Kalkanlama etkinliği sonuçları	74

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
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	Hız
V	Volt
W	Watt

Simgeler**Açıklamalar****Wb**

Weber

Z

Empedans

q

Yük miktarı

 μ

Mutlak manyetik geçirgenlik (permeability)

 ϵ

Mutlak elektriksel geçirgenlik (permittivity)

 λ

Dalga boyu

 π

Pi sayısı

 ω

Açısal frekans

 σ

Elektriksel iletkenlik

 Ω

Direnç birimi

 δ

Deri kalınlığı

Kısaltmalar**Açıklamalar****ASTM**

Amerikan Test ve Malzeme Derneği

EMG

Elektromanyetik girişim

EMU

Electromanyetik uyumluluk

EASMSJ

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler

FCC

Federal haberleşme komisyonu

FCC

Federal haberleşme komisyonu

IEEE

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü

RASMSJ

Radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler

SE

Kalkanlama etkinliği

SE_A

Soğurma kaybı

SE_R

Yansıma kaybı

SE_M

Çoklu yansımalar kaybı

SMSJ

Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler

1. GİRİŞ

Elektromanyetik uyumluluk (EMU), elektromanyetik enerjinin emisyonunun, üretiminin ve alımının araştırıldığı, elektrik mühendisliğinin hayati bir dalıdır. Elektromanyetik enerji, elektronik sistemlerin çalışmasını etkileyebileceği gibi sınırlı bir doz değerinin üzerinde canlı hücrelere de zarar verebilmektedir. Elektromanyetik alanların istenmeyen etkilerini önlemek ve elektronik sistemlerin sorunsuz çalışmasını sağlamak için kullanılan yöntemlerden biri de "kalkanlama" kavramıdır [1]. Günümüzde elektronik teknolojisinin hızla gelişmesi ve yüksek hızlı elektronik cihaz ve sistemlere olan bağımlılık, kablosuz sistemler, televizyon, navigasyon sistemleri, cep telefonları ve radar gibi elektronik ve telekomünikasyon cihazlarının performansının artmasına neden olmaktadır [2]. Elektronikteki gelişmeler sonucunda ortaya çıkan elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik girişim (EMG) sorununu gündeme getirmiştir. EMG kalkanlama, iletken veya manyetik malzemelerden yapılmış bariyerlerle iyonize olmyayan radyasyonunu bloke ederek elektromanyetik girişimin kontrol edilmesi olarak ifade edilmektedir [3]. Elektromanyetik radyasyonu belirli bir frekans aralığında emen veya yansıtan malzemeler geliştirilerek EMG problemlerini çözmeye yönelik yöntemler denenmiştir. Etkili bir EMG koruma malzemesi, genellikle metallerde bulunan hem yüksek elektrik iletkenliğine hem de yüksek dielektrik sabitine sahiptir. Bu nedenlerden dolayı, metalik levhalar ve ince folyolar, EMG kalkanları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [3,4].

Kalkanlama malzemeleri, Elektromanyetik dalgalarını geri yansıtarak veya malzeme içindeki radyasyon gücünü emerek ve dağıtarak yayılan sinyali bloke etme ve zayıflatma yeteneği sunmaktadır. Bu malzemeler elektronik cihazların kabuğunda veya elektromanyetik dalgaların girişinde gövde kabuğu olarak kullanılır ve elektromanyetik sızıntıyı önlemektedir. Bu malzemelerin kalkanlama özellikleri, kalkanlama etkinliği (SE) parametresi kullanılarak belirlenmektedir [5]. EMG' den korunma, özellikle elektrikli ekipmanlarda, havacılık, tıbbi ve askeri uygulamalar için talep edilmektedir. SE, desibel (DB) cinsinden ölçülmekte olup kalkanlama performansı belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

Kompakt yapıları, yüksek güç yoğunlukları ve doğal soğutma mekanizmaları nedeniyle eksenel akılı sürekli mıknatıs senkron jeneratörlerine (EASMSJ) yönelik çalışmalar yaklaşık

olarak 150 yıl öncesine dayanmaktadır [7]. NdFeB mıknatısların üretimi, 1980'lerden itibaren sürekli mıknatıs (PM) makinelerinin tasarım ve üretimini hızlandırmıştır. PM makineleri daha iyi güç yoğunluğuna ve tork değerine, daha ucuz yapıya ve daha yüksek moment değerlerine sahiptirler [8]. Ayrıca bu jeneratörlerin çıkışında ideal sinüzoidal dalga formu üretilebilmektedirler. EASMSJ' ler genellikle 10 Hz ile 100 Hz hızları arasında çalışabilmekte olup AC dalga formları üretebilmektedirler [9].

Bu tez çalışmasında, yeni tasarlanmış ve üretilmiş bir eksenel/radyal akılı sürekli mıknatıs jeneratörün EMG ve kalkanlama özellikleri analiz edilmiş olup ardından çeşitli kalkanlama yöntemleri ile elektromanyetik alan azaltma yöntemleri incelenmiştir.

Bu eksenel ve radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratör, farklı rotor hızları için farklı voltaj çıkışları vermekte, ancak daha yüksek rotor hızlarında genlik çok fazla değişmemektedir. Jeneratörün ortasında bir stator ve iki yanında iki rotor bulunmaktadır. Bu konfigürasyon sonucunda, manyetik akı eksenel yöne ek olarak radyal olarak da yönlendirilmektedir. İki taraftaki stator çaplarının farklı olması nedeniyle, yüksek hızlı sürekli işlemlerde üretilen ısı verimli bir şekilde azaltılabilmektedir.

Bu tezin amacı, farklı elektromanyetik kalkanlama yöntemlerine, bunların avantaj ve dezavantajlarına ve çeşitli alanlardaki uygulamalarına genel bir bakış sağlamaktır. Tez aşağıdaki konuları kapsayacaktır:

- Elektromanyetik alanlar ve dalgalar teorisi ve kalkanlama etkinliği ve zayıflama ilkeleri
- Metaller, kompozitler, metamateryaller, kaplamalar, kafesler, folyolar ve mahfazalar gibi elektromanyetik kalkanlama için kullanılan malzemeler ve geometriler
- Yakın alan ve uzak alan teknikleri, standart test yöntemleri ve sayısal benzetimler gibi elektromanyetik korumanın performansını ölçme ve test etme yöntemleri
- Frekans bağımlılığı, kenar etkileri, korozyon, topraklama ve uyumluluk sorunları gibi elektromanyetik korumanın zorlukları ve sınırlamaları
- Senkron jeneratörlerin özellikleri,
- Yeni tasarlanmış ve üretilmiş eksenel ve radyal akılı senkron jeneratörün elektromanyetik alan ölçümleri ve korunma yöntemlerinin değerlendirilmesi.

Yukarıda belirtilen hususlar ışığında, öncelikle Elektromanyetik girişim ve elektromanyetik uyumluluk temelleri konuları ikinci bölümde incelenmiştir. Elektromanyetik kalkanlamanın temelleri üçüncü bölümde incelenmiştir. Dördüncü bölümde; sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler hakkında bilgiler verilmiş ve bu tez kapsamında EMG ölçümleri gerçekleştirilen eksenel ve radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratörün özelliklerinden detaylı olarak bahsedilmiştir. Beşinci bölümde, ölçüm çalışmaları yapılırken kullanılan malzeme ve yöntemlerden bahsedilmiştir. Altıncı bölümde bulgular ortaya koyulmuştur. Son bölüm olan yedinci bölümde ise deneysel sonuçlar incelenmiş ve elektromanyetik kalkanlama modeli önerilmiştir.

2. ELEKTROMANYETİK ALANLAR VE TEMEL KAVRAMLAR

Elektromanyetik uyumluluk (EMU) kavramını anlamak için öncelikle elektromanyetik girişim (EMG) terimi tanımlanmalıdır. EMG, bir elektronik cihazın çalışmasını etkileyen elektromanyetik enerji olarak tanımlanabilmektedir. EMU ise aynı ortamdaki diğer cihazların amaçlanan şekilde çalışma yeteneğini etkilemeden, bir cihazın amaçlandığı şekilde çalışma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Aslında elektromanyetik girişim, elektromanyetik uyumluluk olmadığında ortaya çıkar. EMU, birçok ülkede birçok ürün için hükümetler tarafından düzenlenmektedir ve belirli standartlara göre ölçüm yöntemleri ve limitleri bulunmaktadır. EMG, elektrikli ve elektronik cihazların çalışmaları sırasında çevreye standartların belirlediği limitlerin üzerinde elektriksel ve elektromanyetik gürültü yayması veya bu emisyonu olması gerekenden daha fazla duyarlılık göstermesi olarak değerlendirilebilir.

Elektromanyetik girişimi ve elektromanyetik girişim problemlerinin yok edilmesini amaçlayan elektromanyetik uyumluluk konularını anlayabilmek için elektromanyetizmanın temel kavramları olan elektrik alan, manyetik alan, elektromanyetik alan ve elektromanyetik spektrum konularının iyi anlaşılması gerekmektedir.

2.1. Elektriksel Alan

Elektriksel alanlar canlı hücrelere ve elektriksel cihazlara etki edebilmektedir. Elektriksel alanlar elektrik alan, manyetik alan ve elektromanyetik alanlardan oluşur. Bu elektriksel alanlar, elektrik enerjisi üretildiğinde oluşmaktadır [10].

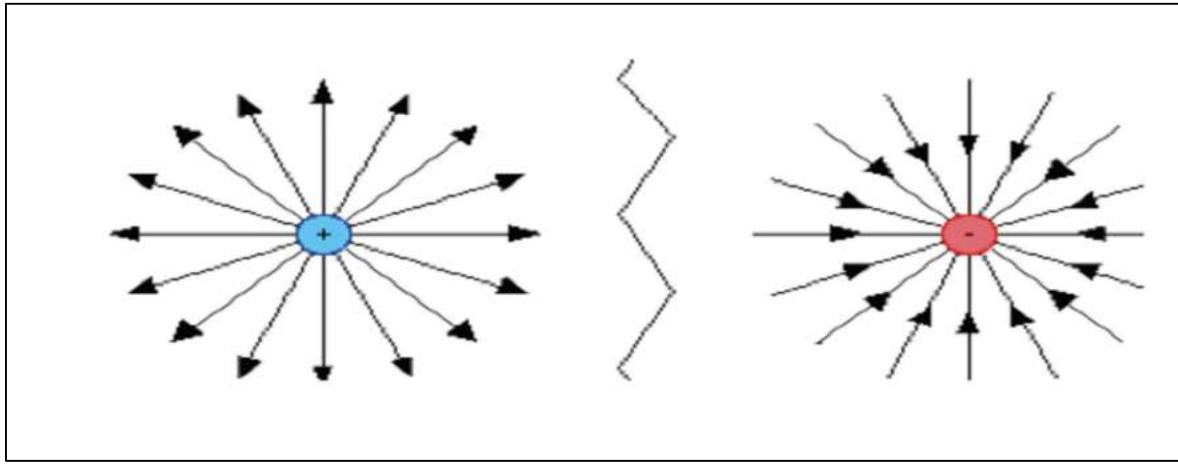
2.1.1. Elektrik alan

Elektrik alan, artı bir birimlik bir elektrik yükünün başka bir elektrik yükü üzerinde yarattığı çekme veya itme kuvveti olarak ifade edilmektedir. Burada yüklerinin kendi varlığı elektrik alanı oluşturmaktadır. Bu nedenle, bir cihazın besleme gerilimi yükseldikçe, bunun sonucu olarak ortaya çıkan elektrik alanı da yükselmektedir. Elektrik alan (E) şiddetinin birimi metre başına düşen volt (V/m) olarak ifade edilmektedir. Ayrıca Elektrik alan şiddeti, kaynaktan uzaklaştıkça ters kare olarak azalmaktadır [11].

Elektrik alan E ile gösterilmektedir. Meydana gelen elektrik alan, bu alan içerisindeki her elektriksel yüke kuvvet uygulamaktadır. Elektrik alan içerisinde q yüküne uygulanan kuvvet Eş. 2.1’de verilmiştir. Burada E , elektrik alanını, F , Newton cinsinden elektrik kuvvetini ve q , Coulomb cinsinden yük miktarını temsil eder [12].

$$F = q E \quad (2.1)$$

Şekil 2.1’de elektrik alanın eksi yük için E radyal olarak eksi yüke doğru yönelmiş, artı yük içinse radyal olarak yükten dışarı doğrudur.



Şekil 2.1. Pozitif yükte başlayıp negatif yükte sonlanan elektrik alan çizgileri

2.1.2. Manyetik alan

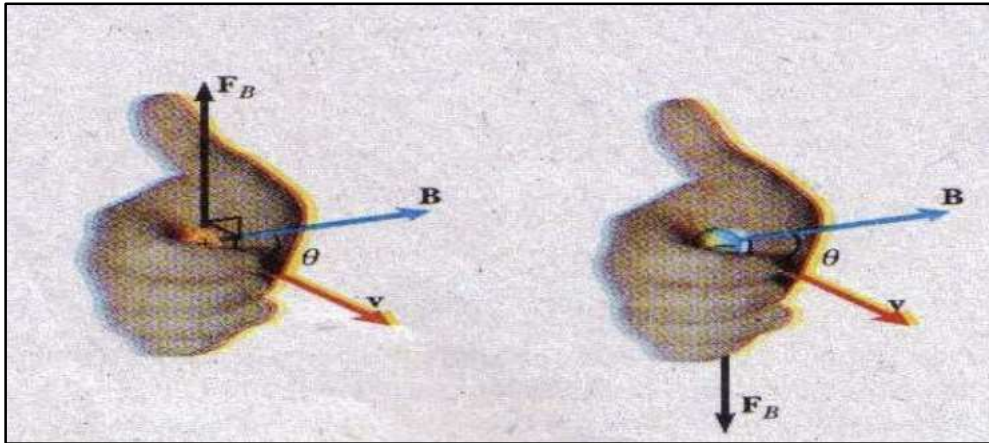
Manyetik alan, hareket halindeki elektriksel yüklere kuvvet uygulayarak bir noktada v hızıyla hareket eden bir q yükünde F kuvvetini oluşturan alan vektörü olup Eş. 2.2’de gösterilmektedir. Manyetik alan, elektriksel yüklerin yer değiştirmesiyle ortaya çıkmakta aynı zamanda elektrik alanda olduğu gibi, mesafe ile azalmaktadır. Ancak, manyetik alan, elektrik alanda olduğu gibi engel teşkil eden nesnelerce neredeyse hiç engellenmemektedir. Manyetik alan, günlük yaşantımızda her yerde karşımıza çıkmaktadır. Akım geçiren her şey, manyetik alan oluşturmaktadır. Mıknatıslar da manyetik alan oluşturmakta hatta dünyanın akışkan olan iç kesimleri bile dünyanın manyetik alanını oluşturmaktadır. Manyetik alan da elektrik alan gibi vektörel bir nicelikdir. Şekil 2.2’de B simgesiyle gösterilen manyetik alan vektörünün yönünün, yüklerin hareket yönüne dik olduğu gösterilmektedir. Bunun yanında, elektrik alan çizgileri gibi manyetik alan çizgileri de birbirlerini kesmezler ve manyetik alan

çizgilerinin sıklığı, akım geçen telden radyal uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak azalmaktadır [13].

Manyetik alan Eş. 2.2’de gösterilmiştir. Burada; F , Newton cinsinden manyetik alan kuvvetini, q , Coulomb cinsinden yük miktarını, v , m/s cinsinden hareket eden yükün hızını ve B , Wb/m² cinsinden manyetik akı yoğunluğunu temsil eder. Eş. 2.3’te görüldüğü üzere manyetik akı yoğunluğu, ortamın manyetik geçirgenliği (μ) ve manyetik alan şiddetinin (H) çarpımına eşittir. H , A/m cinsinden ifade edilir [14].

$$F = q v B \quad (2.2)$$

$$B = \mu H \quad (2.3)$$



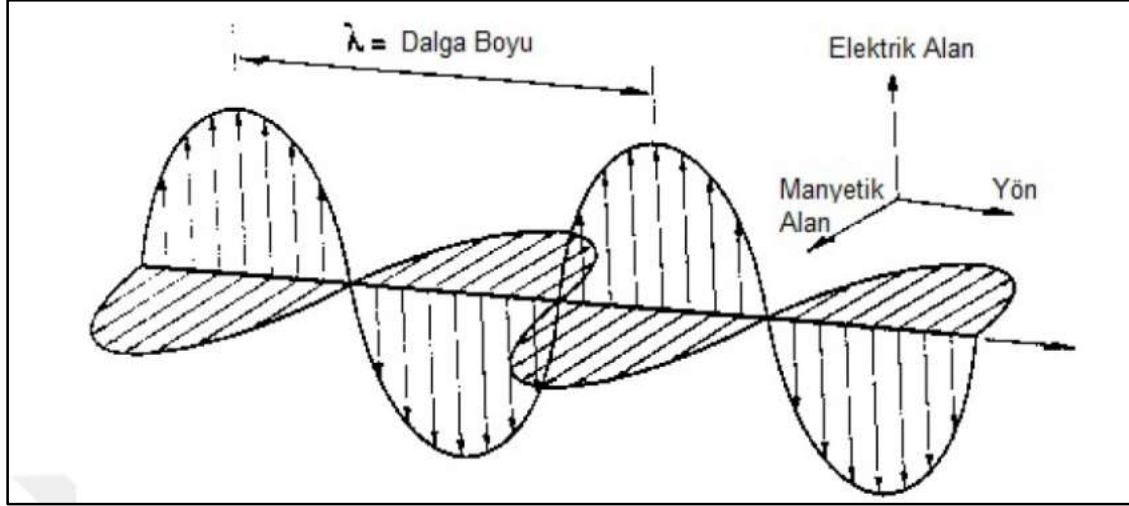
Şekil 2.2. Manyetik kuvvet yönünün sağ el kuralıyla gösterimi

2.1.3. Elektromanyetik alan

Manyetik alan ve elektrik alanın birleştirilmesiyle elektromanyetik alan oluşmaktadır. Bir gözlemciye göre yüklü parçacıklar hareket etmiyorsa, orada sadece elektrik alan vardır. Eğer yükler hareket halindeyse, gözlemciye göre yüklü parçacıkların hareketinden ötürü gözlemci elektrik alanın yanı sıra bir de manyetik alanın etkilerini hissedecektir. Tüm akım taşıyan maddeler elektromanyetik dalga kaynak tiplerini oluşturmakta olup çevresine elektromanyetik alan yaymaktadır [15].

Elektromanyetik alanın oluşturan özellikler, dalga boyu, dalganın frekansı ve hızıdır. Dalgalar, sinüs eğrileri şeklinde yayılan enine dalgalardır. İki tepe noktası arasındaki mesafe

“dalga boyu” olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.3’te elektromanyetik alanın yapısı gösterilmektedir [16].



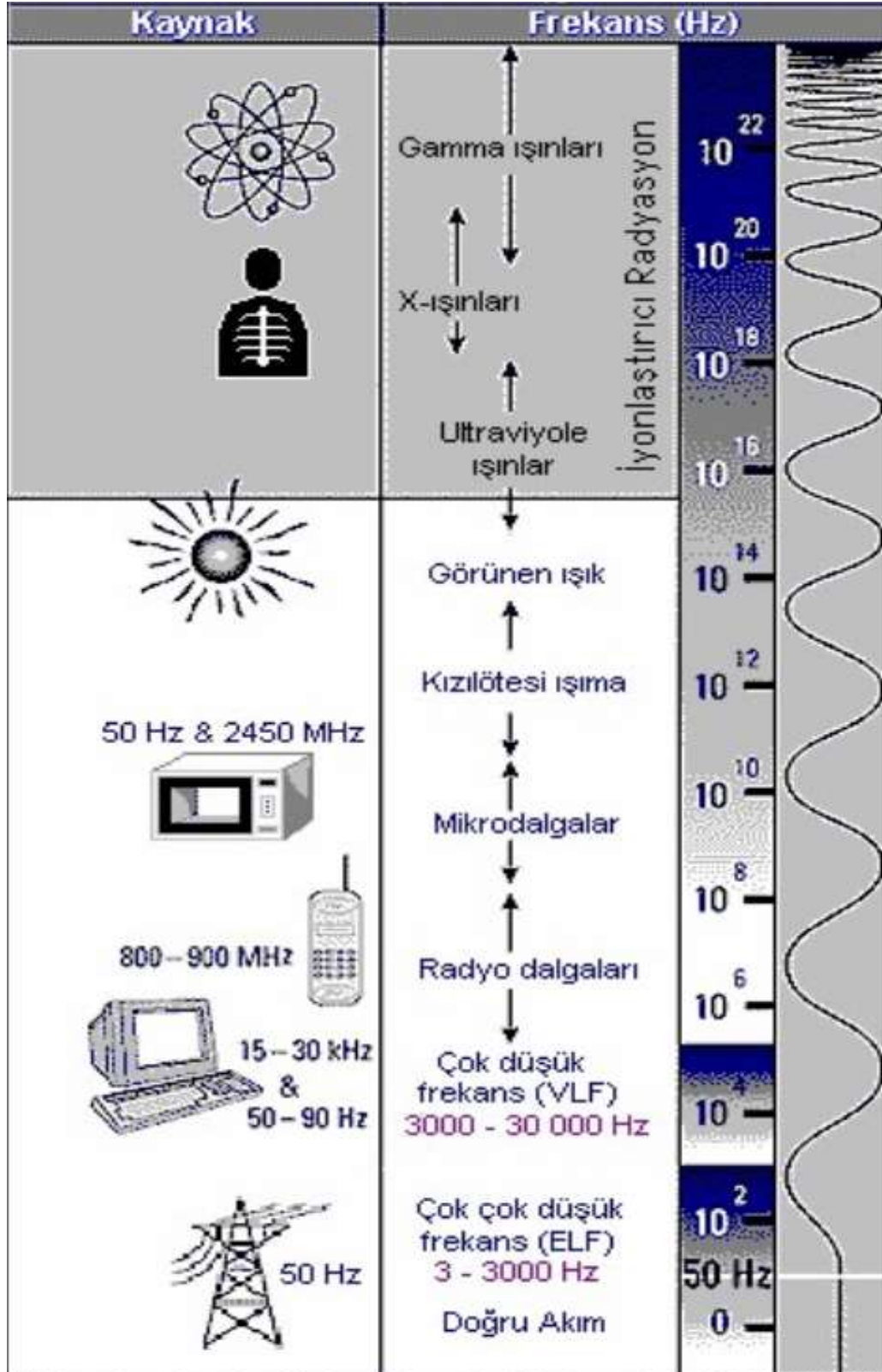
Şekil 2.3. Elektromanyetik alanın yapısı

$$c = \lambda f \quad (2.4)$$

Eş. 2.4’te c , dalganın boşluktaki yayılma hızı olan ışık hızıdır. λ ise dalga boyudur. Dalga boyu ve frekans ters orantılıdır. EM dalgalar boşlukta ışık hızı olan 3×10^8 m/s hız ile yayılırlar.

2.2. Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik dalgaların enerji ya da parçacık olarak yayılmasına elektromanyetik radyasyon denilmektedir. Elektromanyetik spektrum ise, elektromanyetik dalgaların frekans ve dalga boyu şeklinde sınıflandırılmasıdır. Elektromanyetik dalgalar birbirine dik açıda salınım yapan elektrik alan (E) ve manyetik alan (B) bileşenlerinden oluşmakta olup, bu alanlar dalga yayılım yönüne dik doğrultudadır. Şekil 2.4’de elektromanyetik dalga spektrumu verilmektedir [17].



Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrumda dalga şekilleri

DC – 300 GHz arası frekansa sahip elektromanyetik dalgalar; iyonlaştırıcı olmayan radyasyon, 300 GHz üstü dalgalar ise iyonlaştırıcı radyasyon olarak adlandırılır.

2.3. Elektromanyetik Girişim

Elektrikli ve elektronik ürünler genellikle radyo frekans enerjisi üretmektedirler. Her cihaz, diğer elektrikli cihazlarla istenmeyen etkileşime neden olma potansiyeline sahiptir. EMG, yıkıcı elektromanyetik enerjinin bir elektronik cihazdan diğerine yayılan veya iletilen yollarla iletildiği süreçtir.

Elektrik enerjisini ileten, dağıtan, işleyen veya başka bir şekilde kullanan herhangi bir cihaz bir EMG kaynağı olabilir ve diğer cihazların performansının düşmesine neden olabilecek elektromanyetik sinyaller üretebilir. EMG kaynakları oluşumlarına göre doğal ve insan yapımı kaynaklar olarak incelenir. Girişim kaynaklarının özelliklerinin bilinmesi alınabilecek önlemlerin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Elektromanyetik girişim genellikle cihazlardan kaynaklandığı düşünülse de çevremizdeki doğal olaylar da EMG'ye neden olabilir [18].

İnsan yapımı EMG, elektrik hatlarından el cihazlarına kadar her elektronik düzeneğin neden olduğu ve bunları kapsayan gürültü türüdür. Bu elektronik sinyaller aynı frekansta karşılaştıklarında birbirlerini bozarlar. EMG kaynakları aşağıdaki örneklerle gösterilebilir [19].

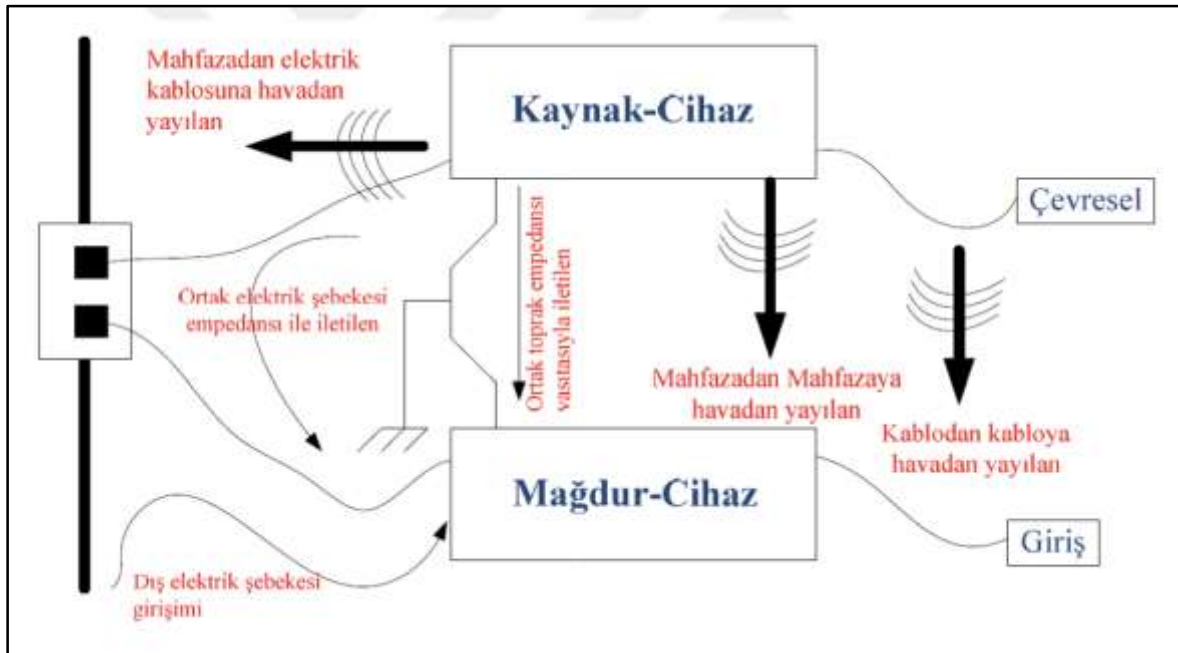
- Radyo vericileri
- Dijital işleme ve iletişim
- Elektro ısı Uygulamaları
- Güç koşullandırma ve iletim
- Elektrostatik boşalma (ESD)
- Nükleer elektromanyetik darbe (EMP)

Elektromanyetik girişim olayında üç unsur vardır. Bunlar; kaynak cihaz, bağlantı yolu ve kurban cihazdır. Kaynak, rahatsız edici elektromanyetik sinyallere neden olan cihazdır. Kurban, kaynak cihazın ürettiği rahatsız edici elektromanyetik sinyallerin olumsuz yönde etkilendiği cihazdır. Bağlantı yolu ise, kaynak cihazın ürettiği elektromanyetik sinyallerin kurban cihaza ulaştıran yoldur [20].



Şekil 2.5. EMG bileşenleri

Gürültü, istenen sinyal dışında olan ve bir devrede bulunan herhangi bir elektrik sinyalidir. Girişim ise gürültü neticesinde ortaya çıkan istenmeyen etkidir. Gürültü ortadan kaldırılamaz ancak girişim problemi azaltılabilmektedir. Bir elektromanyetik girişim olayında girişim gürültüsünün kaynaktan kurbanı doğru ilerlediği bağlantı yolları iki çeşit olup bunlar; iletim yollu (conducted) ve ışıma yollu (radiated) olarak sınıflandırılabilir [21]. Aynı şebekeye bağlı iki cihazın arasındaki elektromanyetik girişim etkileşimi Şekil 2.6’da gösterilmiştir.

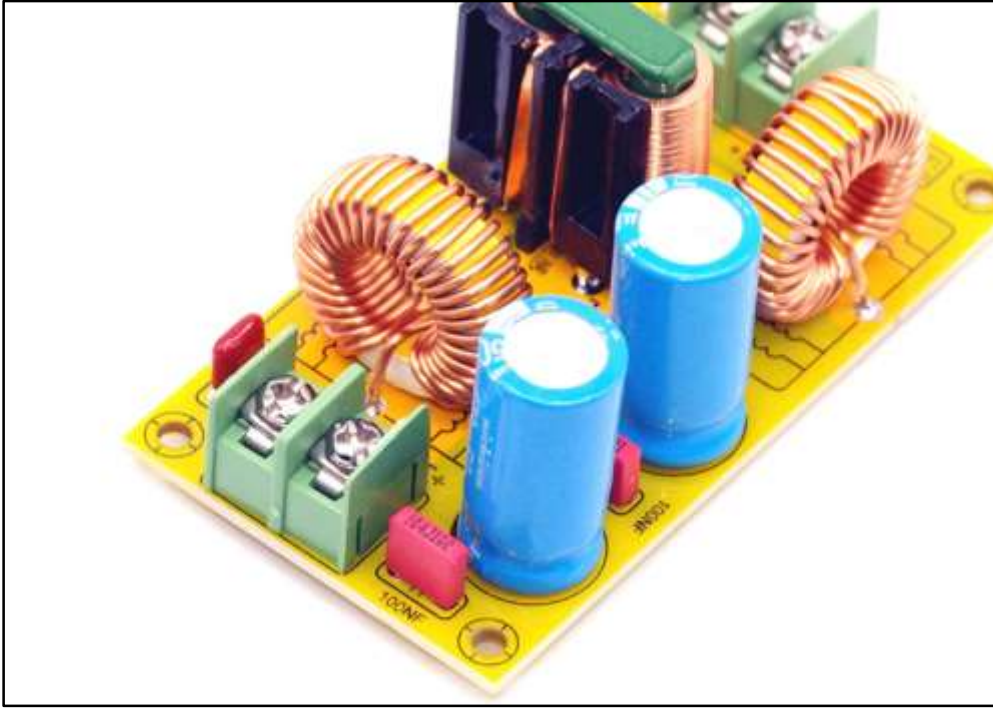


Şekil 2.6. EMG filtreleme şeması

EMG kaçınılmaz olduğundan, elektromanyetik girişimi yönetmek için hem gürültü kaynağında hem de kurban cihazlarda birçok farklı çözüm geliştirilmiştir. Bu çözümler bazen çok basit bazen de ciddi tasarım değişiklikleri gerekmektedir. Gürültü azaltma dolayısıyla elektromanyetik uyumluluk, kaynaktaki emisyonu bastırarak, bağlantı yollarını engelleyerek veya kurbanı emisyonla daha az duyarlı hale getirerek önlenmektedir.

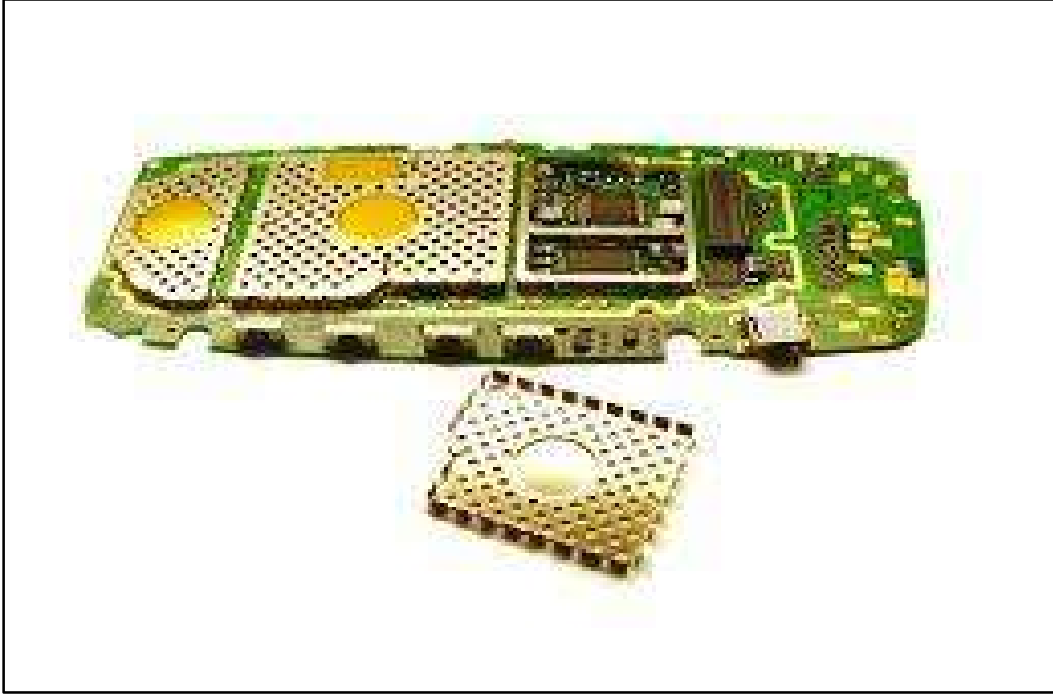
Kullanılan yöntemlerin çoğu her üç konu için de geçerlidir. Bunlar başlıca; EMG filtreler, kaplama ve topraklama olarak sınıflandırılabilirler.

İstenmeyen sinyallerden kurtulmanın etkili yollarından biri EMG bastırma filtreleri olarak da bilinen EMG filtreleridir. Cihazlara veya devrelere EMG filtreleri eklendiğinde, iletim yoluyla iletilen elektromanyetik gürültüyü bastırabilirler. Bir filtre örneği Şekil 2.7’de verilmiştir. Filtreleme genellikle önceden tanımlanmış bir frekans aralığının dışındaki gürültüyü reddetmek için kullanılır. Elektromanyetik gürültü genellikle yüksek frekanslarda oluşur. Bu, ölçülen bir sinyalde, örneğin sinüs dalgalarında, döngülerin birbirine çok yakın olacağı anlamına gelir. EMG filtreleri, bu sinyalleri bastırmak için kapasitörler ve indüktörler içerebilir [18]



Şekil 2.7. Örnek bir EMG filtre devresi

Kaynak veya kurban cihazlarda elektromanyetik gürültüyü önlemek için kullanılan yöntemlerden biri de kalkanlamadır. Kalkanlama prensibi, korunacak nesneyi çevreleyen iletken bir tabaka oluşturmaktır. Faraday kafesi olarak da adlandırılmakta olup Michael Faraday tarafından icat edilmiştir. Kalkanlama her iki yönde çalışarak, kalkanlama malzemesinin içindeki elemanları dış elektromanyetik girişimden dış elemanları da kalkanlama malzemesi içinden kaynaklanan elektromanyetik girişimden korumaktadır [22].



Şekil 2.8. EMG kalkanlama örneği

Metalik kalkanlar, elektromanyetik girişimin manyetik alan bileşenini emmek için yüksek bir manyetik geçirgenliğe sahipken elektrik alan bileşenini yansıtacak şekilde tasarlanmaktadır.

Bir diğer yöntem topraklamadır. Bir elektrik devresi veya ekipmanı ile toprak veya toprak görevi gören bir iletken arasındaki bağlantıya toprak bağlantısı denir. Topraklamanın temel amacı güvenlik ve elektrik çarpması tehlikelerine karşı korumadır. Ek olarak, elektrostatik boşalmalara ve elektromanyetik parazitlere karşı koruma olarak kullanılabilir. İnsanlar ve nesneler üzerinde biriken statik yük, temas yoluyla veya havaya boşalarak elektronik bileşenlere zarar verebilir. Uygun bir topraklama ile bu boşalma akımı, bileşenlere zarar vermeden toprağa aktarılabilir. Elektromanyetik parazite karşı topraklama, devredeki bileşenler için bir referans noktası görevi gören bir eş potansiyel noktası oluşturur. Topraklama tarafından oluşturulan düşük empedanslı yol, akımın sinyal kaynağına geri dönmesini sağlar. Topraklama tasarlanırken empedansın mümkün olduğu kadar düşük ve topraklama döngüsünün mümkün olduğunca küçük olması daha iyi sonuç alınmasını sağlayacaktır [21].

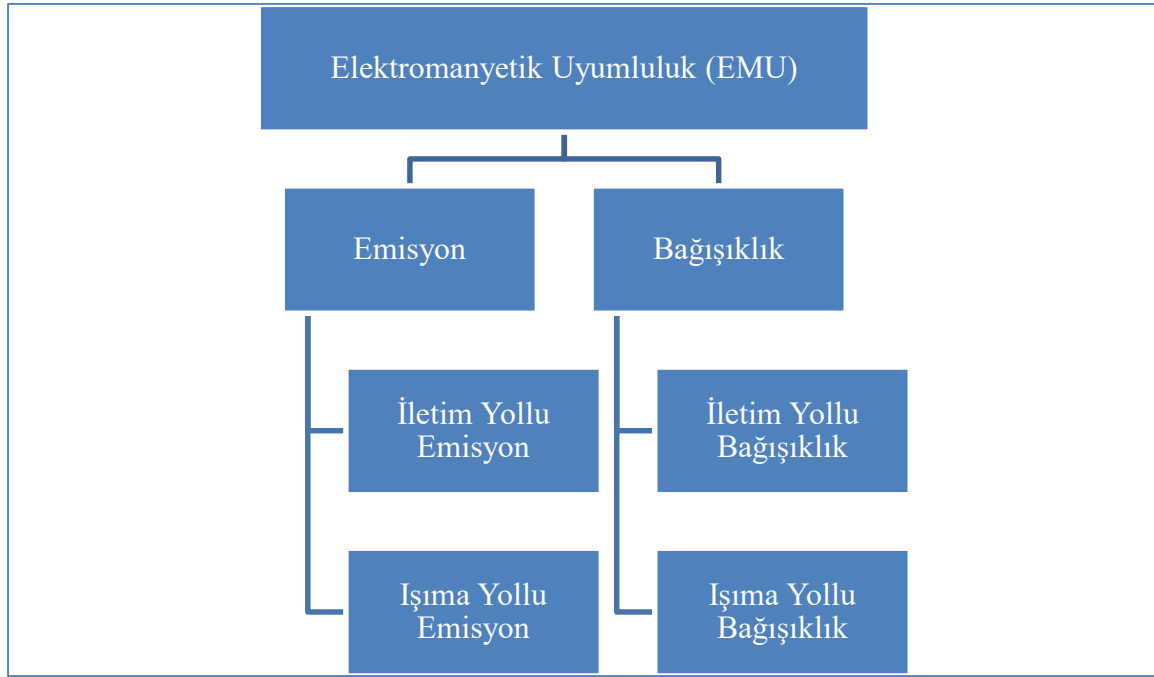
2.4. Elektromanyetik Uyumluluk

Elektromanyetik girişim, cihaz ve sistemlerin fonksiyonel ve güvenilir çalışabilmeleri açısından tehdit oluşturan problem olarak tanımlanır. Elektromanyetik uyumluluk (EMU) ise elektromanyetik girişim problemlerinin yok edilmesi için uygulanması gereken adımlar olarak tanımlanır. EMU ile EMG sorunları azaltılarak cihazların istenildiği şekilde çalışması sağlanır. EMU, uluslararası standartlarca “bir cihaz, donanım veya sistemin, bulunduğu elektromanyetik çevre içerisinde, bu çevreyi veya diğer donanımları rahatsız edecek düzeylerde elektromanyetik gürültü oluşturmada ve ortamdaki diğer sistemlerin oluşturduğu girişimden etkilenmeden, kendisinden beklenen işlevlerini yerine getirme yeteneği” şeklinde tanımlanmaktadır [23]. Emisyon açısından EMU, bir cihazın, ekipmanın veya sistemin elektromanyetik ortamında, o ortamdaki herhangi bir şeye dayanılmaz elektromanyetik bozulma getirmeden tatmin edici bir şekilde işlev görme yeteneği olarak tanımlanabilir [24]. Duyarlılık açısından, tanım, sistemlerin, alt sistemlerin, devrelerin ve bileşenlerin, amaçlanan çalışma ortamlarında, elektromanyetik girişim nedeniyle arıza veya kabul edilemez performans düşüşü olmadan, tasarlandıkları gibi çalışabilme yeteneğidir [23,24]. Tüm ekipman türleri, elektromanyetik uyumluluğu sağlamayı amaçlayan teknik gereksinimlere uygun olmalıdır. Bir cihazın elektromanyetik olarak uyumlu olması için, diğer cihazlar ve şebeke ile etkileşime girmemesi, diğer cihazlardan kaynaklanan emisyonlara duyarlı olmaması ve kendi kendine etkileşime girmemesi beklenir.

Herhangi bir elektrikli veya elektronik cihaz, bulunduğu ortam için potansiyel bir girişim kaynağıdır ve bu durum ciddi bir sorun olan çevresel elektromanyetik kirlilik yaratmaktadır. Elektromanyetik kirliliği kontrol etmek ve sınırlamak için, birçok ülkede elektromanyetik uyumluluk yasaları çıkarılmıştır. Örneğin, Avrupa Birliği ülkelerinde elektromanyetik uyumluluk 2014/30/EU yönergesi kapsamında düzenlenmektedir ve AB dışındaki birçok ülke de bu yönergeyi ulusal yönergelerine uyarlayarak takip etmektedir. [24].

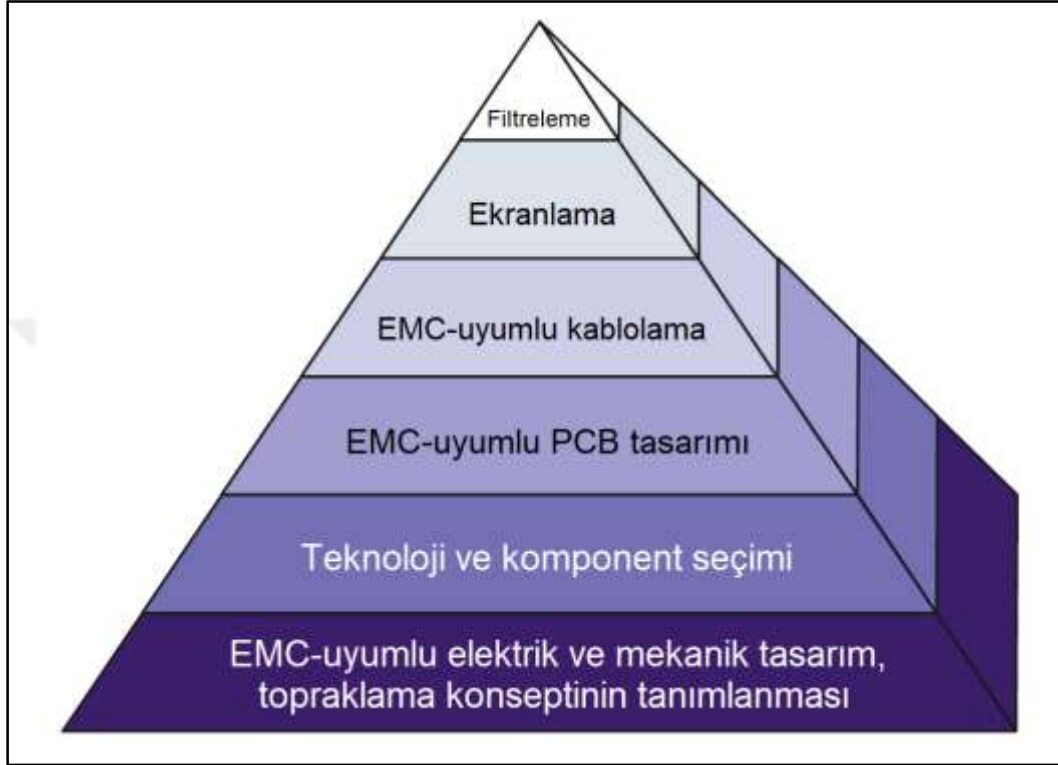
EMU sorunları, iletken ve ışımsal emisyonlardan kaynaklanabilir ve Şekil 2.9'da gösterildiği gibi EMU 'nin dört ana alt sorunu vardır. Bir cihazın yayılan emisyon varlığında çalışma kapasitesinin ölçümüne radyasyon duyarlılığı denir. İletilen emisyon, bir cihazdan başka bir cihaza veya şebekeye iletim yoluyla doğrudan bağlanan elektromanyetik girişimdir.

Bu bağlamda EMU ikiye ayrılmaktadır. Bunlar emisyon ve bağışıklık gruplarıdır. Cihaz ve sistemlerin diğer cihaz ve sistemlerin arızalanmasına veya hatalı çalışmasına neden olan EMG seviyesi üretmeden çalışıp veya çalışmaması emisyon grubunu oluşturur. Bağışıklık ise, bir cihaz veya sistemin uluslararası standartlarca belirlenen seviyelerde performans seviyesini korurken EMG maruziyetine dayanma yeteneğinin göreceli bir ölçüsünü ifade etmektedir. EMU'nin dört temel etkileşim biçimi; İletim yolu emisyon, iletim yolu bağışıklık, ışıma yolu emisyon, ışıma yolu bağışıklık olarak ifade edilmektedir [25].



Şekil 2.9. EMU'nun genel sınıflandırması

Şekil 2.10'da elektronik bir sistem geliştirmedeki temel adımlar verilmiştir. Bu piramitte aşağıdan yukarıya doğru tekniklerin sıralaması verilmektedir. Katmanın büyüklüğü ise o adımın önemini vermektedir [26].



Şekil 2.10. EMU uyumlanmış elektronik sistem geliştirmede temel adımlar

2.5. Bölüm Değerlendirmesi

Gürültüye yani EMG'ye neden olmayan ekipman tasarlamak, gürültüye duyarlı olmayan ekipman tasarlamak kadar önemlidir. Gürültü kaynakları aşağıdaki üç kategoriye ayrılabilir. Bunlar;

- İçsel gürültü kaynakları,
- İnsan yapımı gürültü kaynakları
- Doğal olayların neden olduğu gürültü kaynaklarıdır.

Elektromanyetik uyumluluk, bir elektronik sistemin amaçlanan elektromanyetik ortamda düzgün şekilde çalışabilmesidir. Elektromanyetik uyumluluğun emisyon ve duyarlılık olmak üzere iki yönü vardır. EMG'nin azaltılması ile ilgili başlıca üç ana EMU düzenlemesi bulunmakta olup bunlar; ABD Federal haberleşme komisyonunu kuralları, Avrupa Birliği düzenlemeleri ve çeşitli askeri standartlardır.

EMG kaynaklı EMU problemlerinin çözümü üretimden önce daha kolay ve daha ucuzdur. Bu nedenle, elektromanyetik uyumluluk, elektronik cihaz ve sistemlerin tasarım sürecinin en başından itibaren göz önünde bulundurulması gereken önemli bir parametredir. Elektromanyetik girişime karşı iletim yollu bağışıklığın artırılması ve iletim yollu emisyonun azaltılması, EMU kriterlerine uygun tasarım gerçekleştirilmesine bağlıdır. EMU'ye uygun kalkanlama; topraklama, filtreleme, kablo ve konnektör tercihi, ve kullanılan malzemenin özellikleri, bağışıklık seviyesinin artırılmasında ve emisyon seviyesinin azaltılmasının başlıca yöntemlerdir. EMU problemlerinin çözümü iki yoldan yapılmakta olup, bunlar; girişim kaynağının tespit edilerek yok edilmesi ve bağlantı yolunun zayıflatılmasıdır. Neticede; birçok teknik kullanılarak elektronik bir sistemde EMG azaltılabilir; EMG kaynaklı sorunları için tek bir benzersiz çözüm mevcut değildir.

3. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA

Elektronik sistemlerin ve telekomünikasyon cihazlarının kapsamlı olarak kullanılması ve gelişimi sebebiyle telefonlar, radyo, mikrodalga iletimi ve iletişim uyduları gibi elektrik ve elektromanyetik teknolojileri içeren elektromanyetik yayılım yapan cihazlar yaygınlaşmıştır. Bu cihazların ürettikleri elektromanyetik alanlar aşamalı olarak birbiriyle etkileşime girmekte ve elektromanyetik girişime (EMG) neden olmaktadır [27].

Elektronikteki gelişmeler sonucunda ortaya çıkan elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik kirlilik sorunu gündeme getirmiştir. EMG kalkanlama, iletken veya manyetik malzemelerden yapılmış bariyerlerle radyasyonunu bloke ederek elektromanyetik girişimin kontrol edilmesi olarak ifade edilmektedir [28].

Elektromanyetik uyumluluk (EMU), elektromanyetik enerjinin emisyonunun, üretiminin ve alımının araştırıldığı, elektrik mühendisliğinin hayati bir dalıdır. Elektromanyetik enerji, elektronik sistemlerin çalışmasını etkileyebileceği gibi sınırlı bir doz değerinin üzerinde canlı hücrelere de zarar verebilir. Elektromanyetik alanların istenmeyen etkilerini önlemek ve elektronik sistemlerin sorunsuz çalışmasını sağlamak için kullanılan yöntemlerden biri de "kalkanlama" kavramıdır [29].

Elektrik devreleri tarafından yayılan elektromanyetik sinyaller, elektronik cihazların düzgün çalışmasını bozabilmekte veya tamamen yok edebilmektedir. Bakır, kolayca şekillendirilebilir, imal edilebilir, lehimlenebilir ve oldukça iletken olmasından dolayı RF kalkanlama malzemeleri içerisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çelik, nikel, gümüş de EMG kalkanlama muhafazaları olarak kullanılır [27,30]. Bu bölümde öncelikle, elektromanyetik girişimden korunma yöntemleri ve elektromanyetik kalkanlama kavramları açıklanmıştır.

3.1. Elektromanyetik Kalkanlamanın Önemi

Elektromanyetik alan yayan cihazlar kullanımı sırasında yaydıkları elektromanyetik dalgalarla canlılar üzerinde elektromanyetik alan oluşturarak fayda sağladıkları kadar zarara da neden olabilmektedir. Meydana çıkan bu elektromanyetik alanın, vücuttaki biyolojik ve

fizyolojik uyumu bozmakta hatta uzun süreli maruziyette kanser yapıcı etkilere kadar ulaşacağı düşünülmektedir. Ayrıca, halsizlik, dikkat bozukluğu, yorgunluk, baş ağrısı, uykusuzluk gibi çeşitli reaksiyonlara sebebiyet verdiği düşünülmektedir [31].

Elektromanyetik alan canlıların vücudundaki titreşimleri ve biyokimyasal iyonları, periyodik olarak çeşitli iyon dokularına nüfuz ederek, onların kendi frekanslarında titreşmelerine neden olmaktadır. İyonların titreşimi, etraflarında bir gerilim oluşturarak ve haznedeki potansiyele duyarlı zar kanallarının döngünün dışında açılmasına veya kapanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle hücre civarındaki yapı kimyasal etkilerle değişebilir ve elektromanyetik etkinin artma eğiliminde olduğu durumlarda ise termal etki arttıkça parçanın fonksiyonları bozulabilir, dolayısıyla DNA ve RNA kısmı yenilenmesi engellenebilmektedir. Elektromanyetik dalgalara aşırı maruz kalındığında, hasarlı hücrelerin oluşumuna yol açabilecek bazı kimyasal değişiklikler de meydana gelmektedir [32]

3.2. Elektromanyetik Kalkanlamada Kullanılan Malzemeler

Bir elektrikli cihazı bir Faraday kafesi ile çevrelemek, EMG koruması için kalkanlama tasarlamının ardındaki temel fikirdir. Kalkanlama; metallerden, iletken kaplı plastiklerden (plastik muhafazanın duvarlarını boyama, metalik kaplama veya vakumlu metal kaplama yoluyla) veya iletken dolgulu termoplastikten (iletken parçacıklarla enjeksiyonla kalıplanmış bir polimerik reçine) yapılır. Koruyucu mahfaza, sistemin çalışma ortamı için gerekli olan mekanik ve diğer elektriksel özellikleri de dikkate almalıdır. Malzeme ayrıca güneş radyasyonu, yağmur, nem, aşırı sıcaklıklar ve savaş kimyasalları gibi çevresel gereksinimleri de karşılamalıdır [33].

3.2.1. Metalik malzemeler

Metaller mükemmel elektrik iletkenleridir ve elektromanyetik paraziti emebilir, yansıtabilir ve iletebilirler. Metallerin iletkenliği Çizelge 3.1’de gösterilmektedir. Metallerin hem elektriği hem de ısıyı iletme yeteneği, birçok uygulamada kullanılmalarının ana nedenidir. Statik yükün yüksek olduğu elektrikli ekipmanlar, ısı oluşan yüksek hızlı makineler genellikle metal iletkenlerle topraklanarak korunur, böylece statik yükler ve ısı dağılır. Benzer şekilde, yüksek frekanslı elektromanyetik radyasyonun ekipmandan kaçması engellenir veya ekipman, metal kalkanlar ve kapaklarla başıboş radyasyondan korunur [34].

Elektromanyetik radyasyondan korunmak amacıyla kalkanlamada kullanılacak malzemeler iyi elektrik iletkenlik özelliklerine ve yüksek manyetik geçirgenliğine sahip olmalıdır. Bu sebeplerle, metal levhalar ve metal kaplamalar kalkanlama amacıyla oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun dışında iletken polimerler, iletken iplikler, iletken boyalar, iletken tekstil yüzeyleri ve kompozit malzemeler de radyasyondan korunma amacıyla kullanılmaktadır [35]. Aşağıda Çizelge 3.1’de bazı materyallerin iletkenlik ve geçirgenlik değerleri verilmiştir [36,37]

Çizelge 3.1. Bazı malzemelerin elektriksel ve manyetik özellikleri

Materyal	İletkenlik (σ_r)	Geçirgenlik (μ_r)
	S/m	H/m
Gümüş	1,05	1
Bakır (tavlanmış)	1,00	1
Altın	0,7	1
Krom	0,664	1
Alüminyum (yumuşak)	0,61	1
Alüminyum (temperlenmiş)	0,4	1
Çinko	0,32	1
Berilyum	0,28	1
Pirinç	0,26	1
Kadmiyum	0,23	1
Bronz	0,18	1
Platin	0,18	1
Magnezyum alaşımı	0,17	1
Teneke	0,15	1
Çelik (SAE 1045)	0,10	1.000
Monel	0,04	1
Konetik (1kHz)	0,03	25.000
Mü-metal (1kHz)	0,03	25.000
Paslanmaz çelik (Tip 304)	0,02	500

Genellikle, geçirgenlik ne kadar büyük olursa, frekansla azalma da o kadar büyük olacaktır. Yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler, 10 kHz’in altındaki frekanslarda manyetik alan kalkanları olarak en kullanışlıdır. 100 kHz’in üzerinde çelik yavaş yavaş geçirgenliğini kaybetmeye başlar. Çizelge 3.2, çeliğin frekansa karşı geçirgenliği için temsili değerleri listeler [36].

Çizelge 3.2. Çelik için geçirgenlik ve frekans ilişkisi

Frekans (Hz)	Görelî Manyetik Geçirgenlik
100 Hz	1.000
1 kHz	1.000
10 kHz	1.000
100 kHz	1.000
1 MHz	700
10 MHz	500
100 MHz	100
1 GHz	50
1.5 GHz	10
10 GHz	1

3.2.2. Kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler, metal matrisli, polimer matrisli, karbon matrisli ve çimento matrisli gibi farklı katkılandırma malzemeleri eklenerek talep edilen mekanik ve/veya termal özellikler gibi geliştirmek üzere tasarlanmaktadır [38].

Ferromanyetik malzemeler

Ferromanyetik malzemeler kendiliğinden mıknatıslanma göstermektedir ve bu, komşu atomların mikroskobik olarak geniş bir bölgede dönme momentlerinin, momentlerin paralel hizalanmasıyla sonuçlandığı anlamına gelmektedir. Harici bir manyetik alanın uygulanması, alanları değiştirir ve farklı alanların momentleri daha sonra birlikte sıralanma eğilimi gösterir. Uygulanan alan kaldırıldığında, momentlerin çoğu hizalı kalmakta ve bu da önemli kalıcı mıknatıslanmaya yol açmaktadır [39].

Ferrimanyetik malzemeler

Yüksek frekanslı uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir seramik malzeme sınıfını temsil etmektedir. Granatlar ve ferritler olarak ayrılmaktadır. Manyetik geçirgenlikleri yüksek olduğu için koruma uygulamalarında çok önemli yer tutmaktadırlar. Ferritler kristal bir yapıya sahip olup yüksek manyetik geçirgenlik değerleri (15'e kadar bağıl dielektrik geçirgenliği) sunmaktadırlar [40].

Ferrit, demir, kobalt, nikel, çinko, magnezyum ve bazı nadir toprak metallerinin oksitlerinden oluşan yalıtkan seramik sınıfı için genel bir terimdir. Mevcut ferrit çeşitliliği fazladır. Bunun nedeni, her üretici kendi oksit bileşimini geliştirmiştir. Ferritler, 10 MHz üzerindeki istenmeyen sinyallerin zayıflamasını sağlamada etkilidir. Aşağıda örnek ferrit malzemeler gösterilmiştir [36].



Şekil 3.1. Ferrit malzemeler

İnce filmler ve iletken kaplamalar

Günümüz teknolojisinde, ince film şeklinde oluşturulabilen malzemeler kalkanlama amaçlı kullanıma sunmuştur. Bu malzemelerin kalınlıkları yaklaşık 1 mm'den onlarca mm'ye kadar değişmekte ve kalın bariyerlere kıyasla ağırlık ve çoğu zaman maliyet açısından büyük avantajlar sunabilmektedir. Bazı uygulamalara özel olarak, topraklamayı kolaylaştırdığı veya elektrostatik boşalmalara iletken yollar sunduğu için seçilmektedir. İnce iletken katmanların kalkanlama performansı genellikle yalnızca onlarca MHz'den daha yüksek frekanslarda kabul edilmektedir. İnce bir film, beklenen kaynak konumuna göre dahili veya harici olarak bir mahfaza üzerine çeşitli şekillerde uygulanan iletken bir kaplama şeklini alabilmektedir. Birçok uygulama yöntemi olmakla beraber yaygın olarak; akımsız kaplama, iletken boyama, vakum metalleştirme, elektrolitik biriktirme yöntemleri kullanılmaktadır. Aşağıda Çizelge 3.3'te kaplama değerleri verilmiştir [41].

Çizelge 3.3. Kaplama değerleri

Kaplama Tekniği	Direnç (ohm)	Kalınlık (mm)
Akımsız kaplama	0,01–0,03	1–100
İletken boyama	0,02–0,05	0–75
Vakum metalleştirme	0,05–0,1	5–10
Elektrolitik biriktirme	0,007–0,02	10–25

İletken polimerler

İletken polimerler, EM radyasyonunu korumak için umut verici malzemelerdir. Nispeten yüksek iletkenlik ve dielektrik geçirgenlik değerleri ve kimyasal işleme yoluyla bu parametrelerin kontrol kolaylığı nedeniyle EMG'yi azaltabilmekte ve ortadan kaldıracılabilmektedir. Çizelge 3.3'te çeşitli dolgu malzemeleri ile yapılan kompozitler için SE değerleri verilmiştir. Son zamanlarda, yapılan çalışmalarda Bakıra kıyasla yüksek iletken katkılı polianilin, polipirol ve poliasetilenin yüksek koruma etkinliği sağladığı gösterilmiştir. Çeşitli dolgu malzemeleri içeren kompozitlerde 1-2 GHz' de EMG kalkanlama etkinliği Çizelge 3.4'te gösterilmiştir [42].

Çizelge 3.4. Kompozitlerde kalkanlama etkinliği

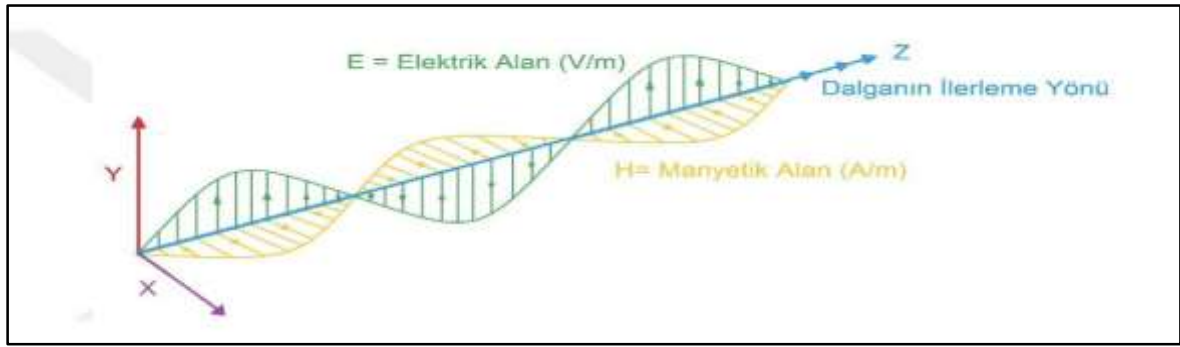
Dolgu	Hacim %	EMG Kalkanlama Etkinliği (dB)
Aluminyum parça (15 x 15 x 0,5 µm)	20	26
Çelik fiber (1,6 çap x 30-56 µm)	20	42
Karbon fiber (10 µm çap x 400 µm)	20	19
Nikel parçacık (1-5 µm çap)	9,4	23
Nikel fiber (2 µm çap x 2mm)	19	58
Karbon filaman (0,1 µm çap x > 100 µm)	7	32
Nikel filaman (0,4 µm çap x > 100 µm)	7	87

3.2.3. Diğer malzemeler

Temel kullanım amaçları elektromanyetik girişim kalkanlaması olmamasına rağmen kimyasal bileşiminde ve yapısında yapılabilecek değişikliklerle EMG kalkanlama malzemesi olarak kullanılabilecek malzemelerdir. Genel olarak; nanomalzemeler, iletken camlar, şeffaf malzemeler, süper iletkenler ve iletken kâğıtlar bu başlıkta sayılabilmektedir [43].

3.3. Matematiksel Olarak Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliği

Kalkanlama etkinliği, çarpan enerjinin artık enerjiye oranıdır. Elektromanyetik dalga bir kalkandan geçtiğinde soğurma ve yansıma gerçekleşir. Kalıntı enerji, kalan enerjinin kalkan tarafından ne yansıtılan ne de emilen ancak kalkandan çıkan kısmıdır. Tüm elektromanyetik dalgalar Şekil 3.2’te görüldüğü gibi manyetik alan (H) ve elektrik alanı (E) olmak üzere iki temel bileşenden oluşur. Bu iki alan birbirine dik ve dalga yayılma yönü iki bileşeni içeren düzleme dik açılardadır [44].



Şekil 3.2. Elektromanyetik dalganın gösterimi

3.3.1. Matematiksel denklemler

Herhangi bir ortamdaki elektromanyetik dalganın davranışı söz konusu ortamın karakteristiğine bağlı olarak Maxwell denklemleri ile açıklanabilir. Elektromanyetik teoremin özeti niteliğinde olan Maxwell denklemleri ilk kez James Clerk Maxwell tarafından formülize edilmiştir. Diferansiyel formda genelleştirilmiş Maxwell denklemlerinin ifadeleri Eş. 3.1-3.4’te verilmektedir.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.3)$$

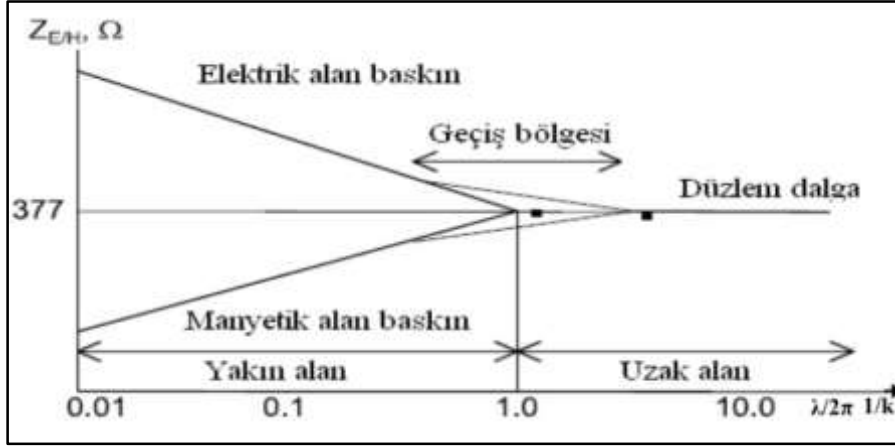
$$\nabla \cdot \vec{H} = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.4)$$

Eş. 3.1’de D elektrik akı yoğunluğunu, ρ_v ise elektrik yük yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu denklem Gauss yasası olarak bilinmekle birlikte, kapalı bir yüzey için geçerlidir. Eş. 3.2’de B manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu denklem kapalı bir yüzey boyunca toplam manyetik akının sıfır olması gerektiğini gösterir. Eş. 3.3’te E elektrik alan şiddetini ifade etmektedir. Bu denklem zamanla değişen manyetik akının elektrik alan oluşturacağını açıklamaktadır. Eş. 3.3’te H manyetik alan şiddetini, J ise akım yoğunluğunu göstermektedir. Zamanla değişen elektrik alanın nasıl manyetik alan oluşturacağını açıklamakta olup, Ampere devre kanunu olarak ifade edilmektedir.

3.3.2. Uzak ve yakın alanlar için elektromanyetik alan

Radyasyon yayılımı yapan kaynak ile gözlem noktası arasındaki mesafeye (r) bağlı olarak dalga boyu “ λ ” olan elektromanyetik yayılım bölgesi üç kısma ayrılır. Yakın alan bölgesi veya indüksiyon alanı; gözlem noktasının kaynaktan uzaklığı, $\lambda/2\pi$ ifadesinden küçük olup elektromanyetik dalganın empedansı kaynak özelliklerine bağlı ve Şekil 3.2’ de görüleceği üzere elektrik alan ve manyetik alan arasındaki oran sabit değildir. Elektrik alanın (E) manyetik alana (H) oranı dalga empedansıdır. Bu bölgede dalga empedansı hesaplaması Eş. 3.5 ve Eş. 3.6’da gösterilmektedir.

Uzak alan bölgesi veya radyasyon alanı; gözlem noktasının kaynaktan uzaklığı, $\lambda/2\pi$ ifadesinden büyük olup bu bölgede elektromanyetik dalga, düzlem dalga haline gelmekte ve hava için öz dalga empedansı $Z = \frac{E}{H} = 377 \Omega$ olarak hesaplanmaktadır. Yakın alanda, E ve H arasındaki oran ağırlıklı olarak kaynak tarafından belirlenir. Kaynak ağırlıklı olarak elektrik ise, ilgili manyetik alan ($1/r^2$) oranında zayıfladığından, elektrik alan kaynaktan ($1/r^3$) oranında zayıflar. Gözlemci bir elektrik kaynağından uzaklaştıkça ve geçiş bölgesine yaklaştıkça dalga empedansı azalır. EMG koruma, yakın alan koruma bölgesi ve uzak alan koruma bölgesi olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır [44].



Şekil 3.3. Elektromanyetik alanları kaynaktan mesafeye göre gösterimi

$$Z = \frac{E}{H} \quad (3.5)$$

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (3.6)$$

Burada;

- Z , dalga empedansı (ohm)
- σ , iletkenlik (S/m)
- ω , açısal hız
- μ , geçirgenlik (H/m) (hava için, $4\pi \cdot 10^{-7}$)
- ϵ , dielektrik sabiti (F/m) (hava için, $8,85 \cdot 10^{-12}$)

3.3.3. Kalkanlama etkinliği hesaplaması

Kalkanlama etkinliği hesaplamasında literatürde birden fazla yöntem bulunmaktadır. Yaklaşım olarak bu tez kapsamında yaygın kullanılan iki yöntemden bahsedilecektir. İlk yöntem olan ve bu tez çalışmasında hesaplamaların yapıldığı yaklaşım; kalkanlama etkinliği (SE), elektrik ve manyetik alanın zayıflamasından önceki ve sonraki alanın oranı olup Eş. 3.7 ve Eş. 3.8'te ifade edilmektedir:

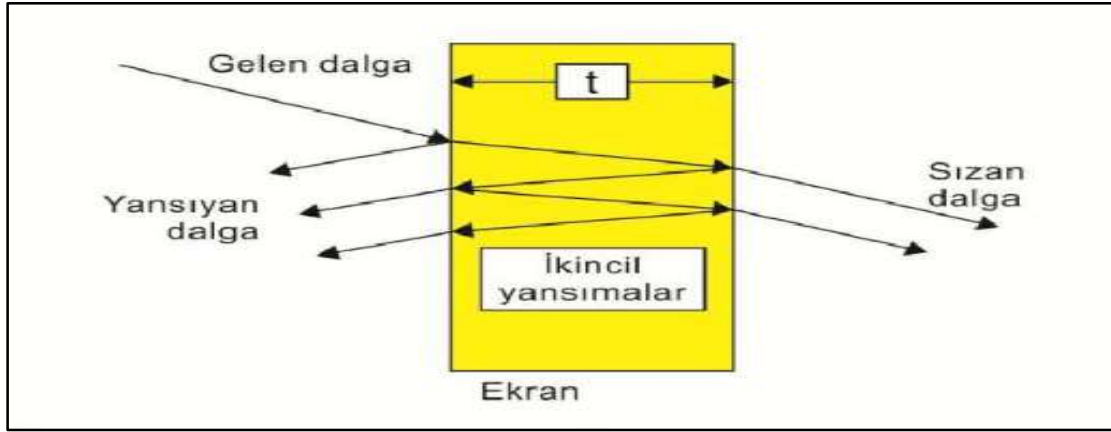
$$SE = 20 \log(E_i/E_t) \quad (3.7)$$

$$SE = 20 \log(H_i/H_t) \quad (3.8)$$

E ve H elektrik ile manyetik alanlar, alt simgeler t ve i ise iletilen ile gelen dalgaları ifade etmektedir. E , volt/m cinsinden ve H , amper/m cinsinden ölçülmektedir. SE , frekansın bir fonksiyonudur.

İkinci yöntem ise Schelkunoff'un yaklaşımı ile ifade edilmekte olup, kalkanlama hesabı hem soğurma hem de yansıma bileşenleri olan bir iletim hattı sorunu olarak ele alınmaktadır. Soğurma, kalkanın içinde üretilen ısıнын sonucu olup yansıma ise, gelen dalga ile kalkan empedansı arasındaki empedans farkının sonucudur.

Bir elektromanyetik dalganın zayıflaması, Şekil 3.4' te gösterildiği gibi üç mekanizma ile gerçekleşir.



Şekil 3.4. Elektromanyetik kalkanlama mekanizması

Literatürde kullanılan ve daha kapsamlı bir analiz sunan bu yöntemde yansıma kaybı (SE_R), soğurma kaybı (SE_A) ve çoklu yansıma kayıplarının (SE_M) toplanmasıdır. İlgili eşitlikler Eş. 3.9'da verilmektedir [36].

$$SE = SE_R + SE_A + SE_M \quad (3.9)$$

Böylece kalkanlama etkinliği, tümünün toplamı olarak ifade edilmektedir.

Yansıma kaybı

Yansıma kaybı (SE_R) Eş. 3.10'da görüldüğü üzere; σ_T toplam iletkenlik, $\omega = 2\pi f$ açısal frekansı, μ_r boş alandaki bağıl geçirgenlik olarak tanımlanır. Denklemden SE_R yansıma

kaybının, kalkan malzemesinin iletkenlik (σ_r) ve geçirgenlik (μ_r) oranının bir fonksiyonu olduğunu gösterir. $\mu = \mu_0 \mu_r$; sırasıyla hava ve malzemenin manyetik geçirgenliğini (permeabilities), $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ sırasıyla hava ve malzemenin dielektrik katsayısını (permittivities) göstermektedir.

Denklemden de anlaşılabacağı gibi frekans arttıkça SE_R azalır [37].

$$SE_R = 10 \log\left[\frac{\sigma_r}{16\omega\varepsilon_0 \mu_r}\right] \quad (3.10)$$

Soğurma kaybı

EMG kalkanlamanın ikincil temel mekanizması soğurmadır. Soğurma kaybı (SE_A) ürünün $\mu_r \sigma_r$ bir fonksiyonudur, oysa yansıma kaybı (SE_R) σ_r / μ_r oranının bir fonksiyonudur, burada ' σ_r ' Bakıra göre bağıl elektriksel iletkenliğidir ve ' μ_r ' bağıl manyetik geçirgenliktir. Çizelge 3.5'de yaygın olarak kullanılan bazı metal ve alaşımlar için kalkanlama performansının hesaplanmasında kullanılan bu değerler özetlenmiştir [45].

Çizelge 3.5. Bazı malzemelerin elektromanyetik değerleri

Malzeme	$\sigma_r \mu_r$	σ_r / μ_r
Gümüş	1,05	1,05
Bakır	1	1
Altın	0,7	0,7
Alüminyum	0,61	0,61
Kalay	0,15	0,15
Çelik	100	1×10^{-3}
Paslanmaz Çelik	10	4×10^{-5}
Mumetal	600	$1,5 \times 10^{-6}$
Permalloy	3000	3×10^{-7}

Deri kalınlığı (δ) aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir.

$$\delta = 2,6 / \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (3.11)$$

Burada; t , kalkan kalınlığı, f (Hertz) frekans ve δ , ise deri kalınlığı için kullanılır.

Çizelge 3.6. Deri kalınlıklarının frekansla değişim değerleri

Frekans	Bakır (cm)	Alüminyum (cm)	Çelik (cm)
60 Hz	0,8509	1,08966	0,08636
100 Hz	0,6604	0,84582	0,06604
1 kHz	0,20828	0,2667	0,02032
10 kHz	0,06604	0,08382	0,00762
100 kHz	0,02032	0,02794	0,002032
1 MHz	0,00762	0,00762	0,000762
10 MHz	0,002032	0,00254	0,000254
100 MHz	0,0006604	0,000762	0,0002032
1000 MHz	0,0002032	0,000254	0,0001016

Soğurma kaybı eşitliği Eş. 3.12’de verilmiştir. Burada görüldüğü üzere, belirli bir malzeme için soğurma kaybı frekansı arttıkça artar [46].

$$SE_A = 3,34t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} = 8,68 \frac{t}{\delta} \quad (3.12)$$

Çoklu yansıma kaybı

EMG kalkanlamanın üçüncü temel bileşeni çoklu iç yansımadır ve SE_M , aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$SE_M = 20 \log(1 - e^{-2t/\delta}) \quad (3.13)$$

Eş. 3.13’te SE_M değerinin soğurma kaybıyla (SE_A) yakından ilişkili olduğu görülmektedir. Ancak, pratik kullanımda $SE \geq 10$ dB olduğunda SE_M değeri ihmal edilebilir [17,44].

3.4. Kalkanlama Etkinliğine Etki Eden Faktörler

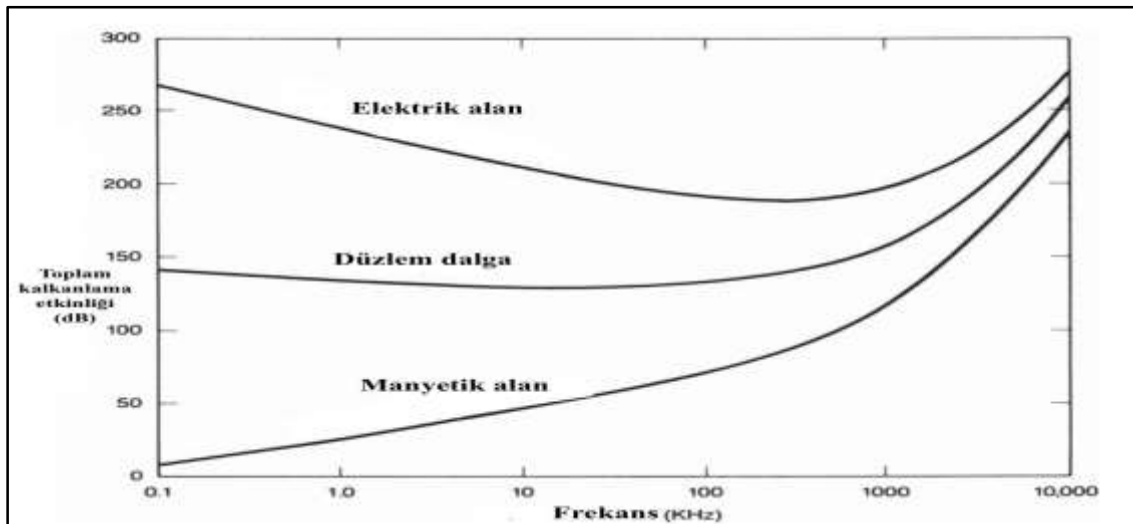
Elektromanyetik koruma etkinliğinin değeri aşağıdaki parametrelere bağlıdır.

Gelen elektromanyetik dalganın frekansı

Artan frekansla yansıma kaybı azalırken, artan frekansla soğurma kaybı artmaktadır. Artan frekansla yansıma kaybının azalması, kalkanlama malzemesinin empedansının frekansla artması nedeniyle oluşurken, frekansla birlikte deri kalınlığı azalması nedeniyle soğurma kaybı frekansla artar [47].

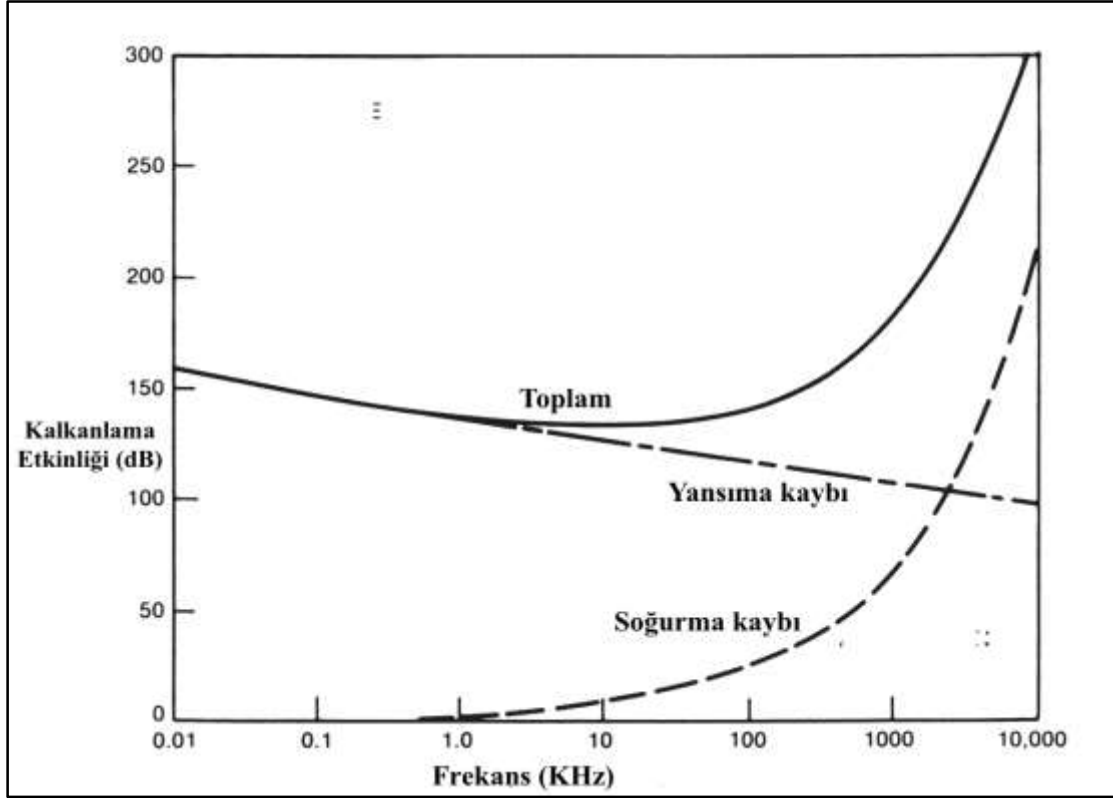
Eş. 3.12, Eş. 3.13 ve Eş. 3.14’te görüldüğü üzere bu denklemler, yansıma kaybının ve soğurma kaybının frekansla değişimini açıkça göstermektedir.

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 incelendiğinde düşük frekanslarda, elektrik alanları için birincil koruma mekanizmasında yansıma kaybı, yüksek frekansta ise soğurma kaybı birincil koruma mekanizması olduğu görülmektedir. Aşağıda Şekil 3.5’te 0,05 cm kalınlığında katı alüminyum kalkanın elektrik alan, düzlem dalga ve manyetik alan kalkanlama etkinliği verilmiştir. [36].



Şekil 3.5. Elektrik alan, düzlem dalga ve manyetik alan kalkanlama etkinliği

Aşağıda Şekil 3.6’da 0,05 cm kalınlığında Bakır malzemenin kalkanlama etkinliği verilmiştir [36].



Şekil 3.6. Kalkanlama etkinliğinin frekansla değişimi

Elektromanyetik alan kaynağı türü

Bir düzlem dalga, elektrik alan ve manyetik alan için yansıma kaybı denklemleri farklı olduğundan, SE değeri elektromanyetik alan kaynağının türüne bağlıdır [48].

Kalkan kalınlığı

Soğurma kaybı kalkanın kalınlığı arttıkça artarken yansıma kaybı kalkanın kalınlığından bağımsızdır.

Koruyucu malzemenin iletkenliği, geçirgenliği ve dielektrik sabiti

Daha yüksek iletkenlik değerlerine sahip daha kalın kalkanlar için daha iyi EM dalga soğurma özellikleri elde edilebilmektedir [47].

Frekans, geçirgenlik değeriyle yakından ilgili olup frekans artıkça geçirgenlik değeri azalmaktadır. Çelik için 100 kHz frekans değerinden sonra geçirgenlik azalmaya başlamaktadır.

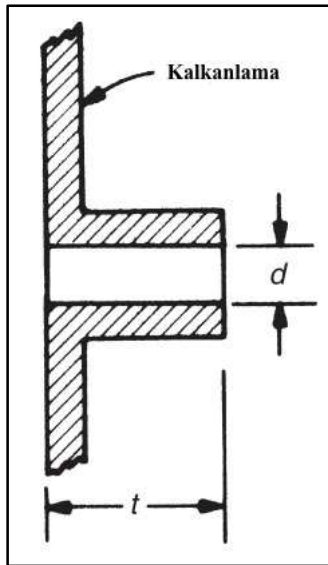
Kalkan malzemesinin kaynaktan uzaklığı

Dalga empedansına göre uzaklığa bağlı olarak elektromanyetik alan azalmaktadır.

Kalkanın geometrisi

SE değeri, kalkanın geometrisine, geliş yönüne ve kalkan içindeki alanın ölçüldüğü konuma göre değişmektedir [49]. Kalkanın geometrisinde derinlik varsa, yani bir dalga kılavuzu oluşturacak şekilde şekillendirilmişse, bir açıklıktan ek zayıflama elde edilebilir. Bir dalga kılavuzunda zayıflatıcı etki halinde bir kesme frekansına sahiptir. Yuvarlak bir dalga kılavuzu için kesme frekansı (Hz) Eş 3.14'te verilmiştir. Burada l değeri dalga kılavuzunun enine kesitinin cm cinsinden uzunluğu, d değeri açıklığın cm cinsinden uzunluğu, t değeri ise açıklığın cm cinsinden derinliğidir.

$$f_c = \frac{14,98 \cdot 10^9}{l} \quad (3.14)$$



Şekil 3.7. Kalkan geometrisinin gösterimi

Kalkandaki açıklık

Açıklık teorisine göre, malzemenin kalınlığının açıklık boyutundan küçük olması koşuluyla, açıklık sayısı arttıkça kalkanlama azalır [49]. Düşük frekanslı manyetik alanlar dışında, açıklık değerleri ile kalkanlama etkinliğini artırmanın olabileceği gösterilmiştir. Açıklıkların manyetik alan kaçağı üzerinde elektrik alan kaçağına göre daha fazla etkisi vardır. Buna göre, manyetik alan sızıntısını en aza indirme yöntemlerine daha fazla önem verilmektedir. Bir açıklıktan sızıntı miktarı temel olarak aşağıdaki üç ögeye bağlıdır [36].

- Açıklığın maksimum doğrusal boyutu
- Elektromanyetik alanın dalga empedansı
- Dalganın frekansı.

Açıklık miktarının kalkanlamaya etkisi aşağıda verilmiştir.

$$SE = 20 \log \frac{150}{f l} \quad (3.15)$$

Burada f , Hz biriminde frekans, l ise metre birimde açıklık miktarıdır.

Kaçak miktarını alanın değil maksimum doğrusal boyutun belirlediği gerçeği, kalkanlamaya devre teorisi yaklaşımı kullanılarak en iyi şekilde özetlenebilmektedir. Bu yaklaşımda, gelen elektromanyetik alan kalkanın içine akım indüklemektedir ve bu akım daha sonra ek bir alan oluşturmaktadır. Yeni alan, orijinal alanı iptal etmektedir. Bu iptalin gerçekleşmesi için, indüklenen kalkan akımının indüklendiği şekilde bozulmadan akmasına izin verilmelidir [29]. Bir açıklık, indüklenen akımı farklı bir yolda akmaya zorlarsa, üretilen alan orijinal alanı tamamen iptal etmeyecek ve kalkanlama etkinliği azalacaktır. Akım sapmaya ne kadar zorlanırsa, kalkanlama etkinliğindeki azalma o kadar büyük olacaktır.

3.5. EMG Kalkanlama Ölçüm Yöntemleri

Belirli bir koruma malzemesinin EMG Koruma etkinliğini ölçmek için yaygın olarak kullanılan dört test yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; açık alan veya boş alan yöntemi, ekranlı kutu yöntemi, ekranlı oda yöntemi, eşeksenli iletim hattı yöntemidir. Aşağıda bu yöntemlerin açıklaması verilmiştir [34].

Açık alan veya boş alan yöntemi

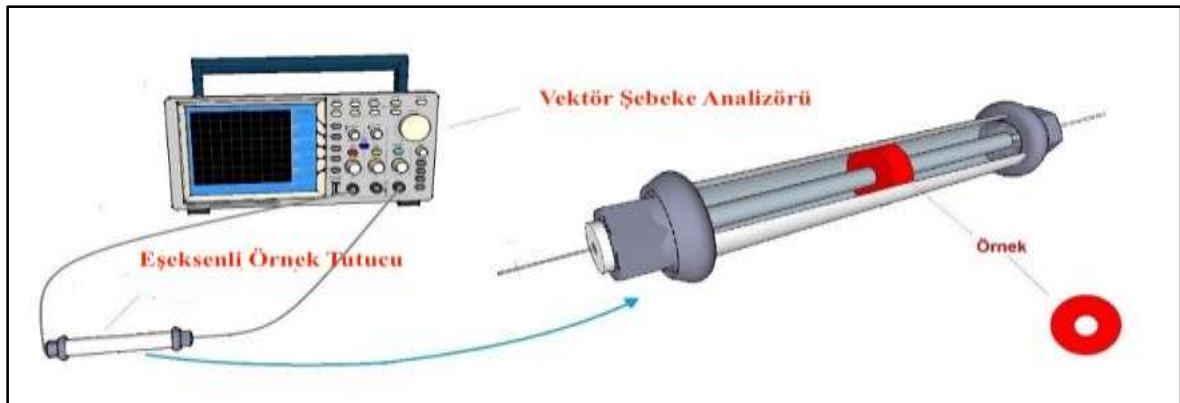
Açık alan veya boş alan yöntemi, tam bir elektronik düzeneğin pratik kalkanlama etkinliğini değerlendirmek için kullanılır. Böylece bitmiş bir üründen yayılan elektromanyetik dalgaları ölçmektedir. Test yöntemi, cihazın bir alıcı antenden 30 m uzağa monte edilmesini yayılan emisyonların kaydedilmesini içerir. Aynı testte, elektrik hattından iletilen emisyonlar da kaydedilmektedir [48].

Ekranlı kutu yöntemi

Ekranlı kutu yöntemi, farklı koruma malzemelerinin test numunelerinin karşılaştırmalı ölçümleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Test, bir metal kutu ve bir duvarında bir numune portu olan ve bir alıcı anten ile donatılmış elektriksel olarak sıkı bir ek yeri içerir. Kutunun dışına bir verici anten yerleştirilmekte ve anten tarafından alınan sinyallerin yoğunluğu ölçülmektedir [48].

Eşeksenli iletim hattı yöntemi

Kalkanlama etkinliğinin ölçümü için eşeksenli iletim hattı yöntemi, korumalı kutu tekniğinin sınırlamalarının üstesinden gelmek ve daha detaylı ölçümler yapmak için kullanılmaktadır. Bu tekniğin en büyük avantajı, farklı laboratuvarlarda elde edilen sonuçların karşılaştırılabilir olmasıdır. Ek olarak, eşeksenli iletim hattı, verileri yansıyan, emilen ve iletilen bileşenlere ayırmak için de kullanılabilir. Şekil 3.8’de eşeksenli hat yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [50].



Şekil 3.8. Eşeksenli hat yönteminin şematik olarak gösterimi

Ekranlı oda yöntemi

Ekranlı oda yöntemi, ekranlı kutu yönteminin sınırlamalarının üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. Genel prensip, ölçüm sistemi bileşenlerinin, sinyal oluşturunun, verici antenin, alıcı antenin ve kayıt cihazının her birinin parazit olasılığını ortadan kaldırmak için ayrı odalarda izole edilmesidir. Ek olarak, antenler yankısız odalara yerleştirilmiştir. Ekranlı kutu yöntemiyle karşılaştırıldığında güvenilir sonuçların elde edilebildiği frekans aralığı büyük ölçüde genişletilmiştir [34,48].

3.6. EMG Kalkanlama Ölçüm Standartları

Son birkaç on yılda elektrikli ve elektronik ürünlerin çoğalması ve bunlarla ilişkili EMG sorunları, dünya çapında birçok ülkede zorunlu EMU standartlarının geliştirilmesi ve uygulanması gerekliliğini artırmıştır. Ayrıca, radyo hizmetlerinin hızla artan kullanımı, günümüzde elektrikli/elektronik ekipmanın yaklaşık 1 ila 15 V/m veya daha yüksek parazit alan seviyeleriyle çalıştığı kentsel alanlarda yüksek seviyeli EMG'lerin çoğalmasında çarpıcı artışlara yol açmıştır. Sonuç olarak, konut, iş ve endüstriyel ortamlarda kullanılmak üzere pazarlanan ürünlerin, tasarlandığı gibi çalışmasını ve rahatsız edici emisyonları önleyebilecek bir seviyeden yeterince düşük olmasını sağlamak için EMG'ye karşı standartlar yayınlanmıştır [37].

Uluslararası kuruluşlar, EMU gerekliliklerinin uygulanması için tavsiyeler sağlayan belgeler çıkarmış olsalar bile, her ülkenin kendi ulusal standartlarında kendi test araçları seti, test süreçleri ve test limitleri ile kendi tavsiyeleri vardır. Başlıca uluslararası kuruluşlar, Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO) ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC)'dur. Bu standartlarının yanı sıra Avrupa'da European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal İletişim Komisyonu (FCC), Japonya'da Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment (VCCI) tarafından yayınlanan standartlar bulunmaktadır. Bu uluslararası standartlara ek olarak, Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI), Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), ABD Savunma Bakanlığı (DoD), Ulusal Güvenlik Teşkilatı (NSA) bulunmaktadır.

Kalkanlama ile ilgili konulardaki başlıca EMU standartları temel olarak; koruma, yayılan emisyon ve yayılan bağışıklık konularını ele almaktadır. Genel olarak, ölçüm testi için prosedürler ve yöntemlerin yanı sıra performans seviyeleri ve izin verilen maksimum limitler belirlenmektedir. Bu tez çalışmasında IEEE Std-299 standardı ve BTK Elektronik Haberleşme Cihazlarından Kaynaklanan Elektromanyetik Alan Şiddetinin Uluslararası Standartlara Göre Maruziyet Limit Değerlerinin Belirlenmesi, Kontrolü ve Denetimi Hakkında Yönetmelik referans alınmıştır.

IEEE Std-299

Mevcut IEEE STD-299, 9 kHz ila 18 GHz (50 Hz ve 100 GHz'e kadar uzatılabilir) frekanslarda muhafazalar için SE'yi ölçmek için tek tip prosedürleri açıklamaktadır. Belge, geçiş/başarısızlık için herhangi bir sınır vermemektedir. Buna ek olarak, standart, kalkanın etkinliğine güven verebilecek bir dizi test frekansını önerse de, bir test planına göre seçilmesi gerektiği açıkça belirtilmiştir [37,51]. Bu yöntemdeki ölçüm aralığı üç alt özelliğe ayrılmıştır [52].

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

3.7. Literatür Taraması

Bu bölümde, elektromanyetik kalkanlama ile ilgili güncel makaleler özetlenmiştir.

Thomassin ve arkadaşları [43] EMG koruyucu malzemeler olarak polimer/karbon bazlı kompozitlerin tasarımı ve karakterizasyonundaki en son araştırmaları gözden geçirmişlerdir. EMG malzemelerinin performanslarını iyileştirmek ve termal yönetim ve mekanik direnç gibi ek özellikler katmak için araştırmalar yapmışlardır Polimer/karbon parçacıkları kompozitlerine dayalı EMG koruyucu malzemeleri hazırlamak için geliştirilen farklı stratejiler gözden geçirilmiş, verimli bir kalkan yapmak için, malzemelerin orta derecede yüksek elektrik iletkenliği ve/veya yüksek dielektrik sabiti sergilemesi gerektiği ortaya koyulmuştur.

Afilipoaei ve arkadaşları [53] yansıma ve yeniden yansıma derecelerinde farklı yapısal veya yapısal olmayan kompozitlerin elektromanyetik radyasyona verdiği yanıtı gözden geçirmiş ve karşılaştırmışlardır. EMG etkisini ortadan kaldırmak için geliştirilen ve önerilen bazı kompozit malzemeleri gözden geçirilmişlerdir. Elektriksel ve mekanik performanslar arasındaki denge arandığında, karbon allotropisinin çoğunlukla uygun olduğu kanıtlamışlardır. Ayrıca; matrise dahil edilen ağırlık yüzdesi, koruma etkinliğinde çok önemli bir rol oynadığını ve ne kadar fazla olursa o kadar çok kalkanlama sağladığını göstermişlerdir. Ancak her zaman mekanik ve termal özellikler göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Amaro ve arkadaşları [51] düzlemsel malzemelerin SE'sini ölçmek için en yaygın kullanılan standartları incelemişlerdir. ASTM D4935-18 standardı tarafından sunulan sorunları hafifleten bir soğurucu kutuya dayalı alternatif bir SE ölçüm yöntemi önermişlerdir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin birkaç konsantrasyonuna ve iki farklı elyaf takviyesine dayalı nanomalzeme numunelerinin SE'sini elde etmişlerdir.

Neruda ve arkadaşları [29] dokuma-tekstil kompozit malzemeler ile üretilmiş elektriksel iletkenliği yüksek dokuma kumaşların elektromanyetik kalkanlama etkinliğini araştırılmıştır. Kaplamadaki açıklık değerlerinin dokuma kumaşlardaki etkisine odaklanmış ve yeni model önermişlerdir.

Akram ve arkadaşları [3] iletken tekstillerin temellerini EMG kalkanlamanın etkilerini ve EMG kalkanlama tekstilleri yapmak için kullanılan modern malzemeleri ele almışlardır. Çoğunlukla malzemeler, radyasyonların kirliliğinin gelişmesine yol açan koruma sırasında yansıma baskın mekanizma gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Bu nedenle, elektromanyetik kalkanlama etkinliği için soğurma mekanizması gösterme yeteneğine sahip malzemeler kullanılması gerektiğini dile getirmişlerdir.

3.8. Bölüm Değerlendirmesi

Manyetik geçirgenlik ve iletkenlik değerlerine bağlı olarak elektromanyetik kalkanlama hesaplanmasının verildiği denklemler incelendiğinde, yüksek iletkenliğe sahip metaller, karbon türevleri, iletken polimerler ve polimer kompozitler ile geçirgenlik değeri yüksek manyetik malzemelerin kalkanlama malzemeleri olarak kullanılabileceği görülmektedir. Bu

malzemeler arasında metaller ve karbon türevleri; düşük maliyeti, seri üretime uygunluğu ve fiziksel avantajları nedeniyle iletken polimer kompozitler diğer alternatiflere göre öne çıkmakta ve daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Farklı metal türleri için elektriksel iletkenlik ve geçirgenlik değerlerine göre etkili kalkanlama mekanizması değerlendirildiğinde, yansıma mekanizmasının yüksek iletkenliğe sahip gümüş ve Bakır için etkili olduğu, soğurma mekanizmasının ise yüksek geçirgenlik değerine sahip nikel için daha etkili olduğu görülmektedir.

Kalkanlama verimi yüksek olan metaller, fiziksel özellikleri ve uygulanabilirlikleri açısından değerlendirildiğinde, yüksek maliyet ve yoğunlukları, uygulama/üretim güçlükleri ve oksidasyon nedeniyle zamanla kalkanlama özelliklerinin azalması gibi önemli dezavantajlara sahiptirler. Yapılan çalışmalar incelendiğinde bu malzemeler ile gerçekleştirilmiş elektromanyetik kalkanlama mekanizmalarının etkinliği ise kalkan malzemenin elektriksel/manyetik özelliklerine, kalınlığına ve dalga frekansına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Elektromanyetik kalkanlamada önemli parametrelerden olan, yansıma kaybının ortam empedansı ve frekans ile ters orantılı, iletkenlik ile doğru orantılı ve kalınlıktan etkilenmediği görülmektedir. Soğurma kaybının ise, frekans, geçirgenlik ve iletkenlik değerleriyle doğru orantılı olduğu ayrıca artan malzeme kalınlığı ile artacağı görülmektedir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen ölçümler gerek frekans aralığı gerekse ölçüm mesafelerinin uygunluğu göz önüne alındığında ölçüm standardı olarak IEEE Std-299 standardı ve Elektronik Haberleşme Cihazlarından Kaynaklanan Elektromanyetik Alan Şiddetinin Uluslararası Standartlara Göre Maruziyet Limit Değerlerinin Belirlenmesi, Kontrolü ve Denetimi Hakkında Yönetmelik referans alınmıştır.

Elektrik alanın (E) manyetik alana (H) oranı dalga empedansıdır. Uzak alanda, bu oran ortamın karakteristik empedansına eşittir (örneğin, hava veya boş alan için $Z_0 = E/H = 377 \Omega$).

Yakın alanda ise, kaynağın yüksek akımı ve düşük voltajı ($E/H < 377$) ise, yakın alan ağırlıklı olarak manyetiktir. Tersine, kaynak düşük akıma ve yüksek gerilime sahipse ($E/H > 377$), yakın alan ağırlıklı olarak elektriktir.

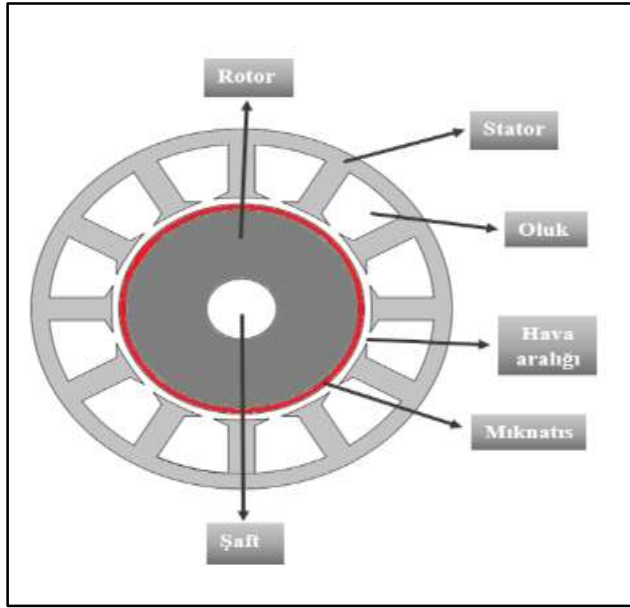
Ölçümleri gerçekleştirilen jeneratörün çalışma frekansı Hz mertebesinde olduğundan ve ayrıca jeneratörün elektrik alan baskın olduğundan, ölçümler elektrik alan üzerinden değerlendirilmiştir. Daha önceki bölümlerde soğurma kaybının düşük frekanslarda etkisinin az olduğu gösterilmiş olduğundan, yansıma kaybının etkisini elektromanyetik kalkanlamada daha fazla olacağı değerlendirilmiştir.

4. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON JENERATÖRLER

Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörlerin (SMSJ) alan uyarımı, DC uyarımlı alan sargısı yerine kalıcı mıknatıslar aracılığıyla gerçekleştirilir. Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlerin hem doğrudan tahrikli hem de çok kademeli dişli versiyonları mevcuttur. Doğrudan tahrikli SMSJ'ler, elektrikle uyarılan jeneratörlere göre daha yüksek enerji verimleri ve daha yüksek güç-ağırlık oranları nedeniyle tercih edilir. Sağlam yapısı nedeniyle doğrudan tahrikli SMSJ'lerde genel verimlilik artmaktadır Tam ölçekli dönüştürücüsü sayesinde, arıza giderme yetenekleri ve reaktif güç desteği yeteneği, SMSJ 'nin önemli avantajlarıdır. Tam ölçekli bir dönüştürücü, jeneratörün farklı frekanslarda çalışmasına da izin vermektedir [54].

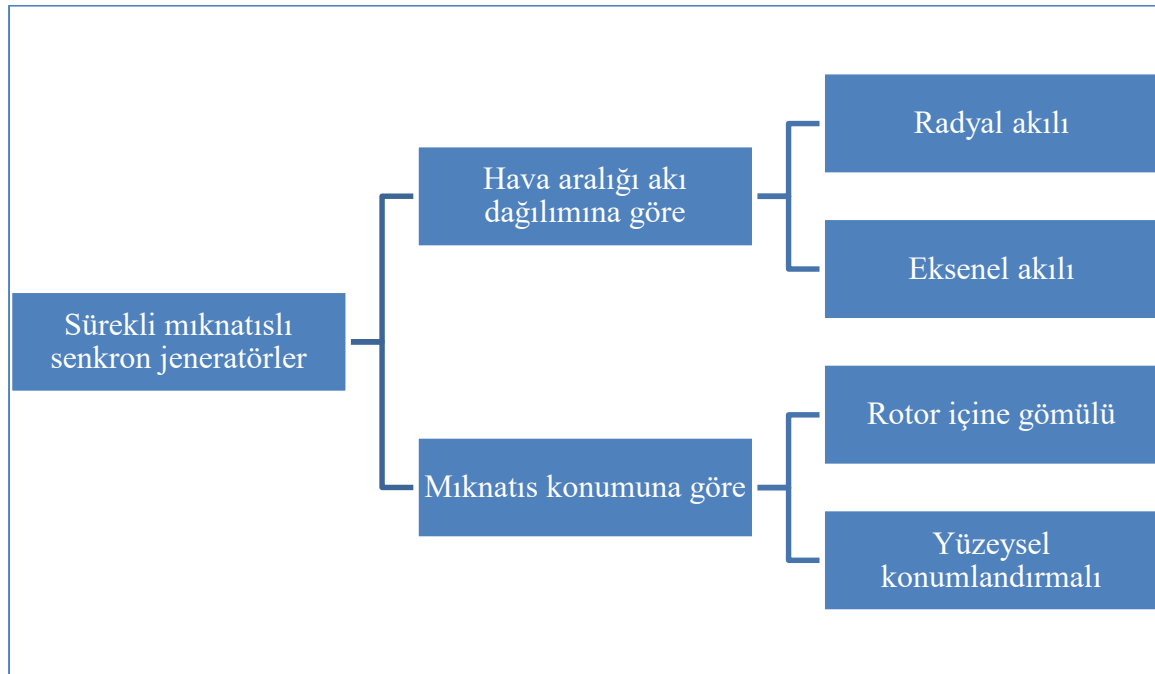
SMSJ 'ler için doğrudan tahrik teknolojisinin gelişimi, özellikle açık deniz rüzgar türbinleri için artan verimlilik ve güvenilirlik sorunları nedeniyle son on yılda dikkat çekmeye başlamıştır [55].

SMSJ'lerdeki kalıcı mıknatıslar, akı yollarına bağlı olarak farklı düzenlenimlerde imal edilebilmektedir. Bunlar radyal akı (RF), eksenel akı (AF) ve enine akı (TF) olarak adlandırılır. Radyal akı konseptinde, manyetik akı rotası rotor milinin yönüne diktir. Eksenel akı konseptinde, manyetik akı yolu rotor milinin yönüne paraleldir. Son olarak enine akı konseptinde, manyetik akı yolu milin dönüş yönüne diktir. Ek olarak, SMSJ'ler, yuva tipi ve stator/rotor konumu gibi mekanik yapılarına göre sınıflandırılabilir. Bir SMSJ parçasının bölümleri, aktif ve aktif olmayan kısımlar olarak sınıflandırılabilir. Aktif kısım, demir çekirdek ve Bakır gibi makinedeki elektromanyetik elemanlardan oluşur. Aktif olmayan kısım çelik, mil ve diğer mekanik çerçeve yapıları gibi mekanik parçalardan oluşmaktadır [54,55]. Bu bölümde öncelikle sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler açıklanmış olup ayrıca bu tez çalışmasında ölçümleri gerçekleştirilen ve yeni tasarlanan eksenel/radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratör için bilgiler verilmiştir. Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler, mevcut frekans ve kutup sayısı ile ilişkili olarak sabit bir hızda dönerler. Şekil 4.1' de SMSJ'nin yapısı gösterilmiştir



Şekil 4.1. SMSJ'nin kesit yapısı

Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler Şekil 4.2' de gösterildiği gibi mıknatıs konumlandırmasına ve hava aralığı akı dağılımına göre sınıflandırılabilir. Hava aralığı akı dağılımı sınıfında radyal akılı ve eksenel akılı senkron jeneratörler bulunmaktadır.

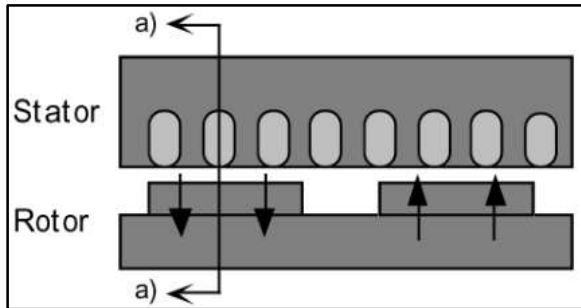


Şekil 4.2. Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörlerin sınıflandırması

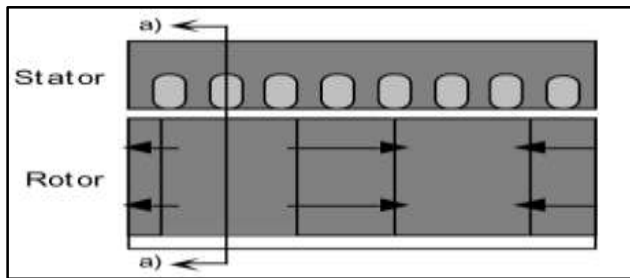
4.1. Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratörler

Radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler (RASMSJ) kalıcı mıknatıslar, manyetik akının hava aralığından radyal yönde geçecek şekilde düzenlenir. Radyal akı düzenlenimi, yüksek tork yoğunlukları ve basit yapıları nedeniyle kalıcı mıknatıs tabanlı senkron jeneratörlerde en yaygın yapıda olanlardır. Mıknatıs, rotor yüzeyine monte edilirse, yüzeye monte kalıcı mıknatıslı jeneratör olarak adlandırılır. Bir diğer yöntem ise, özellikle düşük kalan akı yoğunluklu mıknatıslar kullanıldığında ve yine de yüksek hava aralığı akı yoğunluğuna ihtiyaç duyulduğunda, akıyı yoğunlaştırmayı amaçlayan mıknatıslar rotor yuvalarına yerleştirilir. Radyal akılı jeneratörleri, dış rotor yüzeyinin artan soğutma kapasitesi ile yüksek sayıda kutup kullanmak için bazen dış rotor iç stator düzenlenimi ile inşa edilebilir. Demir çekirdekli ve hava çekirdekli, sırasıyla iç rotor ve dış rotor düzenlenimi ile kullanılan iki çekirdek tipidir. Bu jeneratör tipinin çapı daha uzun aksel uzunluk ile ayarlanabilmektedir [56].

Tipik bir radyal akı yüzeye monte jeneratör düzenlemesi Şekil 4.3'te verilmiştir. Radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratörün gömülü versiyonu Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, akı her iki düzenlenimi de hava aralığını radyal yolda geçmektedir [57].

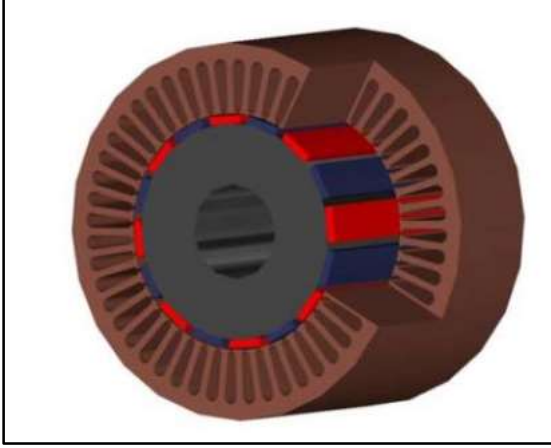


Şekil 4.3. Radyal akı yüzeye monteli versiyonu



Şekil 4.4. Radyal akı gömülü versiyonu

Geleneksel iç rotorlu yüzey montajlı radyal akılı jeneratörün tam görünümü Şekil 4.5'te verilmiştir [58].



Şekil 4.5. Geleneksel iç rotorlu radyal akılı sürekli mıknatıslı jeneratör

4.2. Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratörler

Eksenel akılı jeneratörlerin yapılandırılması basit olarak kabul edilir. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler (EASMSJ) stator ve rotor bileşenlerinden oluşmakta olup stator üzerinde sargılar, rotor üzerinde ise mıknatıslar bulunmaktadır. Mıknatıslar rotora birleştirilmiştir. Bu nedenle, rotor ve stator arasındaki hava boşluğunu kapatarak çok yüksek bir eksenel kuvvet oluşturulması sağlanmaktadır [8].

Geometri ve akı topolojisi, EASMSJ'deki güç yoğunluklarını artırmak için kilit öneme sahip olup makinenin ağırlığını, verimini ve kompaktlığını etkilediği için tasarımlarda çekirdek kütle ve hacmin en aza indirilmesi önemlidir. EASMSJ'lerde statorlar ve rotorlar birçok kombinasyonda tasarlanabilmekte olup. bobin sayılarından dolayı çift taraflı makineler tek taraflı makinelerle göre çok daha fazla güç üretebilmektedir [59].

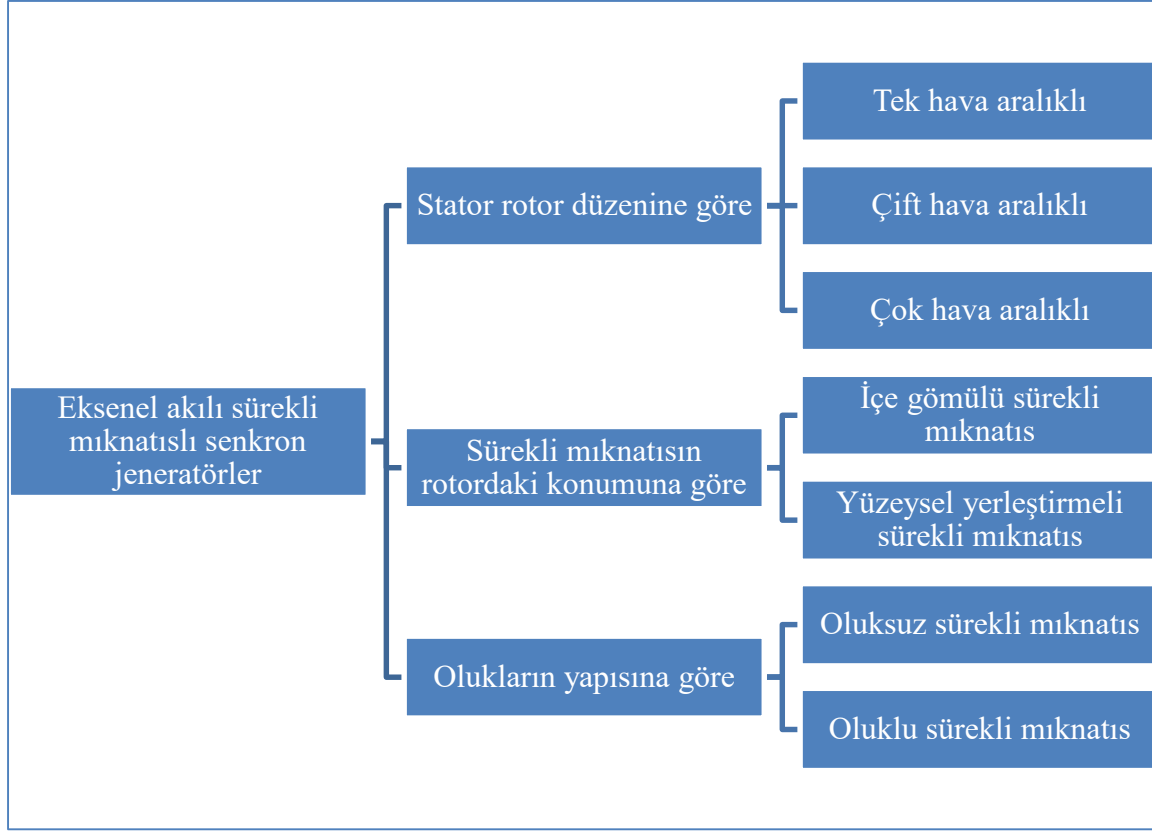
Makineler farklı çekirdek tipleriyle tasarlanabilmekte ve oluk yapıları buna uygun olarak tasarlanabilmektedir. Tasarımların çoğunda lamine çekirdekler kullanılmaktadır. Oluklu çekirdekler, vurutu torkunu azaltmaya yardımcı olurken, oluksuz tasarımlar kayıp endüktansları düşürmeyi başarır. Ancak vurutu torkunu azaltmak için çekirdekler ve mıknatıslar arasındaki manyetik kuvvetin optimize edilmesi gerektiği akılda tutulmalıdır. Gerçekten de, manyetik kuvvet makinede aşırı mekanik strese ve titreşimlere neden

olmaktadır. Bu nedenle eksenel makinelerdeki hava boşlukları radyal akılı olanlardan daha büyük olmalıdır [60]. Bu jeneratör tasarımında hava aralığı, mekanik işlemeye göre 1 mm'den 4 mm'ye kadar tasarlanabilmekte olup hava aralığının makinenin tüm çıkışını etkilediğine dikkat edilmelidir. Bu nedenle yeni bir tasarımda hava aralığı optimizasyonu yapılmalıdır. Nüvesiz makinelerde sargılar epoksi, polyamid vb. manyetik olmayan ve yalıtkan bir malzeme içerisine konulmalıdır. Nüve eksikliğinden dolayı nüve kaybı ve vuru torku oluşmaz ve makineler hafifler. Ancak sargılarda daha yüksek hızlarda girdap kayıpları oluşabilmektedir. Öte yandan, makinenin dezavantajı, nüveli makinelere kıyasla düşük manyetik akılar F ve yüksek Bakır kayıplarının olmasıdır.. Bunlar EASMSJ 'lerin etkinliğini azaltan ana faktörlerdir [61].

EASMSJ 'ler özellikle orta hızlı uygulamalar için uygundur; bu nedenle robotikte, elektrikli araçlarda, trenlerde vb. kullanılabilirler. Rüzgar enerjisi uygulamalarında türbin içerisindeki dişli sistemlerinin ihmal edilmesi tercih edilmektedir. Eksenel akılı makineler ile radyal makineler karşılaştırıldığında, eksenel akılı makineler daha düşük vuru torklarına ve hacme ve daha yüksek güç yoğunluğuna ve verimliliğe sahiptirler [62]. Ancak EASMSJ'lerin ısınmasının daha yüksek güç yoğunluklarından kaynaklanabileceği göz önüne alındığında. rotor ve statorlar için verimli bir geometri tasarlanmalıdır. Isınma probleminden kurtulmak için hava boşluğu da hayati önem taşımaktadır. Tasarımdaki kilit nokta, mıknatısların tüm şekilleri mükemmel sinüzoidal çıkış veremediği için kalıcı mıknatısların uygun şeklinin belirlenmesidir [62,63].

Eksenel akılı makinelerde sıklıkla karşılaşılan zorluk stator yapısıdır. Yoğun ferromanyetik şerit sarımları kullanılarak karmaşık yapıda üretildiği için zaman ve maliyet açısından etkinliği azalmaktadır. Akının eksenel şekilde hava boşluğundan geçmesi ile statorun etrafında alan çizgileri meydana gelmektedir. Statorun iç ve dış çapları arasında moment meydana gelmektedir. Bu kısım sabit kalarak kutup sayısının artırılması eksenel mesafeyi kısaltır. Sonuç olarak EASMSJ'lerin düşük hızda yüksek güç ve yüksek moment ile çalışmaları sağlanır [64].

EASMSJ'ler genellikle stator ve rotor düzenine, mıknatısların rotordaki konumuna, oluk yapısına göre sınıflandırmak mümkündür. Şekil 4.6'da eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron jeneratör sınıflandırması gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Eksenel akıllı sürekli mıknatıslı senkron jeneratör sınıflandırması

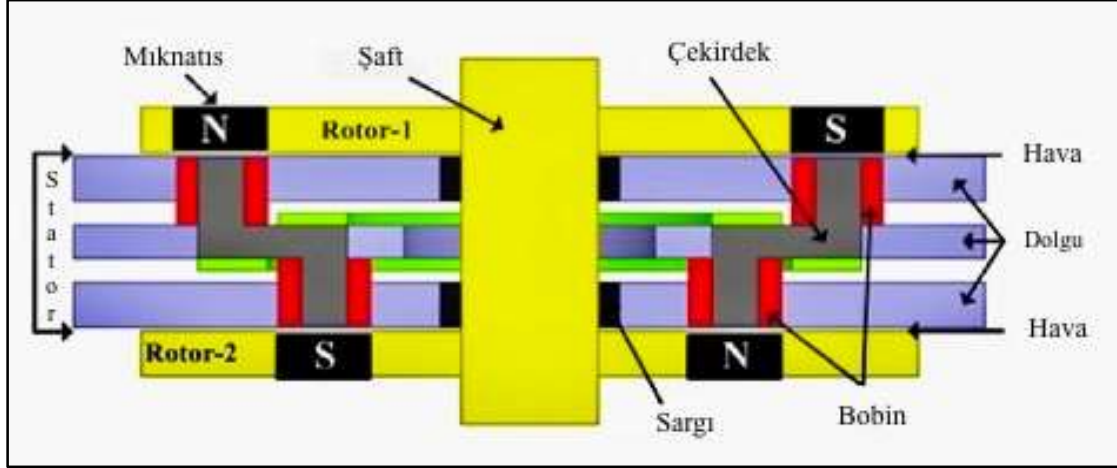
4.3. Ölçümü Yapılan Senkron Jeneratörün Özellikleri

Bu tez kapsamında, üç fazlı bir eksenel ve radyal akıllı sürekli mıknatıslı senkron jeneratörün elektromanyetik kalkanlama analizi yapılmıştır. Tasarlanan makine Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Makinenin üst ve alt kısımlarında çift rotor bulunmakta ve bu rotorların arasına bir stator yerleştirilmiştir. Stator, özellikle yüksek devirlerde kararlı bir makine sağlamak için üç ana üniteye sahiptir.

Rotorlar birbirine bağlıdır ve aynı mil üzerinde iki tarafta dönmektedirler. Tasarımın özel bir lamine çekirdek yapısı vardır. Bu yapının daha düşük vuruş torku değerleri verdiği bilinmektedir. Lamine çekirdeklerin makine ağırlığı ve girdap akımları üzerinde belirli avantajları olduğu bilinmekte olup oluksuz yapı kullanılmıştır [64].

Sargılar, mıknatıslar ve çekirdekler dairesel şekillere sahiptir. Makine üç fazlı olduğu için tasarım 16 adet mıknatıs ve 12 adet sargı ve damardan oluşmakta olup her damarda iki sargı bulunmaktadır. Stator ünitesi içindeki birçok hava boşluğu ve rotor ile stator arasındaki hava

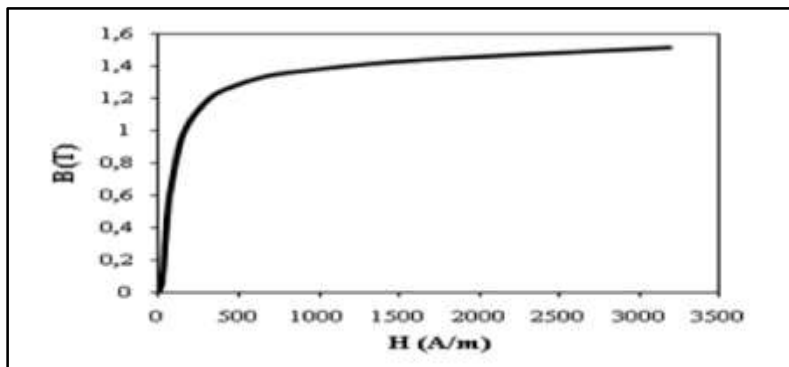
boşlukları nedeniyle tasarım, büyük rotor ve stator yüzeyinde verimli bir doğal soğutma mekanizmasına sahiptir. Mekanik sürtünmeyi önlemek için jeneratör’de 5 mm hava aralığı ayarlanmış olup ortada stator sabit tutulmuş ve rotorlar iki yatak sayesinde dönebilmektedir [65]



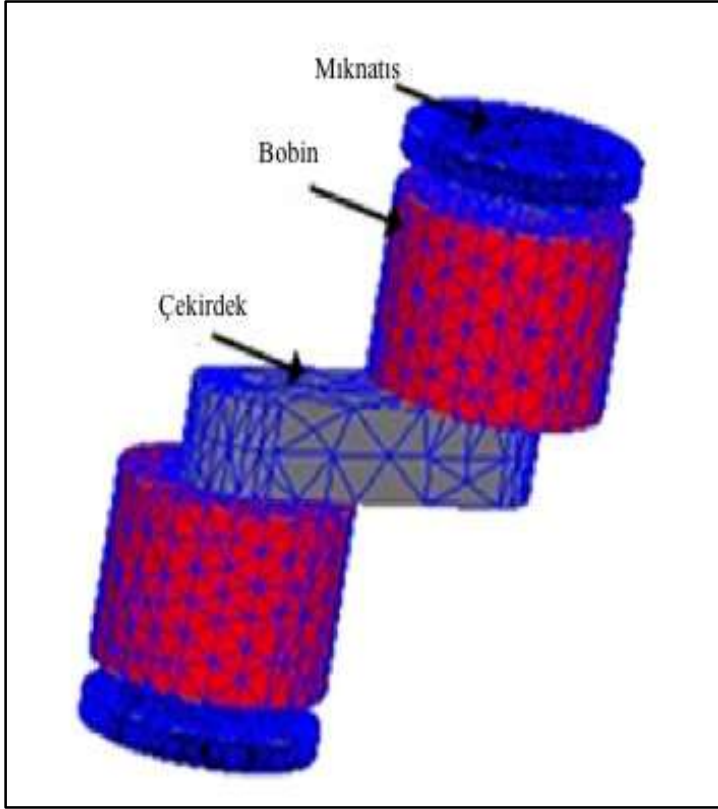
Şekil 4.7. Yeni tasarlanmış senkron jeneratör kesit yapısı

Çekirdek malzemesinin $B-H$ eğrisi Şekil 4.8’de sunulmuştur. Çekirdek malzemesi, 1,5 T'ye kadar yüksek akı yoğunluğu değerine sahiptir.

Her çekirdek, her biri 0,5 mm kalınlığında 40 lamine katmana sahiptir. 40 tabakanın eksenel yönde birleştiğine birleşmiş, böylece eksenel yönde akı kaybı en aza indirilmiştir. Bobinler Bakır kayıplarını azaltmak için Şekil 4.9’da gösterildiği gibi konumlandırılmıştır. Diğer bir tasarım avantajı ise dairesel şekillerdeki sarımların trapez veya üçgen olanlara göre daha kolay üretilebilmesidir. Miknatıslar, zıt yönlerde N-S-N-S oryantasyonunda çekirdeklerin üst ve alt uçlarına yakın simetrik olarak yerleştirilmiştir [54].



Şekil 4.8. M530-50A paslanmaz çelik için $B-H$ eğrisi

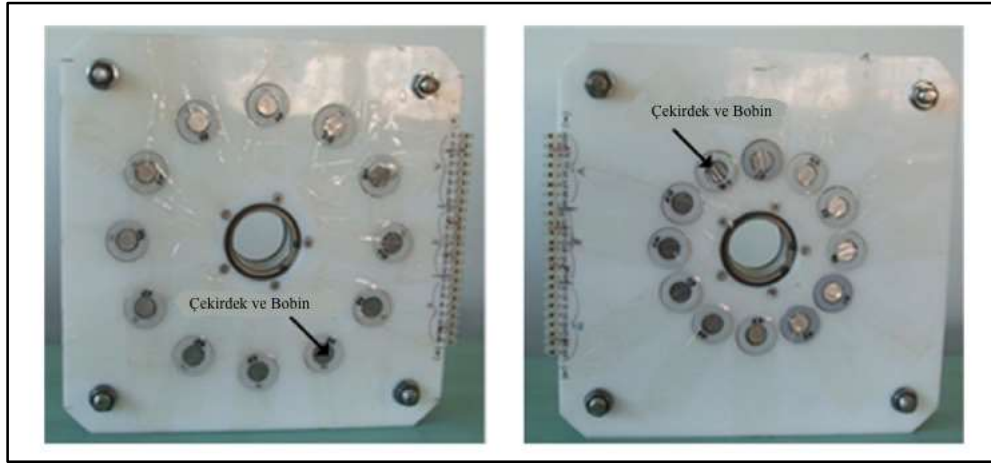


Şekil 4.9. Kullanılan bobin ve nüve yapısının sonlu elemanlar tasarımı

Daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde çift taraflı makinelerin güç yoğunlukları tek taraflı makinelere göre daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca çift taraflı makineler, her iki tarafında hareketli iki parça bulunduğundan daha iyi mekanik dengeye sahip ve makinenin statorun iki yanında bulunan çift hava boşluğu, özellikle yüksek dönüş hızlarında üretilen ısıнын azaltılmasına yardımcı olabilmektedir. Tüm bu avantajlar, makinenin yüksek dirençli elektriksel yüklerle yüklenmesine izin verebilmektedir [66,67].

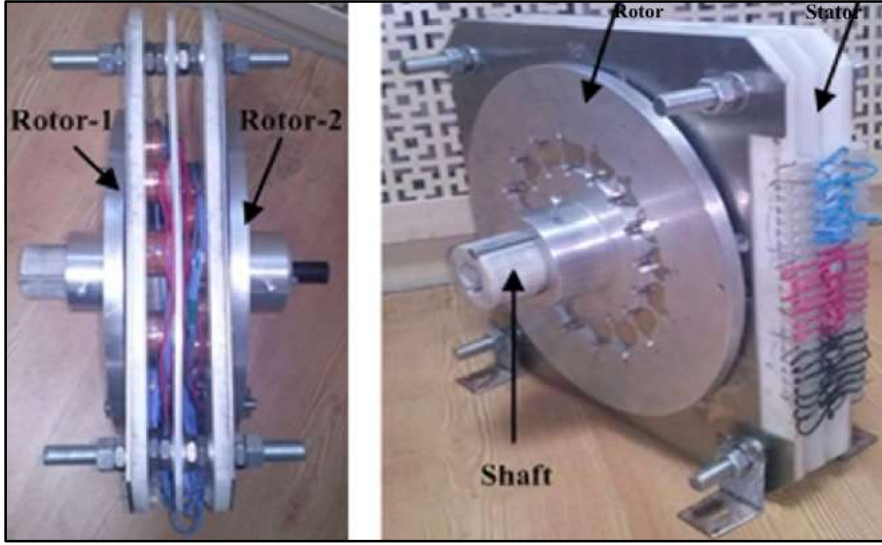
Yapısal maliyeti ve Bakır kayıplarını azaltmak için daha düşük sarım sayıları tercih edilirken, aşırı düşük sarım sayıları güç üretimini düşürebilmektedir [67]. Mevcut makinede, tambur tipi dairesel sargı kullanılmıştır. Bu tip sargıların Bakır kayıplarını azaltmak için belirli avantajları vardır. Bobinin aktif yüzeylerinden faydalanabilmek için mıknatis ve bobin çaplarının birbirine yakın olması gerekmektedir [65]. Nüveler, lamine nüve malzemesinden yapılmıştır. Nüvenin üst ucu statorun bir tarafında kalırken, diğer ucu diğer başlangıç tarafında yer alır. Statorda 12 ayrı çekirdek bulunmakta ve makinede toplamda 24 sargı bulunmaktadır.

Çekirdeksiz makinelerde ferromanyetik malzeme içermediklerinden vurutu torku oluşmamakta böylece bu tür makineler daha düşük hızlarda daha iyi hareket edebilmektedirler. Bu aynı zamanda histerezis kayıplarına da neden olmamaktadır. Öte yandan, bu makineler, sargıların içindeki akı yöneliminin olmaması nedeniyle yüksek girdap kayıplarına sahiptir. Bu nedenle akı yoğunluğu hava aralığında daha düşük olmakta ve bu da çok daha düşük güç üretimine neden olmaktadır. Yukarıdaki açıklamalara bakıldığında nüveli makinelerde nüve kayıpları Bakır kayıplarına göre daha düşük olurken, nüvesiz makinelerde Bakır kayıpları daha yüksek olmaktadır. Ayrıca lamine çekirdek yapısı da çekirdek kayıplarının azalmasına yardımcı olmaktadır [68]. Çekirdek tasarımının özel yapısı nedeniyle, akı radyal ve eksenel yönlerde yönlendirilmiştir. Şekil 4.10' da statorun iki yanındaki çekirdek uçları gösterilmektedir.



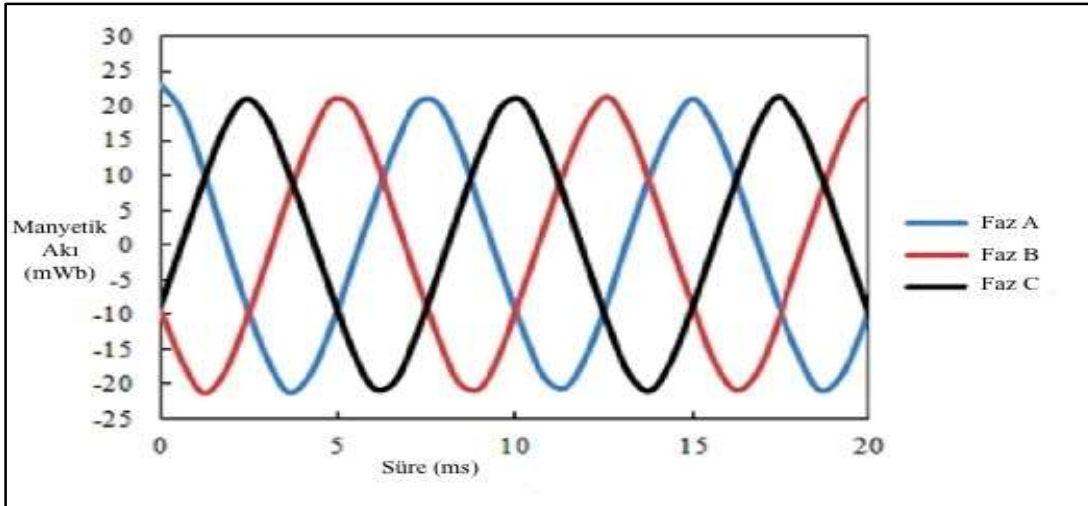
Şekil 4.10. Statorun iki taraftan görünüşü.

Jeneratörün Radyal ve eksenel yönlendirilmiş çekirdek yapısı, doğrusal çubuk şeklindeki çekirdeğe kıyasla daha düşük vurutu tork değerine sahiptir. Tork manyetik kuvvete ve bu kuvvetin eksene uzaklığına bağlı olduğundan, bu sonuç esas olarak statorun bir tarafındaki çapın daha küçük olması nedeniyle daha düşük mekanik moment değerinden kaynaklanmaktadır. Yeni jeneratörün rotorları Şekil 4.11' de gösterilmiştir. Bir dizi mıknatıs maksimum çapta yer alırken, diğer dizi mıknatıslar daha küçük çapta konumlanmıştır. Disk şeklinde yapılandırılmışlardır.



Şekil 4.11. Jeneratörün yandan ve genel görünüşü

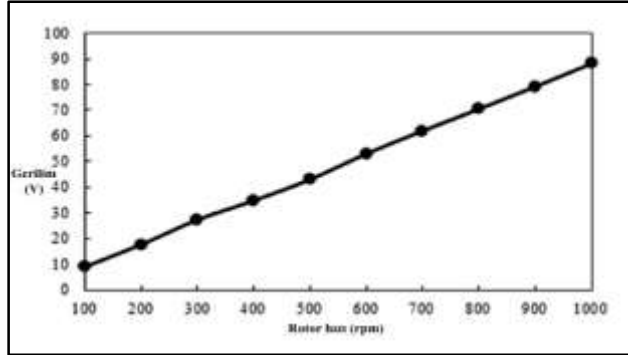
Rotorların üzerine 30 x 5 mm boyutlarında toplam 32 adet mıknatıs yerleştirilmiştir. Bu tasarımda, her bir mıknatıs arasında 22,5 derecelik bir elektrik açısı bulunmaktadır. Şekil 4.12’de, üç faz, 1000 rpm’de ve yüksüz çalışma için manyetik akı özellikleri gösterilmiştir. Disk tipi mıknatıslar dairesel bir yörüngede döndüklerinden akıların sinüzoidal dalga elde edilmiştir.



Şekil 4.12. 1000 rpm’de fazların manyetik akıları

Şekil 4.12’te, yüksüz durum için 100 rpm ve 1000 rpm’de gerilim üretimini gösterilmektedir. Her fazın genliği, 120’lik faz kayması ile elde edilmiştir. 100 rpm hızında, $V_{rms}=9V$ olarak bulunmuştur. Rotor hızı 1000 rpm’ye yükseltildiğinde, $V_{rms}=87,8 V$ ’ye yükselmiştir. Dalga

biçimleri sinüzoidal olup faz kayması üç faz için de aynıdır . Üretilen voltaj rotor hızıyla doğrusal olarak Faraday kanununa uygun olarak artmaktadır.



Şekil 4.13. Yüksüz durumda rotor hızı ve rms gerilim

Çizelge 4.1’de jeneratörde kullanılan mıknatıslar, çekirdekler, hava boşlukları, bobinler, rotorlar ve stator gibi tüm ünitelere ait malzeme özellikleri sunulmuştur [66].

Çizelge 4.1. Jeneratörün teknik özellikleri

Malzeme	Özellikler
R2 rotorunun iç yarıçapı (mm)	75
R2 rotorunun dış yarıçapı (mm)	105
R1 rotorunun iç yarıçapı (mm)	120
R1 rotorunun dış yarıçapı (mm)	150
Stator diskinin iç yarıçapı (mm)	70
Stator diskinin dış yarıçapı (mm)	155
Bobin iç çapı (mm)	30
Bobin dış çapı (mm)	40
Faz	3
Sargı dönüşleri	200
Bobin sayısı	24
Tel çapı (mm)	0,75
Mıknatıs tipi	NdFeB
Mıknatıs şekli	Yuvarlak
Mıknatıs numarası	16
Mıknatıs çapı (mm)	30
Mıknatıs kalınlığı (mm)	5
Çekirdek malzeme	M19
Çekirdek tipi	Eksenel ve Radyal
Çekirdek sayısı	12
Hava boşluğu (mm)	5

Jeneratörün anma değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. 250 W anma gücü %92,5 verimlilikle ölçülmüş olup anma akımı ve gerilimi sırasıyla 1,44 A ve 58 V olarak verilmiştir.

Çizelge 4.2. Üç fazlı Jeneratörün anma değerleri

Üç fazlı Jeneratörün Anma Değerleri	
Anma Gücü	250 W
Anma Akımı	1,44 A
Anma Voltajı	58 V
Anma Hızı	1.000 rpm
Verimlilik	%92,5

4.4. Bölüm Değerlendirmesi

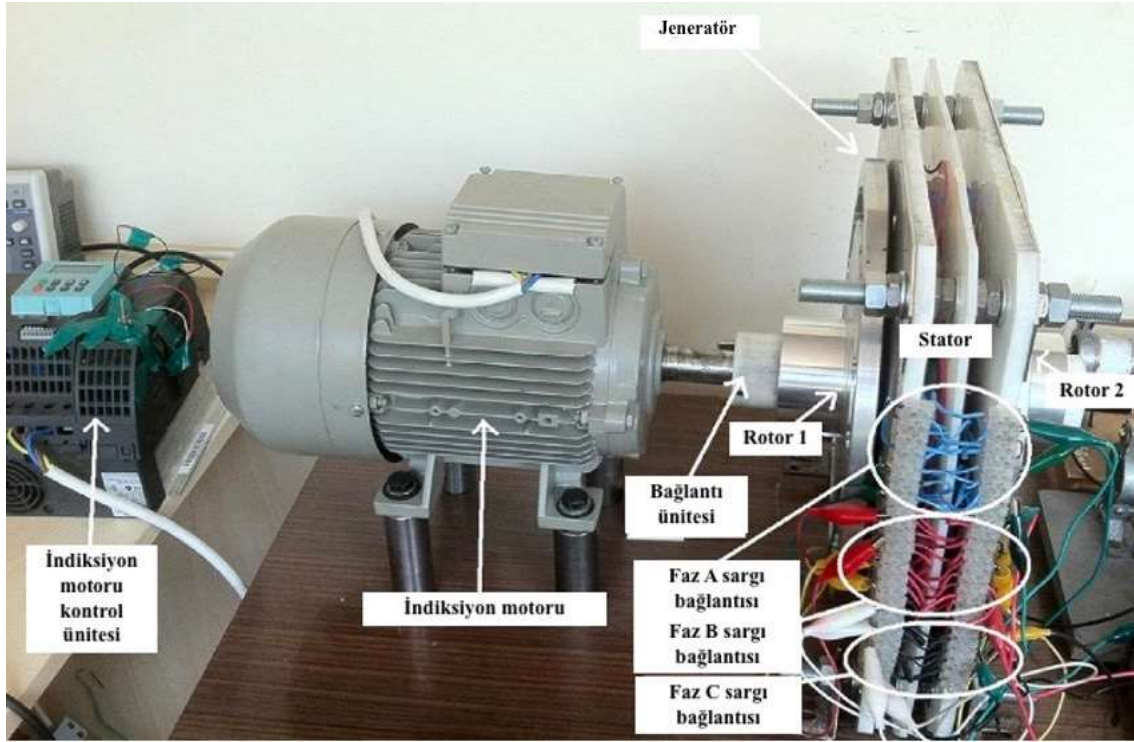
Eksenel akılı makinelerin radyal makinelere göre daha düşük vuruş torkuna, daha yüksek güç yoğunluğuna ve verimliliğine, kolay bakıma, daha düşük hacme ve maliyete sahip olduğu bilinmektedir. Ancak; eksenel akılı makineler için tasarım özellikleri büyük önem arz etmektedir. Bununla birlikte, vuruş torkunu düşürerek kaliteyi artırmak hala ana hedeflerdendir. Vuruş torkunu düşürmek için hava aralığı oldukça önemlidir. Ayrıca, özellikle yüksek hızlarda mıknatıslar ve çekirdekler ısındıkları için ısınmanın önüne geçilmelidir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde yüksek güç yoğunluğunun eksenel akılı makinelerde ısınma problemlerine neden olduğu bilinmekte olup bunu engellemek için uygun bir geometri ve hava mesafesi ayarlanmalıdır. Eksenel akılı makinelerde, rotor ve stator arasındaki güçlü manyetik kuvvetlerin (hava boşluğu ile ilgili) dezavantajları tasarımda ortadan kaldırılmalıdır. Bu bağlamda, vuruş torku, mıknatıs şekillerinden de etkilenmekte, tek büyük çekirdekler, çekirdeksiz yapılardan veya birçok küçük çekirdekten daha yüksek vuruş tork değerlerine neden olmaktadır. Bu nedenle, en uygun çekirdek şekline karar verilmelidir. Bir diğer önemli nokta ise makinedeki kayıpları azaltılmasıdır. Bu bağlamda, çekirdek kütlesi, şekli ve değişen hava aralığının çekirdek kayıplarını azalttığı bilinmektedir.

Elektromanyetik kalkanlama yöntemleri incelenmiş olan jeneratör; yeni tasarım radyal ve aksenal akılı bir jeneratör olup akının üstte ve altta bitişik mıknatıslar üzerinden yoluna devam etmesi ve her bir mıknatıs üzerinde dengeli bir akı oluşturulması sağlanmıştır.

5. MALZEME VE YÖNTEM

Kurulum şekil 5.1' de gösterilmektedir. Deney ünitesi temel olarak rotor hızını rpm olarak ayarlamamızı sağlayan bir kontrol ünitesi, EASMSJ 'yi çalıştıran bir endüksiyon motoru ve EASMSJ için bağlantı üniteleri içermektedir.



Şekil 5.1. Ölçümleri gerçekleştirilen EASMSJ

5.1. Kullanılan Malzemeler

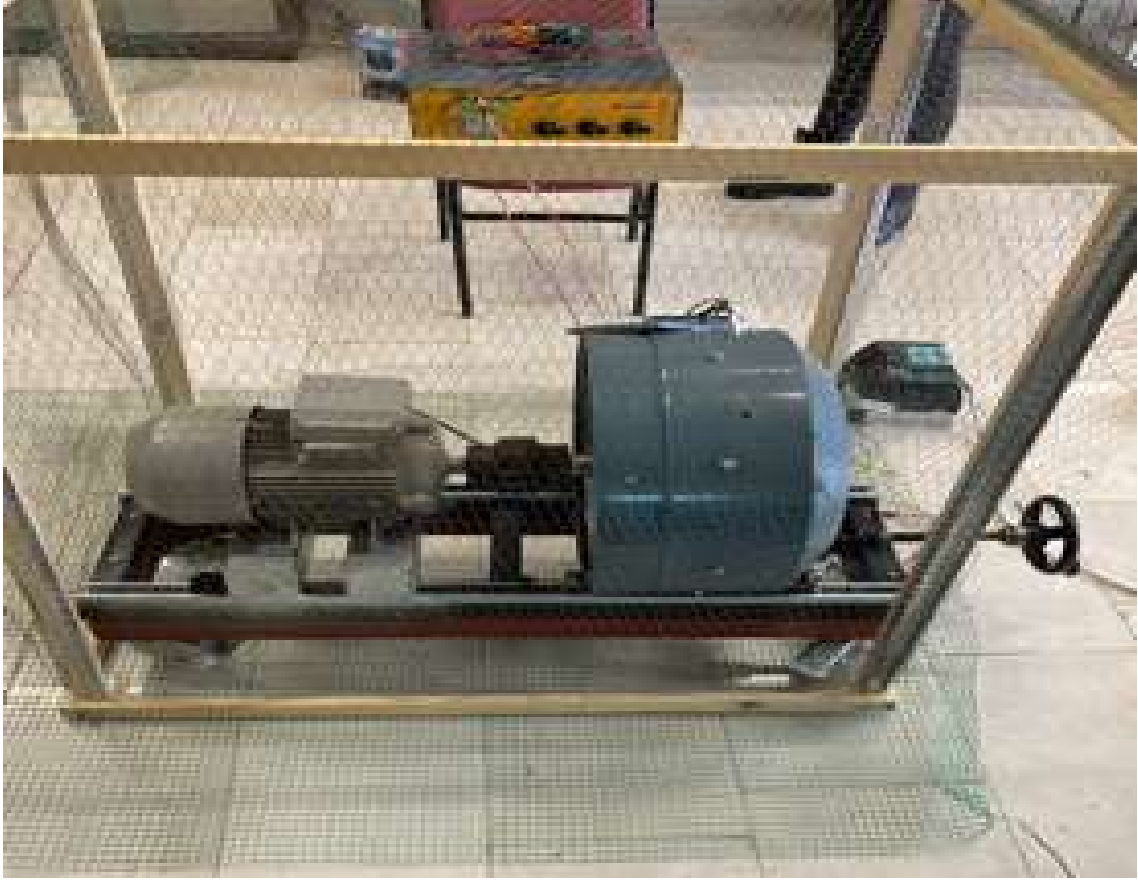
SMP2, elektromanyetik alanları ölçmek için kullanılan, 0 Hz ile 40 GHz arasında bir dizi uyumlu proba sahip bir cihazdır. SMP2, elektromanyetik alanlara maruz kalmayla bağlantılı olarak kişisel güvenlik değerlendirmelerinin ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilmiş ve birçok farklı sektör ve endüstride kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan wp400 probunun seçilmesinin nedeni; elektromanyetik alan ölçümlerinin 1hz-400khz arasında gerçekleştiriliyor olması ve bu prob üzerinden E ve H ölçümlerinin yapılabilir olmasıdır.

Kalkanlama için farklı iletkenlik, geçirgenlik ve şekil özelliklerine sahip üç kafes kullanılmıştır. Şekil 5.2’te kalkanlama olarak kullanılan sineklik gösterilmiştir. Sineklik 1 mm çapında tel örgü olup paslanmaz çelikten üretilmiştir. Kalkanlama olarak kullanılan petek şekil 5.3’te gösterilmiştir. Petek 10 mm çapında tel örgü olup çelikten üretilmiştir. Şekil 5.4’te Kare gösterilmiştir. Karede kullanılan malzeme 5 mm çapında tel örgü olup çelikten üretilmiştir.



Şekil 5.2. Sineklik kalkanlama malzemesi



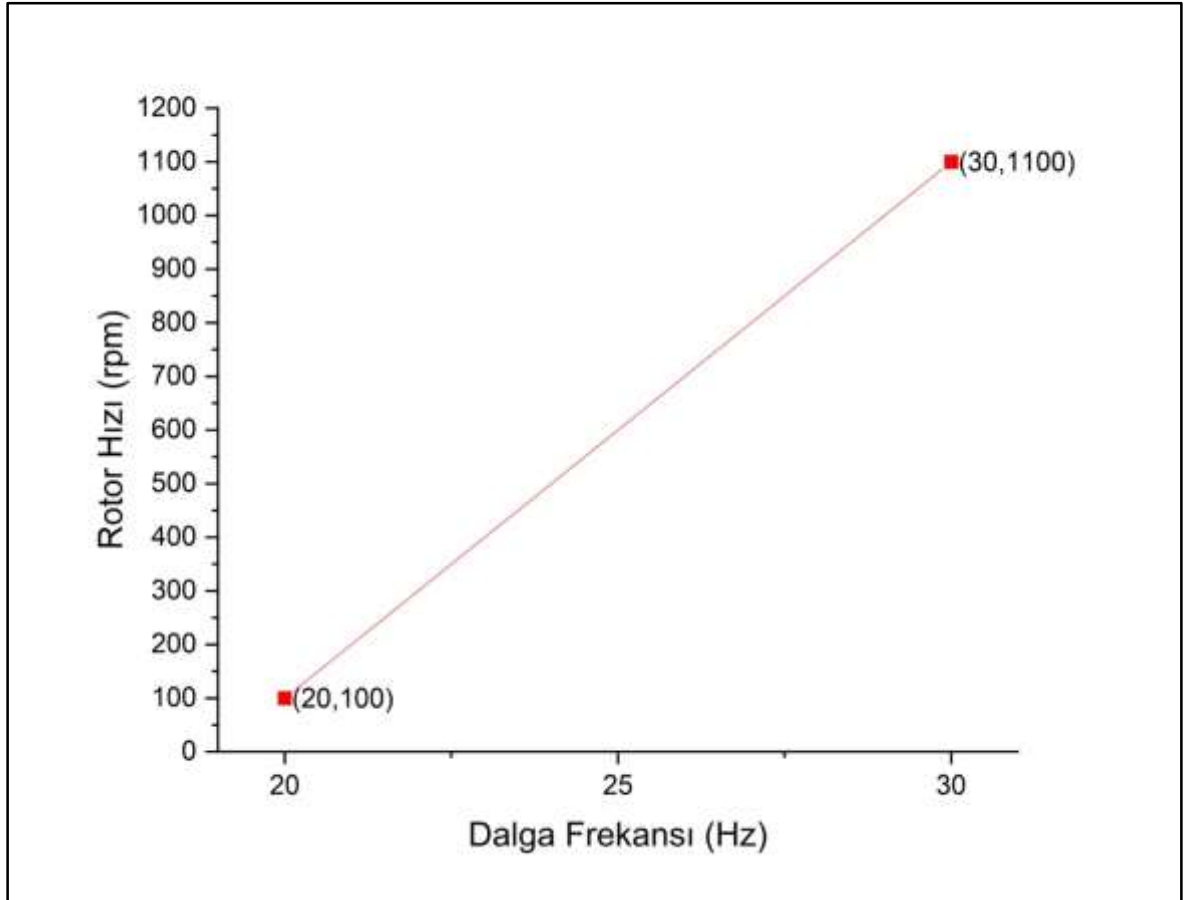
Şekil 5.3. Petek kalkanlama malzemesi



Şekil 5.4. Kare kalkanlama malzemesi

5.2. Yöntem

Testler 10, 20 ve 30 cm mesafelerden üç adet metal kafes için gerçekleştirilmiştir. Ölçümler jeneratörün farklı bölgelerinde (ön, sağ, sol, arka, üst) gerçekleştirilmiştir. EASMSJ'nin 100 rpm'den 1100 rpm dönüş hızına kadar olan ölçümleri bütün mesafeler ve kalkanlama malzemeleri için gerçekleştirilmiştir. Bu açısal hız değerleri, 20 Hz'den 30 Hz'e kadar dalga formları üretmektedir. Frekans ve rotor hızı ilişkisi Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5. EASMSJ'nin frekans ve rotor hızı ilişkisi

Jeneratör başlangıçta herhangi bir elektrik yükü olmadan çalıştırılmış olup jeneratörden herhangi bir elektrik akımının akmadığı anlamına gelmektedir. Bu, arka plan EMG ölçümleri için önemlidir. Daha sonra yükler bağlanarak sargılardan elektrik akımı akarken ölçümler tekrarlanmıştır. Bu aşamada sineklik, petek ve kare olmak üzere 3 kafes ile kafeslerden 10 cm, 20 cm ve 30 cm' lik çeşitli mesafelerden ölçümler yapılmıştır. Ayrıca; Elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin hesaplanabilmesi için kalkanlama malzemesine

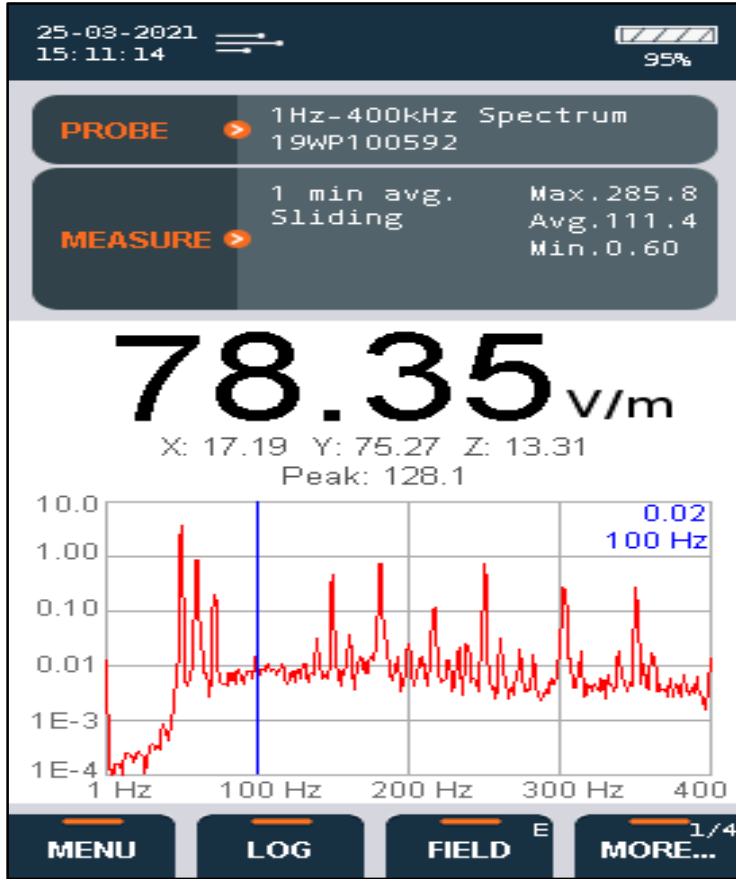
gelen elektrik alan ve kalkanlama malzemesinden çıkan elektrik alan değerleri hesaplanmıştır.

Bu çalışmada, bizim durumumuzda frekansa bağlı elektromanyetik alan önemli olduğu için frekans alanı ölçümü (FFT) yöntemi seçilmiştir. Bu özellik yalnızca WP400, WP400-3 problemlerinde bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan wp400 probu Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Ölçüm cihazı

Frekans alanı ölçümleri, FFT'deki hesaplamayı takiben analiz edilen alandaki frekans bilgilerini içerir. Analizler FFT yöntemi ile 1 Hz - 400 kHz frekanslarında yapıldığından elektromanyetik alan ölçümleri Wavecontrol SMP2 WP400 modeli kullanılarak yapılmıştır. Şekil 5.7' de örnek bir FFT moduyla yapılan ölçüm sunulmuştur.



Şekil 5.7. Örnek bir ölçüm

Bir kalkanının zayıflama seviyesinin belirlenmesi karmaşık olabilir ve araştırma yöntemleri genellikle belirli kalkan uygulamasına göre değişir. İletkenlik ve geçirgenlik gibi malzeme özelliklerinin yanı sıra çarpan dalganın frekansı, ölçüm yeri, polarizasyonu ve geliş açısı, yakın alan veya uzak alan uygulaması gibi birçok faktör SE' yi etkilemektedir. SE değerini ölçmek için birçok teknik bulunmaktadır.

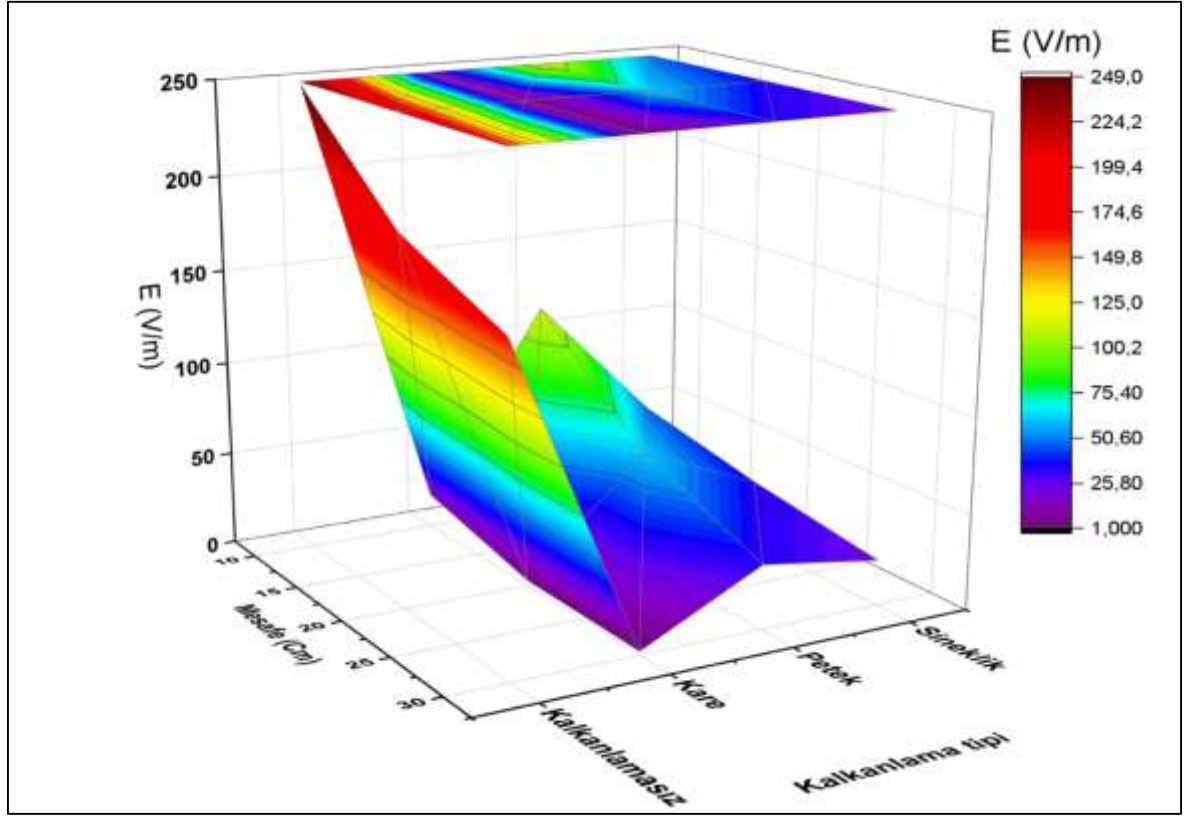
6. BULGULAR

Jeneratörün farklı dalga biçimi frekanslarında (yani 20 Hz ve 30 Hz) önden, sağdan soldan, arkadan ve üstten elektromanyetik alan ölçüm değerleri verilmektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, kalkanlama malzemesine olan mesafe arttıkça tüm bölgeler için EM değerlerinin (yani E ve H) azaldığı ortaya koyulmuştur. Rotor hızı 100 rpm'den 1000 rpm'ye yükseldiğinde, EM parametrelerinin her yüzeyde önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Tüm 3B grafikler için EM değerlerinin rotor hızıyla doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir.

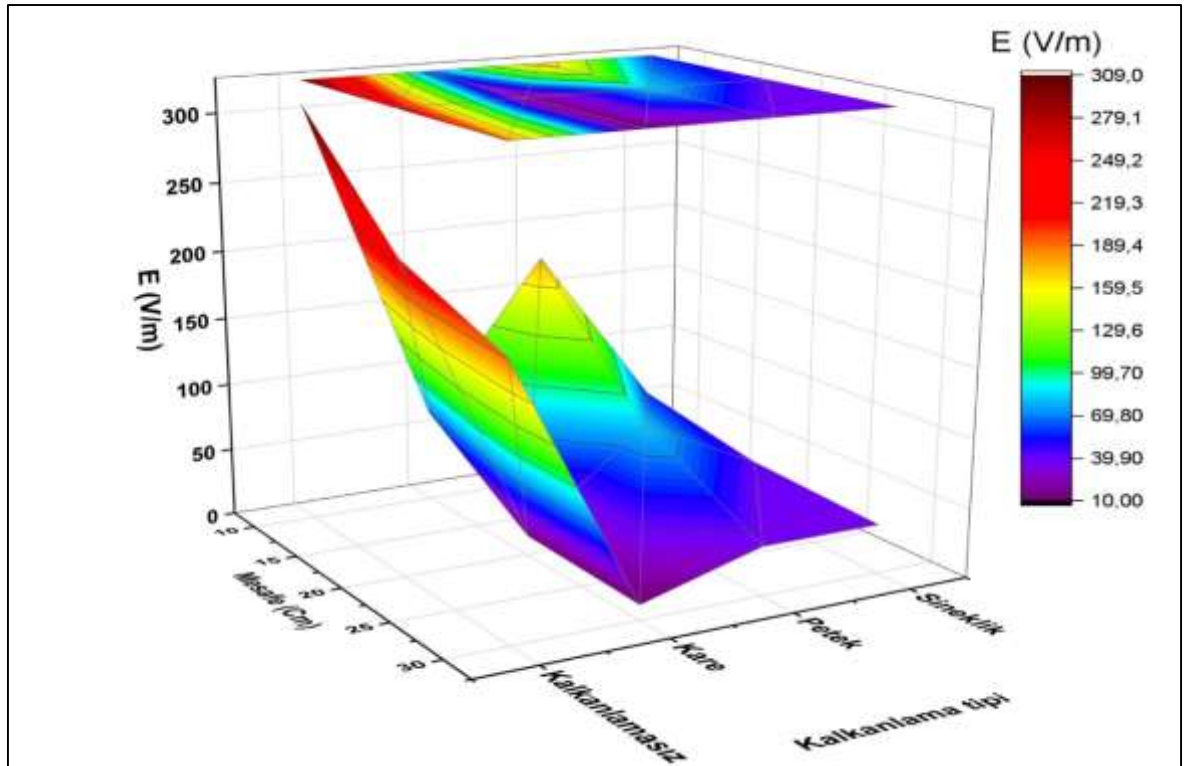
6.1. Jeneratör Ön Yüz Ölçümler

Şekil 6.1 (a, b) ve Şekil 6.2 jeneratörün önden genel elektromanyetik özelliklerini vermektedir. Hem 20 Hz hem de 30 Hz dalga formu frekansları için en yüksek elektromanyetik kalkanlama değerleri kare kalkanlama malzemesi için elde edilmiştir. Önden 20 Hz dalga formu frekansında (yani rotor hızı için 100 rpm), kare için tüm mesafelerin toplamı olarak elektrik alan 22,64 V/m olarak bulunmuştur. Kalkanlamasız durum için 606,3 V/m, petek için 209,86 V/m, sineklik için 106,5 V/m.

Kare kalkanlama için 30 Hz dalga formu frekansının altında (yani rotor hızı için 1100 rpm), elektrik alan 93,18 V/m olarak ölçülmüş olup kalkanlamasız durum için 724,1 V/m, petek için 295,86 V/m ve sineklik için 134,63 V/m değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerin 10 cm, 20 cm, 30 cm mesafeler için değerlerin toplamı olarak elde edilmiştir. Maksimum değer 30 Hz frekansta kalkanlamasız ve 10 cm mesafe için 308,3 V/m olarak ölçülürken, minimum değer 20 Hz frekansta ve 30 cm mesafede 1,88 V/m ile kare kalkanlamada elde edilmiştir. Ayrıca elektrik alan şiddetinin 30 Hz için 20 Hz dalga biçimi frekanslarından daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Ön yüzde ölçülen değerlerin yüksek olmasının sebebi yük bağlantılarının bu yönde olmasından kaynaklanmaktadır.

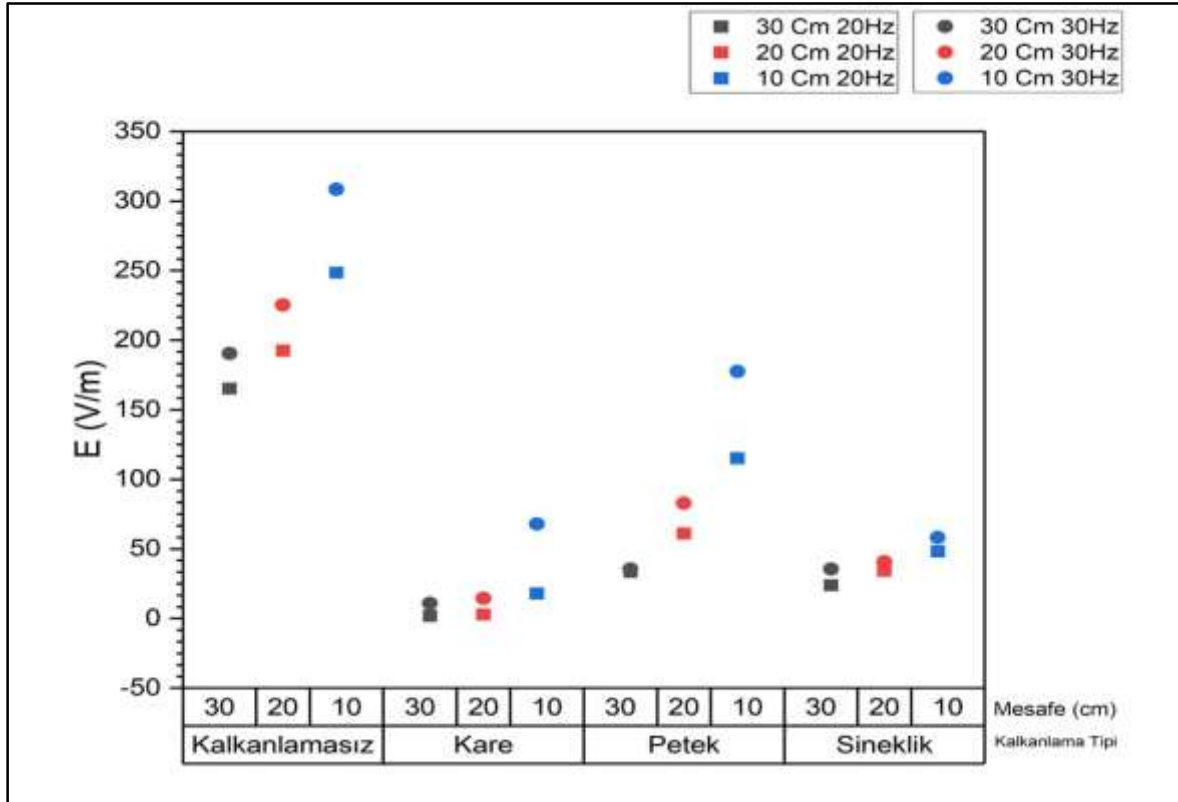


(a)



(b)

Şekil 6.1. Ön yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı

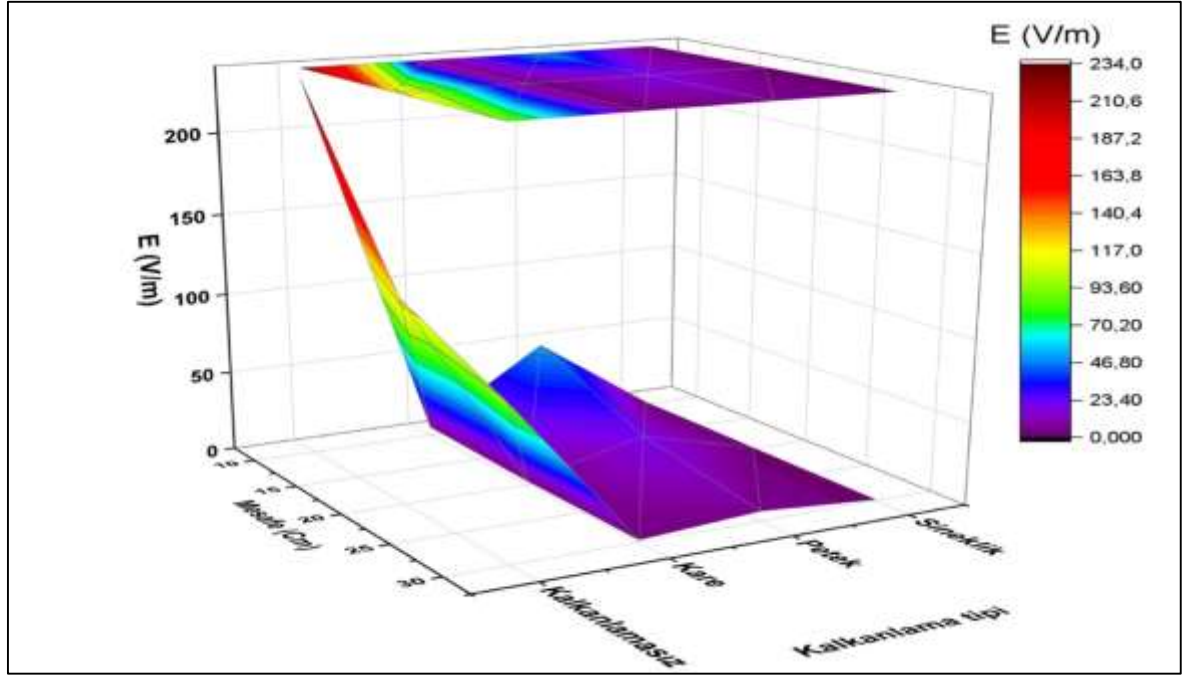


Şekil 6.2. Ön yüz iki boyutlu gösterim

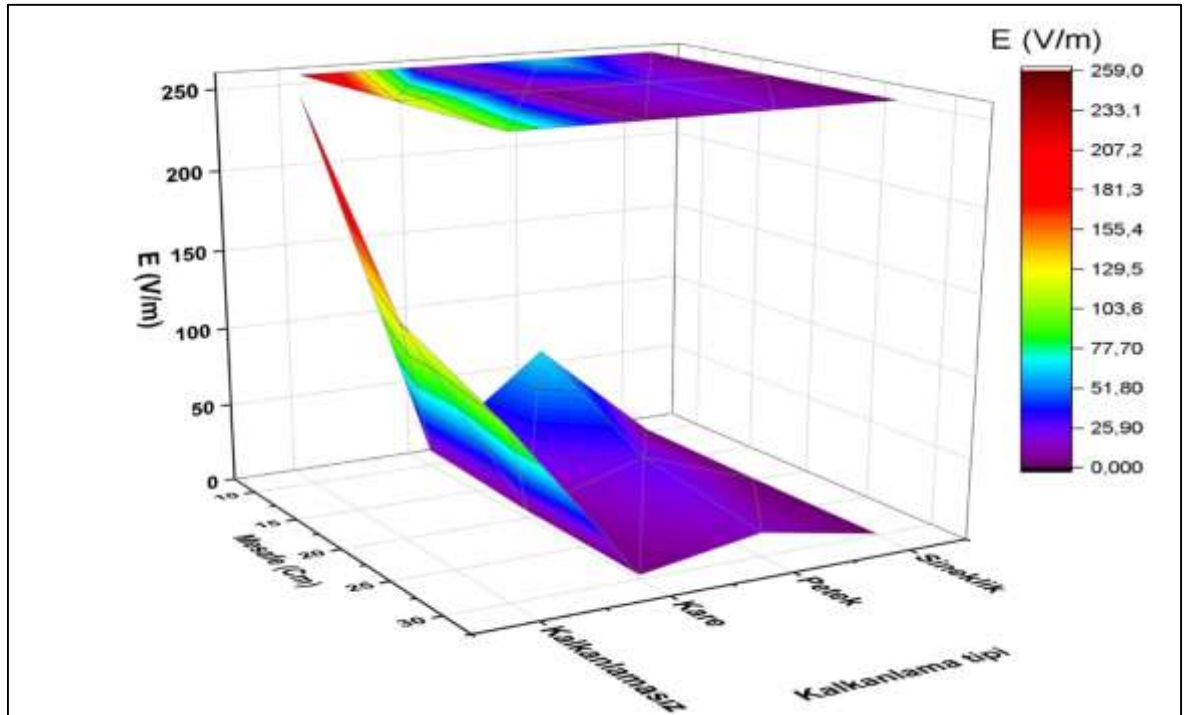
6.2. Jeneratör Sağ Yüz Ölçümler

Şekil 6.3 (a, b) ve Şekil 6.4 jeneratörün sağ yüz elektromanyetik değerlerini göstermektedir. En yüksek elektromanyetik kalkanlama değerleri sineklik ile yapılan kalkanlamada ve 20 Hz ve 30 Hz frekanslarında ölçülmüştür. Sağ yüz için 20 Hz dalga formunda yapılan ölçümlerde sineklik kafesi için elektrik alan 3,09 V/m iken kalkanlamasız durum için 448,21 V/m, petek için 76,2 V/m ve kare için 9,16 V/m elde edilmiştir. Bu değerler 10, 20, 30 cm mesafelerin toplamıdır.

Yüksek dönüş hızı durumunda (yani 30 Hz dalga biçimli rotor hızı), sineklik için 4,86 V/m, kalkanlamasız, petek ve kare için sırasıyla $E = 510,7$ V/m, $E = 142,97$ V/m ve $E = 25,69$ V/m değerleri ölçülmüştür. Bu değerler 10 cm, 20 cm, 30 cm mesafelerde elde edilen değerlerin toplamıdır. En yüksek değer $E = 258,7$ V/m ile 10 cm mesafede kalkanlamasız durum için ölçülmüş olup en düşük değer sineklik için 30 cm mesafede $E = 0,7$ V/m olarak ölçülmüştür. Bu arada, 20 Hz dalga biçimi frekansıyla karşılaştırıldığında 30 Hz dalga biçimi frekansları için elektrik alan değerleri daha büyük olduğu gösterilmiştir.

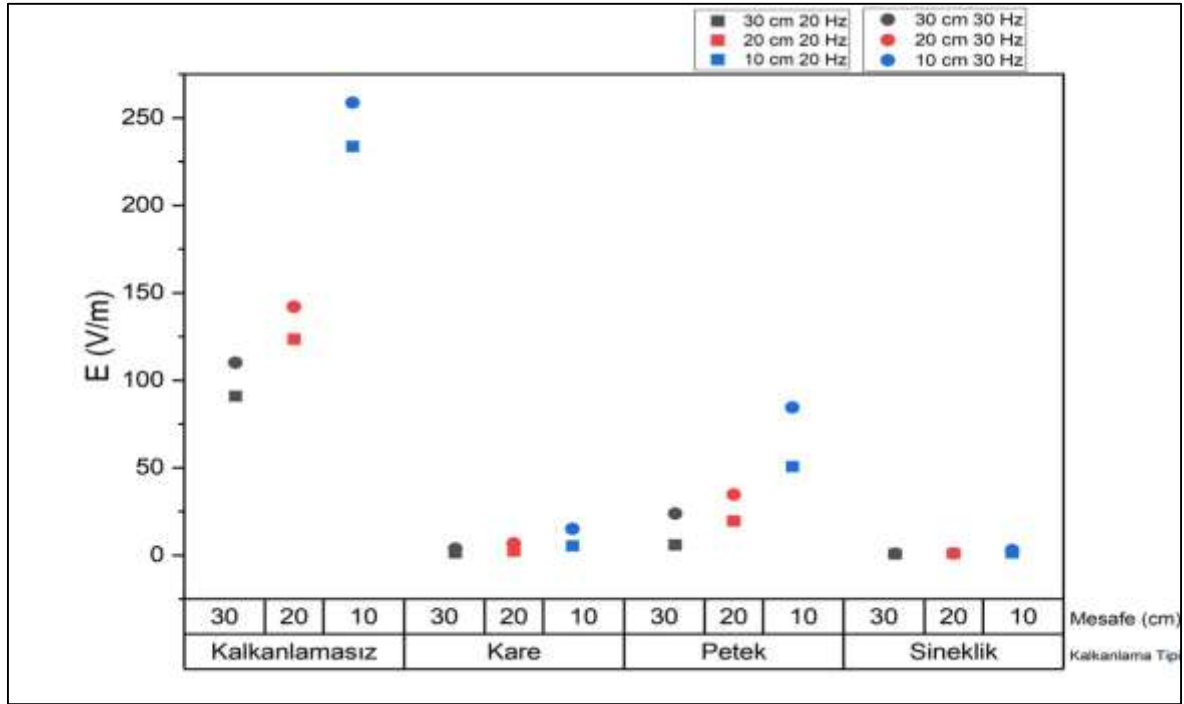


(a)



(b)

Şekil 6.3. Sağ yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı

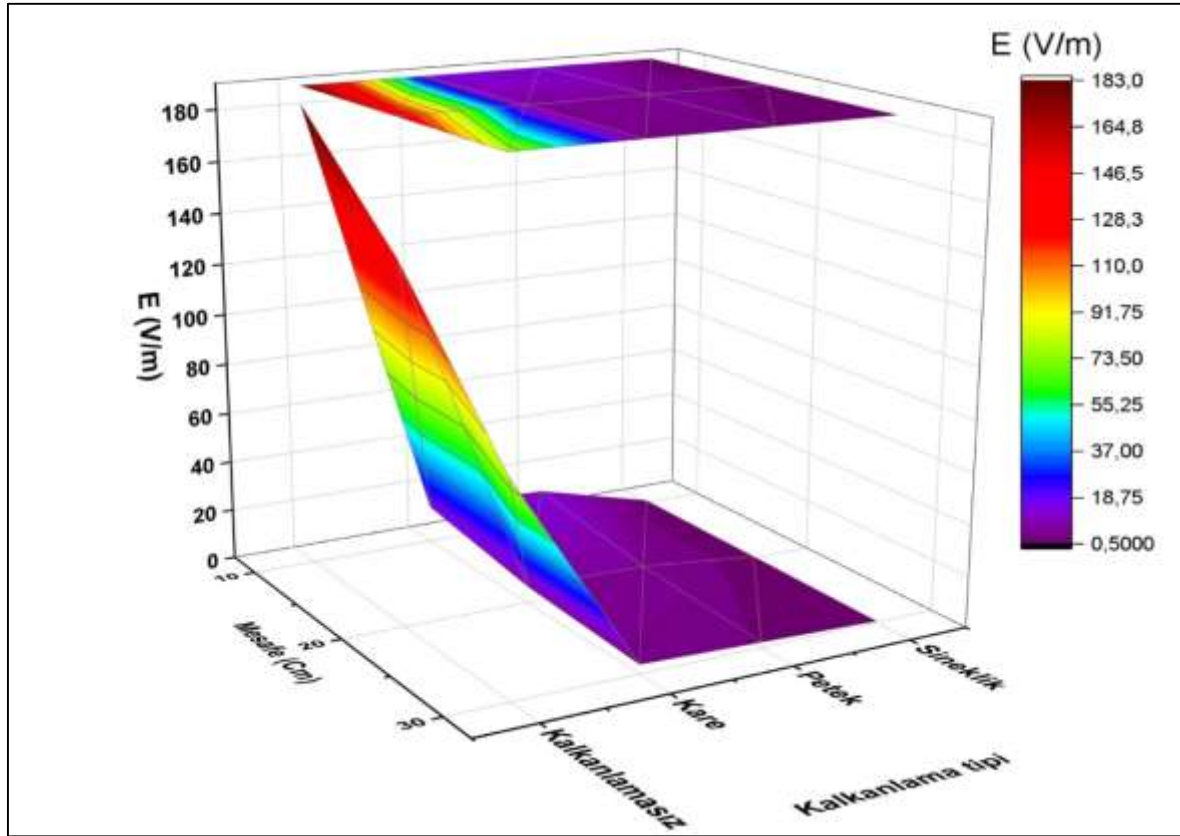


Şekil 6.4. Sağ yüz iki boyutlu gösterim

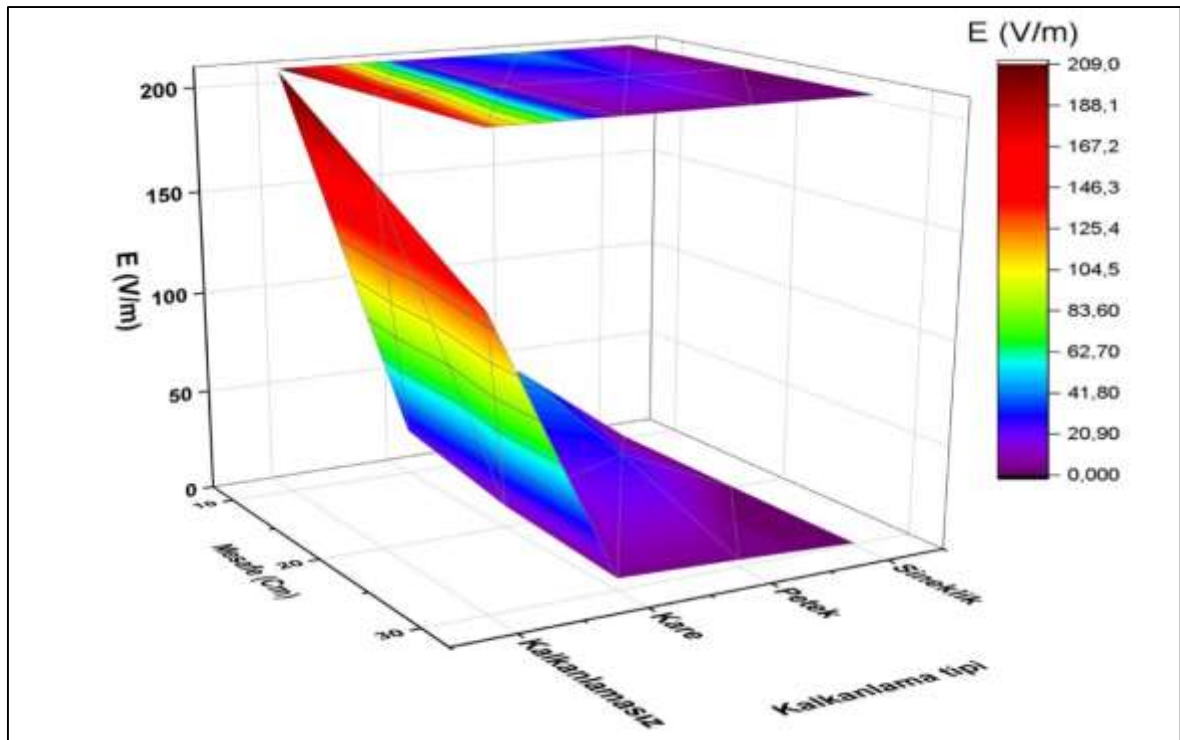
6.3. Jeneratör Arka Yüz Ölçümler

Şekil 6.5 (a, b) ve Şekil 6.6 jeneratörün arka yüzden genel elektromanyetik özelliklerini göstermektedir. Hem 20 Hz dalga formu frekansı (yani rotor hızı için 100 rpm), hem de 30 Hz dalga formu frekansı (yani rotor hızı için 1100 rpm) için en yüksek elektromanyetik kalkanlama değerleri sineklik için elde edilmiştir. Arka yüz için; 20 Hz frekansta, elektrik alan sineklik için 2,14 V/m iken kalkanlamasız durum için $E=402,44$ V/m, petek için $E=20,78$ V/m, kare için $E=24,81$ V/m'dir. 30 Hz frekansta sineklik için elektrik alan 2,53 V/m iken, kalkanlamasız durum için $E=514,4$ V/m, petek için $E=76,09$ V/m ve kare için $E=38,84$ V/m değerleri elde edilmiştir. Bu değerler 10, 20, 30 cm mesafede elde edilen değerlerin toplamıdır.

Şekil 6.6 incelendiğinde maksimum değer kalkanlamasız ve mesafenin 10 cm olduğu durumda 208,6 V/m olarak elde edilmiştir. Minimum değer ise sineklik ve mesafenin 30 cm olduğu durumda 0,5 V/m olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda; elektromanyetik değer 30 Hz için 20 Hz'den daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

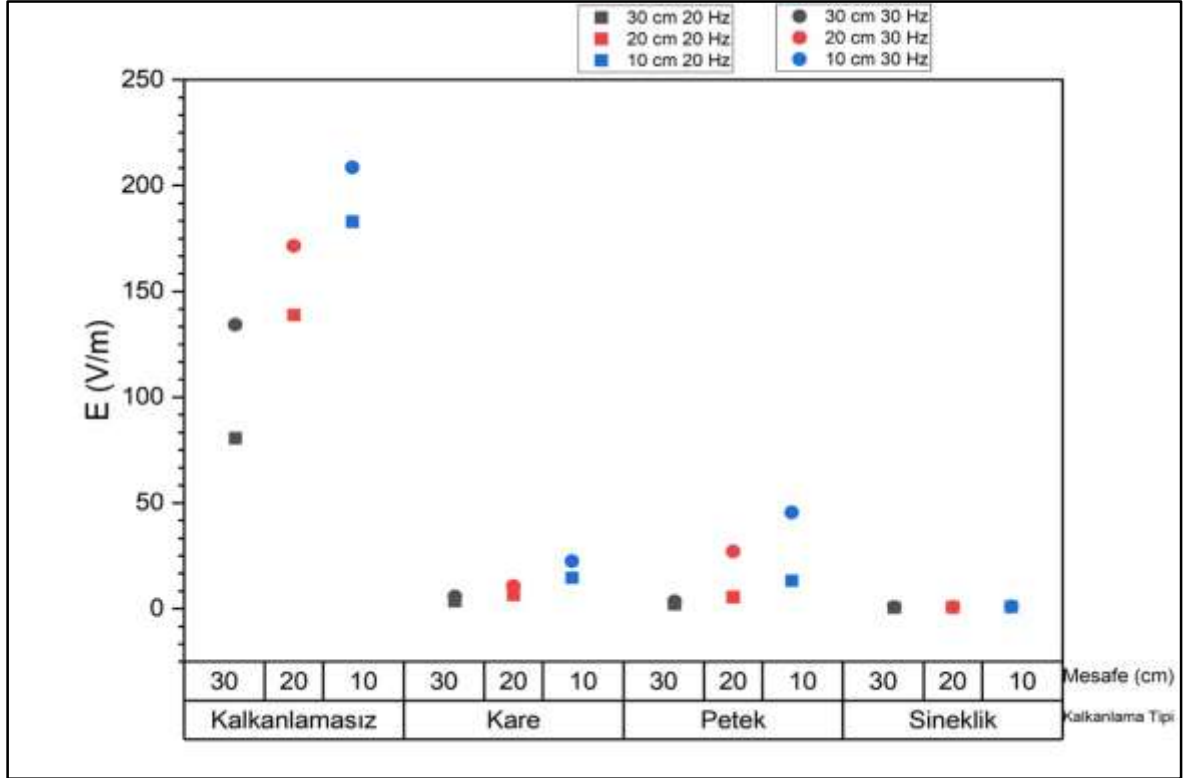


(a)



(b)

Şekil 6.5. Arka yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı

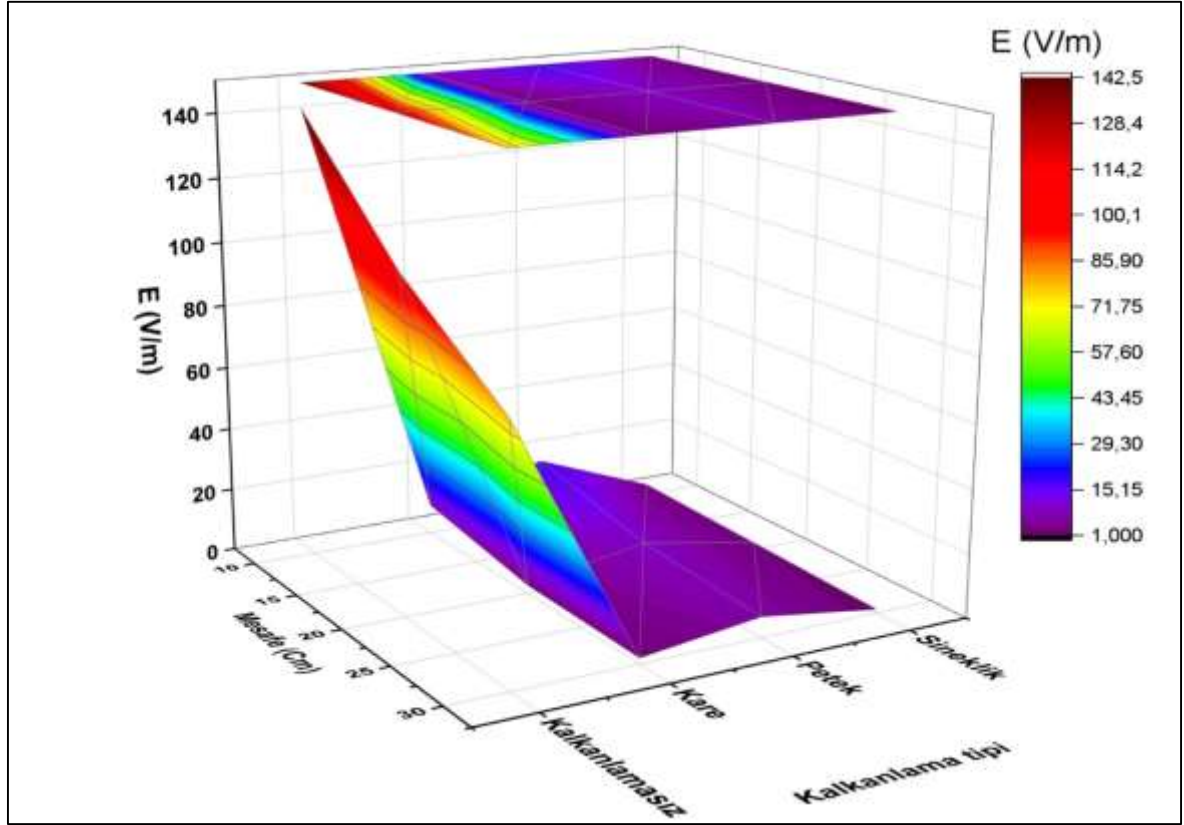


Şekil 6.6. Arka yüz iki boyutlu gösterim

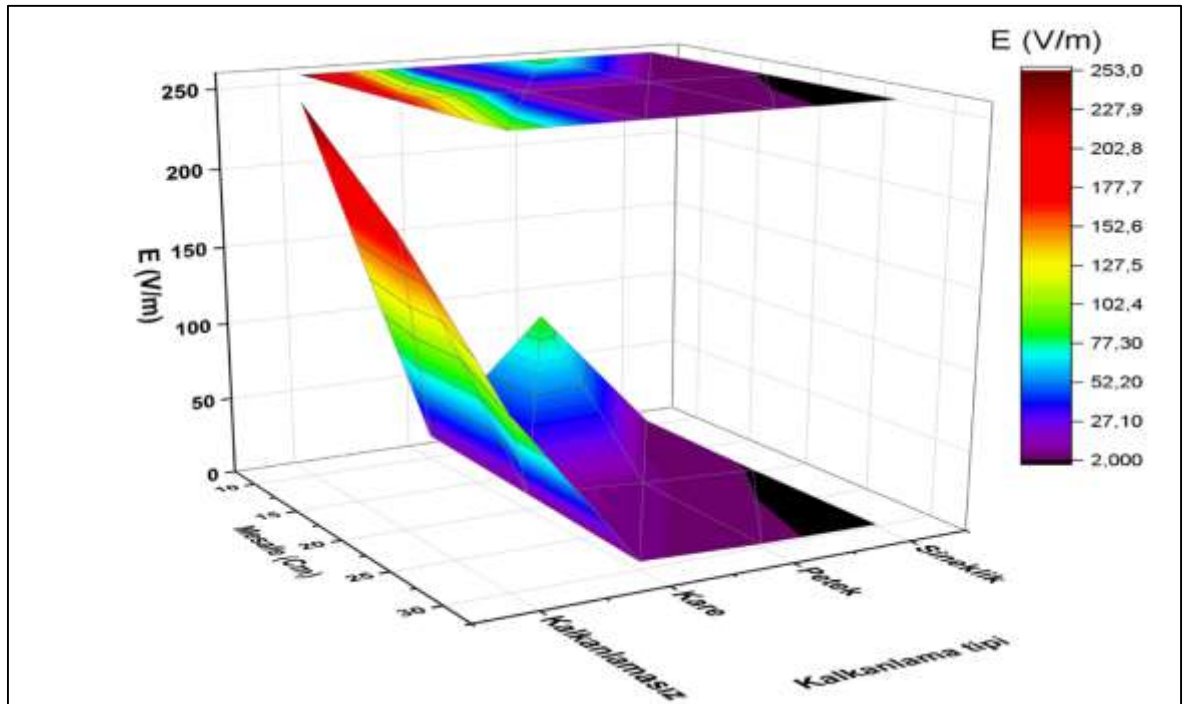
6.4. Jeneratör Sol Yüz Ölçümler

Şekil 6.7 (a, b) ve Şekil 6.8 jeneratörün sol yüz genel elektromanyetik özelliklerini göstermektedir. Hem 20 Hz dalga formu frekansı (yani rotor hızı için 100 rpm), hem de 30 Hz dalga formu frekansı (yani rotor hızı için 1100 rpm) için en yüksek elektromanyetik değerler sineklik için elde edilmiştir. Sol yüz için: 20 Hz frekansta, sineklik için elektrik alan 6,44 V/m iken kalkanlamasız durum için $E=530,8$ V/m, petek için $E=95,74$ V/m ve kare için $E=30,6$ V/m değerleri elde edilmiştir. 30 Hz frekansta sineklik için elektrik alan 15,79 V/m iken, kalkanlamasız durum için $E=562,8$ V/m, petek için $E=217,72$ V/m ve kare için $E=37,72$ V/m değeri ölçülmüştür. Bu değerlerin 10, 20, 30 cm mesafe değerlerinin toplamıdır.

Şekil 6.8 incelendiğinde maksimum değer kalkanlamasız ve mesafenin 10 cm olduğu durumda 252,9 V/m olarak elde edilmiştir. Minimum değer ise sineklik ve mesafenin 30 cm olduğu durumda 1,2 V/m olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda; elektromanyetik değer 30 Hz için 20 Hz'den daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

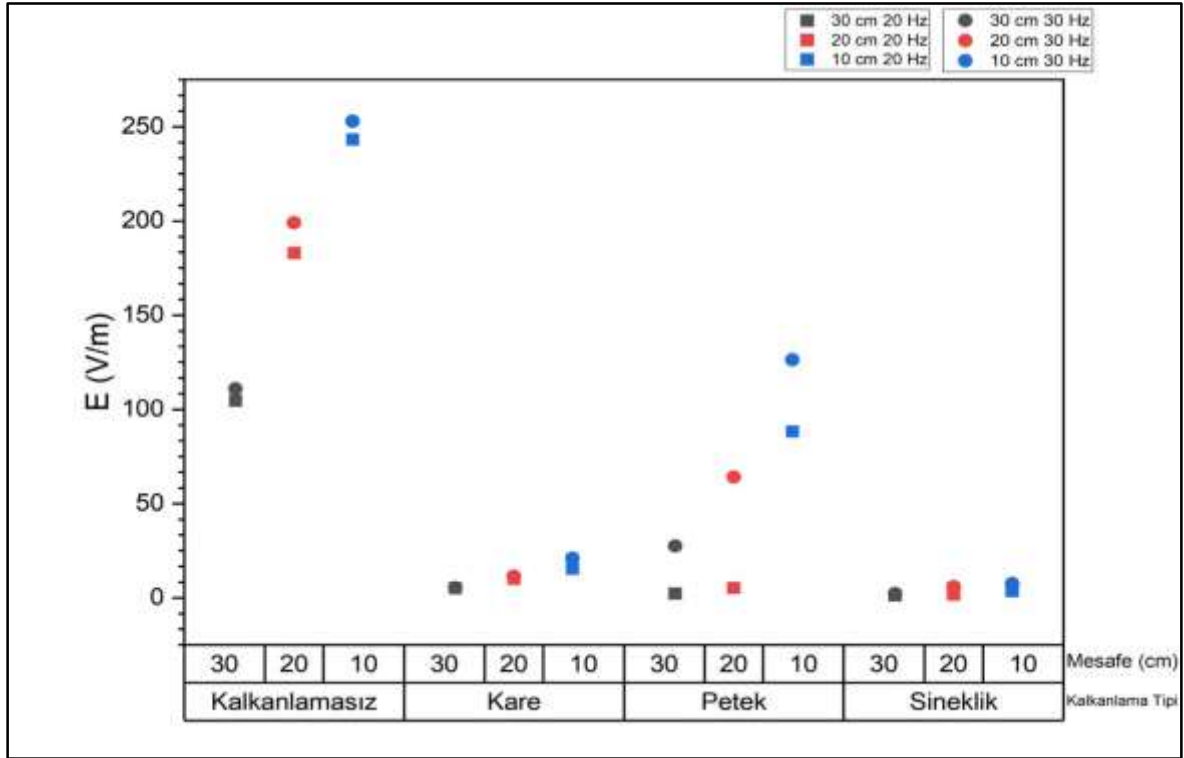


(a)



(b)

Şekil 6.7. Sol yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı

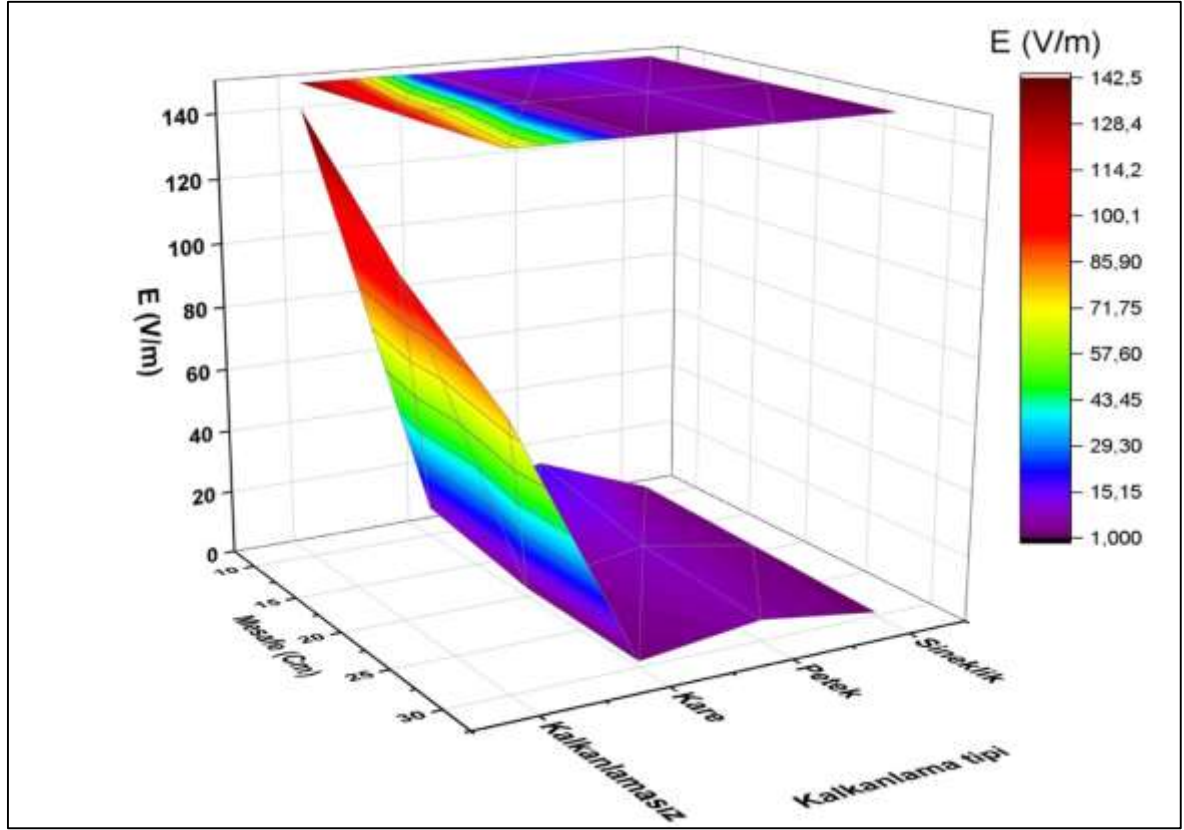


Şekil 6.8. Sol yüz iki boyutlu gösterim

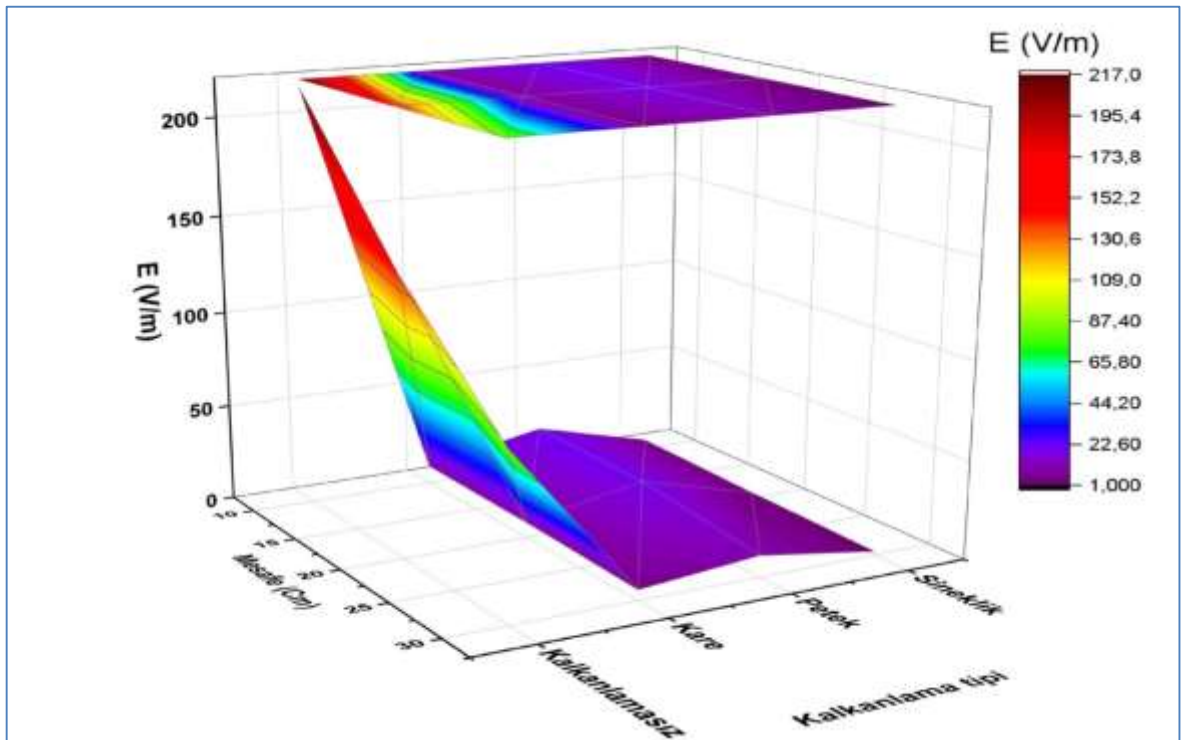
6.5. Jeneratör Üst Yüz Ölçümler

Şekil 6.9 (a, b) ve Şekil 6.10 jeneratörün üst yüz genel elektromanyetik özelliklerini göstermektedir. Hem 20 Hz dalga formu frekansı (yani rotor hızı için 100 rpm), hem de 30 Hz dalga formu frekansı (yani rotor hızı için 1100 rpm) için en yüksek elektromanyetik değerler sineklik için elde edilmiştir. üst yüz için: 20 Hz frekansta, sineklik için elektrik alan 7,19 V/m iken kalkanlamasız durum için $E=325,65$ V/m, petek için $E=34$ V/m ve kare için $E=13,86$ V/m değerleri elde edilmiştir. 30 Hz frekansında sineklik için elektrik alan 9,94 V/m iken, kalkanlamasız durum için $E=441,95$ V/m, petek için $E=51,29$ V/m ve kare için $E=22,75$ V/m değeri ölçülmüştür. Bu değerler 10, 20, 30 cm mesafe değerlerinin toplamıdır.

Şekil 6.10 incelendiğinde maksimum değerin kalkanlamasız ve mesafenin 10 cm olduğu durumda 216,1 V/m olarak elde edilmiştir. Minimum değer ise sineklik ve mesafenin 30 cm olduğu durumda 1,19 V/m olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda; elektromanyetik değerin 30 Hz için 20 Hz'den daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir

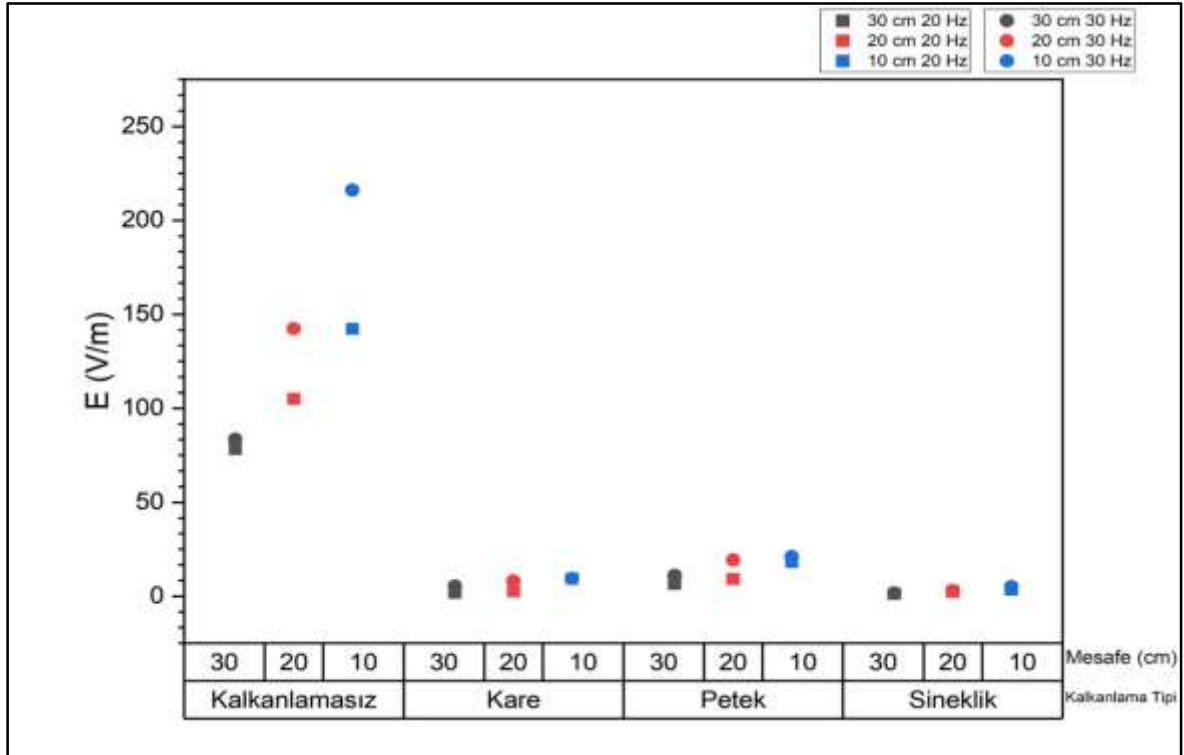


(a)



(b)

Şekil 6.9. Üst yüz (a) 20 Hz dalga frekansı, (b) 30 Hz dalga frekansı

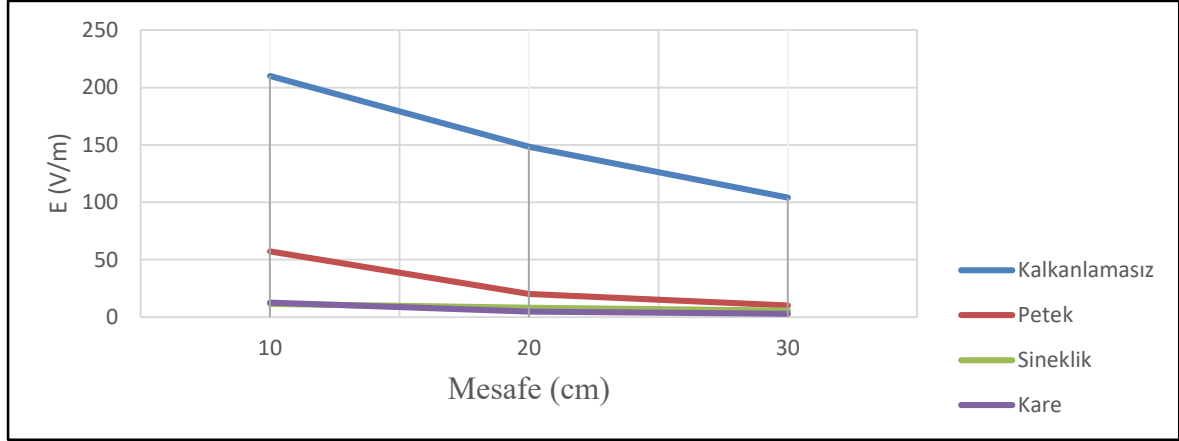


Şekil 6.10. Üst yüz iki boyutlu gösterim

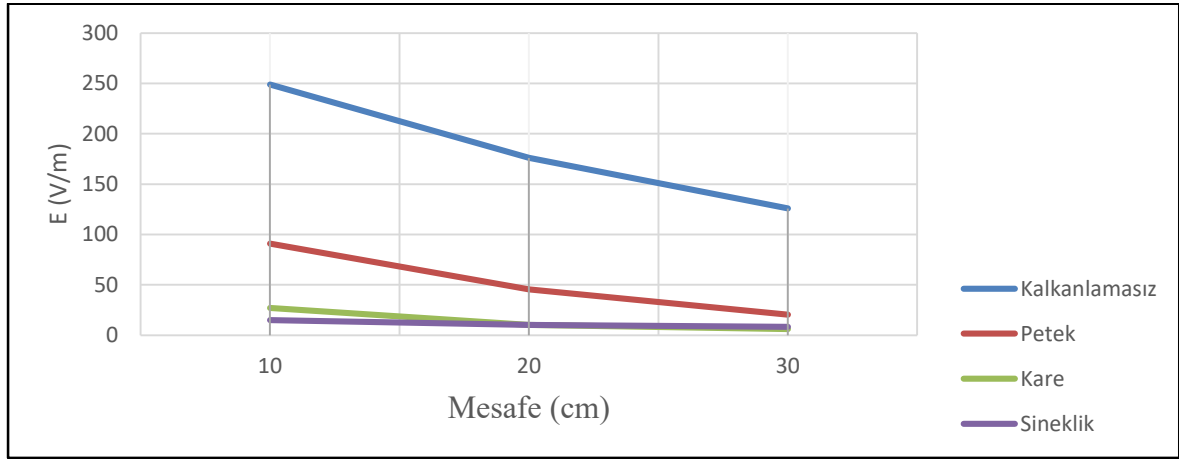
6.6. Mesafeye Göre Ölçümler

10, 20 ve 30 cm mesafelerden üç adet metal kafes için gerçekleştirilen ölçümler jeneratörün farklı bölgelerinde (ön, sağ, sol, arka, üst) elektrik alanının büyük miktarda azaldığı gösterilmiştir. EASMSJ'nin 100 rpm'den 1100 rpm dönüş hızına kadar olan ölçümleri bütün mesafeler ve kalkanlama malzemeleri için rpm değerler 20 Hz'den 30 Hz'e kadar dalga biçimleri üretmekte olup aşağıda Şekil 6.6 ve Şekil 6.7 incelendiğinde elektrik alanının frekansla arttığı ve mesafe artıkça elektrik alanının azaldığı ortaya koyulmuştur.

Mesafeye bağlı olarak elektrik alan değişimleri incelendiğinde değerlerin bütün yüzeylerde azaldığı ortaya koyulmuştur. Bu değerler Sineklik, petek ve kare olmak üzere 3 kafes ile kafeslerden 10 cm, 20 cm ve 30 cm' lik mesafelerde bütün yüzeylerin ortalama elektrik alan değerleri olup Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de verilmektedir.



Şekil 6.11. 20 Hz için mesafeye bağlı elektrik alan değişimi



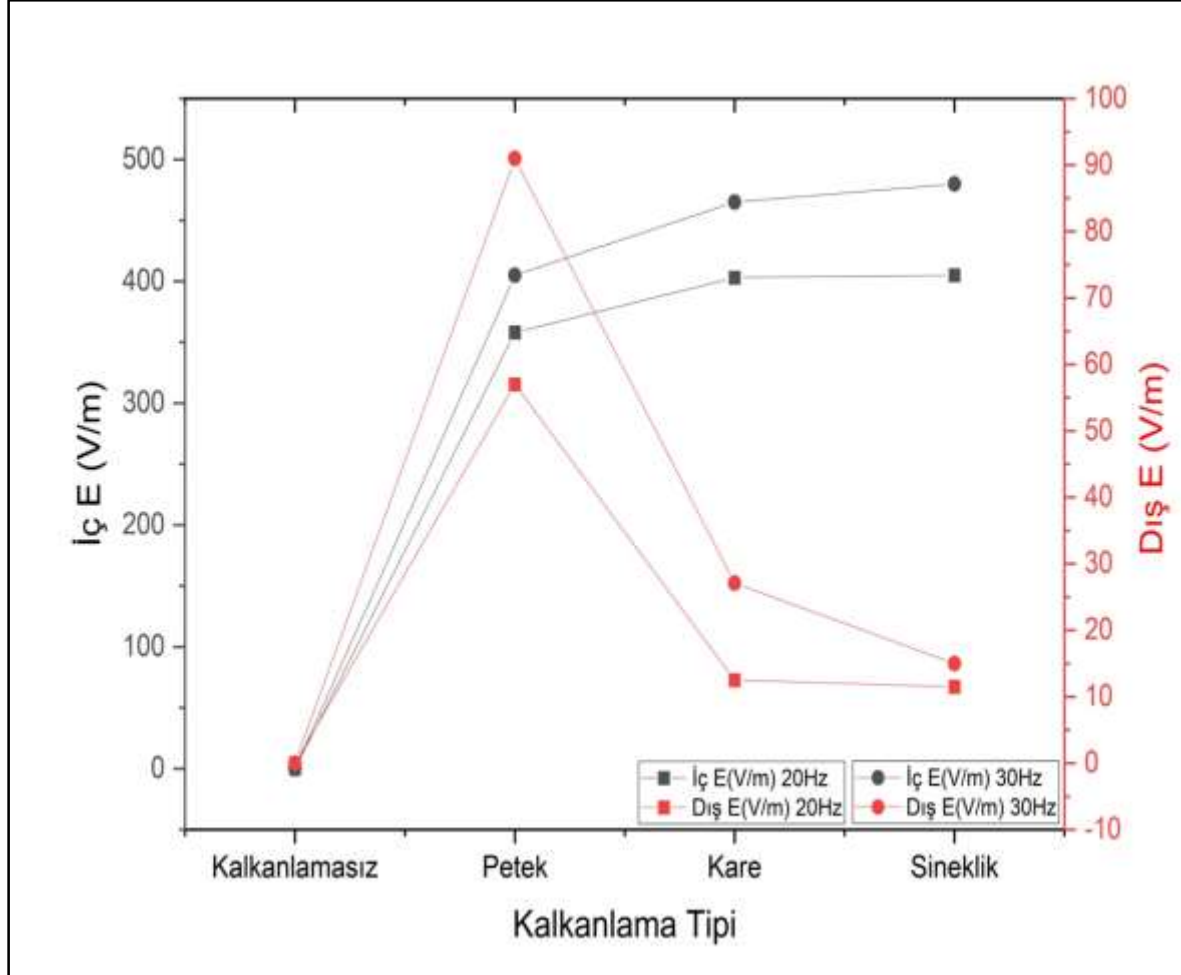
Şekil 6.12. 30 Hz için mesafeye bağlı elektrik alan değişimi

6.7. Jeneratör Dış ve İç Elektromanyetik Alan Ölçümleri

10 cm mesafeden dış ve iç elektromanyetik alanlar için ölçüm sonuçları Şekil 6.8' de verilmiştir. Kalkanlamasız durumda, dış elektromanyetik alanların en yüksek değerlerine ulaşılmış olup 248 V/m değerine 30 Hz ve 10 cm mesafede ulaşılmıştır. Kalkanlama uygulamasından sonra elektromanyetik alanın dışta doğrusal olarak azaldığı ve 20 Hz'de sineklik için en düşük değer olan 11,5 V/m değerine ulaştığı gözlenmiştir. Dış elektromanyetik alanın aksine, kalkanlama kafesinin içindeki iç elektromanyetik alanın doğrusal olarak arttığı ölçülmüştür.

Teoriye düşük frekanslarda yansıma kaybının etkisi artmakta olup kalkanlama etkinliği arttıkça kafesin içine yansıyan elektromanyetik dalganın büyüklüğü de artmakta ve bunun sonucunda kalkanlama kafesinin içinde ölçülen elektromanyetik alan değerinin artmasına

neden olmaktadır. Sineklikte en yüksek iç elektromanyetik alan değeri olan 480 V/m değerinde 30 Hz frekansta ulaşılmıştır.



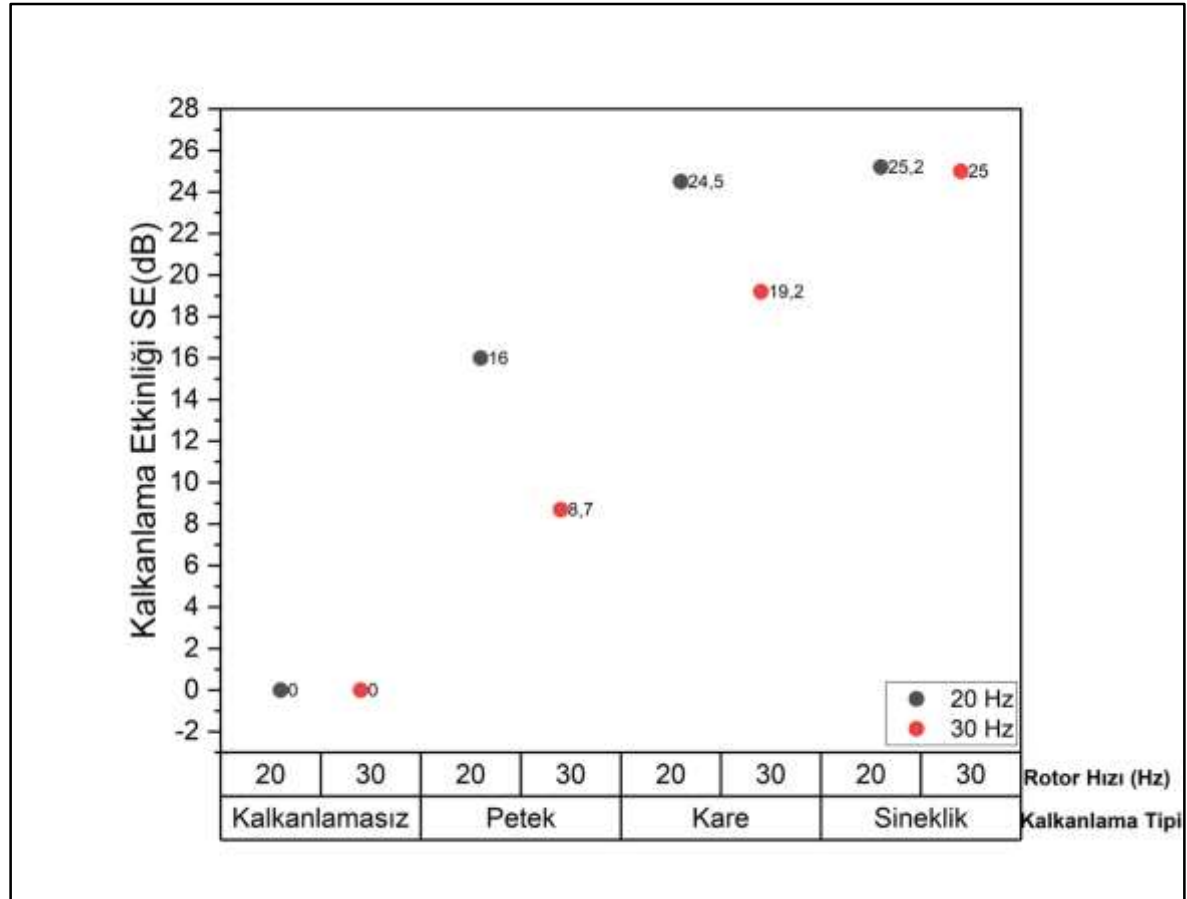
Şekil 6.13. Dış elektromanyetik alan ve kafes içi elektromanyetik alan

6.8. Jeneratör Kalkanlama Etkinliği

Kalkanlama etkinliği hesaplanırken 20 Hz ve 30 Hz frekanslar için ayrı ayrı iç ve dış bölümlerde oluşan elektromanyetik alanlar üzerinden SE hesaplanmıştır. Şekil 6.9, üç farklı kalkanlama malzemesi için 20 Hz ve 30 Hz'de kalkanlama etkinliği (SE) değerini özetlemektedir. Şekil 6.9' da görüldüğü üzere en yüksek kalkanlama değeri, farklı dalga biçimi frekanslarında sineklik tarafından sağlanmıştır. 20 Hz ve 30 Hz'de sineklik için 25 dB'nin üzerinde bir kalkanlama değeri sağlanmış olup bu değer. Petek için ise 20 Hz ve 30 Hz için sırasıyla 16 dB ve 8,7 dB'dir.

SE değeri 90 dB ile 120 dB arasında olan bir malzemenin mükemmel kalkanlama performansına sahip olduğu kabul edilmektedir. Hesaplanan 100 dB'den büyük herhangi bir zayıflama, malzemenin esasen geçilmez olduğu anlamına gelmektedir [30]. $SE \leq 10$ dB; zayıf, 10-30 dB; kabul edilebilir ve $SE \geq 30$ dB; endüstriyel ve ticari uygulamalar için kabul edilebilir değer olan 20 dB değerini aşan kalkanlama olarak kabul edilir [3,53].

Kalkanlama etkinliği değerleri incelendiğinde kalkan malzemelerin ve frekans değerinin özelliklerinden dolayı yansıma kaybının etkili olduğu görülmektedir. Bu nedenle iç elektromanyetik alan değerleri kalkanlama malzemesi içindeki yansıma kaybı değerleri ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 6.14. Kalkanlama etkinliği sonuçları

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, eksenel ve radyal akıllı sabit mıknatıslı senkron jeneratörün elektromanyetik girişim (EMG) ölçümü gerçekleştirilmiş olup farklı malzemeler kullanılarak bu girişimin önüne geçilmesi ve en yüksek kalkanlama etkinliği değeri elde edilebilmesi için en uygun yöntemin seçilmesi üzerine odaklanılmıştır. Öncelikle yaygın olarak kullanılan ölçüm tekniklerinden bahsedilmiş ve tüm ölçümler neticesinde jeneratör için tüm rotor hızlarından en iyi koruma etkinliğinin sineklik kafes yöntemi tarafından sağlandığı gösterilmiştir. Elektromanyetik alan, kafesten uzaklaştıkça azalırken, kalkansız duruma kıyasla üç yöntem içinde iyi bir koruma etkisi kaydedilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümler ve ardından hesaplamalar sonucunda kalkanlama malzemesinin yanı sıra malzemenin şeklinin ve yapısının elektromanyetik girişimi engelleme konusunda önemli bir parametre olduğunu gösterilmiştir.

Teoriye göre kalkan empedansı frekansla birlikte arttığından, yansıma kaybı artan frekansla azalmaktadır. Bununla birlikte soğurma kaybı, azalan deri kalınlığı nedeniyle frekansla birlikte artmaktadır. Düşük frekanslarda yansıma kaybının zayıflamanın çoğundan sorumlu olduğu, oysa yüksek frekanslardaki zayıflamanın çoğunun soğurma kaybından geldiği bilinmektedir. Bu tez çalışmasında kalkanlama içerisindeki elektromanyetik alan değerlerinin yüksek olduğu bulunmuştur. Yansıma kaybının üç kalkanlama mekanizması (sineklik, petek ve kare) için de yüksek olduğu ancak sineklik için en yüksek değere ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Kalkanlama etkinlikleri sonuçları incelendiğinde petek için, 20 Hz ve 30 Hz frekansları için sırasıyla 11,3 dB ve 8,7 dB SE değerleri elde edilmiştir. İkinci kalkanlama yöntemi olan kare için, 20 Hz ve 30 Hz frekanslarında sırasıyla 24,5 dB ve 19,2 dB SE değerleri elde edilmiştir. Son yöntem olan sineklik için ise, 20 Hz ve 30 Hz frekanslarında sırasıyla 25,2 dB ve 25 dB SE değerleri elde edilmiştir. Sineklik yöntemi için SE değerinin tüm ölçüm mesafelerinde ve farklı frekanslarda 25 dB üzerinde olduğu ve petek ve kare kalkanlamaya göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Sineklik için kullanılan malzemenin paslanmaz çelik olduğu düşünüldüğünde petek ve kareden farklı olarak iletkenliği daha yüksek bir malzeme kullanılırsa kalkanlamanın çok

daha iyi olacağı görülmektedir. Sineklik için kullanılan malzemesinin çapının petek ve kareye göre daha küçük olması en iyi SE değerinin elde edilmesinde önemli bir etken olduğu ortaya koyulmuştur. Kalkanlama etkinliği üzerine literatür çalışmaları incelendiğinde kalkanlama malzemesinin geometrik özelliklerinin yeterince dikkate alınmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda; kalkanlama malzemesi geometrisinin kalkanlama etkinliğinde önemli bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur. Bu bağlamda; yeni tasarlanmış jeneratörün elektromanyetik kalkanlama etkinliği sonuçları literatüre katkı sağlayacaktır.

Elde edilen ölçüm sonuçları neticesinde hesaplanan SE değerleri incelendiğinde üç ayrı kalkanlama malzemesi (sineklik, petek ve kare) için de 10 dB olan kabul edilebilir seviyenin üzerinde kalkanlama sağlanmıştır. Ayrıca; endüstriyel ve ticari uygulamalarda kabul edilebilir seviyede olan 20 dB kalkanlama etkinliği değerinin de kare ve sineklik kalkanlama malzemeleriyle sağlandığı ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Rajavel, K., Yu, X., Zhu, P., Hu, Y., Sun, R. and Wong, C. (2021). Investigation on the structural quality dependent electromagnetic interference shielding performance of few-layer and lamellar Nb₂CTx MXene nanostructures. *Journal of Alloys and Compounds*, 877, 160235.
2. Çelik, K. and Kurt, E. (2021). Design and implementation of a dual band bioinspired leaf rectenna for RF energy harvesting applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31(11), e22868.
3. Akram, S., Ashraf, M., Javid, A., Abid, H.A., Ahmad, S., Nawab, Y. and Nosheen, A. (2023). Recent advances in electromagnetic interference (EMI) shielding textiles: A comprehensive review. *Synthetic Metals*, 294, 117305.
4. Zhan, Y., Long, Z., Wan, X., Zhang, J., He, S. and He, Y. (2018). 3D carbon fiber mats/nano-Fe₃O₄ hybrid material with high electromagnetic shielding performance. *Applied Surface Science*, 444, 710-720.
5. Wanasinghe, D., Aslani, F. and Ma, G. (2020). Electromagnetic shielding properties of carbon fibre reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 260, 120439.
6. Liu, L., Chen, X., Wang, J., Qiao, L., and Gao, S. (2019). Effects of Y and Zn additions on electrical conductivity and electromagnetic shielding effectiveness of Mg-Y-Zn alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(6), 1074-1080.
7. Sadeghierad, M., Lesani, H., Monsef, H. and Darabi, A. (2009). Detail Modeling of High Speed Axial Flux Pm Generator. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(2), 1467-1475.
8. Kurt, E., Aslan, S. and Demirtas, M. (2012). *Cogging torque exploration of radially and angularly directed fluxes in a new PM generator with the multiple stators*. Proceedings of the 7th. int. conf. & Exh. ecological vehicles and renewable energies—EVER, Monte-Carlo, Monaco.
9. Kurt, E., Gör, H. and Çelik, K. (2021). Optimization of a 3-kW axial flux permanent magnet generator with variable air gap. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(11), e13074.
10. Güçlü, G.G. (2011). *50 Hz elektromanyetik alanlar ve biyolojik etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 30-50.
11. Palamutcu, S., Ahmet, Ö., Karpuz, C. and Nermin, D. (2010). Electrically conductive textile surfaces and their electromagnetic shielding efficiency measurement. *Textile and Apparel*, 20(3), 199-207.
12. Serway, A. and Beichner, R. (2002). *Fen ve Mühendislik için Fizik*. (Çev. K. Çolakoğlu) Ankara: Palme Yayıncılık, 20-28.

13. Rikitake, T. (1987). *Magnetic and electromagnetic shielding*. Tokyo: Springer Science & Business Media, 5-8.
14. Bertotti, G. (1998). *Hysteresis in magnetism: for physicists, materials scientists, and engineers*. San Diego: Gulf Professional Publishing, 15-18.
15. Çınar, K. (2006). Elektromanyetik alan. İstanbul: *Bilim ve Teknik*, 80-81.
16. Kaiser, K.L. (2005). *Electromagnetic shielding*. Florida: Crc Press, 3-8.
17. Ott, H.W. and Ott, H.W. (1988). *Noise reduction techniques in electronic systems*. New York: Wiley, 110-150 .
18. Zakaria, N.A., Sudirman, R. and Jamaluddin, M.N. (2008). *Electromagnetic interference effect from power line noise in electrocardiograph signal using Faraday cage*. Paper presented at the 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia.
19. Leferink, F., Silva, F., Catrysse, J., Batterman, S., Beauvois, V. and Roc'h, A. (2010). Man-made noise in our living environments. *URSI Radio Science Bulletin*, 2010(334), 49-57.
20. 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.
21. Kolyer, J.M. and Watson, D. (1995). *ESD from A to Z: electrostatic discharge control for electronics*. Massachusetts: Springer Science & Business Media, 25.
22. Peng, Z. and Shufang, L. (2005). *The relationship between Ground and EMI*. Paper presented at the 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Beijing, China.
23. Özen, Ş. and Arı, N. (2008). *Elektromanyetik uyumluluk*. Ankara. Palme Yayıncılık, 30-50.
24. Violette, N. (2013). *Electromagnetic compatibility handbook*. New York: Springer, 310-362.
25. Montrose, M.I. and Nakauchi, E.M. (2004). *Testing for EMC compliance: approaches and techniques*. New York: John Wiley & Sons, 27-40.
26. Lienig, J. and Bruemmer, H. (2017). *Fundamentals of electronic systems design*. Dresden: Springer, 183.
27. Tahar, M., Abdechafik, H. and Mecheri, K. (2018). *Modelling and measurement of electromagnetic shielding effectiveness*. Paper presented at the 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Algiers, Algeria.

28. Viskadourakis, Z., Vasilopoulos, K., Economou, E., Soukoulis, C.M. and Kenanakis, G. (2017). Electromagnetic shielding effectiveness of 3D printed polymer composites. *Applied Physics A*, 123, 1-7.
29. Neruda, M. and Vojtech, L. (2018). Electromagnetic shielding effectiveness of woven fabrics with high electrical conductivity: Complete derivation and verification of analytical model. *Materials*, 11(9), 1657.
30. Munalli, D., Dimitrakakis, G., Chronopoulos, D., Greedy, S. and Long, A. (2019). Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106906.
31. Dönmez, E.T. and Türker, E. (2017). Tekstil atıkları içeren yüzeylerin sahip olduğu elektromanyetik kalkanlama, ses ve ısı izolasyonu özellikleriyle ilgili literatür incelemesi. *Tekstil ve Mühendis*, 24(106), 124-135.
32. Çerezci, O., Kartal, Z. and Pala, K. (2012). *Elektromanyetik alan ve sağlık etkileri*. Ankara: Özsan Matbaacılık, 106-114.
33. Tong, X.C. (2016). *Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding*. Beijing: CRC press, 38-50.
34. Geetha, S., Satheesh Kumar, K., Rao, C.R., Vijayan, M. and Trivedi, D. (2009). EMI shielding: Methods and materials—A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(4), 2073-2086.
35. Bigg, D.M. and Bradbury, E.J. (1981). Conductive polymeric composites from short conductive fibers. *Conductive Polymers*, 23-38.
36. Ott, H.W. (2011). *Electromagnetic compatibility engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons, 238-293.
37. Celozzi, S., Araneo, R., Burghignoli, P. and Lovat, G. (2023). *Electromagnetic Shielding: Theory and Applications*. Hoboken: John Wiley & Sons, 317-350.
38. Mishra, R.K., Dutta, A., Mishra, P. and Thomas, S. (2018). Recent progress in electromagnetic absorbing materials. *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding*, 147-166.
39. Trivedi, D.C. and Dhawan, S.K. (1993). Shielding of electromagnetic interference using polyaniline. *Synthetic Metals*, 59(2), 267-272.
40. Polder, D. (1948). On the phenomenology of ferromagnetic resonance. *Physical Review*, 73(9), 1120.
41. Nagasawa, C., Kumagai, Y., Urabe, K. and Shinagawa, S. (1999). Electromagnetic shielding particleboard with nickel-plated wood particles. *Journal of Porous Materials*, 6, 247-254.

42. Kim, B., Koncar, V., Devaux, E., Dufour, C. and Viallier, P. (2004). Electrical and morphological properties of PP and PET conductive polymer fibers. *Synthetic Metals*, 146(2), 167-174.
43. Thomassin, J.-M., Jerome, C., Pardoën, T., Bailly, C., Huynen, I. and Detrembleur, C. (2013). Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(7), 211-232.
44. Saini, P. and Arora, M. (2012). Microwave absorption and EMI shielding behavior of nanocomposites based on intrinsically conducting polymers, graphene and carbon nanotubes. *New Polymers for Special Applications*, 3, 73-112.
45. Paul, C.R., Scully, R.C. and Steffka, M.A. (2022). *Introduction to electromagnetic compatibility*, Hoboken: John Wiley & Sons, 713-753.
46. Chung, D. (2000). Materials for electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Engineering and performance*, 9, 350-354.
47. Phan, C., Mariatti, M. and Koh, Y. (2016). Electromagnetic interference shielding performance of epoxy composites filled with multiwalled carbon nanotubes/manganese zinc ferrite hybrid fillers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 401, 472-478.
48. Jaroszewski, M., Thomas, S. and Rane, A.V. (2018). *Advanced materials for electromagnetic shielding: fundamentals, properties, and applications*. New Jersey: Wiley, 70-71.
49. Das, A., Kothari, V., Kothari, A. and Kumar, A. (2009). Effect of various parameters on electromagnetic shielding effectiveness of textile fabrics. *Indian Journal of Fibre & Textile*, 34, 144-148.
50. Khan, M.T. and Ali, S.M. (2012). A brief review of measuring techniques for characterization of dielectric materials. *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, 1(1), 2-3.
51. Amaro, A., Suarez, A., Torres, J., Martinez, P.A. and Penades, A. (2023). Shielding effectiveness measurement method for planar nanomaterial samples based on cnt materials up to 18 ghz. *Magnetochemistry*, 9(5), 114.
52. Hromádka, M. and Kubík, Z. (2013). *Suggestion for changes in shielding effectiveness measuring standard*. Paper presented at the 2013 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), Hungary.
53. Afilipoaei, C. and Teodorescu-Draghicescu, H. (2020). A review over electromagnetic shielding effectiveness of composite materials. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 63(1), 23.
54. Gor, H. and Kurt, E. (2016). Waveform characteristics and losses of a new double sided axial and radial flux generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(29), 12512-12524.

55. Güler, N., Irmak, E., Gör, H. and Kurt, E. (2017). An inverter design for a new permanent magnet synchronous generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17723-17732.
56. Li, H. and Chen, Z. (2008). Overview of different wind generator systems and their comparisons. *IET Renewable Power Generation*, 2(2), 123-138.
57. Grauers, A. (1996). *Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines* Doctor of Philosophy Thesis, Chalmers University of Technology Electric Power Engineering, Göteborg, 15-17.
58. Parviainen, A., Niemela, M., Pyrhonen, J. and Mantere, J. (2005). *Performance comparison between low-speed axial-flux and radial-flux permanent-magnet machines including mechanical constraints*. Paper presented at the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, USA.
59. Sung, S.-Y., Jeong, J.-H., Park, Y.-S., Choi, J.-Y. and Jang, S.-M. (2012). Improved analytical modeling of axial flux machine with a double-sided permanent magnet rotor and slotless stator based on an analytical method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(11), 2945-2948.
60. Aydin, M. and Guven, M. (2013). *Design of several permanent magnet synchronous generators for high power traction applications*. Paper presented at the 2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, USA.
61. Lesani, H., Monsef, H. and Darabi, A. (2007). *Design considerations of high speed axial flux permanent magnet generator with coreless stator*. Paper presented at the 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore.
62. Bumby, J. and Martin, R. (2005). Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 152(5), 1065-1075.
63. Chan, C. (1987). Axial-field electrical machines-design and applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (2), 294-300.
64. Kurt, E., Gör, H. and Demirtaş, M. (2014). Theoretical and experimental analyses of a single phase permanent magnet generator (PMG) with multiple cores having axial and radial directed fluxes. *Energy Conversion and Management*, 77, 163-172.
65. Chan, T., Wang, W. and Lai, L. (2012). Magnetic field in a transverse-and axial-flux permanent magnet synchronous generator from 3-D FEA. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(2), 1055-1058.
66. Gör, H. and Kurt, E. (2016). Preliminary studies of a new permanent magnet generator (PMG) with the axial and radial flux morphology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17), 7005-7018.
67. Gieras, J.F., Wang, R.-J. and Kamper, M.J. (2008). *Axial flux permanent magnet brushless machines*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 193-208.

68. Wanjiku, J., Jagau, H., Khan, M. and Barendse, P. (2011). *Minimization of cogging torque in a small axial-flux PMSG with a parallel-teeth stator*. Paper presented at the 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Phoenix.



Gazili olmak ayrıcalıktır