



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**YÜKSEK GERİLİM ve YÜKSEK FREKANS ALTINDA POLYESTER
YALITKANLARIN ELEKTRİKSEL DAVRANIŞININ ANALİZİ**

Cihan Burak FIRAT

DANIŞMAN

Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

II. DANIŞMAN

Prof. Dr. Yasin ÖZÇELEP

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Doktora Programı

Haziran, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Cihan Burak FIRAT tarafından, **Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU** danışmanlığında hazırlanan "**YÜKSEK GERİLİM ve YÜKSEK FREKANS ALTINDA POLYESTER YALITKANLARIN ELEKTRİKSEL DAVRANIŞININ ANALİZİ**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **17/06/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU İstanbul Üniversitesi -Cerrahpaşa Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Aysel ERSOY İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Mukden UĞUR Yeditepe Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu	☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Abdurrahim AKGÜNDOĞDU İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KONAL Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret



Sevgili oğlum Mert Fırat’a ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

**YÜKSEK GERİLİM ve YÜKSEK FREKANS ALTINDA POLYESTER YALITKANLARIN
ELEKTRİKSEL DAVRANIŞININ ANALİZİ**

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 36105

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimle başlayan akademik yolculuğumda, beni doktora yapmaya teşvik eden; lisansüstü eğitim sürecim boyunca engin bilgisi, kıymetli tecrübesi ve rehberliğiyle her karanlıkta yolumu aydınlatan; desteğini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU'na en içten şükranlarımı sunarım.

Bununla birlikte, öğrenim hayatım boyunca her daim yanımda olan, sevgileri, sabırları, duaları ve fedakârlıklarıyla beni her adımda destekleyen, varlıklarıyla güç bulduğum canım annem ve babama; bu zorlu yolculukta sabrıyla, anlayışıyla ve sonsuz desteğiyle daima yanımda olan sevgili eşime ve hayatıma anlam katan evlatlarıma en derin teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2025

Cihan Burak FIRAT

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	4
3. YÖNTEM.....	17
3.1. KATI YALITKAN MALZEMELER.....	17
3.2. YÜKSEK FREKANSLI YÜKSEK GERİLİM ÜRETECİ	20
3.3. IEC60587 TEST DÜZENİĞİ	30
3.4. UYARLANABİLİR GÜRÜLTÜ İLE KOMPLE TOPLULUK GÖRGÜL KİP AYRIŞTIRMASI (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise CEEMDAN).....	32
4. BULGULAR	40
4.1. KAÇAK AKIM İŞARETLERİ.....	40
4.1.1. Standart Eğik Düzlem Testi (50Hz) İşaretleri.....	40
4.1.2. 6kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri	41
4.1.3. 8kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri	41
4.1.4. 10 kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri	42
4.1.5. 12kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri	42
4.1.6. 14kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri	43
4.2. DELİNME İLERLEYİŞİNİN İZLENMESİ.....	44

4.3. CEEMDAN METODU İLE KAÇAK AKIM ANALİZİ	45
4.3.1. 14 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi	45
4.3.2. 12 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi	49
4.3.3. 10 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi	54
4.3.4. 8 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi	58
4.3.5. 6 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi	63
4.3.6. 50 Hz Frekansında CEEMDAN Analizi	68
4.4. IMF ENERJİ DAĞILIMLARI	72
4.4.1. 14 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi	72
4.4.2. 12 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi	74
4.4.3. 10 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi	77
4.4.4. 8 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi	79
4.4.5. 6 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi	81
4.4.6. 50 Hz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi	83
4.5. KISMİ DEŞARJ DESENLERİ	85
4.5.1. 14 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	86
4.5.2. 14 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	87
4.5.3. 12 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	88
4.5.4. 12 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	89
4.5.5. 10 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	90
4.5.6. 10 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	91
4.5.7. 8 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	92
4.5.8. 8 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	93
4.5.9. 6 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	94
4.5.10. 6 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	95
4.5.11. 50 Hz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	96
4.5.12. 50 Hz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni	97
4.6. NUMUNE BOZULMA SÜRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	98
5. TARTIŞMA.....	100
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	102
KAYNAKLAR.....	104
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	110
ETİK KURUL İZİN YAZISI	111
KURUM İZNİ YAZILARI.....	112

ÖZGEÇMİŞ Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1-1 YFYG Sinyal Elde Edilmesi.	2
Şekil 2-1 Polyester Numunesi.	8
Şekil 2-2 Katkılı Polyester Numunesi.	8
Şekil 2-3 Kanal Oluşumu Başlamış Polyester Numunesi.	9
Şekil 2-4 Delinmesi Tamamlanmış Bir Polyester Numunesi.	10
Şekil 2-5 Elanseralathan ve Arkadaşlarının Çalışmasında Verilen Osilatör Şematik Diyagramı [33].	12
Şekil 2-6 Yüksek Frekans Yüksek Gerilim Altında Katı Yalıtkan Malzemelerin 0,75mm Uzunluğundaki Delinme Gerilimleri [44].	15
Şekil 3-1 Kalıp İçine Dökülmüş Polyester.	18
Şekil 3-2 Devre Diyagramı.	21
Şekil 3-3 OPA549 [52].	21
Şekil 3-4 OPA549 Bağlantı Diyagramı [52].	22
Şekil 3-5 Çıkış Akımını Yükseltmek Amacıyla Paralel Bağlama Yöntemi [52].	23
Şekil 3-6 Kuvvetlendirici Devre.	24
Şekil 3-7 Yüksek Frekanslı Yüksek Güç Üreten Devre.	24
Şekil 3-8 Yüksek Frekanslı Transformatör Eşdeğer Devresi [53].	26
Şekil 3-9 (a)Ham Polyamid (b) İşlenmekte Olan Polyamid.	27
Şekil 3-10 Transformatör.	29
Şekil 3-11 Test Düzeneği.	30
Şekil 3-12 Deneylerde Kullanılan Test Düzeneği.	31
Şekil 3-13 (a)Yüksek Gerilim Elektrodu (b) Toprak Elektrodu.	31
Şekil 4-1 50 Hz için alınan sinyal verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.	40

Şekil 4-2 6 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.	41
Şekil 4-3 8 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.	41
Şekil 4-4 10 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.	42
Şekil 4-5 12 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.	42
Şekil 4-6 14 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.	43
Şekil 4-7 Bir Polyester Numunesinde Delinmenin Aşamaları.	44
Şekil 4-8 14 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	45
Şekil 4-9 14 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	47
Şekil 4-10 12 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	49
Şekil 4-11 12 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	52
Şekil 4-12 10 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	54
Şekil 4-13 10 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	56
Şekil 4-14 8 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	58
Şekil 4-15 8 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	60
Şekil 4-16 6 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	63
Şekil 4-17 6 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	65
Şekil 4-18 50 Hz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	68
Şekil 4-19 50 Hz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.	70
Şekil 4-20 14 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	72
Şekil 4-21 14 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	73
Şekil 4-22 12 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	74
Şekil 4-23 12 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	75
Şekil 4-24 10 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	77
Şekil 4-25 10 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	78
Şekil 4-26 8 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	79
Şekil 4-27 8 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	80
Şekil 4-28 6 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	81

Şekil 4-29 6 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	82
Şekil 4-30 50 Hz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.....	83
Şekil 4-31 50 Hz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.	84
Şekil 4-32 14 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni (PD Pattern).	86
Şekil 4-33 14 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	87
Şekil 4-34 12 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	88
Şekil 4-35 12 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	89
Şekil 4-36 10 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	90
Şekil 4-37 10 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	91
Şekil 4-38 8 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	92
Şekil 4-39 8 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	93
Şekil 4-40 6 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	94
Şekil 4-41 6 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	95
Şekil 4-42 50 Hz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	96
Şekil 4-43 50 Hz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.	97
Şekil 4-44 Katkılı ve Katkısız Numunelerin Farklı Frekanslardaki Ortalama Delinme Süreleri	98

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1 14 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri....	46
Tablo 4.2 14 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri..	48
Tablo 4.3 12 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri...	50
Tablo 4.4 12 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.	52
Tablo 4.5 10 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri...	54
Tablo 4.6 10 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.	56
Tablo 4.7 8 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri....	59
Tablo 4.8 8 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri. ..	61
Tablo 4.9 6 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri....	63
Tablo 4.10 6 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri..	66
Tablo 4.11 50 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.	69
Tablo 4.12 50 Hz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.	70

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
°C	: Santigrat derece
A	: Amper
kVA	: Kilo Volt Amper
mm	: milimetre
cm	: santimetre
Hz	: Hertz
kHz	: Kilo Hertz
MHz	: Mega Hertz
Ω	: Ohm
$\Omega \cdot \text{cm}$	: Ohm-santimetre
cm^3	: Santimetreküp
gr/cm^3	: Gram Bölü Santimetreküp
g	: gram
kg	: kilogram
V	: Volt
kV	: kilo Volt
ϵ_r	:Dielektrik Sabiti
W	: Watt
kW	: Kilo Watt
kV/mm	: Kilovolt Bölü Milimetre
MPa	: Megapascal

Kısaltmalar	Açıklama
CEEMDAN	: Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise
IMF	: Intrinsic Mode Function
AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
GND	: Ground
PVC	: Polivinilklorür
PE	: Polietilen
PEEK	: Polieter-eterketon
OPAMP	: Operational Amplifier
HFHV	: High Frequency High Voltage
HVAC	: High Voltage Alternating Current
ASTM	: American Society for Testing and Materials
IEC	: International Electrotechnical Commission
SMPS	: Switch Mode Power Supply
BNC	: Bayonet Neill–Concelman

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

[YÜKSEK GERİLİM ve YÜKSEK FREKANS ALTINDA POLYESTER YALITKANLARIN ELEKTRİKSEL DAVRANIŞININ ANALİZİ]

[Cihan Burak FIRAT]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Doktora Programı

[Danışman : Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU]

II. Danışman : Prof. Dr. Yasin ÖZÇELEP]

Elektrik iletiminin güvenli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi, özellikle yüksek gerilimli sistemlerde, yalıtkan malzemelerin doğru bir şekilde seçilmesi ve uygulanmasına bağlıdır. Elektriksel yalıtkan malzemeler, elektrik akımının kontrolsüz bir şekilde istenmeyen bölgelere taşınmasını engelleyerek, elektriksel güvenliği sağlar ve sistemin performansını artırır. Bu nedenle, elektriksel iletim sistemlerinde kullanılan yalıtkan malzemelerin yüksek frekanslar ve yüksek gerilimler altındaki davranışlarını anlamak, güvenli ve verimli elektrik iletimi için büyük önem taşımaktadır. Yalıtkanlar, katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç farklı fazda bulunabilir. Bu tez çalışmasında yalnızca katı yalıtkan malzemelerin incelenmesi hedeflenmiştir.

Katı yalıtkan malzemeler, özellikle yüksek gerilimli sistemlerde kritik bir rol oynar. Yıldırım gibi ani ve beklenmedik durumlar sırasında, bu malzemeler üzerinde yüksek frekanslı ve yüksek gerilimli sinyaller oluşabilir. Bu tür olaylar, yalıtkan malzemelerin performansını etkileyebilir ve hatta sistemin güvenliğini tehlikeye atabilir. Bu çalışmanın amacı, yüksek frekanslı yüksek gerilimli sinyallerin katı yalıtkan malzemeler üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu bağlamda, bir dizi deneysel test gerçekleştirilmiş ve bu testler için ilk olarak gerekli olan yüksek frekanslı yüksek gerilimli işaretler elde edilmiştir. Ardından Bu işaretler eşik düzlem deney sistemi üzerinde katkılı ve katkısız polyester malzemelere uygulanmıştır.

Deneyler sırasında, kaçak akım sinyalleri; bir gerilim bölücü vasıtasıyla ses kartı üzerinden bilgisayar sistemine aktarılmış ve sinyaller bilgisayar üzerinde izlenerek kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler, MATLAB ortamına aktarılmış ve burada sinyaller üzerinde CEEMDAN yöntemi kullanılarak, IMF grafikleri, IMF enerji dağılımları ve kısmi deşarj desenleri elde edilmiştir. Yapılan analizler, sinyalin katı yalıtkanlar üzerindeki etkilerini anlamak ve yüksek

gerilimli sinyallerin yalıtkan malzemeler üzerindeki performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. |

Haziran 2025 , |132| sayfa.

Anahtar kelimeler: Katı Yalıtkan,Polyester, Yüksek Frekans Yüksek Gerilim |



ABSTRACT

Ph.D. THESIS

**ANALYSIS of the ELECTRICAL BEHAVIOR of POLYESTER INSULATORS
UNDER HIGH VOLTAGE and HIGH FREQUENCY CONDITIONS**

Cihan Burak FIRAT

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering, PhD Program

Supervisor : Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

Co-Supervisor: Prof. Dr. Yasin ÖZÇELEP

Ensuring the safe and efficient transmission of electricity, particularly in high-voltage systems, relies heavily on the proper selection and application of insulating materials. Electrical insulation materials prevent the uncontrolled flow of current to undesired areas, thereby enhancing electrical safety and improving system performance. Therefore, understanding the behavior of insulation materials under high-frequency and high-voltage conditions is of great importance for reliable and efficient power transmission. Insulating materials exist in three different phases: solid, liquid, and gas. However, this thesis focuses exclusively on the investigation of solid insulating materials.

Solid insulating materials play a critical role, especially in high-voltage systems. During sudden and unexpected events such as lightning strikes, high-frequency and high-voltage signals may occur on these materials. Such occurrences can affect the performance of the insulators and may even jeopardize system safety. The aim of this study is to examine the effects of high-frequency, high-voltage signals on solid insulating materials. In this context, a series of experimental tests were conducted, and the high-frequency high-voltage signals required for these tests were first generated. These signals were then applied to additive and non-additive polyester materials using the inclined plane test system.

During the experiments, leakage current signals were transmitted to a computer system via a voltage divider and recorded using the sound card interface. The acquired signals were then imported into MATLAB, where CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise) was applied to perform advanced signal analysis. This process yielded IMF (Intrinsic Mode Function) graphs, IMF energy distributions, and partial discharge patterns. The outcomes of the analyses were used to understand the impact of high-voltage signals on solid insulators and to assess the performance of insulating materials under high-frequency electrical stress. |

June 2025, |132| pages.

Keywords: Solid Insulator, Polyester, High Frequency High voltage |



1. GİRİŞ

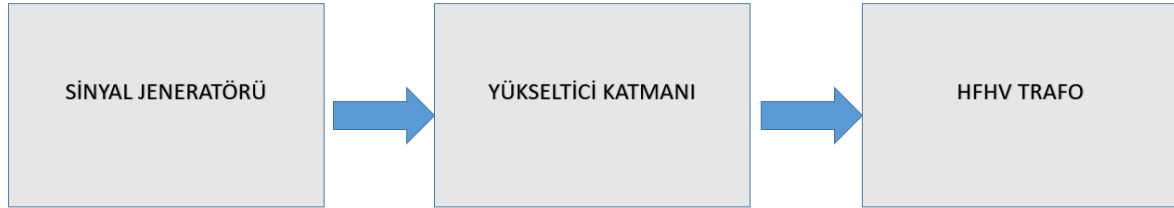
Elektrik ihtiyacının her geçen gün hayatımızın tüm alanlarına yayıldığı günümüzde; elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi, dağıtılması ve sağlıklı şekilde cihazların çalışmasını sağlaması büyük önem taşımaktadır. Elektrik iletim ve dağıtımının çeşitli aşamalarında aşırı gerilimler oluşabilmektedir. İç ve dış aşırı gerilimler olmak üzere iki başlıkta incelenebilen aşırı gerilimler hat üzerinde ilerleyebilmektedir. Dış aşırı gerilimler atmosferik etkilerle ortaya çıkan gerilimler iken, iç aşırı gerilimler ise genel olarak devre açma-kapama (anahtarlama-switching), olayları sonucunda oluşan aşırı gerilimlerdir.

Enerji üretim, iletim ve dağıtım hatlarında gerçekleşen kısa devre arızaları, devre açma-kapama, yıldırım ve yüklü bulut etkisi gibi çeşitli sebeplerle oluşan iç ve dış aşırı gerilimlerin etkisi ve enterkonnekte şebekede anlık olarak devreye giren ve devreden çıkan dengeli veya dengesiz yükler nedeniyle hatlar üzerinde şebeke frekansı olan 50 Hz'in üzerindeki frekanslarda gerilim/akım osilasyonlarının oluşmasına yol açtıkları bilinmektedir. Oluşan bu farklı frekanstaki yüksek gerilimler hat üzerinde bulunan elektriksel yalıtım sistemlerine de aktarılmaktadır. Gaz, vakum, sıvı, kompozit ve katı gibi farklı formlarda olabilen yalıtım sistemleri hat üzerinden gelen aşırı gerilimlerden etkilenebilmektedir.

Bu çalışma süresince katı yalıtkan grubundan polyester reçineler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Polyester; termoset ailesine ait sentetik polimer olan bir katı yalıtandır [1]. 1960 yıllarından sonra yaygınlaşan polimer kompozit malzemelerden üretilen izolatörler hala önemini korumaktadır [2]. Yalıtkanlık seviyesinin iyi olması ve mekanik performansını kısa sürede kaybetmemesi polimerik yalıtkanlardan beklenen özelliklerdendir [3].

Çalışmalar sırasında yapılan deneylerde numunelerin yüksek frekans ve yüksek gerilim altında incelemesi yapılmıştır. Bunun için öncelikle yüksek frekansta yüksek gerilim üreten bir sistem tasarlanmıştır. Bunun için Şekil 1-1'de belirtilen şekilde 3 katmanlı bir sistem kullanılmıştır. İlk katmanda sinyal jeneratörü kullanılmıştır. Sinyal jeneratöründen istenilen nitelikte, sinyal şeklinde, frekansta sinyal alınmıştır. Alınan bu sinyal, 2. katman olarak yükseltici katmanına girmiştir. Yükseltici katmanında sinyalin gücünü yükseltmek amacıyla OPAMP'lardan oluşan bir sinyal yükseltici kullanılmıştır. Bu katmanda çalışma frekanslarımız

olan 6-14 kHz de çalışmaya uygun olan, 100 Hz'den 100 kHz'e kadar stabil bir çalışma sergileyebilen OPA549 operasyonel yükseltici tercih edilmiştir.. Sinyal jeneratöründen elde edilen sinyalin bu katmanda gücü ve akım seviyesi artırıldıktan sonra transformatör katmanına girişi yapılmıştır. Transformatör katında gerilim seviyesi yükseltilmektedir. Elde edilen sinyal; eğik düzlem deney setine sinyal girişi olarak aktarılmıştır.



Şekil 1-1 YFYG Sinyal Elde Edilmesi.

Eğik Düzlem testi laboratuvar koşullarında hızlandırılmış yaşlanma deney yöntemlerinden biridir. Eğik Düzlem Testi (Inclined Plane Test) 1961 yılında ilk kez uygulanmıştır. 1964 yılına gelindiğinde Amerika Birleşik Devletlerinde bir standarda bağlanmıştır. Bu standart: ASTM D230'dur. Bu test ile ilgili olarak IEC tarafından IEC 587 standardı olarak yeni bir standart geliştirilmiştir. ASTM ve IEC testleri arasında küçük farklılıklar olmakla birlikte temelde aynı teoriye dayanmaktadırlar [4-5]. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneyler, standart eğik düzlem test prosedüründen farklı olarak, uygulanan işaretin gerilim seviyesi sabit tutulup yalnızca frekansının değiştirilmesi esasına dayanmaktadır.

Deney düzeneğinde eğik düzlem test sistemine bir gerilim bölücü entegre edilmiştir. Bu bölücü üzerinden elde edilen sinyal, bilgisayarın ses kartına aktarılmış ve kaçak akım sinyalleri dijital olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sinyaller MATLAB ile tekrar çizdirilerek görsel olarak incelenmiştir. Elde edilen kaçak akım sinyalleri CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise) yöntemiyle ayrıştırılarak içsel mod fonksiyonu (Intrinsic Mode Function) (IMF) bileşenleri elde edilmiştir. Elde edilen IMF'ler üzerinden enerji dağılımı ve zaman-frekans davranışları analiz edilmiş; ayrıca bu bileşenlere ait kısmi deşarj (partial discharge) karakteristiklerini içeren grafikler oluşturularak, yalıtkan malzemenin elektriksel dayanımı ve bozunma eğilimleri üzerine kapsamlı değerlendirmeler

yapılmıştır. Bununla birlikte bozulması gerçekleşen bir numunenin aşamaları da başlangıç, kanal oluşumu, delinme gibi süreçler fotoğraflanarak sunulmuştur.



2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Elektriksel yalıtkan karakterlerinin Michael Faraday tarafından 19. yüzyılda tanımlanması ile başlayan elektriksel yalıtım sistemleri tarihi günümüzde de gelişmeye devam etmektedir [6]. Gaz, sıvı ve katı şeklinde kategorize edilebilen yalıtım malzemeleri elektriği iletmeyen maddeler olarak tanımlanabilir [7].

Gaz yalıtkanların en basit ve bilinir olanların başında hava gelir, hava; havai yüksek gerilim hatlarında ilk kurulumlarından bu yana kullanılmaktadır. Havanın bol, ucuz ve delinmeden sonra kendi kendini onarabilmesi popülaritesini korumada önemli bir etkidir. Bununla birlikte kimyasal stabilitesi ve yüksek delinme dayanımı ile en önemli elektronegatif gazlar arasında yer alan SF₆'da elektriksel yalıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Vakum da yaygın olarak kullanılan elektriksel yalıtım sistemlerindendir. Vakumlu bir ortamda 10^{-2} molekül/cm³ 'den daha az molekül bulunması beklenir. Bu da elektronun ortama saçılma bile belirli bir mesafeyi hiçbir çarpışma yaşamadan ilerlemesini sağlar. Bu sayede vakum ideal bir yalıtkan gibi davranır. Fakat pratikte vakumlu alanı temiz tutmak oldukça zor bir süreçtir. Vakumlu alana saçılan metal parçacıkları ve yalıtkan gazlar dielektrik özelliğin bozulmasına sebep olur. Bakım işlemi de diğer yalıtkanlara göre daha zordur [1,6,9].

Yoğunlukla yağlardan oluşan sıvı yalıtkanlar ise transformatörlerde, kondansatörlerde, kesicilerde ve kablolarıda elektriğin istenmeyen alanlarda ilerlemesinin önüne geçmek amacıyla kullanılmaktadır. Ancak ideal bir sıvı yalıtkindan beklenen zehirli olmamak, kimyasal olarak kararlı olmak, bozulmaya karşı dayanım, yanmaya karşı dayanım, gazlar gibi ark söndürebilme becerisi gibi özelliklerin tümünü bünyesinde barındıran bir sıvı kolay bulunabilir bir yalıtkan değildir. Ancak mümkün olduğunca istenileni karşılamak adına çeşitli silikon yağlar geliştirilmektedir [1,10,11].

İki farklı yalıtım malzemesi türünün birlikte kullanılmasıyla oluşan yalıtkan sistemi olan kompozit sistemler de oldukça önemli bir yere sahiptir. Yüksek gerilim kablolarında kullanılan yağ emdirilmiş kâğıtlar örneğinde olduğu gibi katı-sıvı hibrit yalıtım sistemleri ya da iletim

hatlarında karşılaşılan gaz-katı hibrit çözümleri, daha yüksek performanslı yalıtım özellikleri sağlayan kompozit yalıtım sistemlerine örnek olarak gösterilebilir. [12,13].

Bu tezde de kullanılan katı yalıtkan malzemeler elektrik ve elektronik sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıvı ve gazlara oranla daha yüksek delinme dayanımına sahip olan katı yalıtkanların dezavantajı ise bir kez elektriksel özelliğini kaybettiğinde tekrar eski haline dönememesidir.

Yüksek delinme dayanımı, düşük dielektrik kayıp, yüksek mekanik dayanım, sertlik, gaz katkıları ve nem içermemesi, ısı ve kimyasal etkileşmelere dayanım, kullanıldığı bölgedeki ortam şartlarından etkilenmemesi, ozona ve radyasyona karşı dayanıklılık, higroskopik esneklik ve sıvı sızdırmazlığı gibi özellikler ideal bir katı yalıtkan aranan niteliklerdir. Üretildikleri malzemenin yapısı ve kimyasal kompozisyonlarına göre incelendiğinde katı yalıtkanlar organik, inorganik ve sentetik polimerler olmak üzere üç ana başlıkta toplanır [14,15].

Canlı bitki ve hayvanlardan veya bunların yapıldığı maddelerden oluşan anlamına gelen organik sıfatıyla tanımlanan organik katı yalıtkan malzemeler; iyi bir yalıtkan olsalar da hammaddelerinden mütevellit 100°C'nin üzerinde yalıtkanlık özelliklerini yitirirler. Şekil vermesi kolay, mekanik dayanımı yüksek olan tahta ve kablodan, Transformatöre hatta doğru akım makinelerine kadar geniş kullanım alanı bulunan kağıtlar organik katı yalıtkan malzemelere örnek teşkil eder [16].

İnorganik katı yalıtkan malzemeler ise organik kelimesinin zıt anlamı olarak canlı bileşenler harici materyallerden oluşan yalıtkan malzemelerdir. Organik yalıtkanlara oranla daha yüksek sıcaklıklara kadar elektriksel ve mekanik özelliklerini koruyabilmeleri mümkün olan inorganik yalıtkanların elektrik endüstrisinde kullanılan ilk örneği seramik malzemedir imal edilen izolatörlerdir. Seramik inorganik malzemeler, yüksek sıcaklıkta monolitik yapılara mineral katılması ile gerçekleştirilir.

Seramik yalıtkanlar ϵ_r dielektrik sabitlerine göre on ikiden büyük ve küçük olmalarına göre iki kategoride incelenirler. $\epsilon_r < 12$ bağıl dielektrik sabiti düşük olan seramiklerdir bunlar çoğunlukla yalıtım için değerlendirilirler. $\epsilon_r > 12$ bağıl dielektrik sabiti yüksek olan seramiklerdir, kapasitelerde ve algılayıcılarda kullanılırlar [10,17].

Bir diğ er inorganik katı yalıtkan malzeme olan porselenlerin içinde habbecik şeklinde gaz bulunmaması önemli bir avantajdır. Çeşitli sektörlerde uzun yıllardır kullanılan porselenler korozyona, alkalilere, birçok aside ve çevresel kirliliklere dayanıklılık özellikleriyle elektrik yalıtım malzemesi olarak da kendisine yer edinmiştir [18].

Çok uzun süredir yalıtım malzemesi olarak kullanılan ürünlerden cam da düşük yüzey akımı, ısı dayanımı gibi özellikleriyle havai hat izolat rlerinde, transformatörlerde, kapasite ve devre kesicilerinde yalıtım malzemesi olarak bulunmaktadır [10,17].

Çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşikler olan, Yunanca $\pi\omicron\lambda\upsilon\varsigma$ (polus, " ok" anlamına gelir) ve $\mu\epsilon\rho\omicron\varsigma$ (meros, "parça" anlamına gelir) kelimesinden türetilen terim olan polimerler elektrik ve elektronik sistemlerde yalıtkan malzeme olarak kullanımı artan ürünlerdendir. Termoplastikler ve termosetler olarak sınıflandırılan polimerler, birbirlerinden farklı ısı davranışlar sergilerler. Termoplastikler, düşük erime sıcaklıkları (100-120 C) sayesinde ısıtıldıklarında yumuşar ve şekil alır, soğutulduğunda ise tekrar sertleşir. Bu özelliği sayesinde yüksek gerilim kablolarının yalıtımında sıklıkla tercih edilir. Termosetler ise ısıyla bir kez şekillendirildikten sonra tekrar eritilemezler. Yüksek mekanik dayanım ve sertlik özellikleri, termoplastiklere göre daha üstündür. Hafif olmaları, fiyat avantajı sunmaları, çevresel faktörlere ve elektrik alana dayanımları polimerlerin elektriksel yalıtım alanındaki yerlerini korumalarını sağlamaktadır. 1900'l  yılların ilk yarısında polimerlerin elektriksel yalıtkan olarak kullanılan ilk  rneği epoksidir. Epoksi kullanımını 1950'li yıllarda yüksek elektriksel yalıtkanlığı ve korona dayanımıyla polikarbonat kullanımı takip etmiştir. Polietersülfon reçineler 1973 yılında yüz seksen santigrat dereceye varan sıcaklık dayanımı ile elektriksel yalıtım malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Sonrasında reçinelerin poliakrilat ve polieter-eterketon (PEEK) katkılanmasıyla çalışma sıcaklığı 600  C'ye kadar çıkmış aynı zamanda sıvı geçirgenliğine dayanımları da artmıştır. Halen Yüksek gerilim uygulamalarında ve elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılan polimerik yalıtkanlara epoksi reçine, polietilen (PE), polivinilklorür (PVC), elastomer, ve polyester örnek verilebilir [1,10,17-22].

Epoksi reçineler, termoset yapılı, suya ve rutubete karşı yüksek dayanım gösteren, 130 C'ye kadar güvenli bir şekilde çalıştırılabilen polimerik yalıtıktır. Cam dolgu ile bu sıcaklık limiti 650 C'ye kadar çıkarılabilir. Yüksek mekanik dayanımı, metal ve diğer malzemelere m kemm l yapışması ve yapısal dipollerinin neden olduğu kayıp faktörünün

sıcaklıkla artması gibi özellikleri, epoksi reçineleri yüksek gerilim ekipmanlarında tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir. Günümüzde 69 kV'un altındaki gerilim seviyelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [10,22-24].

Polietilen (PE), polar olmayan yapısı sayesinde düşük dielektrik sabiti ve kayıp faktörüne sahip, elektrik endüstrisinde sıkça kullanılan bir termoplastik polimerdir. Üretim yöntemlerine bağlı olarak düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve çapraz bağlı polietilen (XLPE) olmak üzere farklı türleri bulunmaktadır. LDPE, düşük gerilim ve akım uygulamalarında, HDPE ise daha yüksek gerilim ve akım uygulamalarında yalıtım malzemesi olarak tercih edilir. XLPE ise, özellikle yüksek gerilimli kabloların yalıtımında, mükemmel elektriksel ve mekanik özellikleri sayesinde yaygın olarak kullanılır [10,21,25].

Polivinil klorür (PVC), 1930'lardan beri elektrik kablolarında hem yalıtım hem de dolgu malzemesi olarak kullanılan bir polimerdir. Polar yapısı nedeniyle yüksek dielektrik kayıpları sergiler. İyi bir ısı iletkenliğine sahip olmasına rağmen, genellikle orta gerilim seviyelerinin altında (<10 kV) kullanılan elektriksel yalıtım uygulamalarında tercih edilir [10,11,26].

Elastomerler, kauçuğa benzer esnekliğe sahip polimerik malzemelerdir. Elektrik güç sistemlerinde en sık kullanılan elastomer türleri arasında silikon kauçuk, Etilen Propilen Kauçuk (EPR) ve Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM) sayılabilir. Bu malzemeler, ozon, korona deşarjları, kimyasallar ve hava koşullarına karşı yüksek dayanım gösterir. Özellikle silikon kauçuk, yüksek gerilim hatlarında seramik yalıtkanların üzerine ek bir koruma tabakası olarak kullanılarak, yalıtkanın kirlenme ve hava koşullarından etkilenmesini önler ve performansını artırır [10,11,27].

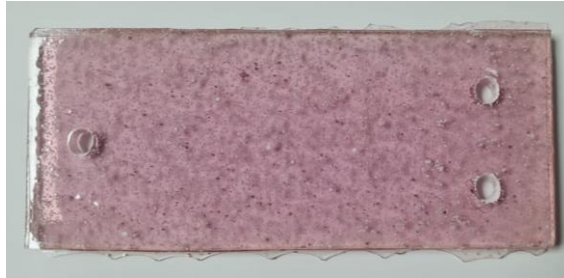
Bu tez kapsamında incelenen ve şekil 2-1'de de bir numunesi gösterilen katı yalıtkan çeşidi olup, yapısında çok sayıda bir asit ve bir alkolün birleşmesiyle oluşan bir bileşik olan ester bağı bulunmasından adını alan polyesterler elektrik ve elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan önemli bir polimer sınıfıdır. Molekül yapısında karbon-karbon çift bağları (C=C) bulunan doymamış (unsaturated) ve Molekül yapısında karbon-karbon çift bağı bulunmayan, tüm bağlar tekli doymuş (saturated) polyesterler olarak iki gruba ayrılırlar. Elektriksel yalıtım malzemesi olarak sıkça kullanılan fiber ve filmler doymuş polyesterlerdendir [10,11,28].



Şekil 2-1 Polyester Numunesi.

Polyester filmler kağıda oranlar daha yüksek yumuşama sıcaklığına sahip olmanın verdiği avantajla bir çok uygulamada kağıdın yerini almıştır. Güçlü bir kimyasal dayanıma da sahip olan polyester filmin hacim öz direnci 100 °C sıcaklıkta $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ ve elektriksel dayanımı 200 kV/mm'dir. Bu ve diğer özellikler, polyester filmleri yüksek gerilimli kablolar, elektrik motorlarının stator yalıtımı ve yüksek frekanslı elektronik devrelerde kullanılan bileşenlerin yalıtımında ideal bir malzeme haline getirir [10,11].

Polyester çeşitli katkılamalarla elektrik endüstrisinin farklı ihtiyaçları için çeşitlendirilebilmektedir. Farklı oranlarda cam, fiber ve mineral katkılarıyla ihtiyacı daha iyi karşılayan şekil alma ve kalıplanma özelliklerine, elektriksel ve mekanik dayanıma sahip olarak şiddetli darbelere, ani sıcaklık değişimlerine ve arka karşı dayanıklı hale gelmektedir [10,11]. Şekil 2-2'de katkılı polyester numunesi görülmektedir.



Şekil 2-2 Katkılı Polyester Numunesi.

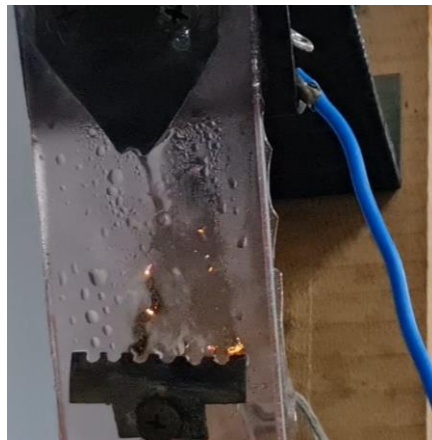
Her ne kadar yalıtkanların daha dayanıklı hale gelmesine çalışılsa da uygun koşullar olduğunda elektriksel bozulma gerçekleşir. Özellikle de katı yalıtkanlarda elektriksel bozulma; gazlardaki gibi tamamen veya sıvılarda olduğu gibi kısmi olarak eski haline dönme durumu olmamasıyla farklılık göstermektedir. Ayrıca katı yalıtkanlarda elektriksel bozulma yalnızca malzemenin kimyasal yapısına değil, aynı zamanda malzemenin şekli gibi fiziksel özelliklerine de bağlıdır. Katı yalıtkanlarda; Yaşlanma, Kısmi boşalma, Kanal oluşumu, Termik

delinme, Elektromekanik delinme, Erozyon ve Yüzey aşınımı başlıca bozulma mekanizmalarıdır [10,11,29].

Elektriksel, ısı, mekanik, kimyasal veya çevresel faktörler ya da bunların birlikte etkimesiyle kullanıma bağlı oluşan ve geri döndürülemeyen bozucu değişim yaşlanma olarak adlandırılmaktadır. Yalıtkanlar elektrik sistemlerinde kullanılmadan önce yaşlanma testlerine tabi tutulurlar. Elektriksel ve çevresel faktörlerin yalıtkanın ömür süresine olan etkisi; gerilim yaşlanması, frekans yaşlanması, termal yaşlanma, çok faktörlü zorlanma yaşlandırması gibi deneyler ile elde edilmeye çalışılır [10,11].

Yalıtkanın tam bir delinme gerçekleşmeden kısmi olarak delinmesine kısmi boşalma ya da korona ismi verilmektedir. Korona kendi kendini besleyen bir yapıdır. Yüksek manyetik alandan kaynaklı olarak, yalıtkan malzemelerin içinde kalan boşluk, hava kabarcıklarından dolayı ya da birden fazla yalıtkan tipinin bir arada kullanıldığı hibrit yalıtkanlarda katmanlardan birinden kaynaklı olarak oluşabilir. Kısmi boşalmalar yalıtkanlık özelliğinin hemen kaybedilmesine sebep olmasa da yalıtkan malzemenin yaşlanma hızını artırabileceği düşünülmektedir [10,11,30].

Kanal oluşumu, bir katı yalıtkanın elektriksel delinmesinin öncül aşaması olarak nitelendirilebilir. Katı yalıtıkanda bulunan gaz habbecikleri, elektromanyetik alan ve çeşitli etkenler tek başlarına ya da birden çok etkenin birleşmesiyle kanal oluşumuna sebep olabilir. Şekil 2-3'te kanal oluşumu başlamış bir polyeester numune görülmektedir. Bu kanalda elektrik iletiminin devam etmesi durumunda elektriksel delinme oluşabilir [10,11,31].



Şekil 2-3 Kanal Oluşumu Başlamış Polyester Numunesi.

Termik delinme; yalıtkan içinde herhangi bir noktada üretilen ısınn o yalıtkanın dayanım değeriini aşması durumunda oluşan stabil olmayan ortamla birlikte yalıtkanın delinmesi olarak tanımlanabilir. Yalıtkanın ısınmasına neden olan ortam sıcaklığının artması olabileceğı gibi yalıtkanın içeriinden akan iletim akımı ya da her ikisinin birleşimi de olabilir. Yalıtkanın içeriinden akan iletim akımının artmasıyla birlikte akım tarafından üretilen ısının da bir kısmı çevreye yayılırken bir kısmı da yalıtkan tarafından absorbe edildiğinden yalıtkan daha çabuk ısınabilir ve delinme hızlanabilir [10,11]. Şekil 2-4'te bu tez kapsamında yapılan deneylerde delinmiş bir polyester numunesi görölmektedir.

Elektromekanik delinme ise yalıtkanın kimyasal yapısı, imalat metodları, vibrasyonlar sebebiyle yalıtkanın fiziksek olarak tesirlenmesinden kaynaklı yaşanan bozulmadır. Oksidasyon, ozon, radyasyon, nem ve kimyasallar dielektrik malzemelerin kullanım sürelerinin eksilmesine sebep olan fiziksel etmenlerdendir. Nem, yalıtkan malzeme ile sıvı veya gaz formunda iken temas edebilir. Bu temasın yarattığı en belirgin durum yalıtım sisteminin niteliğini kaybetmesidir. Fazla nem ile temasa uygun olmayan bazı kağıtlar ve organik yalıtkanlar ise yalnız kullanılmak yerine yağ, cila gibi neme karşı koruyucu önlemler ile birlikte kullanılırlar. Yalıtkanlar fazla neme uygun olmadığı gibi çok düşük neme de uygun değildir. Kritik nem seviyesinin altına düşen yalıtkan maddelerin de yapısı bozulmaya uğramaktadır. Nem ile birlikte yalıtkan malzemenin üzerindeki habbecikler ve kir de malzeme yüzeyinde iletken bir yol oluşturarak malzemenin fiziksel yapısının bozulmasında rol oynarlar [10,11].



Şekil 2-4 Delinmesi Tamamlanmış Bir Polyester Numunesi.

Erozyon özellikle yüksek gerilim kablolarında başlıca bozunum sebeplerindendir. Kablo yalıtkanı içeriisinde kalan habbeciklerin ve hava kanallarının içinde bulunan gazların dielektrik dayanımı kabloyu oluşturan yalıtkanınkinden daha düşük olmasından dolayı bu

alanların elektrik alanı artar ve oluşan elektriksel boşalmalar yalıtıkanda erozyon oluşturur [10,11].

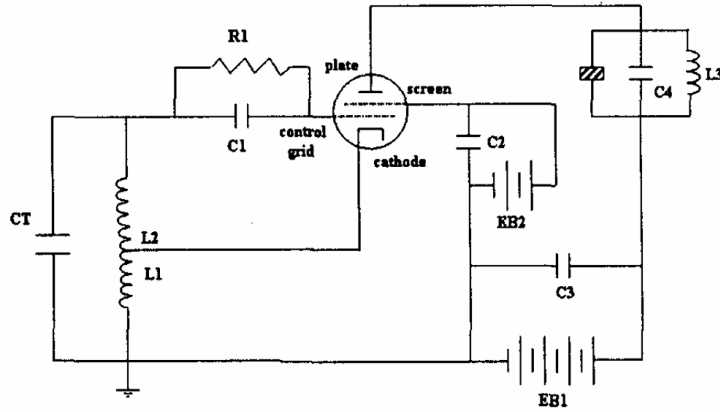
Yüzey aşınımı katı yalıtkanların yüzeyinde oluşan kaçak akım kaynaklı karbonize izdir. Bu çalışmada da polimerik yalıtkanların yüzeyinde IEC 60587 eğik düzlem test standardına göre oluşturulan eğik düzlem üzerinde belirtilen test düzeneğinden farklı frekanslarda ve farklı gerilim seviyelerinde deneyler yapılarak polyester numuneler üzerinde karbonize iz oluşumu görülmüştür [10,11].

Elektrik şebekelerinde ani yüksek gerilimler oluşabilmektedir. Bunlar da yüksek frekanslara çıkabilmektedir bu ve benzeri sebeplerle malzemelerin yüksek frekans ve yüksek gerilim altındaki çalışma durumları hakkında bilgi sahibi olmak önem taşımaktadır. Ancak bu alanda yapılmış olan çalışma sayısı kısıtlıdır.

Mevcut standartlarda yüksek frekans ve yüksek gerilim için belirtilmiş herhangi bir metot bulunmamaktadır. Bu sebeple çalışmalar; frekans hariç, eğik düzlem deneyine uyumlu bir şekilde yapılmıştır.

Bahsi geçen gerilim ve frekans seviyelerine çıkmak için daha önceleri çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Buck, Boost, Buck-Boost, Forward ve Flyback gibi SMPS topolojilerinden ya da osilatör devrelerinden faydalanan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [32,33].

Elanseralathan ve arkadaşları [33] yüksek frekanslı yüksek gerilim elde etmek için şekil 2-5'te şematik diyagramı verilen osilatör devresinden faydalanmış ve 8.8 kHz gerilim seviyesinde 90 kHz frekans değerinde bir sinyal elde edilmiştir.



Şekil 2-5 Elanseralathan ve Arkadaşlarının Çalışmasında Verilen Osilatör Şematik Diyagramı [33].

Bir başka çalışmada yüksek frekanslı yüksek gerilim elde edebilmek için Mirza ve arkadaşları H-köprüsünden faydalanmıştır. Çalışmada kullandıkları tek fazlı H-köprüsü, Behlke tarafından üretilen HTS 331-06 MOSFET'lerden oluşan dört güç anahtarından oluşmuştur. Anahtarlar üzerindeki gerilim aşımını azaltmak için 200 Ohm'luk sönümler dirençleri kullanmışlardır. 1-5 kV arası gerilim seviyelerinde 1.5, 3 ve 4 kHz frekanslarında sinyal elde etmişlerdir [32].

Bu çalışmada da Yüksek frekanslı ve yüksek gerilimli sinyalin elde edilmesinde de OPAMP'lardan faydalanılmıştır. Elde edilen sinyalin gerilim seviyesi bir transformatör vasıtasıyla yükseltilmiştir. Transformatör ya da kısaca trafo hareket etmeyen bir elektrik makinası olup alternatif akımda, aynı güçte belirli bir gerilimdeki elektrik enerjisini başka bir gerilime çevirmeye yarar. Bir veya üç fazlı olarak imal edilirler. Bu cihazlarda hareket olmadığından sürtünme kayıpları yoktur. Bu nedenle verimleri çok yüksektir. Belirli güçte düşük bir alternatif gerilimin yükseltilmesi veya düşürülmesi için kullanılır. Transformatör kapalı bir manyetik gövde ile bunun üzerine, yalıtılmış iletkenlerle sarılan sargılardan oluşur. Bir giriş ve bir çıkış olmak üzere en az iki sargıdan oluşurlar. Yüksek ve düşük frekanslı transformatör tasarımlarında farklı malzemeler kullanmak gerekir. Akademik alanda, düşük güç seviyelerinde çalışan yüksek frekanslı transformatörlere yönelik yoğun çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Buna karşın, yüksek güçlü ve yüksek frekanslı transformatörlerin tasarımı ve analizi üzerine yapılan araştırmalar görece sınırlı kalmıştır. Yüksek frekanslı ve yüksek güçlü transformatörler için mevcut çalışmalar incelenmiştir [34-38].

Winconsin Üniversitesinden Kheraluwala ve arkadaşları [35] yüksek frekanslı ve yüksek güçte bir transformatör elde edebilmek için çeşitli çalışmalar yapmıştır. Çekirdek ve bakır kayıpları, frekansla güçlü bir şekilde ilişkilidir. Belirli bir frekans ve akı yoğunluğu için çekirdek kaybının malzemeye bağlı olmasından ötürü tasarım sürecinin ilk adımı olarak çeşitli yüksek frekanslı çekirdek malzemelerinin araştırmışlardır. Transformatördeki bakır kaybı, pencere bölgesindeki kaçak akı dağılımına son derece duyarlıdır ve bu da çekirdek ve sargı geometrisine bağlıdır. Farklı geleneksel sargı düzenlemelerinin sargı kayıpları ve kaçak endüktans üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İyi bir çekirdek malzemesinin özellikleri arasında yüksek çalışma frekanslarında düşük çekirdek kayıpları, yüksek güç/ağırlık oranı ve iyi termal ve mekanik özellikler bulunduğundan bu özellikleri karşıladıklarını düşündükleri Ferrit PC40, permalloy80 ve metglass2605SC malzemelerini çekirdekte kullanarak farklılıklarını 50 kW gücünde 25 ve 50 kHz frekanslarında kare dalga sinyalleri üzerinde incelemişlerdir. Ayrıca iletken tipinin iletkenlik üzerindeki etkisini anlamak için deri etkisini de göz önünde bulundurarak, üç standart iletken tipi; folyo, litz teli ve katı yuvarlak tel kesit alanı sabit tutularak denenmiştir. Yaptıkları çalışmalarda da yeni tasarlanacak olan transformatörlerde kullanmak üzere çeşitli tasarım kriterlerini paylaşmışlardır. Permalloy kullanımı ve litz teli kullanımı transformatördeki kayıpları azaltmıştır. Ancak transformatör tasarımında maliyetin de öneminden yayında bahsedilmiştir.

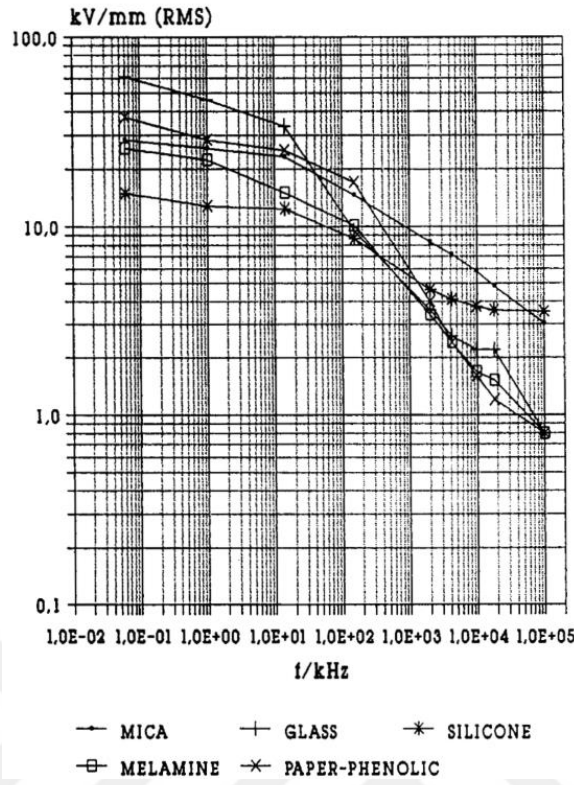
Ayrıca mevcut transformatörün yıpranma durumunu incelemek amacıyla da yüksek frekans kullanan çalışmalar görülmüştür [38].

Elektrik ihtiyacının miktar olarak artmasının yanında kullanım alanları da çeşitlenmektedir. Bu da yalıtım ihtiyacının da çeşitlenmesine sebep olmaktadır. Uçaklarda 400 Hz uzay bilimlerinde kHz seviyelerinden başlayıp mhz lere dayanan farklı frekanslar kullanılmaktadır. Çalışmalar incelendiğinde farklı frekanslarda ve farklı gerilim seviyelerinde çeşitli yalıtkanların analiz edildiği görülmektedir [39-44].

Ikeda ve Tanaka [43] 50 Hz ila 5 kHz arasındaki frekanslarda deşarj dayanıklılık ömrü testleri, gerçekleştirmişlerdir. Deşarjdan kaynaklanan sıcaklık artışının, üst sınırın altındaki frekanslarda kullanım ömrü üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Kullanım ömrünün (arızaya karşı döngülerde) frekansa duyarsızlığına rağmen, deşarjın parlaklığına ilişkin testler, bozulma modellerinin görsel olarak gözlemlenmesi ve deşarj büyüklüğüne ilişkin testlerde, frekansın etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Test düzeneğine

soktukları malzemeler arasında 0.1 mm kalınlığında polietilen (PE), 0.13 mm kalınlığında polipropilen (PP) ve 0,05mm kalınlığında polyethylene terephthalate (PET) bulunmaktadır. 6 kV gerilimde 50, 250 ve 500 Hz, ve 1, 2.5 and 5 kHz frekanslarında kuru hava koşullarında deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları malzemeler için frekansın ömür üzerine etkisini incelerken bir frekans üst sınırı belirlemişlerdir. Üst frekans sınırlarını yaklaşık olarak PE 2,5 kHz; PP 1 kHz; ve PET 3 kHz vermişlerdir. Deşarj özelliklerinin frekansa bağımlılığına ilişkin sonuçların incelenmesi sırasında da, deşarj oranının frekansla orantılı olduğunu, maksimum görünür deşarj büyüklüğünün (ömrün sonundaki büyüklük) frekans bağımlılığının malzeme türleri tarafından belirlenme eğiliminde olduğunu ve oksidasyon reaktivitesi daha yüksek olan malzemelerde daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca deşarjlardan dolayı numune sıcaklığının yükselmesi nedeniyle kullanım ömrü kısılabileceğini belirtmişlerdir. Ancak 5 kHz'e kadar frekansların kullanıldığı bu deneyde sıcaklık artışının ömür özellikleri üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını çünkü sıcaklık artışının sadece birkaç derece olduğunu belirtmişlerdir.

W. Pfeiffer [44] yüksek frekansa çıkıldığında delinmeleri inceleyen bir derleme çalışması yapmış hem boşluk için hem devredeki sızıntı akımları için hem de katı yalıtkanlar için çeşitli veriler yayınlamıştır. Boşlukta delinme gerilim için frekansın büyük farklar yaratmadığını belirtse de devre üzerindeki sızıntı akımlarında frekansın önemli olduğunu görmüştür. Bununla birlikte Şekil 2-6'da görüldüğü gibi sırasıyla mika, cam, silikon, melamin ve kağıt üzerinde delinme gerilimi incelemesini yayınlamıştır.



Şekil 2-6 Yüksek Frekans Yüksek Gerilim Altında Katı Yalıtkan Malzemelerin 0,75mm Uzunluğundaki Delinme Gerilimleri [44].

Elanseralathan ve arkadaşları [33] yüksek frekans ve yüksek gerilim altında çeşitli malzemeleri incelemişlerdir. İlk aşama olarak test düzeneği kurmuş ve test düzeneğinde kullanmak üzere yüksek frekans yüksek gerilime çıkabilen bir üreteç hazırlamışlardır bu üretecin hazırlanmasında osilatör kullanmışlardır. Osilatörü C sınıfı bir yükselteç modunda çalıştırmışlardır. Elde ettikleri sinyali ise osiloskop ile ölçmüşlerdir. Yüksek frekanslı bir sinüs sinyali elde etmişlerdir. 6 kV bir DC giriş için 8.8 kV tepeden tepeye çıkış elde etmişlerdir. Bu sinyali ASTM D149 test düzeneğinde kullanmışlardır. Ancak bu düzeneği kullanırken bu test düzeneğinin yüksek frekanslı bir gerilim altında delinme gerilimini ölçmek için olmadığını standartta belirtilen frekanslar için standardın oluşturulduğunu fakat yüksek frekansta delinme gerilimini ölçmek için bir standart olmadığından bu standardı kendilerine en yakın bulup bunu kullandıklarını belirtmişlerdir. Bu test düzeneği için de altta 3.175cm çapında ve üstte 2.54cm çapında paslanmaz çelik elektrodlar kullanmışlardır. Giriş besleme voltajını ve sonuçtaki yüksek frekans voltajını standartlara uygun olarak düzgün, düzgün ve aşırı akımlar veya geçişler olmadan değiştirebilecek şekilde düzenlemişlerdir. Elde ettikleri gerilimi 83kHz frekansında sabit kalmak üzere 12.5µm kalınlığında PTFE, 12.5 µm kalınlığında polipropilen ve 10 µm kalınlığında kağıt üzerine uygulamışlardır. 50 Hz için olan verileri ise W.Tillar

Shugg'a ait Handbook of Electrical and Electronics Insulating Materials adlı kitaptan alınmışlardır. PTFE için 50 Hz'deki delinme gerilimi 1100-2180 V aralığında iken bu değer 83 kHz'de 551 Volta düşmüştür. Aynı şekilde polipropilen için 50 Hz'deki delinme gerilimi 2,46 kV iken 83 kHz'de 565 Volta, kağıt için ise 50 Hz'deki delinme gerilimi 1,58 kV iken 83 kHz'de 380 Volta düşmüştür. Elde edilen delinme gerilimlerinin 50 Hz'de elde edilenlerden çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Daha düşük delinme gerilimlerinin, yüksek frekanslarda gerçekleşen artan iç ısınmanın yanı sıra malzeme içinde gerçekleşen yoğun kısmi deşarj aktivitesinden kaynaklanıyor olabileceğini belirtmişlerdir.

Bu tez çalışması, literatürde sınırlı sayıda ele alınmış olan YFYG (yüksek frekanslı yüksek gerilim) etkilerinin katı yalıtkan malzemeler üzerindeki davranışlarını inceleyerek, elektriksel yalıtım sistemlerinin performansına dair önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Mevcut standartların çoğu yalnızca 50 Hz şebeke frekansına odaklanırken, bu çalışmada 6–14 kHz aralığında farklı frekans seviyelerinde özel olarak tasarlanmış bir YFYG üretici ile polyester bazlı katkılı ve katkısız numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiş, CEEMDAN yöntemiyle kaçak akım analizi yapılmıştır. Böylece, yüksek frekansların delinme davranışı, yüzey aşınımı ve kısmi deşarj dinamikleri üzerindeki etkileri deneysel ve analitik olarak ortaya konmuştur. Bu bağlamda, çalışma hem deneysel tasarım hem de sinyal işleme yaklaşımı açısından literatüre özgün bir katkı sunmakta, özellikle YFYG uygulamalarında yalıtım sistemlerinin güvenilirliği için yeni bir değerlendirme perspektifi sağlamaktadır. Araştırmanın motivasyonu, modern güç sistemlerinin artan frekans çeşitliliği karşısında mevcut yalıtım yapı taşlarının yeterliliğini sorgulamak ve gelecekteki sistemler için daha sağlam malzeme seçimlerine bilimsel temel oluşturmaktır.

3. YÖNTEM

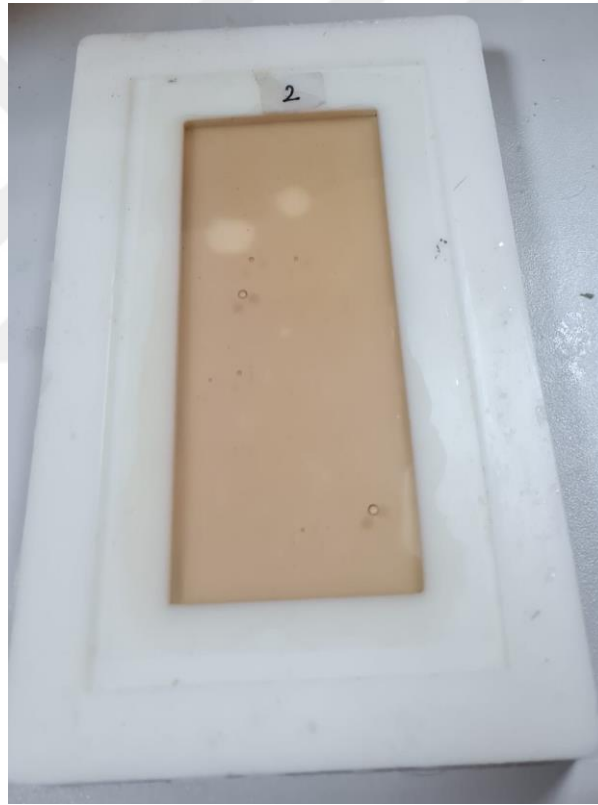
Bu çalışmada elektrik elektronik endüstrisinde kullanılan katı yalıtkanlara yüksek frekanslı yüksek gerilimin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla çeşitli gerilim seviyelerinde sıkça kullanılan polimerler grubuna ait polyester, incelenecek katı yalıtkan olarak belirlenmiştir. Katı yalıtkanın yüksek frekanslı yüksek gerilim altında incelenmesi için bir standart geliştirilmediğinden; yüksek frekansın polyester yalıtkanın elektriksel davranışına olan etkisi, yüzey aşınım testi kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Yüzey aşınım testleri IEC 60587 “Elektrik yalıtım malzemeleri - Ağır ortam şartlarında kullanılan - Yüzeysel kaçaklara ve aşınmaya karşı dayanıklılıklarının değerlendirilmesi için uygulanan deney metotlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak frekans değeri şebeke frekansı olan 50 Hz’den daha yüksek değerler seçilmiştir. Ve böylelikle hem 50Hz frekansa sahip gerilimli hem de daha yüksek frekanslara sahip gerilimli sinyallerin aynı katı yalıtkan üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüksek Frekanslı yüksek gerilim altında inceleyebilmek amacıyla ilk kademede yüksek güce sahip yüksek frekanslı bir sinüs sinyali elde edilmiş sonrasında ise transformatör vasıtasıyla yüksek gerilim elde edilmiştir. Elde edilen sinyal belirtilen test standardına göre, ancak frekans değiştirilerek katı yalıtkanların testinde kullanılmıştır.

3.1. KATI YALITKAN MALZEMELER

Katı yalıtkan malzeme olarak seçilen ürün yerli bir üreticiden temin edilen genel amaçlı polyesterdir. CE 92 Ortoftalik esaslı CTP tipi doymamış polyester reçine sıvı halde ISO 1675’e göre yaklaşık 1.1 gr/cm³ yoğunluğa sahiptir. Numunelerin hazırlandığı kış aylarında 350-450 cps viskositeye sahip olan şeffaf görünümlü polyester reçinede bulunan monomer oranı % 38-42 aralığında olup asit değeri 18-22 mgKOH/g seviyesindedir. Sertleştirildiğinde ise 128 MPa eğilme dayanımı olan polyester 65 MPa çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca katalog değerine göre darbe dayanımı 13 kJ/m² olarak belirtilmiştir [45].

Bu polyester ile katkılı ve katkısız test numunesi hazırlamak amacıyla gerekli işlemler aynı laboratuvar koşulları altında yapılmıştır. Polyester reçineye ağırlığına oranla %1 metil-etil-keton-peroksit (MEKP) ve aynı şekilde ağırlığına oranla % 0.2 kobalt hızlandırıcı olarak katkılanmıştır. Numuneler Şekil 3-1’de görülen silikon kalıplar içerisinde IEC standardında belirtilen şekilde en az 120mm x 50mm x 6mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Ardından matkap vasıtasıyla standartta belirtilen yerlerden elektrodla bağlantı için gerekli delikler açılmıştır.

Her bir numune için 50 gram polyester kullanılmıştır. Polyester ağırlığının binde ikisi oranında kobalt yani 0,1 gram kürlenmenin hızlanmasını sağlayan kobalt ve polyester ağırlığının yüzde biri oranında numunenin sertleşmesini sağlayan mek (metil etil peroksit) kullanılmıştır. 50 gram polyester için 0,5 gram mek kullanılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken hususlara uyularak malzemeleri aynı anda değil sırayla katarak çalışmak üretilen numunenin sağlıklı olması açısından önem taşımaktadır. Hazırlanan polyester şekil 3-1’de görüldüğü gibi silikon kalıp içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Silikon kalıp içerisinde dinlendirilen numune etüve alınmaya hazır haldedir. Etüve konulmak için hazır hale gelen polyester numunesi 80°C’de 5 saat süre ile kürlenmiştir. İşlemleri tamamlanan numuneler son halini alarak testlerde kullanılmaya hazır halde muhafaza altına alınmıştır.



Şekil 3-1 Kalıp İçine Dökülmüş Polyester.

Deneylerde kullanılmak üzere aynı numunenin bir de katkılı hali üretilmiştir. Katkılı örnekler %2 oranında borik asit katkılanarak üretilmiştir. Borik asit polyestere diğer katkı malzemelerinden önce katılarak iyice karıştırılmıştır. Bor ürünü seçilmesinin çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Dünya bor rezervlerinin yüzde 73,4’ü Türkiye’de, yüzde 6,2’si ABD’de, yüzde 7,7’si Rusya’da bulunmaktadır. Türkiye ve Amerika Birleşik Devletleri bor üretiminde dünyanın en büyük üreticileri konumundadır. Antik Tibet’ten başlayarak Babil, Mısır, Yunan

ve Roma gibi medeniyetlerde metal işleme, mumyalama ve temizlik gibi farklı alanlarda kullanılan bor tuzları, 875 yılında Araplar tarafından ilaç yapımında da kullanılmaya başlanmış ve böylece 4000 yıllık köklü bir geçmişe sahip olmuştur. Ülkemizde de 1865 yılından itibaren çıkarılan bordan üretilen borik asit borun zayıf asididir. Borik asit, (borasis asit ya da ortoborik asit olarak da adlandırılır) beyaz toz halinde suda çözünebilir formda bulunmaktadır. Borik asit, doğal olarak bulunan bor mineralleri olan kolemanit veya boraksın, kimyasal bir süreçte asitlerle birleştirilmesi sonucu elde edilen önemli bir kimyasal maddedir. Bu süreçte, mineralin içindeki bor bileşikleri asit etkisiyle çözünerek borik asit kristallerinin oluşmasını sağlamaktadır. Borik asit, fırın camı, laboratuvar cam malzemeleri ve cam elyafı gibi özel cam türlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir bileşendir. Camın ısıya, kimyasallara ve mekanik etkilere karşı dayanımını artırırken, devitrifikasyon adı verilen istenmeyen kristalleşme olayını da engellemektedir. Özellikle tek-filaman fiberglas üretiminde, yüksek ve tutarlı bor oksit (B_2O_3) içeriği, düşük erime noktası ve refrakter mineral içermemesi gibi özellikleri sayesinde borik asit, kolemanite göre daha tercih edilir bir malzemedir. Borik asit, yalıtım ve güçlendirme fiberglaslarında viskoziteyi düşürerek fiberleşmeyi kolaylaştırır ve aynı zamanda fiberlerin fiziksel ve neme karşı dayanımını artırmaktadır. Borik asit, seramiklerde bağlayıcı olarak kullanılmasının yanı sıra, ürünlerin dayanıklılığını artırır, erime sıcaklığını düşürür ve sırların kalitesini iyileştirir. Borik asit, temizlik ürünlerinde mikrop öldürücü ve ağartıcı olarak kullanılmaktadır. Sabun ve deterjanlara eklenerek suyun sertliğini azaltmakta ve yıkama süresini kısaltmaktadır. Borik asit, tarımda hem bitki besin maddesi olarak hem de diğer tarım ürünlerinin üretiminde kullanılan çok yönlü bir bileşendir. Özellikle bor eksikliği yaşanan topraklarda bitki verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Borik asit, yanıcı maddelerin tutuşma sıcaklığını yükselterek alevlenme riskini azaltan bir bor bileşiğidir. Ahşap kompozitler, kereste ve katı ahşap ürünlere alev geciktirici özellik kazandırmak için sıkça tercih edilir. Ayrıca, disodyum oktaborat tetrahidrat ile birlikte ahşap kompozit malzemelerde, denizcilik ve havacılık sektöründe kullanılan boyalarda ve yapı malzemelerinde yangına karşı koruma sağlamak amacıyla kullanılır. Isıya ve korozyona dayanıklılık gerektiren uygulamalarda, ateş tuğlalarına ve harçlara da eklenir. Tıp sektöründe de antiseptik olarak göz temizleyici ve mantar öldürücü olarak kullanılmaktadır. Borik asit, petrol ve yağlara eklendiğinde metal ve seramik yüzeylerde sürtünmeyi azaltıcı bir etki gösterir. Birçok alanda çeşitli faydaları bulunan borik asidin poliestere katıldığında yüksek frekanslarda eğik düzlem testinde katkısız numuneye göre sinyal üzerinde oluşturduğu farklılıklar gözlemlenmiştir. 50

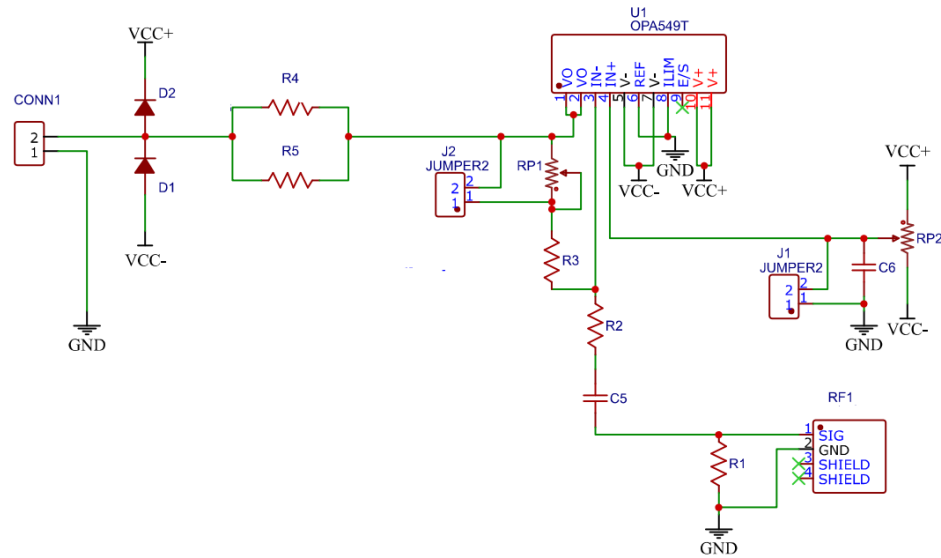
adet %2 oranında borik asit katkılı ve 50 adet katkısız olmak üzere toplam 100 adet numune üretilerek eğik düzlem testlerinde kullanılmıştır [46-50].

3.2. YÜKSEK FREKANSLI YÜKSEK GERİLİM ÜRETECİ

Yüksek frekanslı yüksek gerilim üreteci 3 katmandan oluşmaktadır. İlk katmanda bir sinüs dalgası elde etmek amacıyla fonksiyon jeneratörü kullanılmıştır. Bu amaç için GWINSTEK firmasına ait SFG-2120 model fonksiyon jeneratörü kullanılmıştır.

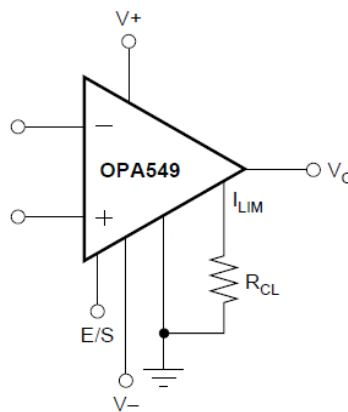
Bu fonksiyon jeneratörü DDS (Direct Digital Synthesized) teknolojisine sahip FPGA (Field Programmable Gate Array - Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) tasarımlı bir jeneratördür. Doğrudan dijital sentez (DDS), tek bir sabit frekanslı referans saatinden dalga formları oluşturmak için kullanılan frekans sentezleyiciler tarafından kullanılan bir yöntemdir. Bu Jeneratör, yapısı sayesinde kararlı çıkış frekansı, düşük bozulma ve iyi frekans çözünürlüğüne sahiptir. 1 Hz'den 20 MHz'ye kadar frekans genişliğini 0,1 Hz çözünürlükle desteklemektedir. Sinüs, kare dalga ve üçgen dalga üretebilmektedir. 2 mili Volttan 10 Volta kadar tepeden tepeye genliği olan sinyal üretebilmektedir. Genlik ve frekans modülasyonunu desteklemektedir. Bu cihazdan 10V tepeden tepeye genliği olan sinüs sinyali alınarak üretecin ikinci katmanı olan yükseltici katmanına aktarılmıştır [51].

Yükseltici katmanı için OP-AMP kullanılarak bir devre tasarımı yapılmıştır. Bu devrenin 2 aşaması bulunmaktadır. İlk aşamasında devreyi beslemek için 230V gerilim girişini 0-30V DC değere düşüren %95 verimle çalışan SMPS kullanılmıştır. 2 adet 500 W gücünde hem akım hem gerilim ayarlamalı ve bu değerleri de kendi üzerinde gösteren ekranlı anahtarlamalı güç kaynağı kullanılmıştır. İki güç kaynağının birbirine seri bağlanmasıyla birlikte yeterli güç elde edilmiştir. Pozitif ve negatif 30V'a kadar gerilim ve 16,6 Ampere kadar çıkış verebilen bir besleme sistemi oluşturulmuştur. SMPS çıkışından pozitif ve negatif 30V DC alınmış ve devre beslemesinde kullanılmıştır.



Şekil 3-2 Devre Diyagramı.

Şekil 3-2’de verilen devrenin girişi 50 ohm BNC bağlantısı ile tasarlanmıştır. Fonksiyon jeneratörü çıkışı buraya bağlanmıştır. SMPS çıkışlarından elde edilen +30V ve -30V ise OPA549’un beslemesine bağlanmıştır. RP1 ayarlı direnci sayesinde devrenin kazancı ayarlanabilmektedir. Ayrıca J2 jumperi ile devrenin kazancı 1 olarak ayarlanabilmektedir. Bu da devrenin girişine uygulanan sinyali direk olarak çıkışa vermesi anlamına gelmektedir.

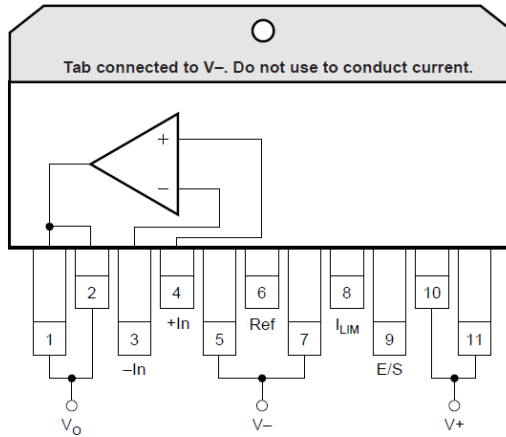


Şekil 3-3 OPA549 [52].

OPA549 -40°C ila $+85^{\circ}\text{C}$ aralığında çalışabilir, aşırı sıcaklığa karşı korumalıdır. Ayrıca, OPA549 devre üzerinde akım limitlemesi yapılmasına da olanak sağlar. Şekil 3-3'te gösterilen OPAMP'ın 11 pinli diyagramı Şekil 3-4'te verilmiştir. 1. ve 2. Pinler çıkış, 3. Pin $-In$ 4. Pin $+In$ 5. ve 7. Pinler V_{-} , 8 numara ile gösterilen pin ise akımı limitlemede kullanılan pindir.

OPAMP 0A ile 10A arasında istenilen akım değerini verecek şekilde ayarlanabilmektedir. Ancak sürekli durumda 8A değerinin üzerine çıkması sağlıklı çalışması açısından uygun değildir. Bu, uzun vadede OPAMP'ın güvenilir çalışmasının önüne geçebilmektedir. Ayrıca 1 amper değerinin altına ayarlanan akım değeri de çıkış akımının uzun vadeli güvenilirliğinin önüne geçmektedir. Akım kontrol işlemi direnç kontrollü olarak yapılabileceği gibi dijital olarak da yapılabilmektedir. 6 numaralı pin toprak referans pinidir. Devrede doğru ölçümler yapılmasını sağlamaktadır. Toprağın referans olarak kullanılabilmesi dışında kullanıcının belirlediği -8V'a kadar olan herhangi bir değer de referans olarak atanabilir. Ancak V+'dan daha yüksek bir değer ya da V-'den daha düşük bir değer referans olarak atanamamaktadır. OPA549 DC'de +8V ile +60V aralığında AC'de $\pm 4V$ ve ± 30 aralığında çalışabilmektedir.

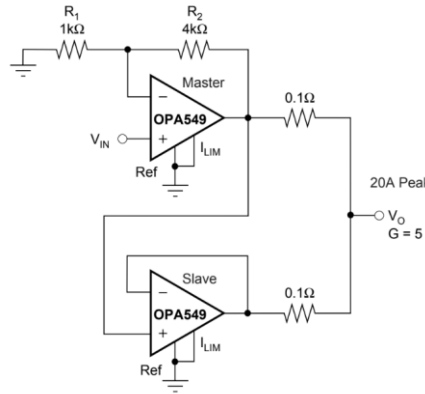
9 numaralı pin Enable/Status (E/S) Pin olarak görülmektedir. Bu pin çıkışı bir lojik verisi ile kapatma ve termal voltaj seviyesini izleyerek kapatma göstergesi olarak ayarlanabilir. Açık devre olarak bırakıldığında ise devrenin çalışmasına herhangi bir müdahalede bulunmamaktadır.



Şekil 3-4 OPA549 Bağlantı Diyagramı [52].

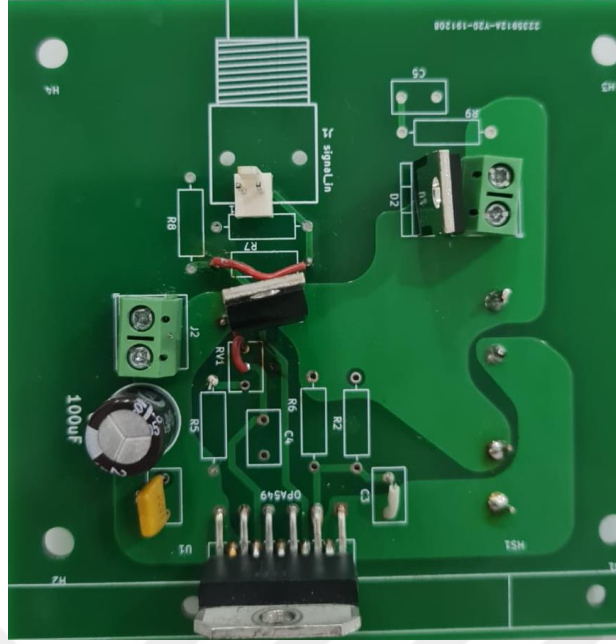
OPAMP çalışırken bir ısı salınımı yapmaktadır. Bu salınım DC ile çalışırken daha yüksek olmasına karşın bizim çalışacağımız AC de daha azdır. Bu salınımın OPAMP'ı termal limit değerlerinin üzerine çıkarmaması oldukça önemlidir. OPAMP'ın içerisinde bulunan transistörlerin dayanabileceği ısı limitinin üzerine çıkılması durumunda cihazın zarar görmemesi için iletim kesilmektedir. Sıcaklık 160°C'nin üzerine çıktığında sistemi kapatan bir dahili termal kesici devresi bulunmaktadır. Bu dahili termal kesici devresi 140°C'nin altına

düştüğünde devreden çıkarak tekrar akım akmasını sağlamaktadır. Ancak bu kesilip tekrar yüklenme süreçleri yük üzerinde istenmeyen etkiler oluşturabilmektedir. Bütün bu koruma önlemlerine rağmen sıcaklığın 125°C 'nin üzerine çıkması istenmeyen bir durum olarak belirtilmektedir. Bu ısınmanın önüne geçebilmek amacıyla soğutucu olarak alüminyum kullanılmıştır.



Şekil 3-5 Çıkış Akımını Yükseltmek Amacıyla Paralel Bağlama Yöntemi [52].

Şekil 3-5'te görüldüğü gibi devrenin çıkış akımını yükseltmek amacıyla OPAMP'ları paralel kullanmak mümkündür. Şekil 3-3'te görülen devrenin yaklaşık 4 tanesinin paralel olarak bağlanması ile çıkış akımı yaklaşık 4 katına çıkarılmıştır. Çıkış akımının yüksek olma ihtiyacı devrenin devam eden kısmında kullanılması planlanan transformatörün giriş ve çıkışı arasındaki gücün idealde sabit olmasından (gerçekte çıkış gücünün giriş gücünün altında) kaynaklanmaktadır. Transformatörün giriş akımı yükseltilerek çıkışta elde edilen yüksek gerilim sonucunda deneylerdeki yüksek gerilim ile birlikte akım ihtiyacını karşılayabilecek seviyede bir değer elde edilmesini sağlamaktır. Devrenin tamamlanmış hali Şekil 3-6'da verilmiştir



Şekil 3-6 Kuvvetlendirici Devre.

4 adet devrenin paralel olarak çalıştırılmasıyla birlikte devreler üzerinden yüksek akım geçebilmektedir. Üzerinden yüksek akım geçen OPAMP'larda aşırı ısınma gözlemlenmiştir. Bu ısınmanın önüne geçebilmek amacıyla soğutucu alüminyum kullanılmıştır. OPAMP'ların soğutucu yüzeyleri ısı iletken bir termal jel vasıtasıyla alüminyuma temas ettirilmiş ve Şekil 3-7'de de görüldüğü gibi vidalama ile sabitlenmiştir.



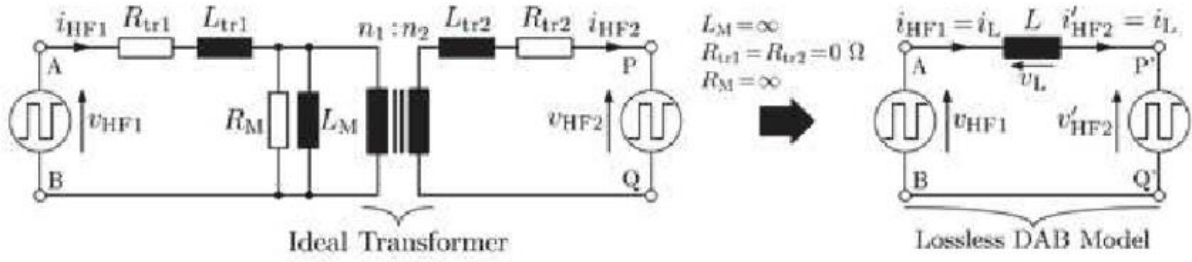
Şekil 3-7 Yüksek Frekanslı Yüksek Güç Üreten Devre.

Bu devre çıkışından elde edilen sinyal, yüksek frekansa uygun olarak sarılmış transformatörün girişine uygulanmakta ve çıkışta yüksek gerilim elde edilmektedir. Bu da

sistemin 3. Katmanı olan transformatör katmanıdır. Yüksek frekanslı transformatörler güç transformatörü, Filtre, şok bobini olarak tasarlanabilirler. Yüksek Frekanslı transformatörler; alternatif enerji invertörlerinde, elektronik anahtarlama cihazlarında, askeri güç kaynaklarında, LED aydınlatmalarda, plazma üretiminde, biyomedikal cihazlarda ve kişisel elektronik sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüksek frekanslı transformatörün bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlardan birincisi boyutudur; Herhangi bir güç derecesi için frekans ne kadar yüksekse, transformatör o kadar küçük olabilir. Bir diğeri az bakır gerektirmesidir; transformatör daha küçük olduğu için daha az bakır tel gereklidir. Bu sayede bakır kayıpları azalır, transformatör daha verimli olur. Yüksek frekanslı transformatörlerin bir diğeri avantajı da istenilen geometride üretilmeye uygun olmasıdır; yüksek frekanslarda ferrit çekirdek kullanıldığından, transformatörün istenilen geometride üretilmesine imkân tanır.

Bunun yanında yüksek frekanslı transformatör tasarımının zorlukları da bulunmaktadır. Sıcaklık ve yüksek çekirdek kaybı bunlardan biridir; Yüksek frekanslı işlem, daha yüksek çekirdek kaybı ve sıcaklığa sebep olur. Bu sebepten; yüksek doygunluklu akı yoğunluklu (high saturation fluxdensity), düşük özgül kayıplı ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilen manyetik çekirdek malzemesinin seçimi; yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu elde etmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca doğru sarım düzenlemesi ile ısınma azaltılabilir. İzolasyon sorunu bir diğeri tasarım zorluğudur; Hacmi ve ağırlığı azaltılmış olduğundan, yalıtım gereklilikleri ve termal yönetim dikkatlice düşünülmelidir. Ayrıca deri etkisi (skin effect) ve yakınlık etkisi (proximity effect) yüksek frekanslı transformatörün kablosunun seçiminde önem taşır. Yüksek frekans transformatörün tasarımında öncelikle anma güç hesabı yapılır. Bu güç hesabı transformatörün birincil sargı gerilimi için kullanılan Faraday Yasası ve birincil sargı etkin akım denklemi ile birleştirilip, çekirdek seçiminin yapılmasını sağlayan “alan çarpımı” değerine ulaşır. Bu alan çarpımı değeri sayesinde transformatör yapısında kullanılacak olan çekirdeğin boyutları belirlenir.



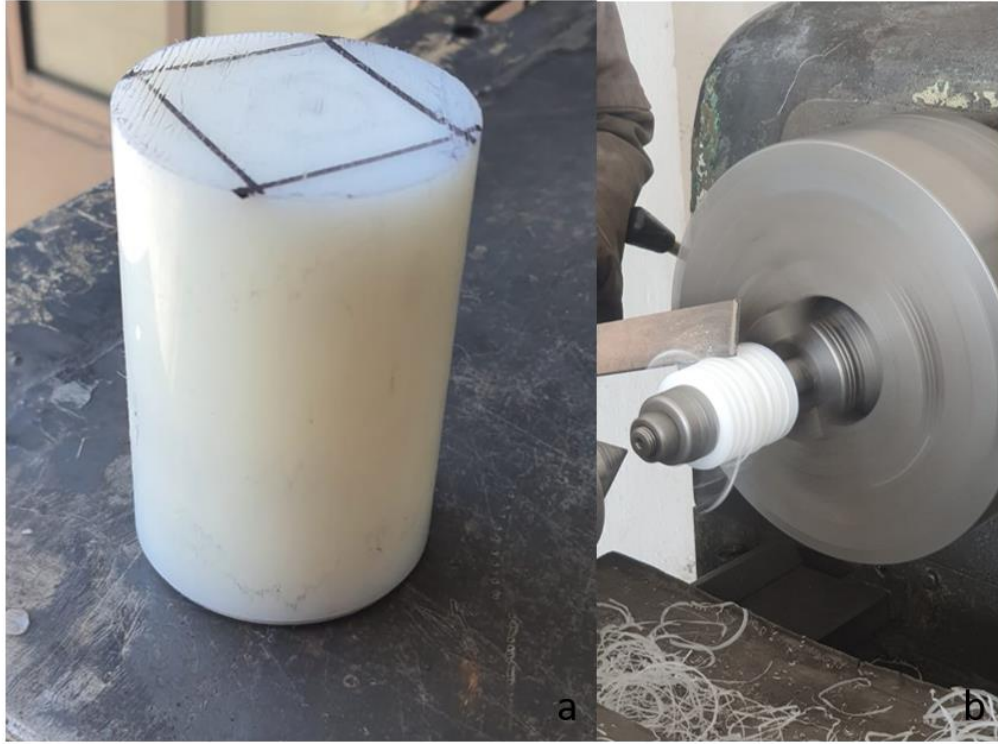
Şekil 3-8 Yüksek Frekanslı Transformör Eşdeğer Devresi [53].

Şekil 3-8’de yüksek frekanslı transformör eşdeğer devresi verilmiştir. Yüksek frekanslı transformör eşdeğer devresini standart transformör eşdeğer devresinden ayıran L endüktansı bulunmaktadır. Bu L endüktansını bulmak için tüm devre elemanları primer tarafta toplanıp eşdeğer endüktans hesaplaması yapılır.

Transformörün tasarımında; çekirdek için ferrit, yalıtım için polyamid, iletken olarak da bakır tel kullanılmıştır.

Çekirdekte kullanılan ferrit; yüksek manyetik doygunluk, yüksek Curie noktası, yarıiletken-yalıtkan geçişi, yüksek dielektrik sabiti ve düşük dielektrik kaybı gibi önemli özellikleri nedeniyle teknolojik ve mühendislik araştırma alanlarında önemli bir yere sahiptir. Yüksek dayanım, iyi elektriksel ve kimyasal özelliklere sahip, hafif ve birçok türleri olan termoplast bir üründür.

Yalıtım katında kullanılan polyamid ise yüksek dayanım, iyi elektriksel ve kimyasal özelliklere sahip, hafif ve birçok türleri olan termoplastik bir üründür. Ürün dişli ve yatak yapımında, elektrik tellerinin yalıtımında, elektrikli battaniyelerde, kumaş, elbise, çorap ve örme işleri ile darbeye dirençli metal mobilyaların kaplanmasında, gıda endüstrisinde ve hastane araç ve gereçleri yapımında ve daha birçok alanda yüksek dayanımı sayesinde kullanılmaktadır. Polyamid şekil 3-9 a’da gösterilen şekilde ham olarak alınmış ardından şekil 3-9 b’de gösterilen şekilde üzerine sarımların yapılacağı şekilde oyuklar açtırılmıştır. Sarımlarda ise bakır iletken tel kullanılmıştır.



Şekil 3-9 (a)Ham Polyamid (b) İşlenmekte Olan Polyamid.

Transformatör sarılmadan önce giriş ve çıkış sarımları için yükseltme oranı göz önünde bulundurularak ve giriş tarafının minimum sarım sayısı düşünülerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Giriş tarafının minimum sarım sayısını aşağıdaki formül ile hesaplayabiliriz. Bu formülde V_1 giriş gerilimini T sinyalin periyodunu, ΔB akı yoğunluğundaki değişimi A_{min} ise çekirdeğin minimum kesit alanını belirtmektedir.

$$N_{1min} \geq \frac{V_1 \times T/2}{\Delta B \times A_{min}} \quad (3.1)$$

İlgili formülden ve deneysel çalışmalardan faydalananarak giriş sarımı 10 olarak belirlenmiştir. İstenilen çıkış değerine ulaşabilmek amacıyla kayıplar da göz önünde bulundurularak

$$N_1 \times V_2 = N_2 \times V_1 \quad (3.2)$$

Formülünden 2000 (250*8) sarım olarak belirlenmiştir.

Transformatörde kullanılacak tellerin kalınlığı ise aşağıdaki formül ile bulunmaktadır. Bu formülde d kullanılacak olan bakır iletkenin çapını vermektedir. I_{RMS} cinsinden akım belirtirken s ise akım yoğunluğudur.

$$d = \sqrt{\frac{4xI}{\pi x s}} \quad (3.3)$$

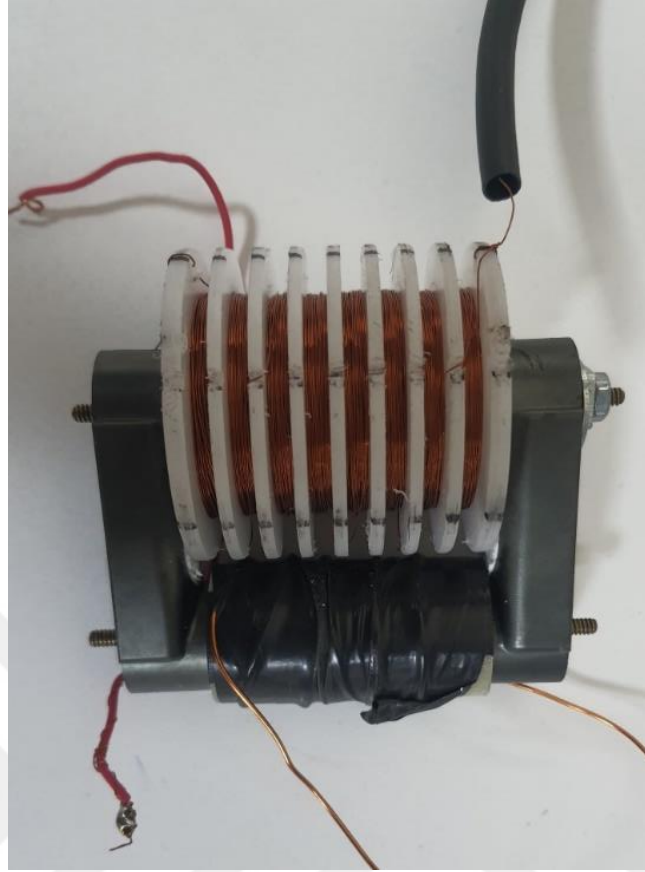
Bu formül ile iletken çapları hesaplanırken transformatörün girişine yaklaşık 10A akım gelmesi planlanmıştır. Bu değerler bizim önceki aşamada kurduğumuz devreden elde edebildiğimiz en yüksek değerler olarak hesaplamaya alınmıştır. Bunun için öncelikle primer sargının çapı hesaplanmıştır. Burada akım yoğunluğu değeri 3 olarak seçilmiştir.

$$d = \sqrt{\frac{4x10}{\pi x 3}} = 2,06 \text{ mm} \quad (3.4)$$

İlgili formülde değerler yerine konulduğunda kullanılması gereken bakır kablo çapı 2,06 mm bulunmuştur. Sistemin güvenliği de düşünüldüğünden 2,5 mm çapında kablo kullanılmıştır.

Sekonder tarafın iletken çapını bulmak için yine aynı formülde değerler yerine konulmuştur burada da çıkış akımı için yaklaşık değer hesaplanmıştır. Belirli bir toleransla birlikte 0,2mm çapında bakır kablo kullanılmıştır.

$$d = \sqrt{\frac{4x(\frac{10}{200})}{\pi x 3}} = 0,146 \text{ mm} \quad (3.5)$$



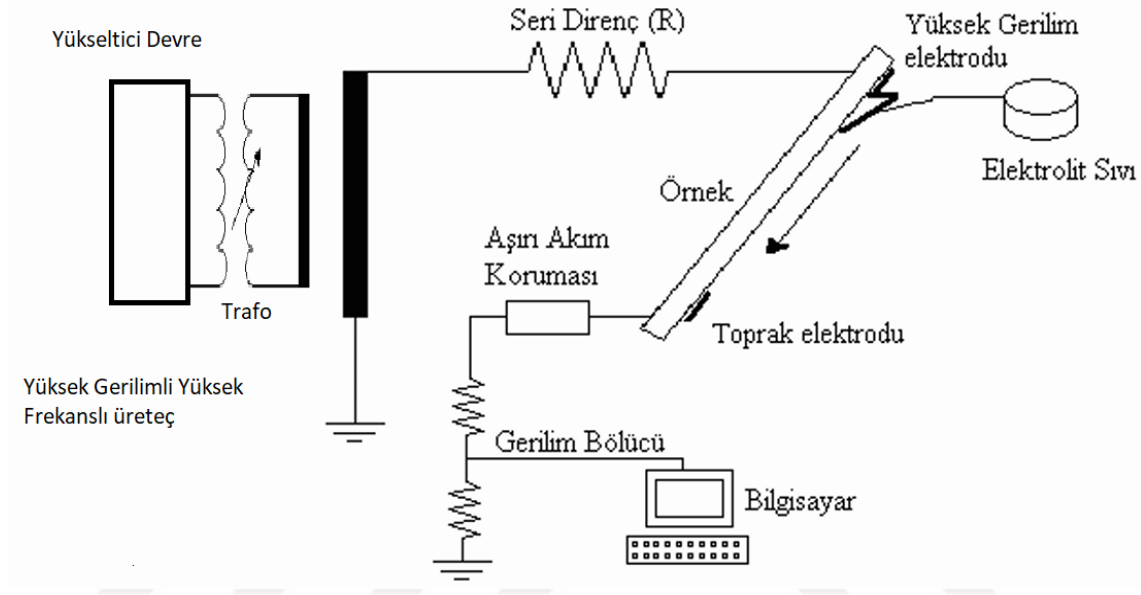
Şekil 3-10 Transformatör.

Sinyal jeneratöründen tepeden tepeye genliği 10V olan bir sinyal alınmış ve güçlendirici devre girişine uygulanmıştır. Bu devrenin çıkışında da gerilim seviyesi yükselerek 60V seviyesine çıkmıştır. Bu gerilim de üretilmiş hali Şekil 3-10'da görülen ve tasarımı yapılmış yüksek frekanslı transformatörün primer kısmına uygulanmış ve transformatörün sekonder kısmında gerilim seviyesi ölçülmüştür. Ölçüm rezistif gerilim bölücü ile Fluke marka 199C model skopmetre kullanılarak yapılmıştır. 200 MHz band genişliği olan bu cihaz saniyede 2,5 GS gerçek zamanlı örnekleme oranına sahiptir. Ayrıca renkli ekranı ve ekrandaki verileri hafızada tutabilmesi gibi özelliklerle de kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

Test düzeneğini kurmak için ihtiyaç olan gerilim seviyesi elde edildikten ve düzeneğe kullanmak için gerekli olan numuneler üretildikten sonra test düzeneği kurularak deneylere başlanmıştır.

3.3. IEC60587 TEST DÜZENEGİ

Elektrik yalıtım malzemeleri - Ağır ortam şartlarında kullanılan - Yüzeysel kaçaklara ve aşınmaya karşı dayanıklılıklarının değerlendirilmesi için uygulanan deney metotlarına ait deney düzeneğinin giriş geriliminin frekansı değiştirilerek yüksek gerilimli hale getirilmiş ve yüksek frekanslı halinin şematik gösterimi Şekil 3-11’de verilmiştir.



Şekil 3-11 Test Düzeneği.

Deneyler sırasında öncelikle örneklere 50Hz 4 kV gerilim uygulanmıştır. Bu amaçla 220 V 50Hz şebeke gerilimi varyak ile kontrol altında tutularak 220/4000 V çevirme oranına sahip transformatör yardımıyla 4 kV’luk değere ulaştırılmıştır. Transformatör çıkışında test örneğine uygulanan 4 kV gerilim değeri için standartta belirtilen şekilde 33 kohm, 500 watt gücüne sahip bir direnç seri olarak bağlanmıştır. Test örneğinin üzerine yerleştirilen yüksek gerilim elektroduna gerilim, bu direnç üzerinden uygulanmıştır. İz oluşumu deney düzeneğinde 4 kV gerilim değeri için öngörülen elektrolit akış hızı, 36 ml/saat olarak infüzyon pompası yardımı ile uygulanmıştır.

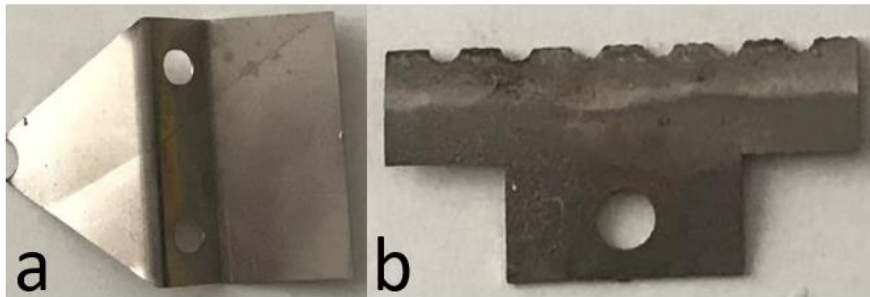
Ardından tüm deneyler giriş gerilimini sağlayan yapı değiştirilerek yüksek frekanslı transformatör çıkışından elde edilen sinyal örneğe uygulanacak şekilde yeniden yapılmıştır. Bu deneyler sırasında da frekans değiştirilerek farklı frekanslarda deneyler tekrarlanmıştır. Yapının tümünü gösterir düzenek şekil 3-12’de verilmiştir



Şekil 3-12 Deneylerde Kullanılan Test Düzeneği.

Örnek yüzeyindeki bozulmanın takip edilebilmesi için test örneğinin üzerinden akan kaçak akım bir dizi dirençten oluşan bir gerilim bölücü vasıtasıyla analog dijital dönüştürücü olarak kullanılmak üzere bilgisayarın ses kartının girişine bağlanmıştır. Bu sayede sinyalin yapısı bilgisayar ortamında takip edilebilir hale gelmiştir.

Deneylerde kullanılmak üzere standartta belirtilen ölçülerde elektrotlar paslanmaz çelikten hazırlanmıştır. Eğik düzlemin yukarı kısmında Şekil 3-13 a’da verilen yüksek gerilim elektrodu bulunurken aşağı kısmında toprak elektrodu bulunmaktadır. Toprak elektrodunun deney örneğine temas ettiği yüzeyinde, çapı 5 mm olan yarım daireler açılarak toprak elektrodunun örneğe 7 farklı noktadan temas etmesi sağlanmıştır. Toprak elektroduna verilen eğimle birlikte örnek ile arasındaki açı 30 derece olmaktadır. Şekil 3-13 b’de toprak elektrodu gösterilmiştir [4,54,55,56].



Şekil 3-13 (a)Yüksek Gerilim Elektrodu (b) Toprak Elektrodu.

Eğik düzlem düzeneğinde deney örneği üzerinde iletkenliği sağlamak amacıyla ilgili standartta tanımlanan bir kirletici bir çözelti kullanılmıştır. Bu amaçla saf suyun içine standartta

belirtilen oranlarda NH_4Cl (Amonyum Klorür) ve Triton-X100 eklenerek elektrolit sıvı hazırlanmıştır. Çözeltide iletkenliği artırmak amacıyla amonyum klorür, sıvının yalıtkan yüzeyinde daha uzun süre kalmasını sağlamak için ise Triton-X kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında hazırlanan çözeltinin test cihazıyla yapılan ölçümünde iletkenlik seviyesi yaklaşık olarak 0.28 S/m olarak ölçülmüştür.

3.4. UYARLANABİLİR GÜRÜLTÜ İLE KOMPLE TOPLULUK GÖRGÜL KİP AYRIŞTIRMASI (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise CEEMDAN)

Bu çalışmada sinyal işleme yöntemi olarak CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise) kullanılmıştır.

Bu yöntemin literatürdeki gelişim süreci ile sağladığı başlıca avantajlar, sistematik biçimde ele alınmıştır. Uyarlanabilir Gürültü ile Geliştirilmiş Komple Topluluk Görgül Kip Ayrıştırması (CEEMDAN), EMD (Empirik Mod Ayrıştırma), EEMD (Toplu Empirik Mod Ayrıştırma) ve CEEMD temelli tekniklerin daha gelişmiş bir versiyonudur. EMD'ye dayalı ayrıştırma yöntemleri, orijinal verileri farklı frekans ve ölçeklerdeki çeşitli içsel mod fonksiyonlarına (IMF) ve kalıntıya uyarlanabilir biçimde ayırabilmektedir. Bu yaklaşım, doğrusal olmayan ve durağan olmayan zaman serisi verilerinin analizine uygundur ve uydu sinyalleri, konuşma tanıma, ekonomik modelleme ve görüntü işleme gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Geleneksel EMD yönteminin sınırlarını aşmak amacıyla CEEMDAN, sürece uyarlanabilir gürültü terimi ekleyerek ayrıştırmayı daha etkin hale getirir. Bu yöntemi irdelemeden önce, CEEMDAN'ın temelini oluşturan EMD algoritmasını kavramak gerekir. EMD, bir sinyali farklı frekans ve genliklerdeki osilasyon modlarına, yani IMF'lere ayıran veri odaklı bir tekniktir.

Ancak EMD yöntemi, gürültü, darbe etkileri veya kesiklikler içeren verilerde mod karışımı sorununa sahiptir. Bu nedenle, EEMD adı verilen ve orijinal verilere beyaz gürültü eklenerek mod karışımını azaltmayı hedefleyen bir yöntem geliştirilmiştir. Beyaz gürültünün tekdüze frekans dağılımı, veriyi daha sürekli hale getirerek sinyal-gürültü oranını (SNR) azaltır ve bu sayede mod karışımı sorunu etkili biçimde azaltılır. Bununla birlikte, EEMD yönteminin

en büyük dezavantajı, eklenen beyaz gürültünün tamamen ortadan kaldırılamaması ve bu durumun sinyalden çıkarılacak bilgiyi olumsuz etkilemesidir [57-58].

EEMD, gürültü destekli bir analiz yöntemi olarak, beyaz gürültü eklenmiş çok sayıda sinyalin ortalamasını alarak çalışır. EEMD, EMD algoritmasında olduğu gibi önceden belirlenmiş kriterler olmadan doğal şekilde frekans ayrımı yapabilir. Wu ve Huang [59], beyaz gürültünün farklı olasılıkları temsil ettiğini ve bu sayede tüm potansiyel çözümlerin analiz edildiğini ifade etmişlerdir. Böylece sinyaller, uygun içsel modlara ayrılabilir. Yeterli tekrar sayısı ile beyaz gürültünün ortalaması sıfıra yaklaşır ve sadece sinyal korunur.

2010 yılında Yeh ve çalışma arkadaşları, eşit genlikte pozitif ve negatif beyaz gürültü ekleyerek, ortalama alma sürecinde bu gürültüyü ortadan kaldırabilen CEEMD yöntemini tanıtmışlardır. Daha sonra Torres ve ekibi, hesaplama verimliliğini artırmak ve ortalama alma hatalarını azaltmak adına CEEMD'yi geliştirerek CEEMDAN yöntemini önermiştir [60-61].

Intrinsic Mode Function (IMF), karmaşık ve durağan olmayan sinyallerin zaman-frekans analizini mümkün kılan özelleşmiş sinyal bileşenleridir. Her bir IMF, sinyalin belirli bir frekans aralığını temsil eden, simetrik ve sıfır ortalamalı osilasyon yapısına sahip alt bileşenlerden oluşur. IMF'ler, sinyalin lokal özelliklerine duyarlı olarak elde edildiğinden, geleneksel Fourier veya dalgacık analizlerinden farklı olarak ön tanımlı taban fonksiyonlarına ihtiyaç duymaz ve bu yönüyle adaptiftir. Sinyalin frekans içeriğinin zamanla değişimini ortaya koymada etkili olan IMF'ler, özellikle kısmi deşarj, kaçak akım ve titreşim gibi transient karakterli elektriksel olayların analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede, IMF bileşenleri üzerinden elde edilen enerji dağılımı, dominant frekans davranışı ve zaman aralıklı genlik modülasyonları gibi parametreler, arıza teşhisi ve yapısal bozulma analizi açısından kritik bilgiler sunar.

CEEMDAN'ın avantajları şunlardır:

1. Ayırıştırma sürecinde sinyal-gürültü oranı (SNR) kontrolü sağlamak üzere ek parametre tanımlanır.
2. Ayırıştırma sonunda elde edilen IMF'ler, orijinal sinyali neredeyse gürültüsüz biçimde yeniden oluşturabilir.

3. EMD, EEMD ve CEEMD'ye kıyasla daha az tekrar gerektirir ve yüksek verimlilik sunar.

CEEMDAN yöntemi, uyarlanabilir gürültü ekleyerek EMD'deki mod karışımı sorununu ortadan kaldırır ve sinyali farklı frekanslardaki IMF'lere ayırarak doğrusal olmayan ve durağan olmayan yapıdaki verilerin ayrıştırılmasına olanak tanır.

CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise) yöntemi, zamana bağlı bir orijinal sinyalin ayrıştırılması için geliştirilmiş gelişmiş bir sinyal işleme tekniğidir. Bu yöntem, geleneksel EMD'nin (Empirical Mode Decomposition) eksikliklerini gidererek daha kararlı ve tekrarlanabilir sonuçlar üretmeyi amaçlar. CEEMDAN süreci, orijinal zaman serisi verisine ε_0 sinyal-gürültü oranına sahip beyaz gürültü $\omega_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) eklenmesiyle başlar. Bu işlemin sonucunda aşağıdaki şekilde ifade edilen gürültülü sinyaller $f_i(t)$ elde edilir:

$$f_i(t) = x(t) + \omega_i(t) \quad (3.6)$$

Burada t zaman eksenini, i beyaz gürültü örneğini ve n toplam gürültü sayısını temsil eder. Her bir gürültülü sinyal için EMD uygulanarak ilk IMF bileşeni $c_1^{(i)}$ elde edilir. Bu IMF'lerin ortalaması alınarak aşağıdaki gibi birleştirilmiş ilk mod elde edilir:

$$c_1(t) = (1/n) \sum c_1^{(i)}(t) \quad (3.7)$$

Bu IMF bileşeni, $x(t)$ sinyalinden çıkarılarak ilk rezidü $r_1(t)$ hesaplanır:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (3.8)$$

İkinci IMF'in hesaplanması için, her bir $\omega_i(t)$ beyaz gürültüsü $r_1(t)$ üzerine eklenerek yeni gürültülü sinyaller elde edilir:

$$f_i(t) = r_1(t) + \omega_i(t) \quad (3.9)$$

Bu sinyaller için tekrar EMD uygulanarak ikinci IMF bileşenleri hesaplanır:

$$c_2(t) = (1/n) \sum c_2^{(i)}(t) \quad (3.10)$$

Bu süreç, orijinal sinyalin ayrıştırılabileceği maksimum IMF sayısına ulaşıncaya kadar aşağıdaki genel formülle tekrarlanır:

$$r_{k-1}(t) = r_{k-2}(t) - c_{k-1}(t) \quad (3.11)$$

$$c_k(t) = (1/n) \sum c_1^{(i)}(t) \quad (3.12)$$

Sonuç olarak, orijinal sinyal şu şekilde ifade edilebilir:

$$x(t) = \sum c_k(t) + r_k(t) \quad (3.13)$$

CEEMDAN yöntemi, beyaz gürültü ortalamasının sıfıra yakın olması sayesinde, IMF'lerin daha istikrarlı ve fiziksel anlamlı şekilde elde edilmesini sağlar. Böylece, zaman-frekans çözünürlüğü daha yüksek ve yorumlanabilir IMF bileşenleri ortaya çıkar. Intrinsic Mode Function (IMF), CEEMDAN süreciyle elde edilen ve karmaşık sinyallerin frekans-zaman çözümlemesine olanak sağlayan temel sinyal bileşenleridir. Bir IMF'in tanımlanabilmesi için iki temel koşulun sağlanması gerekir: (1) sinyaldeki sıfır geçiş sayısı ile yerel ekstremum (maksimum + minimum) sayısı eşit olmalı ya da en fazla bir fark bulunmalı; (2) sinyalin her noktasında zarf eğrilerinin ortalaması sıfıra yakın olmalıdır. Bu koşullar, IMF'lerin hem osilasyon özelliğini hem de lokal ortalama simetrisini garanti eder. CEEMDAN ile ayrıştırılan her IMF bileşeni, sinyalin özgün bir frekans bant aralığını temsil eden ve zamanla değişen genlik ve frekans bilgisi taşıyan adaptif bir moddur [57-61].

Her bir IMF bileşeni $c_k(t)$, sinyalin farklı spektral bileşenlerinin bir temsilcisidir. IMF'ler, yüksek frekanstan düşük frekansa doğru sıralanır ve bu sayede sinyalin farklı frekans katmanları analiz edilebilir. CEEMDAN yönteminde elde edilen IMF'ler, sinyalin zamana bağlı frekans çözünürlüğünü maksimize ederken, aynı zamanda beyaz gürültü ortalamasının sıfıra yaklaşması sayesinde daha kararlı ve fiziksel anlamlı çözümler sunar. Matematiksel olarak, CEEMDAN ile ayrıştırılmış bir sinyal $x(t)$ denklem 3.13'teki gibi ifade edilir.

Burada $c_k(t)$ k-inci IMF bileşenini, $r_k(t)$ ise kalan (rezidü) sinyali temsil eder. Her IMF bileşeni zamanla değişen frekans yapısına sahiptir ve sinyalin hem geçici hem de sürekli yapılarının analizine olanak tanır. IMF'lerin Fourier veya dalgacık analizine kıyasla en büyük avantajı, önceden tanımlı baz fonksiyonları gerektirmeden doğrudan veriden öğrenilen adaptif yapıda olmalarıdır. Bu yönüyle IMF'ler, özellikle lineer olmayan, durağan olmayan ve geçici özellikler içeren elektriksel sinyallerin detaylı incelenmesinde üstünlük sağlar.

Ayrıca, IMF bileşenlerinin her biri üzerinde uygulanan spektral analizler, sinyalin baskın frekans bileşenlerinin zamanla nasıl evrildiğini ortaya koyar. Bu sayede sistemdeki

bozulma, ani değişim veya arıza oluşumu gibi fenomenlerin hem frekans hem de zaman düzleminde hassas tespiti mümkün hale gelir. IMF tabanlı enerji yoğunluğu dağılımları ve frekans istatistikleri, CEEMDAN analizinin sonraki aşamalarında arıza teşhisi, karakterizasyon ve sınıflandırma gibi işlemlerde güçlü bir temel sunar. Her bir IMF tablosunda aşağıda açıklamalarıyla birlikte belirtilen değerler bulunmaktadır.

Baskın Frekans (Dominant Frequency):

Baskın frekans, bir sinyalin frekans spektrumunda en yüksek genliğe veya güce sahip olan frekans bileşenini ifade eder. Bu değer, sinyalin periyodik davranışının temel frekansını veya en belirgin salınımını temsil eder. Baskın frekans, sinyalin karakteristik özelliklerini ve temel titreşim mekanizmalarını anlamak için kritik bir parametredir. Özellikle karmaşık sinyallerde, baskın frekans sinyalin algılanan "perdesini" veya temel ritmini belirleyebilir. Farklı zaman aralıklarında veya sinyalin evrimi boyunca baskın frekanstaki değişimler, altta yatan fiziksel süreçlerdeki dinamikleri yansıtabilir ve bu nedenle sinyal analizi ve yorumlamasında kritik bir rol oynar.

IMF bileşenlerinin baskın frekanslarının belirlenmesinde genellikle Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform – FFT) yöntemi kullanılır. Bu işlemde her bir IMF'ye Fourier dönüşümü uygulanarak frekans düzlemine taşınır ve genlik spektrumu elde edilir. Elde edilen spektrum içerisinde genlik değeri en yüksek olan frekans bileşeni, o IMF'nin baskın frekansı olarak tanımlanır. Matematiksel olarak bu frekans, genlik spektrumunun maksimum olduğu noktaya karşılık gelen frekanstır ve şu şekilde ifade edilir:

$$f_{\text{dominant},i} = \text{argmax}_f |X_i(f)| \quad (3.14)$$

Burada $X_i(f)$, i . IMF bileşeninin Fourier dönüşümünü; $f_{\text{dominant},i}$ ise o bileşenin baskın frekansını temsil eder. Bu analiz sayesinde her bir IMF'nin enerji yoğunluğu hangi frekans bandında yer alıyorsa, o bölge tespit edilmekte ve sinyalin frekans içeriği ayrıntılı şekilde anlaşılabilir [62].

Ortalama Frekans (Mean Frequency - Hz):

Ortalama frekans, bir sinyalin frekans spektrumundaki tüm frekans bileşenlerinin ağırlıklı ortalamasını ifade eden istatistiksel bir metriktir. Bu değer, spektrumdaki her bir frekansın genliği veya gücü ile orantılı olarak hesaplanır ve sinyalin spektral içeriğinin merkezi eğiliminin bir ölçüsünü sunar. Ortalama frekans, sinyalin genel frekans içeriği hakkında bilgi sağlar ve farklı sinyallerin spektral özelliklerini karşılaştırmak için kullanılabilir. Özellikle geniş bantlı veya birden fazla frekans bileşeni içeren sinyallerin analizinde, ortalama frekans spektrumun genel "ağırlık merkezini" temsil ederek sinyalin baskın frekans aralığı hakkında genel bir fikir verir.

Ortalama frekans, bir sinyalin frekans bileşenlerinin yoğunluk dağılımını dikkate alarak, spektral içeriğin ağırlıklı merkezini temsil eden bir parametredir. Zaman-frekans analizlerinde yaygın olarak kullanılan bu metrik, özellikle biyomedikal sinyal işleme, titreşim analizi ve elektriksel deşarj sinyallerinin karakterizasyonunda anlamlı bilgiler sunar. Ortalama frekans, sinyalin güç spektral yoğunluğu (PSD: Power Spectral Density) üzerinden hesaplanır ve spektrumdaki her frekans bileşeninin güçle ağırlıklandırılmış ortalamasını ifade eder.

Matematiksel olarak ortalama frekans aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$f_{\text{mean}} = (\sum f_i * P(f_i)) / (\sum P(f_i)) \quad (3.15)$$

Burada:

- f_{mean} : Ortalama frekans (Hz),
- f_i : i 'nci frekans bileşeni,
- $P(f_i)$: i 'nci frekans bileşenine karşılık gelen güç spektral yoğunluğu,
- N : toplam frekans bileşeni sayısıdır.

Bu formül, sinyalin frekans domaininde dağılımını yansıtan bir ölçüt olarak değerlendirilir. Özellikle CEEMDAN yöntemiyle ayrıştırılmış Intrinsic Mode Function (IMF) bileşenlerinin her biri için ortalama frekansın belirlenmesi, farklı frekans bantlarındaki enerji konsantrasyonunun ve spektral davranışın anlaşılmasını kolaylaştırır. Böylece elektriksel deşarj sinyallerinin analizinde IMF'lerin karakteristiği hakkında daha ayrıntılı bilgi sağlanmış olur.

Ortanca Frekans (Median Frequency - Hz):

Ortanca frekans, bir sinyalin spektral güç dağılımının merkezi eğilimini ifade eden istatistiksel bir metriktir. Bu değer, frekans spektrumunu iki eşit alana bölen frekans noktasını temsil eder; yani, toplam spektral gücün yarısı bu frekansın altında ve diğer yarısı ise üzerindedir. Ortalama frekanstan farklı olarak, ortanca frekans spektrumdaki uç değerlerden (aykırılardan) daha az etkilenir, bu da onu spektral içeriğin genel karakteristiğini değerlendirmede daha robust bir ölçü haline getirir. Özellikle gürültülü veya geçici bileşenler içeren sinyallerin frekans analizinde, ortanca frekans sinyalin baskın frekans bileşenlerinin daha kararlı bir göstergesini sunabilir.

Frekans Standart Sapması (Standard Deviation of Frequency - Hz):

Frekans standart sapması, bir sinyalin frekans bileşenlerinin spektrum boyunca ne kadar yayıldığını veya dağıldığını nicelendiren bir istatistiksel ölçüdür. Yüksek bir standart sapma değeri, sinyalin geniş bir frekans aralığına yayıldığını ve dolayısıyla daha geniş bant genişliğine sahip olduğunu gösterirken, düşük bir değer frekans bileşenlerinin dar bir bant aralığında yoğunlaştığını işaret eder. Bu metrik, sinyalin spektral içeriğinin homojenliğini veya heterojenliğini anlamak için kritik bir öneme sahiptir. Özellikle farklı frekans bantlarının karakteristik özelliklerini karşılaştırmada ve sinyallerin zaman-frekans davranışlarını analiz etmede değerli bilgiler sunar.

Spektral Çarpıklık (Spectral Skewness):

Spektral çarpıklık, bir sinyalin frekans spektrumunun simetri derecesini ve dağılımının asimetrisini tanımlayan üçüncü merkezi momenttir. Pozitif bir çarpıklık değeri, spektrumun yüksek frekanslar yönünde daha uzun bir kuyruğa sahip olduğunu ve düşük frekanslarda yoğunlaştığını gösterirken, negatif bir çarpıklık değeri ise bunun tam tersini ifade eder. Sıfıra yakın bir çarpıklık değeri, spektrumun yaklaşık olarak simetrik bir dağılıma sahip olduğunu belirtir. Spektral çarpıklık, sinyalin frekans içeriğindeki asimetrisi ve baskın frekans bileşenlerinin spektrum üzerindeki dağılımını anlamak için önemli bir parametredir.

Spektral Basıklık (Spectral Kurtosis):

Spektral basıklık, bir sinyalin frekans spektrumunun şeklini, özellikle de kuyruklarının "ağırlığını" ve dağılımının "sivriliğini" karakterize eden dördüncü merkezi momenttir. Yüksek bir basıklık değeri (leptokurtik dağılım), spektrumun ortalama etrafında daha sivri bir tepeye ve daha kalın kuyruklara sahip olduğunu, bu da spektrumda daha az sayıda ancak daha yüksek genlikli frekans bileşenlerinin bulunduğunu işaret eder. Düşük bir basıklık değeri (platikurtik dağılım) ise daha düz bir tepe ve daha ince kuyruklar anlamına gelir, bu da frekans bileşenlerinin daha eşit bir şekilde dağıldığını gösterir. Spektral basıklık, sinyalin spektral içeriğindeki anormallikleri, geçici olayları veya dar bantlı bileşenlerin varlığını tespit etmede faydalı bir ölçüdür.

Spektral Kesim Frekansı (Spectral Rolloff Frequency):

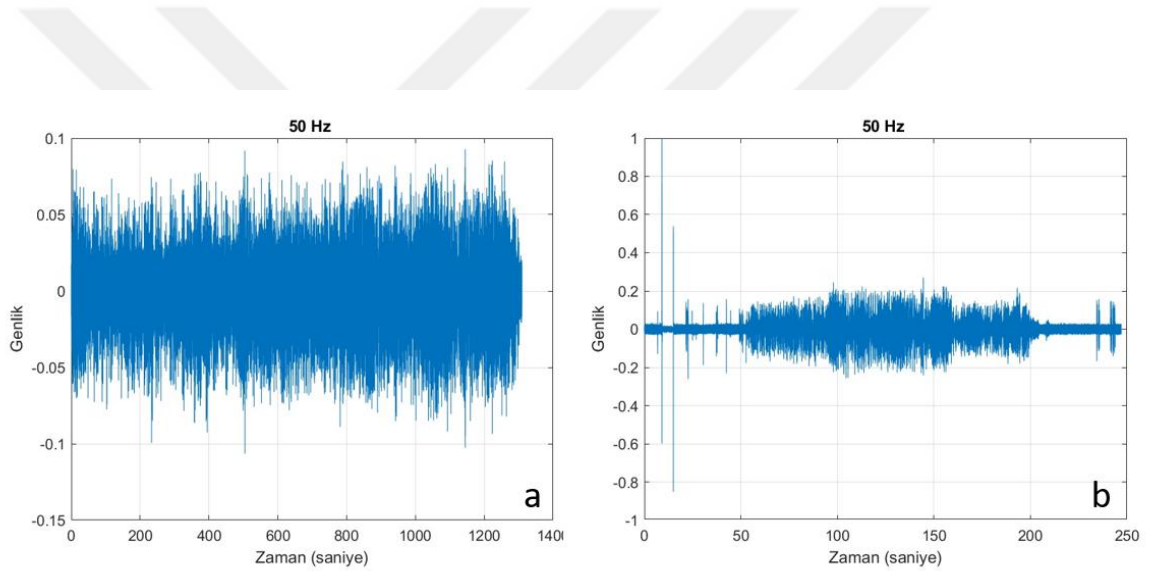
Spektral kesim frekansı, bir sinyalin toplam spektral gücünün belirli bir yüzdesinin (genellikle %85 veya %95) altında bulunduğu frekans değerini ifade eder. Bu metrik, sinyalin yüksek frekans içeriğinin yayılımını ve spektral enerjisinin büyük bir kısmının hangi frekans aralığında yoğunlaştığını belirlemek için kullanılır. Düşük bir spektral kesim frekansı, sinyalin enerjisinin daha düşük frekanslarda toplandığını ve yüksek frekans bileşenlerinin sınırlı olduğunu gösterirken, yüksek bir spektral kesim frekansı tam tersini işaret eder. Bu parametre, sinyallerin bant genişliği tahmininde, özellik çıkarımında ve farklı sinyal türlerinin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılır.

4. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde 50 hz ile 6-8-10-12-14 Khz frekanslarında yaklaşık 4kV gerilim uygulanmış ve veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. En düşük frekanstan yükseğe doğru bilgisayar ortamına aktarılan veriler aşağıda incelenmiştir. Sinyaller çeşitli yöntemlerle matlab ortamında analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar bir sonraki kısımda değerlendirilmiştir.

4.1. KAÇAK AKIM İŞARETLERİ

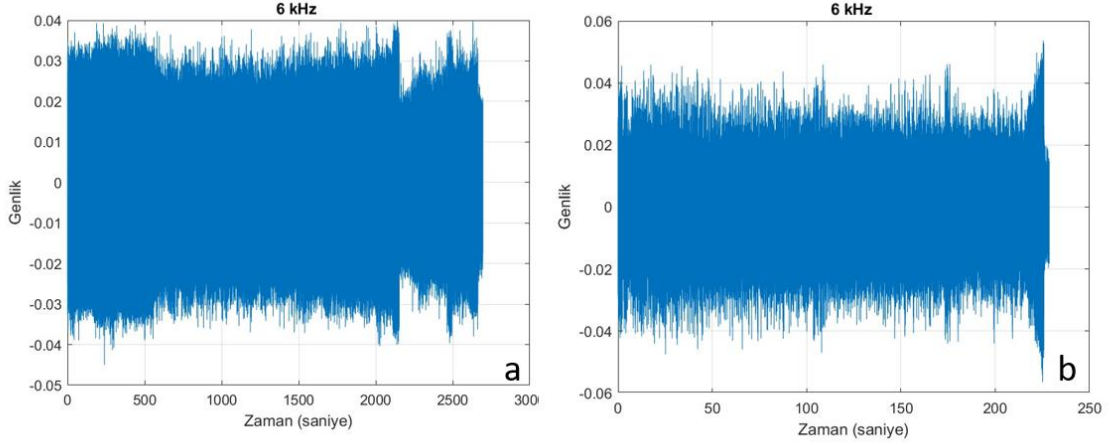
4.1.1. Standart Eğik Düzlem Testi (50Hz) İşaretleri



Şekil 4-1 50 Hz için alınan sinyal verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.

Şekil 4-1’de 50 Hz 4kV gerilimi olan sinyalin polyester numuneye uygulandığında yalıtkan üzerinden akan akımın sinyal verisi görülmektedir. Bu çalışma IEC 60587 standart eğik düzlem test düzeneği ile elde edilen sinyali göstermektedir. Şekil 4-1 a’da verilen polyester katkısız Şekil 4-1 b’de verilen ise borik asit katkılıdır.

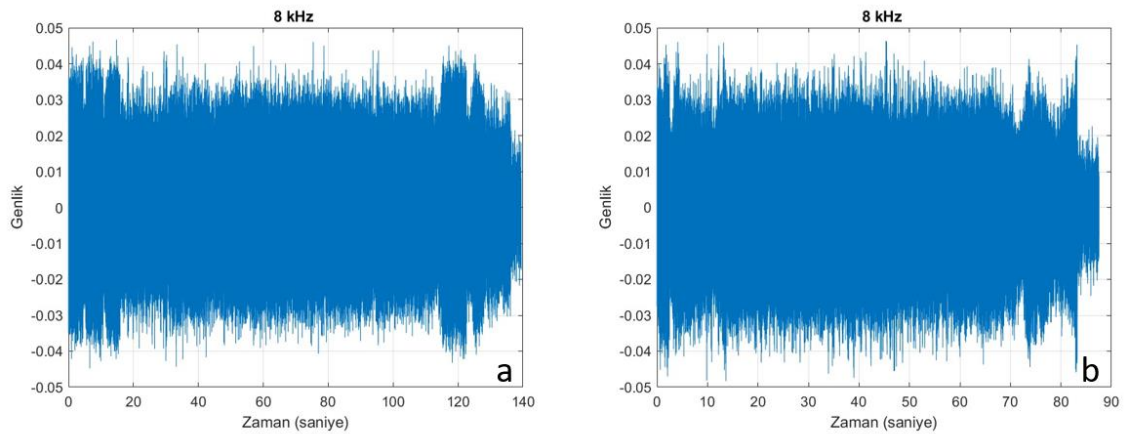
4.1.2. 6kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri



Şekil 4-2 6 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.

Şekil 4.2’de 6kHz 4kV gerilimi olan sinyalin polyester numuneye uygulandığında elde edilen kaçak akım sinyal verisi görülmektedir. Bu ve bundan daha yüksek frekanslarda standart eğik düzlem test düzeneğinin giriş beslemesi yüksek frekanslı üreteç ile değiştirilmiş ve numuneler üzerine yüksek frekanslı bir işaretin uygulanması sağlanmıştır. Şekil 4-2-a’da verilen polyester katkısız Şekil 4-2-b’de verilen ise katkılıdır.

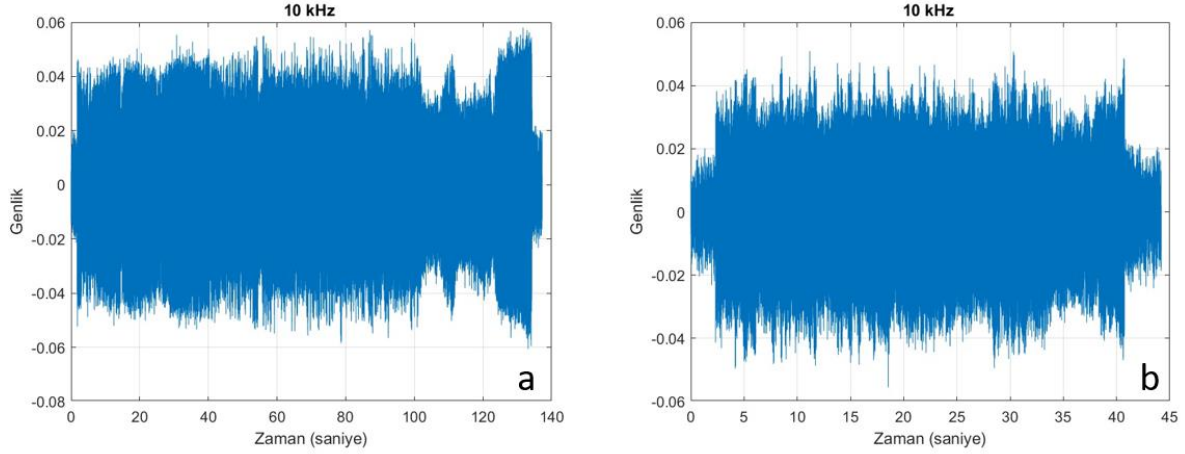
4.1.3. 8kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri



Şekil 4-3 8 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.

Şekilde 8kHz 4kV gerilimi olan sinyalin polyester numuneye uygulandığında elde edilen kaçak akım sinyal verisi görülmektedir. Her iki sinyalde de benzeri bir görünüm olmuştur. Şekil 4-3-a'da verilen polyester katkısız 4-3-b'de verilen ise katkılıdır.

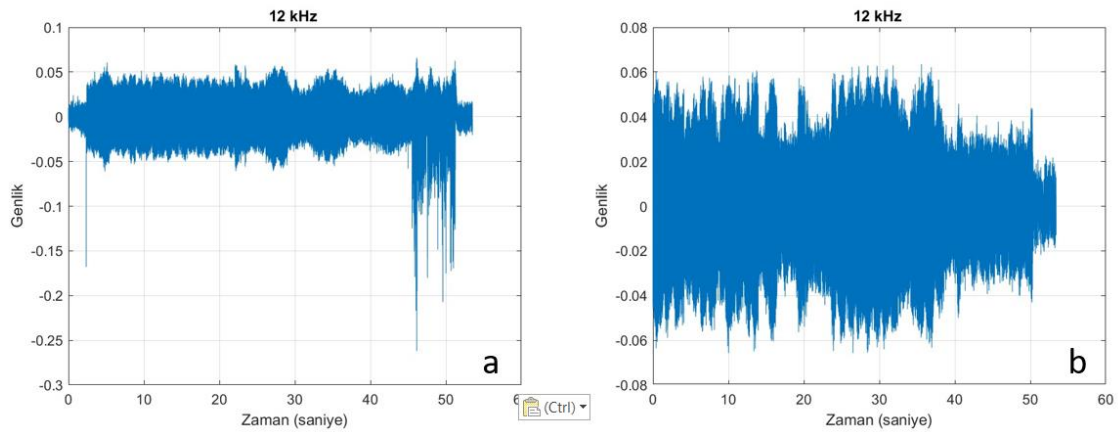
4.1.4. 10 kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri



Şekil 4-4 10 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.

Şekilde 10kHz 4kV gerilimi olan sinyalin polyester numuneye uygulandığında elde edilen kaçak akım sinyal verisi görülmektedir. Şekil 4-4-a'da verilen polyester katkısız Şekil 4-4-b'de verilen ise katkılıdır.

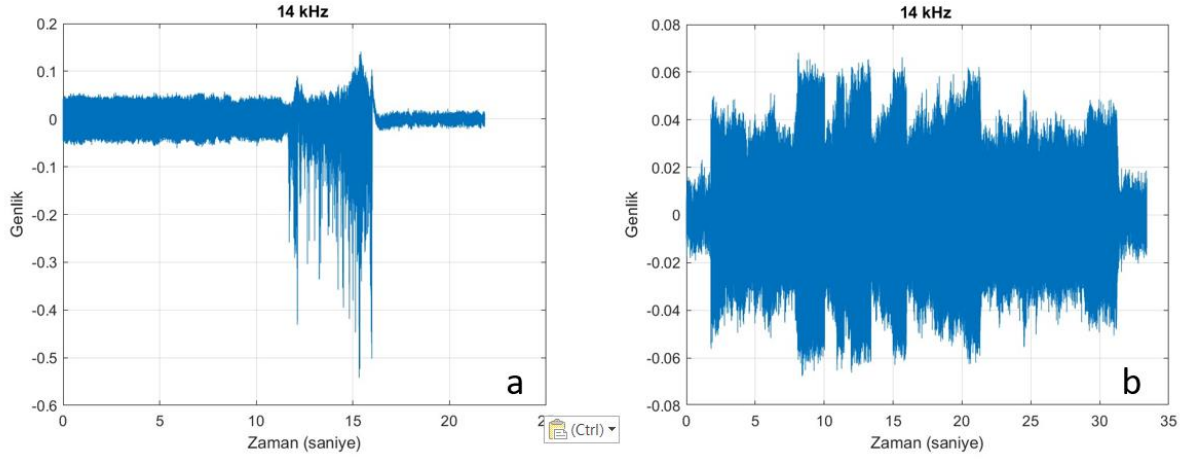
4.1.5. 12kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri



Şekil 4-5 12 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.

Şekilde 12kHz 4kV gerilimi olan sinyalin polyester numuneye uygulandığında elde edilen kaçak akım sinyal verisi görülmektedir. Şekil 4-5-a'da verilen polyester katkısız, Şekil 4-5-b'de verilen ise katkılıdır.

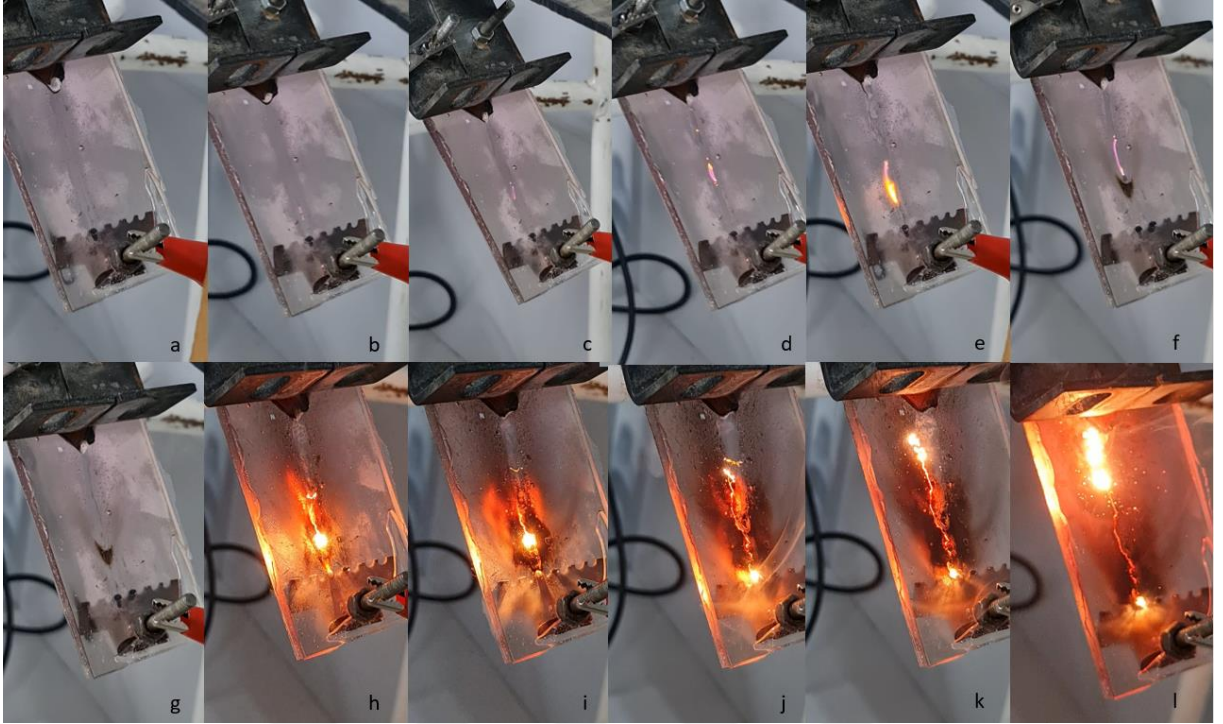
4.1.6. 14kHz Frekans Altında Yapılan Eğik Düzlem Testi İşaretleri



Şekil 4-6 14 kHz İçin Alınan Sinyal Verisi (a)Katkısız Polyester (b) Katkılı Polyester.

Şekilde 14kHz 4kV gerilimi olan sinyalin polyester numuneye uygulandığında elde edilen kaçak akım sinyal verisi görülmektedir. Şekil 4-6-a'da verilen polyester katkısız Şekil 4-6-b'de verilen ise katkılıdır.

4.2. DELİNME İLERLEYİŞİNİN İZLENMESİ



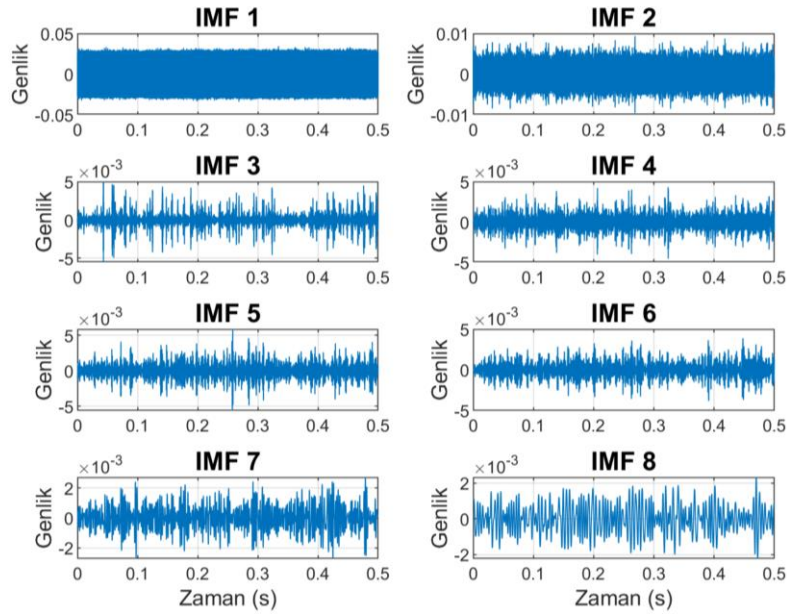
Şekil 4-7 Bir Polyester Numunesinde Delinmenin Aşamaları.

Şekil 4-7’de bozunumu tamamlanmış bir yalıtkan polyester numunenin ilerleme aşamaları görülmektedir. Şekil a’da numune eğik düzleme standartlarda belirtilen şekilde bağlanarak üzerinden kirletici sıvının akması sağlanmıştır. Şekil b’de kirletici sıvının yalıtkan üzerinde bir yol oluşturduğu görülmektedir. Şekil b-c ve d’de elektrik akımının bu iletken sıvı vasıtasıyla yalıtkan üzerinde ilk iletimlerini gerçekleştirdiği görülmektedir. Şekil e’de elektrik akımının artmasının ardından kısmi delinmelerin etkisiyle şekil f’de yalıtkan numune üzerinde ilk bozulmaların gerçekleşmeye başlaması görülmektedir. Şekil g’de iz oluşmuş numune görülmektedir. Şekil h’de bir katı yalıtkanın elektriksel delinmesinin öncül aşaması olarak nitelendirilen Kanal oluşumu belirginleşmektedir. Şekil i-j ve k’de ilerleyen kanal ile birlikte iletken hattın oluşumu takip edilebilmektedir. Şekil l’de ise yalıtkan üzerinden geçen akım sonucu yalıtkanın yanması için yeterli ısıya ulaşılması sonucu tam bir termik delinmenin gerçekleşmesi görülmektedir.

4.3. CEEMDAN METODU İLE KAÇAK AKIM ANALİZİ

Bu kısımda eğik düzlem deney düzeneğinde farklı frekans seviyelerinde (50 Hz, 6, 8, 10, 12 ve 14 kHz) katkılı ve katkısız katı yalıtkan malzeme örneklerine uygulanan yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyallerinden bir kesit, CEEMDAN yöntemiyle analiz edilmiştir. CEEMDAN yöntemi sayesinde sinyaller sekiz IMF bileşenine ayrılarak spektral içerikleri detaylı biçimde incelenmiştir. Her frekans seviyesi için katkılı ve katkısız durumlar ayrı ayrı analiz edilerek CEEMDAN yöntemi ile kaçak akım sinyalleri işlenmiştir. Elde edilen bulgular bu bölümde paylaşılmıştır.

4.3.1. 14 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi



Şekil 4-8 14 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-8 de katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 14 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.1’de bu grafiklerde gösterilen IMFlere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.1 14 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Rollof Hz
1	14001,17	12587,74	13999,17	4678,649	-0,6546	3,349315	16453,37
2	6000,5	5991,559	5960,497	2476,408	2,563813	16,63531	7516,626
3	6000,5	3501,358	3274,273	1741,71	2,874809	21,65795	4554,58
4	2002,167	2450,634	2268,189	1696,136	6,361756	63,31197	3260,272
5	1000,083	1539,835	1242,104	1958,956	7,274467	64,96034	1894,158
6	780,065	1049,299	754,0628	1961,509	7,851727	71,33119	1066,089
7	400,0333	530,5947	416,0347	1202,084	13,23106	199,9784	586,0488
8	182,0152	417,2675	202,0168	1633,729	9,918631	110,8057	308,0257

14 kHz frekansında katkılı yalıtkan malzeme örneği üzerinde CEEMDAN yöntemiyle yapılan analizlerde, IMF1 bileşeni 14001,17 Hz dominant frekans, 12587,74 Hz ortalama frekans, 13999,17 Hz medyan frekans ve 16453,37 Hz roll-off değeri ile yüksek frekans bölgesinde enerjik bir yoğunluk göstermektedir. Skewness -0,6546 ve kurtosis 3,35 gibi değerler sinyalin simetrik ve normal dağılıma yakın olduğunu göstermektedir.

IMF2 bileşeni 6000,5 Hz dominant frekansa, 5991,56 Hz ortalama frekansa ve 5960,49 Hz medyan frekansa sahiptir. Roll-off frekansı 7516,63 Hz olan bu bileşenin skewness ve kurtosis değerleri sırasıyla 2,56 ve 16,64 olup, ani sivrilikler içeren orta frekanslı enerji yayılımını işaret etmektedir.

IMF3 bileşeninde 6000,5 Hz dominant, 3501,36 Hz ortalama ve 3274,27 Hz medyan frekanslarla birlikte 4554,58 Hz roll-off gözlenmiştir. Skewness 2,87 ve kurtosis 21,7 ile sinyalin bu bileşeninde düzensizlikler belirgindir.

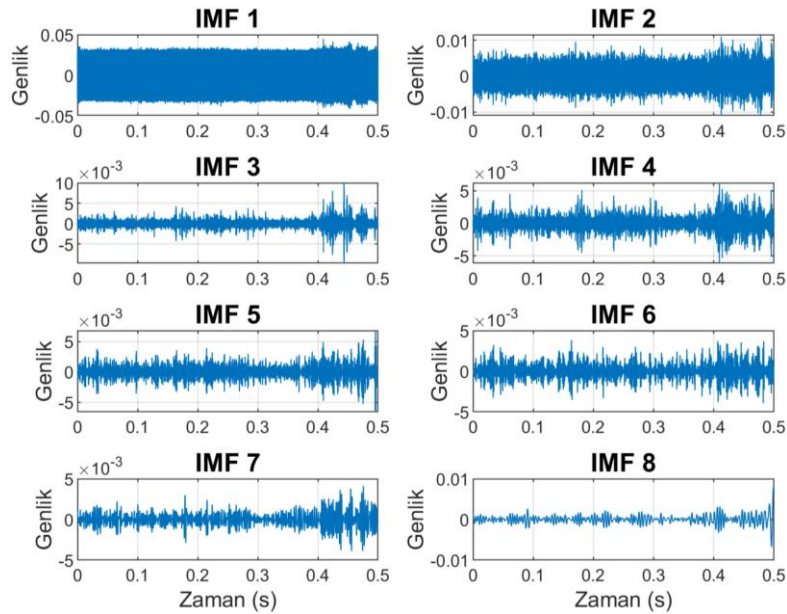
IMF4 bileşeni 2002,17 Hz'lik dominant frekans ve 2450,634 Hz ortalama frekans ile orta-alt bantta yer alır. Roll-off 3260,27 Hz olup, skewness 6,36 ve kurtosis 63,31 ile sivri ve dengesiz yapılar barındırır.

IMF5 bileşeni 1000,08 Hz dominant frekans, 1539,83 Hz ortalama frekans ve 1242,10 Hz medyan frekans değerleri ile daha düşük frekans bileşenidir. Skewness 7,27 ve kurtosis 64,96 ile oldukça sivri yapıdadır.

IMF6 bileşeni 780,07 Hz frekans civarında yoğunlaşmakta ve 1066,08 Hz roll-off değeri ile belirgin enerji içerir. Skewness 7,85 ve kurtosis 71,33 değerleri, bu bileşende yüksek enerjili ani boşalımları işaret eder.

IMF7 bileşeni 400,03 Hz dominant frekans, 530,59 Hz ortalama frekans ve 416,03 Hz medyan frekans ile daha alt bantlarda sivri yapılar göstermektedir. Skewness 13,23 ve kurtosis 199,98 gibi yüksek değerler sinyalin oldukça kaotik olduğunu göstermektedir.

IMF8 bileşeni ise 182,01 Hz dominant frekans, 417,27 Hz ortalama frekans ve 202,01 Hz medyan frekans ile çok düşük bantlarda yer almakta; skewness 9,91 ve kurtosis 110,81 ile ciddi ölçüde sivri ve bozulmuş bir yapıya sahiptir.



Şekil 4-9 14 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-9’da katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 14 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.2’de bu grafiklerde gösterilen IMF’lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.2 14 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Roloff Hz
1	14001,17	12353,06	13993,17	4564,698	-0,72227	3,259838	16007,33
2	6000,5	6045,591	5982,499	2437,032	2,484919	16,54361	7590,633
3	6000,5	3910,427	3632,303	1928,71	2,610488	19,61042	5572,464
4	3466,289	2601,958	2424,202	1580,831	6,052462	63,84842	3466,289
5	1734,145	1537,325	1394,116	1301,523	9,580984	127,6355	1988,166
6	798,065	907,4735	780,065	1243,481	12,05083	173,5109	1110,093
7	460,0383	799,713	430,0358	2177,749	7,246314	59,88894	626,0522
8	216,018	2167,979	238,0198	4697,33	2,828954	10,46322	4002,334

Katkısız numuneye 14 kHz frekanslı gerilim uygulandığında, IMF1 bileşeninin dominant frekansı 14001,17 Hz ve roll-off frekansı 16007,33 Hz olarak belirlenmiştir. Ortalama frekans değeri 12353,06 Hz, medyan frekans ise 13993,17 Hz'dir. Bu değerler, IMF1'in sinyalin üst frekans bandındaki baskın bileşeni olduğunu ortaya koymaktadır. Skewness değeri -0,72227 ve kurtosis 3,259838 olup, IMF1 bileşeninin simetrik ve normal dağılıma oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

IMF2 bileşeni 6000,5 Hz dominant frekansa, 6045,591 Hz ortalama frekansa ve 5982,499 Hz medyan frekansa sahiptir. 2437,032 Hz'lik standart sapma değeri ve 7590,633 Hz'lik roll-off değeri ile bu bileşen orta frekans bölgesinde geniş spektral yayılım göstermektedir. Skewness 2,484919 ve kurtosis 16,54361 gibi yüksek değerler, sinyalde ani, sivri uçlu enerji boşalımlarının bulunduğunu ortaya koymaktadır.

IMF3 bileşeninde dominant frekans 6000,5 Hz, ortalama frekans 3910,427 Hz ve medyan frekans 3632,303 Hz olarak ölçülmüştür. 1928,71 Hz'lik standart sapma ve 5572,464 Hz'lik roll-off değeri, IMF3'ün orta-alt frekans bölgesinde yoğunluk kazandığını ve enerji spektrumunun geniş bir bölgeye yayıldığını göstermektedir. Skewness değeri 2,610488 ve kurtosis 19,61042 olan bu IMF, oldukça sivri ve düzensiz yapıdaki sinyalleri temsil etmektedir.

IMF4 bileşeninde 3466,289 Hz dominant frekans, 2601,958 Hz ortalama frekans, 2424,202 Hz medyan frekans ve 1580,831 Hz standart sapma gözlenmiştir. Bu IMF'in roll-off frekansı 3466,289 Hz'dir. Skewness 6,052462 ve kurtosis 63,84842 olan bu bileşen, oldukça sivri ve ani değişimlerin yaşandığı, düzensiz sinyal yapısını temsil etmektedir.

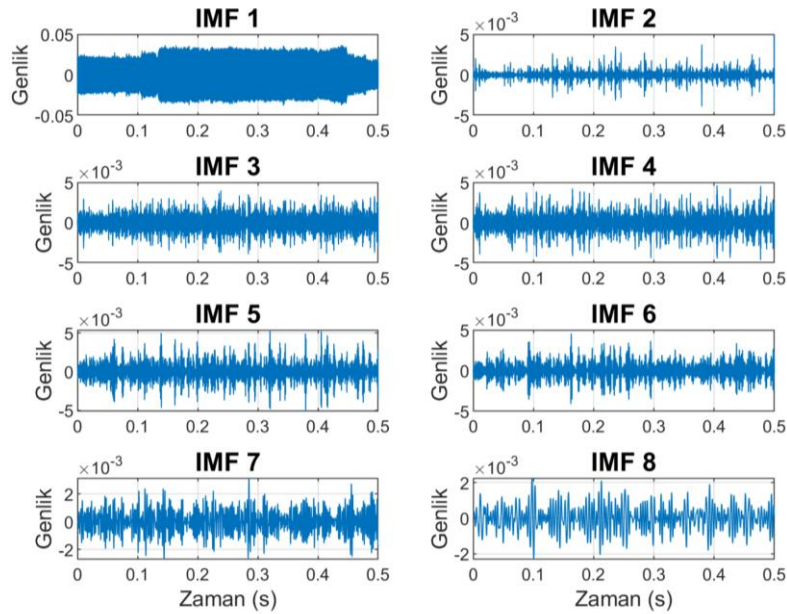
IMF5 bileşeninde 1734,145 Hz dominant frekans, 1537,325 Hz ortalama frekans ve 1394,116 Hz medyan frekans değerleri gözlenmiştir. Bu bileşende skewness 9,580984 ve kurtosis 127,6355 gibi oldukça yüksek değerler dikkat çekmektedir. Roll-off frekansı ise 1988,166 Hz'dir. Bu durum, sinyalde yüksek seviyede sivrilğe ve düzensizliğe işaret eder.

IMF6 bileşeni 798,065 Hz dominant frekans, 907,4735 Hz ortalama frekans ve 780,065 Hz medyan frekans değerine sahiptir. Bu IMF bileşeninde skewness 12,05083 ve kurtosis 173,5109 gibi uç değerler ölçülmüştür. Roll-off değeri 1110,093 Hz'dir. Bu, yüzeysel boşalımların çok ani ve sivri şekilde ortaya çıktığını gösterir.

IMF7 bileşeni 460,0383 Hz dominant frekans, 799,713 Hz ortalama frekans ve 430,0358 Hz medyan frekansa sahiptir. Skewness 7,246314 ve kurtosis 59,88894 gibi oldukça yüksek değerlere sahiptir. Roll-off frekansı 626,0522 Hz olarak belirlenmiştir. Bu durum sinyalde düzensiz boşalımların bulunduğunu gösterir.

IMF8 bileşeninde ise 216,018 Hz dominant frekans, 2167,979 Hz ortalama frekans ve 238,0198 Hz medyan frekans değerleri gözlenmiştir. Roll-off frekansı 4002,334 Hz olup skewness 2,828954 ve kurtosis 10,46322 değerleri ile IMF8 bileşeni de ani değişimlere duyarlılık göstermektedir.

4.3.2. 12 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi



Şekil 4-10 12 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-10'da katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 12 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.3'te bu grafiklerde gösterilen IMF'lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.3 12 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Rollof Hz
1	12001	11690,69	12001	4431,148	-0,04283	3,021993	16549,38
2	5138,428	5774,421	5234,436	3376,017	2,668094	12,18333	7156,596
3	4386,366	4205,173	4058,338	2041,234	3,480143	27,95151	5536,461
4	2400,2	2682,708	2410,201	1950,741	5,765343	49,44264	3500,292
5	984,082	1858,904	1330,111	2673,892	5,366714	34,7509	2044,17
6	788,0657	937,5701	764,0637	1443,687	10,44983	129,1912	1096,061
7	400,0333	1174,323	434,0362	3068,512	4,940419	28,61956	708,059
8	200,0167	429,7502	224,0187	1618,228	10,00572	112,7809	320,0267

Katkılı numuneye 12 kHz frekans uygulandığında IMF1 bileşeni 12001 Hz'lik dominant frekans, 11690,69 Hz ortalama frekans ve 12001 Hz medyan frekans değerleriyle, sinyalin büyük ölçüde yüksek frekans bandında yoğunlaştığını göstermektedir. Roll-off frekansı 16549,38 Hz olan bu IMF, yüksek frekans bileşenlerinin güçlü biçimde sinyale katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bileşende skewness -0,04283 gibi düşük bir değerde gerçekleşmiş ve sinyalin simetrik yapıda olduğunu, kurtosis değerinin ise 3,02 gibi normal dağılıma yakın bir seviyede olduğunu göstermektedir.

IMF2 bileşeninde 5138,43 Hz dominant frekans, 5774,42 Hz ortalama frekans, 5234,44 Hz medyan frekans ve 7156,60 Hz roll-off değeri ölçülmüştür. Standart sapma değeri 3376,02 Hz gibi oldukça yüksektir. Bu durum, IMF2'nin daha geniş bir frekans aralığına yayıldığını göstermektedir. Skewness 2,668 ve kurtosis 12,18 değerleri ise bu bileşende ani ve sivri sinyal yapılarının bulunduğunu ortaya koymaktadır.

IMF3 bileşeni ise 4386,37 Hz dominant frekansa, 4205,17 Hz ortalama frekansa ve 4058,34 Hz medyan frekansa sahiptir. 2041,23 Hz'lik standart sapma ile IMF3, orta frekans bölgesine karşılık gelmektedir. Skewness 3,48 ve kurtosis 27,95 gibi oldukça yüksek değerler ise bu IMF'in sivri uçlu, ani enerji boşalmalarını içerdiğini göstermektedir. Bu tablo, katkılı

yalıtkan numunenin 12 kHz altında dahi belirli düzeyde düzensiz deşarj sinyalleri ürettiğini; ancak bu düzensizliğin üst IMF'lerde daha az belirgin olduğunu göstermektedir.

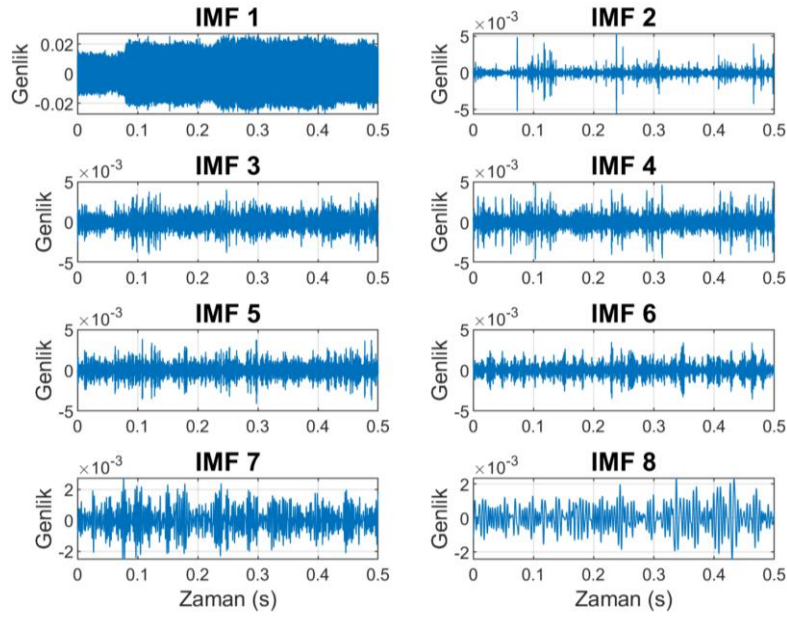
IMF4 bileşeninde 2400,2 Hz'lik dominant frekans, 2682,71 Hz ortalama frekans ve 2410,2 Hz medyan frekans değerleri yer almaktadır. Bu bileşende standart sapma 1950,74 Hz olup roll-off frekansı 3500,29 Hz'dir. Skewness 5,76 ve kurtosis 49,44 gibi oldukça yüksek değerlere sahip olan bu IMF, sinyalde orta-alt bantta yer alan sivri yapıları göstermektedir.

IMF5 bileşeninde dominant frekans 984,08 Hz, ortalama frekans 1858,90 Hz ve medyan frekans 1330,11 Hz olarak belirlenmiştir. Standart sapma 2673,89 Hz, roll-off 2044,17 Hz, skewness 5,37 ve kurtosis 34,75'tir. Bu değerler IMF5 bileşeninde yüzeysel boşalımların oldukça düzensiz ve ani şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

IMF6 bileşeni 788,07 Hz'lik dominant frekansa, 937,57 Hz ortalama frekansa ve 764,06 Hz medyan frekansa sahiptir. Standart sapma 1443,69 Hz, skewness 10,45 ve kurtosis 129,19'dur. Bu özellikler sinyalin sivri uçlu ve yüksek enerjili yapılar içerdiğini göstermektedir.

IMF7 bileşeni 400,03 Hz dominant frekans, 1174,32 Hz ortalama frekans, 434,04 Hz medyan frekans ve 3068,51 Hz standart sapma ile daha düşük bantlarda geniş spektral dağılıma sahiptir. Skewness 4,94 ve kurtosis 28,62 ile sinyaldeki ani ve düzensiz boşalımlar dikkat çekmektedir.

IMF8 bileşeninde ise 200,02 Hz'lik dominant frekans, 429,75 Hz ortalama frekans, 224,02 Hz medyan frekans, 1618,23 Hz standart sapma, 10,01 skewness ve 112,78 kurtosis değeri ölçülmüştür. Roll-off frekansı ise 320,02 Hz'dir. Bu değerler IMF8 bileşeninin oldukça düzensiz, sivri uçlu ve ani deşarjlar içerdiğini göstermektedir.



Şekil 4-11 12 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-11’de katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 12 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.4’te bu grafiklerde gösterilen IMF’lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.4 12 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Rollof Hz
1	12001	11788,52	12001	4659,688	-0,0589	2,610834	17241,44
2	6000,5	5552,797	5308,442	2557,919	2,620403	14,54643	6996,583
3	3452,288	4209,903	4146,346	1623,616	1,490752	14,82064	5672,473
4	3452,288	2569,602	2402,2	1575,635	5,566327	58,38346	3468,289
5	1726,144	1553,88	1406,117	1358,293	9,37777	119,7724	1992,166
6	722,0602	840,0585	780,065	788,9696	16,54317	372,215	1082,09
7	394,0328	1287,887	416,0347	3298,524	4,536598	24,36286	736,0613
8	180,015	1179,094	216,018	3439,28	4,344661	22,4868	544,0453

IMF1 bileşeni 12001 Hz dominant frekans, 11788,52 Hz ortalama frekans ve 12001 Hz medyan frekans değerleriyle yüksek frekans bölgesinde enerjinin yoğunlaştığını göstermektedir. 4659,69 Hz’lik standart sapma ve 17241,44 Hz roll-off frekans değeri bu IMF

bileşeninin güçlü ve kararlı yapıda olduğunu ortaya koymaktadır. Skewness -0,0589 ve kurtosis 2,61 gibi değerlere sahip olan sinyal, normal dağılıma oldukça yakındır.

IMF2 bileşeninde dominant frekans 6000,5 Hz, ortalama frekans 5552,80 Hz, medyan frekans 5308,44 Hz ve standart sapma 2557,92 Hz olarak ölçülmüştür. Roll-off değeri 6996,58 Hz'dir. Bu IMF bileşeni daha düşük enerji içeriğine sahip olsa da skewness 2,62 ve kurtosis 14,54 ile sinyalin ani sivrilikler içerdiğine işaret etmektedir.

IMF3 bileşeni 3452,29 Hz dominant frekans, 4209,90 Hz ortalama frekans, 4146,35 Hz medyan frekans, 1623,61 Hz standart sapma ve 5672,47 Hz roll-off değeri ile orta frekans bölgesinde kararlı ama sivri sinyaller üretmektedir. Skewness 1,49 ve kurtosis 14,82 değerleri sinyalin dengesiz ancak şiddetli deşarj karakteri taşıdığını göstermektedir.

IMF4 bileşeninde 3452,29 Hz'lik dominant frekans ile birlikte ortalama frekans 2569,60 Hz, medyan frekans 2402,20 Hz ve standart sapma 1575,64 Hz'dir. Skewness 5,56 ve kurtosis 58,38 ile bu IMF sinyallerinin ani enerji boşalımları içerdiği ve yüzeysel düzensizliklerin arttığını ortaya koymaktadır.

IMF5 bileşeni 1726,14 Hz dominant frekansa, 1553,88 Hz ortalama frekansa ve 1406,12 Hz medyan frekansa sahiptir. 1358,29 Hz'lik standart sapma ve 1992,17 Hz'lik roll-off değeri, yüzeysel ve orta frekans yapılı boşalımların bulunduğunu gösterir. Skewness 9,38 ve kurtosis 119,77 gibi çok yüksek değerler bu IMF'in oldukça sivri, kaotik ve ani boşalımlar içerdiğini kanıtlamaktadır.

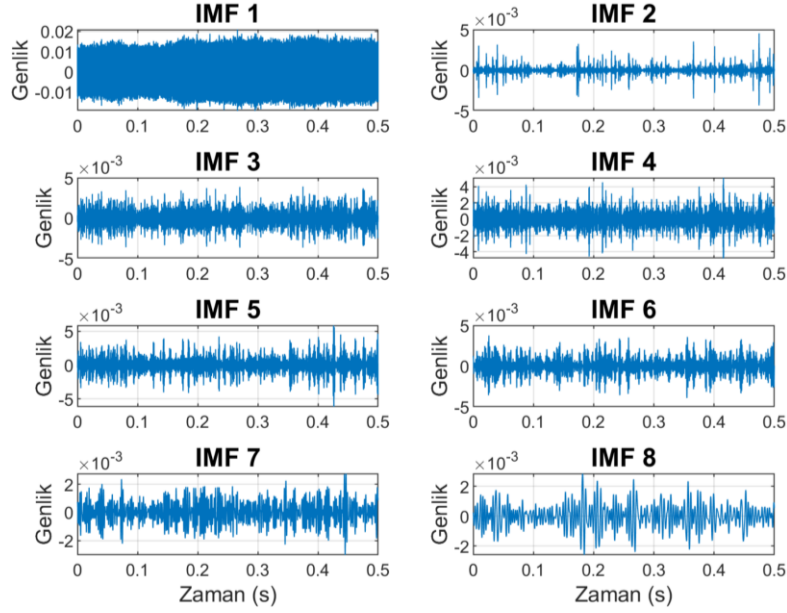
IMF6 bileşeni 722,06 Hz dominant frekansa, 840,06 Hz ortalama frekansa ve 780,07 Hz medyan frekansa sahiptir. Skewness 16,54 ve kurtosis 372,21 değerleri bu IMF bileşeninin en sivri uçlu, en ani deşarjları içerdiğini göstermektedir. Bu değerler, katkısız yalıtkan numunede 12 kHz frekans altında yüzeysel boşalımların aşırı şekilde arttığını işaret etmektedir.

IMF7 bileşeni 394,03 Hz dominant frekans, 1287,89 Hz ortalama frekans ve 416,03 Hz medyan frekans ile geniş dağılımlı, düşük frekanslı ama enerjik bileşenlerdendir. Standart sapma 3298,52 Hz ve roll-off frekansı 736,06 Hz'dir. Skewness 4,53 ve kurtosis 24,36 gibi değerler, belirli düzeyde düzensizliği işaret etmektedir.

IMF8 bileşeninde ise 180,02 Hz'lik dominant frekans, 1179,09 Hz ortalama frekans, 216,02 Hz medyan frekans, 3439,28 Hz standart sapma, 4,34 skewness ve 22,48 kurtosis değeri

yer almaktadır. Bu IMF bileşeni de düşük frekanslarda enerji taşıyan ve düzensiz yapılar içeren sinyalleri temsil etmektedir. Roll-off değeri ise 544,05 Hz olarak görülmektedir.

4.3.3. 10 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi



Şekil 4-12 10 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-12’de katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 10 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.5’te bu grafiklerde gösterilen IMF’lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.5 10 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Rollof Hz
1	10000,83	10550,34	10000,83	5320,635	0,112428	2,365144	17085,42
2	5860,488	5371,828	4880,407	2713,294	2,686632	13,59805	6584,549
3	4398,367	3938,201	3918,327	1585,53	2,182754	22,96266	5238,437
4	2002,167	2580,041	2398,2	1576,386	5,816109	60,92033	3422,285
5	1200,1	1864,074	1304,109	2742,561	5,254574	33,19417	2020,168
6	750,0625	1029,71	760,0633	1875,603	8,207756	78,07232	1100,092
7	400,0333	523,9024	422,0352	1102,96	14,35153	236,3666	598,0498
8	200,0167	423,0937	208,0173	1639,072	9,891744	110,1334	314,0262

IMF1 bileşeni, 10000,83 Hz'lik dominant frekans, 10550,34 Hz ortalama frekans ve 10000,83 Hz medyan frekans değerleriyle üst frekans bölgesinde oldukça dengeli bir sinyal sunmaktadır. 5320,63 Hz'lik standart sapma, enerjinin bu bölgede güçlü şekilde yoğunlaştığını; 17085,42 Hz'lik roll-off değeri ise üst bantta önemli spektral enerji taşındığını göstermektedir. Skewness değeri 0,11 ile pozitif yönde düşük asimetri; kurtosis ise 2,36 ile neredeyse normal dağılıma yakın bir enerji profili sunmaktadır.

IMF2 bileşeni, 5860,49 Hz'lik dominant frekans ve 5371,83 Hz'lik ortalama frekans ile orta-yüksek frekans bileşenidir. Standart sapma 2713,29 Hz, roll-off ise 6584,55 Hz'dir. Skewness 2,68 ve kurtosis 13,60 ile sinyalde ani artışlar ve sivriliklerin başladığını göstermektedir.

IMF3 bileşeni 4398,37 Hz dominant frekans, 3938,20 Hz ortalama frekans ve 1585,53 Hz standart sapma ile orta frekans aralığında enerjinin belirli bir yoğunlukla bulunduğunu ortaya koymaktadır. Skewness 2,18 ve kurtosis 22,96 ile sinyalin daha kaotik bir yapıya bürünmeye başladığı görülmektedir.

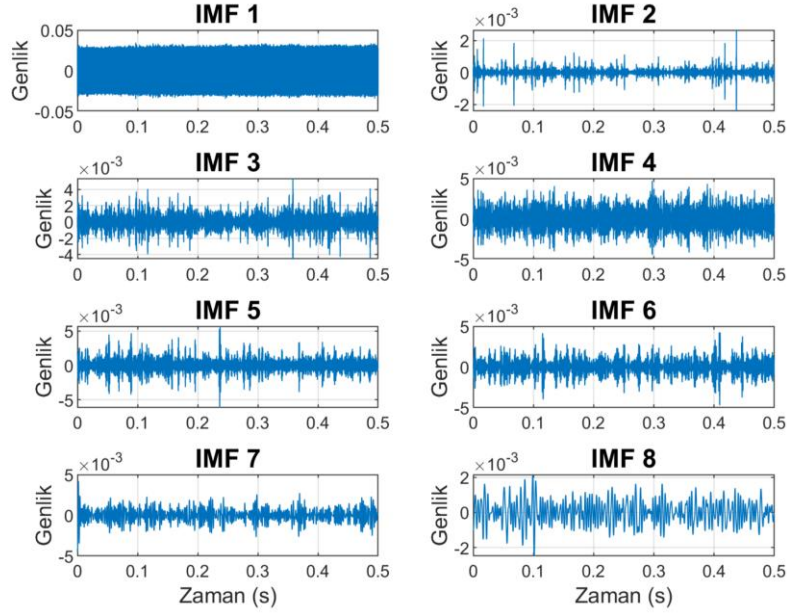
IMF4 bileşeni 2002,17 Hz'lik dominant frekans, 2580,04 Hz ortalama frekans, 2398,2 Hz medyan frekans ve 1576,39 Hz standart sapma ile orta frekans bölgesinde yüzeysel boşalım karakteri taşımaktadır. Skewness 5,82 ve kurtosis 60,92 değeri, deşarjın düzensiz ve keskin tepkimelere dönüştüğünü ortaya koymaktadır. Roll-off frekansı 3422,29 Hz'dir.

IMF5 bileşeninde 1200,1 Hz dominant frekans, 1864,07 Hz ortalama frekans, 1304,11 Hz medyan frekans, 2742,56 Hz standart sapma ve 2020,17 Hz roll-off frekansı mevcuttur. Skewness 5,25 ve kurtosis 34,19 değeri sinyalin yüzeysel deşarj bölgelerinde keskin karaktere sahip olduğunu göstermektedir.

IMF6 bileşeni 750,06 Hz dominant frekansa, 1029,71 Hz ortalama frekansa ve 760,06 Hz medyan frekansa sahiptir. Skewness 8,20 ve kurtosis 78,07 ile oldukça sivri, ani boşalımları gösterir. 1875,6 Hz standart sapma ve 1100,09 Hz roll-off değeri mevcuttur.

IMF7 bileşeni 400,03 Hz dominant frekans, 523,90 Hz ortalama frekans, 422,04 Hz medyan frekans, 1102,96 Hz standart sapma ve 598,05 Hz roll-off frekansı ile düşük frekanslarda ama yüksek sivrilikte deşarj karakteri sunar. Skewness 14,35 ve kurtosis 236,37 gibi çok yüksek değerler gözlemlenmiştir.

IMF8 bileşeni ise 200,02 Hz dominant frekans, 423,09 Hz ortalama frekans, 208,01 Hz medyan frekans ve 1639,07 Hz standart sapmaya sahiptir. Roll-off 314,03 Hz, skewness 9,89 ve kurtosis 110,13'tür. Bu değerler, yüzeydeki yalıtım zayıflığına işaret eden yüksek yoğunluklu ani boşalımları temsil etmektedir.



Şekil 4-13 10 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-13'te katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 10 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.6'da bu grafiklerde gösterilen IMF'lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.6 10 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Roloff Hz
1	10000,83	10234,14	10000,83	4922,003	0,178388	2,780838	16025,34
2	4500,375	5153,77	4636,386	2974,993	2,651355	12,8564	6494,541
3	4000,333	3687,493	3622,302	1646,082	2,940145	29,66234	4982,415
4	2000,167	2449,711	2234,186	1601,006	6,085082	63,47443	3308,276
5	2000,167	1630,538	1252,104	2239,7	6,43826	50,17008	1972,164
6	590,0492	946,6956	736,0613	1641,903	9,372885	102,1508	1066,089
7	300,025	1959,322	434,0362	4269,317	3,238534	13,19304	2590,216
8	200,0167	930,9481	214,0178	3004,739	5,109997	30,5059	368,0307

IMF1 bileşeni, 10000,83 Hz'lik dominant frekans, 10234,14 Hz ortalama frekans ve 10000,83 Hz medyan frekans ile yüksek frekans bölgesinde yer almaktadır. 4922,003 Hz'lik standart sapma, sinyalin üst frekanslarda oldukça yaygınlaştığını göstermektedir. Roll-off frekansı 16025,34 Hz ile dikkat çekici düzeydedir. Skewness 0,17 ve kurtosis 2,78 olması, bu bileşenin simetriye yakın ve nispeten düzgün bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

IMF2 bileşeni, 4500,38 Hz dominant frekans, 5153,77 Hz ortalama frekans, 4636,39 Hz medyan frekans ve 2974,99 Hz standart sapma ile orta frekans bölgesinde geniş dağılımlı bir yapı göstermektedir. Roll-off 6494,54 Hz'dir. Skewness 2,65 ve kurtosis 12,86 gibi değerler, sinyalin belirgin şekilde sivrileştiğini ve yüksek enerjili ani boşalmalara işaret ettiğini göstermektedir.

IMF3 bileşeninde 4000,33 Hz dominant frekans, 3687,49 Hz ortalama frekans, 3622,30 Hz medyan frekans ve 1646,08 Hz standart sapma yer almaktadır. Bu değerler sinyalin orta frekans bölgesine kaydığını ve daha kompakt bir yapıya geçtiğini göstermektedir. Skewness 2,94 ve kurtosis 29,66, sinyalin daha ani, şiddetli sivrilikler içerdiğini göstermektedir. Roll-off ise 4982,42 Hz'dir.

IMF4 bileşeni 2000,17 Hz dominant frekans, 2449,71 Hz ortalama frekans, 2234,19 Hz medyan frekans, 1601,01 Hz standart sapma ve 3308,28 Hz roll-off değeri ile yüzeysel deşarj bölgesine yaklaşmaktadır. Skewness 6,08 ve kurtosis 63,47 gibi oldukça yüksek değerler, deşarjların yoğun, ani ve düzensiz biçimde oluştuğunu göstermektedir.

IMF5 bileşeni 2000,17 Hz dominant frekans ve 1630,54 Hz ortalama frekans ile IMF4'ün benzeri bir deşarj bölgesine işaret eder. Medyan frekans 1252,10 Hz ve standart sapma 2239,7 Hz'dir. Roll-off 1972,16 Hz olup; skewness 6,43 ve kurtosis 50,17 gibi çarpıcı değerlerle ani sivriliklerin ve keskin darbelerin yoğunluğunu ortaya koymaktadır.

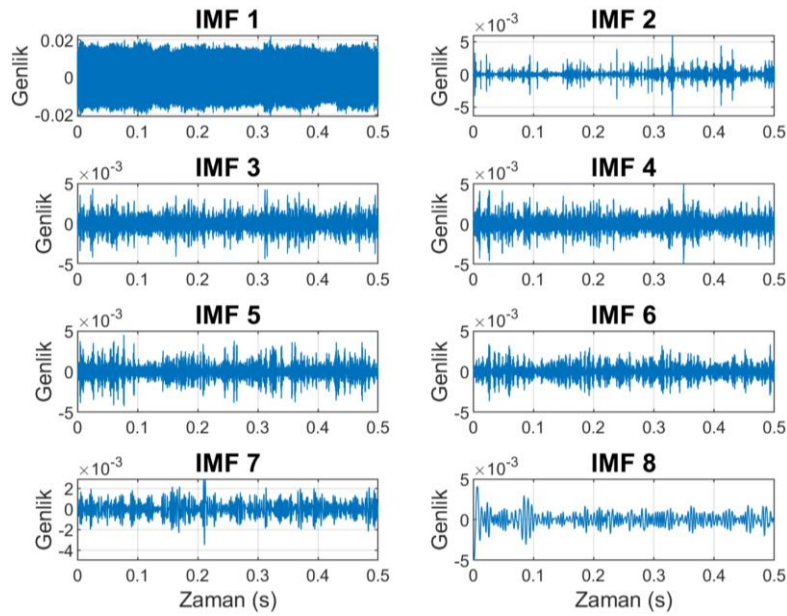
IMF6 bileşeni, 590,05 Hz dominant frekans, 946,70 Hz ortalama frekans ve 736,06 Hz medyan frekans ile düşük frekans bölgesine geçişi temsil etmektedir. 1641,90 Hz standart sapma ve 1066,09 Hz roll-off frekansına sahiptir. Skewness 9,37 ve kurtosis 102,15 gibi değerlerle oldukça ani ve şiddetli boşalmaların varlığına işaret etmektedir.

IMF7 bileşeni 300,03 Hz'lik dominant frekans, 1959,32 Hz ortalama frekans, 434,04 Hz medyan frekans ve 4269,32 Hz gibi oldukça yüksek standart sapma değeri ile dikkat çeker.

Bu değerler, sinyalin geniş frekans aralığında salındığını ve yüzeysel deşarj karakteristiğini taşıdığını ortaya koymaktadır. Skewness 3,24 ve kurtosis 13,19'dur. Roll-off değeri ise 2590,22 Hz'dir.

IMF8 bileşeni ise 200,02 Hz dominant frekans, 930,95 Hz ortalama frekans ve 214,02 Hz medyan frekansa sahiptir. 3004,74 Hz'lik yüksek standart sapma ile oldukça geniş spektral dağılım göstermektedir. Roll-off 368,03 Hz, skewness 5,11 ve kurtosis 30,51 gibi değerlerle yüzeydeki düzensiz, sivri boşalımları temsil etmektedir.

4.3.4. 8 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi



Şekil 4-14 8 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-14'te katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 8 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.7'de bu grafiklerde gösterilen IMF'lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.7 8 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Roloff Hz
1	8000,667	9895,065	8152,679	5304,897	0,338925	2,358351	16561,38
2	8000,667	6391,122	5998,5	3101,507	1,658086	8,632723	8832,736
3	4048,337	3978,037	3864,322	1648,783	2,300352	20,80969	5200,433
4	2400,2	2477,889	2346,196	1254,136	4,475816	55,033	3408,284
5	1000,083	1453,221	1300,108	1357,307	9,432623	121,3358	1920,16
6	690,0575	860,9766	768,064	1060,237	13,69794	231,4766	1074,09
7	400,0333	532,6136	402,0335	1269,695	12,54642	179,4638	576,048
8	164,0137	1835,711	212,0177	4365,817	3,164395	12,68582	2712,226

IMF1 bileşeni, 8000,67 Hz'lik dominant frekans, 9895,07 Hz ortalama frekans ve 8152,68 Hz medyan frekans ile üst frekans bölgesine aittir. 5304,90 Hz gibi oldukça yüksek standart sapma değeri, sinyalin geniş frekans aralığında dağıldığını göstermektedir. Roll-off 16561,38 Hz ile spektral enerjinin üst bantlara yayıldığını ifade eder. Skewness 0,33 ve kurtosis 2,36 ile bu bileşen, simetrik yapıya yakın, kararlı bir enerji yapısı sunmaktadır.

IMF2 bileşeni de yine 8000,67 Hz dominant frekansa sahiptir; ancak ortalama frekans 6391,12 Hz'ye düşmüş, medyan frekans ise 5998,5 Hz olarak gerçekleşmiştir. 3101,51 Hz standart sapma ve 8832,74 Hz roll-off değeri ile IMF1'e göre daha kompakt ama yine de yüksek enerjili bir yapıdadır. Skewness 1,65 ve kurtosis 8,63 değerleri, sinyalde hafif asimetri ve belirgin sivrilikler olduğunu göstermektedir.

IMF3 bileşeninde 4048,34 Hz'lik dominant frekans, 3978,04 Hz ortalama frekans ve 3864,33 Hz medyan frekans gözlemlenmiştir. 1648,78 Hz standart sapma ile orta frekans bölgesine geçiş başlamıştır. Roll-off 5200,43 Hz'dir. Skewness 2,30 ve kurtosis 20,81 değeri, sinyalin daha sivri ve ani boşalmalara dönüştüğünü gösterir.

IMF4 bileşeni 2400,2 Hz dominant frekans, 2477,89 Hz ortalama frekans, 2346,20 Hz medyan frekans, 1254,14 Hz standart sapma ve 3408,28 Hz roll-off değeriyle yüzeysel boşalım karakterine sahip orta-alt frekans bir bileşendir. Skewness 4,48 ve kurtosis 55,03 ile belirgin sivrilikler ve düzensiz enerji yoğunlukları görülmektedir.

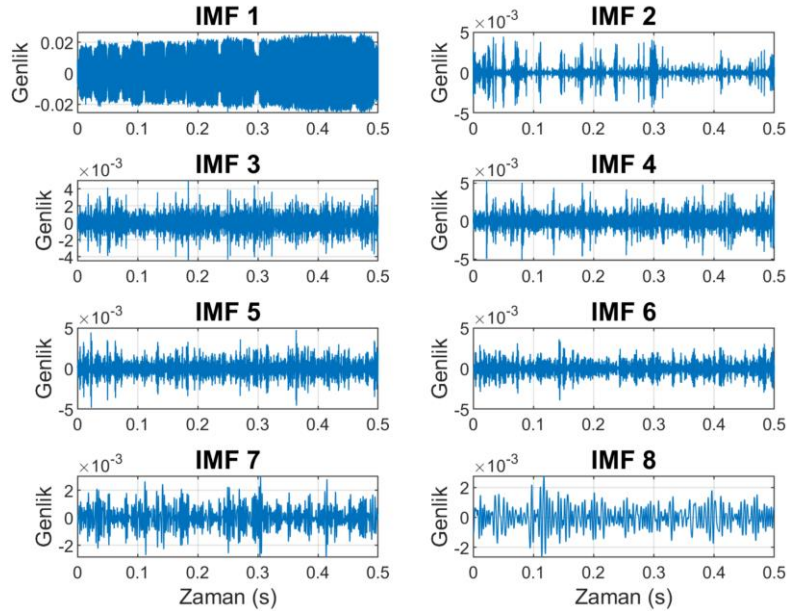
IMF5 bileşeninde 1000,08 Hz dominant frekans, 1453,22 Hz ortalama frekans ve 1300,11 Hz medyan frekans ile düşük frekans bölgesine iniş başlamaktadır. Standart sapma

1357,31 Hz ve roll-off 1920,16 Hz'dir. Skewness 9,43 ve kurtosis 121,34 değeri sinyalin yüzeyde yoğun, ani boşalımalar taşıdığını ortaya koyar.

IMF6 bileşeni 690,06 Hz'lik dominant frekans, 860,98 Hz ortalama frekans, 768,06 Hz medyan frekans ve 1060,24 Hz standart sapma ile çok düşük frekanslarda geniş bir dağılıma sahiptir. Skewness 13,69 ve kurtosis 231,47 değeri, sinyalin aşırı sivri, çok yoğun deşarj darbeleri içerdiğini göstermektedir. Roll-off 1074,09 Hz'dir.

IMF7 bileşeni 400,03 Hz'lik dominant frekans, 532,61 Hz ortalama frekans, 402,03 Hz medyan frekans, 1269,70 Hz standart sapma ve 576,05 Hz roll-off değeriyle düşük frekanslı, enerjisi yayılmış bir bileşendir. Skewness 12,55 ve kurtosis 179,46 değerleri ile aşırı sivrilemiş, düzensiz boşalımların temsilcisidir.

IMF8 bileşeni 164,01 Hz'lik dominant frekans, 1835,71 Hz ortalama frekans ve 212,02 Hz medyan frekans ile çok düşük frekanslı, ani sıçramaların bulunduğu bir bileşendir. 4365,82 Hz'lik oldukça yüksek standart sapma ve 2712,23 Hz roll-off değeri, enerjinin alt bantlara da yayıldığını ortaya koymaktadır. Skewness 3,16 ve kurtosis 12,69 ile daha simetrik ama hala sivri yapıda bir sinyal sunmaktadır.



Şekil 4-15 8 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-15'te katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 8 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.8'de bu grafiklerde gösterilen IMF'lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.8 8 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Rollof Hz
1	8000,667	9735,756	8064,672	5231,568	0,396317	2,46882	16319,36
2	8000,667	6764,725	6922,577	2948,26	1,539875	9,188381	8618,718
3	4100,342	4020,401	3900,325	1819,531	3,059794	26,28779	5254,438
4	1870,156	2692,84	2300,192	2340,856	5,244082	37,66618	3452,288
5	1500,125	1711,354	1358,113	2232,436	6,427635	50,09376	1984,165
6	740,0617	862,9486	746,0622	1142,283	12,81694	200,6004	1074,09
7	384,032	463,1842	406,0338	794,5471	19,42806	444,6271	570,0475
8	200,0167	1151,926	210,0175	3401,723	4,405277	23,07209	486,0405

IMF1 bileşeni, 8000,67 Hz'lik dominant frekans, 9735,76 Hz ortalama frekans ve 8064,67 Hz medyan frekans ile üst frekans bandında enerji taşıyan bir bileşendir. 5231,57 Hz'lik yüksek standart sapma, sinyalin geniş frekans spektrumuna yayıldığını gösterirken; 16319,36 Hz'lik roll-off değeri, üst bantlara taşınan enerji varlığını teyit eder. Skewness değeri 0,39 ile pozitif yönde düşük asimetri, kurtosis değeri ise 2,46 ile normal dağılıma yakın bir yapı sergilediğini gösterir.

IMF2 bileşeni, yine 8000,67 Hz'lik dominant frekansa sahip olmakla birlikte, ortalama frekans 6764,73 Hz'ye, medyan frekans ise 6922,57 Hz'ye düşmüştür. Bu bileşen, 2948,26 Hz'lik standart sapma ile daha dar bir frekans aralığına dağılmıştır. 8618,72 Hz roll-off frekansı ile orta-yüksek enerji taşıdığı görülmektedir. Skewness 1,54 ve kurtosis 9,18 ile bu bileşen, daha sivri ve asimetrik bir enerji yapısına işaret eder.

IMF3 bileşeni 4100,34 Hz dominant frekansa, 4020,40 Hz ortalama frekansa ve 3900,32 Hz medyan frekansa sahiptir. Standart sapma 1819,53 Hz, roll-off ise 5254,43 Hz'dir. Skewness 3,06 ve kurtosis 26,28 ile sinyalin yüksek sivrilik ve darbe içerdiğini göstermektedir. Bu bileşen, orta frekans bölgesinde, elektriksel boşalımların enerjisini taşıyan kritik bir IMF yapısıdır.

IMF4 bileşeninde dominant frekans 1870,16 Hz, ortalama frekans 2692,84 Hz, medyan frekans ise 2300,19 Hz'dir. 2340,86 Hz'lik standart sapma ve 3452,29 Hz roll-off değeri, yüzeysel deşarj karakteristiğini ortaya koymaktadır. Skewness 5,24 ve kurtosis 37,66 ile sinyalin düzensiz, sivrilik içeren yapıya büründüğü anlaşılmaktadır.

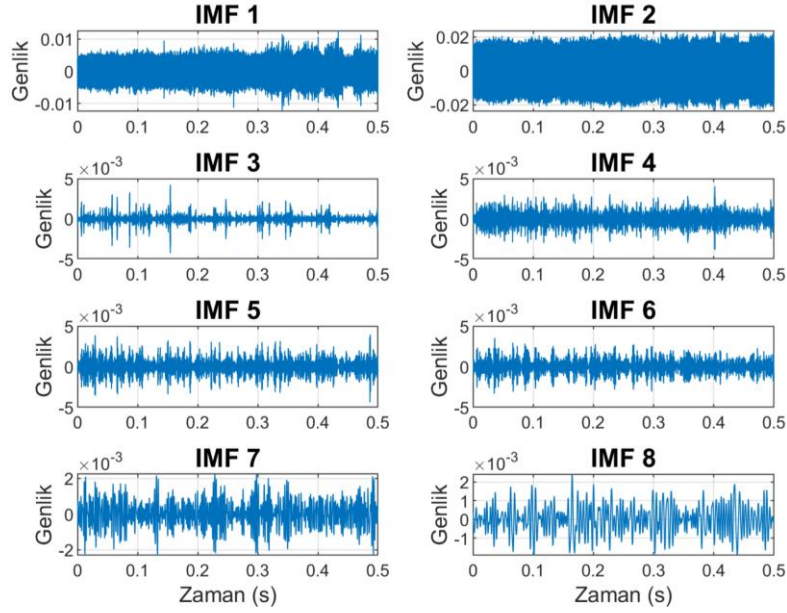
IMF5 bileşeninde 1500,13 Hz dominant frekans, 1711,35 Hz ortalama frekans ve 1358,11 Hz medyan frekans değerleri ile birlikte 2232,45 Hz'lik yüksek standart sapma gözlemlenmiştir. Roll-off frekansı 1984,17 Hz'dir. Skewness 6,43 ve kurtosis 50,09 gibi yüksek değerler, yüzeydeki boşalımların ani, yoğun ve düzensiz olduğunu gösterir.

IMF6 bileşeni 740,06 Hz'lik dominant frekans, 862,95 Hz ortalama frekans, 746,06 Hz medyan frekans ve 1142,28 Hz standart sapma ile düşük frekanslarda ani boşalım karakteri sunmaktadır. Skewness 12,82 ve kurtosis 200,60 değerleri, sinyalde çok yüksek sivrilikler, ani pikler ve kaotik yapı olduğunu kanıtlamaktadır. Roll-off 1074,09 Hz'dir.

IMF7 bileşeninde 384,03 Hz dominant frekans, 463,18 Hz ortalama frekans, 406,03 Hz medyan frekans, 794,55 Hz standart sapma ve 570,05 Hz roll-off değeri görülmektedir. Skewness değeri 19,43 ve kurtosis 444,63 ile bu bileşen, çok keskin, yoğun, yüzey arızasıyla ilişkili sinyaller taşımaktadır.

IMF8 bileşeni ise 200,02 Hz dominant frekans, 1151,93 Hz ortalama frekans, 210,01 Hz medyan frekans ve 3401,72 Hz standart sapma gibi değerlere sahiptir. Roll-off frekansı 486,05 Hz'dir. Skewness 4,41 ve kurtosis 23,07 ile bu IMF bileşeni, düşük frekanslı ancak zamanla yayılan yüksek enerjili boşalım örüntülerini temsil etmektedir.

4.3.5. 6 kHz Frekansında CEEMDAN Analizi



Şekil 4-16 6 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-16’da katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 6 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.9’da bu grafiklerde gösterilen IMF’lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.9 6 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Rolof Hz
1	6000,5	12228,2	13047,09	5781,23	-0,15213	1,702757	18363,53
2	6000,5	6624,208	6000,5	3439,336	1,211075	6,382548	9858,822
3	3000,25	3374,675	3008,251	2087,07	4,371027	31,66537	4082,34
4	2500,208	2427,95	2266,189	1632,818	6,893445	71,72618	3156,263
5	984,082	1458,564	1282,107	1427,418	9,28588	113,6884	1894,158
6	600,05	1382,578	758,0632	2862,656	5,259053	32,3854	1164,097
7	402,0335	579,1935	402,0335	1470,561	10,86635	134,019	584,0487
8	200,0167	445,1936	198,0165	1784,007	9,051438	92,50599	304,0253

IMF1 bileşeni, 6000,5 Hz’lik dominant frekansa ve 12228,2 Hz gibi oldukça yüksek bir ortalama frekansa sahiptir. Medyan frekans değeri 13047,09 Hz ile sinyalin üst frekanslarda yoğunlaştığını göstermektedir. 5781,23 Hz’lik oldukça yüksek standart sapma değeri, bu

bileşenin geniş bir spektrumda enerji içerdiğini kanıtlamaktadır. Spektral roll-off değeri de 18363,53 Hz ile bu gözlemi desteklemektedir. Skewness değeri -0,15 olup sinyalin hafifçe negatif asimetri gösterdiğini ve dolayısıyla enerjinin üst frekanslara biraz daha fazla eğilimli olduğunu göstermektedir. Kurtosis ise 1,70 ile normal dağılıma oldukça yakındır. Bu bileşen, CEEMDAN ayrıştırmasında yüksek frekanslı taşıyıcı bileşeni temsil etmektedir ve sistemin uygulanan frekansa tepkisini net şekilde yansıtmaktadır.

IMF2 bileşeni de 6000,5 Hz'lik dominant frekansa sahiptir, ancak ortalama frekansı 6624,2 Hz ve medyanı 6000,5 Hz olarak belirlenmiştir. Standart sapma 3439,34 Hz olup, önceki bileşene kıyasla daha dar bir frekans bandı göstermektedir. Spektral roll-off 9858,82 Hz olup orta-yüksek bantlarda spektral enerji taşımaktadır. Skewness 1,21 ile pozitif yönlü hafif bir asimetri; kurtosis 6,38 ile sinyalin daha sivri bir enerji yapısı sunduğunu göstermektedir. Bu bileşen, temel taşıyıcı sinyale yakın ancak daha düzensiz boşalım etkilerini temsil edebilir.

IMF3 bileşeni 3000,25 Hz dominant frekansa ve 3374,68 Hz ortalama frekansa sahiptir. Medyan frekans 3008,25 Hz olup sinyal yoğunluğunun orta-alt frekanslarda bulunduğunu işaret etmektedir. 2087,07 Hz'lik standart sapma ile enerji dağılımı geniştir. Roll-off frekansı 4082,34 Hz olarak belirlenmiştir. Skewness değeri 4,37 ve kurtosis değeri 31,67 olan bu bileşen, yüzeydeki düzensiz deşarj tepkimelerinin karakteristiklerini taşımaktadır.

IMF4 bileşeni, 2500,21 Hz'lik dominant ve 2427,95 Hz'lik ortalama frekansa sahiptir. Medyan frekans değeri 2266,19 Hz ile ortalama değerden biraz altında kalsa da, geniş dağılım karakteri göstermektedir. Standart sapma 1632,82 Hz ve roll-off 3156,26 Hz olarak ölçülmüştür. Spektral skewness değeri 6,89 ile oldukça pozitif ve bu durum ani tepkilerin varlığını göstermektedir. Kurtosis 71,73 ile sinyalin sivri ve yoğun darbe içeren bir yapı sergilediğini kanıtlamaktadır.

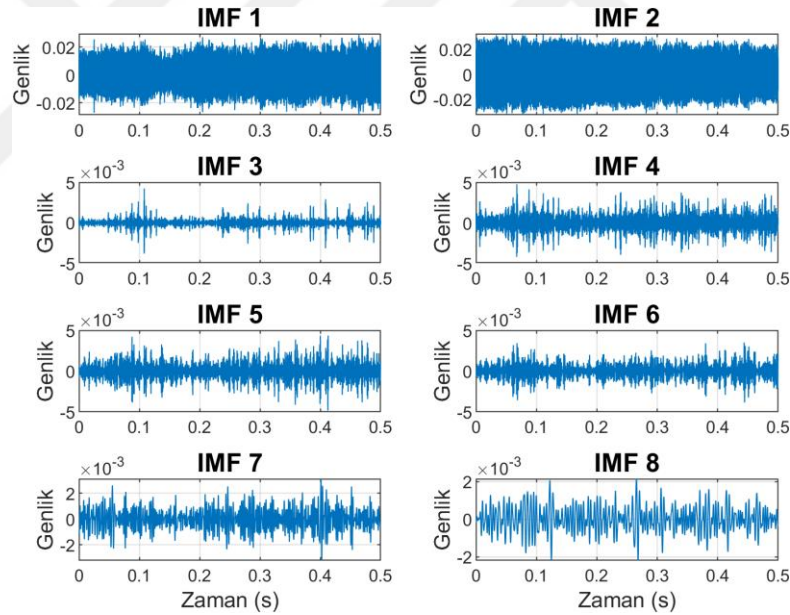
IMF5 bileşeninde 984,08 Hz'lik dominant frekans, 1458,56 Hz ortalama frekans ve 1282,11 Hz medyan frekans bulunmaktadır. 1427,42 Hz'lik standart sapma, sinyalin belirgin frekans dağılımına sahip olduğunu ve yüzeydeki geçici boşalım etkilerinin yaygın olduğunu göstermektedir. Roll-off frekansı 1894,16 Hz ile orta-alt seviyelerdedir. Skewness değeri 9,29 ve kurtosis değeri 113,69 ile sinyalin yüksek sivrilik ve düzensizlik içerdiğini göstermektedir.

IMF6 bileşeni 600,05 Hz dominant frekansa ve 1382,58 Hz ortalama frekansa sahiptir. Medyan frekans 758,06 Hz ve standart sapma 2862,66 Hz ile oldukça yaygın bir dağılım

göstermektedir. Skewness 5,26 ve kurtosis 32,38 değerleri sinyalin güçlü biçimde sivrildiğini ve düşük frekanslarda önemli miktarda deşarj tepkisi içerdiğini gösterir. Roll-off 1164,10 Hz olarak tespit edilmiştir.

IMF7 bileşeni 402,03 Hz'lik dominant frekansa, 579,19 Hz ortalama frekansa ve 402,03 Hz medyan frekansa sahiptir. 1470,56 Hz standart sapma ile sinyal geniş bir alana yayılmıştır. Skewness değeri 10,87 ve kurtosis değeri 134,02 gibi çok yüksek seviyelerde olup, yüksek asimetri ve sivrilğe işaret etmektedir. Roll-off frekansı ise 584,05 Hz'dir.

IMF8 bileşeninde 200,02 Hz dominant frekans, 445,19 Hz ortalama frekans ve 198,02 Hz medyan frekans değeri gözlemlenmiştir. 1784,01 Hz'lik standart sapma, geniş bir spektral dağılıma işaret etmektedir. Skewness 9,05 ve kurtosis 92,51 gibi oldukça yüksek değerlere sahiptir. Bu bileşen, yüzeydeki kararsız boşalım etkinliklerinin düşük frekanslı uzantılarını temsil etmektedir.



Şekil 4-17 6 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-17'de katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 6 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.10'da bu grafiklerde gösterilen IMF'lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.10 6 kHz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Rollof Hz
1	6000,50	9769,97	6966,58	5582,50	0,53	1,99	17761,48
2	6000,50	6332,79	6000,50	2906,65	1,86	9,76	8126,68
3	2400,20	3322,09	2982,25	1874,14	3,76	28,15	4180,35
4	2500,21	2280,09	2246,19	984,81	3,44	51,87	3096,26
5	1000,08	1443,65	1288,11	1379,31	9,48	120,11	1892,16
6	660,06	1422,75	774,06	2908,76	5,16	31,21	1180,10
7	298,02	646,77	394,03	1801,28	8,85	88,95	578,05
8	200,02	373,72	210,02	1421,27	11,45	147,22	314,03

IMF1 bileşeni, 6000,50 Hz'lik dominant frekansla hedeflenen giriş frekansının aynısını yansıtmaktadır. Bu bileşen, 9769,97 Hz'lik ortalama frekans ve 6966,58 Hz'lik medyan frekans ile geniş bir frekans spektrumuna yayılmıştır. 5582,50 Hz'lik yüksek standart sapma ve 17761,48 Hz'lik roll-off değeri, bu IMF bileşeninde enerjinin yüksek frekans bileşenlerinde yoğunlaştığını ve giriş sinyalinin CEEMDAN tarafından başarılı şekilde ayrıştırıldığını göstermektedir. Skewness değeri 0,53 ile oldukça düşük düzeyde bir asimetriye işaret ederken, kurtosisin 1,99 gibi düşük bir değere sahip olması sinyalin neredeyse normal dağılıma sahip olduğunu ve aşırı sivrilik barındırmadığını göstermektedir.

IMF2 bileşeni de yine 6000,50 Hz dominant frekans ile doğrudan sinyal frekansını taşımaktadır. Ancak ortalama frekans değeri 6332,79 Hz'ye düşmüş, medyan frekans ise tam olarak 6000,50 Hz'de sabit kalmıştır. Bu durum, bu IMF'in hedef frekansa oldukça simetrik bir biçimde merkezlendiğini ve CEEMDAN'ın bu bileşeni hedef sinyal frekansına oldukça yakın şekilde ayrıştırdığını göstermektedir. Skewness 1,86 ve kurtosis 9,76 değerleri ise sinyalin hafif sivrilik ve asimetri içerdiğini, ancak kaotikleşme düzeyinin henüz sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. 2906,65 Hz'lik standart sapma ve 8126,68 Hz'lik roll-off da orta-yüksek frekans bileşenlerinin hâlâ baskın olduğunu doğrulamaktadır.

IMF3 bileşeni 2400,20 Hz'lik dominant frekans ve 3322,09 Hz'lik ortalama frekans değeriyle orta frekans bölgesinde önemli bir enerji yoğunluğu taşımaktadır. Medyan frekans ise 2982,25 Hz ile sinyalin frekans dağılımının simetrik olmadığını göstermektedir. Standart sapma 1874,14 Hz, skewness 3,76 ve kurtosis 28,15 gibi değerler, bu IMF bileşeninde sinyalin artık daha belirgin sivrilik ve ani değişimlerle karakterize olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yapı,

yüzeysel deşarj olaylarının ve mikro boşalmaların etkisinin IMF3'te kendini hissettirmeye başladığını göstermektedir.

IMF4 bileşeninde dominant frekans 2500,21 Hz, ortalama frekans 2280,09 Hz ve medyan frekans 2246,19 Hz olup, bu bileşenin daha düşük frekanslı yüzey olaylarına karşılık geldiğini düşündürmektedir. 984,81 Hz'lik standart sapma daha sınırlı bir frekans yayılımı sunarken, skewness değeri 3,44 ve kurtosis 51,87 ile oldukça yüksek çıkmıştır. Bu durum, bu bileşende yer alan sinyalin şiddetli sivriliklere ve düzensiz boşalım karakterine sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

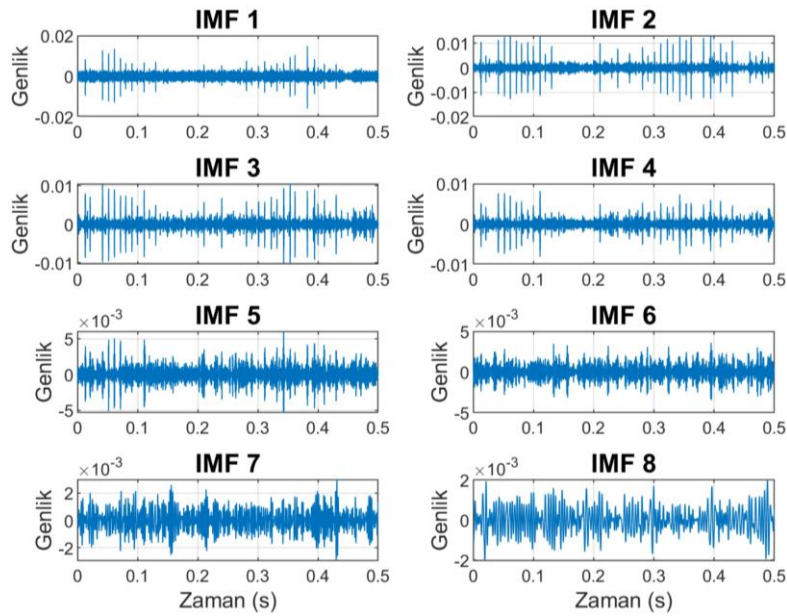
IMF5 bileşeni ise 1000,08 Hz'lik dominant frekans, 1443,65 Hz'lik ortalama frekans ve 1288,11 Hz'lik medyan frekans değerleriyle alt frekans bandına geçişi temsil etmektedir. 1379,31 Hz'lik standart sapma ve 1892,16 Hz'lik roll-off değeri, yüzeydeki orta-şiddetteki deşarj etkilerinin bu bileşende toplandığını göstermektedir. Skewness 9,48 ve kurtosis 120,11 gibi yüksek değerler, bu bileşenin çok yüksek sivrilik ve ani enerji boşalmalarını içerdiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

IMF6 bileşeni 660,06 Hz'lik dominant frekans ve 1422,75 Hz ortalama frekans ile düşük frekans bandında yer almakla birlikte, enerji içeriği olarak hâlâ anlamlı bir yayılım göstermektedir. Medyan frekans 774,06 Hz olup, sinyal dağılımının alt banda doğru kayma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Standart sapma 2908,76 Hz gibi oldukça yüksektir ve bu durum sinyalin frekans açısından geniş spektrumlu olduğunu göstermektedir. Skewness değeri 5,16 ve kurtosis 31,21 olup sinyalin ani yükselme ve sivriliklerle karakterize kaotik bir yapı sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır. 1180,10 Hz'lik roll-off değeri, sinyalin spektral yoğunluğunun üst sınıra kadar uzandığını işaret eder. Bu tür davranış, numunelerde yüzeysel kaçakların dengesiz bir şekilde oluştuğunu gösterir.

IMF7 bileşeni ise 298,02 Hz'lik dominant frekans, 646,77 Hz ortalama frekans ve 394,03 Hz medyan frekans ile çok düşük frekans bandında yer almaktadır. Bu IMF bileşeni, yüzeyde oluşan yavaş, ancak geniş kapsamlı enerji boşalmalarını temsil etmektedir. 1801,28 Hz'lik oldukça yüksek standart sapma ve 578,05 Hz'lik roll-off değeri, sinyalin geniş bantta dağılmış olduğunu göstermektedir. Skewness 8,85 ve kurtosis 88,95 gibi yüksek değerlere sahip olması, yüzeydeki elektriksel deşarjların hem ani hem de yüksek tepe değerli bir yapı sergilediğini ve bu tür davranışların malzemenin zayıf noktalarında tekrarlandığını göstermektedir.

IMF8 bileşeni 200,02 Hz'lik dominant frekans, 373,72 Hz ortalama frekans ve 210,02 Hz medyan frekans ile CEEMDAN analizinin en düşük frekans bileşendir 1421,27 Hz'lik yüksek standart sapma, sinyalin geniş frekans bandına yayıldığını gösterirken, 314,03 Hz roll-off değeri sinyalin daha çok alt bantta yoğunlaştığını göstermektedir. Skewness 11,45 ve kurtosis 147,22 gibi aşırı yüksek değerler, çok ani, sivri ve şiddetli yüzeysel boşalımların bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu bileşen, katkısız malzeme üzerinde zamanla gelişen elektriksel bozulmaların CEEMDAN yöntemi ile başarıyla ayrıştırıldığını ve düşük frekanslı IMF'lerde de toplandığını göstermektedir.

4.3.6. 50 Hz Frekansında CEEMDAN Analizi



Şekil 4-18 50 Hz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-18'de katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 50 Hz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.11'de bu grafiklerde gösterilen IMF'lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.11 50 kHz Frekans Altında Katkılı Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

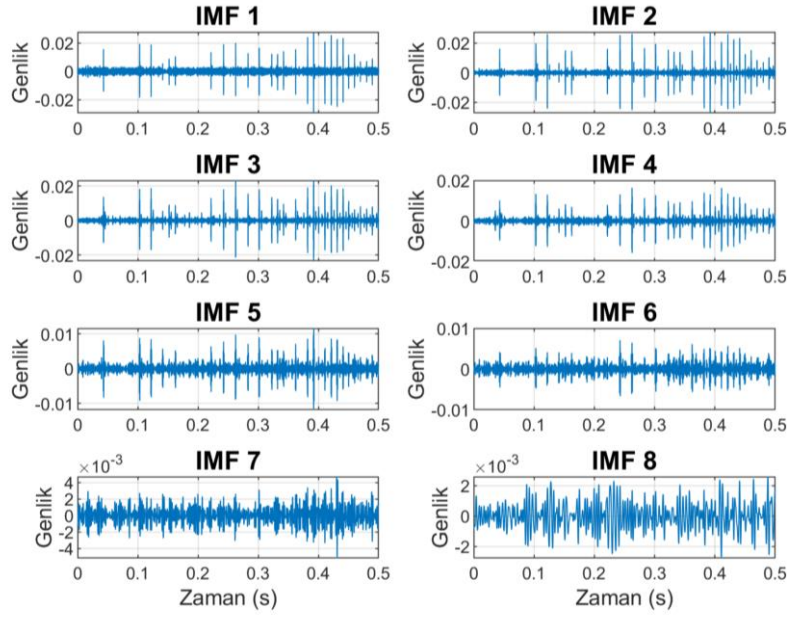
IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Rolof Hz
1	18003,5	12855,77	13607,13	5459,089	-0,39612	2,18367	18817,57
2	8000,667	7148,69	6630,553	3527,536	1,116545	5,645616	10386,87
3	3468,289	4539,082	4284,357	2078,494	2,03402	14,09688	6190,516
4	3468,289	2859,4	2654,221	1757,48	4,984302	45,90861	3794,316
5	1734,145	1660,258	1536,128	1229,223	8,65472	119,3224	2166,181
6	780,065	866,9713	798,0665	710,7519	15,846	390,5653	1158,097
7	450,0375	1065,65	448,0373	2814,298	5,457599	34,58897	690,0575
8	222,0185	1342,365	248,0207	3655,563	4,020104	19,47821	874,0728

50 Hz frekansında katkılı yalıtkan malzeme için gerçekleştirilen CEEMDAN analizinde, IMF1'den IMF8'e kadar olan bileşenler incelendiğinde frekans bileşenlerinin giderek azaldığı ve düşük frekanslı bileşenlerde spektral özelliklerin bozulmaya başladığı gözlemlenmektedir. Yüksek frekanslı IMF1 ve IMF2 bileşenleri kararlı ve simetrik dağılımlar sergilerken, IMF seviyeleri ilerledikçe sinyal karakteristiğinde bozulmalar ortaya çıkmaktadır.

Skewness (çarpıklık) değerleri IMF1'de -0,39 gibi düşük ve negatif bir değerdeyken, IMF seviyeleri ilerledikçe bu değer pozitif yöne kaymakta ve IMF6'da 15,84 gibi oldukça yüksek bir seviyeye ulaşmaktadır. Bu artış, sinyalin düşük frekans bileşenlerinde simetrik yapıdan uzaklaşıp çarpık hale geldiğini göstermektedir. Benzer şekilde kurtosis (basıklık) değerleri de IMF1–IMF3 aralığında 2–14 arasında kalırken, IMF6'da 390,56 gibi aşırı yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu durum, düşük frekanslardaki sinyal bileşenlerinin çok sivri tepe ve çöküntülere sahip olduğunu ve yüzeysel deşarjların düzensiz karaktere büründüğünü göstermektedir.

Genel olarak 50 Hz frekansında katkılı numune için elde edilen CEEMDAN IMF analizleri, özellikle IMF5'ten itibaren ciddi derecede çarpıklık ve sivrilik içeren bileşenlerin varlığını ortaya koymaktadır. Bu da düşük frekanslarda da yüzeysel deşarjların etkili olduğunu ve malzeme içerisindeki lokal bozulmaların enerji dağılımında önemli değişimlere neden olduğunu göstermektedir.

50 Hz frekansında beklenmeyen yüksek frekans bileşenlerinin gözlemlenmesinin, sinyallerin ses kartı aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılması sürecinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4-19 50 Hz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Grafikleri.

Şekil 4-19’da katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 50 Hz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen CEEMDAN IMF grafikleri ve Tablo 4.12’de bu grafiklerde gösterilen IMF’lere ait veriler görülmektedir.

Tablo 4.12 50 Hz Frekans Altında Katkısız Malzeme İçin CEEMDAN IMF Tablo Verileri.

IMF Number	Dominant Frequency Hz	Mean Frequency Hz	Median Frequency Hz	StdDev Frequency Hz	Spectral Skewness	Spectral Kurtosis	Spectral Roloff Hz
1	18003,5	11765,5	11888,99	5565,775	-0,10137	1,954017	18237,52
2	8000,667	6646,055	6028,502	3468,56	1,212381	5,696301	9914,826
3	3718,31	4140,156	3858,322	2030,282	1,989931	13,67332	5832,466
4	2350,196	2648,971	2472,206	1383,367	3,796802	39,15847	3596,3
5	1730,144	1777,213	1578,132	1575,92	7,990845	87,20209	2218,185
6	850,0708	1005,718	902,0752	978,3412	13,20594	238,1973	1274,106
7	450,0375	1277,031	494,0412	3139,064	4,792455	27,04148	850,0708
8	200,0167	1455,516	252,021	3813,776	3,804593	17,61297	1184,099

50 Hz frekansında katkısız yalıtkan malzeme ile yapılan deneysel analizde, CEEMDAN yöntemi ile elde edilen IMF bileşenlerinin Skewness ve Kurtosis değerleri, sinyalin asimetrik yapısı ve sivrilik düzeyi açısından belirgin bilgiler sunmaktadır.

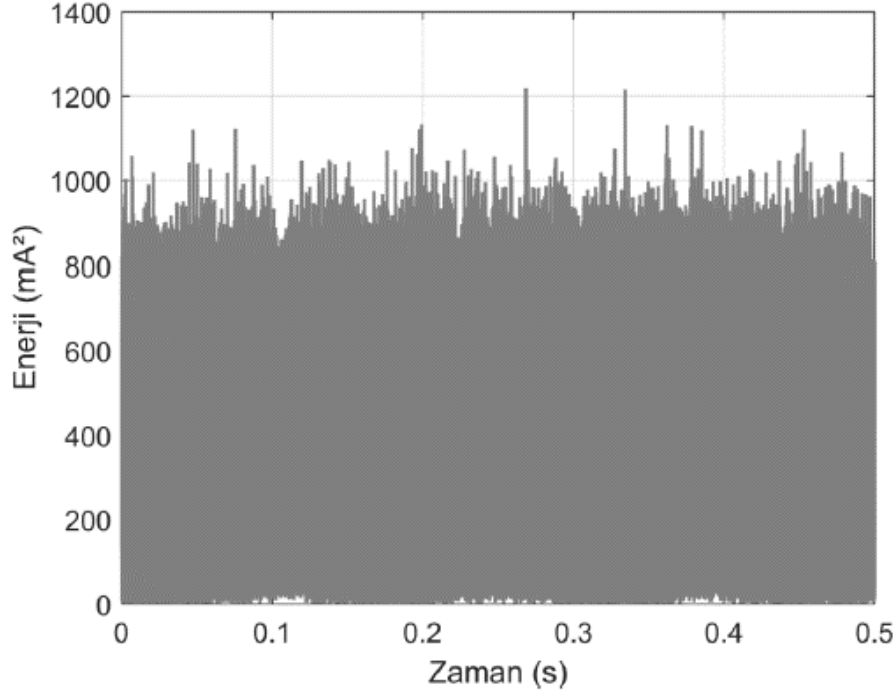
İlk bileşen olan IMF1’de skewness değeri yaklaşık -0,10, kurtosis değeri ise 1,95 olarak ölçülmüş olup sinyalin normal dağılıma oldukça yakın, dengeli bir yapıda olduğunu göstermektedir. Ancak, frekans azaldıkça ve IMF bileşen sayısı arttıkça, özellikle IMF5, IMF6 gibi daha düşük frekanslı bileşenlerde Skewness değerinin 7,99 ile 13,20 arasında yükseldiği ve Kurtosis değerlerinin de 87 ile 239 arasında seyrettiği gözlenmektedir.

Bu durum, yüzeysel boşalım sinyallerinin alt IMF bileşenlerinde daha belirgin ve sivri yapıda oluştuğunu, deşarjların yoğunlaştığını ve sistemin izolasyon yapısında bozulma işaretlerinin belirginleştiğini göstermektedir. Özellikle IMF6 bileşeni, spektral olarak en yüksek sivrilik ve çarpıklık değerlerini içermektedir ve bu da katkısız malzemenin düşük frekans altında kararsız boşalımın oluşturduğunun işaretidir.

Genel olarak örnekler incelendiğinde, IMF1–IMF3 bileşenlerinde daha kararlı sinyaller üretirken, IMF4-5’ten itibaren skewness ve kurtosis değerlerinde ciddi artışlar gözlemlenmektedir. Bu durum, IMF4-5’ten itibaren ciddi derecede çarpıklık ve sivrilik içeren bileşenlerin varlığını ortaya koymaktadır. Bu da çeşitli frekanslarda dahi yüzeysel deşarjların etkili olduğunu ve malzeme içerisindeki lokal bozulmaların enerji dağılımında önemli değişimlere neden olduğunu göstermektedir.

4.4. IMF ENERJİ DAĞILIMLARI

4.4.1. 14 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi

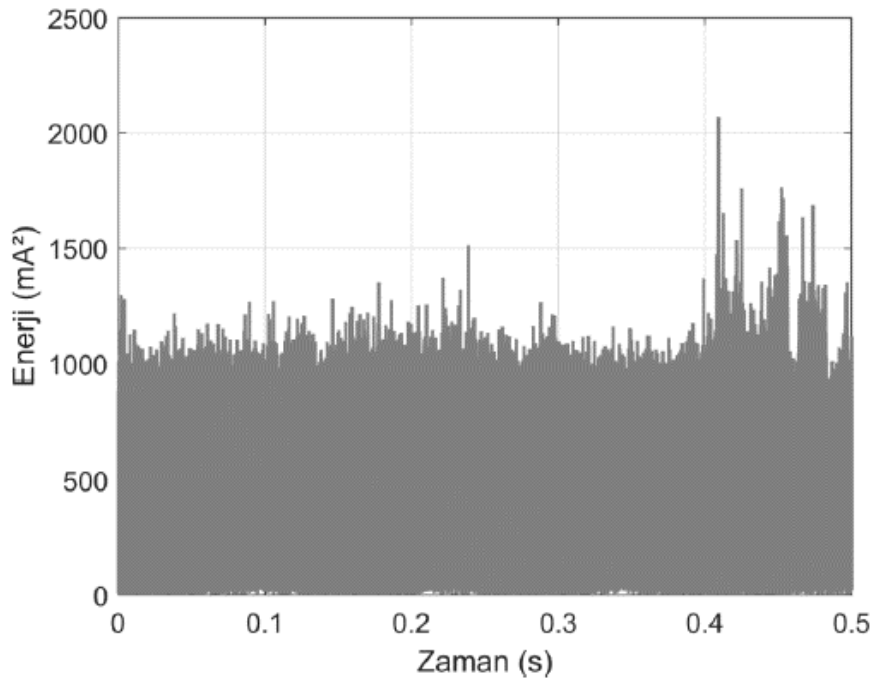


Şekil 4-20 14 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Şekilde görülen CEEMDAN-temelli enerji grafiği, 14 kHz frekansında katkılı bir yalıtkan malzeme üzerinde elde edilen sinyalin IMF bileşenlerinin enerji yoğunluğunu zaman ekseninde göstermektedir. Grafik boyunca enerjinin 800–1000 mA² aralığında yoğunlaştığı, zaman içinde kararlı fakat yüksek genlikli salınımların varlığını sürdürdüğü gözlemlenmektedir. Bu durum, yüksek frekanslı elektriksel stres altında malzeme yüzeyinde sürekli olarak küçük ölçekli, fakat enerjik deşarj olaylarının meydana geldiğini göstermektedir.

Enerji yoğunluğunun zaman boyunca büyük oranda sabit kalması, IMF bileşenlerinin baskın bir frekans bandında ve sürekli bir mod yapısında salındığını göstermektedir. Bu yapı, yüksek frekanslı sinyallerin yüzey polarizasyon etkisi oluşturduğuna ve bu etkinin katkılı malzemelerde baskılayıcı bir şekilde dağılmak yerine, belirli IMF'ler üzerinde toplandığına işaret etmektedir. Grafik, transiyent yapıdan çok, kararlı bir salınım enerjisi profili göstermektedir; bu da CEEMDAN ile elde edilen IMF'lerin daha çok yüksek frekans bandına ait olduğunu ve yüzeysel rezonans etkisinin süreklilik kazandığını göstermektedir.

Katkılı malzeme yapısının bu frekansta sürekli enerji üretmesi, katkı malzemesinin 14 kHz frekansındaki elektriksel gerilim karşısında tam anlamıyla enerji absorbe edemediğini ve yüzeyde enerji birikimi oluştuğunu düşündürmektedir. Bu da katkıların dispersiyon yapısı, bağlanma kalitesi veya yüzey geçirgenliğine bağlı olarak frekansa duyarlı bir koruma etkisi gösterdiğini göstermektedir. CEEMDAN ayrıştırması sayesinde elde edilen bu enerji grafiği, sinyalin yüzeysel bozulmaya açık olduğunu ve katkı kullanımının bu frekansta belirgin bir enerji baskılaması oluşturmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4-21 14 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

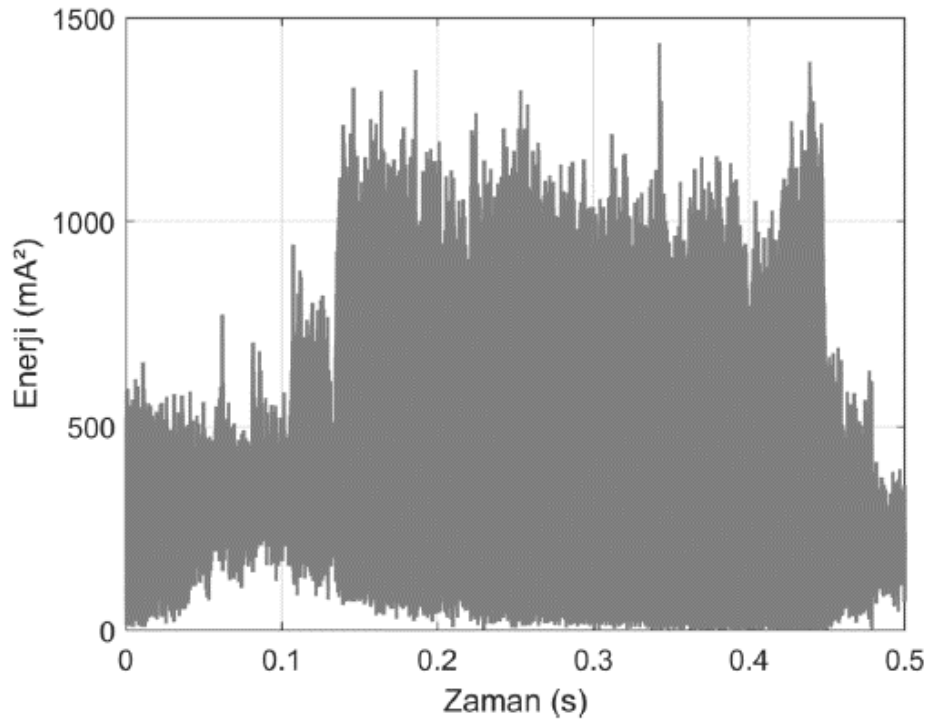
Grafikte, 14 kHz frekansında katkısız yalıtkan malzeme için elde edilen CEEMDAN enerji dağılımı, zaman eksenini boyunca genel olarak 1000–1200 mA² aralığında seyretmekte; ancak 0.4 s sonrası dönemde belirgin ve ani bir enerji artışı gözlenmektedir. Bu artış, enerji seviyelerinin kısa sürede 1500–2000 mA²'ye kadar çıktığını göstermekte ve malzeme yüzeyinde meydana gelen ani bir elektriksel olayın göstergesi olarak yorumlanabilir.

Bu davranış, katkısız malzemelerin 14 kHz frekansındaki elektriksel gerilim altında daha yüksek düzeyde lokal enerji yoğunlaşmalarına maruz kaldığını ve bu durumun geçici ama yüksek enerjili deşarjlara yol açabileceğini göstermektedir. Grafik, sinyalin belirli bir zaman

aralığında (yaklaşık 0.4–0.5 s arasında) ani enerji sıçramaları içerdiğini, bu sıçramaların da CEEMDAN algoritmasıyla ayrıştırılan yüksek frekanslı IMF bileşenlerine yansıdığını ortaya koymaktadır.

Enerji düzeyinin ani yükselmesi, katkı maddesinin bulunmadığı bir yapının frekans karşısında daha zayıf bir yüzey tutarlılığına sahip olduğunu ve yük taşıma kapasitesinin bozulma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu, özellikle yüzeysel dielektrik bozulmaların veya kısmi deşarj karakterlerinin ortaya çıktığı aralıklarda izlenebilmektedir.

4.4.2. 12 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi



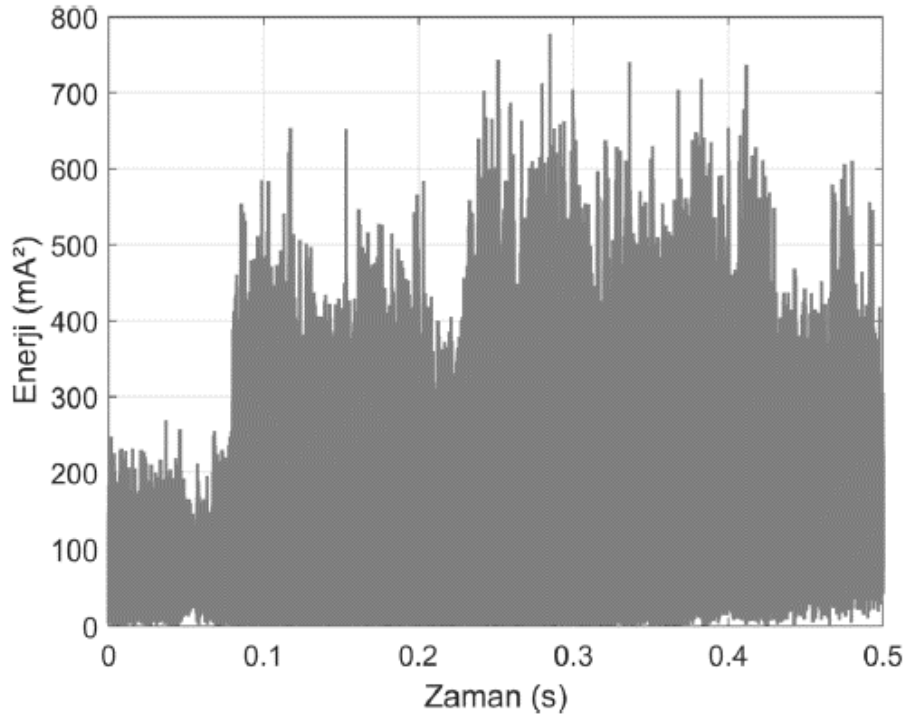
Şekil 4-22 12 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Grafikteki enerji dağılımı, katkılı yalıtkan malzemenin 12 kHz frekansında maruz kaldığı elektriksel stres altındaki IMF bileşenlerine ait enerji profilini ortaya koymaktadır. Zaman ekseninde ilk 0.1 s'ye kadar olan bölümde enerji seviyeleri düşük ve göreceli olarak stabil iken, 0.1 s sonrasında enerji seviyelerinde ani bir artış meydana gelmiştir. Bu yükseliş, 1000–1200 mA² aralığında yoğunlaşmış ve yaklaşık 0.4 s'ye kadar devam etmiştir. Bu süre

boyunca malzeme yüzeyinde sürekli, yüksek enerjili salınımlar meydana gelmiş, bu da yüzeyde yoğun elektriksel etkileşimlerin gerçekleştiğini göstermektedir.

Bu davranış, katkı maddesinin 12 kHz frekansında belirli bir gecikmeyle etkinleştiğini ve enerji dağılımının zamansal olarak gecikmeli bir şekilde IMF bileşenlerine yansıdığını düşündürmektedir. Yüksek enerji seviyeleri, CEEMDAN analizinde yüksek frekanslı IMF'lere ait bileşenlerin öne çıktığını ve yüzeyde frekansa bağlı bir rezonans etkisi oluştuğunu göstermektedir. 0.4 s sonrasında enerjideki düşüş, sistemin yeniden dengeye geldiğine ya da elektriksel etkinliğin bastırıldığına işaret eder.

Bu eğilim, katkılı malzemenin başlangıçta yüksek frekanslı gerilime karşı nispeten dirençli olduğunu; ancak belirli bir eşik süresi sonrasında enerji birikiminin hızlıca arttığını göstermektedir. Bu durum, katkıların dağılım etkinliği ve malzeme içi yapısal bütünlüğün zamana bağlı olarak sınındığını, yüksek frekansların bu yapıyı dinamik olarak zorladığını ortaya koyar.



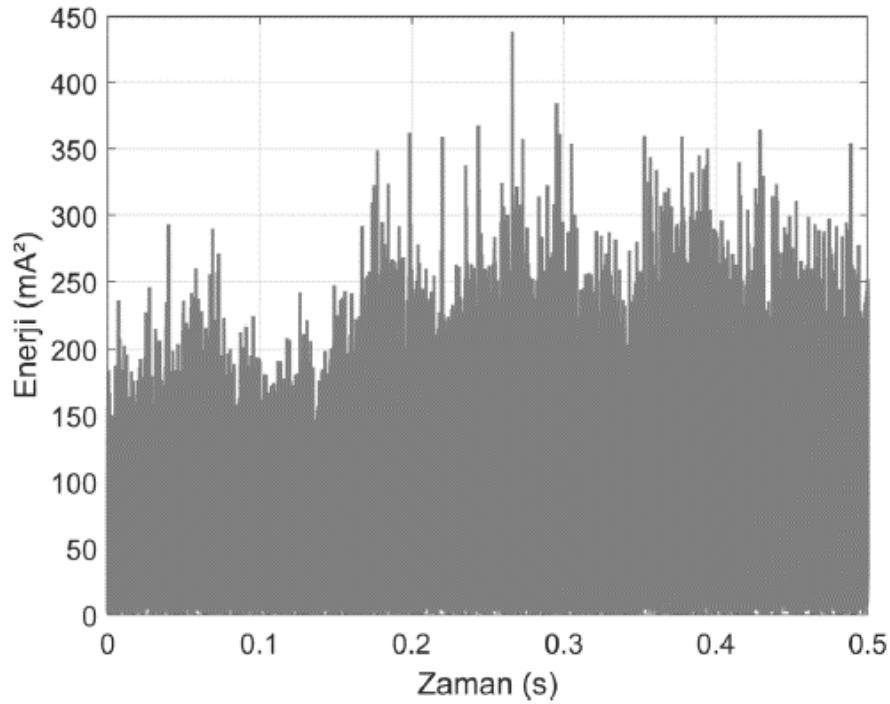
Şekil 4-23 12 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Bu grafik, katkısız bir yalıtkan malzemenin 12 kHz frekansında maruz kaldığı elektriksel stres altındaki CEEMDAN bileşenlerinin enerji zaman dağılımını göstermektedir. Enerji seviyeleri başlangıçta oldukça düşüktür ($200\text{--}300 \text{ mA}^2$), ancak yaklaşık 0.1 s'den itibaren yükselerek $600\text{--}700 \text{ mA}^2$ seviyelerine kadar ulaşmakta ve bu yüksek değerler zaman ekseninde dalgalanarak devam etmektedir.

Bu davranış, katkısız malzemenin yüksek frekanslı uyarım altında yüzeysel enerji emilimini sınırlı biçimde gerçekleştirebildiğini ve sistemde zamanla birikmiş elektriksel enerjinin kararsız IMF bileşenleri şeklinde ortaya çıktığını göstermektedir. 0.1–0.4 s aralığında dalgalı şekilde süren bu enerji salınımları, yüzeydeki lokal elektrik alan yoğunluklarının artışıyla açıklanabilir. Bu durum, katkı maddesi bulunmayan malzemelerin yüksek frekanslara karşı daha düşük bastırma kabiliyetine sahip olduğunu ve yüzeysel bozulmaların daha erken evrede ortaya çıkabileceğini göstermektedir.

Grafik ayrıca, CEEMDAN analizinin zamansal çözünürlüğü sayesinde enerji birikiminin belirli aralıklarla pik yaptığı ve bu pencerelerin IMF yapısına yansıdığı anlaşılmaktadır. Malzemenin belirli bir eşiğin üzerine çıkan bu enerji seviyeleri, transiyent olaylara duyarlılığını ve yüzey kırılgenliğini işaret etmektedir.

4.4.3. 10 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi



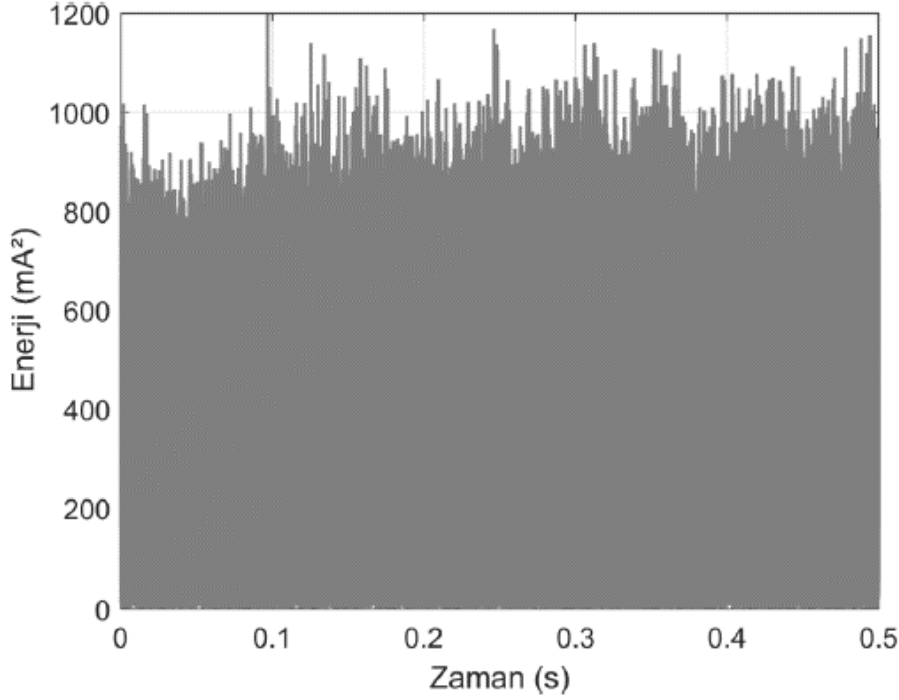
Şekil 4-24 10 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Görselde yer alan IMF enerji dağılımı grafiği, katkılı bir malzemenin 10 kHz frekanslı elektriksel stres altındaki zamana bağlı enerji değişimini temsil etmektedir. Enerji düzeyleri başlangıçta görece düşük olup ($\sim 200\text{--}300 \text{ mA}^2$), 0.1 s civarında hızla yükselerek $600\text{--}700 \text{ mA}^2$ aralığında seyreden bir plato oluşturmaktadır. Bu artış, CEEMDAN ile ayrıştırılan IMF bileşenlerinde yüksek frekanslı modların enerji taşıdığını ve bu etkinin zaman içerisinde belirli bir kararlılıkla sürdüğünü göstermektedir.

Grafikteki enerji artışı, malzemenin frekansa bağlı olarak artan yüzey polarizasyonuna yanıt verdiğini ve katkı malzemesinin bu noktada enerji yayılımını bastırmak yerine belirli IMF’lerde yoğunlaştırdığını düşündürmektedir. Enerjinin zaman boyunca yüksek düzeyde sabit kalması, malzemenin sürekli elektriksel aktiviteye maruz kaldığını ve geçici değil, sürekli bir stres altında olduğunu ortaya koyar. Bu davranış, yüksek frekansların malzeme içinde sürekli enerji transferine yol açtığını göstermektedir.

Bu enerji yapısı aynı zamanda CEEMDAN yönteminin yüzeydeki sürekli osilasyonları yüksek çözünürlükle ayrıştırabildiğini ve IMF bileşenleri aracılığıyla malzemenin elektriksel

stres karakteristiğini açığa çıkardığını göstermektedir. Yüksek enerjili bu IMF'ler, muhtemelen orta düzeydeki IMF bileşenleri olup, frekans-mekansal geçiş davranışlarını temsil etmektedir.



Şekil 4-25 10 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

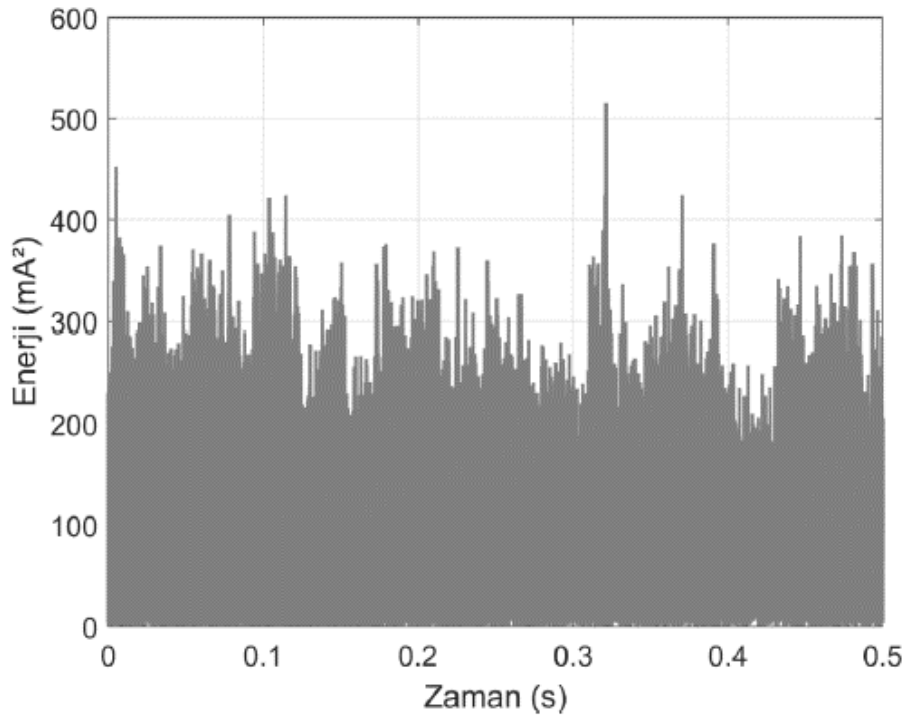
Bu grafikte katkısız yalıtkan malzeme üzerinde 10 kHz frekansında uygulanan elektriksel stres altında elde edilen CEEMDAN-temelli IMF enerji bileşenlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Enerji seviyesi, zaman boyunca oldukça kararlı ve yüksek bir bantta (yaklaşık 850–1100 mA²) seyretmekte; belirgin bir pik ya da ani sıçrama olmadan sürekli yüksek yoğunluklu bir enerji yapısı sergilemektedir. Bu enerji profili, katkı maddesi bulunmayan malzemelerde elektriksel stresin sürekli olarak yüzeyde dağılamayıp, IMF'ler aracılığıyla sistem içerisinde yüksek yoğunluklu bir şekilde taşındığını göstermektedir.

Bu durum, malzemenin yüzeyel yapısının yüksek frekansa karşı yeterli direnç göstermediğini ve enerjinin yüzeyde bastırılmadan birikerek sürekli yüksek frekanslı osilasyonlara dönüştüğünü işaret eder. CEEMDAN algoritmasıyla ayrıştırılmış bu bileşenlerin

büyük bölümü, muhtemelen ilk birkaç IMF içerisinde yoğunlaşmıştır ve bu da sinyalin baskın olarak yüksek frekanslı bileşenler içerdiğini gösterir.

Grafikte zamanla belirgin bir artış veya düşüş eğilimi olmaması, sistemin elektriksel davranışının baştan sona homojen olarak etkilendiğini ve herhangi bir yüzey bozulma eşiğinin geçilmediğini düşündürse de, yüksek enerji düzeyinin sürekli varlığı potansiyel yüzey yıpranmasının temelini oluşturabilecek niteliktedir.

4.4.4. 8 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi



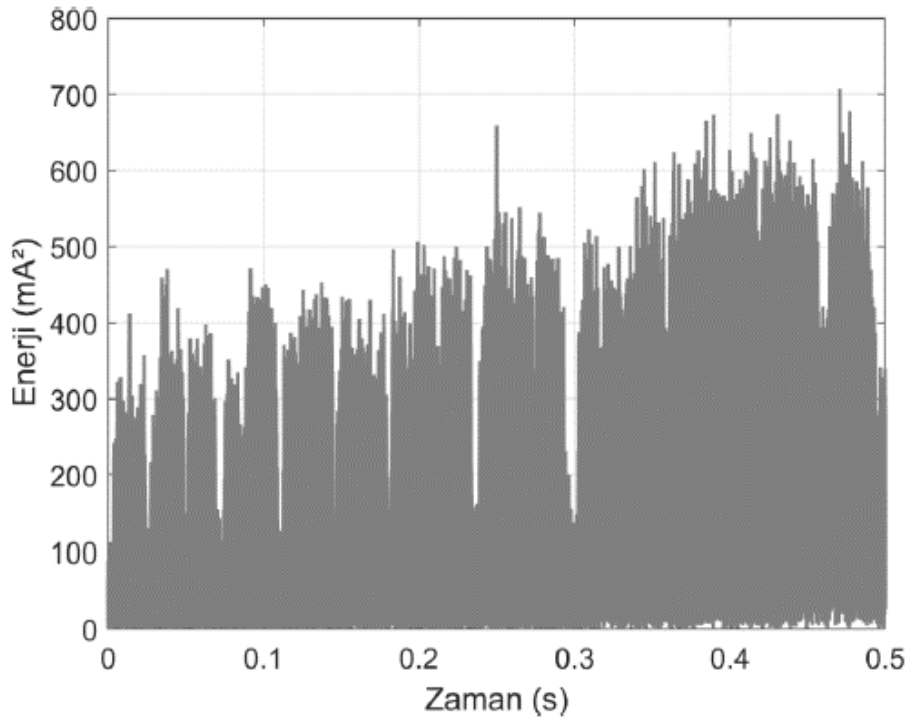
Şekil 4-26 8 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Bu grafikte katkılı bir yalıtkan malzemenin 8 kHz frekansında maruz kaldığı elektriksel stres altındaki IMF enerji bileşenlerinin zamana bağlı dağılımı gösterilmektedir. Enerji düzeyleri 200–350 mA² aralığında yoğunlaşmış olup, zaman boyunca görece homojen bir yapı sergilemektedir. 0.3 s civarında kısa süreli bir pik (~500 mA²) gözlenmekte, ancak bu sıçrama dışında sistemin genel enerji profili oldukça stabildir.

Grafikteki bu homojenlik, katkı maddesinin 8 kHz frekansında oldukça etkin bir enerji dağıtım mekanizması sağladığını, yüzeydeki elektriksel yüklerin lokal birikimini önleyerek IMF bileşenlerine dengeli bir şekilde dağıttığını göstermektedir. Pik değerlerin çok kısa süreli

ve düşük genlikli olması, sistemde transiyent davranışların sınırlı olduğunu ve yüzey bozulması riskinin minimum düzeyde kaldığını düşündürmektedir.

Bu yapı, CEEMDAN ayrıştırmasının yüksek frekans çözünürlüğüyle birlikte katkı malzemesinin bastırma yeteneğini ortaya koymuştur. Enerji dağılımının zamana bağlı olarak sönümlü yapıda kalması, sistemin frekanslı uyarı karşısında belirgin bir rezonansa girmediğini, enerji yoğunlaşmasının baskılandığını göstermektedir.



Şekil 4-27 8 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

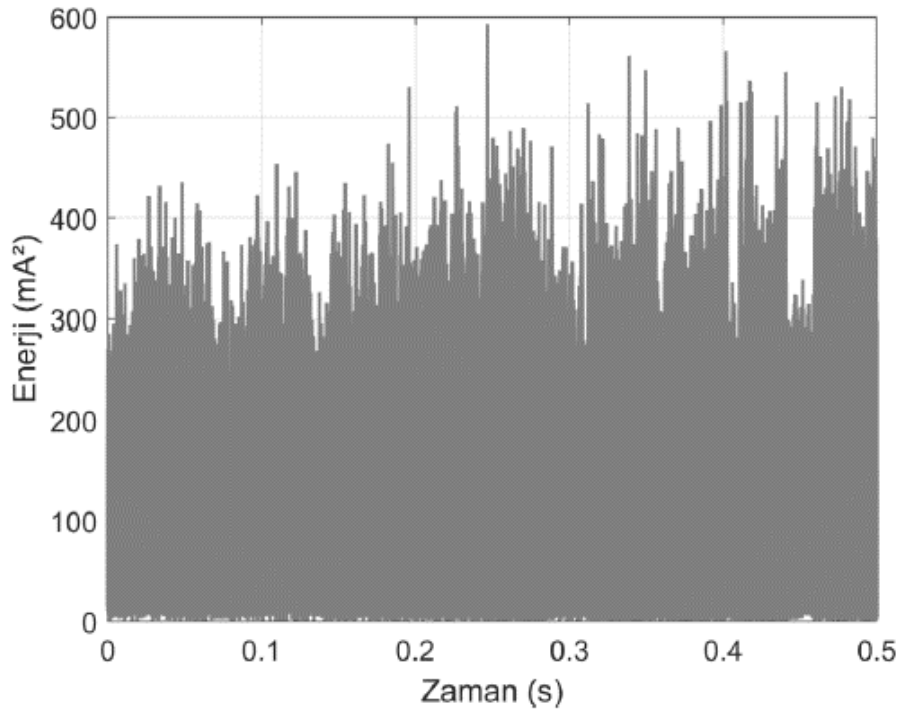
Bu grafik, katkısız bir yalıtkan malzemenin 8 kHz frekansında maruz kaldığı elektriksel stres altında zamanla değişen IMF enerji bileşenlerini göstermektedir. İlk 0.1 s'de enerji seviyeleri 250–400 mA² aralığında düşük yoğunlukta seyretmektedir. Ancak zaman ilerledikçe özellikle 0.3 s sonrası dönemde enerji seviyelerinde belirgin bir artış gözlenmekte ve grafik 600–700 mA² düzeyine kadar çıkmaktadır. Bu artış, sistemde enerji birikiminin zamanla yoğunlaştığını ve katkısız yapı nedeniyle yüzeyde bastırma etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

Bu yapı, yüzeydeki yük birikiminin katkı maddesi olmadan daha geç sönümlendiğini ve sistemin zamanla rezonansa girerek yüksek enerjili modları aktif hale getirdiğini

göstermektedir. CEEMDAN algoritmasıyla ayrıştırılan bu IMF bileşenlerinin zamansal olarak artış göstermesi, malzemenin frekans karşısında gecikmeli fakat yoğun bir yüzeysel stres yaşadığını ortaya koymaktadır.

Ayrıca grafik boyunca görülen yüksek frekanslı küçük salınımlar, sistemde sürekli ama bastırılmamış bir elektriksel aktivitenin varlığını göstermektedir. Bu yapı, katkısız malzemelerde 8 kHz frekanslı uyarımın zamanla enerjiyi absorbe edemeyen yüzey davranışına yol açtığını ve arıza oluşum riskinin daha yavaş ancak birikimli şekilde arttığını işaret etmektedir.

4.4.5. 6 kHz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi



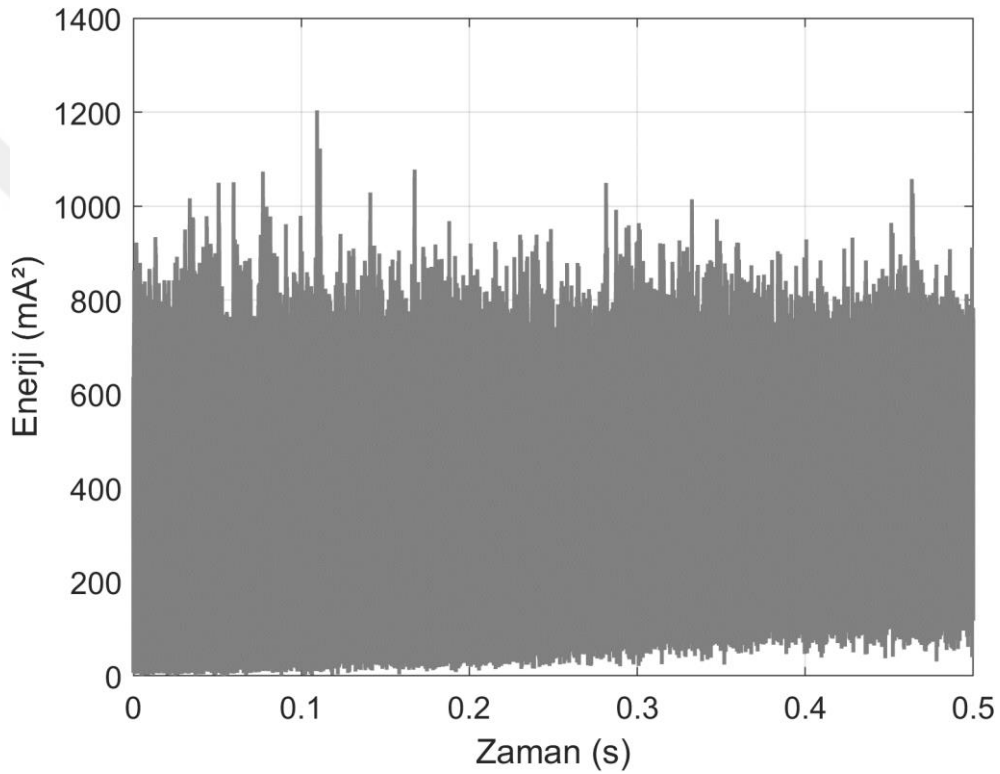
Şekil 4-28 6 kHz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Grafikte 6 kHz frekansında katkılı bir yalıtkan malzemenin CEEMDAN ile ayrıştırılmış IMF enerji bileşenlerinin zamana bağlı dağılımı görülmektedir. Enerji seviyeleri zaman boyunca genel olarak 300–450 mA² aralığında seyretmekte, bazı anlık sıçramalarla 500 mA² üzerine çıkmaktadır. Bu yapı, yüksek frekanslara göre daha düşük enerjili ve daha homojen bir dağılımın varlığına işaret etmektedir.

Zaman eksenini boyunca enerjinin görece dengeli seyretmesi, katkı maddesinin 6 kHz frekansında elektriksel gerilime karşı etkin bir yüzey dengeleme sağladığını göstermektedir.

Özellikle grafikte ani sıçramaların azlığı ve yüksek enerji piklerinin kısa süreli oluşu, katkının transiyent tepkileri bastırma kabiliyetinin güçlü olduğunu göstermektedir.

CEEMDAN yöntemiyle ayrıştırılmış IMF'lerin, bu frekansta yüksek frekanslı salınımlar yerine daha kararlı modlar taşıdığı söylenebilir. Bu, orta ve düşük IMF bileşenlerinin baskın olduğu bir enerji yapısına işaret eder. Katkı maddesi, bu frekans aralığında yüzeydeki yük birikimini dengeleyerek elektriksel bozulmaların önüne geçmiş görünmektedir.



Şekil 4-29 6 kHz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Bu grafikte katkı maddesi içermeyen yalıtkan bir numuneye 6 kHz frekansında uygulanan alternatif gerilim sonrası CEEMDAN yöntemiyle elde edilen IMF enerji bileşenlerinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Enerji seviyesi zaman boyunca 800 mA² civarında yoğunlaşmış ve zaman eksenini boyunca belirgin ve keskin piklerle birlikte seyretmiştir.

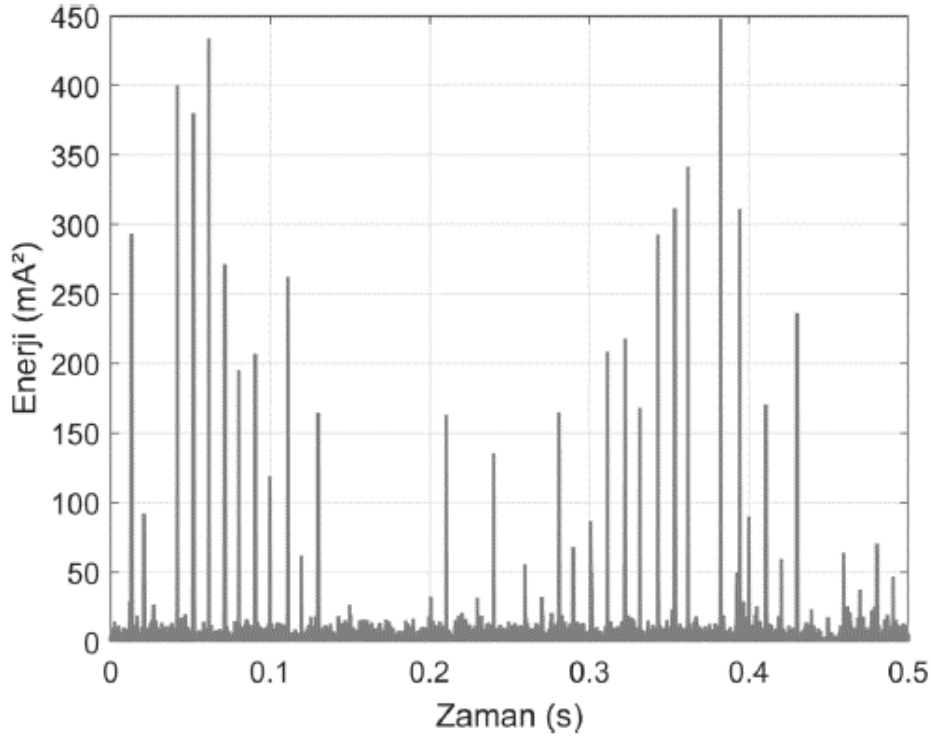
Bu enerji dağılımı, sistemde belirgin bir kararsızlık sinyali vermemekle birlikte, sinyalin sürekli olarak yüksek düzeyli salınımlarla yüzeye iletilildiğini ve yüzeyde lokal olarak bir enerji yoğunluğu oluştuğunu göstermektedir. Zaman içinde ani enerji sıçramalarının varlığı, yüzey

boşalımı kaynaklı kısa süreli enerji taşınımına işaret edebilir. Bu tür sıçramalar, yüzey kusurlarının veya mikro bozulmaların başlama noktaları olarak değerlendirilebilir.

Enerjinin belirli bir zaman aralığında değil, tüm zaman boyunca dağılım göstermesi; bu yüzeysel deşarj davranışının sistem boyunca homojen şekilde yayıldığını ve sistemin baştan sona benzer elektriksel stres koşulları altında çalıştığını gösterir. Ancak katkısız yapının 6 kHz gibi orta frekanslı bir sinyali yeterince bastıramadığı ve katkılı örneğe oranla yüzeyde daha yüksek bir enerji birikimi oluşturduğu anlaşılmaktadır.

CEEMDAN yöntemi ile elde edilen bu analiz sonucunda, yüksek frekans bileşenlerinin büyük bölümünün özellikle IMF1–IMF4 bileşenlerinde toplanmış olması beklenir. Bu da katkısız malzemelerde orta frekanslı elektriksel streslerin, yüzeye etkili biçimde yansıtıldığını ve malzeme üzerinde yorucu bir etki oluşturduğunu düşündürmektedir.

4.4.6. 50 Hz Frekanslı Uygulamanın Değerlendirmesi



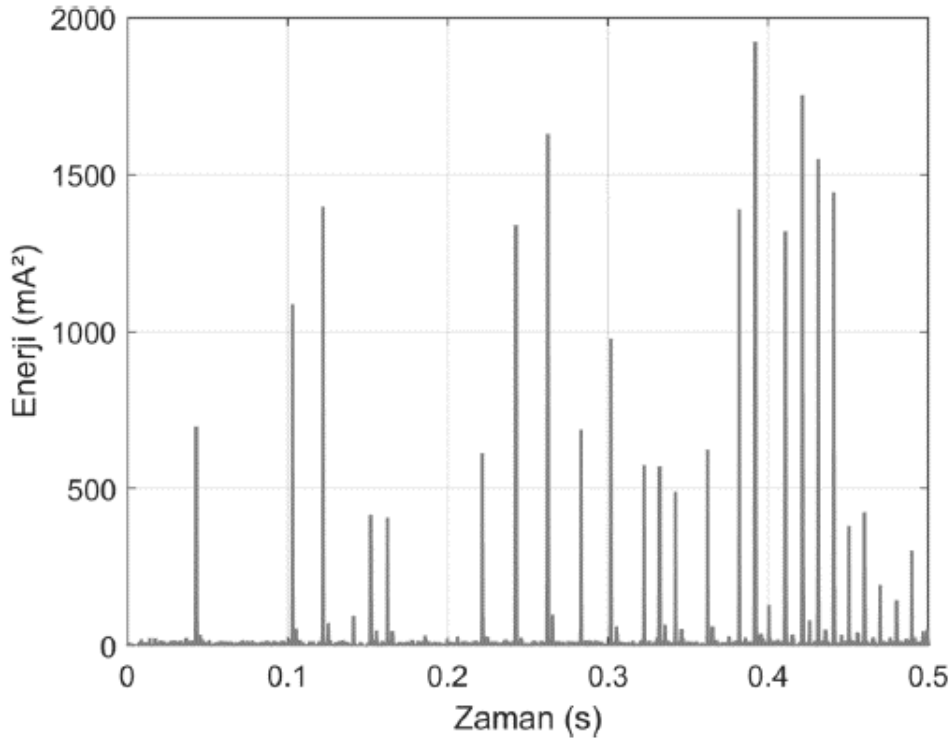
Şekil 4-30 50 Hz Katkılı Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Grafikte katkılı bir yalıtkan malzemenin 50 Hz frekansında maruz kaldığı elektriksel stres altında IMF enerji bileşenlerinin zamanla değişimi sunulmaktadır. Grafik, yüksek

frekanslı uygulamalarda görülen sürekli enerji yoğunluğu yerine, belirgin aralıklarla ortaya çıkan sivri enerji pikleri ile karakterizedir. Enerji seviyeleri piklerde 400 mA^2 civarına kadar ulaşırken, arka plan enerji düzeyi $0\text{--}50 \text{ mA}^2$ arasında oldukça düşüktür.

Bu yapı, 50 Hz gibi düşük frekanslı gerilim altında sistemde sıklıkla boşalma (deşarj) ve dinlenme (sönümlleme) döngülerinin gerçekleştiğini göstermektedir. Katkı maddesinin varlığı, bu döngülerin yüksek enerjiye dönüşmesini engellemiş ve sistemi düşük genlikli, zamana yayılmış enerji salınımlarıyla sınırlı tutmuştur.

CEEMDAN ayrıştırması ile ortaya çıkan bu yapı, IMF bileşenlerinin çoğunlukla düşük frekanslı ve kısa süreli olduğunu, yüksek frekans IMF'lerinin ise sınırlı ve geçici olduğunu göstermektedir. Bu da katkılı malzemelerin 50 Hz gibi standart frekanslarda oldukça dengeli bir performans sergilediğini ve yüzeysel yük birikimlerini başarılı şekilde bastırdığını ortaya koyar.



Şekil 4-31 50 Hz Katkısız Malzeme IMF Enerji Dağılımları.

Grafikte, 50 Hz frekansında katkısız bir yalıtkan malzeme için zaman boyunca elde edilen CEEMDAN IMF enerji bileşenlerinin dağılımı sunulmaktadır. Enerji düzeyi, yaklaşık

0.1 s'den sonra artmaya başlamış, 0.3–0.45 s aralığında ise sıklıkla 1000 mA² ve üzerine çıkan keskin, yüksek enerjili pikler meydana gelmiştir. Özellikle 0.4 s civarında gözlemlenen 1800–2000 mA² düzeyine ulaşan ani yükselmeler, ciddi bir yüzeysel deşarj oluşumunun sinyali.

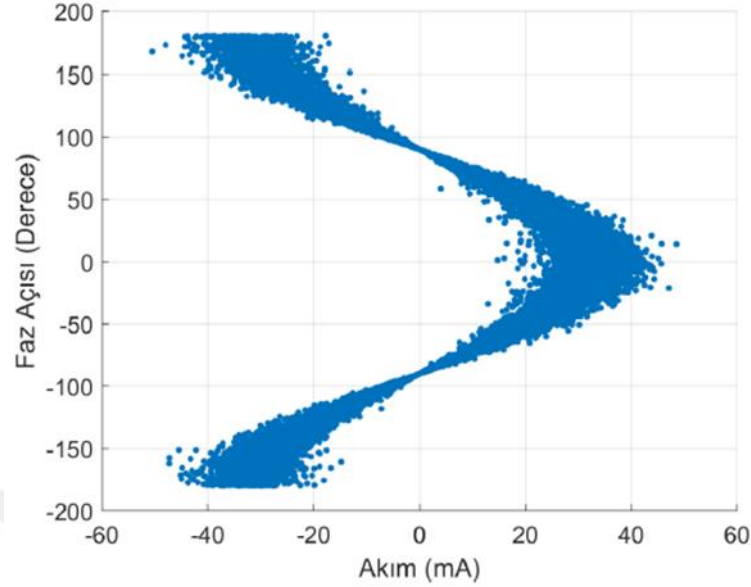
Bu yapı, sistemin zaman içinde giderek artan bir enerji birikimine maruz kaldığını ve bu enerjinin katkı maddesi bulunmaması nedeniyle bastırılmadan ani ve şiddetli deşarjlarla salındığını göstermektedir. Enerji profili, frekans düşük olmasına rağmen sistemin kararlılığını koruyamadığını, yüzey yalıtımının lokal olarak bozulduğunu ve transiyent etkilerin baskın hale geldiğini işaret eder.

CEEMDAN yöntemi sayesinde ortaya çıkan bu sinyal bileşenleri, IMF'lerin büyük ölçüde düşük frekanslı ve ani yoğunlaşmalarla karakterize olduğunu göstermektedir. Grafik, zamana bağlı olarak sistemin sarsıcı bir elektriksel cevaba yöneldiğini ve katkısız yapıların 50 Hz altında dahi yüksek stres üretme potansiyeline sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

4.5. KISMİ DEŞARJ DESENLERİ

Kısmi deşarj desenleri (Partial Discharge Patterns, PD Patterns), yüksek gerilim altındaki yalıtım sistemlerinde meydana gelen yerel ve sınırlı elektriksel boşalmaların zaman, faz açısı ve genlik gibi parametreler cinsinden görsel ve sayısal olarak analiz edilmesini sağlayan önemli bir değerlendirme aracıdır. Bu desenler, elektriksel deşarjların oluştuğu faz açısı aralığı, deşarj tekrarlama oranı ve akım genliği gibi özelliklerin belirlenmesine olanak tanıyarak, yalıtım malzemesindeki bozulma mekanizmalarının karakterize edilmesine yardımcı olur. Kısmi deşarj desenlerinin incelenmesi, yalıtımın zayıfladığı bölgelerin tespiti, arıza türlerinin sınıflandırılması ve yalıtım sisteminin ömrünün tahmin edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada da eğik düzlem deney düzeneğinde farklı frekans seviyelerinde (50 Hz, 6, 8, 10, 12 ve 14 kHz) katkılı ve katkısız katı yalıtkan malzeme örneklerine uygulanan 4000V yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyallerinin analizi ile elde edilen kısmi deşarj desenleri sunulmuştur.

4.5.1. 14 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni



Şekil 4-32 14 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni (PD Pattern).

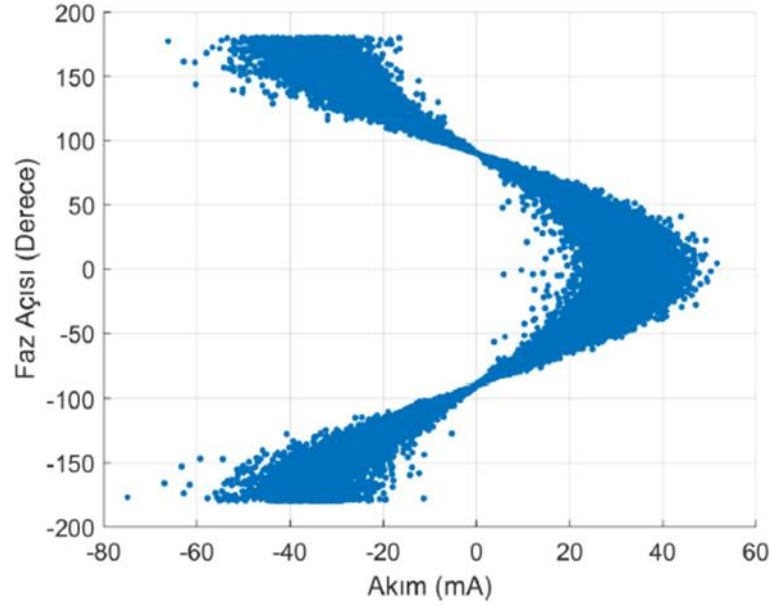
Bu grafik, malzeme üzerinde belirli bir frekansta uygulanan gerilim sonucu elde edilen kısmi deşarj desenini göstermektedir. Görüntüde, akımın faz açısına göre dağılımı gözlemlenmekte olup, belirgin simetri, yoğunluk ve uçlardaki yoğunlaşmalar malzemenin dielektrik özellikleri, katkı durumu ve uygulanan frekansa bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Özellikle desenin üst ve alt yarım dairelerindeki yoğunluk farkları, yük boşalmalarının pozitif ve negatif yarı çevrimlerdeki aktivitesine dair önemli ipuçları sunmaktadır. Ayrıca desenin yatayda (akım eksen) genişlemesi de deşarj şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Katkılı ve katkısız örneklerdeki desenlerin geometrik farklılıkları, katkının malzeme içi boşluklar ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Bu bağlamda, bu PD deseni, yüksek frekanslı uyartım altındaki dielektrik davranışın görsel olarak değerlendirilmesi açısından son derece kritiktir.

Şekil 4-32’de katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 14 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

14 kHz katkılı malzeme PD deseni incelendiğinde, faz açısının $\pm 150^\circ$ civarında yoğunlaşan ve akım genliği olarak ± 40 mA civarında olan belirgin bir desen gözlenmektedir. Bu durum, katkılı malzemenin yüksek frekansta deşarj aktivitelerini belli bir bölgede sınırladığını ve daha homojen bir dağılım sağladığını göstermektedir. Katkılı malzemenin etkisi

ile enerji dağılımı stabil hale gelmiş ve bu durum malzemenin yalıtım özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir.

4.5.2. 14 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

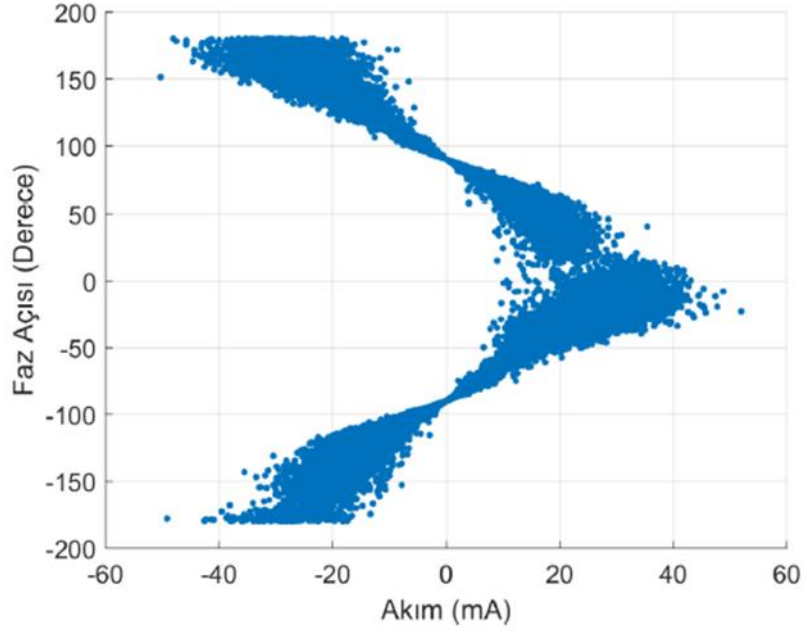


Şekil 4-33 14 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-33'te katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 14 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

14 kHz katkısız malzeme PD deseni incelendiğinde, ± 60 mA civarına ulaşan daha yüksek akım değerleri ile karşılaşılacaktır. Bu durum, katkısız malzemede deşarjların daha yüksek enerjiyle gerçekleştiğini ve yalıtkanın yer yer daha güçlü streslere maruz kaldığını işaret etmektedir. Ayrıca, daha geniş bir faz aralığında yoğunlaşan noktalar, katkısız malzemenin yalıtım performansının frekans artışında zayıfladığını göstermektedir.

4.5.3. 12 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

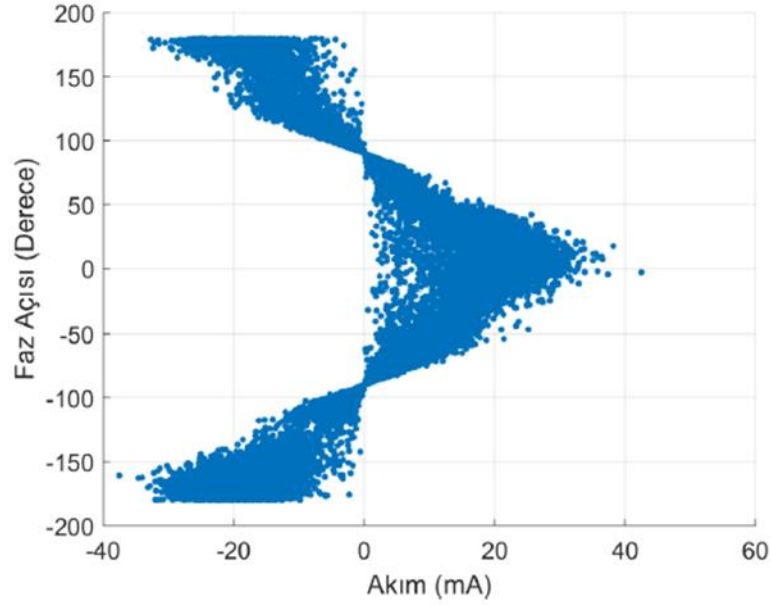


Şekil 4-34 12 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-34’te katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 12 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

12 kHz katkılı malzeme PD deseninde, akım genliği ± 40 mA değerlerine kadar uzanmakta olup, faz açısı yoğunlukları $\pm 150^\circ$ seviyesinde toplanmıştır. Bu desen, katkılı malzemenin ilgili frekanstaki deşarj olaylarını düzenli bir şekilde yönettiğini ve deşarj enerjilerinin katkı sayesinde daha kontrollü olarak dağıldığını düşündürmektedir.

4.5.4. 12 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

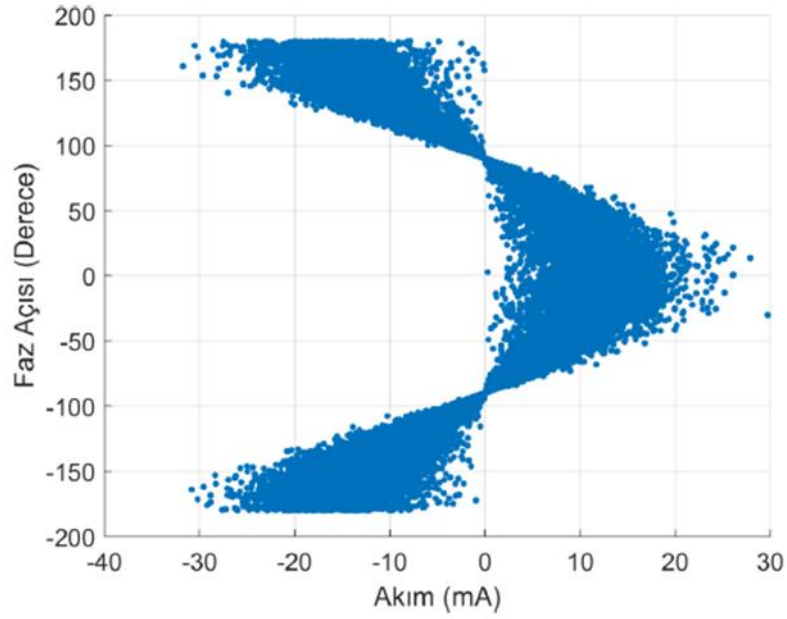


Şekil 4-35 12 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-35'te katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 12 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

12 kHz katkısız malzeme PD deseninde ise akım dağılımının daha düzensiz ve ± 40 mA civarına yayıldığı görülmektedir. Desen içerisindeki noktaların dağılımının dağınık olması, katkısız malzemenin frekans kaynaklı strese karşı duyarlılığını arttırmakta ve enerji dağılımının daha kaotik gerçekleştiğini göstermektedir.

4.5.5. 10 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

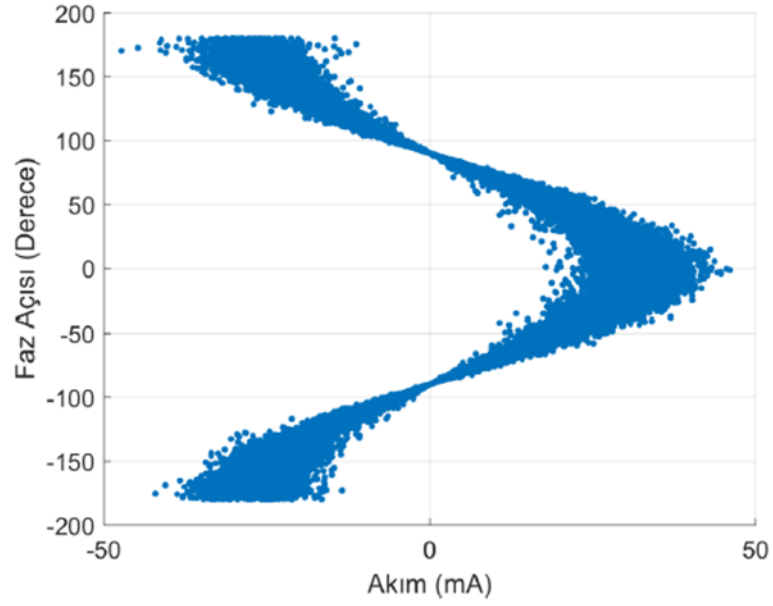


Şekil 4-36 10 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-36’da katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 10 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

10 kHz katkılı malzeme PD deseni ± 30 mA civarında daralmış, faz açısı ise $\pm 150^\circ$ arasında yoğunlaşmıştır. Bu durum, katkılı malzemenin daha düşük frekansta bile etkili bir şekilde enerji yoğunluğunu azaltarak deşarjları sınırladığını ve sistem kararlılığını artırdığını göstermektedir.

4.5.6. 10 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

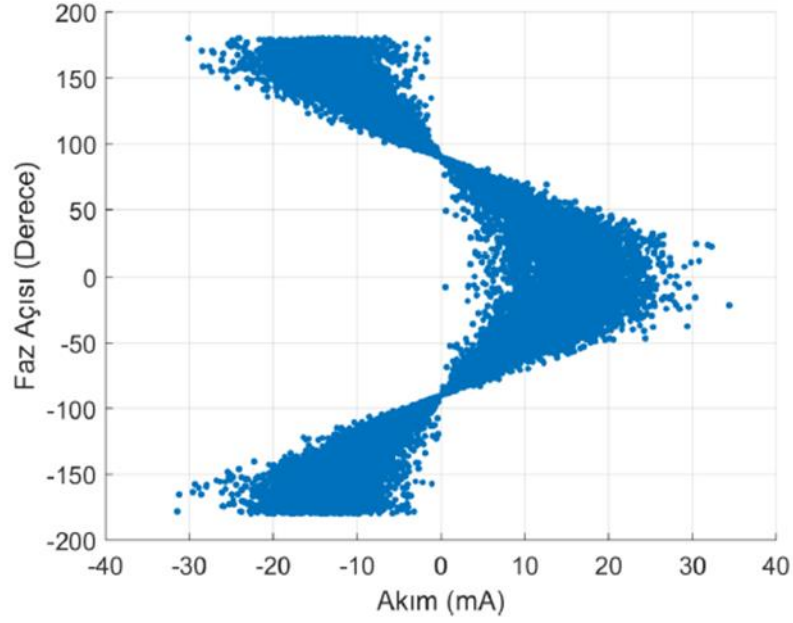


Şekil 4-37 10 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-37’de katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 10 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

10 kHz katkısız malzeme PD deseninde, ± 50 mA civarında daha geniş bir akım aralığında bir dağılım gözlenmektedir. Faz açılarında genişleyen bu dağılım, katkısız malzemenin 10 kHz frekansta daha heterojen bir deşarj davranışı sergilediğini göstermektedir.

4.5.7. 8 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

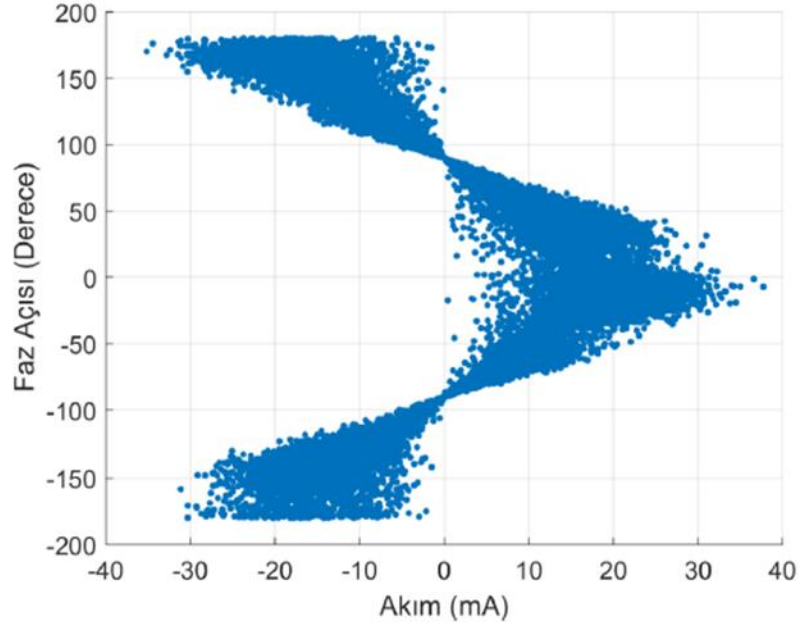


Şekil 4-38 8 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-38’de katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 8 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

8 kHz katkılı malzeme PD deseninde, ± 30 mA civarında yoğunlaşan ve faz açılarında net ve dar bir aralıkta kümelenmiş desen gözlenmiştir. Bu desen, katkının 8 kHz frekansta etkili olduğunu ve yalıtkan stabilitesini koruduğunu işaret etmektedir.

4.5.8. 8 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

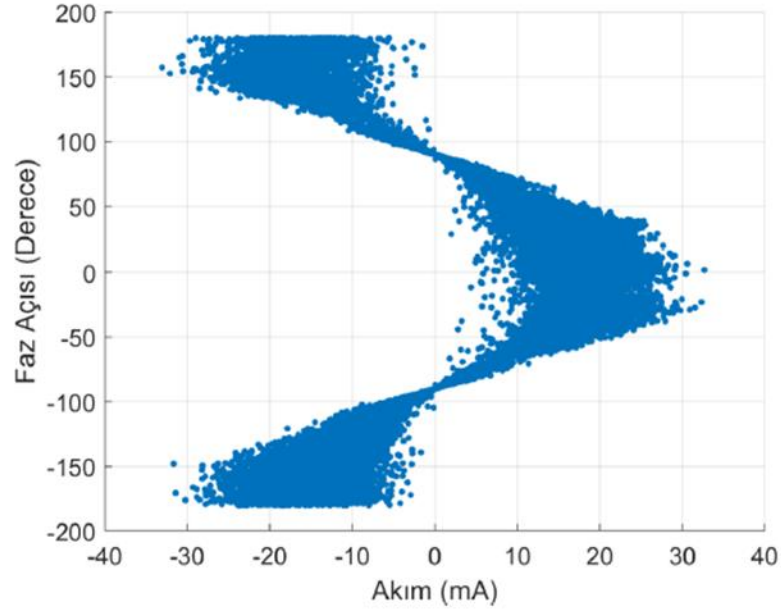


Şekil 4-39 8 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-39’da katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 8 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

8 kHz katkısız malzeme PD deseni ise ± 30 mA civarında daha geniş ve dağınık bir desen sergilemektedir. Katkısız malzemenin düşük frekansta dahi deşarjları tam anlamıyla kontrol altına alamadığı ve enerji dağılımının daha düzensiz olduğu görülmektedir.

4.5.9. 6 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

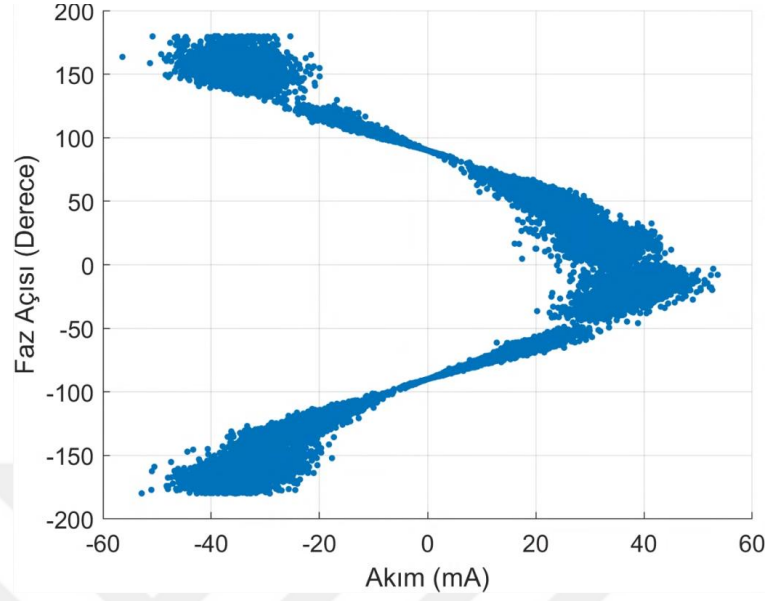


Şekil 4-40 6 kHz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-40'ta katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 6 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

6 kHz katkılı malzeme PD deseni ± 30 mA civarında oldukça belirgin ve net bir şekilde toplanmıştır. Katkı malzemesinin düşük frekansta enerji yoğunluğunu katkısız malzemeye oranla başarıyla sınırladığı ve kontrol altında tuttuğu gözlenmektedir.

4.5.10. 6 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

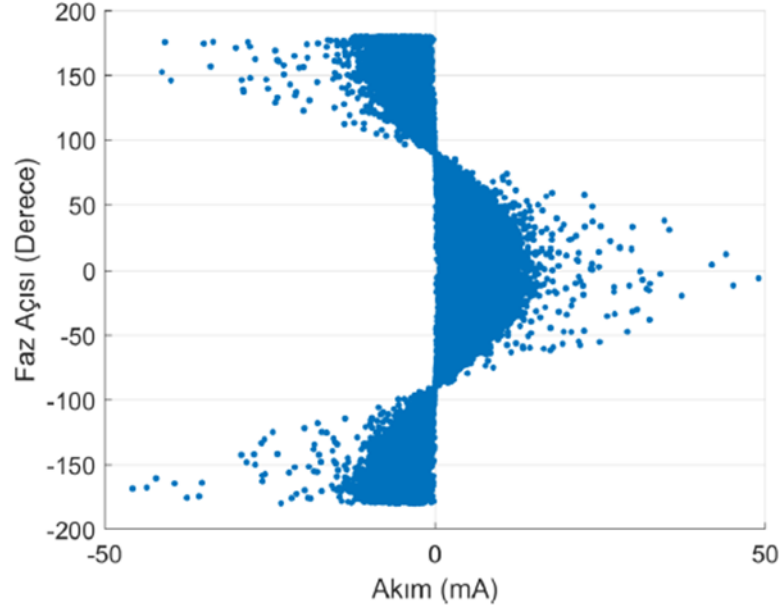


Şekil 4-41 6 kHz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-41’de katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 6 kHz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

6 kHz katkısız malzeme PD deseninde ise akım dağılımının ± 50 mA civarına genişlediği görülmektedir.. Bu durum, katkısız malzemenin düşük frekansta enerji kontrolünde sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

4.5.11. 50 Hz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni

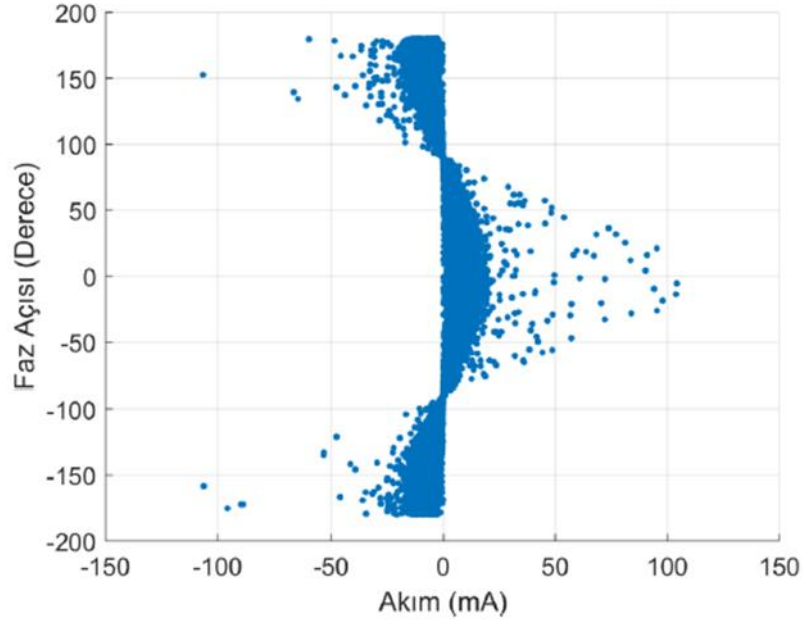


Şekil 4-42 50 Hz Katkılı Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-42’de katkılı katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 50 Hz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

50 Hz katkılı malzeme PD deseninde akım dağılımının ± 20 mA civarında yoğunlaştığı, ancak faz açısının dar ve net bir alanda toplandığı gözlenmiştir. Bu durum, katkının standart frekansta oldukça etkili olduğunu ve enerji yoğunluğunu minimize ettiğini göstermektedir.

4.5.12. 50 Hz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni



Şekil 4-43 50 Hz Katkısız Malzeme Deney Sonucu Kısmi Deşarj Deseni.

Şekil 4-43'te katkısız katı yalıtkan malzeme örneğine uygulanan 50 Hz frekanslı yüksek gerilim sonucu elde edilen kaçak akım sinyalleri vasıtasıyla elde edilen kısmi deşarj deseni görülmektedir.

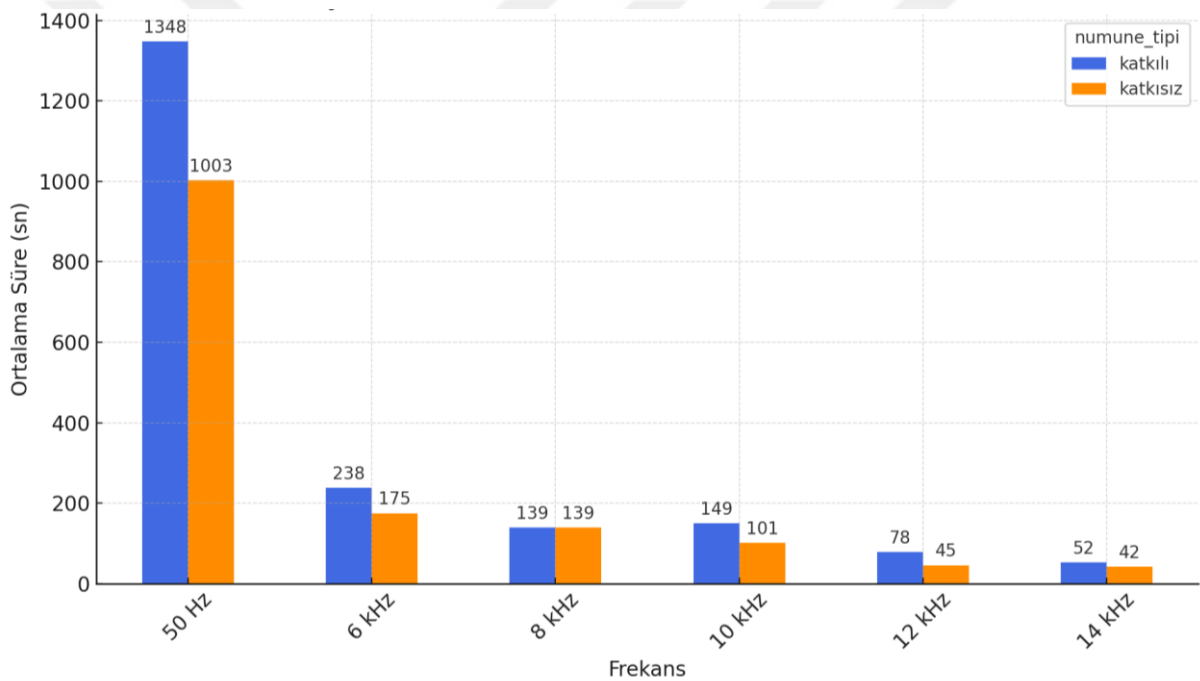
50 Hz katkısız malzeme PD deseninde ise ± 100 mA seviyelerine kadar çıkan geniş akım dağılımları ve geniş faz açısı aralıkları gözlenmektedir. Bu desen, katkısız malzemenin düşük frekansta bile enerji kontrolünde zorlandığını ve yalıtkan performansının katkılı duruma göre zayıf olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Tüm desenler genel olarak değerlendirildiğinde, frekans arttıkça hem katkılı hem katkısız malzemelerde akım ve faz açısı dağılımlarında farklılaşmalar meydana gelmiştir. Katkılı malzemelerde akım yoğunluğunun ve faz dağılımının daha kontrollü ve dar olduğu, bu sayede enerji kontrolünün daha etkin olduğu açıkça görülmektedir. Katkısız malzemelerde ise yüksek akım değerleri ve genişleyen faz açısı dağılımı, enerji yoğunluğunun kontrol edilmediğini ve malzemelerin daha yüksek stres altında çalıştığını işaret etmektedir. Bu bulgular ışığında, yüksek frekans uygulamalarında da düşük frekans uygulamalarında olduğu

gibi katkılı malzeme kullanımının yalıtkan stabilitesi açısından avantajlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.6. NUMUNE BOZULMA SÜRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde numuneye gerilim verildiği andan itibaren süre tutulmuş ve malzemenin bozuldu anda süre durdurularak not edilmiştir. Her bir frekansta ve her bir numune türü için üçer adet numunenin başarılı olarak bozulması sağlanmıştır. Aşağıdaki grafikte elde edilen süreler ortalaması alınarak sunulmuştur.



Şekil 4-44 Katkılı ve Katkısız Numunelerin Farklı Frekanslardaki Ortalama Delinme Süreleri

Hazırlanan ortalama delinme süresi grafiği, 50 Hz ile 14 kHz aralığında uygulanan farklı frekanslardaki elektriksel gerilim altında katkılı ve katkısız katı yalıtkan numunelerin ortalama delinme sürelerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Bu analiz, katkı maddesinin yalıtım performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiş olup, frekansa bağlı olarak malzemenin dayanım süresinde meydana gelen değişimleri ortaya koyması açısından büyük önem taşımaktadır.

Grafik verileri incelendiğinde, katkılı numunelerin genel olarak katkısız numunelere kıyasla daha yüksek ortalama delinme sürelerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, katkı maddesinin yalıtkan malzeme içerisindeki elektriksel dayanıklılığı artırıcı etkisine işaret etmektedir. Özellikle düşük frekanslı uygulamalarda katkının etkisi daha belirgin bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Örneğin 50 Hz frekansında katkılı numuneler ortalama 1348 saniyelik delinme süresi sergilerken, katkısız numunelerde bu değer 1003 saniye olarak tespit edilmiştir. Bu fark, katkılı numunelerin düşük frekanslı elektriksel streslere karşı daha uzun süre dayanım gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

Benzer biçimde 6 kHz frekansında da katkılı numuneler 238 saniyelik ortalama delinme süresi ile katkısız numunelerin 175 saniyelik ortalama süresine göre daha üstün bir performans sergilemiştir. 8 kHz frekansında katkının etkisinin azaldığı ve katkılı ile katkısız numunelerin her ikisinin de 139 saniyelik benzer delinme sürelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı maddesinin etkinliğinin belirli bir frekans aralığında azalabileceğine işaret etmektedir. Ancak 10 kHz frekansında katkılı numunelerin delinme süresi 149 saniyeye yükselirken, katkısız numunelerde bu sürenin 101 saniyeye düştüğü görülmüştür. Bu da katkının orta frekans bölgesinde yeniden etkili olmaya başladığını göstermektedir.

Daha yüksek frekanslar olan 12 ve 14 kHz’de ise katkılı numunelerin katkısızlara göre üstünlüğü devam etmekle birlikte farkın daraldığı gözlemlenmiştir. 12 kHz’de katkılı numunelerin ortalama delinme süresi 78 saniye iken katkısızlarda bu süre 45 saniyeye düşmüştür. 14 kHz frekansında ise katkılı ve katkısız numunelerin ortalama delinme süreleri sırasıyla 52 ve 42 saniye olarak tespit edilmiştir. Bu veriler, frekans arttıkça katkı maddesinin etkinliğinde kademeli bir azalma yaşandığını göstermektedir.

Elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, katkı maddesinin yalıtkan malzemelerin delinme dayanımını artırma potansiyeline sahip olduğu ve bu etkinin frekansa bağlı olarak değişkenlik gösterdiği sonucuna varılabilir. Özellikle düşük ve orta frekans aralıklarında katkı maddesinin olumlu etkisinin daha belirgin olduğu, yüksek frekanslı uygulamalarda ise bu etkinin görece zayıfladığı anlaşılmaktadır. Bu durum, katkı maddesinin frekans bağımlı elektriksel stres koşullarında yalıtım performansına katkı sağlama mekanizmasının, malzemenin dielektrik özellikleri ve katkı malzemesinin dağılım karakteristiğiyle ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı frekanslarda (6 kHz, 8 kHz, 10 kHz, 12 kHz, 14 kHz ve referans olarak 50 Hz) uygulanan yüksek gerilim altında katkılı ve katkısız katı yalıtkan malzemelerin karakteristikleri analiz edilmiştir. CEEMDAN yöntemiyle ayrıştırılan sinyallerden elde edilen IMF bileşenleri, hem zamansal hem de frekans-temelli olarak değerlendirilmiş, bu bileşenlerin enerji katkıları üzerinden malzemelerin elektriksel stres altındaki davranışları incelenmiştir.

Elde edilen bulgular, mevcut literatürdeki klasik 50 Hz temelli çalışmalarla karşılaştırıldığında, yüksek frekans uygulamalarının malzeme davranışı üzerinde daha belirgin yüzeysel gerilim yoğunlaşmaları ve kısa süreli enerji salınımları oluşturduğunu göstermektedir. Literatürde genellikle 50 Hz uygulamalarıyla yapılan çalışmalar ("örneğin ASTM D2303 standardına dayalı eğik düzlem testleri"), malzeme yüzeyinde oluşan izlenme ve aşınma davranışlarını uzun zaman diliminde değerlendirirken; bu çalışmada kullanılan yüksek frekans sinyalleri, daha kısa sürede daha yoğun enerji taşıyan deşarj olaylarını tetiklemiş ve bu durum IMF enerji bileşenleri aracılığıyla net biçimde ortaya konmuştur. Bu yönüyle çalışma, literatürde eksikliği hissedilen yüksek frekans-temelli yalıtkan karakterizasyonuna katkı sağlamaktadır.

Ayrıca, CEEMDAN yöntemi sayesinde mod karışımı problemi en aza indirilmiş ve IMF bileşenlerinin zamana bağlı spektral çözünürlüğü artırılmıştır. Bu sayede, sinyallerin geçici ve tekrarlayan davranışları ayrıntılı biçimde ortaya çıkarılmıştır. Özellikle 12 kHz frekansında, katkılı malzemelerde gözlenen IMF bileşenlerine ait enerji yoğunluklarının artması, bu malzemelerin belirli frekans aralıklarında daha fazla elektriksel stres altında kaldığını göstermiştir. Bu bulgular, literatürde katkılı yalıtkanların performans artışı sağladığı yönündeki genel yargı ile uyumlu olmakla birlikte, frekansa duyarlı bir etki mekanizmasının da varlığını ortaya koymuştur.

Bazı frekans aralıklarında katkısız malzemelerin belirli IMF'lerinde daha yüksek enerji birikimi gözlenmiş ve bu durum literatürde yeterince açıklanmamış olan "katkı malzemesinin dispersiyon etkinliği" ya da "yüksek frekans geçişlerinde yüzey polarizasyon etkisi" gibi

mekanizmalarla ilişkilendirilebilir. Ancak bu noktada daha ileri düzeyde mikroskobik ve termal analizlerin yapılması gerektiği düşünülmektedir.

Önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu tezde elde edilen bulgular belirgin bazı benzerlikler ve ayrışmalar göstermektedir. Örneğin [21] numaralı çalışmada yalnızca 50 Hz frekanslı gerilim altında katkılı yalıtkan malzemelerin yüzeysel izlenme davranışları incelenmiş ve düşük frekanslarda enerji birikiminin malzeme bozulmasına neden olduğu raporlanmıştır. Bu çalışma, katkılı malzemelerin yüzey dirençlerinin daha yüksek olması nedeniyle klasik AC uygulamalarda daha dayanıklı olduğunu göstermiştir. Ancak, bu tez kapsamında yapılan çalışmada 6–14 kHz aralığında yapılan uygulamalarda katkılı malzemelerde belirli frekans aralıklarında enerji birikiminin arttığı görülmüş ve bu durum, katkılarının yüksek frekans geçişlerine karşı her zaman olumlu sonuçlar doğurmadığını ortaya koymuştur. Bu yönüyle bu tez kapsamında elde edilen bulgular, düşük frekans literatürüyle uyumlu olmakla birlikte, frekans bağımlı etki mekanizmasının karmaşıklığını da göz önüne sermektedir.

Benzer şekilde [33] numaralı çalışmada, analiz edilen sinyallerde gerilimin frekansı yükseldiğinde aynı numunenin dayanabildiği gerilim seviyesinin azaldığı gösterilmiştir. Bu tez kapsamında gerilim seviyesinden farklı olarak dayanım süre olarak incelenmiş ve aynı zamanda işaretler üzerinde analizler yapılmıştır. CEEMDAN tabanlı analiz, daha yüksek frekanslarda zamanla sınırlı, dar bantlı fakat yüksek enerjili IMF bileşenlerinin varlığını göstermiştir. İki çalışmada da frekansın artışıyla birlikte delinmenin kolaylaştığı görülmüştür.

Ayrıca [44] numaralı Pfeiffer'in çalışmasında yüksek frekanslı gerilimlerin fiziksel yalıtım dayanıma etkisi deneysel olarak ölçülürken; bu tez çalışmasında bu etkinin sinyal boyutunda nasıl açığa çıktığı CEEMDAN yöntemiyle gösterilmektedir. Ancak her iki çalışma da yüksek frekanslı gerilimin yalıtım sistemlerine olan etkisini analiz eder ve frekans arttıkça malzeme dayanımının azaldığı sonucunu vurgular.

Sonuç olarak bu çalışmada, yüksek frekanslı elektriksel stres altında yalıtkan malzemelerin davranışları CEEMDAN yöntemi ile detaylı olarak incelenmiştir. Katkılı ve katkısız malzemelerin IMF enerji dağılımları üzerinden karşılaştırılması ile frekans-temelli performans farkları detaylı olarak ortaya konmuştur. CEEMDAN'ın yüksek zamansal çözünürlüğü sayesinde, klasik yöntemlerle tespit edilmesi zor olan geçici deşarj olayları ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Bu yönüyle, çalışma hem yöntemsel hem de uygulama açısından literatüre yenilikçi bir bakış açısı sunmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, farklı frekanslardaki (6 kHz, 8 kHz, 10 kHz, 12 kHz, 14 kHz ve 50 Hz) alternatif gerilimlerin katı yalıtkan malzemeler üzerindeki etkilerini incelemek ve CEEMDAN tabanlı sinyal işleme yöntemiyle bu etkilere dair ayrıntılı zamansal ve frekansal çıkarımlarda bulunmak amacıyla yürütülmüştür. Deneysel düzenek aracılığıyla katkılı ve katkısız numunelere uygulanan farklı frekanslardaki elektriksel stres altında, bilgisayar ses kartı ile kaydedilen kaçak akım sinyalleri CEEMDAN yöntemiyle ayrıştırılmış, her bir IMF bileşeni enerji dağılımı açısından analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular, klasik 50 Hz uygulamalarına kıyasla yüksek frekanslı stres koşullarının yalıtkan malzeme davranışında önemli farklılıklar yarattığını ortaya koymuştur. Eğik düzlem deney düzeneğinde uygulanan 50 Hz ve yüksek frekanslı gerilimlere 8 kHz frekansındakiler hariç; katkılı malzemeler katkısız malzemelere oranla daha uzun süre dayanım göstermiştir. Ayrıca katkılı malzemeler, belirli frekans aralıklarında enerji birikimini azaltarak daha kararlı bir elektriksel karakteristik sunmuş, ancak 12 kHz frekansı için bu durum geçerli olmamıştır. Bu durum, katkılı sistemlerin frekansa duyarlı bir yanıt sergilediğini göstermiştir. IMF bileşenleri aracılığıyla yapılan enerji analizleri, malzeme-tabanlı farklılıkların ayrıntılı olarak ortaya konmasını sağlamış ve bu yönüyle çalışma, hem sinyal işleme yöntemi hem de deneysel tasarım açısından literatüre katkı sunmuştur.

Ayrıca, CEEMDAN yönteminin özellikle geçici ve kararsız karakterli sinyallerin ayrıştırılmasında son derece başarılı olduğu gözlemlenmiştir. IMF bileşenlerinden elde edilen enerji dağılımı, frekans davranışı ve zaman içerisindeki genlik değişimleri gibi çıktılar sayesinde malzeme yüzeyinde gerçekleşen elektriksel olayların tespiti daha hassas hale gelmiştir. Bu yönüyle, tez çalışması yalıtkan sistemlerin frekansa duyarlı karakterizasyonuna yönelik öncü bir metodoloji ortaya koymuştur.

Gelecek çalışmalarda, katkılı malzemelerin iç yapısına ilişkin SEM (Scanning Electron Microscope) ve EDX (Energy Dispersive X-ray) gibi tekniklerle destekleyici yapısal analizler yapılabilir.

Farklı katkı oranları, şekilleri (nano, mikro), dağılım homojenliği gibi parametrelerin IMF enerji dağılımına etkileri detaylı biçimde incelenebilir.

CEEMDAN yönteminin ötesine geçilerek VMD (Variational Mode Decomposition) gibi alternatif adaptif ayrıştırma teknikleriyle karşılaştırmalı analizler yapılabilir.

Deneysel verilerin zamana bağlı eğilimlerini daha iyi anlamak adına IMF bileşenleri üzerinde entropy, RMS, kurtosis gibi istatistiksel parametrelerin zaman serisi boyunca takibi yararlı olabilir.

Bu çalışmanın sonuçları, yüksek frekanslı HVAC bileşen tasarımı, kablo izolasyon sistemlerinin ömrü ve arıza öngörüsü gibi alanlara uyarlanarak pratik uygulamalara dönüştürülebilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Uzunoğlu, C., P., 2005, Polimerik Yalıtkanlardaki Kaotik Yüzeysel Aşınımların Brown Hareketi İle Modellenmesi, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2]. Stocks, S., 1996, Synopsis-standardisation of test procedures for non-ceramic insulation, IEE Colloquium on Review of Outdoor Insulation Materials, 7/1-7/3.
- [3]. Houlgate, R., 1996, Outdoor testing of nonceramic insulators, IEE Colloquium on Review of Outdoor Insulation Materials, 5/1-5/4.
- [4]. ASTM D2303, 1978, Standard test methods for liquid contaminant, inclined plane tracking and erosion of insulating materials, 552-556.
- [5]. International Electrotechnical Commission, 1984, IEC 587, Inclined Plane Tracking Test Method.
- [6]. Kuffel, E., Zaengl, W.S., 1992, High Voltage Engineering, 1st ed., Pergamon Press, Oxford, 0-08-024213-8.
- [7]. Arora, R., & Mosch, W. (2022). High voltage and electrical insulation engineering. John Wiley & Sons.
- [8]. Yin, X., Su, Y., Xi, T., Chen, B., Zhang, L., Zhang, X., ... & Shao, X. (2022). Research progress on photoacoustic SF6 decomposition gas sensor in gas-insulated switchgear. Journal of Applied Physics, 131(13).
- [9]. Sun, J., Song, S., Zheng, J., Li, Z., Huo, J., Wang, Y., ... & Qin, D. (2022). A review on surface flashover phenomena at DC voltage in vacuum and compressed gas. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 29(1), 1-14.
- [10]. Malik, N. H., Al-Arany, A. A., Qureshi, M. I., 1998, Electrical insulation in power systems, Marcel Dekker, Inc, ISBN 08247-0106-2.

- [11]. Shugg, W.T., 1995, Handbook of Electrical and electronic insulating materials, 2.ed., IEEE Press, ISBN 0-7803-1030-6
- [12]. Ogbonna, V. E., Popoola, P. I., Popoola, O. M., & Adeosun, S. O. (2022). A comparative study on the failure analysis of field failed high voltage composite insulator core rods and recommendation of composite insulators: A review. *Engineering Failure Analysis*, 138, 106369.
- [13]. Hussain, M. K., & Alshadeedi, B. M. (2023). Optimal design of high voltage composite insulators with grading rings in different configurations. *Electric Power Systems Research*, 221, 109493.
- [14]. Haque, S. M., Ardila-Rey, J. A., Umar, Y., Mas' ud, A. A., Muhammad-Sukki, F., Jume, B. H., ... & Bani, N. A. (2021). Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment. *Energies*, 14(10), 2758.
- [15]. Aljamali, N. M., AlNajim, M. M., & Alabbasy, A. J. (2021). Types of electrical insulators and their electrical applications. *J. Digit. Integr. Circuits Electr. Devices*, 6, 18-23.
- [16]. Zhang, X., Cheng, L., Liu, Y., Tao, B., Wang, J., & Liao, R. (2022). A review of non-destructive methods for the detection tiny defects within organic insulating materials. *Frontiers in Materials*, 9, 995516.
- [17]. Adler, A., 1971, Physics of Electronic Ceramics, Part A. L. L. Hench and D. B. Dove (Eds.), Marcel Dekker, Inc., New York.
- [18]. Muangpratoom, P., Khonchaiyaphum, I., & Vittayakorn, W. (2023). Improvement of the Electrical Performance of Outdoor Porcelain Insulators by Utilization of a Novel Nano-TiO₂ Coating for Application in Railway Electrification Systems. *Energies*, 16(1), 561. <https://doi.org/10.3390/en16010561>
- [19]. Dorf, R.C., 1993, The Electrical Engineering Handbook, CRC Press, 1132-1151.
- [20]. Jenkins, A., Kratochvíl, P., Stepto, R. and Suter, U. (1996) Glossary of basic terms in polymer science (IUPAC Recommendations 1996). *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 68 (Issue 12), pp. 2287-2311.

- [21]. Ersoy, A., 2007, Elektriksel Yalıtım Sistemlerinde Kullanılan Polimerik izolatörlere Bor Katkısı ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Tez (Doktora), İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22]. Ogbonna, V. E., Popoola, A. P. I., Popoola, O. M., & Adeosun, S. O. (2022). A review on corrosion, mechanical, and electrical properties of glass fiber-reinforced epoxy composites for high-voltage insulator core rod applications: challenges and recommendations. *Polymer Bulletin*, 79(9), 6857-6884.
- [23]. Raju, G.G., 2003, Dielectrics in Electric Fields, 1st ed., Marcel Dekker, New York, 0-8247-0864-4.
- [24]. Kreuger, F.H., 1991, Industrial High Voltage, 1. Fields, 2. Dielectrics, 3. Constructions, 1st ed., Delft University Press, The Netherland, 90-6275-561-5.
- [25]. Nadolny, Z. (2022). Electric field distribution and dielectric losses in XLPE insulation and semiconductor screens of high-voltage cables. *Energies*, 15(13), 4692.
- [26]. KJ, A. (2024). Application of PVC—A superior material in the fields of Science and Technology. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(15), 2089-2107.
- [27]. Saleem, M. Z., & Akbar, M. (2022). Review of the performance of high-voltage composite insulators. *Polymers*, 14(3), 431.
- [28]. Gümüş, S., Aksoy, K., & Aytac, A. (2024). Functionalized Unsaturated Polyester as Electrical Insulation Varnish. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 225(13), 2400127.
- [29]. Borghei, M., & Ghassemi, M. (2021). Insulation materials and systems for more-and all-electric aircraft: A review identifying challenges and future research needs. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(3), 1930-1953.
- [30]. Rumi, A., Marinelli, J. G., Barater, D., Cavallini, A., & Seri, P. (2022). The challenges of reliable dielectrics in modern aerospace applications: The hazard of corona resistant materials. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(4), 4646-4653.
- [31]. Abdulah, C. S. K., Rohani, M. N. K. H., Ismail, B., Isa, M. A. M., Rosmi, A. S., Mustafa, W. A., & Kamarol, M. (2021, July). Electrical Tree Investigation on Solid Insulation for High

Voltage Applications. In *2021 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (ISIEA)* (pp. 1-6). IEEE.

[32]. Mirza, A., Chen W., Bazzi A., Nguyen H., Cao Y. and Hao L., "Modeling Electrical Aging of Polyimide Kapton HN Under High-Voltage High-Frequency Pulse Waveforms," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 6, pp. 2394-2401, Dec. 2022, doi: 10.1109/TDEI.2022.3204075

[33]. K. Elanseralathan, M. J. Thomas and G. R. Nagabhushana, "Breakdown of solid insulating materials under high frequency high voltage stress," Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.00CH36347), Xi'an, China, 2000, pp. 999-1001 vol.2, doi: 10.1109/ICPADM.2000.876399.

[34]. Güzelbeyoğlu, N. 2005. Elektrik makinaları (Birinci-İkinci Teori Kısım), Birsen Yayınevi, İstanbul.

[35]. Kheraluwala, M. H., Novotny, D. W. and Divan D. M., "Design considerations for high power high frequency transformers," 21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists, San Antonio, TX, USA, 1990, pp. 734-742, doi: 10.1109/PESC.1990.131262.

[36]. Goldberg, A. F., Kassakian, J. G., Schlecht, M. F., "Issues Related to 1-10 MHz Transformer Design", IEEE Trans. Power Electron., vol. 4, Jan. 1989, pp.113-123

[37]. Goldberg, A. F., Schlecht, "The Relationship Between Size and Power Dissipation in a 1-10 MHz Transformer", IEEE PESC Conf. Proc., June 1989.

[38]. Bjerkan, E. (2005). High frequency modeling of power transformers. stresses and diagnostics.

[39]. Kobravi, K., Iravani, R., & Kojori, H. A. (2012, September). A review and implementation of matrix-converter for aerospace application. In 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 698-705). IEEE.

[40]. W. White and I. Galperin, "Material Considerations for high frequency, high power capacitors", IEEE Transactions on Electrical Insulation, V01.20, No. 1, PP.66-69, 1985.

- [41]. W. Khachen and J.R. Laghari, "Polypropylene for high voltage high frequency airborne applications", Conference record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada, June, pp.80-83, 1990.
- [42]. Renz, D. D. (1984, January). High voltage-high power components for large space power distribution systems. In Intersoc. Energy Conversion Eng. Conf. (No. E-2093).
- [43]. Y. Ikeda, T. Tanaka, "Frequency acceleration characteristics in internal discharge endurance tests by a glass-covered electrode system", IEEE Trans. Electric. Insul., Vol. 17, pp. 64-69, 1982.
- [44]. Pfeiffer, W. (1991). High-frequency voltage stress of insulation. Methods of testing. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 26(2), 239-246.
- [45]. <http://www.camelyafresins.com/> CE92 Teknik Bilgi Formu Erişim tarihi: 05.01.2024
- [46]. Can, A., & Belen, İ. N. (2024). Identification of potential marker bacteria with metagenome data in boron mine detection. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences.
- [47]. Adair, R. (2007). Boron. The Rosen Publishing Group, Inc.
- [48]. <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/tarihce.html> Erişim tarihi: 09.12.2024
- [49]. <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/rezervler.html> Erişim tarihi: 09.12.2024
- [50]. <https://www.etimaden.gov.tr/storage/pages/March2019/1-borik-asit1.pdf> Erişim tarihi: 09.12.2024
- [51]. Texas Instruments, 2020, OPA549: High-Voltage, High-Current Op Amp datasheet, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa549.pdf>, [Ziyaret tarihi: 3 Ocak 2024].
- [52]. <https://www.gwinstek.com/en-US/products/downloadSeriesDownNew/12789/481> Erişim tarihi: 09.12.2024
- [53] Veltman, A., Pulle, D.W.J., De Doncker, R.W. (2016). The Transformer. In: Fundamentals of Electrical Drives. Power Systems. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29409-4_3

- [54] Standard test methods for liquid contaminant, inclined plane tracking and erosion of insulating materials, 2004, ASTM (D2303-97), 1-10.
- [55]. IEC 587, 1984, Inclined Plane Tracking Test Method.
- [56]. MASON, J.H., 1983, Summary of Factors which affect the results of Inclined Plane Tests, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1-3, 1983.
- [57]. Wang, J., Liu, L., & Wang, Y., 2021, An improved method based on CEEMDAN and its application in signal processing, *Journal of Signal Analysis*, 15 (4), 205–217.
- [58]. Wu, Z., & Huang, N. E., 2009, Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1 (1), 1–41.
- [59]. Wu, Z., & Huang, N. E., 2005, The development of ensemble empirical mode decomposition method, In: Garzelli, A. (ed.), Chapter 5, *Proceedings of the 2005 International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images*, IEEE, Bilkent, Turkey, 45–50.
- [60]. Yeh, J. R., Shieh, J. S., & Huang, N. E., 2010, Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2 (2), 135–156.
- [61]. Torres, M. E., Colominas, M. A., Schlotthauer, G., & Flandrin, P., 2011, A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 22–27 May 2011 Prague, IEEE Press, Prague, Czech Republic, 4144–4147.
- [62]. Tian, Z., & Jia, Y. (2023). A method for portable PPG signal dynamic acquisition and denoise based on CEEMDAN and wavelet transform. *Journal of Instrumentation*, 18(01), P01023.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

ETİK KURUL İZİN YAZISI

KURUM İZNİ YAZILARI