T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

FARKLI YÜKSEK GERİLİM TİPLERİNİN YALITIM YAĞLARININ DİELEKTRİK DAYANIMLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Fatih ATALAR

DANIŞMAN
Doç. Dr. Aysel ERSOY

II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Pawel ROZGA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Ekim, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Fatih ATALAR tarafından, **Doç. Dr. Aysel ERSOY** danışmanlığında hazırlanan **" FARKLI YÜKSEK GERİLİM TİPLERİNİN YALITIM YAĞLARININ DİELEKTRİK DAYANIMLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **28/10/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Doç. Dr. Aysel ERSOY İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Mukden UĞUR Türk-Alman Üniversitesi Robotlar ve Akıllı Sistemler Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Rana ORTAÇ KABAOĞLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Kontrol ve Kumanda Sistemleri Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Emrah DOKUR Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

JURİ TEZ ONAY FORMU

Doküman No	İlk Yayın Tarihi	Revizyon No	Revizyon Tarihi	Sayfa No
414.1.17F	04.03.2020	00	00.00.0000	1 / 1

Bu çalışma 28.10.2022 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Doç. Dr. Aysel ERSOY
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr.Öğr.Üyesi Rana ORTAÇ KABAOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Mukden UĞUR
Türk-Alman Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Doç. Dr. Emrah DOKUR
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Kıymetli eşim Şeyma'ya ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

FARKLI YÜKSEK GERİLİM TİPLERİNİN YALITIM YAĞLARININ DİELEKTRİK DAYANIMLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FDK-2021-36036

TEŞEKKÜR

Bilginin en önemli güç olduğu çağımızda akademik olarak bilime katkım olmasından dolayı sonsuz mutluluk duyuyorum. Bilginin sınırsız olduğu bu çağda sosyal yaşamla akademik yaşam arasındaki dengeyi sağlamamda ve geniş bilgi birikimiyle bu tezin oluşma sürecinin her detayında yapıcı ve anlayışlı yaklaşımıyla benim bu seviyeye gelmeme katkısı olan kıymetli danışmanım Doç. Dr. Aysel ERSOY'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca bilgi birikimi ve desteğiyle uzakta da olsa her zaman sorularıma cevap verip bu tezin oluşmasında emekleri olan 2. Danışmanım Doç. Dr. Pawel ROZGA'ya teşekkürlerimi sunuyorum. Zaman zaman kaygıyı ve stresi yüksek seviyelere çıkaran bu süreçte desteklerini esirgemeyen ve çokça hissettiren eşime, anneme ve kız kardeşime de ayrı ayrı sonsuz teşekkür ederim.

Ekim 2022 **Fatih ATALAR**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
JURİ TEZ ONAY FORMU ..... **iii**
BEYAN ..... **iv**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **vi**
TEŞEKKÜR ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xvii**
ABSTRACT ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. İYONİZASYON MEKANİZMASI 11
2.1.1. Çarpma ile İyonizasyon 11
2.1.2. Termik İyonizasyon 12
2.2. SIVI YALITKANLARDA DELİNME MEKANİZMALARI 13
2.2.1. Sıvı Dielektriklerin Delinme Dayanımını Etkileyen Faktörler 13
2.3. SIVI YALITKANLARDA DELİNME TÜRLERİ 16
2.3.1. Elektromekanik Delinme 17
2.3.2. Termik Delinme 17
2.3.3. Elektriksel Delinme 17
3. YÖNTEM **18**
3.1. DENEY DÜZENEĞİNİN HAZIRLANMASI 18
3.2. METAL PARÇACIKLARIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ İÇİN DENEY DÜZENEĞİNİN KURULMASI 26
4. BULGULAR **32**
4.1. AC GERİLİM DENEYLERİ 32

4.2. DC GERİLİM DENEYLERİ 38
4.3. DARBE GERİLİMİ TESTLERİ 44
4.4. AKIM SİNYALLERİ İŞLEME METOTLARI 51
4.5. METAL PARÇACIKLARIN ETKİSİNİN İNCELENDİĞİ DENEYLERE AİT BULGULAR 75
5. TARTIŞMA 103
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 104
KAYNAKLAR 107
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 113
ETİK KURUL İZİN YAZISI 114
KURUM İZNİ YAZILARI 115
ÖZGEÇMİŞ 116

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1.1: VDE ve Disk Elektrotlar 18

Şekil 3.1.2: Darbe Gerilimi Testinde Kullanılan İğne Elektrot ve Toprak Elektrot..... 19

Şekil 3.1.3: Elektrot Tutucu Düzenekler (a-VDE Elektrot, b-Disk Elektrot)..... 19

Şekil 3.1.4: Deney Kazanı içinde Disk Elektrot Düzeninde Yağlar (a-Mineral Yağ, b-Doğal Ester Yağ, c-Sentetik Ester Yağ)..... 20

Şekil 3.1.5: Deney Kazanı içinde VDE Elektrot Düzeninde Yağlar (a-Mineral Yağ, b-Doğal Ester Yağ, c-Sentetik Ester Yağ)..... 21

Şekil 3.1.6: AC Yüksek Gerilim Kaynağı Devre Şeması..... 22

Şekil 3.1.7: DC Yüksek Gerilim Kaynağı Devre Şeması, R_1, R_2: Rezistif Gerilim Bölücü 23

Şekil 3.1.8: AC ve Negatif DC Deney Düzeneği Fotoğrafı 23

Şekil 3.1.9: Akım Verisi Elde Etme Düzeneği..... 24

Şekil 3.1.10: Darbe Gerilimi Veri Elde Etme Düzeneği 25

Şekil 3.1.11: İğne-Silindir Elektrot Sistemi ve Optik Kablo..... 25

Şekil 3.1.12: Darbe Gerilimi Testi Devre Şeması 26

Şekil 3.2.1: Nano Parçacıkların Etkisinin İncelenmesi için Kurulan Deney Düzeneği 27

Şekil 3.2.2: Akım Ölçümü için Kurulmuş Devre Şeması..... 28

Şekil 3.2.3: Deney Kazanı içinde VDE Elektrot Düzeninde Sıvı Dielektrikler (a-Mineral Yağ, b- Sentetik Ester Yağ, c- Doğal Ester Yağ)..... 29

Şekil 3.2.4: Deney Kazanı içinde Disk Elektrot Düzeninde Sıvı Dielektrikler (a-Mineral Yağ, b- Sentetik Ester Yağ, c- Doğal Ester Yağ)..... 30

Şekil 3.2.5: Demir (a) ve Bakır (b) Partiküllerinin Ağırlık Ölçüm Düzeneği..... 31

Şekil 4.1.1: VDE Elektrot Düzeninde AC Delinme Gerilimlerinin Grafiği..... 33

Şekil 4.1.2: Disk Elektrot Düzeninde AC Delinme Gerilimlerinin Grafiği 34

Şekil 4.2.1: VDE Elektrot Düzeninde Negatif DC Delinme Gerilimleri 39

Şekil 4.2.2: Disk Elektrot Düzeninde Negatif DC Delinme Gerilimleri 39

Şekil 4.3.1: Mineral Yağ Darbe Gerilimi Dalga Formları a) Delinme Yokken b) Delinme Anında 46

Şekil 4.3.2: Doğal Ester Yağ Darbe Gerilimi Dalga Formları a) Delinme Yokken b) Delinme Anında 47

Şekil 4.3.3: Sentetik Ester Yağ Darbe Gerilimi Dalga Formları a) Delinme Yokken b) Delinme Anında..... 49

Şekil 4.4.1: Disk Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 53

Şekil 4.4.2: Disk Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 55

Şekil 4.4.3: VDE Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 57

Şekil 4.4.4: VDE Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 58

Şekil 4.4.5: Disk Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 60

Şekil 4.4.6: Disk Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 62

Şekil 4.4.7: VDE Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 64

Şekil 4.4.8: VDE Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 65

Şekil 4.4.9: Disk Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 67

Şekil 4.4.10: Disk Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 69

Şekil 4.4.11: VDE Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 71

Şekil 4.4.12: VDE Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm) 72

Şekil 4.5.1: Mineral Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 76

Şekil 4.5.2: Mineral Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 77

Şekil 4.5.3: Bakır Katkılı Mineral Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)..... 78

Şekil 4.5.4: Bakır Katkılı Mineral Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)..... 79

Şekil 4.5.5: Bakır Katkılı Mineral Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 80

Şekil 4.5.6: Bakır Katkılı Mineral Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)..... 81

Şekil 4.5.7: Doğal Ester Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 85

Şekil 4.5.8: Doğal Ester Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 86

Şekil 4.5.9: Bakır Katkılı Doğal Ester Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 87

Şekil 4.5.10: Bakır Katkılı Doğal Ester Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)..... 88

Şekil 4.5.11: Bakır Katkılı Doğal Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)..... 89

Şekil 4.5.12: Bakır Katkılı Doğal Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)..... 90

Şekil 4.5.13: Sentetik Ester Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 94

Şekil 4.5.14: Sentetik Ester Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 95

Şekil 4.5.15: Bakır Katkılı Sentetik Ester Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 96

Şekil 4.5.16: Bakır Katkılı Sentetik Ester Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler) 97

Şekil 4.5.17: Bakır Katkılı Sentetik Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)..... 98

Şekil 4.5.18: Bakır Katkılı Sentetik Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)..... 99

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.2.1: Sıvıların Dielektrik Dayanımına Yabancı Parçacıkların Etkisi 15

Tablo 3.1.1: Yağların Elektriksel ve Fiziksel Parametreleri 22

Tablo 4.1.1: VDE Elektrot Düzeninde AC Delinme Gerilimleri 32

Tablo 4.1.2: Disk Elektrot Düzeninde AC Delinme Gerilimleri 34

Tablo 4.1.3: AC Testlerde Elektrot Düzenleri Arasındaki DG Farkları (VDE_{DG}-$DİSK_{DG}$) 35

Tablo 4.1.4: AC Testlerdeki Standart Sapma Değerleri 36

Tablo 4.1.5: AC Testlerdeki Standart Sapma/Delinme Gerilimi Değerleri ($\boldsymbol{s/\bar{x}}$) 36

Tablo 4.2.1: Negatif DC Delinme Gerilimleri (-kV) 38

Tablo 4.2.2: Negatif DC Testlerde Elektrot Düzenleri Arasındaki DG Farkları (VDE_{DG}-$DİSK_{DG}$) 40

Tablo 4.2.3: AC ve DC Testlerdeki DG Farkları (DC_{DG}-AC_{DG}) 41

Tablo 4.2.4: Negatif DC Testlerdeki Standart Sapma Değerleri 42

Tablo 4.2.5: Negatif DC Testlerdeki Standart Sapma/Delinme Gerilimi Değerleri ($\boldsymbol{s/\bar{x}}$) 42

Tablo 4.3.1: Darbe Gerilimi Testlerinde Ölçülen ve Hesaplanan Değerler 45

Tablo 4.5.1: Mineral Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm) 83

Tablo 4.5.2: Doğal Ester Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm) 92

Tablo 4.5.3: Sentetik Ester Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm) 100

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\boldsymbol{l}$	: Elektronun İyonizasyon Başlangıcı için Kat Ettiği Mesafe
$\boldsymbol{I}$	: İyonizasyon Potansiyeli
$\boldsymbol{v}$	: Elektron Hızı
$\boldsymbol{F}$	: Elektrik Alan Yoğunluğu
$\boldsymbol{w_t}$	: İyonizasyon Potansiyeli Frekansı
$\boldsymbol{m}$	: Elektron Kütlesi
$\boldsymbol{W_i}$	: İyonizasyon Enerjisi
$\boldsymbol{\theta}$	: İyonize olmuş Parçacık Sayısı Oranı
$\boldsymbol{p}$	: Basınç
$\boldsymbol{k}$	: Boltzmann Sabiti
$\boldsymbol{\varepsilon}$	: Yabancı Parçacık Dielektrik Sabiti
$\boldsymbol{\varepsilon_s}$	: Sıvı Dielektrik Sabiti
$\boldsymbol{r}$	: Yabancı Parçacık Yarıçapı
$\boldsymbol{E}$	: Elektrik Alan Şiddeti
$\boldsymbol{T}$	: Sıcaklık
$\boldsymbol{^oA}$	: Ångström
$\boldsymbol{p_D}$	: Dış Basınç
$\boldsymbol{p_H}$	: Gaz Kabarcıklarının Basıncı
$\boldsymbol{p_A}$	: Yapışkan Basıncı
Ω	: Ohm
$\boldsymbol{\bar{x}}$	: Delinme Gerilimi
$\boldsymbol{x_i}$	: i. Deneydeki Delinme Gerilimini
$\boldsymbol{s}$	: Standart Sapma
$\boldsymbol{\sigma}$	: Darbe Geriliminde Standart Sapma
$\boldsymbol{K}$	: Darbe Geriliminde Ortalama Delinme Gerilimi
$\boldsymbol{\sigma_{\bar{x}}}$	: Darbe Geriliminde Standart Hata
$\boldsymbol{v_p}$	: Darbe Gerilimi Yayılma Hızı
$\boldsymbol{x(t)}$	: EMD Yönteminde Giriş Sinyali

$c_k(t)$: EMD Yönteminde Modülasyonlu Sinyal

$r(t)$: EMD Yönteminde Kalıntı

$a_k(t)$: EMD Yönteminde Sinyalin Pozitif Genliği

$\emptyset_k(t)$: Anlık Faz

$b_k(t)$: Her Adımdaki Anlık IMF Değeri

v_M : VMD Yönteminde Merkez Frekans

$f(t)$: Fourier Dönüşümü Giriş Sinyali

$F(w)$: Fourier Dönüşümü Frekans Sinyali

HD_n : n. Harmonik Değeri

I_n : n. Sızıntı Akımı Değeri

Kısaltmalar	**Açıklama**
kV	: kiloVolt
AC	: Alternatif Gerilim (Alternative Current)
DC	: Doğru Gerilim (Direct Current)
LI	: Darbe Gerilimi (Lightning Impulse)
VDE	: Verband Deutscher Elektrotechniker
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
mm	: Milimetre
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
EMD	: Ampirik Mod Ayrıştırması (Empirical Mode Decomposition)
VMD	: Değişken Mod Ayrıştırması (Variational Mode Decomposition)
ms	: Milisaniye
Hz	: Hertz
mA	: miliAmper
KD	: Kısmi Deşarj
RMS	: Efektif Değer
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared)
cm	: Santimetre
E_d	: Delinme Dayanımı
µs	: Mikrosaniye
LIT	: Darbe Gerilimi Testi (Lightning Impulse Test)

kJ	: kilo-Joule
s	: Saniye
g	: Gram
l	: Litre
ppm	: Milyonda bir Konsantrasyon Değeri (parts per million)
kVA	: kiloVolt Amper
pF	: pikoFarad
nm	: Nanometre
d	: Elektrotlar Arası Mesafe
DG	: Delinme Gerilimi
TtB	: Delinmeye Kadar Geçen Zaman (Time to Breakdown)
NSD	: Normalize Edilmiş Standart Fark (Normalized Standard Difference)
$\boldsymbol{THD}$	: Toplam Harmonik Bozulma (Total Harmonik Distortion)

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI YÜKSEK GERİLİM TİPLERİNİN YALITIM YAĞLARININ DİELEKTRİK DAYANIMLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Fatih ATALAR

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman : Doç. Dr. Aysel ERSOY

II. Danışman : Doç. Dr. Pawel ROZGA

Sıvı dielektrikler birbirlerinden farklı yapıya sahip olmalarına karşın kullanıldıkları elektriksel ekipmanlarda aynı görevleri gerçekleştirmek üzere kullanılmaktadırlar. Transformatörlerde kullanılan yalıtım yağlarının, benzer koşullarda farklı gerilim türleri altındaki yalıtım performansları dielektrik dayanımları açısından önemli bilgiler verecektir. Bu çalışmada mineral yağ, doğal ester yağ ve sentetik ester yağ olmak üzere üç farklı sıvı dielektrik test edilmiştir. Mineral yağ olarak Nytro TAURUS, doğal ester yağ için MIDEL en1204 ve sentetik ester yağ için MIDEL 7131 yağları kullanılmıştır. AC ve negatif DC gerilim altındaki testleri ASTM D1816-12 ve ASTM D877/87M-19 standartları gereğince disk ve VDE tip elektrotlar kullanılarak 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm elektrot açıklıklarında gerçekleştirilmiştir. Darbe gerilimi testleri ise IEC 60897 no'lu standart kapsamında yapılmıştır. AC elektrik alan stresi altında delinmeden önceki 500 ms'lik akım verisi Ampirik Mod Ayrıştırması (Empirical Mode Decomposition-EMD) ve Değişken Mod Ayrıştırması (Variational Mode Decomposition - VMD) yöntemleri kullanılarak ayrıştırılmıştır. Bu sayede elektriksel tam delinmeden önceki

süreç analiz edilmiştir. Ayrıca sıvı yalıtkanların delinme dayanımlarına nano parçacıkların etkisini incelemek amacıyla bu yağlara bakır ve demir tozları eklenip uygun şekilde karıştırılmıştır. Gerilim bölücü üzerinden elde edilen akım sinyallerinden 0-1 kHz frekans bandındaki harmonik değerler hesaplanmıştır. Bu harmoniklerin toplam bozucu etkisi de hesaplanarak yağlar kendi aralarında dielektrik dayanım açısından karşılaştırılmıştır. AC ve negatif DC elektrik alan stresi altında sentetik ester yağ en yüksek dielektrik dayanıma sahip olsa da darbe geriliminde mineral yağ en dayanıklı sıvı dielektrik olarak ölçülmüştür. Ayrıca mineral yağın AC ve negatif DC gerilim altındaki kararlılığının da hesaplanan standart sapma değerlerinden iyi olduğu görülmüştür. Ancak özellikle sentetik ester yağın dielektrik performans olarak mineral yağa önemli bir üstünlüğü bulunmaktadır. Bakır parçacıkların delinme dayanımını düşürücü etkisi yapılan deneylerle ortaya koyulmuştur. Ancak demir tozlarının etkisi her yağ ve elektrot açıklığı için değişim göstermiştir. Bu durum, elektriksel ekipmanlarda sıvı dielektrik seçiminin birden çok parametreye bağlı kombine bir değerlendirme neticesinde seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ekim 2022 , 136 sayfa.

Anahtar kelimeler: Dielektrik Sıvı, Transformatör, Delinme Gerilimi, Kısmi Deşarj, Nano-parçacık

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

INVESTIGATION OF EFFECTS OF DIFFERENT HIGH VOLTAGE TYPES ON DİELECTRIC STRENGTH OF INSULATING OILS

Fatih ATALAR

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Aysel ERSOY

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Pawel ROZGA

Although liquid dielectrics have different structures from each other, they are used to perform the same tasks in the electrical equipment they are used in. Insulation performances of liquid dielectrics used in transformers under different voltage types under similar conditions will provide important information in terms of dielectric strength. In this study, three different transformer oils, mineral oil, natural ester oil and synthetic ester oil were tested. Nytro TAURUS as mineral oil, MIDEL en1204 for natural ester oil and MIDEL 7131 oil for synthetic ester oil are used. Tests under AC and negative DC voltage are performed at electrode gaps of 2.5 mm, 2 mm and 1 mm using disk and VDE type electrodes as per ASTM D1816-12 and ASTM D877/87M-19 standards. The impulse voltage tests are performed under standard IEC 60897. The current data of 500 ms prior to breakdown under AC electrical field stress is decomposed using the Empirical Mode Decomposition (EMD) and Variational Mode Decomposition (VMD) methods. This analyzes conducted the process before the full electrical discharge. In addition, to examine the effect of nanoparticles on the dielectric strength of liquid

insulators, copper and iron powders are added to these oils and mixed appropriately. The harmonic values in the 0-1 kHz frequency band are calculated from the current signals obtained over the voltage divider. By calculating the total distortion effect of these harmonics, the oils are compared among themselves in terms of dielectric strength. Although synthetic ester oil has the highest dielectric strength under AC and negative DC electrical field stress, mineral oil has been measured as the most resistant liquid dielectric at lightning impulse voltage. In addition, stabilization of mineral oil under AC and negative DC voltage is also seen to be good with the help of calculated standard deviation values. However, synthetic ester oil has a significant advantage over mineral oil, especially as dielectric performance. It has been demonstrated by experiments the breakdown voltages are generally reduced because of the copper nano-particle effect. However, the effect of iron powders varied for each oil and electrode gap. This indicates that liquid dielectric selection in transformer must be carried through as a combined evaluation of multiple parameters

October 2022, 136 pages.

Keywords: Dielectric Liquid, Transformer, Breakdown Voltage, Partial Discharge, Nano-particle

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi ilk üretildiği yerde uzak noktalara taşınacak kadar büyük potansiyel fark değerine sahip değildir. Bu enerjinin ilk iletiminden önce gerilim seviyesinin yeterli olacak şekilde arttırılması gerekmektedir. Sabit bir elektrik makinesi olan transformatörler ince silisli saclardan oluşan demir, çelik ya da farklı bir ferromanyetik malzemeden yapılmış bir çekirdek etrafına bakır sarımların sarılmasıyla meydana gelmektedir. Transformatörler elektromanyetik indüksiyon prensibiyle çalışan ve girişine uygulanan gerilimi sarım sayısı oranına göre düşürücü ya da arttırıcı yönde çalışmaktadır. Buna göre elektrik enerjisinin ilk üretim noktasında elde edilen gerilim bir trafo yardımıyla bazı durumlarda 154 kilovolta (kV) ekstra yüksek gerilim seviyelerine yükselterek elektrik iletimi için uygun bir potansiyel fark değerinin elde edilmesini sağlar. Elektrik enerjisinin son tüketiciye ulaşmasına kadar trafolar gerilim düşürücü rol de oynarlar. Bu sayede endüstride, meskûn mahalde ve kurumlarda kullanılan elektrik enerjisi son kullanıcısına ulaşmış olur.

Transformatörlerde işletme ömürleri boyunca çeşitli nedenlerden bazı kayıplar görülmektedir. Kayıplar demir ve bakır kaybı olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu kayıpların transformatör işletmeye alınmadan açık ve kısa devre testleriyle ölçülmesi gerekmektedir. Bu iki kayıp transformatör içerisindeki malzemelerden kaynaklanmaktadır. Demir kayıpları demir nüve üzerinde frekansa ve nüve malzemesine bağlı bir kayıpken bakır kaybı bakır sargıların üzerinden akım geçmesi nedeniyle bu sargıların direncine ve üzerinden geçen akıma bağlı olarak değişen bir kayıp olarak bilinmektedir. Bu kayıplar transformatör işletmeye alınmadan önce en düşük seviyeye getirilecek şekilde ayarlanırlar. Ancak trafolar için en büyük sorun işletme ömürleri boyunca karşılaştıkları yüksek elektrik, termal ve mekanik zorlanmalardır. Trafo ömrünü azaltan en önemli neden yüksek elektrik alan stresidir. Transformatörler içerisinde yalıtım ve soğutma amaçlı kullanılan sıvı dielektrik malzemeler bu elektrik alan stresleri altında yalıtım özelliklerini yavaşça kaybederler. İzolasyon bir trafo için en hayati fonksiyonlardan biridir. Bu işlevin çeşitli sebeplerle azalması hatta tamamen kaybolması trafonun tamamen kullanılamaz hale gelmesine neden olabilir. İşletme ömrü boyunca bu yalıtım karakteristiği olumsuz yönde bir seyirle hareket etmektedir. Bu trafo sargılarını birbirilerinden ve dışarıya karşı yalıtan sıvı

dielektrikler için doğal bir süreçtir. Ancak bu süreçten en az kayıp ve zorlanma ile çıkmak trafonun daha verimli çalışması açısından gereklidir.

Transformatörlerde en çok kullanılan sıvı izolasyon malzemesi petrol bazlı olan mineral yağdır. Ancak malzeme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte yeni dielektrik sıvılar ortaya çıkmaya başlamıştır. Son dönemlerde doğal ester yağ ve sentetik ester yağ iyi bir izolasyon sağlama amacıyla yeni yalıtkanlar olarak trafolarda kullanılmaya başlamıştır. Ancak bu yeni yağların maliyet-performans analizinin iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bunun yanı sıra trafoların ömürleri boyunca karşılaştıkları farklı gerilim streslerinin bu yağlara etkisi detaylı bir şekilde incelenmelidir.

Bu tez çalışmasında transformatörlerde yalıtkan olarak kullanılan mineral yağ, doğal ester yağ ve sentetik ester yağ elektriksel olarak test edilmiştir. Alternatif gerilim (Alternative Current-AC), negatif Doğru Gerilim (Direct Current-DC) ve Darbe Gerilimi (Lightning Impulse – LI) elektrik alan stresleri altında bu üç sıvı dielektrik test edilmiştir. AC ve negatif DC gerilim testleri disk ve mantar (Verband Deutscher Elektrotechniker -VDE) tipi elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu iki test Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials-ASTM) tarafından ilan edilen ASTM D1816-12 ve ASTM D877/87M-19 standartları kapsamında 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm elektrot açıklıklarında yapılmıştır. Ayrıca darbe gerilimi testleri ise iğne-silindir elektrot sisteminde sabit 25 mm açıklıkta Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission-IEC) tarafından ilan edilen IEC 60897 kodlu standart kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca AC gerilim altında besleme trafosunun birincil sargısına bağlı direnç üzerinden ölçülen akım sinyalleri Ampirik Mod Ayrıştırması (Empirical Mode Decomposition – EMD) ve Değişken Mod Ayrıştırması (Variational Mode Decomposition - VMD) metotları kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analiz sayesinde elektriksel tam delinmeden önceki 500 milisaniye (ms) boyunca üç farklı yağın dielektrik davranışı incelenmiştir.

Trafolar demir nüve etrafına bakır sargıların sarılmasıyla oluştuğundan dolayı işletme ömürleri boyunca trafo yağının içine nano boyutta demir ve bakır parçacıkları karışmaktadır. Bu nano parçacıkların dielektrik dayanıma etkisini ölçmek için AC gerilim altında 50-100 nanometre (nm) boyutundaki Fe_3O_4 ve 100 nm boyutundaki CuO partikülleri yağ içerisine katılarak sızıntı akımları verisi yardımıyla dielektrik davranışı test edilmiştir. Bu nano parçacıkların etkisi 1 mm elektrot açıklığında disk ve VDE tipi elektrotlar kullanılarak AC gerilim altında test edilmiştir.

0-1000 Hertz (Hz) frekans aralığında harmonik akımlarının hesaplanmasıyla üç farklı yağın üstün ve dezavantajlı durumları ortaya konmuştur. Tüm bu test ve analizler sonucunda trafolarda uygun sıvı dielektrik seçiminin sadece bir parametreye bağlı olmadığı kombine bir değerlendirme gerektirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu tez kapsamında trafoların işletme ömürleri boyunca sağlıklı ve sürdürülebilir şartlar altında çalışması için yağların birbirlerinden farklı özellikleri ortaya konmuştur.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Üretim noktasından son kullanıcıya erişene kadar elektrik iletim-dağıtım sisteminin her safhasında kullanılan transformatörlerin sağlıklı çalışması enerjinin sürekliliğinin olmazsa olmaz koşullarından biridir. Periyodik bakımların aksatılmadan yapılması her elektrik makinesinde olduğu gibi transformatörlerde de verimli çalışma için önemli hususlar arasında yer almaktadır. Ancak transformatörler işletmeye alınmadan alınacak çözümler doğru ve verimli bir işletme ömrü için başlangıç koşullarından biridir. Temel olarak elektriksel potansiyel farkı ya da elektrik akımını arttırıcı veya düşürücü görevleri yapan transformatörler çok karmaşık bir yapıya sahip değildir. Bu elektrik makinesini oluşturmak için ilk olarak nüve monte edilir. Nüvenin doğru bir ferromanyetik malzemeden yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde girdap (Fucoult) ve histerezis kayıpların yüksek olmasıyla sonuçlanabilir [1,2]. Nüveler genel olarak demirden ince silisli saclar şeklinde yapılırlar. Bu nüvenin bacaklarına bakır tellerden sarımlar sarılarak trafonun ana iskeleti oluşturulmuş olur. Bakır sargıların birbirlerinden elektriksel olarak izole edilmeleri gerekmektedir. Aksi takdirde iletkenler arasındaki çok düşük dirençten dolayı kısa devreler yaşanarak transformatörün servis dışı kalmasına neden olur [3,4]. Bu sargıların birbirlerinden yalıtılmaları katı, sıvı veya gaz izolatörlerin kullanılmasıyla sayesinde gerçekleştirilir. Bakır sargılar ilk olarak pressboard olarak adlandırılan selülozik yapıdaki kâğıt mukavvalar ile sarılırlar. Uygun kurutma işlemlerinden sonra olası hava boşlukları vakum fırınlarda ortadan kaldırılır. Piyasada kullanılan transformatörlerin çoğunda kâğıt yalıtkanla birbirlerinden izole edilen bu sargılar sıvı dielektrik malzeme içerisine yerleştirilir. Trafolarda yalıtım ve soğutma işlevlerini yerine getiren sıvı dielektrikler trafo yağları olarak bilinirler.

Elektriksel ve termal stresler bir elektrik makinesinin çalışma koşullarını ciddi derecede etkilerler. Endüstride kullanılan çoğu ekipmanın ana enerji besleme kaynağı olan trafolar da işletme ömürleri boyunca bu tür zorlanmalara maruz kalmaktadırlar. Yüksek gerilim altında çalışan trafoların yalıtkanları ciddi bir elektrik alan altında çalışırlar [5,6]. Yalıtım için yaygın olarak kullanılan sıvı dielektrik malzemeler iletken parçaları korumak için bu elektrik alan maruziyetinden ilk etkilenen elemandır. Trafoyu elektriksel ve termal olarak içeriye ve dışarıya karşı izole eden sıvı dielektrik malzemelerin elektrik alan altında Kısmi Deşarjları (KD)

elektriksel olarak tam delinme ile sonuçlanabilir [7,8]. Ciddi enerji kesintilerine sebep olan bu durumun iyi bir şekilde analiz edilip, periyodik bakımların aksatılmadan yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde enerji kesintisine uğrayacak olan endüstriyel ekipmanlar ülkenin ciddi bir finansal kayıp yaşamasına yol açabilirler [9,10]. Elektriksel delinme süreçlerinin iyi bir şekilde analiz edilmesinin en iyi yollarından biri de doğru sıvı yalıtkan seçimidir. Piyasada çok fazla türde sıvı yalıtkan bulunmaktadır. Ancak, bir trafo için sorunsuz bir işletme ömrü daha yüksek dielektrik dayanıma sahip yalıtkan sıvı seçimine bağlıdır [11]. Bu sıvıların karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için çok sayıda akademik çalışma yapılmıştır [12]. Genel olarak mineral yağlar en ucuz çözüm olarak sunulmaktadırlar [13]. Ancak daha iyi bir dielektrik davranış elde etmek için sentetik [14,15] ve doğal ester yağlar da [16] tercih edilmektedir. Mineral ve sentetik ester yağ petrol bazlı olmasına rağmen [17] doğal ester yağ doğal yollardan elde edilir ve biyolojik olarak doğada zararsız bir şekilde çözünebilme özelliğine sahiptir [18]. Ancak ciddi bir enerji kaybı yaşanmaması için tüm sıvı dielektriklerin öne çıkan özellikleri incelenmeli ve buna göre kullanımına karar verilmelidir.

Sıvı dielektriklerin performanslarını ölçmek ve geliştirmek işletme sağlığını yakından ilgilendirmektedir. Yan Zhou ve Jun Qu yaptıkları çalışmada bu tip sıvılara katkılanacak bazı kimyasalların genel bir özetini sunmaktadır [19]. Konuyla ilgili çalışmalarda sıvıya ait kimyasal bileşenin uygun nano sıvılar ile değiştirilebileceği ve özelliklerinin geliştirildiği anlatılmaktadır. Ancak bu katkılamalar henüz araştırma aşamasında olup trafolarda uygulama safhasına geçmemiştir. Ayrıca aynı çevresel koşullarda aynı oranlarda katkılama yapılması performansın değerlendirilmesinde belirleyicidir. Dolayısıyla nano katkılardan önce bu yağların aynı ortam şartlarında kıyas yapılarak test edilmesi gerekmektedir. Sharin Ab Ghania ve arkadaşları da sadece doğal ester yağın dielektrik özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalardan oluşan bir derleme sunmuşlardır [20]. İlgili çalışmada doğal ester yağın akma noktası, kimyasal değişimi, nano parçacıkların etkisi ve birçok diğer özelliğin etkisi anlatılmıştır. Ortaya çıkabilecek faydalar detaylı olarak bahsedilmiş ve karşılaşılan zorluklara da çalışmalarında yer verilmiştir. İlgili derleme doğal ester yağ için çok bilgi verici olup ancak mineral yağ ve sentetik ester yağlara ait veriler bulunmamaktadır. Sadece bazı bitkisel yağlar doğal ester yağ ile karşılaştırılmıştır. Ancak gerçek uygulamada bitkisel yağ kullanımı oldukça düşüktür. Suhaib Ahmad Khan ve arkadaşları mineral yağ içerisine SiO_2'yi nano boyutta katkılayarak dielektrik davranışlarını incelemişlerdir [21]. Ayrıca elektrot alanı ve yağın hacmini değiştirerek ilgili nano sıvının performansını analiz etmişlerdir. Mineral yağın

akışkanlığı ve elektrot alanına etkisi diğer yağlardan farklıdır. Özellikle doğal ester yağın fiziksel ve kimyasal yapısı bu etkiyi değiştirebilme potansiyeline sahiptir. İlgili çalışmada doğal ester yağdan ve onun farklı kimyasal ve fiziksel özelliklerinden bahsedilmemiştir. Benzer nano sıvı katkılaması, termal analiz çalışmaları için de kullanılmıştır [22]. Trafolarda termal analiz önemli olmakla birlikte ilk olarak bakılması gereken yüksek elektrik alan altında dielektrik dayanımlardır.

Trafolar işletme ömürleri boyunca farklı karakteristiklerde yüksek elektrik alan streslerine maruz kalmaktadırlar. Bu zorlanmalar gerilim türüne özgü zamana bağlı değişim göstermektedir. En çok etkilenen ise yalıtım amacıyla kullanılan sıvı dielektrik malzeme olan trafo yağlarıdır. Genel olarak kullanılan mineral yağ, doğal ester yağ ve sentetik ester yağ kullanımları boyunca AC, DC ve darbe gerilimleri altında dielektrik performanslarını kaybetmektedirler. Peter Kurzweil ve arkadaşları bahsedilen üç yağa ek olarak biyolojik tabanlı karbon yağını AC elektrik alan altında 2.5 mm elektrot açıklığında incelemişlerdir [23]. Delinme dayanımı bakımından en iyi performansı biyolojik tabanlı karbon yağın verdiğini ölçmüşlerdir. Ancak deneylerini sadece VDE tipi elektrot ve tek bir açıklıkta gerçekleştirmişlerdir. Oysa trafo içerisinde sivri köşe etkisinin incelenmesi için disk elektrot kullanılmalıdır. Ayrıca yağlar sadece AC elektrik alan altında değil, DC ve darbe gerilimi nedeniyle de yıpranmaktadırlar. Mihir Bhatt ve Praghnesh Bhatt mineral yağın dielektrik performansını üç farklı gerilim türünün etkisini 2 boyutlu düzende simüle etmişlerdir [24]. Çalışmanın odağı çığ ve kanal oluşumu olup sadece mineral yağ ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca bu düzeneğin 3 boyutlu simülasyonu ve gerçek deney verileri de gerekmektedir. Huize Cui ve arkadaşları 20 kV DC ve 20 kV_{RMS} AC gerilim altında mineral yağın termal incelemesine ek olarak yağda çözünmüş gaz analizini yapmışlardır [25]. İki gerilim türünün etkisinin incelendiği bu çalışmada yağın dielektrik dayanımından ziyade yaşlanmaya bağlı gaz konsantrasyon değerleri incelenmiştir. Gaz analizleri dinamik olarak uzaktan erişim ile izlenebilen hızlı değerlendirilebilen bir durumdur. Yağların bu analizinin daha doğru sonuç vermesi için geliştirilmesi önemlidir ancak asıl önemli olan farklı yağların dielektrik dayanımlarının incelenmesidir. R. Siva Sai ve arkadaşları mineral yağın simetrik ve karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki yarı küre elektrot düzeninde dielektrik parametrelerini incelemişlerdir [26]. Taze, yaşlı ve filtreli yaşlı yağlar için elektriksel, kimyasal ve fiziksel parametreleri deneysel olarak test etmişlerdir. Bu sonuçlar her ne kadar önemli olsa da işletme ömrü boyunca

yaşlanan yağın üstün özelliklerini yitirdiği bilinmektedir. Bu tür bir çalışmanın farklı trafo yağları için farklı gerilim türlerinde yapılması önemlidir.

Elektriksel olarak yağların performansları delinme gerilimi analizi ve ölçümü ile incelenmektedir. Bu analizlerde farklı metotlar kullanılarak yağların üstün özelliklerinin ortaya çıkarılması mümkündür [27,28]. Ancak yapılan çalışmalar genelde AC gerilim altındaki elektrik alan stresini kapsamaktadır. Halbuki bir trafo işletme ömrü boyunca DC ve darbe gerilim streslerine de maruz kalmaktadır.

Trafolar iletken metalleri muhteva ettiğinden dolayı servis ömürleri boyunca nano boyutta bakır ve demir parçalar yağ içerisine sızarak delinme dayanımını önemli ölçüde değiştirirler. Ayrıca trafo montajında kullanılan gövde ve diğer metal ekipmanlardan dolayı farklı metallerde sıvı dielektrik içerisine zamanla nüfuz edebilirler. Bu parçacıkların etkisinin incelenmesi trafonun verimli çalışma koşullarının oluşturulması açısından elzemdir. Zahra Taghikhani ve arkadaşları manyetit, bakır ve alüminyum nano metal oksitlerin trafoda kullanılan mineral yağ ve doğal ester yağın termal davranışına etkisini farklı nüve malzemeleriyle oluşturdukları 3 fazlı üç boyutlu trafo modellerinde yaptıkları simülasyonlarla incelemişlerdir [29]. Yapmış oldukları elektromanyetik analiz sonucunda trafonun demir kayıplarını ve termal olarak sıcak noktaları incelemişlerdir. Bakır nano oksit nedeniyle doğal ester yağda bu kayıpların daha çok arttığını ve trafo üzerindeki sıcak noktaların derecesinin mineral yağ kullanımıyla kıyaslandığında daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. İlgili çalışmanın da ortaya koyduğu üzere bakır nano parçacıkların etkisi diğer metallere göre daha yüksektir. Ancak böyle bir çalışmada sıvı yalıtkanların dielektrik performansı incelenmemiştir. Bir yalıtkan içerisine girecek metal parçacıkların en büyük etkisinin dielektrik dayanım üzerine olduğu bilindiğine göre Zahra Taghikhani ve arkadaşlarının çalışmasının bu yönüyle yeterli olmadığı görülmektedir.

Zhang Liusheng ve arkadaşları mineral yağ içerisine magnezyum oksit, çinko oksit ve bakır oksit ekleyerek moleküler anlamda bu parçacıkların etkisini hareketlerini inceleyerek gerçekleştirmişlerdir [30]. Kristal bir katmanla metal oksitler arasındaki ara yüzeyde kinetik hareketleri inceleyecek şekilde üç boyutlu tasarıma sahip bir simülasyon yapmışlardır. Elde ettiği sonuçlara göre üç metal oksit ve mineral yağ arasındaki ara yüzey etkileşim enerjisi negatiftir, bu üç metal oksitin harici enerji yüzeye tutunma olmadan kendiliğinden yağ ile reaksiyona girebileceğini gösterir. Ayrıca üç metal oksidin yağ üzerindeki yüzeye tutunma kapasitesinin, güçlüden zayıfa doğru bakır oksit> magnezyum oksit> çinko oksit yaptıkları

analiz ile elde etmişlerdir. Bu üç metal oksit arasında bakır oksit, yağ için en iyi yüzeye tutunma kapasitesine sahip olandır. Dolayısıyla bakır nano parçacıklarının sıvı dielektrik malzeme yüzeyine tutunma derecesinin fazla olması iletken yakınında ciddi yalıtım problemlerine sebep olur. Ancak ilgili çalışmada yalıtım etkisinden ziyade moleküler dinamik bir model üzerinde analizlerini gerçekleştirmişlerdir. İlgili çalışma kapsamında oluşabilecek sorunlardan olan yalıtım derecesinin düşmesi hakkında herhangi bir analiz yer almamaktadır.

Kaizheng Wang ve arkadaşları farklı çaplardaki demir ve bakır metal parçacıklarının mineral yağ ve doğal ester yağ üzerindeki saflığı bozucu etkisini araştırmışlardır [31]. Yapmış oldukları deneysel çalışmada bu iki sıvı dielektriğin delinme dayanımını AC ve darbe gerilimi altında incelemişlerdir. Metal partikülün boyutunun artmasıyla AC delinme geriliminin düştüğünü ve bu etkinin mineral yağda daha fazla görüldüğünü ortaya koymuşlardır. Darbe gerilimi altında metal partiküllerin miktarının pozitif darbe gerilimi için %10, negatif darbe gerilimi için %20 gibi bir eşik değerden sonra delinme gerilimini özellikle bakır partiküller kullanıldığında daha fazla azalttığı görülmektedir. Ancak ilgili çalışmada yağların tam delinmesinden önce meydana gelen KD'ler hakkında ipucu olan harmoniklerle ilgili bir analiz yapılmamıştır. Ayrıca, trafolarda kullanılan ve dielektrik dayanımı yüksek olan sentetik ester yağın delinme davranışı incelenmemiştir.

Ivanka Atanasova-Höhlein yapmış olduğu çalışmada mineral yağ, sentetik ester yağ, doğal ester yağ ve silikon yağ için aşağıdaki yöntemlerle metal parçacık etkisini incelemiştir [32].

• yalnızca yalıtım sıvısı

• yalıtkan sıvı + bakır

• yalıtkan sıvı + çelik

• izolasyon sıvısı + bakır + çelik

• izolasyon sıvısı + bakır + çelik + izolasyon kâğıdı

Yukarıdaki yöntemle 4 farklı yağın içerisinde çözünen gazları analiz ederek birbirleri arasındaki farklar ortaya konulmuştur. Buna göre yağlar içinde hidrojen, etan ve metan gazları, diğerlerine göre daha yüksek konsantrasyon değerlerinde oluşmuştur. Sentetik ester yağda sadece hidrojen gazı çözünmüş olarak bulunmuştur. Bu yağ için en yüksek gaz konsantrasyon değeri yalıtkan sıvı + bakır ortamında ölçülmüştür. Mineral yağ içerisinde hidrojen gazı en yüksek yalıtkan sıvı + bakır, metan ve etan gazları izolasyon sıvısı + bakır + çelik + izolasyon

kâğıdı ortamında ölçülmüştür. Doğal ester yağda hidrojen gazı en yüksek sıvı yalıtkana çelik parçacıkların etkisiyle, metan gazı saf yağ ve kâğıt izolasyonlu durum dışındaki koşullarda ölçülmüştür. İlgili çalışmada silikon yağa ait gaz konsantrasyon değer artışı saptanmamıştır. Yağlar içerisinde çözünen gazlar erken arıza için önemli bir ölçüt olsa da ani ve yüksek elektrik alan stresleri altında yağların dielektrik davranışlarının incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca trafolar genellikle demir nüveden yapıldığından dolayı çelik değil de demir parçacıkların etkisi daha yaygın bir değerlendirme yapılması açısından incelenmesi gerekmektedir.

Li Zhang ve arkadaşları bakır metallerinin pressboard-yağ ara yüzeyindeki etkisini içerisinde antioksidan ve metal pasivatör içeren ve içermeyen naftanik bazlı iki farklı mineral yağ için incelemişlerdir [33]. Bakır varlığının, yalıtım yağlarının yaşlanmasını katalize ettiği, yağın asidik ve diğer polar maddeler üretmesine neden olduğunu ve furfural üretim oranını hızlandırdığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, termal yaşlanma ilerledikçe, pressboardın dielektrik dağılımının kademeli olarak arttığını ve metal malzemelerin eklenmesiyle bu artışın devam ettiğini belirtmişlerdir. Ancak ilgili çalışma sadece mineral yağ ve pressboard için bakır etkisinin incelenmesini kapsamaktadır. İlgili çalışma kapsamında herhangi bir delinme dayanımı analizi farklı yağlar da kullanılarak yapılmamıştır.

Trafo yağları içerisindeki metal nano partiküllerin etkisinin incelendiği çokça araştırma olmasına rağmen [34-38] mineral yağ, doğal ester yağ ve sentetik ester yağın birlikte değerlendirildiği deneysel çalışma sayısı oldukça azdır. Ayrıca bu çalışmalarda kısmi deşarjların değerlendirildiği analizlerin eksikliği göze çarpmaktadır. Ek olarak, sıvı yalıtkan içerisinde iyonizasyonlardan sonra meydana gelen akım verilerinin analiziyle harmonik sızıntı akımlarının da araştırıldığı çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle harmonik akımlarının incelendiği araştırmaların yapılması farklı sıvı dielektrikler için doğru bir değerlendirme yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Böylece trafolar için uygun sıvı dielektrik seçimi mümkün olduğunca kapsamlı bir analiz olanağı oluşacaktır.

Bu tezde trafolarda yalıtım amaçlı kullanılan mineral yağ, doğal ester yağ ve sentetik ester yağ AC, negatif DC ve darbe gerilimi stresleri altında dielektrik dayanımlarının ölçülmesi amacıyla test edilmişlerdir. AC ve negatif DC testleri “VDE Elektrotları Kullanan Yalıtkan Sıvıların Dielektrik Delinme Gerilimi için Standart Test Yöntemi” isimli ASTM D1816-12 kodlu ve “Disk Elektrotları Kullanan Yalıtkan Sıvıların Dielektrik Delinme Gerilimi için Standart Test Yöntemi” isimli ASTM D877/87M-19 kodlu standartları kapsamında test edilmişlerdir. Darbe

gerilimi testleri “Yalıtkan Sıvıların Yıldırım Darbesi Delinme Gerilimi Belirleme Yöntemleri” isimli IEC 60897 kodlu standart gereğince gerçekleştirilmiştir. AC gerilim stresi altında trafonun birincil sargısından toplanan akım verileri EMD ve VMD yöntemleriyle ayrıştırılarak delinme sürecinde ipucu veren modlar ortaya konmuştur. Ayrıca yağ içerisinde çözünebilen ve dielektrik dayanımını etkileyen bakır ve demir nano partiküllerin etkisi AC gerilim altında incelenmiştir. Bozunmayı gösteren etkenlerden harmonik ve sızıntı akım analizi yapılarak bu parçacıkların etkisi daha detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Bir sonraki kısımda elektriksel delinme sürecinin başlangıç aşaması olan iyonizasyon hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında sıvı dielektriklerin genel özelliklerinin anlatımıyla başlanmış bu yalıtkanların delinme türleriyle devam edilerek bu mekanizmanın teorisinden bahsedilmiştir. Ardından deney düzeneğinin kurulduğu ve malzemelerin nasıl hazırlandığı Malzeme ve Yöntem bölümüyle devam edilmiştir. Bulgular bölümünde deneylerden elde edilen verilerin yorumlanması ve bu verilerin yukarıda bahsedilen yöntemlerle işlenmesiyle ortaya çıkan bulgulardan bahsedilmiştir. Yağ seçiminde önemli parametrelerin etkisi Tartışma bölümünde ele alınmıştır. Sonuç bölümünde tez kapsamına yapılan deneylerin genel olarak bir değerlendirmesi yapılarak tezin literatüre katkısı verilmiştir. Ayrıca bu bölümde elde edilen sonuçlar özetlenerek gelecekteki olası çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. İYONİZASYON MEKANİZMASI

İyonizasyon fenomeni her ne kadar gaz yalıtkanların delinme davranışının açıklanmasında kullanılsa da asıl manası bir yalıtkanın tam delinmesi için ilk elektronun kopması anlamına gelen iyonizasyon sıvı dielektrik malzemelerin delinme prosesini de açıklamaya yardımcı olmaktadır. 1965 yılında Leonid Veniaminovich Keldysh güçlü elektromanyetik alan altında iyonizasyon sürecini ilk defa açıkladığında elektriksel yalıtım malzemelerinin gerilim stresleri altındaki delinme süreçleri daha iyi anlaşılmaya başlamıştır [39]. Buna göre iyonizasyon potansiyeli Denklem 2.1.1'deki gibi açıklanmaktadır.

$$l = I/vF \tag{2.1.1}$$

Burada I iyonizasyon potansiyelini, l elektrotun ilk nötr atomu iyonize etmesi için kat etmesi gereken uzunluğu, v elektronun hızını ve F ise elektrik alan yoğunluğunu göstermektedir. Belirli bir frekans için bu süreç Denklem 2.1.2'deki gibi gerçekleşir.

$$w_t = vF/\sqrt{2mI} \tag{2.1.2}$$

Elektronun hızı ayrıca m kütlesine bağlıdır. w_t frekansındaki iyonizasyona en büyük etki elektrik alan yoğunluğunun büyüklüğüdür. Buna göre alan yoğunluğunun fazla olması kolay bir iyonizasyon sağlar ve yağların delinme sürecini de hızlandırır. Sıvı dielektriklerde genel olarak çarpma ile iyonizasyon ve termal iyonizasyon gerçekleşmektedir.

2.1.1. Çarpma ile İyonizasyon

Elektriksel deşarjlar meydana gelmeden önce anot-katot arasında herhangi bir iletken yol yoktur. Elektrik alan stres değeri arttıkça elektronlar karşı elektroda doğru hareket etmeye başlarlar. Bu hareketlerin hızı elektron kütlesi ve elektrik alan şiddetine bağlıdır. Ancak, eğer anot ile katot arasındaki mesafe uzunsa yalıtım sıvısı elektronların bu hareketini engelleyecek yönde davranış gösterecektir. İlk elektron koptuktan sonra sıvının yalıtım direncini düşürerek hızlı bir şekilde karşı elektroda doğru ilerlerken nötr atomlarla karşılaşır. Bu nötr atomlar ve elektron çarpışması olası bir iyonizasyonun başlamasına sebep olabilir. Buna göre hızı v olan elektronun ne kadar kinetik enerjiye sahip olduğu oldukça önemlidir. Çünkü iyonizasyon olayı aslında iki enerji seviyesi arasındaki üstünlük mücadelesinden kaynaklanmaktadır. Elektronun kinetik enerjisinin Denklem 2.1.3'de gösterildiği gibi iyonizasyon enerjisi olan W_i'yi aşması durumunda nötr atom ve elektron çarpışmasından iyonize olmuş moleküller ve yeni elektronlar oluşur [40].

$$\frac{1}{2}mv^2 > W_i \qquad (2.1.3)$$

Ancak her çarpışma yeteri düzeyde iyonizasyon ile sonuçlanmaz. Elektronların nötr atomlarla çarpışması sonucunda aşağıdaki üç farklı durum meydana gelebilir;

- Eğer elektronun kinetik enerjisi iyonizasyon enerjisinden daha küçük bir değere sahipse bu durumda elektron nötr atoma çarpınca bu atom uyarılmış duruma geçer. Aynı atoma diğer elektronların çarpması sonucu atom kademeli şekilde iyonize olur. Bu durum kademeli iyonizasyon olarak adlandırılır.

- Elektron uyarılmış atoma çarptığında atom önceki temel durumuna geri dönebilir. Bu durumda elbette ki açığa enerji çıkacaktır. Bu enerji elektron tarafından alınır ve elektronun kinetik enerjisi ilgili atomun iyonizasyon enerjisine yükselmiş olur.

- Elektronların uyarılmış duruma getirdiği iki atomun çarpışması durumunda birinin sahip olduğu potansiyel enerji diğerine geçebilir. Bu durumda enerjiyi alan atom iyonize olabilir.

2.1.2. Termik İyonizasyon

Termal iyonizasyon terimi, genel olarak, yüksek sıcaklıkta, yalıtkanlarda meydana gelen moleküler çarpışmalar, radyasyon ve elektron çarpışmalarının iyonlaştırıcı eylemleri için geçerlidir. Eğer yeterince yüksek bir sıcaklığa ulaşılırsa, birçok atom veya molekül, diğer atomlar veya moleküller ile çarpışma sonucunda iyonizasyona neden olmak için yeterince yüksek hız kazanırlar. Termal iyonizasyon, çok yüksek sıcaklıklarda ve yüksek basınçlı arklarda iyonlaşmanın başlıca kaynağıdır [41].

Termal iyonizasyon sürecini analiz ederken, pozitif iyonlar ve elektronlar arasındaki yeniden birleşim dikkate alınmalıdır. Termodinamik denge koşulları altında, yeni iyon oluşum hızı, yeniden birleştirme hızına eşit olmalıdır. Bu varsayım kullanılarak, iyonlaşma derecesi θ için gaz basıncı ve mutlak sıcaklık cinsinden bir ifade Denklem 2.1.4'deki gibi türetilmiştir [42, 43].

$$\frac{\theta^2}{1-\theta^2} = \frac{1}{p}\frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h}(kT)^{5/2}e^{-W_i/kT} \qquad (2.1.4)$$

Burada p Torr cinsinden basıncı, W_i iyonizasyon enerjisini, k Boltzmann sabitini, θ iyonize olmuş parçacıkların toplam parçacık sayısına oranını göstermektedir. θ'nın sıcaklığa olan güçlü bağımlılığı, iyonlaşma derecesinin oda sıcaklığında ihmal edilebilir olduğunu gösterir. W_i, kT, p ve kT değerlerinin ikamesi üzerine, 1000 Kelvin (^{o}K)'nin üzerindeki sıcaklıklar için termal iyonizasyonun önemli hale geldiği bu ifadeyle görülmektedir.

2.2. SIVI YALITKANLARDA DELİNME MEKANİZMALARI

Sıvı dielektrik malzemeler katılardan farklı olarak elektriksel deşarjlar sonrasında kendilerini onarabilme kabiliyetine sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı trafolarda pressboardu ve bakır sargıları elektriksel ve termal olarak izole etmek için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sıvı dielektrikler gaz yalıtkanlara göre daha yüksek delinme dayanımına sahiptirler. Ayrıca daha kalın tabakalar halinde kullanılabilirler. Katı yalıtkanların deşarj durumlarını azaltıcı yönde etki yaparlar. Çok fazla sayıda sıvı yalıtkan türü olduğu bilinmektedir. Bunlar içinde en fazla bilinen trafo yağları bu tez kapsamında detaylıca incelenmiştir. Bir sıvı dielektrik servis ömrü boyunca yalıtım direncini azaltan bazı etkilerle karşı karşıya kalmaktadır. Gaz kabarcıkları ve hava habbecikleri, basınç ve sıcaklık, elektrot malzemesi ve yüzey durumu, nem, toz, is ve elyaflı parçacıklar, elektrotlar arası mesafe ve elektrot tipi ve gerilimin uygulanma süresi sıvı yalıtkanların delinme dayanımını etkileyen faktörlerdir.

2.2.1. Sıvı Dielektriklerin Delinme Dayanımını Etkileyen Faktörler

2.2.1.1. Gaz Kabarcıkları ve Hava Habbecikleri

Sıvı yalıtkanlar yüksek elektrik alan stresi altındayken içerisinde bulunan yabancı partiküller gerilimin yüksek olduğu alanlara doğru hareket ederler. Bu parçacıkların oluşturduğu iletken köprüden yüksek akımlar geçmesi nedeniyle aşırı ısı artışı meydana gelmektedir. Bu ısı artışı yalıtım direncinin düşük olması durumunda daha hızlı yükselir. Aşırı yükselen sıcaklık iletken köprüyü yok eder ve burada hava boşlukları görülür. Bu boşluklara gaz kabarcıkları da etki ederek sıvının delinme dayanımını oldukça düşürürler. Bu boşluklar gaz yalıtkanlarda meydana gelen korona boşalmasının meydana gelmesine neden olurlar. Eğer sıvı dielektriğin sıcaklığı 27^{o}C civarında yani soğuksa bu gazlarda ışıltı biçiminde boşalma, eğer sıcaksa ark şeklinde bir boşalma meydana gelir. Bu durum sıvının yalıtım direncini ciddi oranda düşürüp dielektrik dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Sıvı yalıtkanlarda yabancı parçacıkların bulunmaması için periyodik olarak gereken bakımların ve müdahalenin yapılması gerekmektedir.

2.2.1.2. Basınç ve Sıcaklık

Sıvı dielektriklerin delinme dayanımları AC ve DC elektrik alan stresi altında artan basınçla birlikte yükselmektedir. Basıncın artması delinme gerilimini arttıracaktır. Ancak darbe gerilimin uygulamasında basınç, delinme gerilimi üzerinde herhangi bir etkiye neden olmamaktadır. AC ve DC gerilim altında 15-20 atmosfer (atm) basınç değerinden sonra delinme gerilimi sabit kalmaktadır [40]. Bu durum basıncın pozitif etkisinin belirli bir eşik değerine kadar olduğunu göstermektedir. Sıvı dielektrik içerisindeki termal koşulun değişmesi yağ içerisinde termik iyonizasyona neden olur ve bu da elektriksel boşalma sürecini hızlandırır. Ancak daha önce de açıklandığı gibi bu durum ancak 1000 ^{o}K ve üzeri sıcaklık değerleri için geçerlidir. Dolayısıyla bu değerden sonra delinme gerilimi düşüş yönünde bir eğilim gösterir.

2.2.1.3. Elektrot Malzemesi ve Yüzey Durumu

Pürüzsüz elektrot yüzeyi deşarjlara engel olacak yapıya sahip olduğundan dolayı delinme gerilimi bu tip yüzeyler için daha yüksektir. Ayrıca yüzeyin pürüzsüz olmasının yanı sıra parlak bir özelliğe sahip olması da sıvı dielektriklerin daha yüksek gerilim seviyelerinde delinmesine etki etmektedir. İletkenliği yüksek direnci düşük elektrot malzemelerinin kullanılması durumunda daha yüksek delinme gerilimleri ölçülmektedir. Delinme gerilimleri arasındaki fark bazı durumlarda iki kat olacak şekilde görülebilmektedir. Demir malzemeden yapılmış bir elektrot paslanmaz çelikten yapılmış bir elektroda göre daha yüksek delinme gerilimi ölçülmesine neden olmaktadır.

2.2.1.4. Nem

Su damlacıkları sıvı dielektrik içerisinde delinme dayanımına çok fazla etki etmezler. Her sıvı dielektrik için içerebileceği nem oranı birbirinden farklıdır. Daha yüksek delinme dayanımına sahip bir sıvı yalıtkan daha düşük dielektrik performansa sahip bir sıvı yalıtkandan daha fazla nem içerebilir. Bu eşik değerler aşıldıktan sonra delinme dayanımı önemli ölçüde azalmaktadır. Su buharının varlığı sıvı dielektrik malzemelerde delinme dayanımını su damlacıklarına oranla daha fazla düşürmektedir. Dolayısıyla bu yalıtkanların uygun vakum fırınlar vasıtasıyla içerisindeki su buharından olabildiğince ayrılması gerekmektedir. Böylece dielektrik dayanım yükselecek olup daha uzun ömürlü bir sıvı yalıtkan elde edilecektir.

2.2.1.5. Toz, İs ve Elyaflı Parçacıklar

Sıvı dielektriklerin kullanımı sırasında havanın toz ve nemi sıvı içerisine kolayca girebilmektedir. Ayrıca trafolarda kâğıt mukavva yalıtkan ile beraber kullanıldıklarından dolayı selülozik elyaflı parçacıklar sıvı içerisine girmektedirler. Bu parçacıklar yüksek elektrik alan altında dipol oluşturur ve alanın en yüksek olduğu bölgelerde iletken köprüler meydana getirirler. Elektrik alan dielektrik katsayısı büyük olan parçacıkları çekme etkisiyle bu parçacıkların negatif iyon bulutu etrafında pozitif yüklenmesine neden olurlar. Bu çekme etkisi Denklem 2.2.1.5.1'de ki eşitlikten faydalanarak açıklanabilir [40].

$$\frac{\varepsilon-\varepsilon_s}{\varepsilon+2\varepsilon_s}\varepsilon_s.r^3.E^2 \geq \frac{1}{4}kT \qquad (2.2.1.5.1)$$

Burada ε parçacığın ε_s ise sıvının dielektrik sabitini göstermektedir. E elektrik alan şiddetini r ise parçacığın yarıçapını temsil etmektedir. Eğer parçacığın dielektrik katsayısı sıvı yalıtkanın dielektrik sabitinden çok büyükse denklemde ε_s ihmal edilir. Bu durumda aşağıdaki üç farklı durumdan biri gerçekleşir.

- Eğer parçacık çapı 10 ^{o}A (Ångström) değerinden küçükse bu maddeler yalıtkan içerisinde yaklaşık 200-250 kV/cm elektrik alan değerlerine kadar dağınık halde bulunurlar.

- Dielektrik katsayısı küçük olan parçacıklar herhangi bir iletken köprü meydana getirmezler.

- $\varepsilon \gg \varepsilon_s$ ve r'nin çok büyük olduğu durumlarda yabancı partiküller sıvı içerisinde kolayca iletken köprüler meydana getirirler. Eğer $\varepsilon_s = 1$, $k = 1.371 * 10^{-23}/K^o$ ve $T = 27\,^{o}$C olursa Tablo 2.2.1.5.1'deki delinme dayanımları ölçülür.

Tablo 2.2.1: Sıvıların Dielektrik Dayanımına Yabancı Parçacıkların Etkisi

Parçacık Çapı (^{o}A)	15	25	50	60	75	100	300
Delinme Dayanımı (E_d) (kV/mm)	160	70	25	20	15	9	1.9

Yukarıdaki tablodan açıkça görüleceği üzere yabancı partiküllerin çaplarının artması dielektrik dayanımı ciddi oranlarda düşürmektedir.

2.2.1.6. Elektrotlar Arası Mesafe ve Elektrot Tipi

Sıvı dielektrik malzemelerin delinme dayanımı elektrot tipine göre değişmektedir. Ancak bu değişimin ana nedeni elektrot tipinin nasıl bir elektrik alan oluşturduğuyla alakalıdır. Eğer iğne ya da çubuk-düzlem elektrot konfigürasyonu kullanıldıysa bu düzgün olmayan elektrik alan yaratacağından sivri ucun polaritesinin delinme dayanımına etkisi farklılık göstermektedir. Eğer sivri uçlu elektrot toprak elektrotu ya da negatif polariteye sahip olacak şekilde kullanılıyorsa delinme dayanımı pozitif polariteye sahip sivri uçlu iğne ya da çubuk-düzlem elektrot düzeninden daha yüksek delinme gerilimine sahiptir. Eğer iki elektrotta sivri uçlu yapıya sahipse bu durumda dielektrik dayanım pozitif sivri uç-düzlem elektrot düzeninden yüksek negatif sivri uç-düzlem elektrot düzeninden ise küçüktür. Ayrıca hem düzgün hem de düzgün olmayan elektrik alan altında elektrotlar arası açıklık arttıkça dielektrik dayanım yükselmektedir. Bu tez çalışmasında da üç farklı elektrot konfigürasyonunda sıvı yalıtkanlar test edilmiştir.

2.2.1.7. Gerilimin Uygulanma Süresi

Yüksek elektrik alan stresi yaratan gerilimin uygulama süresinin artması sıvı yalıtkanların delinme dayanımının artmasıyla sonuçlanmaktadır. Buna göre mikro saniye (μs) sürede uygulanan darbe gerilimi altında sıvıların dielektrik dayanımları daha yüksektir. Ancak burada yağın tazelik durumu çok ciddi bir etkendir. Eğer yağ temiz ve taze ise delinme dayanımı darbe gerilimi altında en yüksek olarak ölçülür. Bu tez çalışmasında üç farklı gerilim türü yüksek elektrik alan stresi oluşturmak amacıyla kullanılmış bir bakıma bu etki de test edilmiştir.

2.3. SIVI YALITKANLARDA DELİNME TÜRLERİ

Sıvı dielektrik malzemeler çeşitli sebeplerle dielektrik dayanımlarını kaybederek delinmeye uğrarlar. Delinme nedenleri birbirlerinden farklı olsa da yalıtım direncinin oldukça düştüğü sarih bir gerçektir. Sıvı yalıtkanlarda ya da bu tezin ana malzemesi olan trafo yağlarında başlıca termik delinme, elektromekanik delinme ve elektriksel delinme türleri bulunmaktadır. Tüm bu delinme türleri birbirlerinden farklı özelliklere sahip süreçlerden oluşmaktadır. Burada önemli olan bir sıvı yalıtkanın bu delinme türlerine karşı yalıtım direncinin yükseltilmesi ve delinmeye sebebiyet veren faktörlerin olabildiğince ortadan kaldırılmasıdır. Böylece özellikle trafolardan uzun ve verimli bir işletme ömrü içinde daha sürdürülebilir fayda sağlanmaktadır.

2.3.1. Elektromekanik Delinme

Gaz kabarcıkları ve boşlukların hava ile dolmasından dolayı sıvı yalıtkanların delinme dayanımı düşmektedir. Bu boşluklardaki gaz veya hava yalıtkanı daha düşük yalıtım direncine sahip olduğundan dolayı ilk deşarjlar buralarda meydana gelmektedir. Bu deşarjlar sıvı dielektrik malzemenin delinme dayanımını düşürmektedir. Habbeciklerin elektrostatik kuvvetler tarafından çekilerek daha uzun boylu hale getirilmesi sıvı içerisindeki uzunluğunu arttırmaktadır. Sonuç olarak su buharı ve kabarcıklar büyür ve sıvının delinme dayanımı çok daha düşüş gösterir.

Sıvılar elektrotlara dış basınç olan p_D, gaz kabarcıklarının basıncı p_H ve adezyon ya da yapışkan basıncı olan p_A ile bağlıdırlar. Toplam basınç $p_D - p_H + p_A$ formülüyle hesaplanmaktadır. Eğer bu basınç elektrostatik kuvvetin çekme etkisinden dolayı oluşan basınçtan küçük olursa sıvı yalıtkanda elektromekanik delinme görülmektedir.

2.3.2. Termik Delinme

Saflığı bozan yabancı parçacıklar ve su buharı yüksek elektrik alan altında polarize olup iletken köprü oluşturarak sıvı yalıtkanın daha düşük gerilim seviyelerinde delinmesine neden olurlar. İki elektrot arasında elektriksel olarak tamamen iletken olan bu köprüden akım geçmesiyle beraber ilgili bölgelerde ciddi ısı artışları meydana gelmektedir. Eğer sıvı içerisinde metal mikro veya nano partiküller bulunursa yalıtkanın bozunma süreci hızlanmaktadır. AC ve DC gerilim altında sıvı dielektriklerin bir dakikalık delinme dayanımlarının incelenmesinde en sık karşılaşılan boşalma türü termik delinme olarak öne çıkmaktadır. Sıvı içerisinde bulunan yabancı maddeler bu delinme türünü etkileyen tek parametredir. Sıvı dielektriğin kendi kimyasal yapısı termik delinmeyi etkileyecek bir faktör olarak değerlendirilmemektedir.

2.3.3. Elektriksel Delinme

Sıvı yalıtkanın taze ve kirli olmaması durumunda gerilimin kısa süreli uygulanması sırasında ortaya çıkan delinme türü gazlarda çokça görülen korona boşalmaları gibi meydana gelmektedir. Elektrik akımı belirli bir gerilim değerine kadar lineer olarak artarken daha sonra korona başlangıç gerilimine kadar sabit değer almaktadır. Ancak korona başladıktan sonra akım değeri lineer olmayan eksponansiyel bir davranışla hızlıca artış gösterir. Akımı sınırlandırmanın en etkili yolu elektrotlar arası açıklığı arttırmaktır. Böylece sıvı yalıtkan daha yüksek gerilim seviyelerinde delinmeye uğrar. Bu durum sıvı dielektriğin kimyasal yapısına bağlı olarak değişim göstermektedir.

3. YÖNTEM

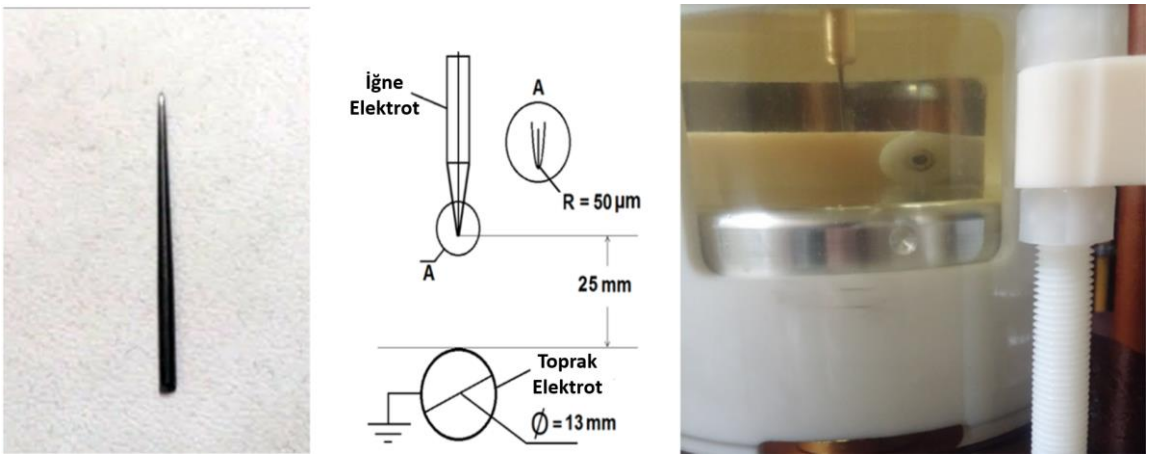
3.1. DENEY DÜZENEĞİNİN HAZIRLANMASI

AC gerilim testleri ASTM D1816-12 ve ASTM D877/87M-19 standartlarına göre yapılmıştır [44,45]. Bu standartlar kapsamında her ikisi de pirinç malzemeden yapılmış disk ve VDE tipi elektrotlar kullanılmıştır (Şekil 3.1.1). Elektrodun disk olan kısmı 36 milimetre çapında ve 1 cm kalınlığına sahiptir. Çubuklar 8 mm çapında ve 4 cm uzunluğunda tutucu çubuklar diskin merkezinden itibaren destek olarak tutturulmuştur. VDE elektrodun şapka/mantar noktasının oluşmaya başladığı kavis 4 mm yarıçapına sahiptir. Mantarın dikey olarak boyu 36 mm çapında ve en arka noktasından kafa ön en uç noktasına kadar olan mesafesi 13 mm'dir.



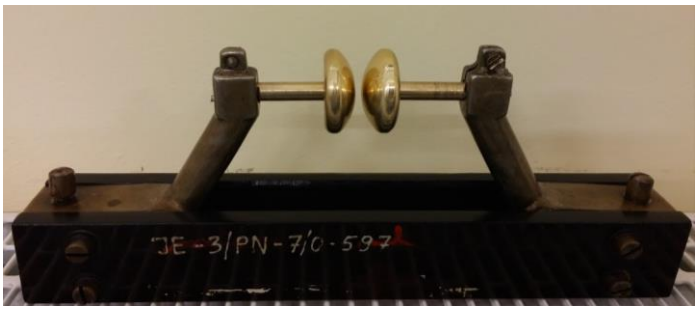
Şekil 3.1.1: VDE ve Disk Elektrotlar

Bu elektrotlar AC ve negatif DC deneyleri sırasında kullanılmıştır. Darbe gerilimi testi (Lightning Impulse Test-LIT) deneylerinde IEC 60897 standardı gereğince çelik iğne-silindir elektrot düzeni kullanılmıştır [46]. Darbe gerilimi 6 katlı 500 kV maksimum genlik ve 2.2 kilo-Joule (kJ) enerji seviyesine sahip Marx jeneratörü aracılığıyla elde edilmiştir. Darbe gerilimi yıldırım darbesi ile aynı yükselme ve kuyruk zamanları olan 1.2/50 µs koşulunu sağlamaktadır. İğne elektrot 4 cm uzunluğuna ve 50 mm uç noktası kalınlığına sahiptir. Toprak elektrot ise 13 cm çap ve 2 cm kalınlığında silindir şeklindedir. İki elektrot arasındaki mesafe standart gereği 25 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu düzene ait görsel Şekil 3.1.2'de verilmiştir.

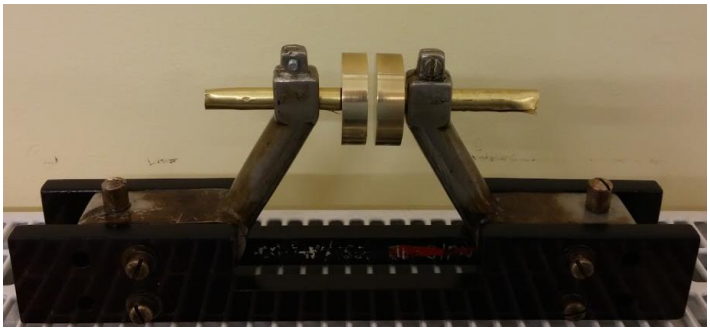


Şekil 3.1.2: Darbe Gerilimi Testinde Kullanılan İğne Elektrot ve Toprak Elektrot

Elektrotlar alt tutucu noktası ahşap ve elektrot tutucu noktaları çelik malzemeden yapılmış bir düzenekle kullanılmıştır (Şekil 3.1.3). Deneylerde mineral yağ (Nytro TAURUS), doğal ester yağ (MIDEL en1204) ve sentetik ester yağ (MIDEL 7131) kullanılmıştır. Yağlara ait değerler Tablo 3.1.1'de verilmektedir. Deney kabı borosilikat malzemeden yapılmış olup 200x100x142 mm boyutlarında 4 mm kalınlığa sahiptir. Deneyler sırasında deney kazanına 2 litre hacminde trafo yağı doldurulmuştur. Şekil 3.1.4 ve 3.1.5'te üç yağa ait iki elektrot düzenindeki sistem gösterilmiştir.

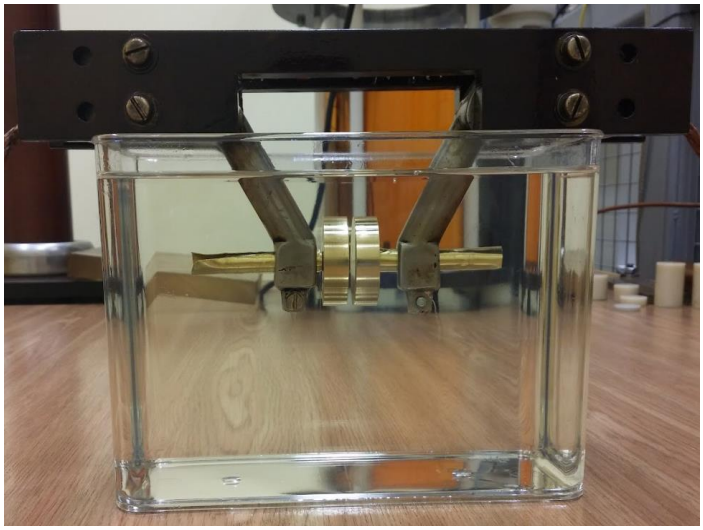


a

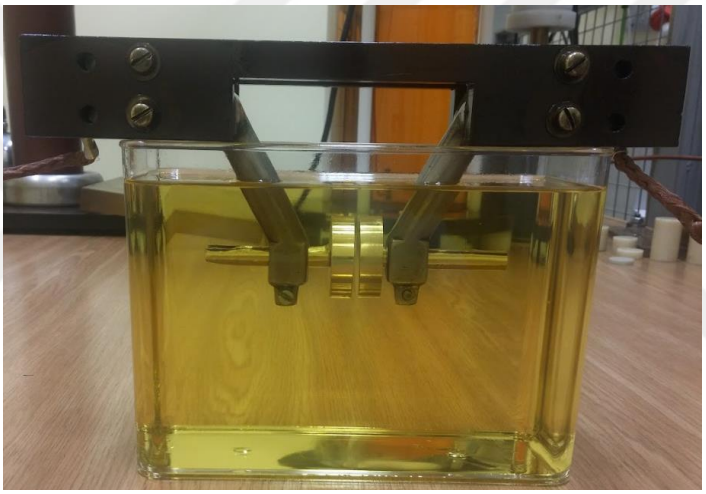


b

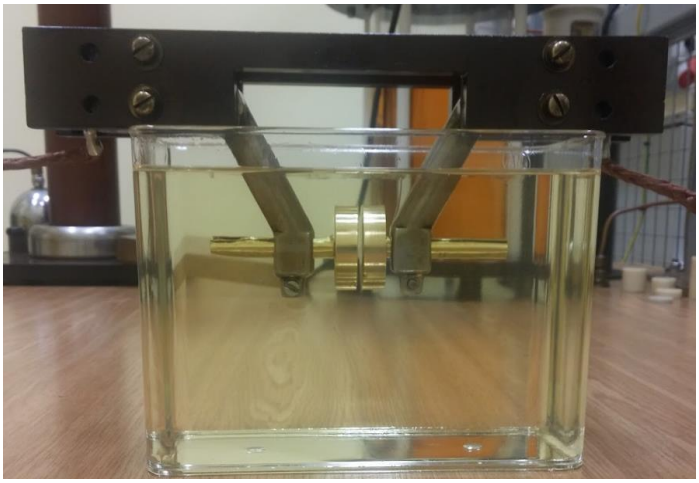
Şekil 3.1.3: Elektrot Tutucu Düzenekler (a-VDE Elektrot, b-Disk Elektrot)



a



b



c

Şekil 3.1.4: Deney Kazanı içinde Disk Elektrot Düzeninde Yağlar
(a-Mineral Yağ, b-Doğal Ester Yağ, c-Sentetik Ester Yağ)



a



b



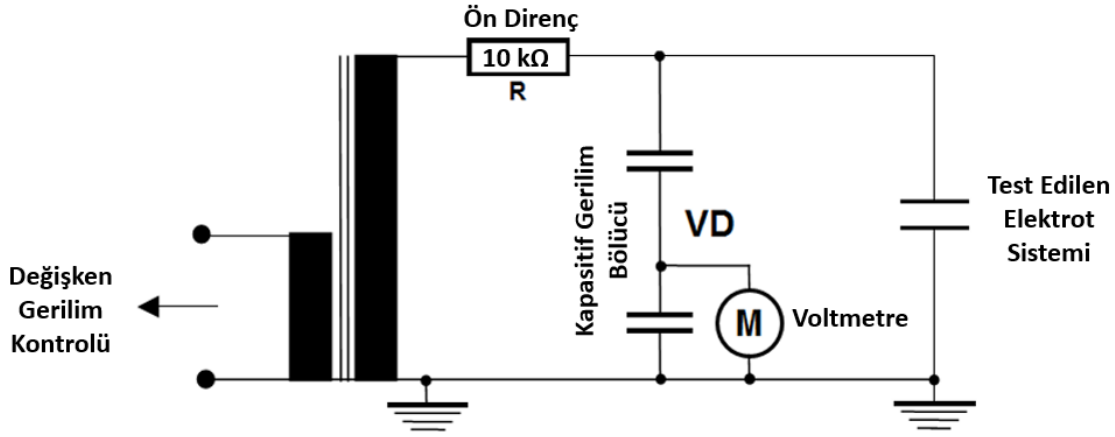
c

Şekil 3.1.5: Deney Kazanı içinde VDE Elektrot Düzeninde Yağlar
(a-Mineral Yağ, b-Doğal Ester Yağ, c-Sentetik Ester Yağ)

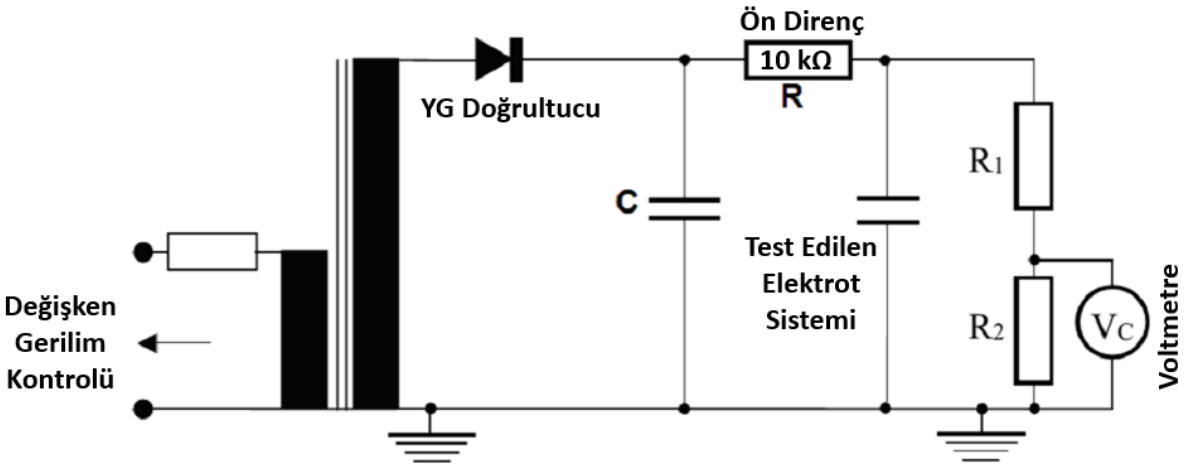
Tablo 3.1.1: Yağların Elektriksel ve Fiziksel Parametreleri

Parametre/Birim	Sıvı Yalıtkan		
	Mineral Yağ	**Doğal Ester Yağ**	**Sentetik Ester Yağ**
Dielektrik Sabiti	2.2	3.1	3.2
Dielektrik Kayıp Faktörü (90 ˚C)	0.001	0.027	0.007
Viskozite (40 ˚C) [mm^2/s]	9.5	37	28
Yoğunluk (20 ˚C) [g/cm^3]	0.87	0.92	0.97
Yanma Noktası [˚C]	150	350	260
Akma Noktası [˚C]	-51	-31	-60
Nem İçeriği [ppm]	6.8	56	69

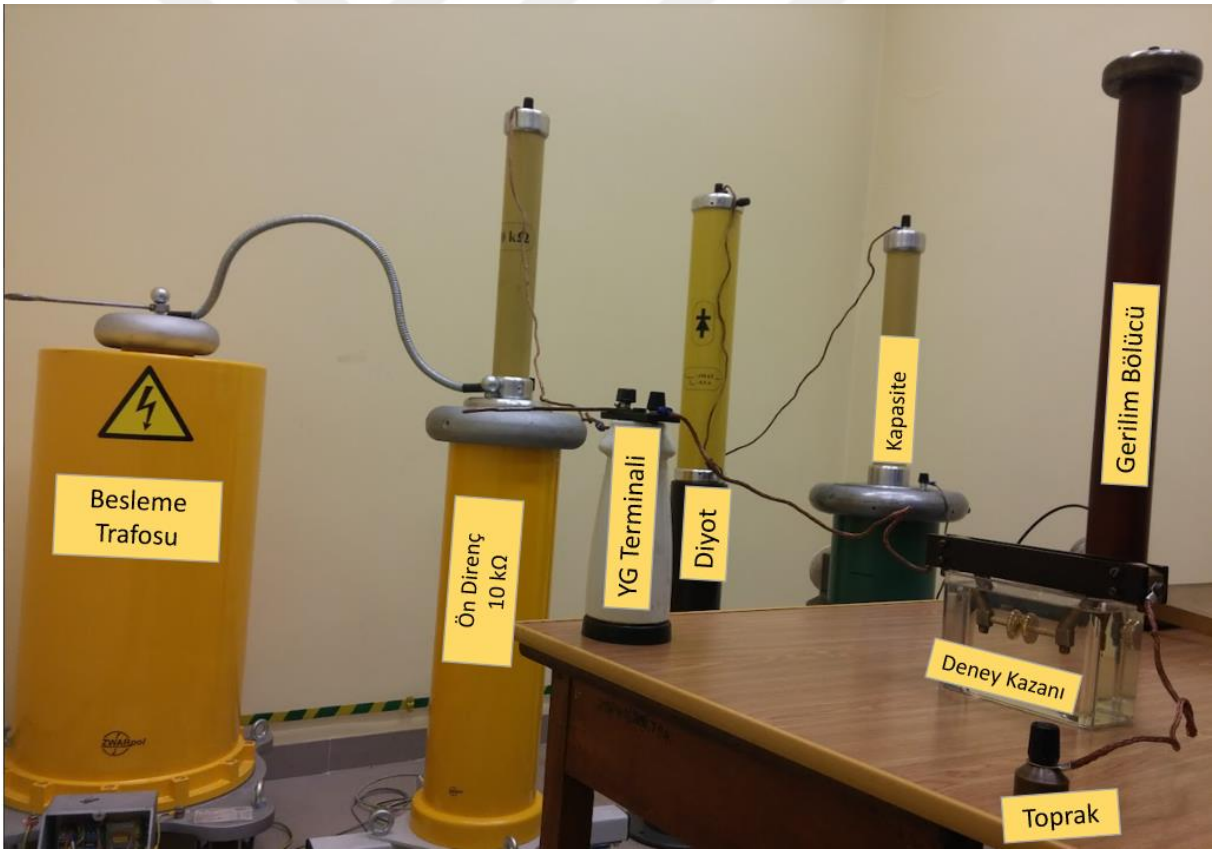
AC ve negatif DC deneylerinde 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm elektrot açıklıklarında deneyler yapılmıştır. Bu hassas açıklıklar özel yapım elektrot tutucular sayesinde adaptif olarak ayarlanmıştır. AC yüksek gerilim elde etmek için 10 kVA gücünde, 230 V/100 kV çevirme oranına sahip bir trafo kullanılmıştır. Negatif DC gerilim aynı laboratuvarda bağlantılar değiştirilerek elde edilmiştir. 10 kΩ değerine sahip ön direncin çıkışı yüksek gerilim doğrultucusuna negatif sinyal geçirecek şekilde bağlanmıştır. Buradan elde edilen doğru gerilim 500 pF değerindeki kapasiteye bağlanmış olup doğru gerilim elde edilmiştir. AC ve negatif DC gerilimlere ait devre şeması ve görseller sırasıyla Şekil 3.1.6, Şekil 3.1.7 ve Şekil 3.1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1.6: AC Yüksek Gerilim Kaynağı Devre Şeması

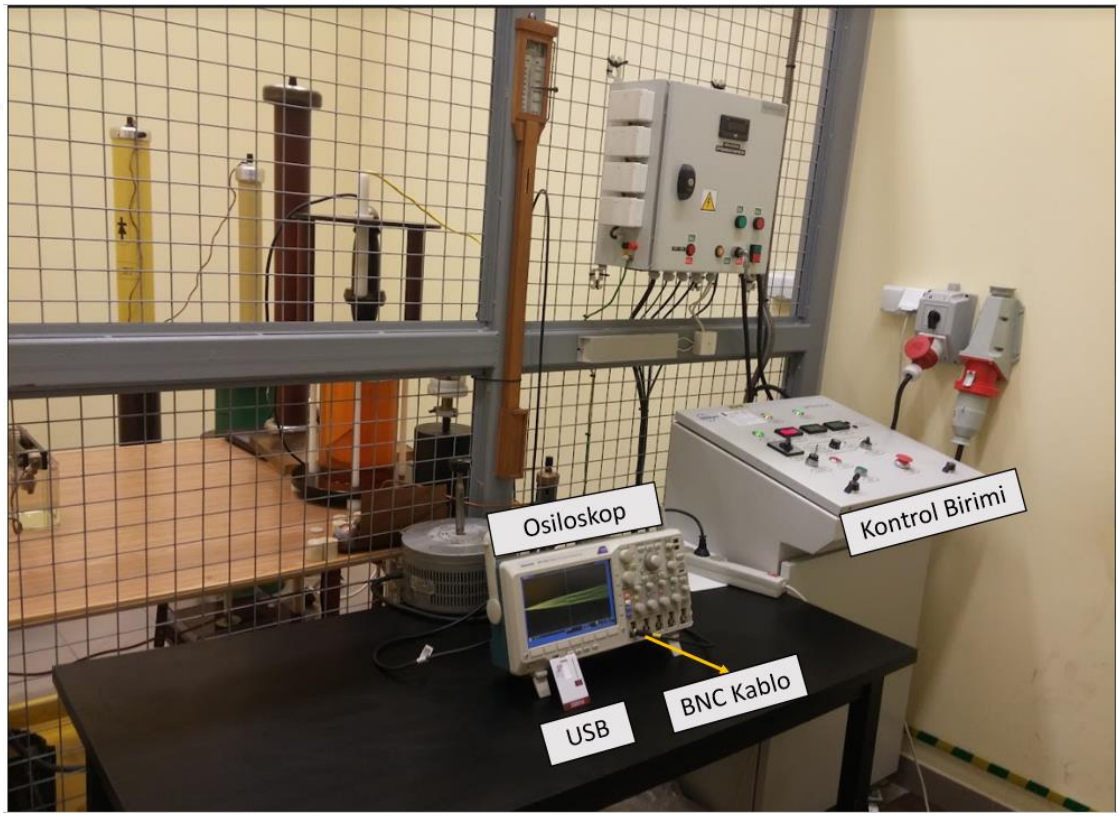


Şekil 3.1.7: DC Yüksek Gerilim Kaynağı Devre Şeması, R_1, R_2: Rezistif Gerilim Bölücü



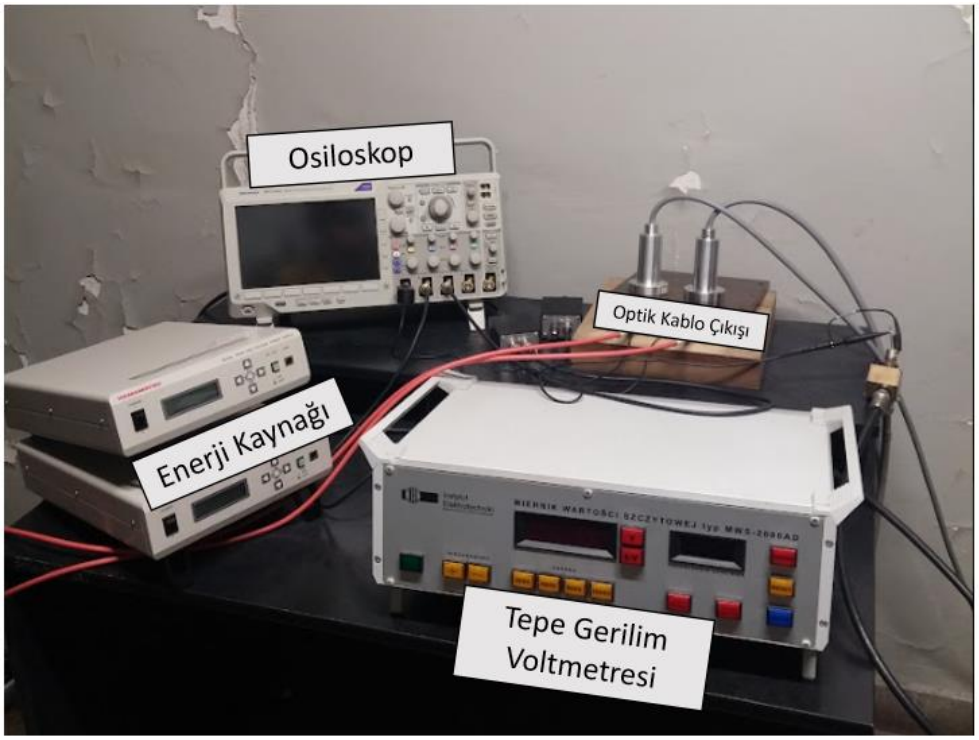
Şekil 3.1.8: AC ve Negatif DC Deney Düzeneği Fotoğrafı

VDE elektrot düzeninde standart gereği gerilim artış miktarı 0.5 kV/s disk elektrotta ise 3 kV/s olacak şekilde ZWARpol markasına ait UP10-100 AC model numaralı kontrol ünitesinde otomatik artış fonksiyonuyla ayarlanmıştır. Bu sistem AC ve negatif DC gerilim deneyleri için aynı şekilde kullanılmıştır. Ayrıca trafonun birincil sargısına bağlı 215 Ω değerindeki alüminyum direnç üzerinden akım verisi alınmıştır. Akan akım Tektronix firmasına ait DPO3054 model numaralı 500 MHz bant genişliğine ve 2.5 GS/s örnekleme hızına sahip Digital Phosphor Oscilloscope aracılığıyla yüksek hassasiyetli BNC kablo ile ölçülmüştür (Şekil 3.1.9). Veriler bir USB bellek ile alınıp daha sonra bilgisayara aktarılmıştır.

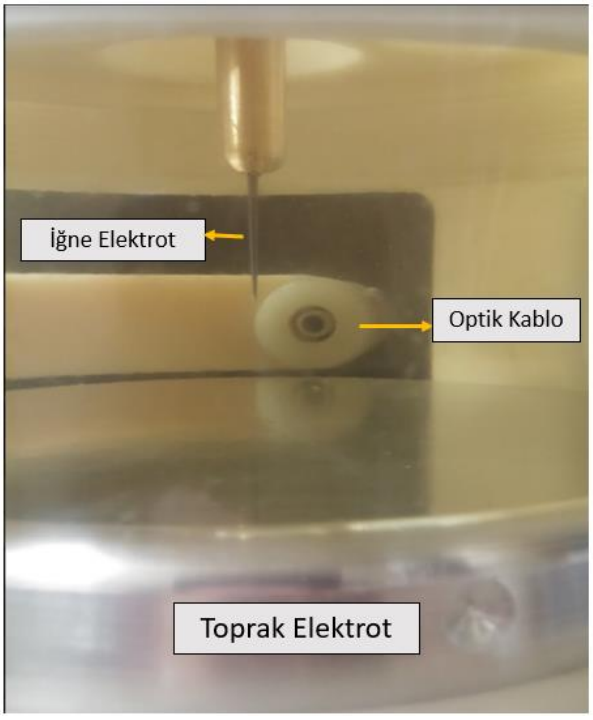


Şekil 3.1.9: Akım Verisi Elde Etme Düzeneği

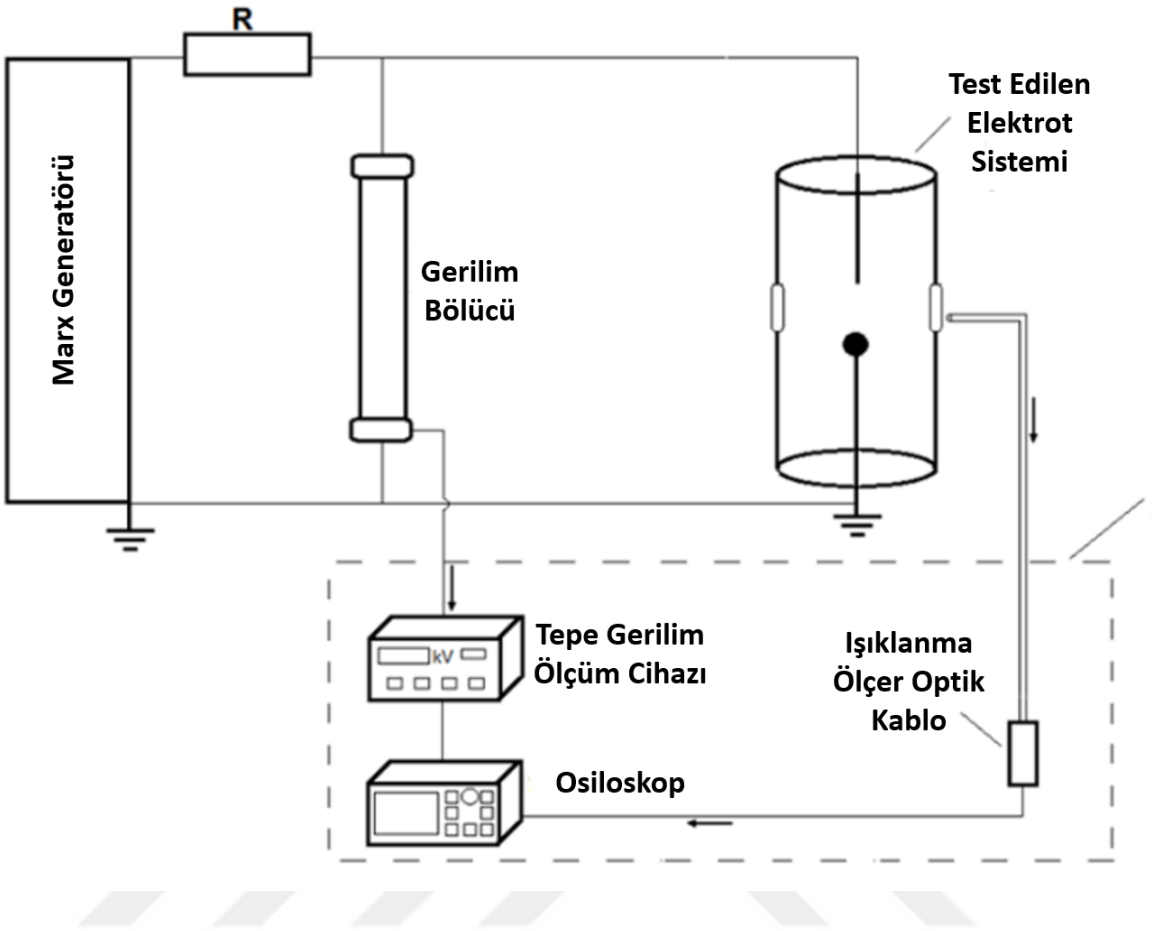
Darbe gerilimi testinde gerilim bölücüden verilen darbe gerilimi tepe gerilim ölçme aletiyle ölçülmüştür. Ayrıca deney kabının içerisindeki ışıklanma da yüksek hassasiyetli optik alıcı (fotomultiplier) ile ölçülmüştür. Tüm ölçümler BNC kablo aracılığıyla aynı osiloskop üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1.10'da bu düzeneğe ait görsel yer almaktadır. Ayrıca deney kazanı içerisindeki elektrot sistemi görüntüsü Şekil 3.1.11'de verilmiştir. Darbe gerilimi devre şeması Şekil 3.1.12'de gösterilmiştir. Bu deney düzenekleriyle oluşturulan sistemlerde testler Lodz Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Güç Enstitüsünde bulunan yüksek gerilim laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1.10: Darbe Gerilimi Veri Elde Etme Düzeneği



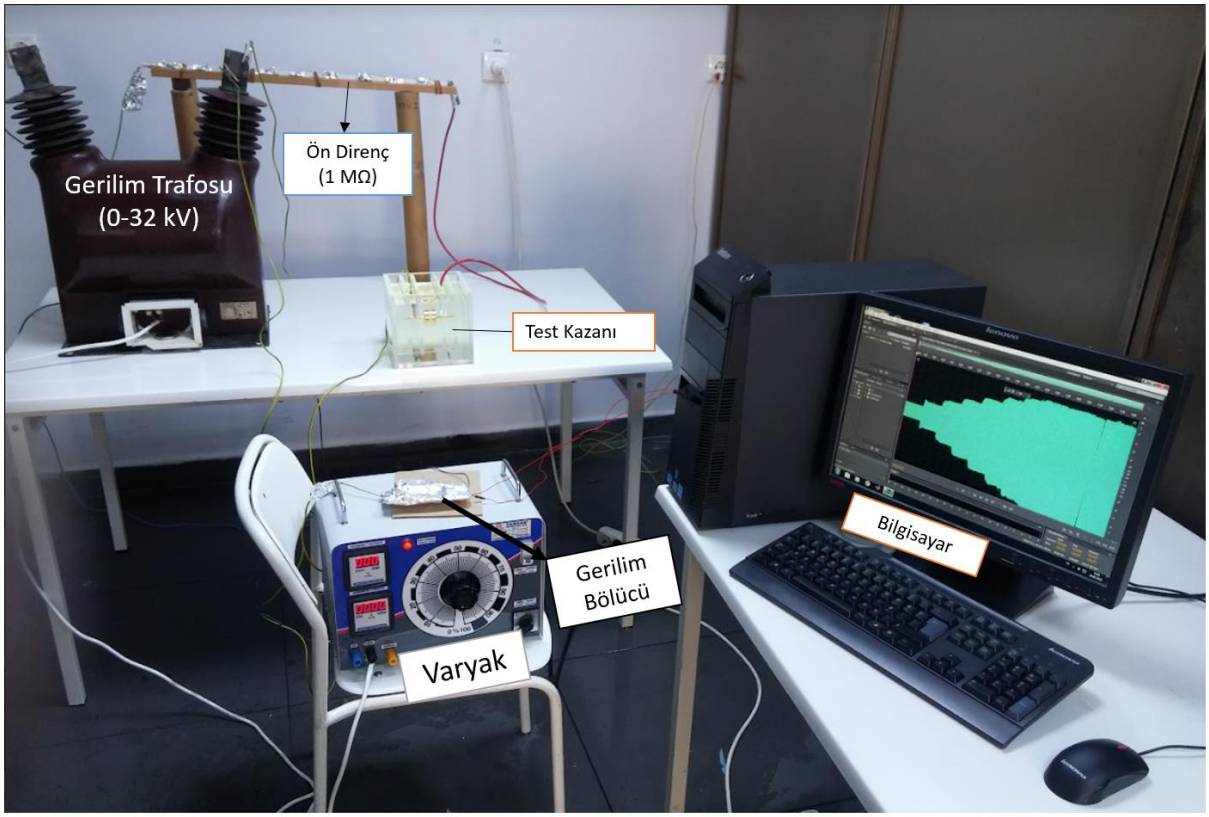
Şekil 3.1.11: İğne-Silindir Elektrot Sistemi ve Optik Kablo



Şekil 3.1.12: Darbe Gerilimi Testi Devre Şeması

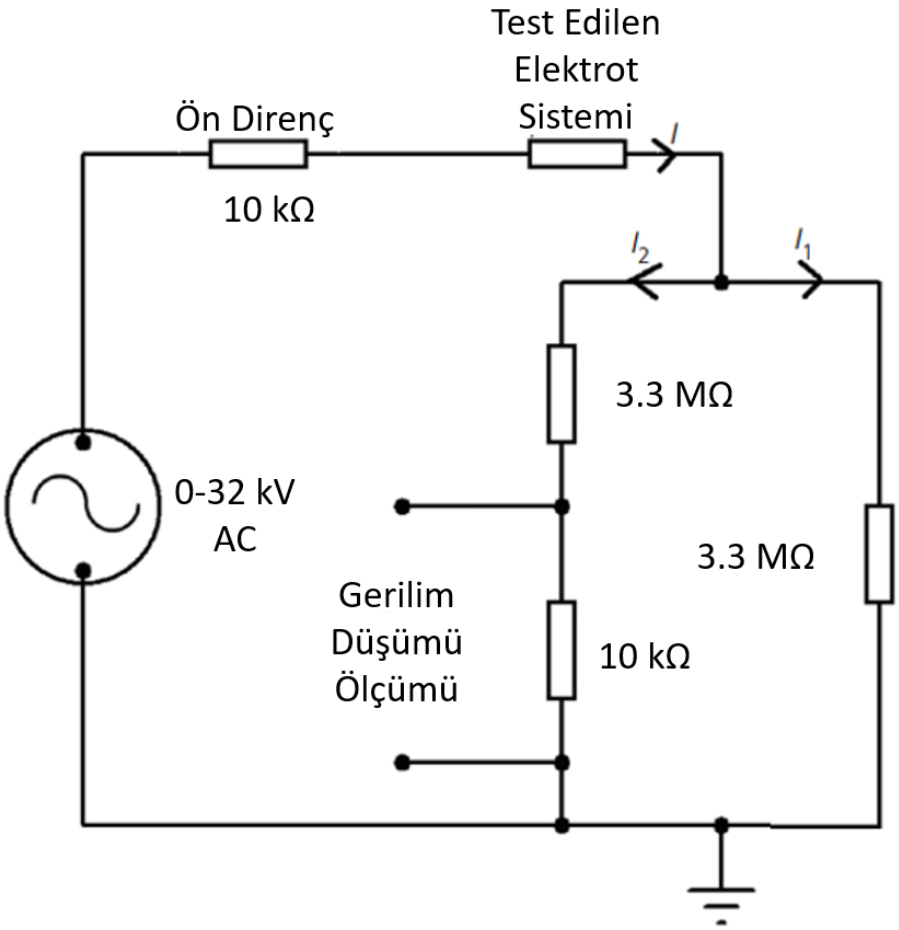
3.2. METAL PARÇACIKLARIN ETKİSİNİN İNCELENMESİ İÇİN DENEY DÜZENEĞİNİN KURULMASI

Trafolarda bulunan bakır sargılar ve demir nüveden, servis ömrü boyunca nano boyutta parçacıklar kopmaktadır. Bu metal parçacıklar oksit özelliği göstermesinin yanı sıra yağ içerisine sızarak delinme dayanımını etkileyecek şekilde davranırlar. Trafo yağı içerisinde meydana gelen iyonizasyon ve iletken köprü oluşumunu farklı yönlerde etkileyen metal oksit parçacıkların etkisinin incelenmesi için İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Gerilim Laboratuvarında bir yüksek AC gerilim deney seti kurulmuştur. Demir ve bakır nano oksitlerin etkisi üç farklı trafo yağı için ASTM D1816-12 ve ASTM D877/87M-19 standartlarına göre disk ve VDE tipi elektrotlar kullanılarak 1 mm elektrot açıklığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler önce metal parçacık içermeyen taze ve temiz yağ için yapılmıştır. Daha sonra ilgili metaller eklenerek yağlar test edilmişlerdir. Deney düzeneğine ait görsel Şekil 3.2.1'de gösterilmiştir.



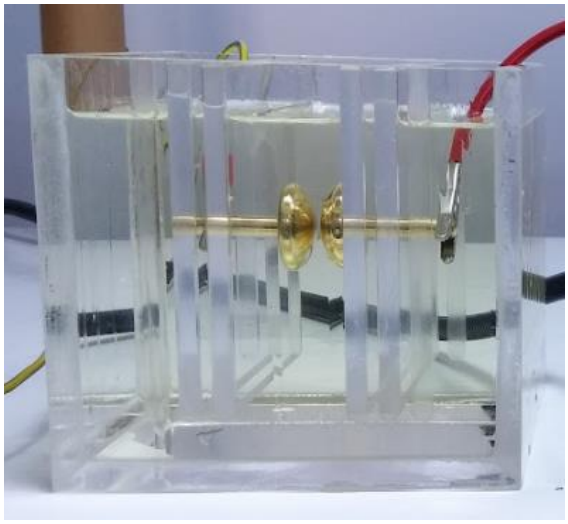
Şekil 3.2.1: Nano Parçacıkların Etkisinin İncelenmesi için Kurulan Deney Düzeneği

Yüksek gerilim elde etmek için 1.5 kVA görünür güce, 220 V/ 32 kV dönüştürme oranına sahip bir gerilim transformatörü kullanılmıştır. Bu trafoya şebekeden elde ettiği gerilimi istenilen oranda değiştirebilen oto trafo ile besleme yapılmıştır. Trafonun yüksek gerilim çıkışına 1 MΩ direnç değerine sahip ön direnç kullanılmıştır. Test kabı pleksiglas malzemeden yapılmış olup, 15x15x15 cm boyutlarında ve 10 mm et kalınlığına sahiptir. Kabın ortasından sağa ve sola 2 cm mesafe bırakıldıktan sonra 8 mm genişliğinde, 5 mm kalınlığında ve 13 cm dikey uzunluğunda toplam 12 kanala sahiptir. Bu kanalların varlığının nedeni elektrotların yerleştirilmesi ve elektrotlar arasındaki boşluğun ayarlanmasıdır. Elektrotları tutmak için bu kanallara 8 mm genişliğinde ve 13 cm uzunluğunda plakalar yerleştirilmiştir. Toprak elektrotu üzerinden taş dirençlerden oluşan gerilim bölücü devre aracılığıyla o noktadaki gerilim düşümü ölçülmüştür. Bu değer direnç değerine bölünerek o noktadan akan elektrik akımı hesaplanmıştır. Kullanılan gerilim bölücüye ait devre şeması Şekil 3.2.2'de verilmiştir. Bu akım değerleri anlık olarak 44.1 kHz örnekleme frekansıyla bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir. Her durum için deneyler standartlar ölçüsünde 5 defa tekrar edilmiştir.

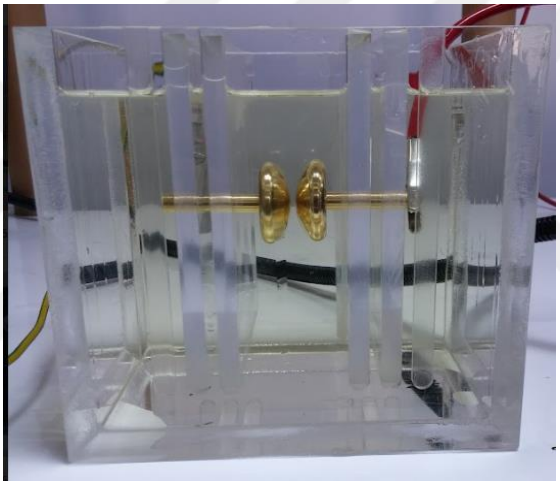


Şekil 3.2.2: Akım Ölçümü için Kurulmuş Devre Şeması

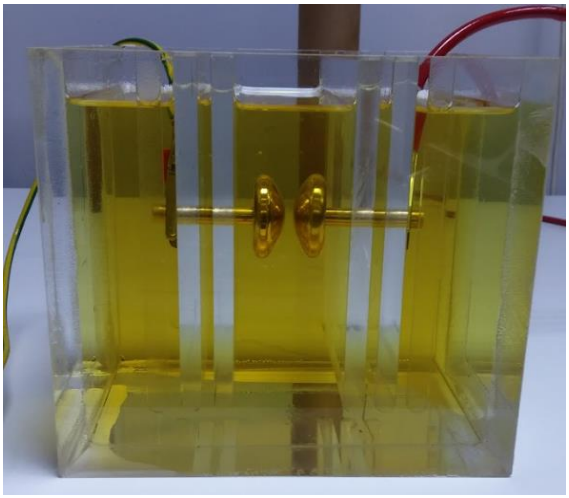
10 kΩ direnç üzerinden I_2 akımı hesaplanarak metal parçacıkların üç farklı sıvı dielektriğin delinme dayanımına etkisi incelenmiştir. VDE elektrot düzeninde mineral yağ, doğal ester yağ ve sentetik ester yağın deney kazanı içerisindeki durumunu gösteren görseller Şekil 3.2.3'te verilmiştir. Ayrıca üç trafo yağının disk elektrot düzeninde deney kazanı içerisindeki görüntüleri Şekil 3.2.4'te verilmiştir.



a

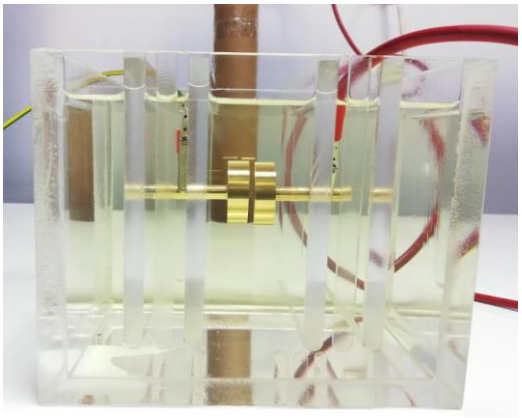


b

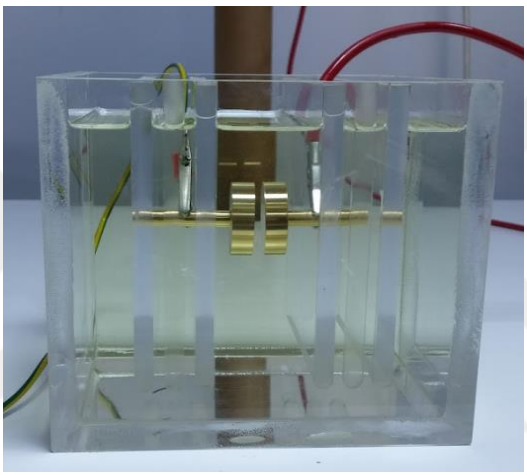


c

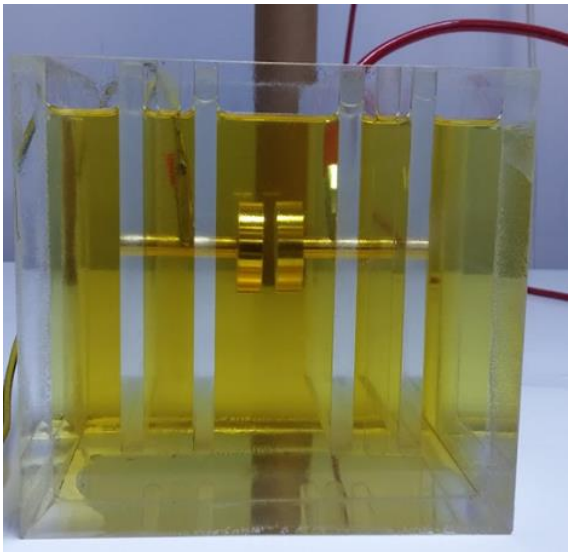
Şekil 3.2.3: Deney Kazanı içinde VDE Elektrot Düzeninde Sıvı Dielektrikler (a-Mineral Yağ, b- Sentetik Ester Yağ, c- Doğal Ester Yağ)



a



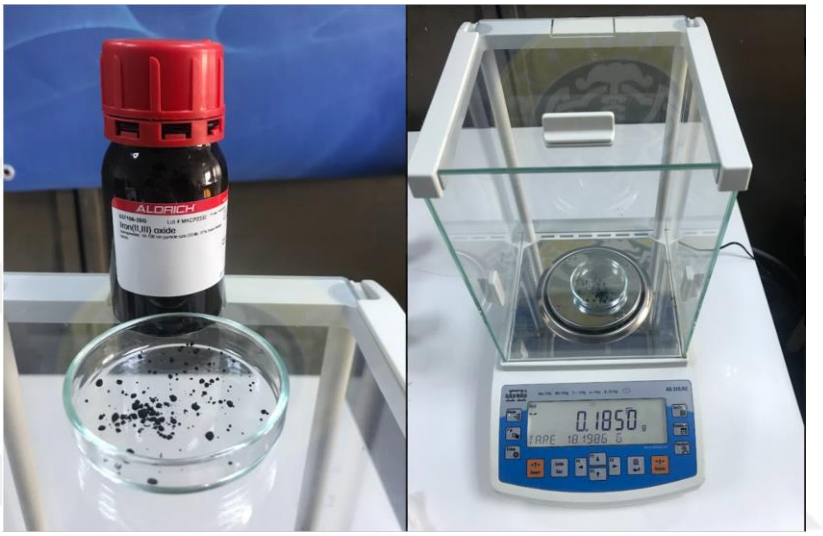
b



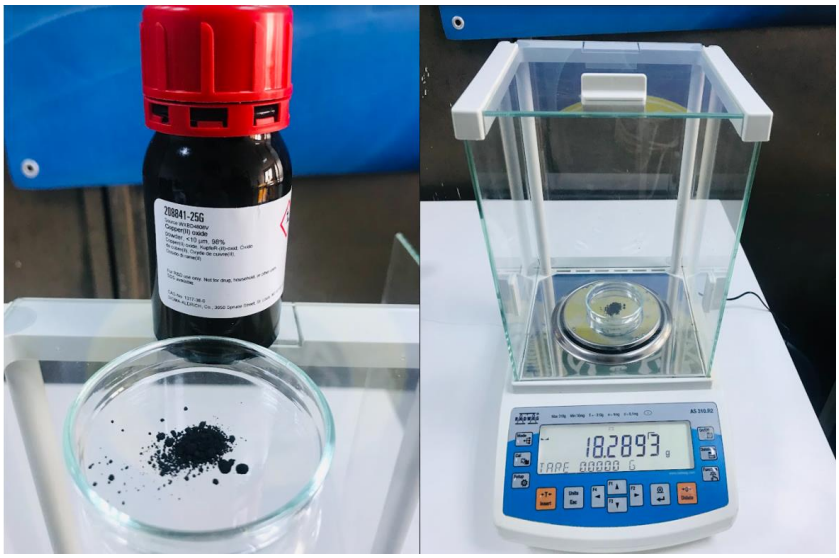
c

Şekil 3.2.4: Deney Kazanı içinde Disk Elektrot Düzeninde Sıvı Dielektrikler (a-Mineral Yağ, b- Sentetik Ester Yağ, c- Doğal Ester Yağ)

Trafolarda iletkenlerden kopan metal parçacıkların oksit özellikte olması nedeniyle bu tez çalışmasında yapılan deneylerde bakır oksit ve demir oksit nano partiküller kullanılmıştır. 50-100 nanometre (nm) boyutundaki Fe_3O_4 0.001 *g/l* oranında ve 100 nm boyutundaki CuO partikülleri 0.1 *g/l* oranında yağ içerisine katılarak sızıntı akımları verisi yardımıyla dielektrik davranış test edilmiştir. Bu parçacıklar yağ içerisinde basit bir mekanik karıştırıcı ile dağıtılmıştır. Nano parçacıkların ağırlıkları hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 3.2.5'te sırasıyla demir ve bakır tozlarının ölçüm düzeneklerine ait bir örnek gösterilmiştir.



a



b

Şekil 3.2.5: Demir (a) ve Bakır (b) Partiküllerinin Ağırlık Ölçüm Düzeneği

4. BULGULAR

4.1. AC GERİLİM DENEYLERİ

AC yüksek gerilim stresi deneyleri her bir açıklık için en az 5 kez tekrar edilmiştir. Ölçülen delinme gerilimlerinin aritmetik ortalaması Denklem 4.1.1'de gösterildiği gibi hesaplanarak delinme gerilimi değeri hesaplanmıştır.

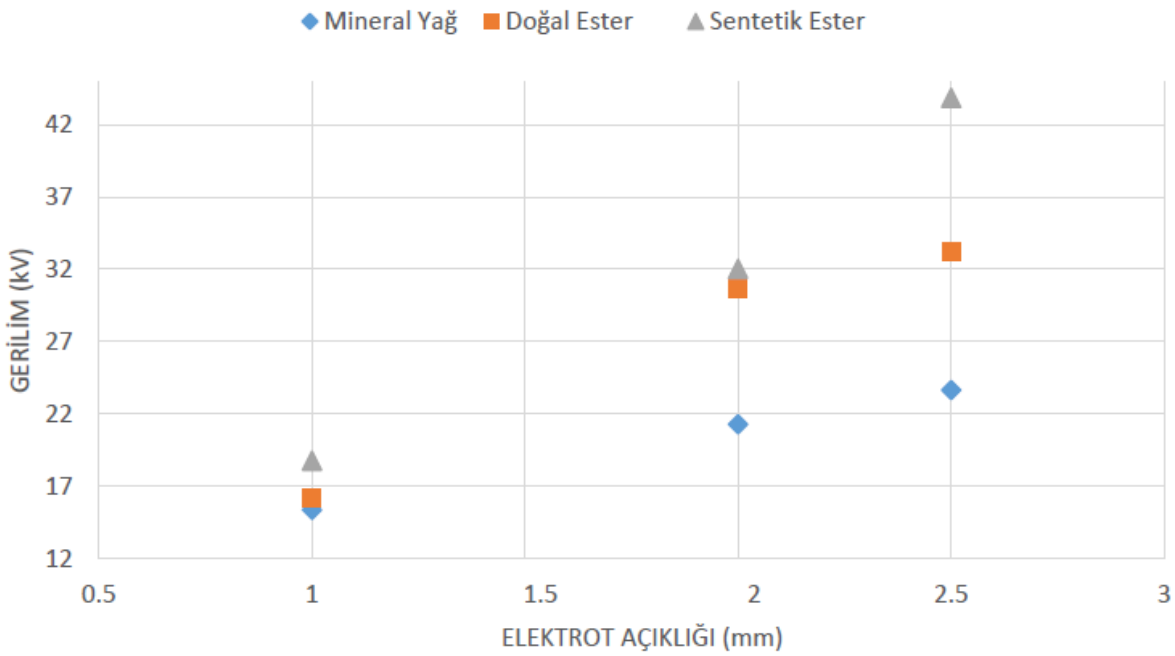
$$\bar{x} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} x_i \tag{4.1.1}$$

Burada $\bar{x}$ delinme gerilimini, x_i ise i. deneydeki delinme gerilimini göstermektedir.

VDE elektrot düzeninde mineral yağ ile yapılan deneylerde sırasıyla 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm açıklıklarında AC delinme gerilimi 23.64 kV, 21.28 kV ve 15.36 kV olarak ölçülmüştür. Elektrot açıklığı azaldıkça delinme gerilim değerinin de düştüğü görülmektedir. Elektrot açıklığı 2 mm olduğunda % 9.98 oranında, 1 mm elektrot açıklığında delinme geriliminde %27.81 oranında bir düşüş görülmektedir. Doğal ester yağın 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm açıklıklarında AC delinme gerilimi 33.24 kV, 30.7 kV ve 16.18 kV olarak ölçülmüştür. Sentetik ester yağın delime dayanımı diğer yağlara göre yüksek olduğu bilinmektedir. Deneyde bu yağ için sırasıyla 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm açıklıklarında AC delinme gerilimi 43.84 kV, 32.02 kV ve 18.76 kV olarak ölçülmüştür. MIDEL 7131 en yüksek delinme gerilimlerine sahip olarak en iyi dielektrik performansı veren sıvı yalıtkan olarak öne çıkmaktadır. Ancak en düşük elektrot açıklığında fark giderek azalmaktadır. Sentetik ester yağ 1 mm açıklıkta mineral yağa göre 3.4 kV doğal ester yağa göre 2.58 kV miktarında daha yüksek delinme gerilimi değerine sahiptir. Tüm yağlara AC delinme gerilimlerini özeti Tablo 4.1.1 ve Şekil 4.1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1.1: VDE Elektrot Düzeninde AC Delinme Gerilimleri

	Delinme Gerilimi (kV)		
d (mm)	**Mineral Yağ**	**MIDEL en 1204**	**MIDEL 7131**
1	15.36	16.18	18.76
2	21.28	30.7	32.02
2.5	23.64	33.24	43.84



Şekil 4.1.1: VDE Elektrot Düzeninde AC Delinme Gerilimlerinin Grafiği

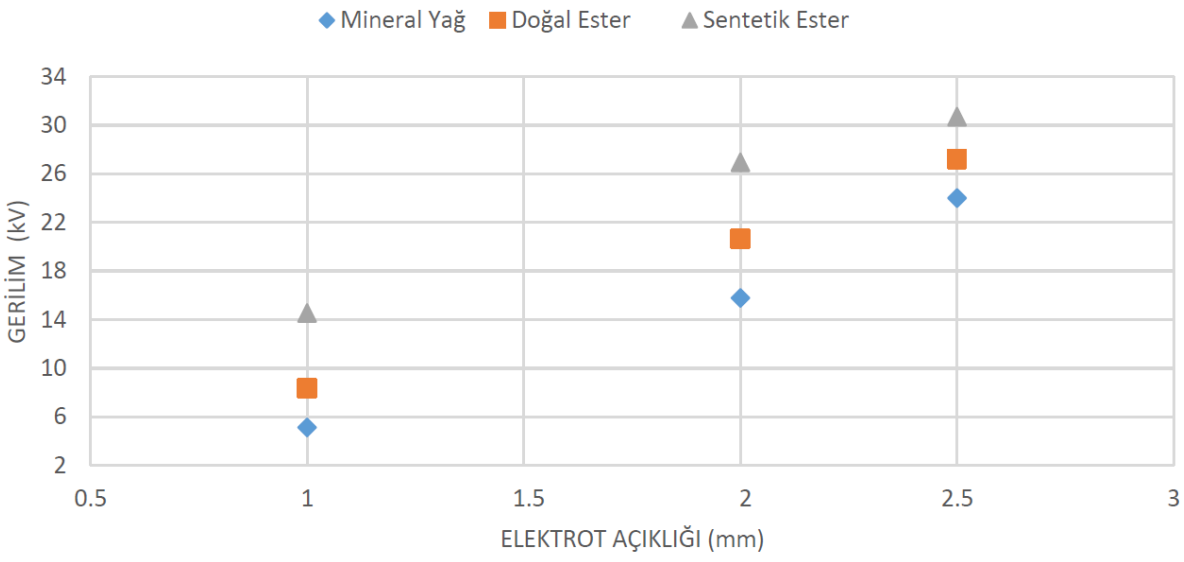
Görüldüğü üzere büyük elektrot açıklıklarında yağlar arasındaki delinme gerilimleri arasındaki fark daha yüksek iken elektrot açıklığı azaldıkça bu fark daha düşük seviyelerde gerçekleşmektedir. Yüksek gerilim stresi altında ilk elektron koptuktan sonra tam delinme sürecinin ilk adımı olan iyonizasyon başlar. Elektronlar karşı elektroda ulaşıp iletken köprü meydana getirmek için çok hızlı hareket ederler [41]. Ancak mesafenin kısa olması durumunda çığ oluşumu ve iletken köprü daha kısa zamanda gerçekleşmektedir [40,47].

Disk elektrot yapısal olarak mantar elektrottan daha farklı bir geometriye sahiptir. Bu elektrotta elektrik alanın daha düzgün olması beklenmektedir. Bu yüzden de daha yüksek delinme gerilimlerinin olacağı tahmin edilebilir. Ancak yapılan deneylerde genel olarak sonuçların beklenenden farklı olduğu görülmüştür. Disk elektrot düzeninde mineral yağ ile yapılan deneylerde sırasıyla 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm açıklıklarında AC delinme gerilimi 24 kV, 15.78 kV ve 5.12 kV olarak ölçülmüştür. VDE elektrot konfigürasyonu ile karşılaştırıldığında en yüksek elektrot açıklığında disk elektrotta mineral yağın delinme gerilimi çok az bir miktar da olsa daha yüksektir. Mineral yağın yüksek elektrot açıklığında düzgün elektrik alanda iyi bir performans gösterdiği görülmektedir. Delinme gerilimi VDE elektrot ile kıyaslandığında, en düşük elektrot açıklığında farkın en fazla olduğu görülmektedir. Doğal ester yağın 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm açıklıklarında AC delinme gerilimi 27.2 kV, 20.64 kV ve 8.36 kV olarak ölçülmüştür. MIDEL en1204 mineral yağa göre farklı bir delinme davranışı göstermiştir. Bütün

açıklıklarda delinme gerilimi azalmıştır ve en düşük elektrot açıklığında mineral yağ ile arasındaki fark azalmıştır. Doğal ester yağ elektrot açıklığı azaldıkça VDE elektroda göre daha fazla farkla düşük delinme gerilimine sahiptir. Sentetik ester yağın delime dayanımı VDE elektrot düzeninde diğer yağlara göre yüksek ölçülmüştür. Disk elektrot düzeninde bu yağ için sırasıyla 2.5 mm, 2 mm ve 1 mm açıklıklarında AC delinme gerilimi 30.7 kV, 26.94 kV ve 14.54 kV olarak ölçülmüştür. Disk elektrot kullanıldığında delinme gerilimi (DG) en fazla düşen yağ sentetik ester yağdır. Tüm yağlara AC delinme gerilimlerini özetleyen tablo ve grafik Tablo 4.1.2 ve Şekil 4.1.2'de gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 4.1.3'te iki elektrot düzeninde ölçülen AC delinme gerilimleri ve farklar verilmiştir.

Tablo 4.1.2: Disk Elektrot Düzeninde AC Delinme Gerilimleri

	Delinme Gerilimi (kV)		
d (mm)	**Mineral Yağ**	**MIDEL en 1204**	**MIDEL 7131**
1	5.12	8.36	14.54
2	15.78	20.64	26.94
2,5	24	27.2	30.7



Şekil 4.1.2: Disk Elektrot Düzeninde AC Delinme Gerilimlerinin Grafiği

Tablo 4.1.3: AC Testlerde Elektrot Düzenleri Arasındaki DG Farkları (VDE_{DG}-$DİSK_{DG}$)

d (mm)	Mineral Yağ	MIDEL en 1204	MIDEL 7131
2.5	-0.36	6.04	13.14
2	5.5	10.06	5.08
1	10.24	7.82	4.22

Tablo 4.1.2'de görüldüğü üzere büyük elektrot açıklıklarında sadece mineral yağ disk elektrot düzeninde daha iyi performans göstermiştir. Diğer bütün durumlarda tüm yağlar disk elektrot düzeninde daha düşük delinme gerilimlerine sahiptir. En yüksek fark MIDEL 7131 için 2.5 mm elektrot açıklığında ölçülmüştür. Ayrıca disk elektrot düzeninde tüm elektrot açıklıklarında yağların delinme gerilimi arasındaki sayısal fark daha stabil bir davranış göstermektedir. Bu durum disk elektrot kullanıldığında daha düzgün elektrik alan elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Disk elektrot her ne kadar daha düzgün elektrik alan yaratmış olsa da köşe noktaları sivri uç etkisi göstererek delinme gerilimini düşürmektedir. İki elektrot düzenindeki delinme gerilimi farkları dielektrik performans açısından bilgi verebilir. Ancak deneylerde, uyulan standartlarda yer alan standart sapmaların (s) hesaplanması gerekmektedir. Standart sapma hesaplamasında kullanılan formüller ASTM D1816-12 standardı için Denklem 4.1.2'de ASTM D877/D877M-19 standardı için Denklem 4.1.3'te gösterilmiştir.

$$s = \sqrt{0.25 * \left[\left(\sum_{i=1}^{5} x_i^2\right) - (5 * \bar{x}^2)\right]} \tag{4.1.2}$$

$$s = \sqrt{0.5 * \left[\left(\sum_{i=1}^{5} x_i^2\right) - (5 * \bar{x}^2)\right]} \tag{4.1.3}$$

Bu denklemler kullanılarak hesaplanan standart sapma değerleri Tablo 4.1.4'te gösterilmiştir. Her iki standarda göre $s/\bar{x}$ değeri 0.15'i çok fazla aşmadığı sürece deneylerin uygun şekilde yapıldığı kabul edilmektedir. Bu değerler Tablo 4.1.5'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4.1.4: AC Testlerdeki Standart Sapma Değerleri

Elektrot Düzeni	d (mm)	Mineral Yağ	Doğal Ester Yağ	Sentetik Ester Yağ
VDE	2.5	1.238	2.174	8.250
	2	1.979	3.228	4.833
	1	1.926	0.739	1.77
DİSK	2.5	1.732	3.789	3.487
	2	2.316	2.678	1.279
	1	0.523	1.027	0.745

Tablo 4.1.5: AC Testlerdeki Standart Sapma/Delinme Gerilimi Değerleri ($s/\bar{x}$)

Elektrot Düzeni	d (mm)	Mineral Yağ	Doğal Ester Yağ	Sentetik Ester Yağ
VDE	2.5	0.052	0.065	0.188
	2	0.093	0.105	0.150
	1	0.125	0.045	0.094
DİSK	2.5	0.072	0.139	0.113
	2	0.146	0.129	0.047
	1	0.102	0.122	0.051

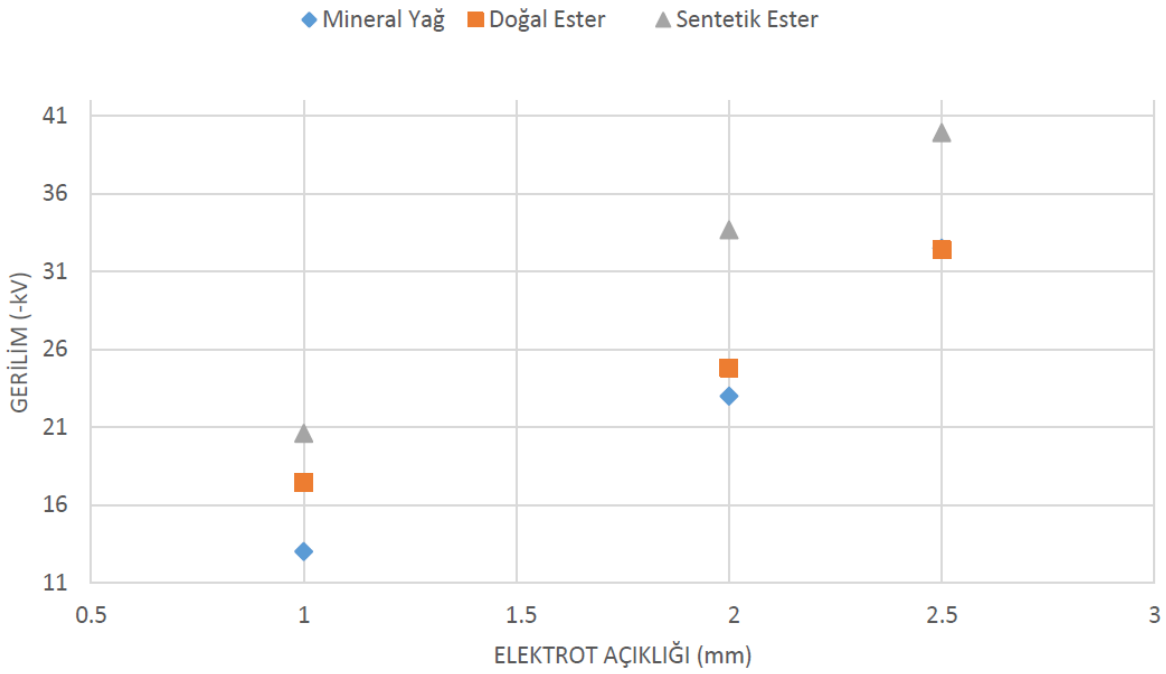
Tablo 4.1.4'ten açıkça görüleceği üzere genel olarak elektrot açıklığı azaldıkça standart sapma değeri düşmektedir. VDE elektrot düzeninde mineral yağ için ise tersi bir durum söz konusudur. Bu durum mineral yağın iyonizasyonu ve sonrasında elektron hareketlerinin farklı olduğunu göstermektedir. Sentetik ester yağ en yüksek standart sapma değerlerine sahiptir. Bu yağ ile yapılan deneylerde daha yüksek gerilim seviyelerine ulaşılmıştır. Tekrarlanan delinme süreçlerinde gerilimlerin sayısal değerleri arasındaki farklar diğer iki yağa göre daha yüksektir. Standart sapmaların yüksek olmasının sebebi budur. Tablo 4.1.5'deki değerler yağın stabilizasyonunu göstermektedir. Bu değerin küçük olması yağın tekrarlanan deneylerde daha kararlı bir davranış gösterdiği anlamına gelmektedir. VDE elektrot düzeninde 2.5 mm ve 2 mm elektrot açıklığında mineral yağ, 1 mm elektrot açıklığında doğal ester yağ daha stabil bir davranış göstermiştir. Mineral yağın bu elektrot düzeninde en küçük açıklıkta en kötü performansa sahip olmasının bir göstergesi de budur. Disk elektrot düzeninde $s/\bar{x}$ değeri sadece doğal ester yağda elektrot açıklığı azaldıkça düşüş eğilimi göstermektedir. Bu durum sivri köşe etkisinin bu yağda daha düşük olduğu anlamına gelmektedir. Tablo 4.1.4 ve Tablo 4.1.5'deki değerler yağın stabil davranış gösterip göstermediğini ortaya koymaktadır. Dielektrik performans bakımından hangi yağın daha üstün olduğu delinme gerilimine bakılarak anlaşılır. Ancak kullanılacak trafonun işletme gerilimi göz önüne alındığından yağların kararlılık durumları da sıvı dielektrik seçimi için önem arz etmektedir.

4.2. DC GERİLİM DENEYLERİ

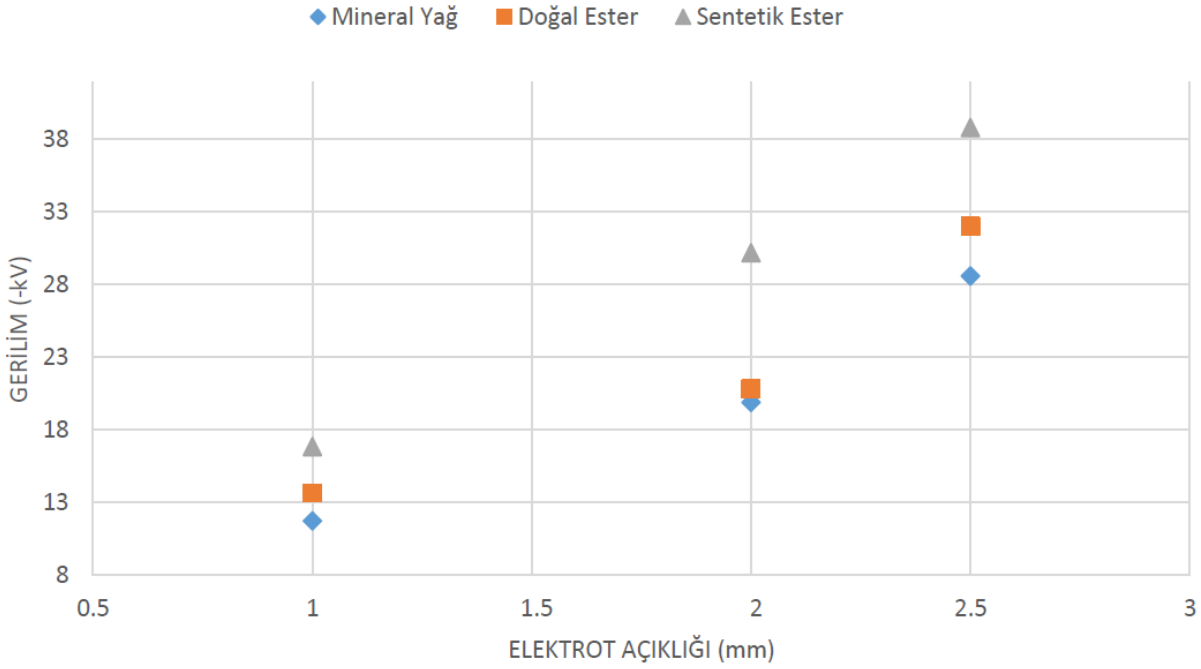
Sıvı dielektriklerin elektriksel karakteristiklerinin Doğru Gerilim altındaki davranışlarının incelenmesini içeren çalışmaların çoğunluğu sadece pozitif sabit gerilim stresi altında yapılmıştır [48,49]. Deneysel çalışmalarımızda DC gerilim içinde aynı elektrot düzenleri kullanılmıştır. ASTM D1816-12 ve ASTM D877/D877M-19 standartlarında yer alan gerilim arttırma miktarı ve süresi aynı şekilde uygulanmıştır. Pozitif DC gerilim ile yapılan deneylerde delinme gerilimleri AC delinme gerilimleri ile benzer çıkmıştır. Bu yüzden deneyler negatif DC gerilim altında yapılmıştır. Bu sayede yalıtkan içerisinde ilk iyonizasyonun başladığı negatif elektrik alan stresi altında delinme gerilimi davranışı incelenmiştir. Tablo 4.2.1'de her iki standart doğrultusunda negatif doğru gerilim stresi altında üç farklı sıvı dielektrik malzemenin delinme gerilimleri verilmiştir. Tablodaki delinme gerilimleri, 5 deney tekrarında elde edilen delinme gerilimi değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Yağlar arasındaki delinme gerilimleri ilişkisini ortaya koyan grafikler Şekil 4.2.1 ve 4.2.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2.1: Negatif DC Delinme Gerilimleri (-kV)

		Delinme Gerilimi (-kV)		
Elektrot Düzeni	**d (mm)**	**Mineral Yağ**	**Doğal Ester Yağ**	**Sentetik Ester Yağ**
VDE	2.5	32.5	32.38	39.92
	2	23	24.8	33.68
	1	13.02	17.46	20.602
DİSK	2.5	28.6	32.04	38.82
	2	19.9	20.82	30.2
	1	11.74	13.66	16.86



Şekil 4.2.1: VDE Elektrot Düzeninde Negatif DC Delinme Gerilimleri



Şekil 4.2.2: Disk Elektrot Düzeninde Negatif DC Delinme Gerilimleri

Negatif DC delinme gerilimi değerlerinin AC yüksek gerilimdeki karşılıklarıyla kıyaslanması için mutlak değerinin dikkate alması gerekmektedir. Aksi takdirde değerler negatif olduğundan en küçük delinme gerilimi mutlak değeri en yüksek değere karşılık gelecektir. Bu durumda doğru bir karşılaştırma yapılamaz. VDE elektrot düzeninde mineral yağın yüksek elektrot açıklıklarında DC gerilimde daha iyi bir dielektrik performansa sahip olduğu görülmektedir. Doğal ester yağın negatif DC delinme gerilimleri 2.5 mm ve 1 mm için hemen hemen benzer olmasına rağmen 2 mm açıklıkta negatif DC gerilim altında daha kötü performans gösterdiği görülmektedir. Sentetik ester yağ ise sadece 2.5 mm elektrot açıklığında VDE elektrot düzeninde negatif DC gerilim altında daha düşük delinme gerilimi değerine sahiptir.

Disk elektrot düzeninde en küçük ve en büyük elektrot açıklığı olan 1 mm ve 2.5 mm'de bütün yağlar negatif DC gerilim altında daha iyi bir dielektrik dayanıma sahiptir. 2 mm açıklıkta mineral yağ ve sentetik ester yağ negatif DC yüksek gerilim stresi altında daha yüksek delinme gerilimlerine sahipken doğal ester yağ için bu değer AC delinme gerilimi ile hemen hemen aynıdır.

Negatif DC altında VDE elektrot düzeninde mineral yağ ve doğal ester yağ arasındaki delinme gerilimleri farkı elektrot açıklığı arttıkça azalmıştır. AC gerilim deneylerinde mineral yağın 5 deney tekrarında birbirine en yakın delinme gerilimi değerlerine sahip olduğu belirtilmişti. DC gerilim zamana bağlı değişmeyen ve sadece uygulama esnasında sabit bir polariteye sahip olduğundan dolayı mineral yağ, elektrot açıklığı arttığında dielektrik performansını doğal ester yağa göre daha fazla arttırmıştır. VDE elektrot düzeninde artan elektrot açıklığıyla birlikte sentetik ester yağın delinme gerilimi değerinin diğer yağlara göre farkı artan bir davranış göstermiştir. Bu davranış disk elektrot sisteminde de aynı özelliği göstermiştir. Tablo 4.2.2'de negatif DC gerilim altında VDE elektrot düzenindeki delinme gerilimi ile disk elektrot düzenindeki delinme gerilimi farkları verilmiştir. Ayrıca benzer şekilde delinme gerilimleri arasındaki farklar AC gerilim ile karşılaştırılarak Tablo 4.2.3'de verilmiştir. Bu fark değerleri negatif DC delinme gerilimlerinin mutlak değerleri baz alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.2.2: Negatif DC Testlerde Elektrot Düzenleri Arasındaki DG Farkları (VDE_{DG}-$DİSK_{DG}$)

d (mm)	Mineral Yağ	Doğal Ester Yağ	Sentetik Ester Yağ
2.5	3.9	0.34	1.1
2	3.1	3.98	3.48
1	1.28	3.8	3.742

Tablo 4.2.3: AC ve DC Testlerdeki DG Farkları (DC_{DG}-AC_{DG})

Elektrot Düzeni	d (mm)	Mineral Yağ	Doğal Ester Yağ	Sentetik Ester Yağ
VDE	2.5	8.86	-0.86	-3.92
	2	1.72	-5.9	1.66
	1	-2.34	1.28	1.842
DİSK	2.5	4.6	4.84	8.12
	2	4.12	0.18	3.26
	1	6.62	5.3	2.32

Tablo 4.2.2'den görüleceği üzere negatif DC gerilim altında sıvı dielektrikler daha yüksek delinme gerilimlerine sahiptir. Ancak bu fark genel olarak AC gerilim altında daha yüksek ölçülmüştü. Tek bir polariteye ve zamana bağlı sabit değere sahip gerilim altında iyonizasyon süreci daha kararlı devam etmiştir. AC gerilimde negatif polaritede iyonizasyon başlar ve pozitif polaritede delinme gerçekleşir. Delinmeye sebep olan en önemli etken devam eden iyonizasyon sürecidir. AC gerilimde yağlar pozitif polariteye geçildiğinde polarize olduklarından dolayı kendilerini onarmışlardır. Farklı yağlar farklı seviyede kendini onardığından dolayı AC gerilim altında iki elektrot düzeni arasındaki delinme gerilimi farkı daha yüksektir. Negatif DC gerilim sadece negatif polariteye sahip olduklarından dolayı yağlarda sürekli ve daha hızlı bir iyonizasyon gerçekleşmiştir. Bu durum her iki elektrot düzeni için de aynıdır. Bu yüzden delinme gerilimleri arasındaki farklar daha düşük çıkmıştır. Tablo 4.2.3'de görüldüğü üzere disk elektrot düzeninde AC gerilim altında daha düşük delinme gerilimleri kaydedilmiştir. Negatif DC gerilimde disk elektrot düzeninde daha yüksek delinme gerilimi ölçülmesinin nedeni sivri köşe etkisinin sabit gerilimde daha az etki etmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca tek bir polariteli sabit gerilim, disklerin karşılıklı bakan yüzeylerinde daha düzgün bir elektrik alan oluşturmuştur.

Negatif DC delinme gerilimlerinin mutlak değerleri alınarak Denklem 4.1.2 ve 4.1.3'te yer alan formüller kullanılarak standart sapma değerleri Tablo 4.2.4'de hesaplanmıştır. Ayrıca yağların kararlı durumları ile ilgili bilgi veren $s/\bar{x}$ değerleri ise Tablo 4.2.5'de verilmiştir.

Tablo 4.2.4: Negatif DC Testlerdeki Standart Sapma Değerleri

Elektrot Düzeni	d (mm)	Mineral Yağ	Doğal Ester Yağ	Sentetik Ester Yağ
VDE	2.5	6	2.36	8.08
	2	2.121	1.78	2.14
	1	1.577	1.05	0.47
DİSK	2.5	6.37	3.13	8.64
	2	1.26	1.72	4.04
	1	3.42	3.42	3.89

Tablo 4.2.5: Negatif DC Testlerdeki Standart Sapma/Delinme Gerilimi Değerleri ($s/\bar{x}$)

Elektrot Düzeni	d (mm)	Mineral Yağ	Doğal Ester Yağ	Sentetik Ester Yağ
VDE	2,5	0.1846	0.072	0.202
	2	0.0922	0.072	0.060
	1	0.1211	0.060	0.232
DİSK	2,5	0.222	0.097	0.222
	2	0.063	0.082	0.134
	1	0.291	0.251	0.231

Disk elektrot düzeninde 1 mm elektrot açıklığı hariç genel olarak açıklık azaldıkça standart sapmalar AC gerilimde olduğu gibi azalmaktadır. VDE elektrot düzeninde sentetik ester yağ için standart sapma değerleri negatif DC gerilimde azalma göstermektedir. Diğer yağlarda ise elektrot açıklığına göre değişen bir davranış mevcuttur. Bu gerilim tipinde, disk elektrot düzeninde genel olarak standart sapma değerleri artmıştır. 2.5 mm açıklıkta sabit doğru gerilimde mineral yağın VDE elektrot düzeninde kararlılığı azalmıştır. Diğer iki elektrot açıklığında AC gerilimdeki ile benzer değerler görülmektedir. Aynı elektrot düzeninde sentetik ester yağın kararlılığı olumsuz yönde en çok etkilenen sıvı dielektrik olarak öne çıkmaktadır. Disk elektrot düzeninde, yağların delinme gerilimleri negatif doğru gerilimde daha yüksek olarak ölçülmüştü. Ancak özellikle 1 mm açıklıkta yağların stabil durumlarının bozulduğu görülmektedir. Bu açıklıkta tekrarlanan deneylerde birbirine benzer değerlerde delinme gerilimleri doğal ester yağda görülmektedir. Bu yüzden 1 mm açıklıkta doğal ester yağın stabil kalma durumu diğer yağlara göre daha iyidir. Buradan hareketle yağların dielektrik performanslarının delinme gerilimi değerleri yanı sıra kararlılık durumlarını ne kadar koruduklarıyla da değerlendirilmelidir.

4.3. DARBE GERİLİMİ TESTLERİ

Deney düzeneğinde darbe gerilimi negatif polariteli olarak elektrot sistemine uygulanmıştır. Darbenin tepe değeri üreteç çıkışındaki rezistif gerilim bölücüsü üzerinden bir tepe değer ölçü aleti kullanılarak ölçülmüştür. Her yağa ait darbe sinyalleri osiloskop yardımıyla kaydedilmiştir. Her ölçümde deney kazanı içerisindeki ışıklanma photomultiplier yöntemiyle ölçülmüştür. Burada Hamamatsu R1925A marka ve model numaralı 300-850 nm spektral tepki aralığına sahip bir photomultiplier kullanılmıştır. Hassas olan bu ölçüm 37 ayrı fiberden yapılmış bir fiber optik kablo ile yapılmıştır [50,51]. Darbe gerilimi 5 kV'luk artış oranıyla uygulanmıştır. Her darbeden sonra diğer kademeye geçiş için 1 dakikalık süre, standart gereğince beklenmiştir. Delinme olmaksızın en az 4 defa darbe uygulaması yapılmıştır. Her bir yağ için en az 5 delinme gerilimi değeri ve sinyalleri kaydedilmiştir. Delinme gerçekleştikten sonra 30 dakika beklenmiştir, daha sonra ölçümlere aynı yöntemle devam edilmiştir. 30 dakika yağın kendini onarması ve yeni teste hazır olması için gereken optimum süredir.

3 farklı yağa ait darbe gerilimi testleri IEC 60897 standardına göre yapılmıştır. Delinme gerilimi değeri aritmetik ortalama alınarak hesaplanmıştır. Buna göre 5 farklı delinme gerilimi değerinin toplamı deney sayısına bölünerek yağın delinme gerilimi belirlenmiştir. Ayrıca bu deneylerden elde edilen delinme gerilimlerinin standart sapması (Denklem 4.3.1), ortalamaya göre hata hesabı (Denklem 4.3.2) ve medyan değerleri hesaplanmıştır. Her bir yağın delinme sürecinin başladığı ve bittiği an arasında bir zaman geçmektedir. Bu zaman delinmeye kadar olan zaman (Time to Breakdown-TtB) olarak ifade edilmektedir. Bu zaman istatistiki bir veridir ve yağın dielektrik dayanımı hakkında kesin bilgi vermez. Sadece yağın delinme davranışının anlaşılmasında önemli bir ipucu vermektedir. Darbe gerilimi çok kısa sürede gerçekleştiğinden dolayı TtB'nin değerlendirilmesi önemlidir. Ayrıca elektrotlar arasındaki sabit 25 mm açıklık değerine bir oran yapıldığında, delinme sonucu oluşan deşarjın iğne elektrodun uç noktasından toprak elektrotuna hangi hızda ulaştığı hesaplanmaktadır. Bu değer deşarjın yayılma hızı olarak adlandırılmaktadır. 5 tekrarlı deneylerden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak Tablo 4.3.1'de darbe gerilim testleri sonucunda ölçülen ve hesaplanan değerler verilmiştir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K}(x_i - \bar{x})^2} \tag{4.3.1}$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{K}} \tag{4.3.2}$$

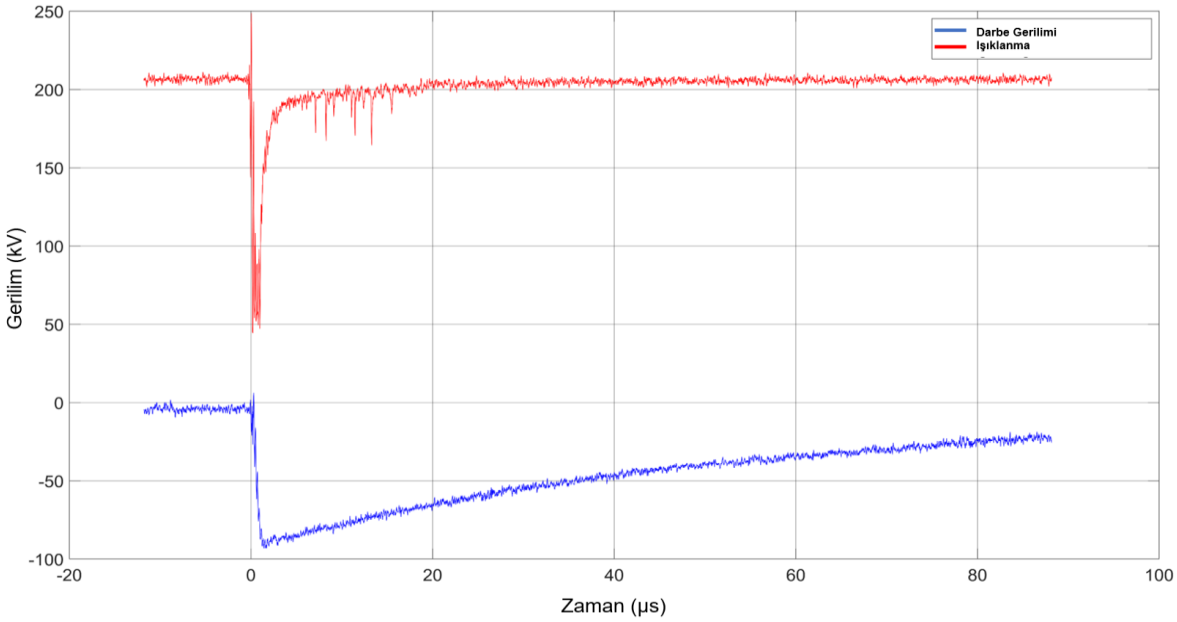
Tablo 4.3.1: Darbe Gerilimi Testlerinde Ölçülen ve Hesaplanan Değerler

Yağlar	Delinme Gerilimi (kV)	Standart Sapma	Ortalamanın Standart Hatası	Medyan Değeri	TtB (µs)	Yayılma Hızı (v_p=mm/ µs)
Mineral Yağ	131	12.207	5.459	124.6	19.6	1.81
Doğal Ester Yağ	90.4	4.273	1.911	92.5	17.09	1.87
Sentetik Ester Yağ	100.14	13.732	6.141	107.3	34.29	0.74

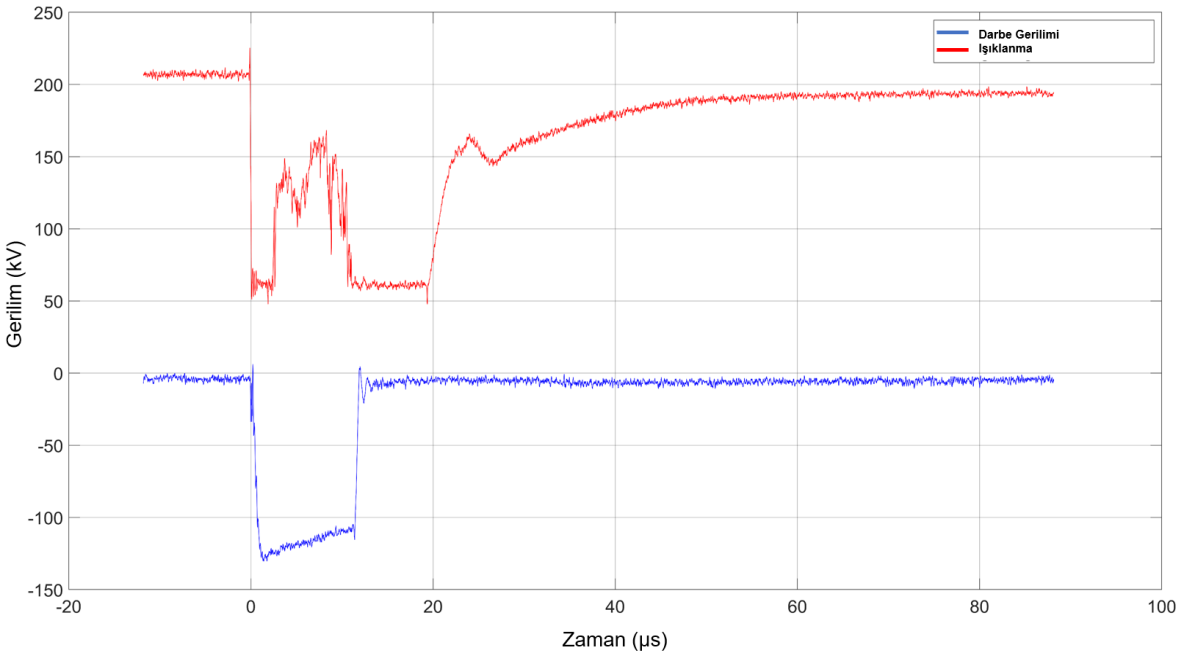
Tablo 4.3.1'den açıkça görüleceği üzere darbe gerilimi uygulandığında en dayanıklı sıvı dielektrik mineral yağ olmuştur. AC ve DC gerilim testlerinde en düşük delinme gerilimine sahip olan mineral yağın olası bir darbe gerilimine maruz kaldığında daha yüksek elektrik alan streslerinde delineceği anlaşılmaktadır. Darbe gerilimine özel bu durumda, mineral yağın davranışı, dielektrik performansların AC ve DC gerilimler altında ölçülenin tam tersi sıralamayla gerçekleştiği varsayılabilir. Bu durumda sentetik ester yağın en düşük elektrik alan değerinde darbe gerilimi altında delinmesi gerekiyordu. Elde edilen sonuçlarda tıpkı AC ve DC gerilim deneylerinde ölçüldüğü gibi MIDEL 7131'in yalıtım performansı MIDEL en1204'e göre daha yüksektir. Doğal ester yağ darbe gerilim testlerinde en düşük delinme gerilimine sahip olmasına karşın gerek hata gerek medyan değerinden dolayı deney tekrarlarında benzer delinme gerilimlerine sahip olduğu görülmektedir. Örneğin mineral yağın delinme gerilimi ve medyan değeri arasında 6.4 kV olarak oluşan fark sentetik ester yağa ait 7.16 kV değerine yakındır. Ancak doğal ester yağ için bu fark değeri yalnıza 2.1 kV olarak görülmektedir. Sentetik ester yağın AC testlerinde de delinme gerilimi kararlılığı en düşük olarak görülmüştü. Darbe gerilimi testlerinde de en yüksek standart sapma ve hata değerine sahip olarak benzer bir davranış gösterdiği anlaşılmaktadır.

Sentetik ester yağın TtB ve v_p değerinin en düşük olması bu yağın ciddi bir şekilde darbe gerilim stresine direnç gösterdiğinin bir belirtisidir. Bu duruma karşın delinme gerilimi mineral yağdan daha düşüktür. Deşarjın toprak elektrotuna ulaşma süresinin fazla olması deşarjın dallı ve geniş bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca darbe gerilimi ve ışıklanma sinyallerinde ise daha fazla bozucu ve pik noktanın olduğunu göstermektedir. Her bir yağa ait bu sinyallerin ve Tablo 4.3.1'deki değerlerin incelenmesi darbe gerilimi altında yağların performansına ait kombine bir değerlendirme yapma imkânı verir. Şekil 4.3.1'de mineral yağın

delinme olmaksızın ve elektriksel delinmeye uğramış durumlarındaki ölçülen dalga formları verilmiştir.



a

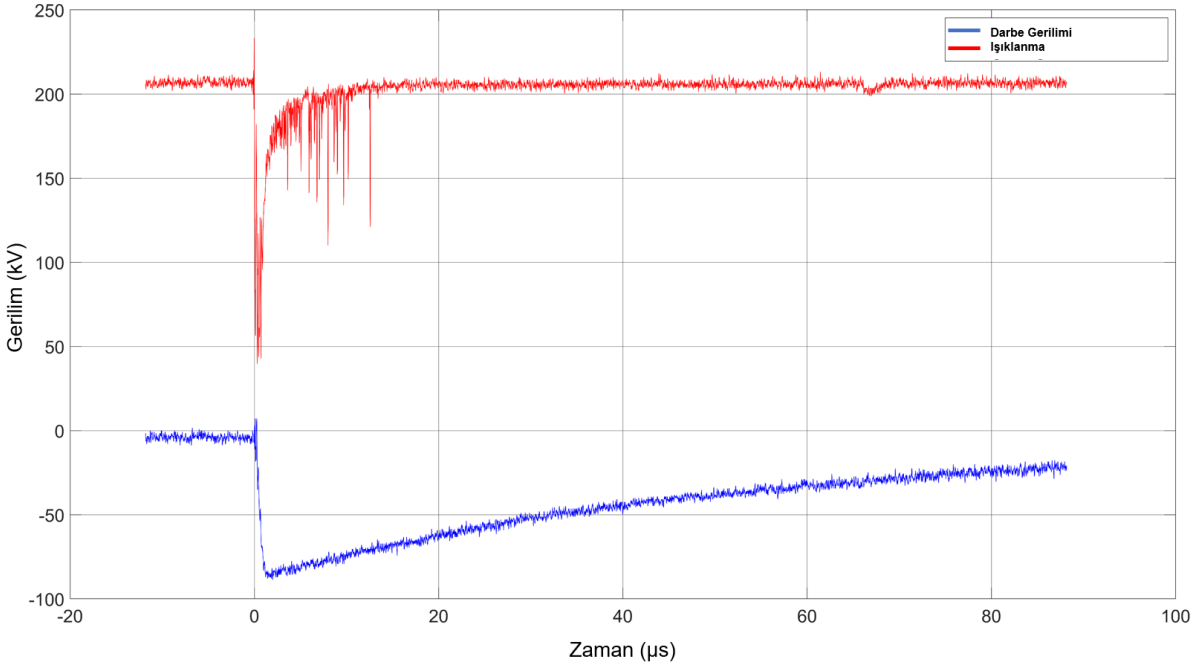


b

Şekil 4.3.1: Mineral Yağ Darbe Gerilimi Dalga Formları
a) Delinme Yokken b) Delinme Anında

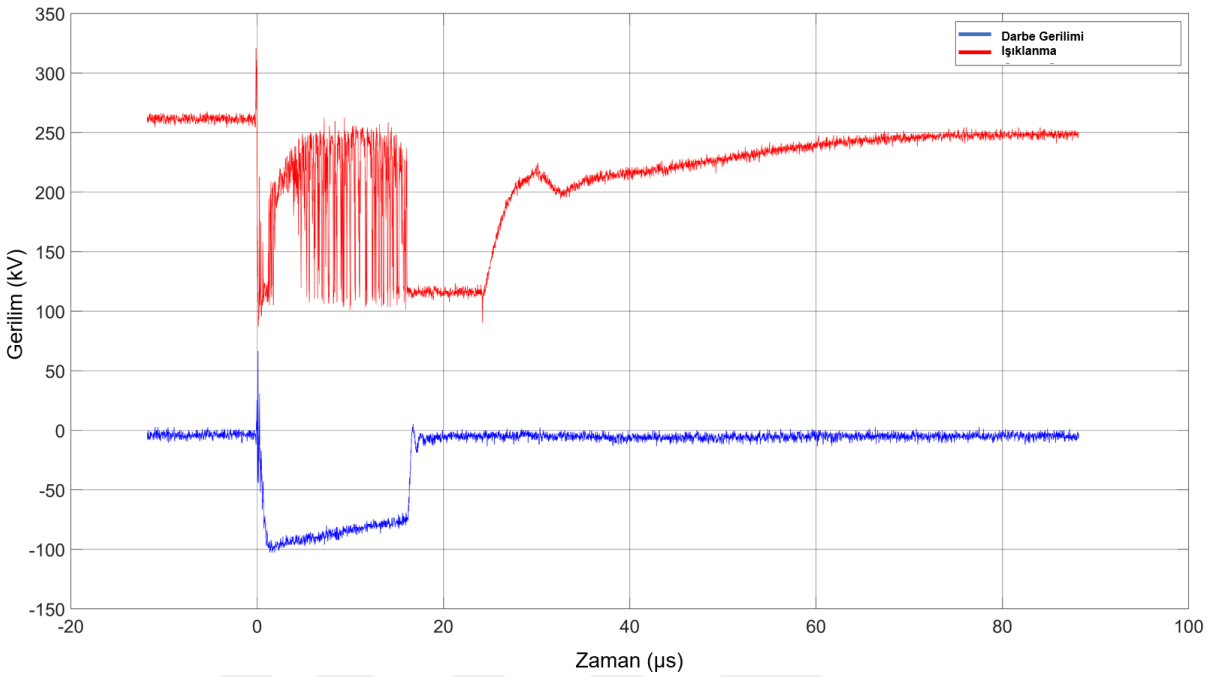
Şekil 4.3.1'de kırmızı renkli dalga formu photomultiplier ile test kazanı içerisindeki ışıklanmanın ölçümüdür. Işıklanma ölçümü sırasında osiloskop volt/div değeri 2V, rezistif gerilim bölücü yardımıyla ölçülen darbe geriliminin volt/div değeri 200 V'dur. Ölçümler 100 MHz örnekleme frekansıyla kaydedilmiştir. Bu değerler tüm yağlara ait grafiklerde aynıdır.

Şekil 4.3.1 (b)'de görüleceği üzere delinme olduğunda darbenin kuyruk zamanı oldukça uzundur. Ayrıca mineral yağda delinme sırasında ölçülen ışıklanmada 2,43. µs'den sonra tekrar genliğini arttıracak şekilde davranış gözlenmektedir. Bu durum yaklaşık 8 µs sürmüş daha sonra yağın gerilime gösterdiği direnç daha uzun sürmemiştir. Bu noktadan sonra delinme tamamlanmış olup elektrotlar arasında iletken bir yol meydana gelmiştir. Bu durum mineral yağın hızlıca deşarj olacakken toparlanmaya çalışmasının bir göstergesidir. Ayrıca mineral yağ daha yüksek delinme gerilimine sahip olmasına karşın darbe dalga formlarında çok fazla bozucu nokta görülmemiştir. Şekil 4.3.2'de doğal ester yağın delinme olmaksızın ve elektriksel delinmeye uğramış durumlarındaki ölçülen dalga formları verilmiştir.



a

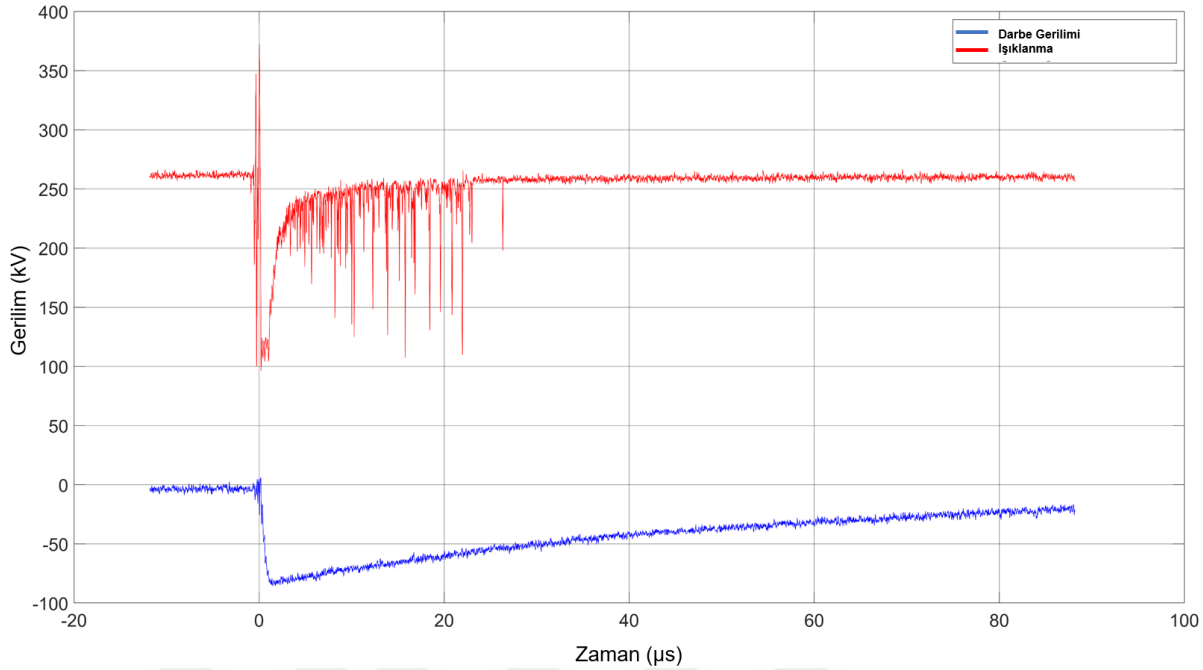
Şekil 4.3.2: Doğal Ester Yağ Darbe Gerilimi Dalga Formları
a) Delinme Yokken b) Delinme Anında



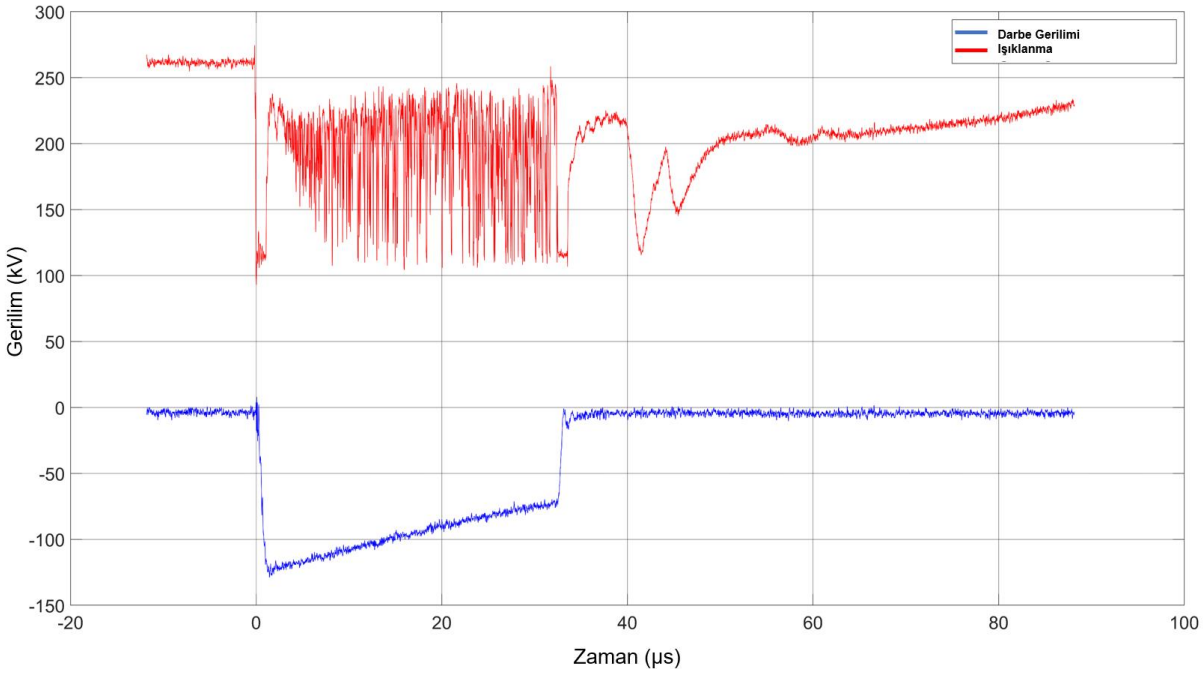
b

Şekil 4.3.2 (devam): Doğal Ester Yağ Darbe Gerilimi Dalga Formları
a) Delinme Yokken b) Delinme Anında

MIDEL en1204'e ait darbe gerilimi ve ışıklanma eğrisi incelendiğinde delinme olmadan ışıklanma sinyalinde mineral yağa göre daha fazla bozucu ve pik noktanın olduğu görülmektedir. Bu tip piklerin hem sayısı fazladır hem de genlikleri daha büyüktür. Bu durum doğal ester yağda daha fazla deşarjın olduğunu göstermektedir. Delinme anında darbe gerilim sinyalinin başladığı noktada mineral yağda görülmeyen bir pik nokta ölçülmüştür. Normalde Ttb değeri mineral yağdan daha düşük olmasına karşın deşarjların daha fazla görülmesi ester yağın darbe gerilimi altındaki karakteristik davranışından kaynaklanmaktadır. Özellikle ışıklanma sinyalindeki 1,75 µs – 15,95 µs arasındaki yoğun bozucu pikler yağın yalıtım direncini önemli ölçüde azaltmıştır. Darbe gerilimi altında doğal ester yağın en zayıf dielektrik olmasına bu durumun yüksek oranda sebep olduğu Şekil 4.3.2'de açıkça görülmektedir. Bir başka ester yağ olan MIDEL 7131'e ait delinme olmaksızın ve elektriksel delinmeye uğramış durumlar için ölçülen dalga formları Şekil 4.3.3'de verilmiştir.



a



b

Şekil 4.3.3: Sentetik Ester Yağ Darbe Gerilimi Dalga Formları
a) Delinme Yokken b) Delinme Anında

Sentetik ester yağ, darbe gerilimi dalga formları, en çok gürültülü ve bozucu noktaya sahiptir. Sentetik ester yağ mineral yağa göre %74.94 oranla doğal ester yağa göre %100.64 oranla daha fazla sürede elektriksel delinmesini tamamladığını gösteren TtB değerine sahiptir. Sürenin uzun olması ester yağın yapısından dolayı meydana gelen deşarjların önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Ayrıca MIDEL 7131 diğer iki yağa göre yaklaşık 2.4 kat daha fazla yayılma hızına sahiptir. Deşarjların karakteristik olarak daha dallı olması deney kazanı içerisinde daha hızlı yayılmasından kaynaklanır. Sentetik ester yağın ışıklanma sinyalinde daha fazla bozucu nokta olmasına karşın delinme dayanımı doğal ester yağa göre daha iyidir. Işıklanma sinyali özellikle elektriksel delinme durumunda kendi doğal pozisyonuna dönmekte zorlanmış ve diğer iki yağda görülmeyen geniş deşarjlar görülmüştür.

4.4. AKIM SİNYALLERİ İŞLEME METOTLARI

Lodz Teknoloji Üniversitesi, Elektrik ve Güç Enstitüsü, Yüksek Gerilim Laboratuvarında gerçekleştirilen AC deneylerde şebeke frekansı olan 50 Hz'de besleme trafosunun birincil sargısındaki 215 Ω direnç üzerinden akım sinyalleri zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Akım sinyallerinin dalga formları her iki standarta göre zamana bağlı artış eğilimi göstermektedir. Bu sinyallerin ayrıştırılması ve elektriksel delinmeye neden olan sürecin daha yakından takibi açısından önemlidir. Akım sinyalleri Ampirik Mod Ayrıştırması (Empirical Mode Decomposition -EMD) ve Değişken Mod Ayrıştırması (Variational Mode Decomposition - VMD) yöntemleri kullanılarak ayrıştırılmıştır. EMD bilinen bir yöntem olmasına karşın VMD son yıllarda popüler hale gelen yeni bir sinyal ayrıştırma metodu olarak öne çıkmaktadır. Her iki yöntemde özellikle periyodik olan sinyaller ayrıştırılmaktadır.

EMD yönteminde sinyalin üst ve alt kısımlarındaki pikler tespit edildikten sonra bu noktalarda kübik interpolasyon yapmak için üst ve alt eğrilikler üretilir [52]. İki eğrilik arasındaki ortalama alındıktan sonra IMF hesaplaması için çok sayıda döngü sonucunda genlik ve modülasyona sahip sinyal çıkarılır. Bunun sonrasında EMD yönteminde bir x(t) sinyali Denklem 4.4.1'e göre ayrıştırılmaktadır [53].

$$x(t) = \sum_{k=0}^{K} c_k(t) + r(t) \tag{4.4.1}$$

Burada $c_k(t)$ genlik ve frekans modülasyonuna sahip sinyali, $r(t)$ ise ayrıştırma sonucu kalıntı değeri belirtmektedir. $c_k(t)$ faz açısına bağlı bir büyüklüktür (Denklem 4.4.2).

$$c_k(t) = a_k(t).\cos\left(\emptyset_k(t)\right) \tag{4.4.2}$$

$a_k(t)$ modülasyonu sonucu ortaya çıkan frekansa bağlı sinyalin anlık pozitif genlik büyüklüğünü, $\emptyset_k(t)$ ise anlık fazı temsil etmektedir. Frekansa bağlı bir ayrıştırma yapıldığından dolayı anlık frekans değeri $w_k(t)$ anlık faz değerinden oldukça küçük olmakla birlikte bu faz değerinin zamana bağlı derivasyonundan elde edilir. EMD ayrıştırması artık değer monotonik fonksiyon olana kadar devam eder. Bu duruma erişildikten sonra daha fazla IMF üretilmez. Önceden tanımlanmış eşik değer içi sonlandırma kriteri normalize edilmiş standart fark (Normalized Standard Deviation-NSD) ile belirlenir (Denklem 4.4.3) [53].

$$NSD = \sum_{j=1}^{R} \frac{|b_{k-1}(t) - b_k(t)|^2}{b_j^2(t)} \tag{4.4.3}$$

Denklemde $b_k(t)$ her adımdaki IMF değerlerini temsil etmektedir. EMD yönteminde bir sinyal ayrıştırması yapılırken enterpolasyona bağlı bir durdurma kriterinin olması zorunludur. Bu durum kendini sürekli yenileyen bir yapıya sahiptir. Bu tip problemlerin ortadan kaldırılması için yeni sinyal ayrıştırma yöntemleri kullanılmaya başlamıştır. Son zamanlarda adaptif olarak anlık optimizasyona sahip [54] VMD yöntemi sayesinde modların toplu bant genişliği en aza indirilmiştir [55,56]. VMD yönteminde frekans ve genlik parçalarına ayrılmış modüle edilmiş sinyallerin birleşimiyle giriş sinyali tekrar oluşturulur [52]. EMD, sinyali yüksek frekanstan düşük frekansa ayrıştırırken, VMD bunun tersini yapar. Bu yöntemde sinyal M adet moda ayrıştırılır. Bunların hepsi kendi merkez frekanslarında yoğunlaşırlar. Denklem 4.4.4'te VMD'nin matematiksel ifadesi $u(t)$ giriş sinyali uygulandığında gösterilmiştir [53,57].

$$\min_{i_N, v_M} \left\{ \sum_M \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * i_M \right] e^{-jvt} \right\|_2^2 \right\} \tag{4.4.3}$$

Burada $\sum_M i_M = u$ giriş sinyalini $i_M(1,2,3,\ldots.L)$ herbir ayrıştırma modunu v_M ise merkez frekansı göstermektedir. İlerleyen adımlarda Lagrangian çarpımı ve ceza terimi oluşturulur (Denklem 4.4.4).

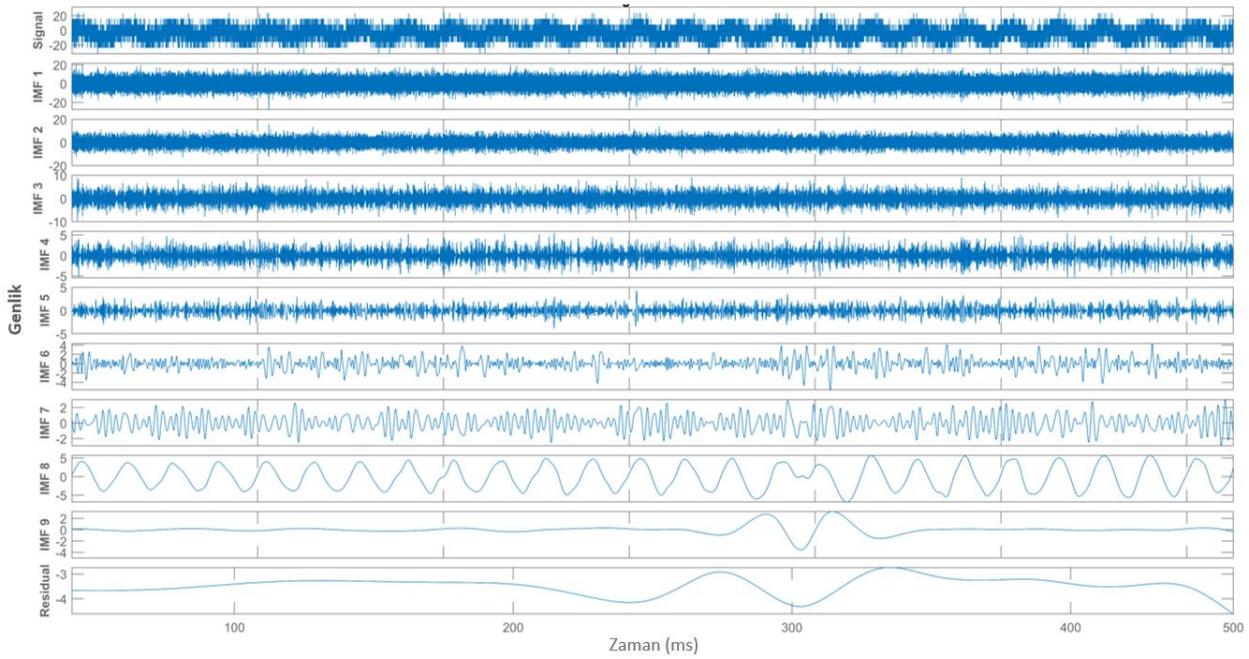
$$\Gamma(i_M, v_M, \lambda) = \alpha \sum_M \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * i_M \right] e^{-jvt} \right\|_2^2 + \|u - \sum i_M\|_2^2 + \langle \lambda, u - \sum i_M \rangle \tag{4.4.4}$$

Bu denklemde λ ikili eğimi, σ Dirac dağılımını ve α Lagrangian çarpanını temsil etmektedirler. Bu şekilde her bir iterasyonda yeni adıma geçilerek hesaplamalar tekrarlanır. Frekans domeninde yapılan hesaplamalar Parseval/Plancherel Fourier izometrisi ve Hermitian simetrisi sayesinde sonuçlanır (Denklem 4.4.5).

$$v_n^{j+1} = \frac{\int_0^\infty v |i_n(v)|^2 dv}{\int_0^\infty |i_n(v)|^2 dv} \tag{4.4.5}$$

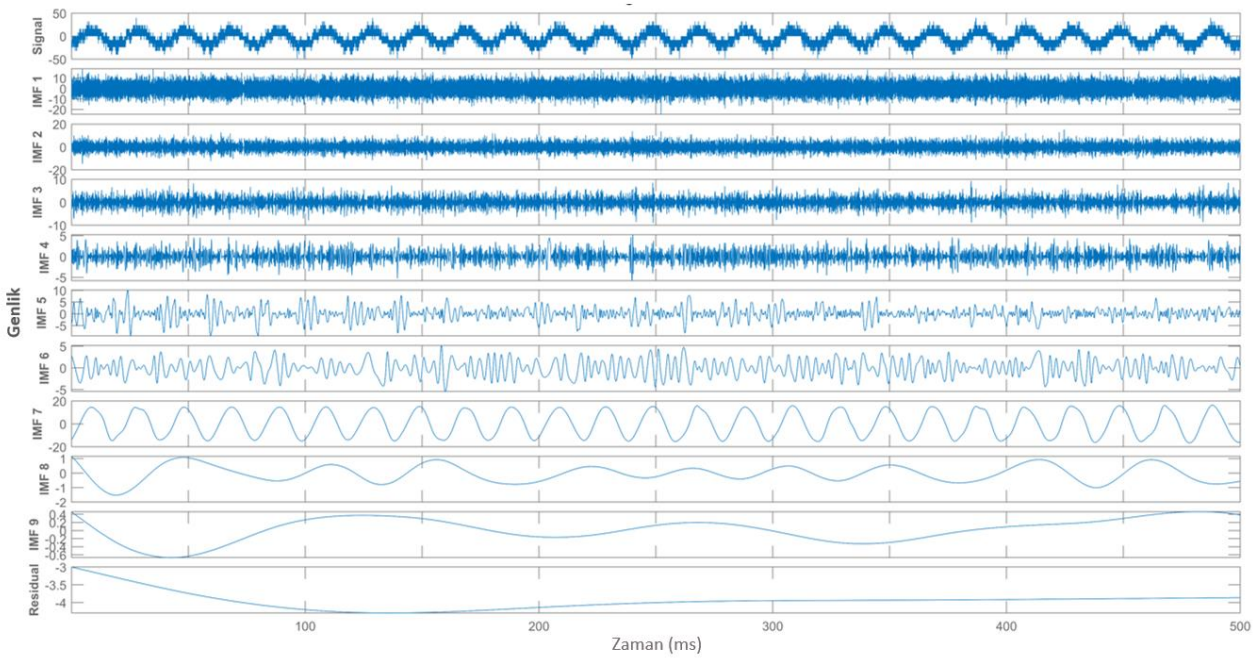
Böylece merkez frekansı etrafında modların ayrıştırılması tamamlanmış olur. EMD ve VMD yönteminde modlar ayrışırken kendi içlerinde farklı bilgiye sahiptirler [58]. Bu sayede iki yöntemi kullanarak akım sinyallerinin analiz edilmesiyle elektriksel delinme süreci yorumlanabilmektedir. Elektrot açıklığı arttığında yüksek frekanslı deşarjların azaldığı bilinmektedir. Ayrıca genel olarak sentetik ester yağ en iyi yalıtım karakteristiğine sahip olduğundan bu yağa ait akım bileşenlerinde deforme noktaların görülme olasılığı azdır. Her iki standart kapsamında gerilimin artışı her bir saniyede belirli gerilim miktarlarında yapılmıştır.

Gerilim artışına denk gelecek sinyalin ayrıştırması sırasında oluşacak IMF'lerin yorumlanmasında yalıtım karakteristiği ortaya konulamaz. Bu yüzden ayrıştırmalarda delinme anından hemen önceki 500 ms süreliğindeki sinyaller kullanılmıştır. Şekil 4.4.1 ve 4.4.2'de 1 mm, 2 mm ve 2.5 mm elektrot açıklığında mineral yağa ait sırasıyla disk elektrot düzenindeki EMD ve VMD ayrıştırmaları sırasıyla verilmiştir.

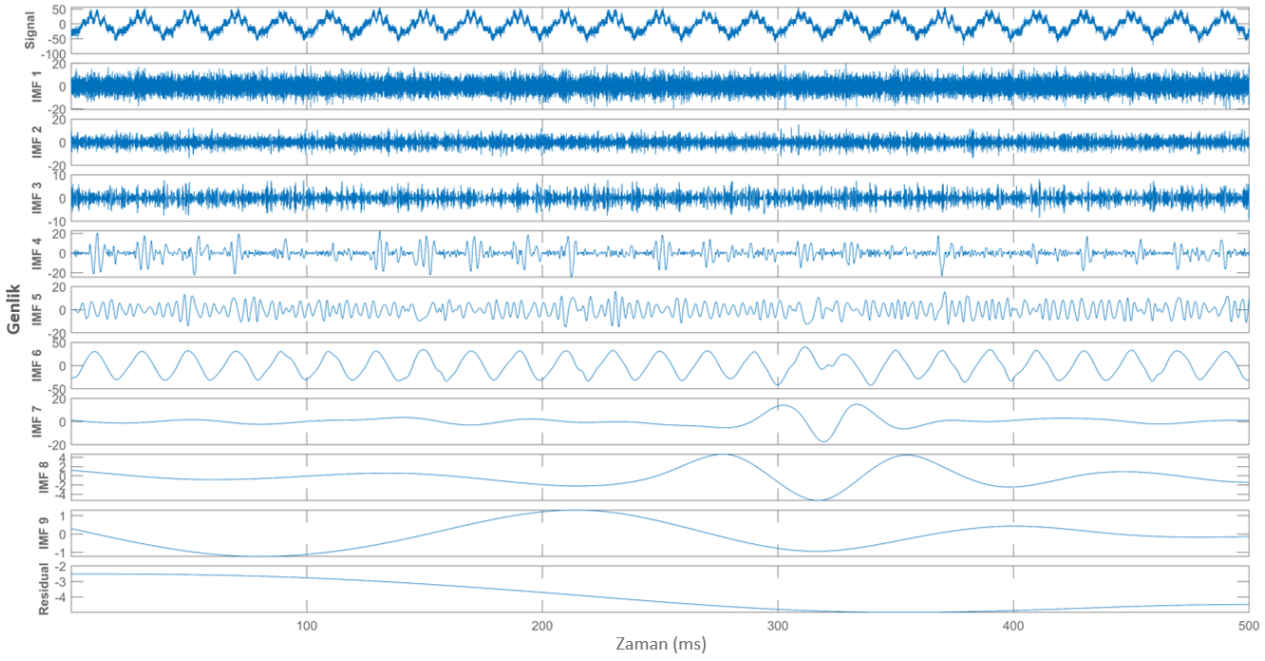


a

Şekil 4.4.1: Disk Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

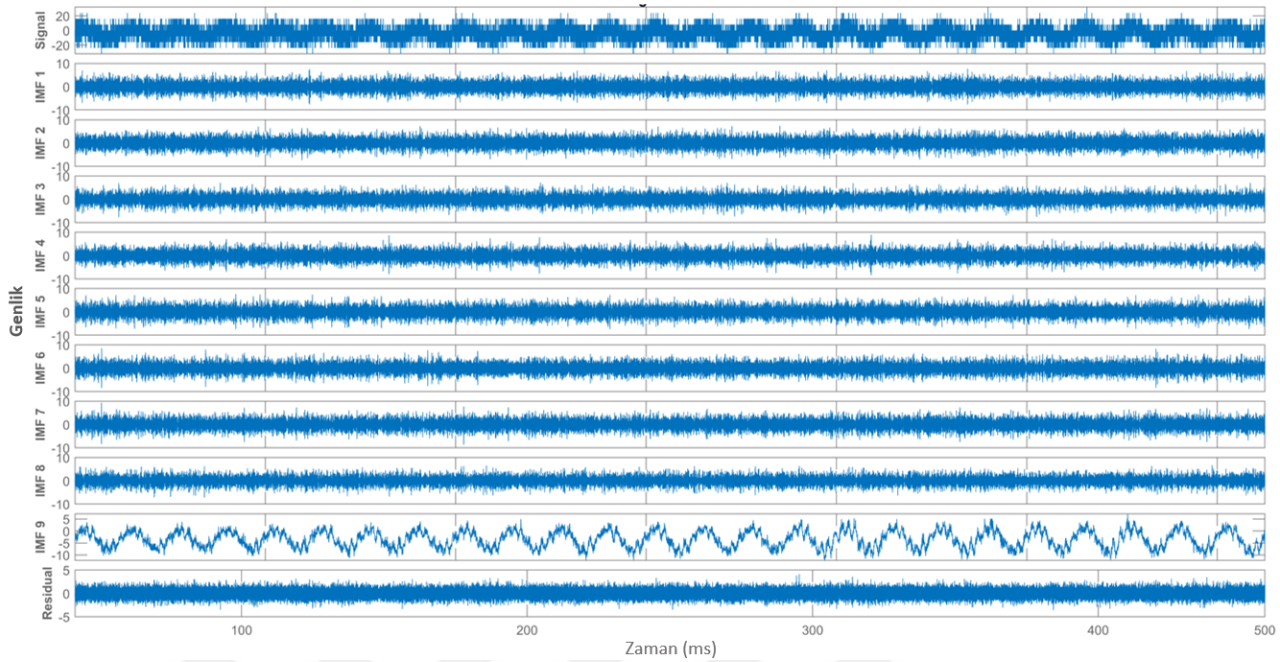


b

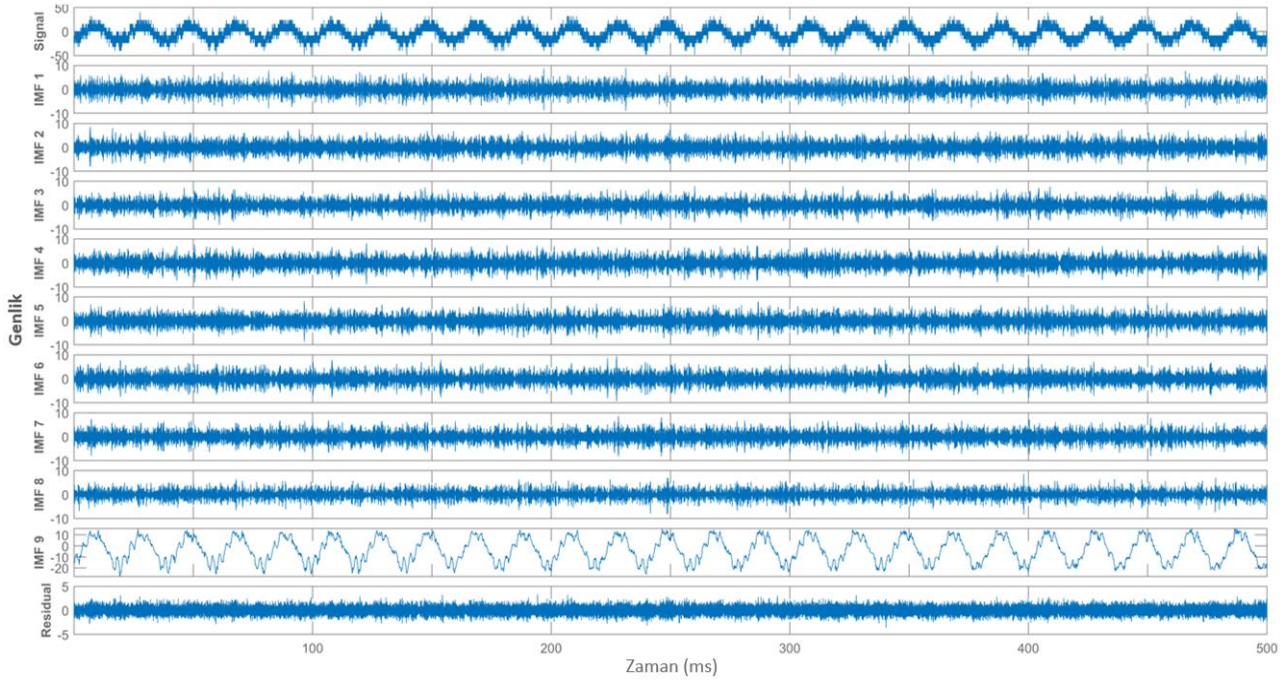


c

Şekil 4.4.1 (devam): Disk Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

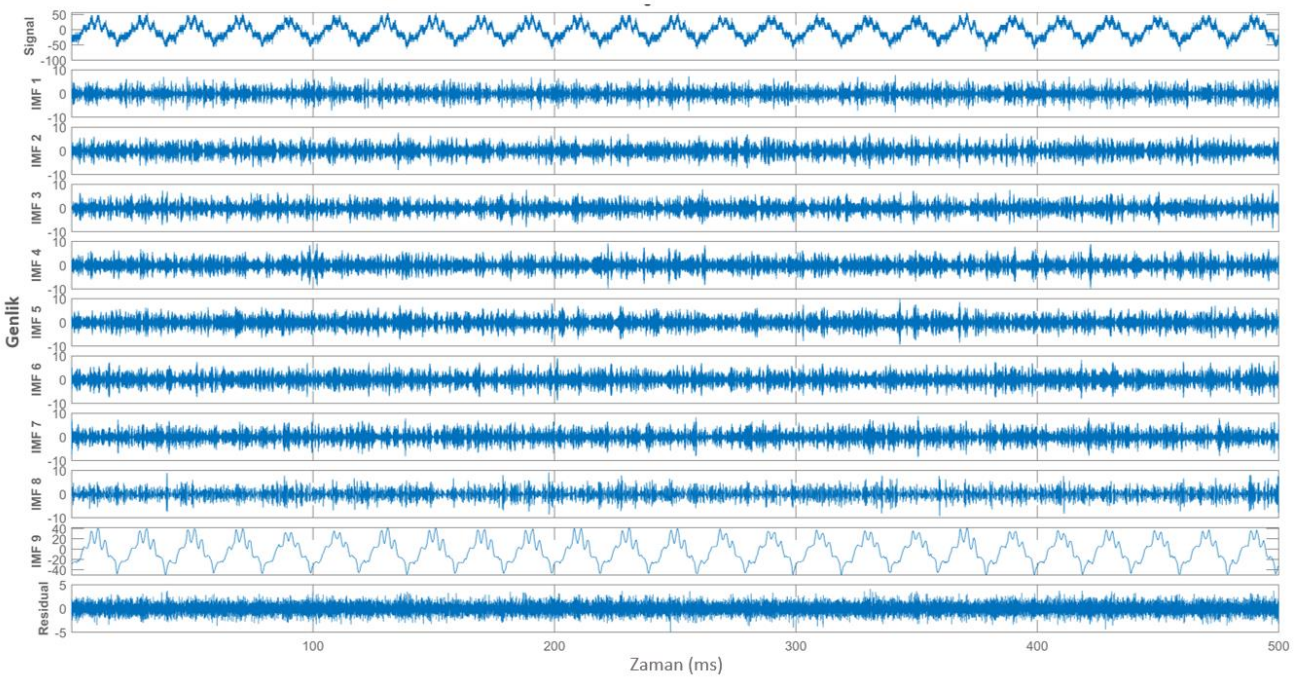


a



b

Şekil 4.4.2: Disk Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

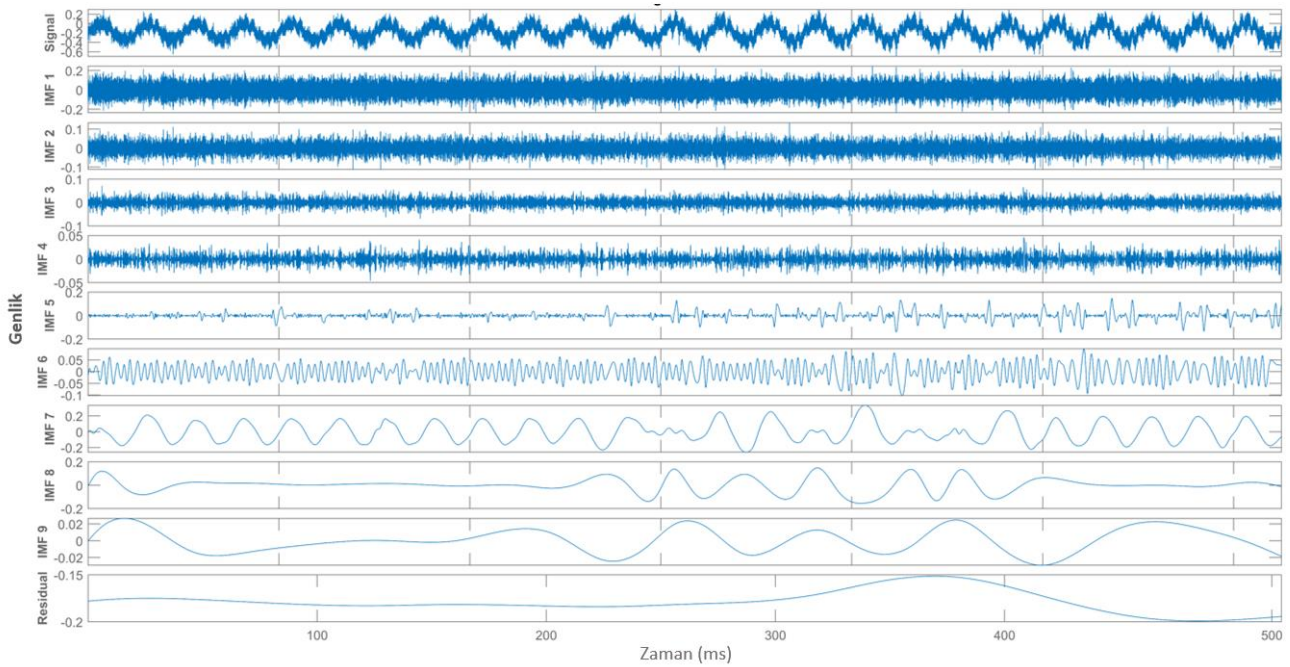


c

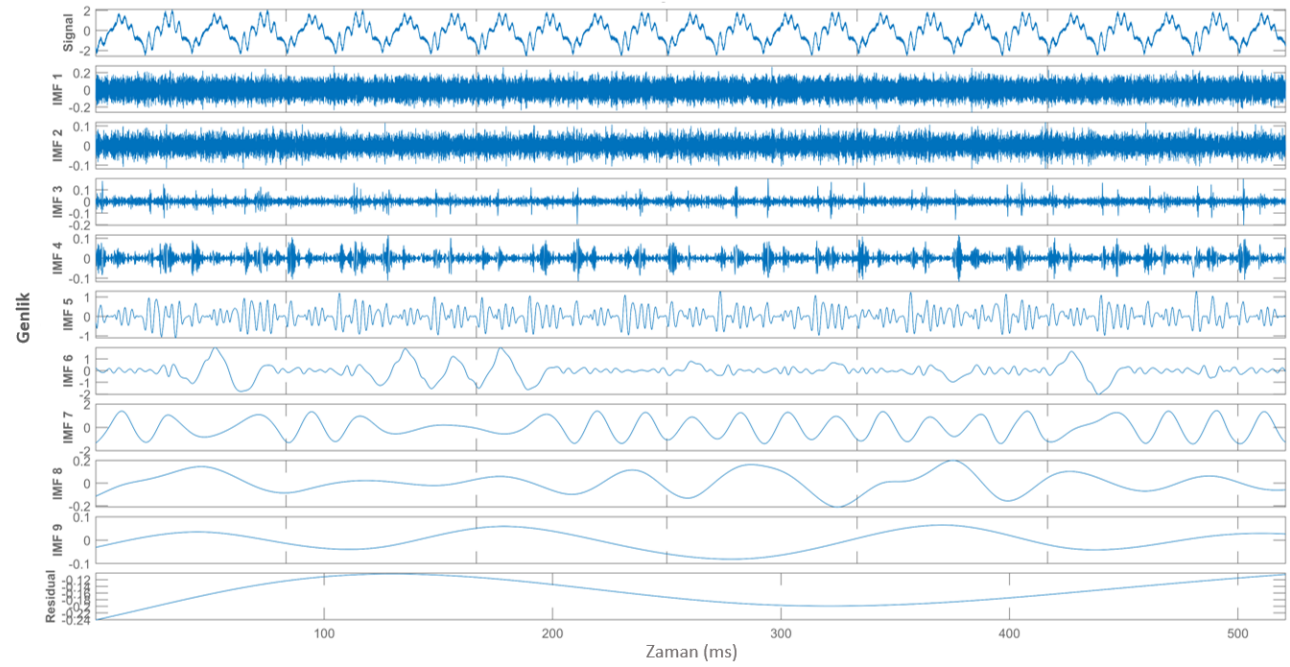
Şekil 4.4.2 (devam): Disk Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

Şekil 4.4.1 incelendiğinde EMD yöntemiyle yapılan ayrıştırmada IMF 5, IMF 6 ve IMF 7 modları, yağın delinme süreciyle ilgili bilgi vermektedir. Buna göre bu modlardaki gürültülü ve bozucu noktaların olması yağın daha düşük gerilim seviyelerinde delineceğinin işaretidir. 1 mm açıklıkta bu sinyaller en bozuk dalga formlarına sahiptirler. Özellikle IMF 6 modunun en yüksek elektrot açıklığında neredeyse temiz bir sinüs dalga formuna sahip olması yüksek frekanslarda kısmi deşarjların daha az gerçekleştiğinin göstergesidir. Kısacası, EMD modları incelendiğinde temiz ve gürültüsüz sinüs dalga formu daha erken modlarda görülürse ilgili durumda yalıtım malzemesinin dielektrik dayanımı daha yüksek anlamına gelmektedir.

VMD yöntemi ile yapılan ayrıştırmada IMF 9 moduna ait genlik değeri elektrot açıklığı arttıkça yükselmektedir. Ancak bu modda önemli olan sinyalin dalga formunun durumudur. 1 mm açıklıkta IMF 9 modunda daha parazitik ve gürültülü bir dalga formu ölçülmüştür. Ayrıca IMF 8 modundaki ayrışmanın daha yüksek olması durumunda sıvı dielektrik malzemenin daha yüksek gerilim seviyelerinde delindiği sonucuna ulaşılmaktadır. Şekil 4.4.3 ve 4.4.4'te 1 mm, 2 mm ve 2.5 mm elektrot açıklığında mineral yağa ait sırasıyla VDE elektrot düzenindeki EMD ve VMD ayrıştırmaları sırasıyla verilmiştir.

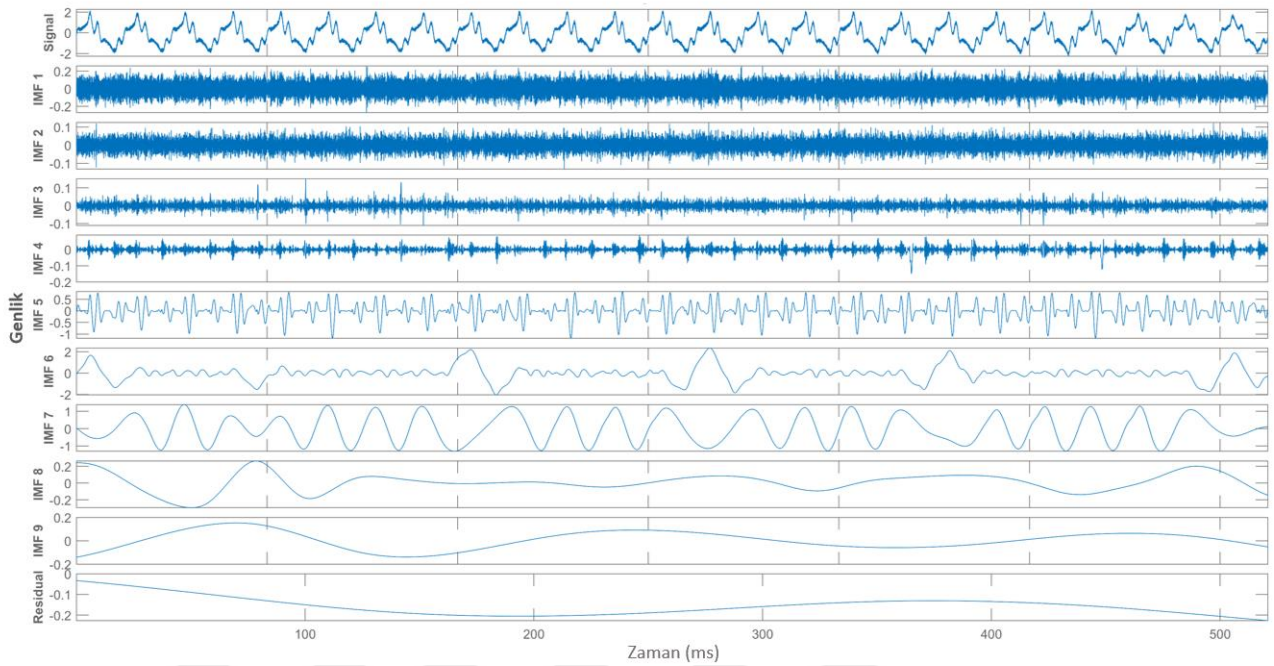


a



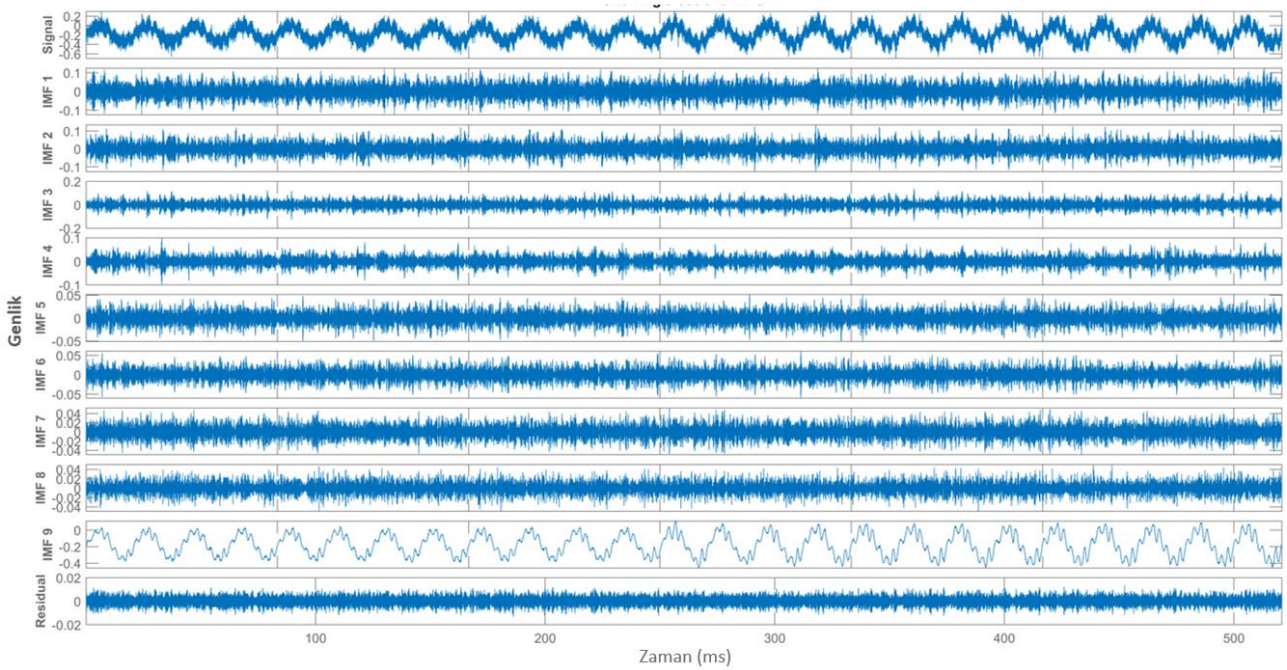
b

Şekil 4.4.3: VDE Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)



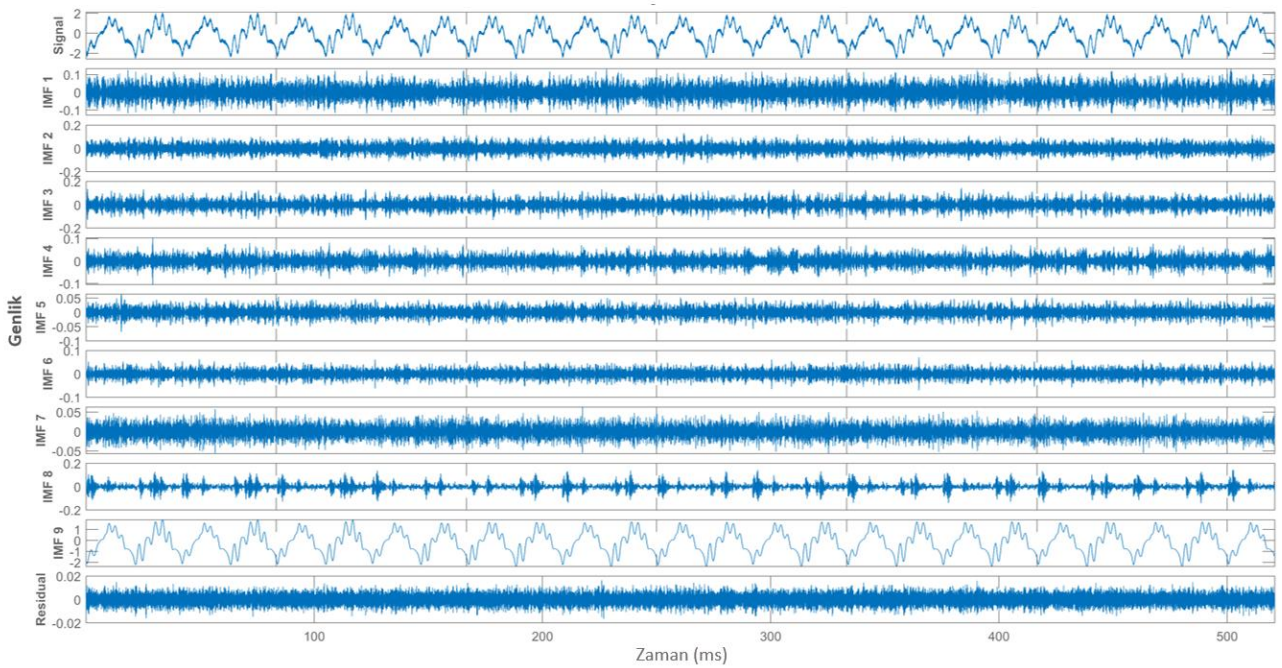
c

Şekil 4.4.3 (devam): VDE Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

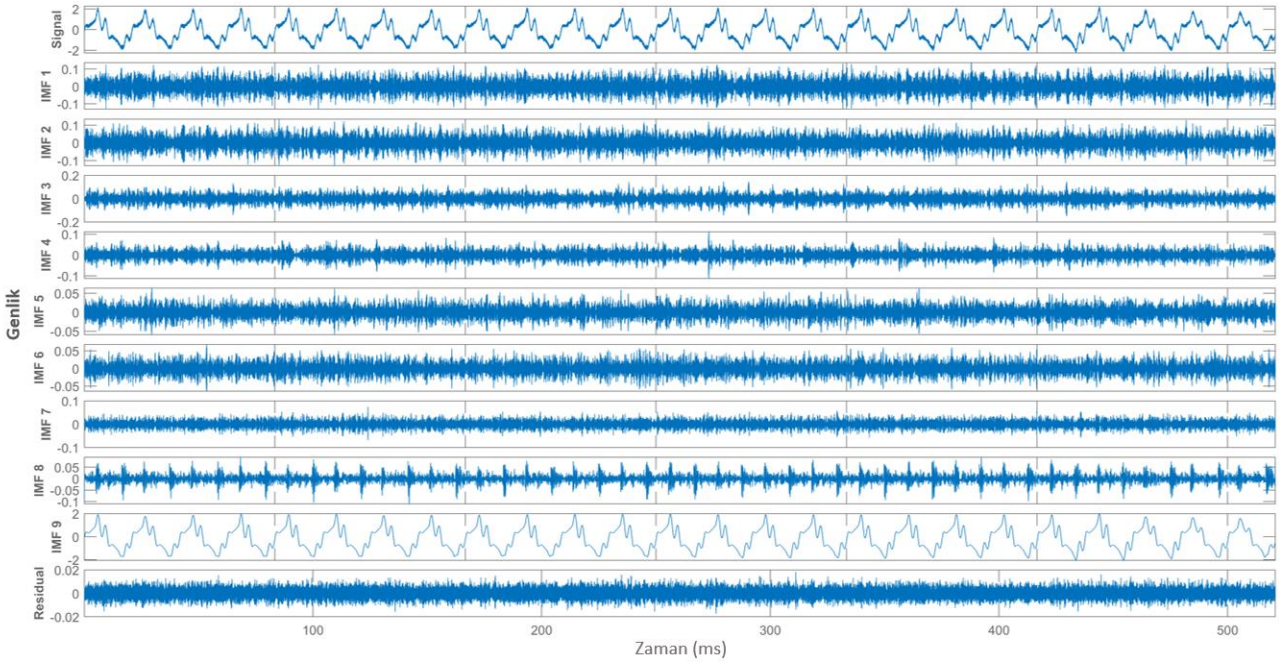


a

Şekil 4.4.4: VDE Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)



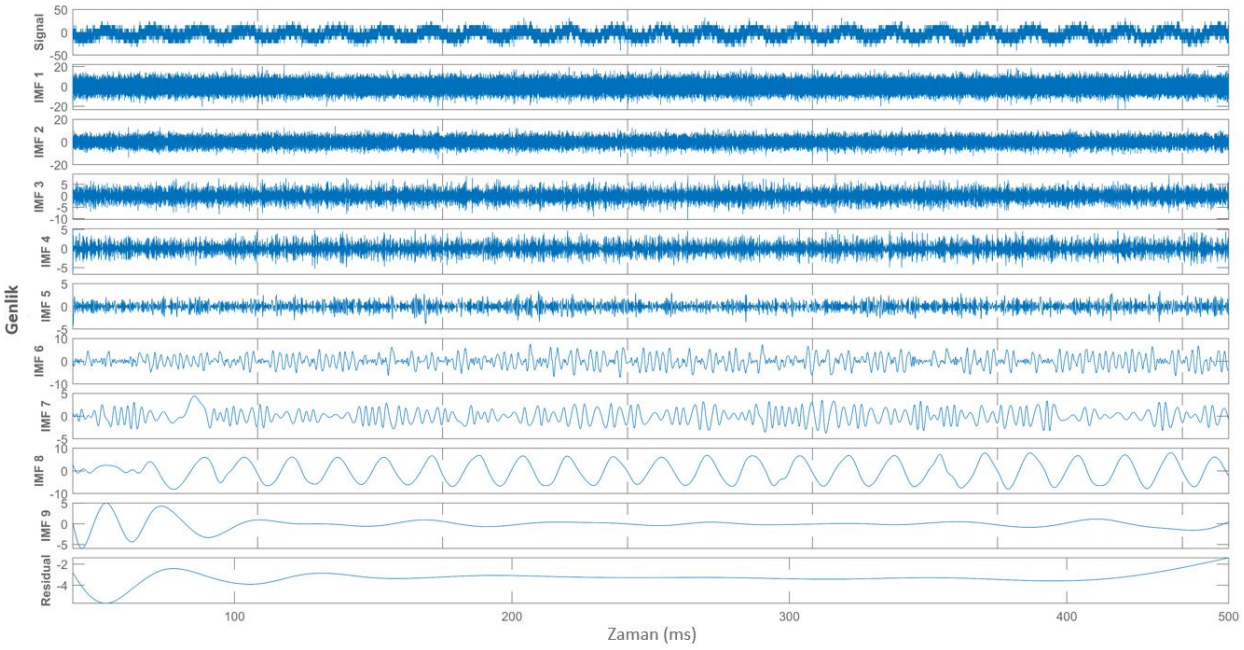
b



c

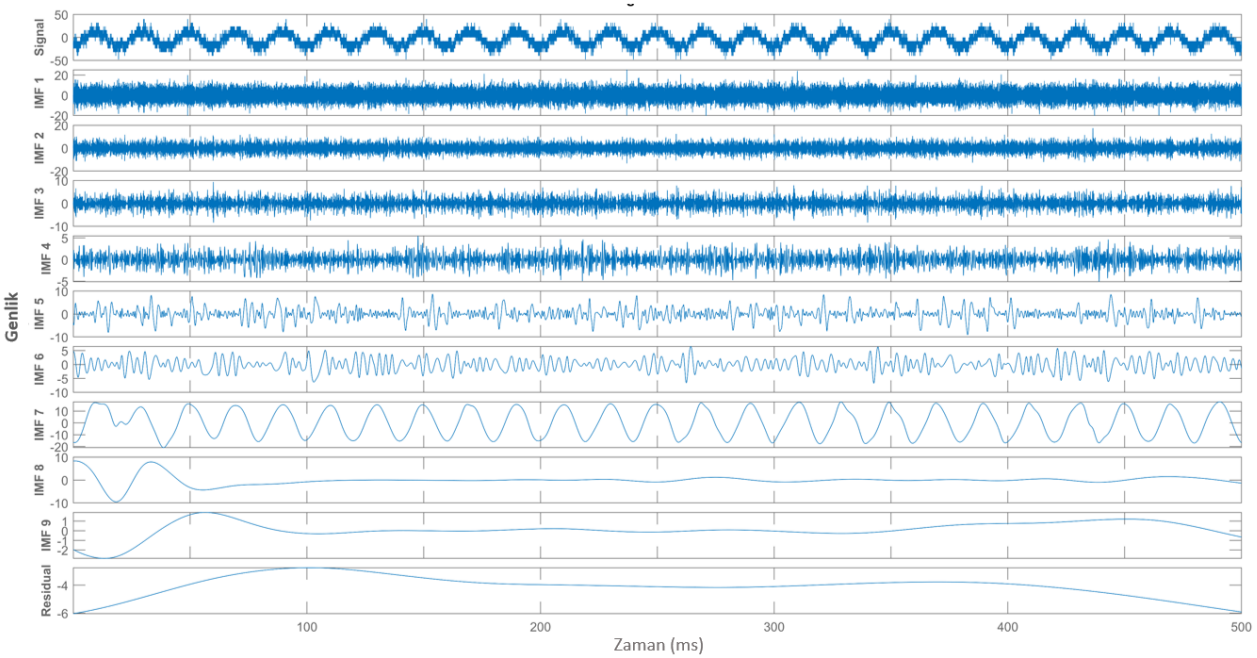
Şekil 4.4.4 (devam): VDE Elektrot Düzeninde Mineral Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

VDE elektrot düzeninde yapılan sinyal ayrıştırmalarında farklı bir davranış görülmektedir. EMD ayrıştırmasında bu elektrot düzeninde sadece IMF 5 modu delinme süreci hakkında bilgi vermektedir. Bu modun sinyal dalga formu ne kadar saf ve gürültüsüz olursa delinme geriliminin daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır. VMD ayrıştırmasında 2.5 mm elektrot açıklığında az da olsa 2 mm'ye göre gürültülü sinyal IMF 8 modunda görülmektedir. Yapılan deneylerde VDE elektrot düzeninde mineral yağın 2.5 mm elektrot açıklığında disk elektrot düzeninde ölçülen delinme gerilimi değerinden az da olsa daha düşük olduğu ölçülmüştü. Bu durum IMF 8'de net olarak görülmektedir. Ayrıca VDE elektrot düzeni için IMF 9 sinyalinin dalga formunun sinüs dalga formundan uzaklaşması yağın daha geç delindiğini göstermektedir. Şekil 4.4.5 ve 4.4.6'da 1 mm, 2 mm ve 2.5 mm elektrot açıklığında doğal ester yağa ait sırasıyla disk elektrot düzenindeki EMD ve VMD ayrıştırmaları sırasıyla verilmiştir.

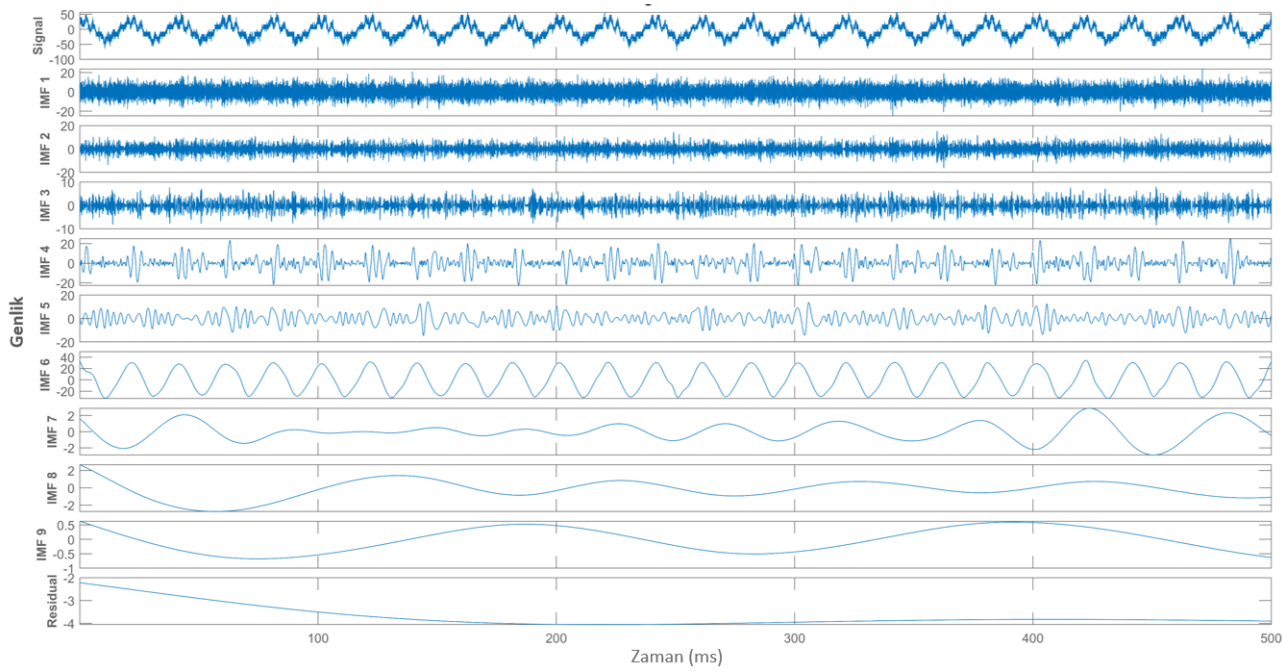


a

Şekil 4.4.5: Disk Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

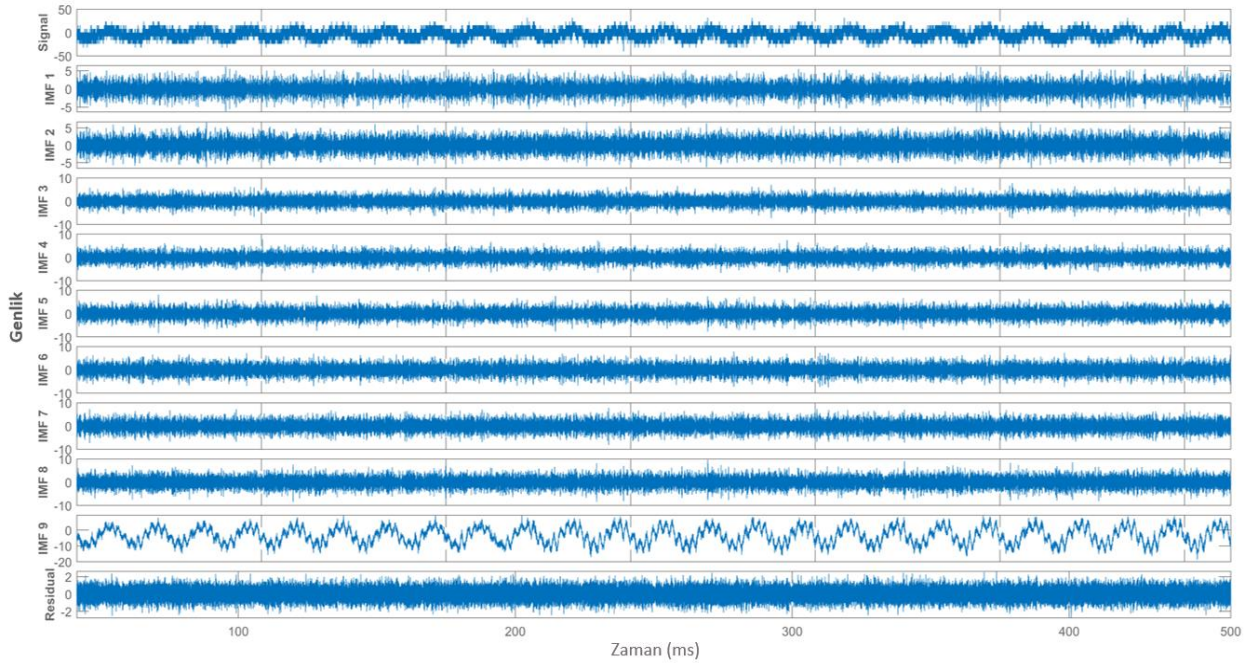


b

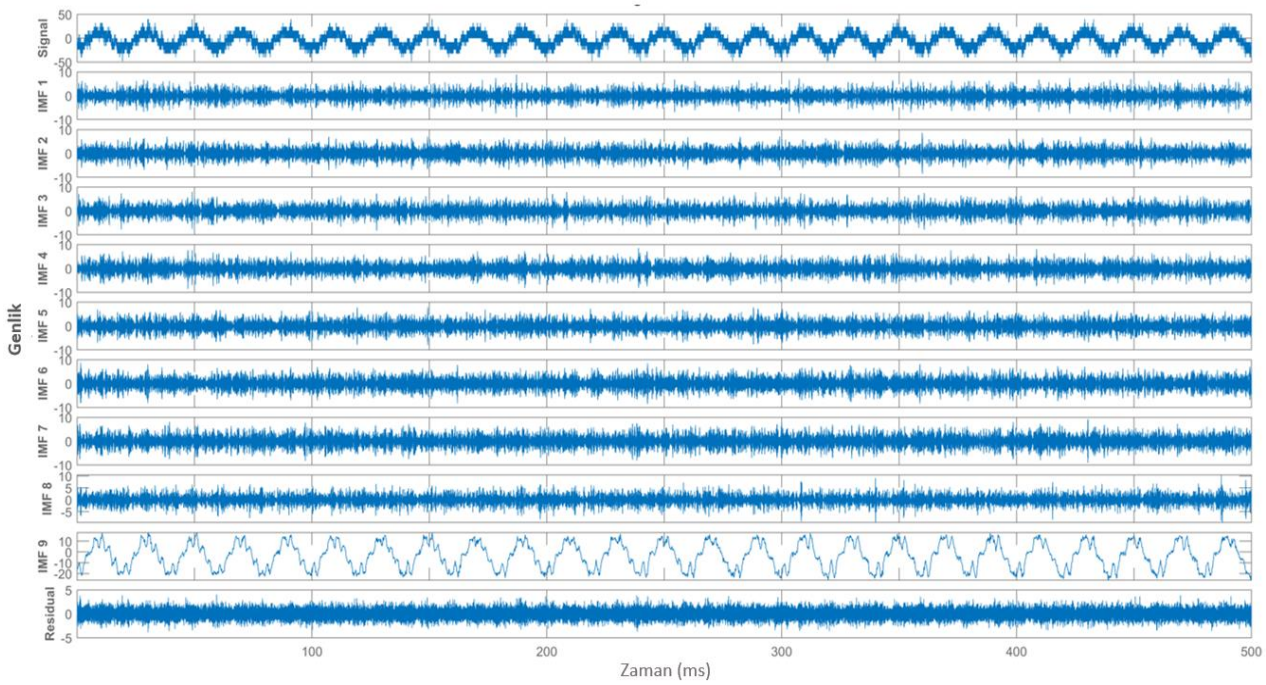


c

Şekil 4.4.5 (devam): Disk Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

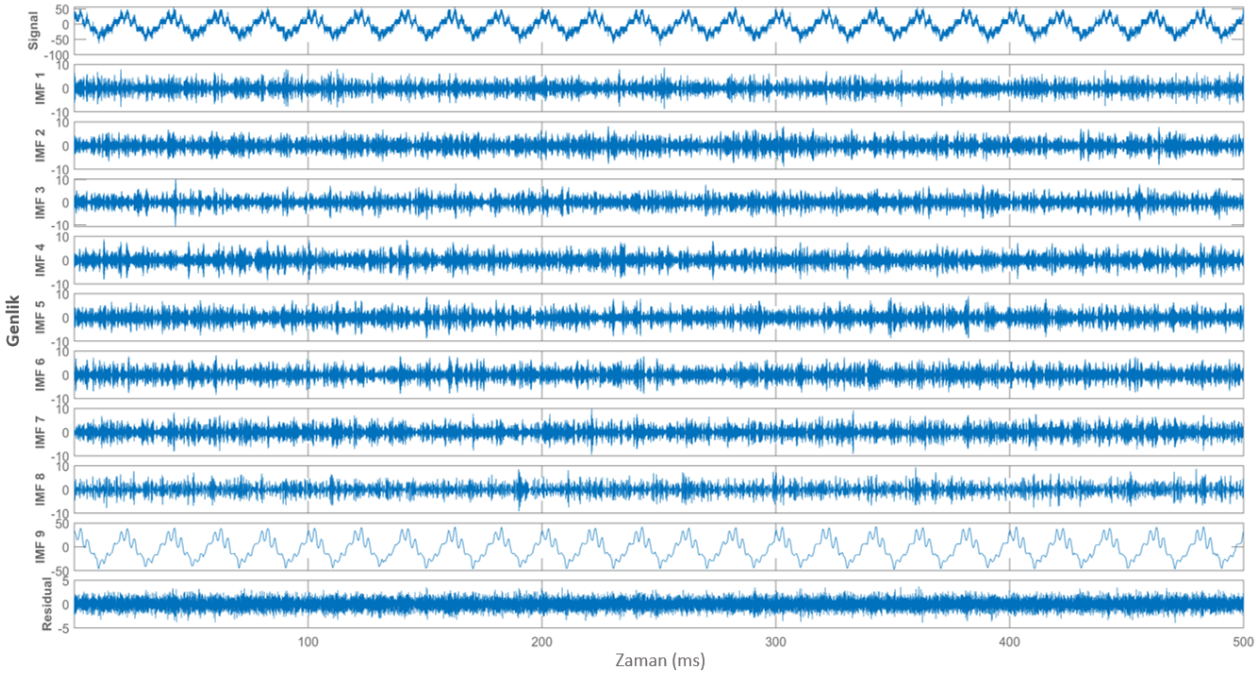


a



b

Şekil 4.4.6: Disk Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

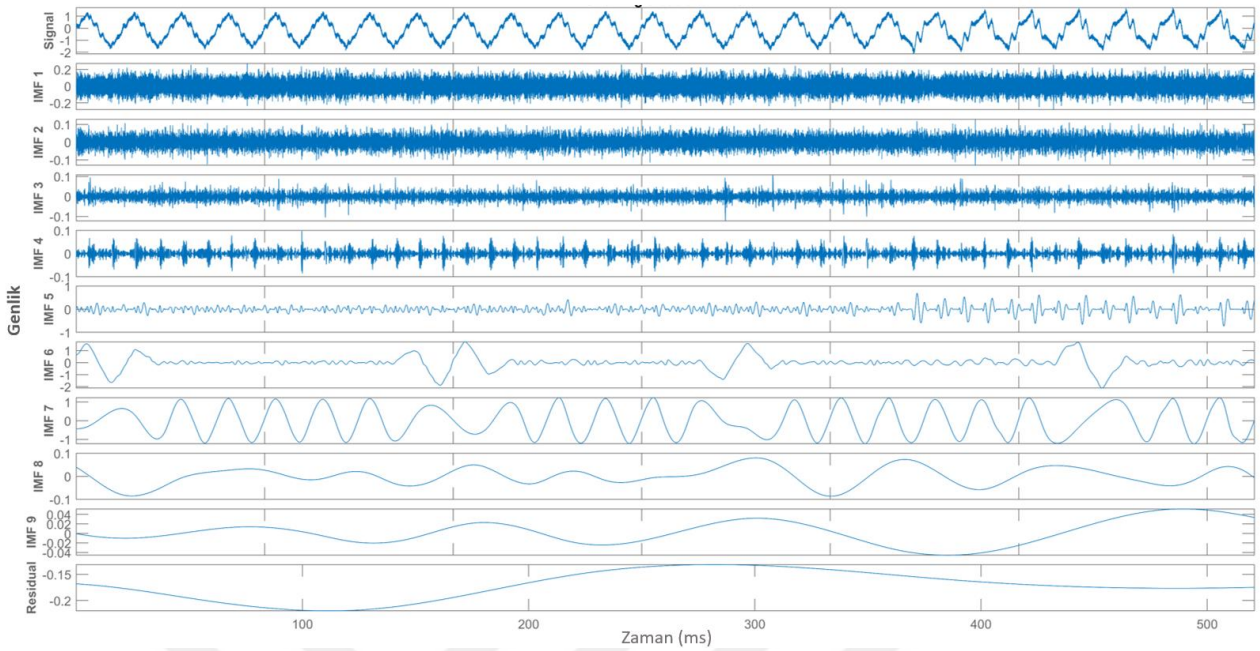


c

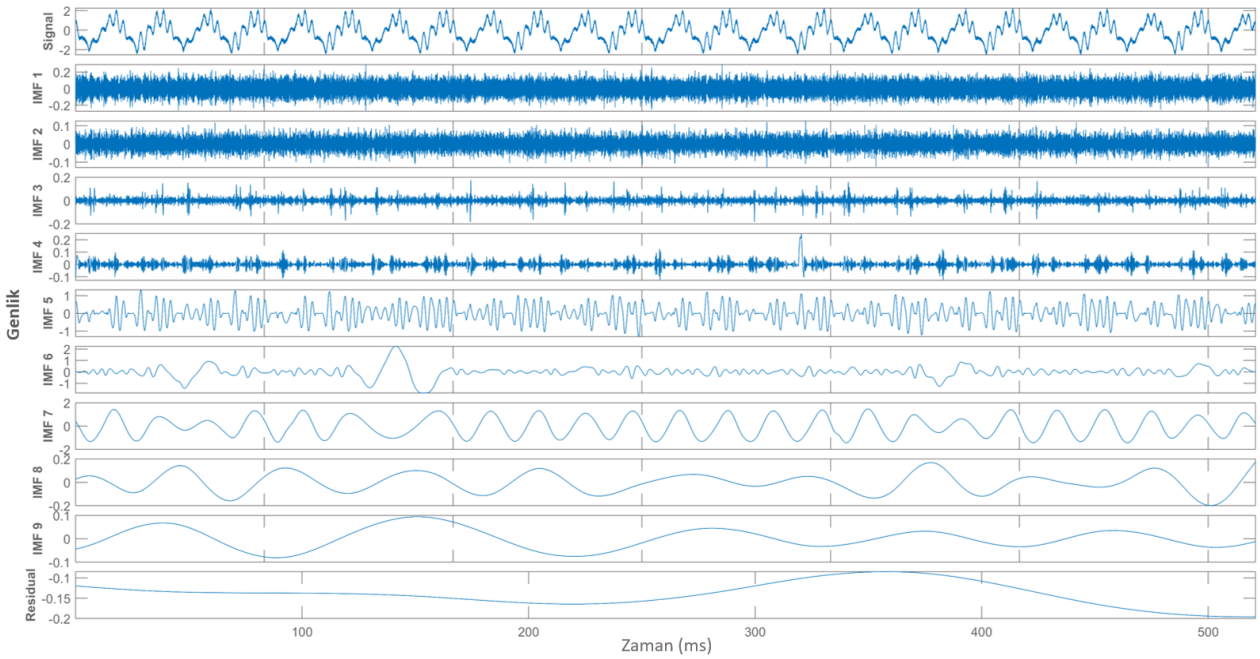
Şekil 4.4.6 (devam): Disk Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

Sivri köşe etkisine neden olan disk elektrot düzeninde doğal ester yağ için yapılan EMD ayrıştırması mineral yağın aynı elektrot düzenindeki davranışına benzer bir özellik göstermiştir. Her ne kadar doğal ester yağ daha yüksek delinme gerilimine sahip olsa da akım sinyallerinin EMD ayrıştırması mineral yağdaki gibi delinme geriliminde IMF 5, IMF 6 ve IMF 7 modlarının sinyal dalga formlarından anlaşılmaktadır. Buna göre eğer IMF 5 sinyali, 2.5 mm elektrot açıklığında olduğu gibi daha düzgün ve gürültüsüz bir yapıda ise bu durumda delinme gerilimi daha yüksek ölçülmektedir. Ancak doğal ester yağın ayrışma modlarındaki sinyaller mineral yağa göre daha erken temiz sinüs formuna ulaşmıştır.

VMD ayrıştırmasında mineral yağın disk elektrot düzenindeki davranışına benzer şekilde IMF 8 ve IMF 9 modlarının ayrışma oranı delinme hakkında bilgi vermektedir. Bu durumda IMF 8 ve IMF 9 modlarında daha fazla ayrışma olması yağın nispeten daha yüksek gerilim seviyelerinde delineceğini göstermektedir. Şekil 4.4.7 ve 4.4.8'de 1 mm, 2 mm ve 2.5 mm elektrot açıklığında doğal ester yağa ait sırasıyla VDE elektrot düzenindeki EMD ve VMD ayrıştırmaları sırasıyla verilmiştir.

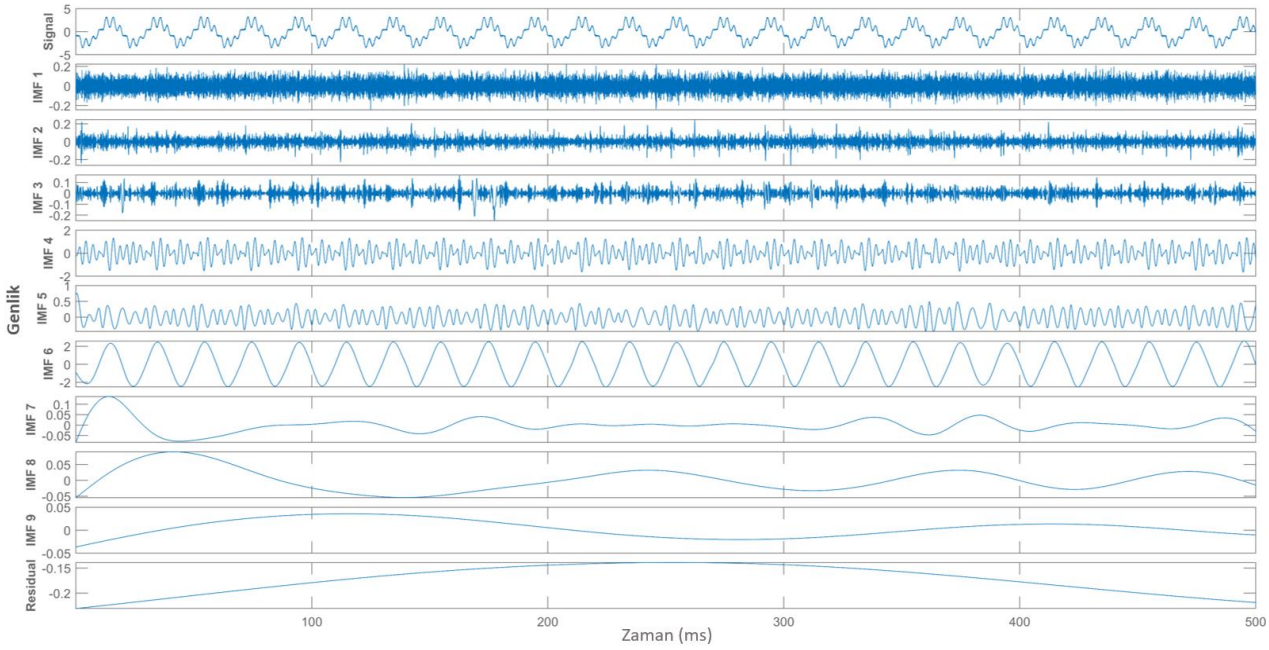


a



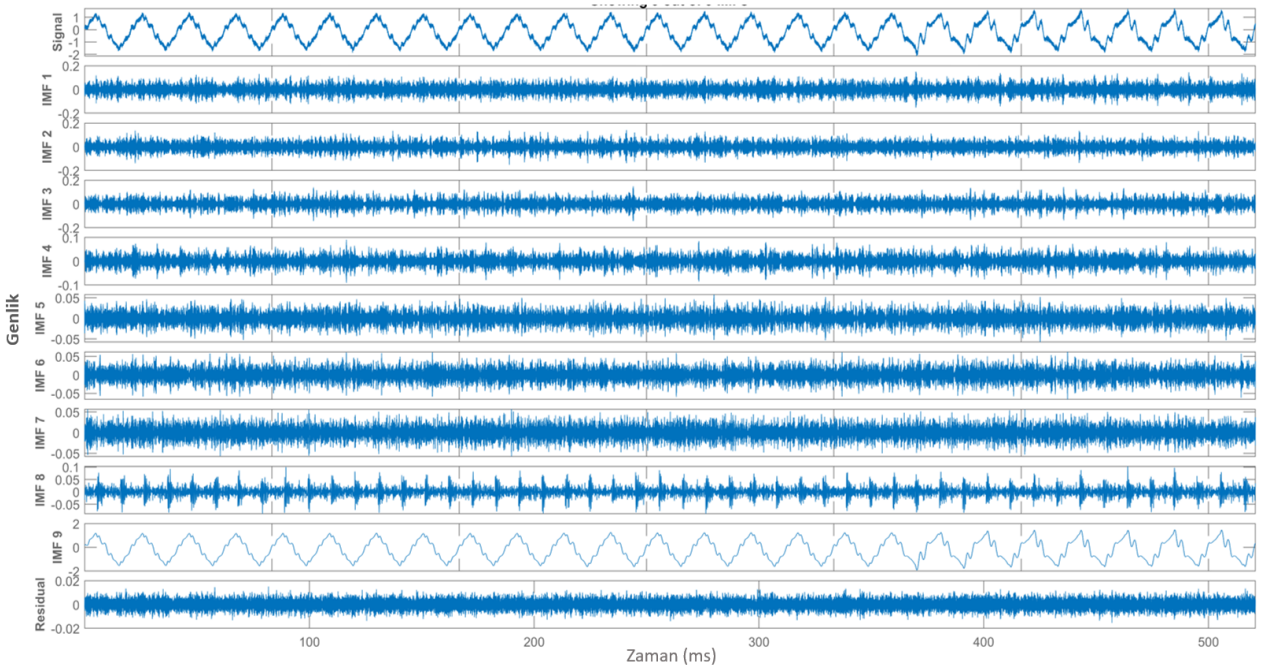
b

Şekil 4.4.7: VDE Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)



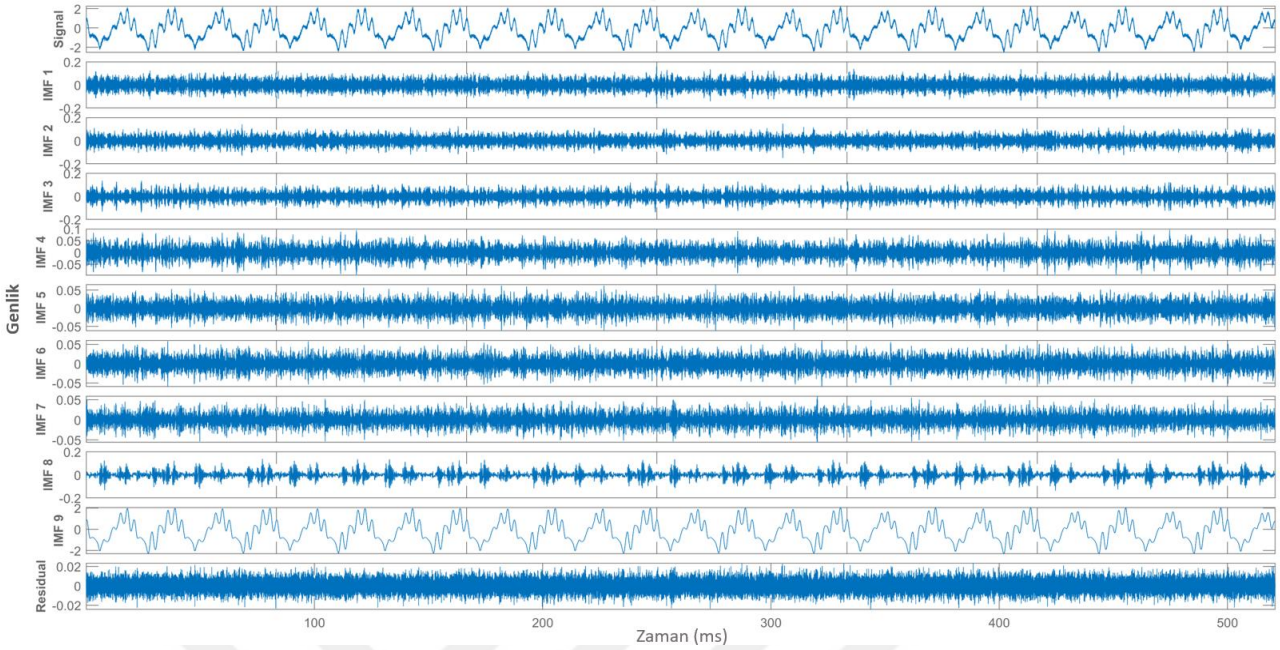
c

Şekil 4.4.7 (devam): VDE Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

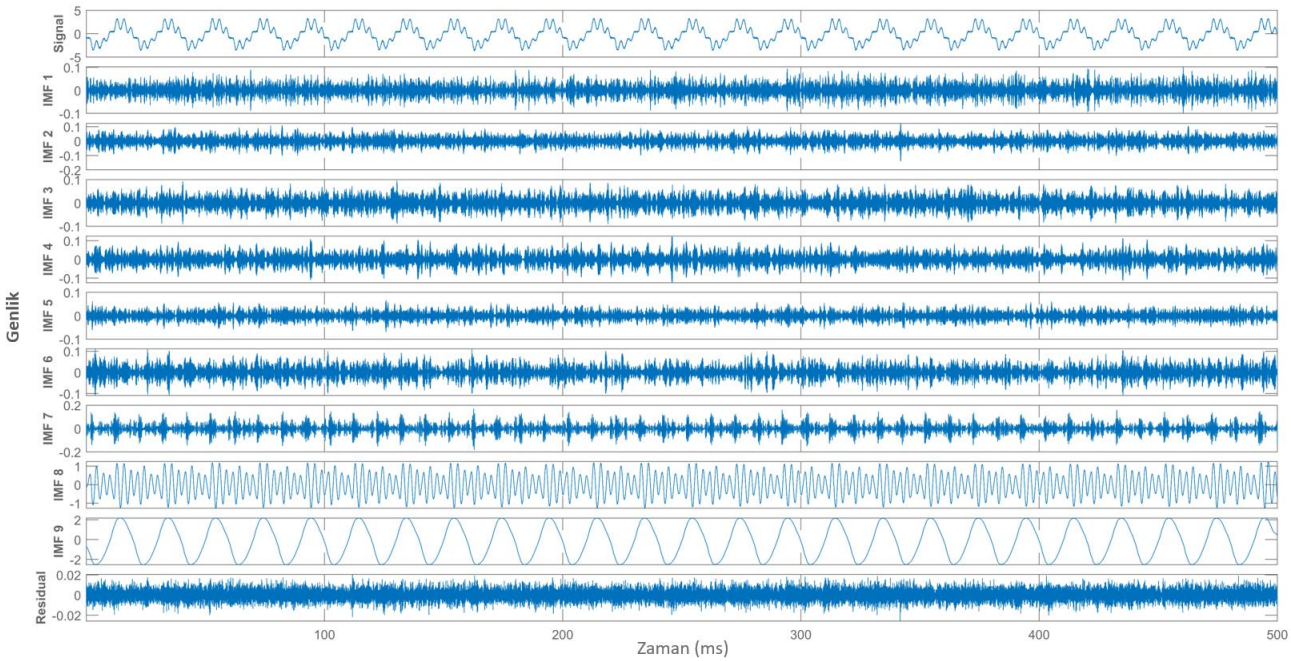


a

Şekil 4.4.8: VDE Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)



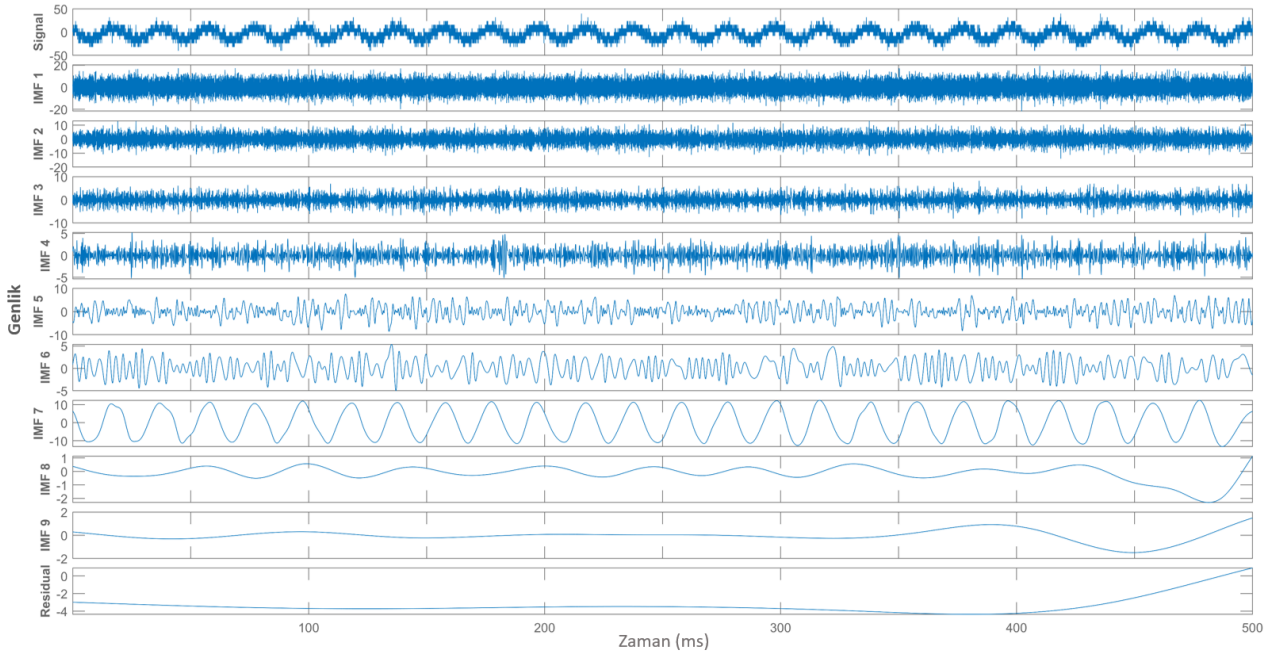
b



c

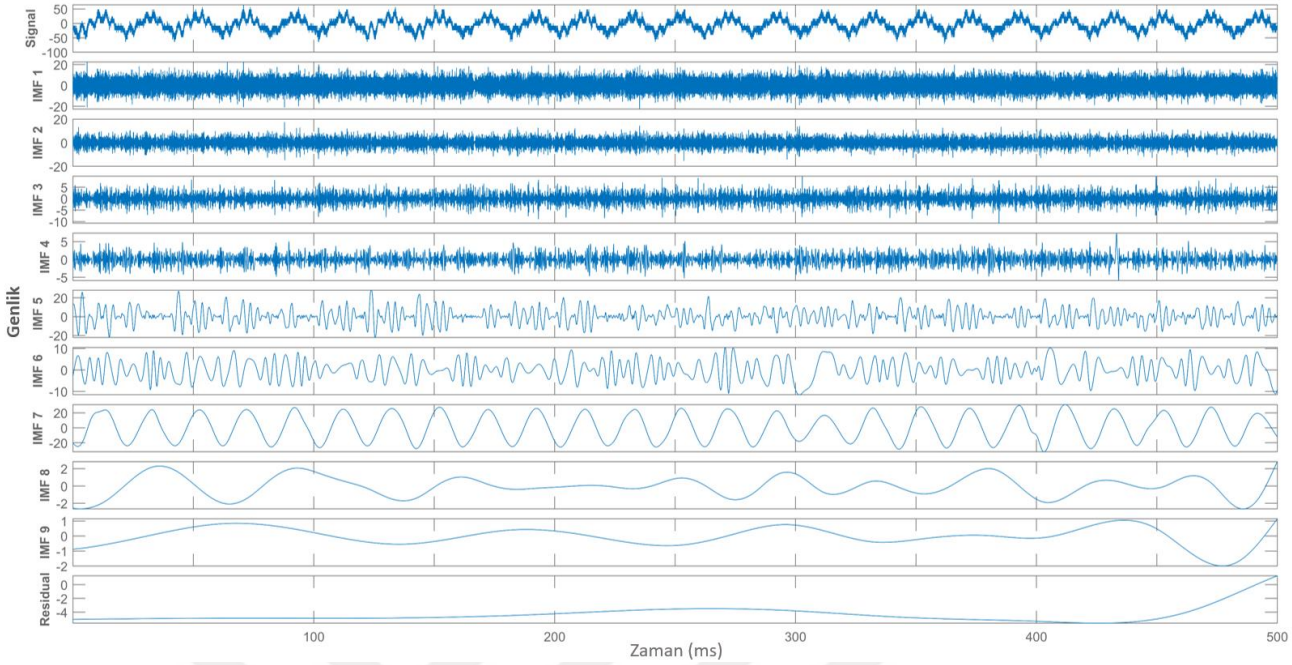
Şekil 4.4.8 (devam): VDE Elektrot Düzeninde Doğal Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

Doğal ester yağa ait EMD ayrıştırmasında IMF 6 modunun 2.5 mm elektrot açıklığında üzerindeki bütün gürültülerden arındığı görülmektedir. Bu durum mineral yağ ile karşılaştırıldığında doğal ester yağın daha üstün dielektrik performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü mineral yağda IMF 6 modu tamamen temiz bir sinüs dalga formuna sahip değildir. Ayrıca mineral yağda olduğu gibi modların sinüs formuna daha erken ulaşması yağın yalıtım direncinin fazla olduğunu göstermektedir. Doğal ester yağın 2.5 mm elektrot açıklığında elde edilen akım değerinin VMD ayrıştırmasında IMF 9 modunun, bu yağın disk elektrot düzeninde ve mineral yağın iki elektrot düzenindeki dalga formundan oldukça farklı olduğu görülmektedir. IMF 9 modu neredeyse hiçbir pik ve bozucu nokta içermemektedir. Bu durum farklı sıvı dielektriklerin yalıtım dirençlerinin neden farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca VDE elektrotlarının sivri köşe etkisinin ne derece azalttığının da bir göstergesidir. Şekil 4.4.9 ve 4.4.10'da 1 mm, 2 mm ve 2.5 mm elektrot açıklığında sentetik ester yağa ait disk elektrot düzenindeki sırasıyla EMD ve VMD ayrıştırmaları verilmiştir.

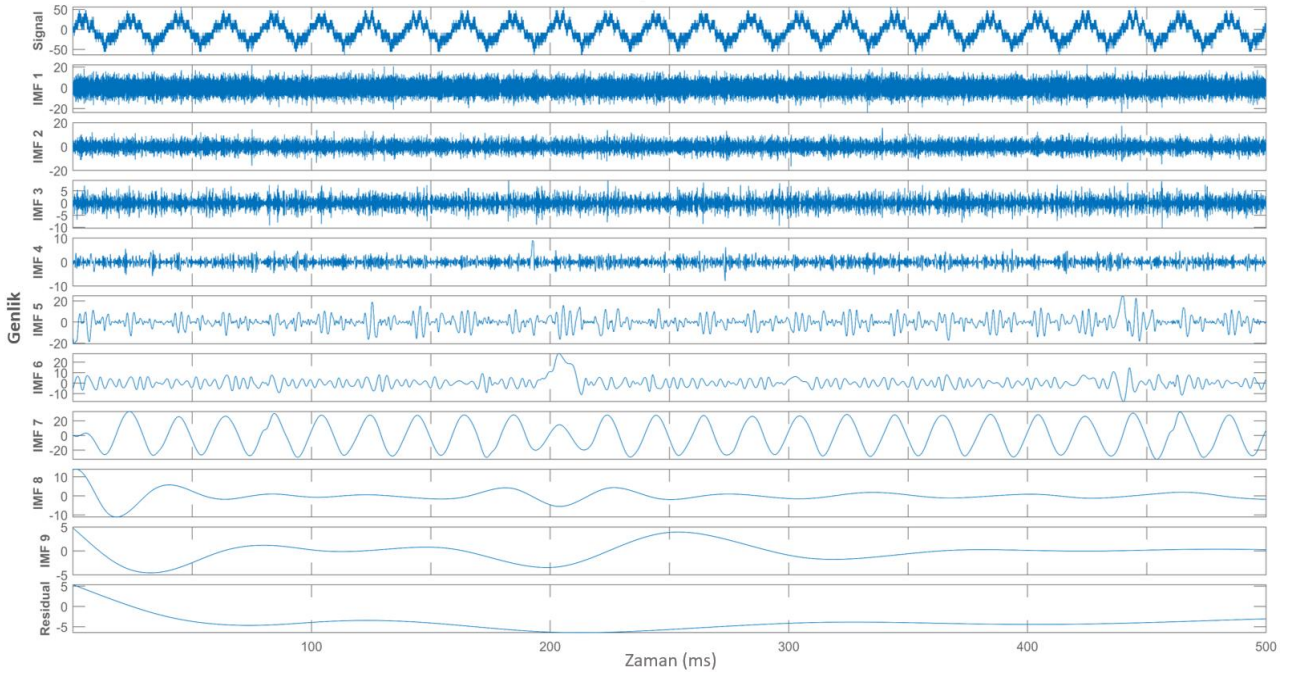


a

Şekil 4.4.9: Disk Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

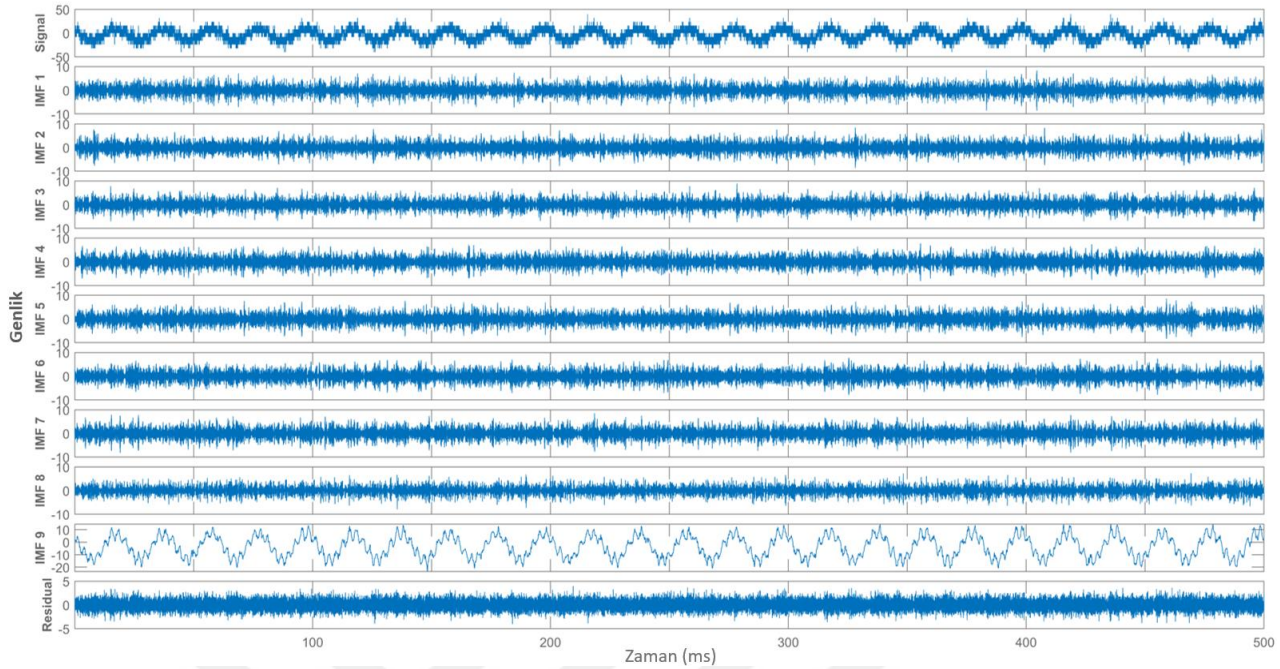


b

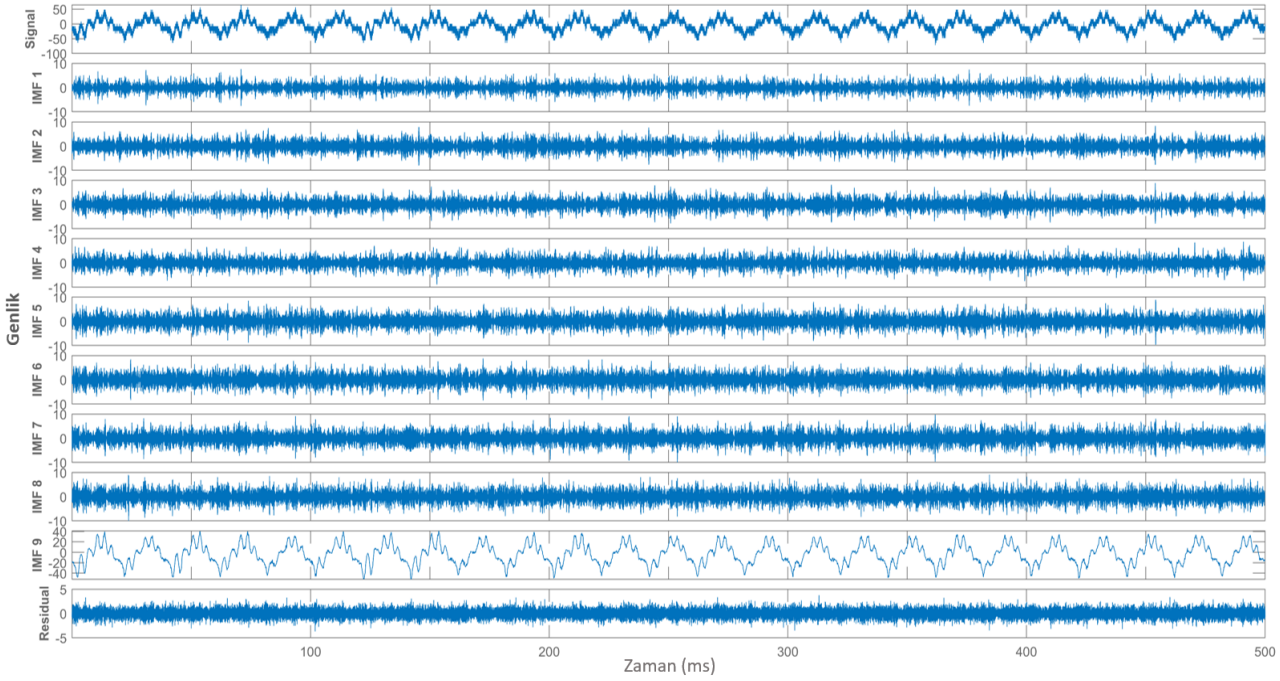


c

Şekil 4.4.9 (devam): Disk Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

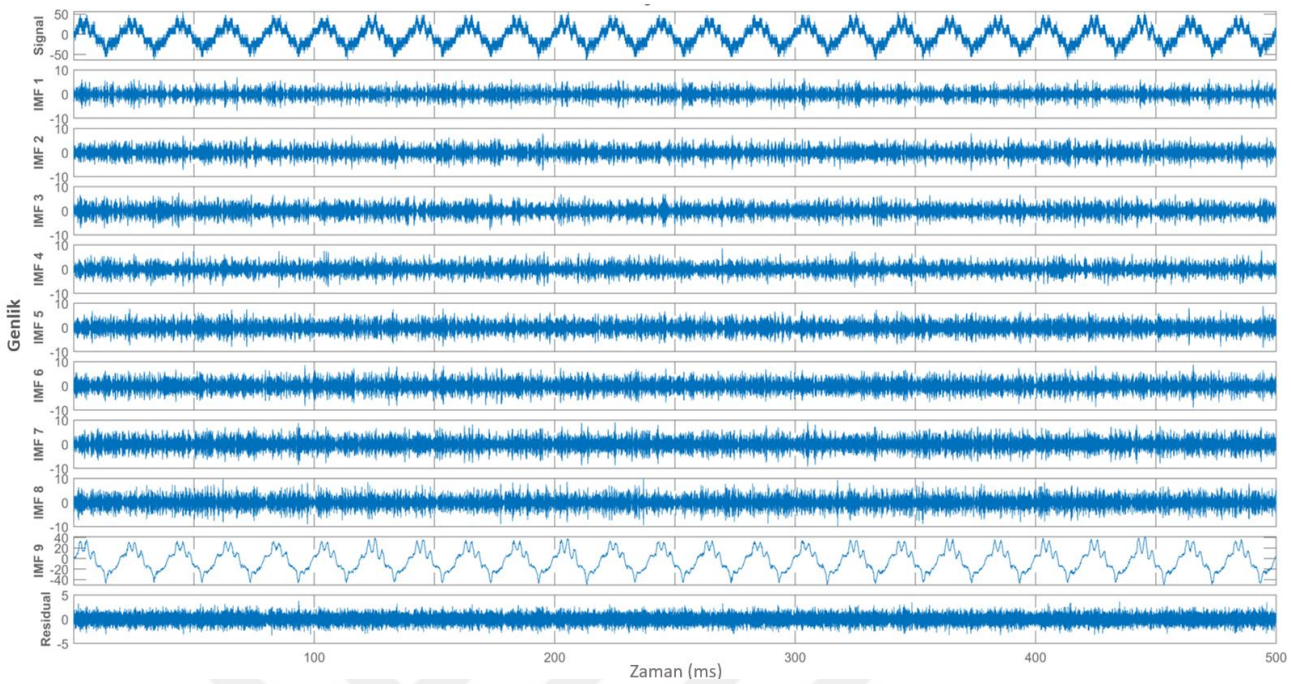


a



b

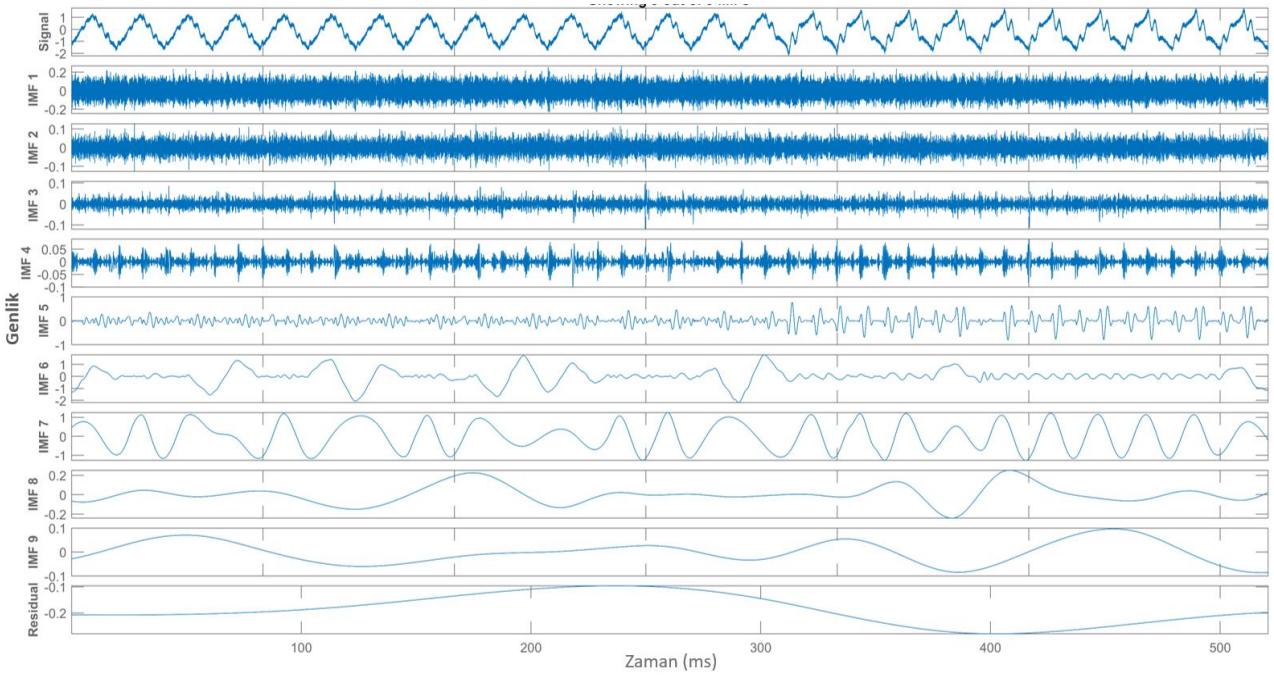
Şekil 4.4.10: Disk Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)



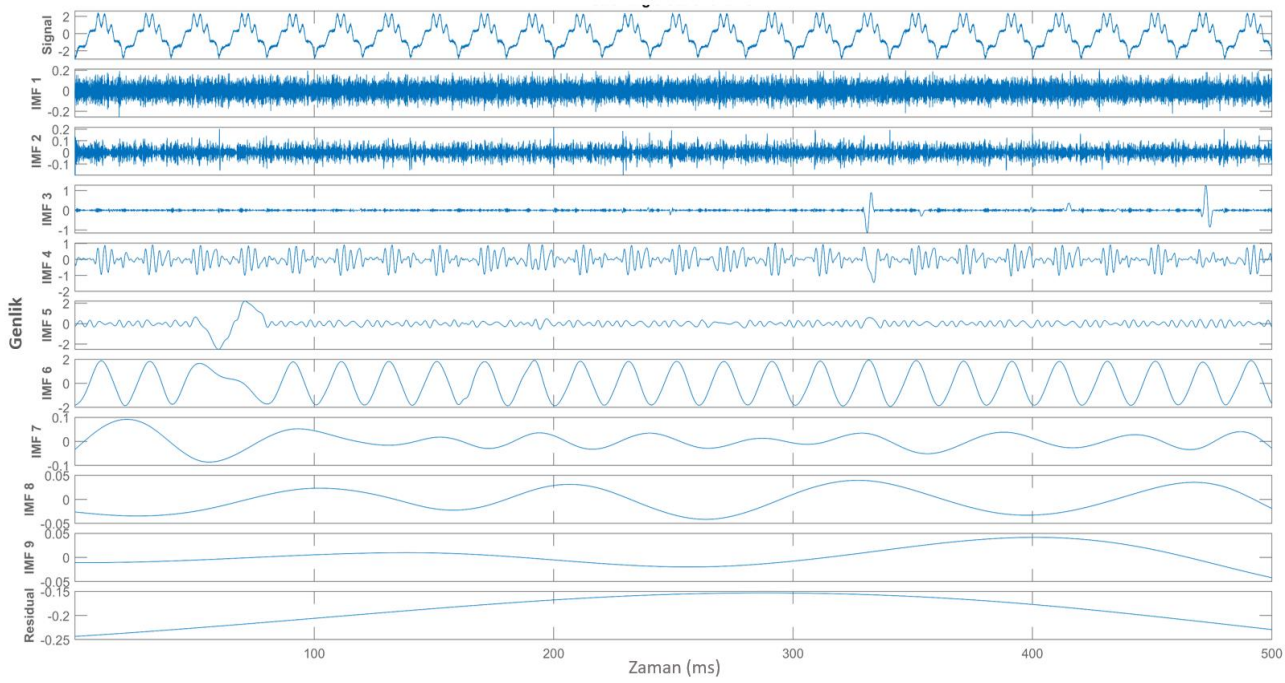
c

Şekil 4.4.10 (devam): Disk Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

Sentetik ester yağın disk elektrot düzeninde EMD akım sinyali ayrıştırmasında, diğer iki yağa benzer şekilde IMF 5 ve IMF 6 modlarının sinyal dalga formunun gürültü oranı, elektrot açıklığı arttıkça azalmaktadır. Sentetik ester yağın elektrot açıklığının arttığı durumda stabil davranışının bozulduğu standart sapma hesaplarından görülmektedir. Bu durum VMD ayrıştırmasında IMF 8 değerinin daha fazla gürültülü ve sık olmasıyla sonuçlanmıştır. Şekil 4.4.11 ve 4.4.12'de 1 mm, 2 mm ve 2.5 mm elektrot açıklığında sentetik ester yağa ait VDE elektrot düzenindeki sırasıyla EMD ve VMD ayrıştırmaları verilmiştir.

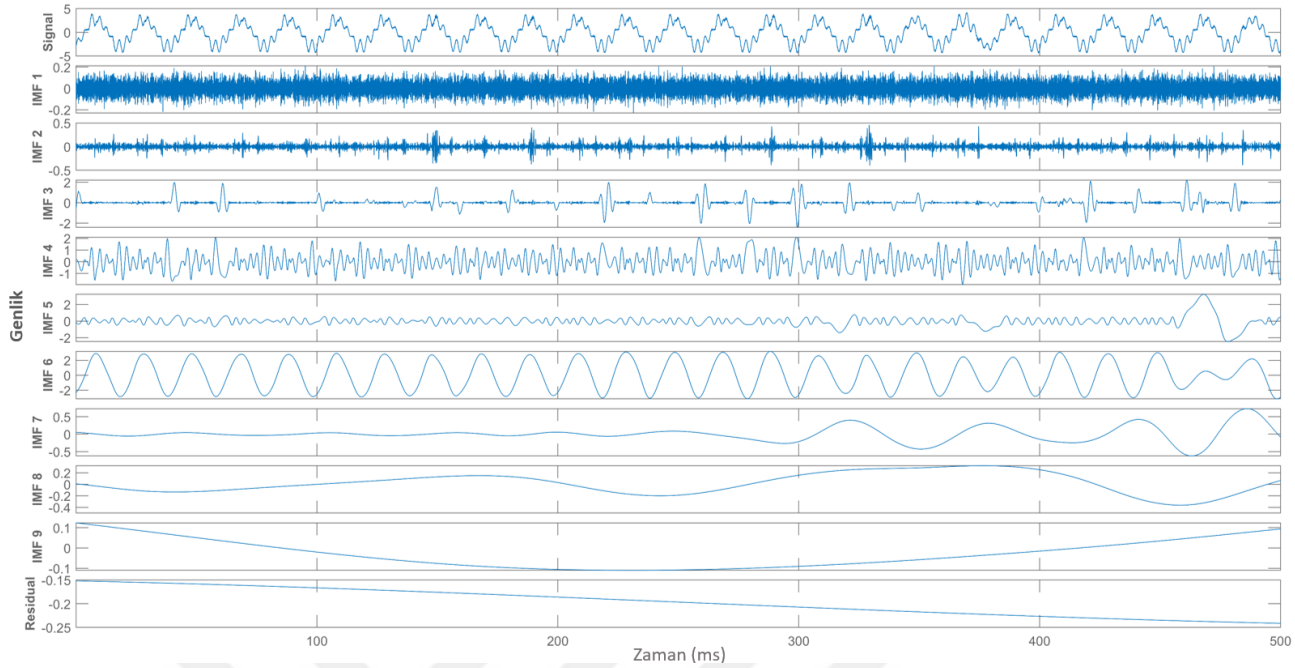


a



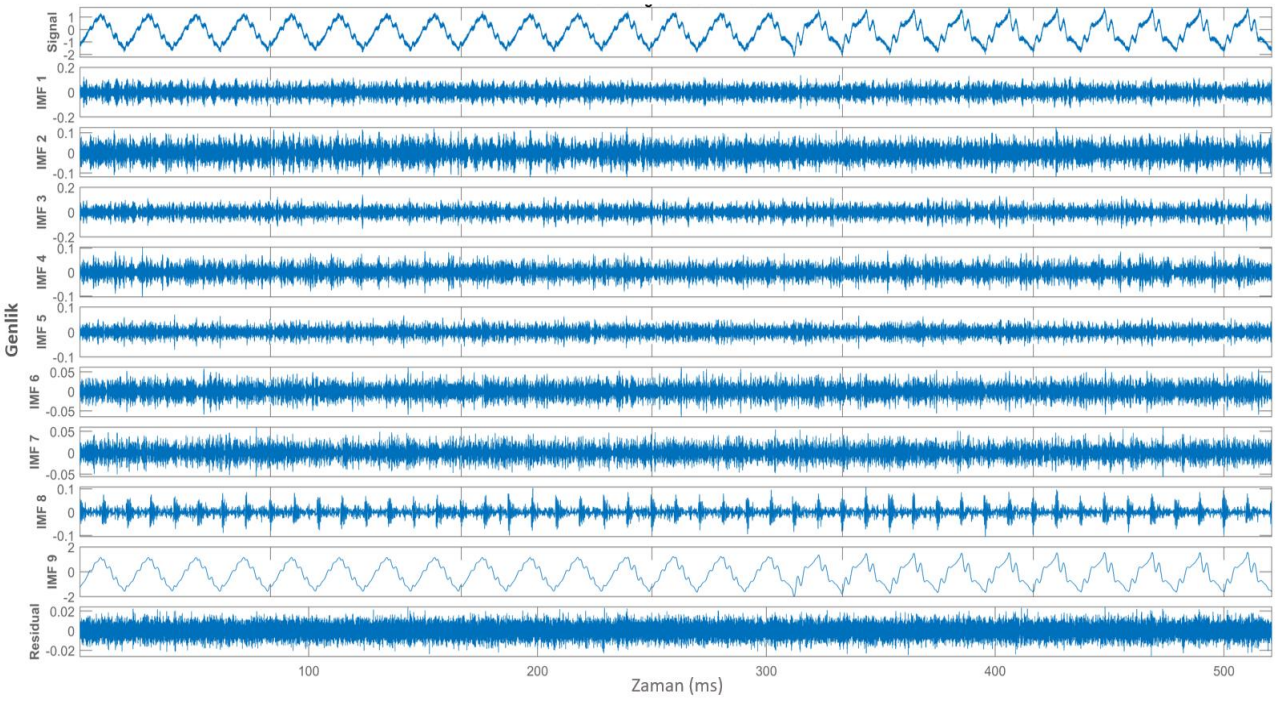
b

Şekil 4.4.11: VDE Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)



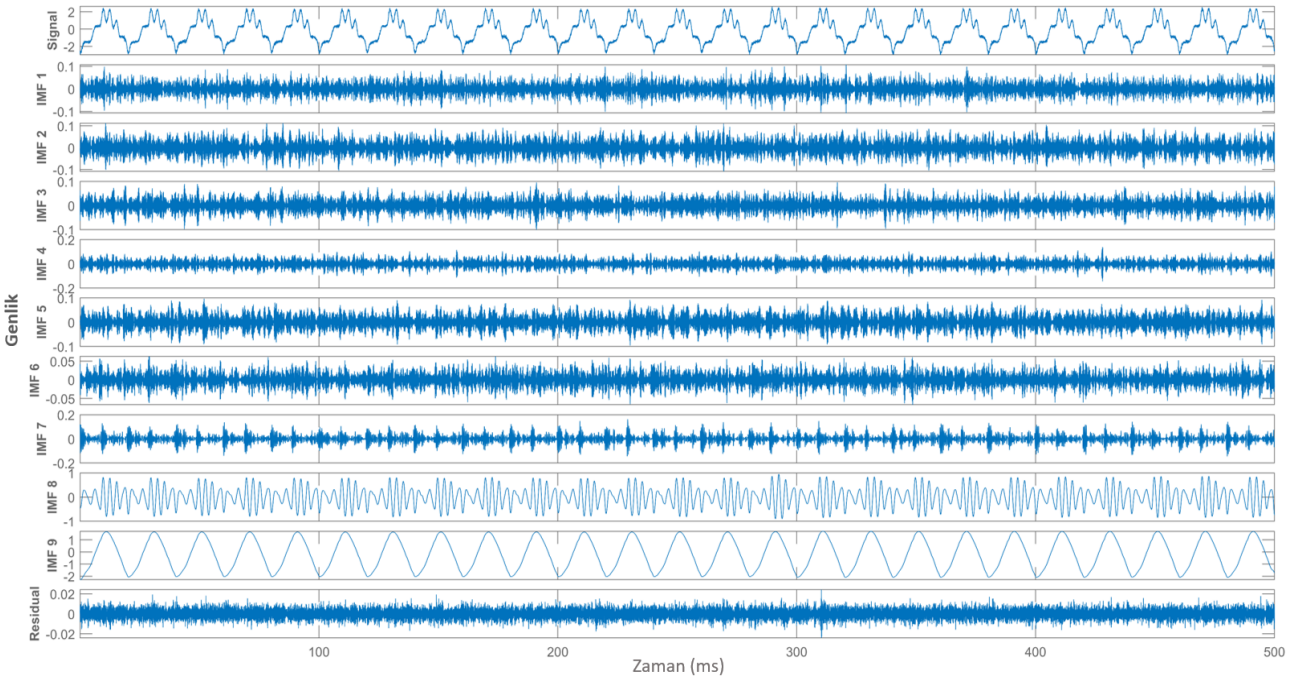
c

Şekil 4.4.11 (devam): VDE Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin EMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

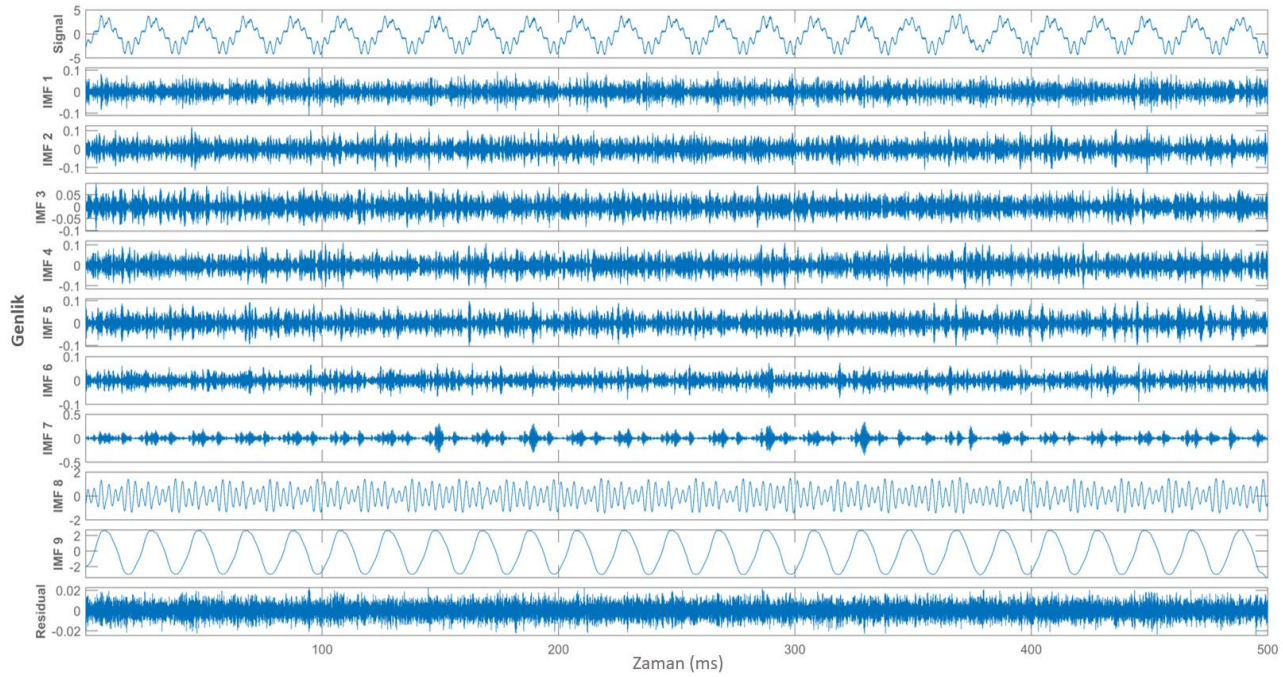


a

Şekil 4.4.12: VDE Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)



b



c

Şekil 4.4.12 (devam): VDE Elektrot Düzeninde Sentetik Ester Yağa ait Akım Sinyallerinin VMD Ayrıştırması (a: d=1 mm, b: d=2 mm, c: d= 2.5 mm)

Sentetik ester yağ ile yapılan deneylerde VDE elektrot düzeninde, en yüksek delinme dayanımına sahip olduğu EMD ayrıştırmasındaki IMF 4 modundan anlaşılabilmektedir. Mineral yağ ve doğal ester yağın EMD ayrıştırmalarında tüm açıklıklarda IMF 4 modu daha gürültülü bir dalga formuna sahiptir. Ancak sentetik ester yağda EMD yönteminde ayrışma daha erken modlarda başlamıştır. Bu durumda EMD yöntemindeki modlardaki dalga formlarının, en temiz sentetik ester yağın VDE elektrot düzenindeki yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarda var olduğu görülmektedir. Bu elektrot düzeninde VMD yöntemi ile yapılan ayrıştırmada 2 mm elektrot açıklığında IMF 8 modu ilk defa diğer yağlardaki eşdeğerlerine göre daha ayrışmış olarak görülmektedir. Doğal ester yağda benzer durum sadece 2.5 mm elektrot açıklığında görülmüştür. Sentetik ester yağın VDE elektrot düzeninde hem 2 mm hem de 2.5 mm elektrot açıklığında VMD ayrıştırmasının IMF 9 modunda temiz ve gürültülü nokta içermeyen bir sinüs dalga formu olduğu Şekil 4.4.12'de açıkça görülmektedir. Bu durumun test edilen diğer iki trafo yağı için her iki açıklıkta da aynı davranışa sahip olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca VMD ayrıştırması bir sinyalde sivri köşe etkisinin olup olmadığı hakkında da bilgi vermektedir. Buna göre modların daha gürültüsüz ve ayrışmış olması sivri köşe etkisinin olmadığı anlamına gelmektedir. Bu durum özellikle büyük elektrot açıklıklarında daha etkili bir biçimde analiz edilmiştir.

4.5. METAL PARÇACIKLARIN ETKİSİNİN İNCELENDİĞİ DENEYLERE AİT BULGULAR

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü, Yüksek Gerilim Laboratuvarında yapılan deneyler ile bakır ve demir oksit parçacıklarının trafo yağları üzerindeki etkisinin inceleneceği bu bölümde gerilim bölücü devre vasıtasıyla elde edilen akım sinyalleri analiz edilmiştir. Yalıtım yağlarının yüksek gerilim stresi altında deşarj olmasından dolayı deney sırasında elde edilen akım verilerinde sinüsoidal olmayan gürültü noktalarının varlığı normaldir. Bu noktalar adeta lineer olmayan bir davranış göstererek çeşitli harmoniklerin oluşmasına neden olurlar. Deneyler gerilim trafosundan elde edilen maksimum 32 kV gerilim seviyesi uygulanarak VDE ve disk elektrot düzenlerinde 1 mm elektrot açıklığında gerçekleştirilmiştir. Sentetik ester ve doğal ester yağın 2 mm ve 2.5 mm elektrot açıklıklarında delinme gerilimleri ölçülemediğinden dolayı demir ve bakır parçacıklarının etkisi sadece en küçük elektrot açıklığı olan 1 mm'de incelenmiştir. Harmonik analizi yapabilmek için zaman eksenindeki akım verilerinin frekans ekseninde incelenmesi gerekmektedir. Bunun için Fourier dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Zamanla değişen $f(t)$ sinyalinin frekans eksenindeki karşılığı en basit şekliyle Denklem 4.5.1'deki gibi hesaplanmaktadır [59].

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-jwt}\,dt \tag{4.5.1}$$

Bir akım sinyali devamlı bir özellik göstermektedir. Ancak harmonik analizi yapabilmek için her frekans bandındaki değerlerin ayrı ayrı oluşturulması gerekmektedir. Bu yüzden zaman eksenindeki n adet örneğin frekans bandındaki k adet örneğe dönüştürülmesi için Denklem 4.5.2'de hesap yöntemi kullanılmaktadır [60].

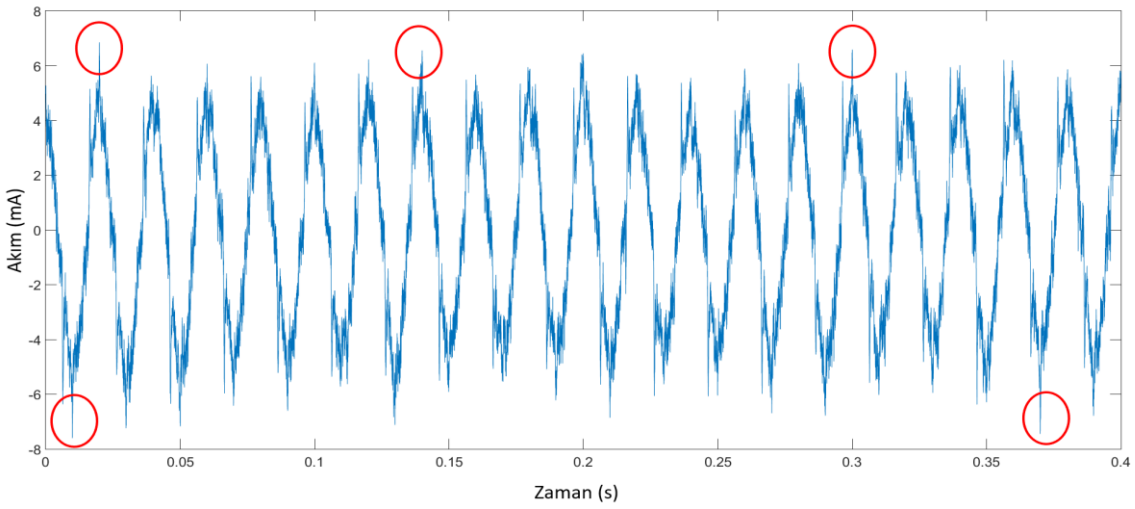
$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T)e^{-j2\pi kn/N} \tag{4.5.2}$$

Bu denklemde n ve k 0'dan başlayarak $N-1$ değerine kadar artmaktadır. N örneğin toplam sayısı olarak ifade edilmektedir. $\Delta\Omega$ zaman ekseninin frekans karşılığındaki değişimini göstermektedir. Harmonik bileşenlerin hesabı için ayrık dönüşümün hızlı Fourier dönüşümü ile devam ettirilmesi gerekmektedir. Bunun için k ve n örnek sayılarının matris formunda (W^{kn}) hesaplandığı $W = e^{-2j\pi/N}$ denklemi kullanılarak hesap yapılmaktadır. Bu aşamadan sonra Denklem 4.5.3'deki formül kullanılarak dalga formunu bozan harmonik değerler hesaplanmaktadır.

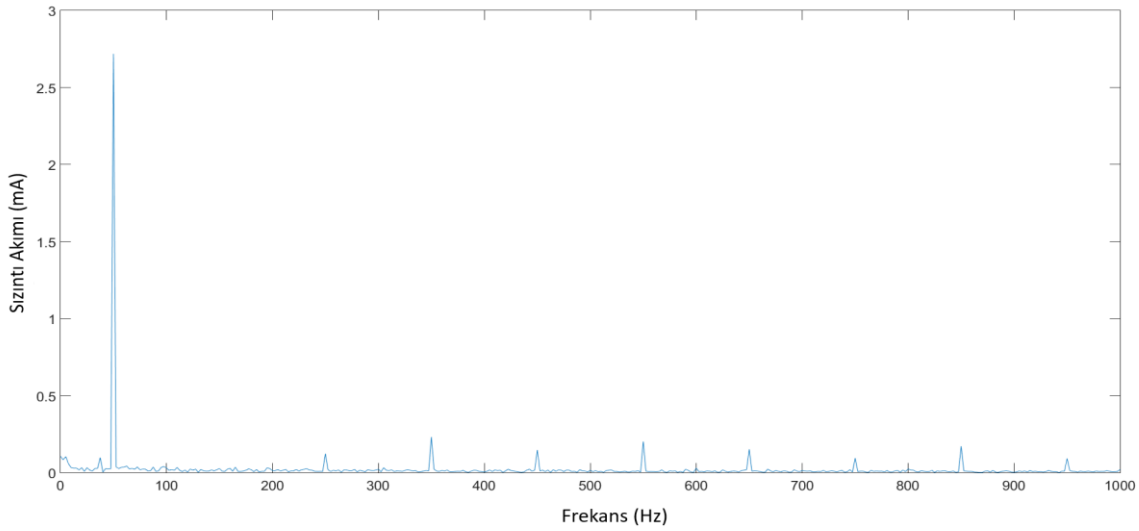
$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n sin(nw_1 t + \delta_n) \tag{4.5.3}$$

Bu denklemde belirli bir frekansa sahip olmayan terimler ihmal edilmiştir. Zaman ekseninde n. derece harmonik akımının anlık değerini göstermektedir. w_1 açısal frekansında ve δ_n faz açısındaki n. derecedeki harmonik akım değeri efektif değer olarak hesaplanmaktadır. Bundan sonra her bir harmonik değerinin hesaplanması için $HD_n = \frac{I_n}{I_1}$ eşitliği kullanılmaktadır.

Mineral yağın herhangi bir demir ya da bakır nano parçacık ihtiva etmediği durumda 20 periyotluk örnek bir akım sinyali ve harmonik grafiği 1 mm elektrot açıklığında sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.1 ve 4.5.2'de verilmiştir.

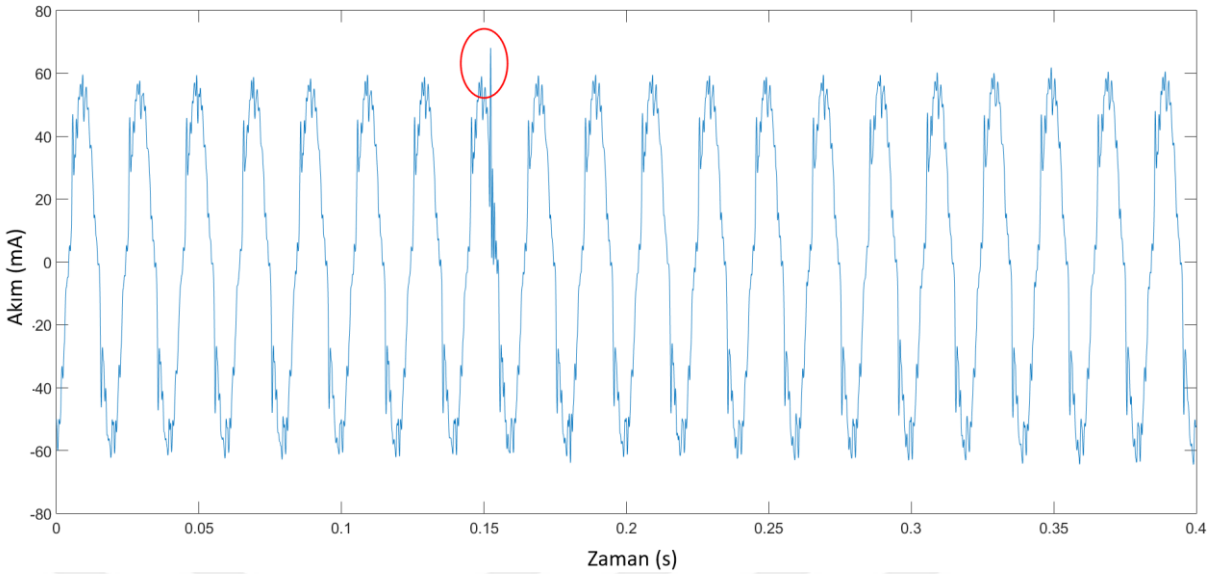


a

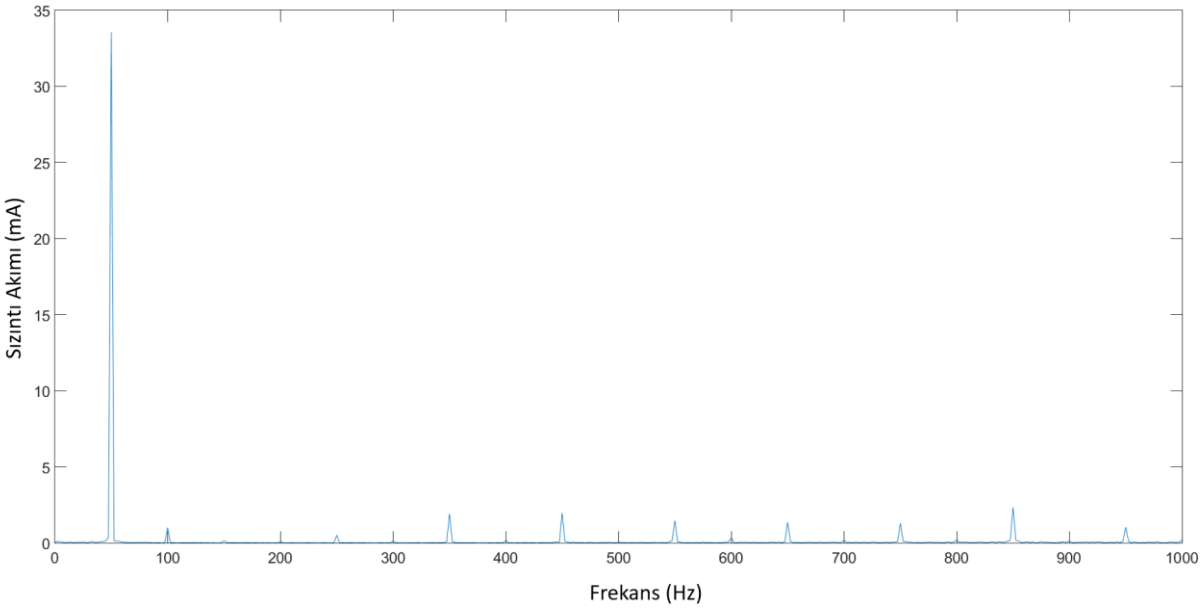


b

Şekil 4.5.1: Mineral Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



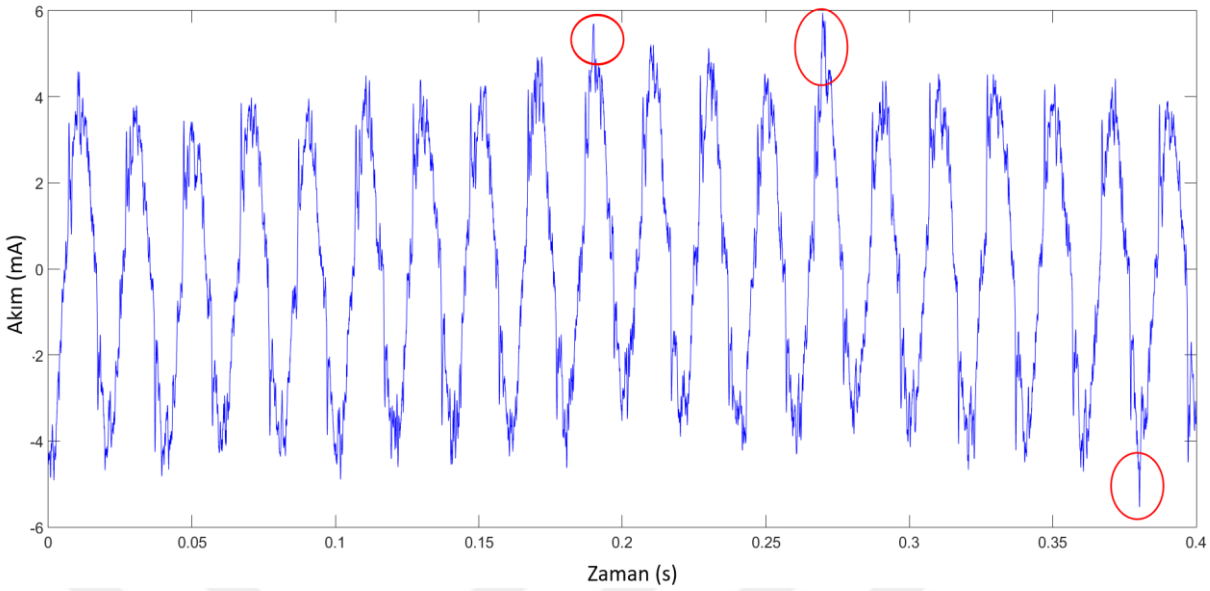
a



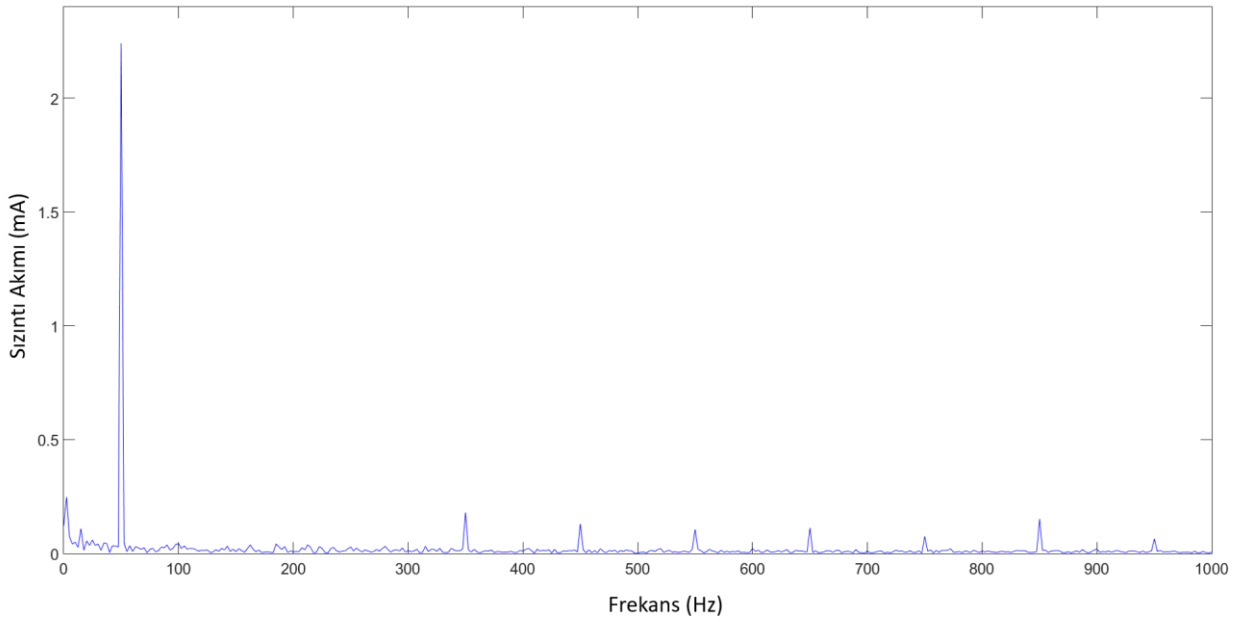
b

Şekil 4.5.2: Mineral Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

Disk elektrot düzeninde hem negatif hem de pozitif alternansta daha fazla pik noktalar 20 periyotluk sinyallerde görülmektedir. VDE elektrot düzeninde daha fazla harmonik görülürken disk elektrotta daha fazla bozucu sinyal görülmesi sivri köşe etkisinden kaynaklanmaktadır. Mineral yağda 1 mm elektrot açıklığında, bakır nano partikül eklenmesi durumunda 20 periyotluk örnek akım sinyali ve harmonik grafiği sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.3 ve 4.5.4'de verilmiştir.

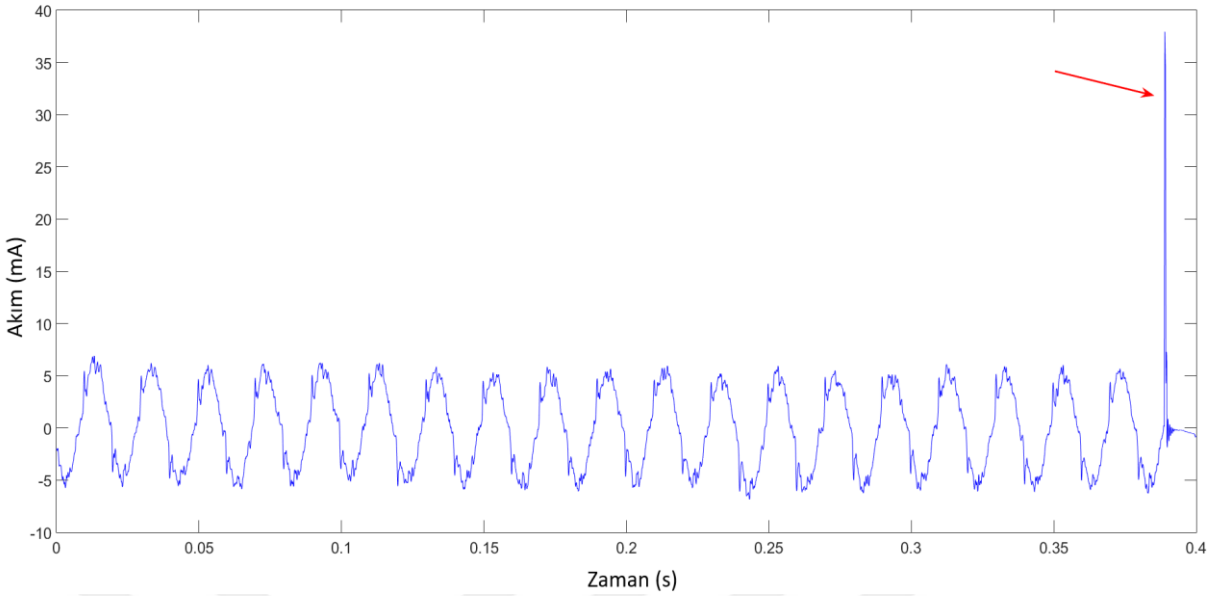


a

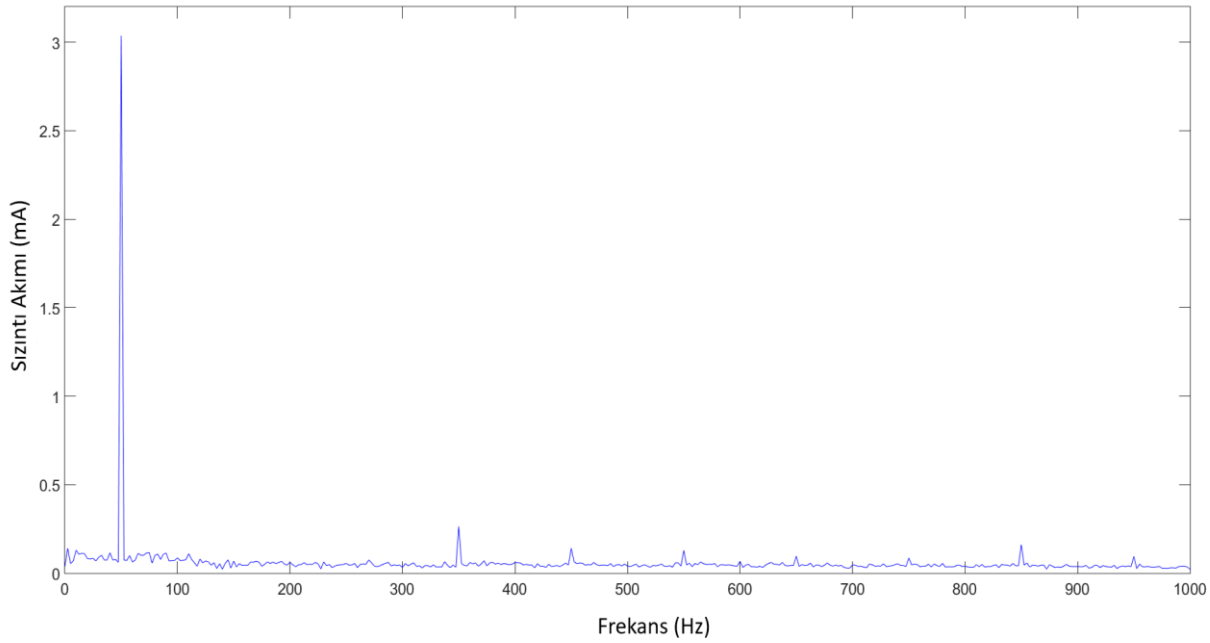


b

Şekil 4.5.3: Bakır Katkılı Mineral Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



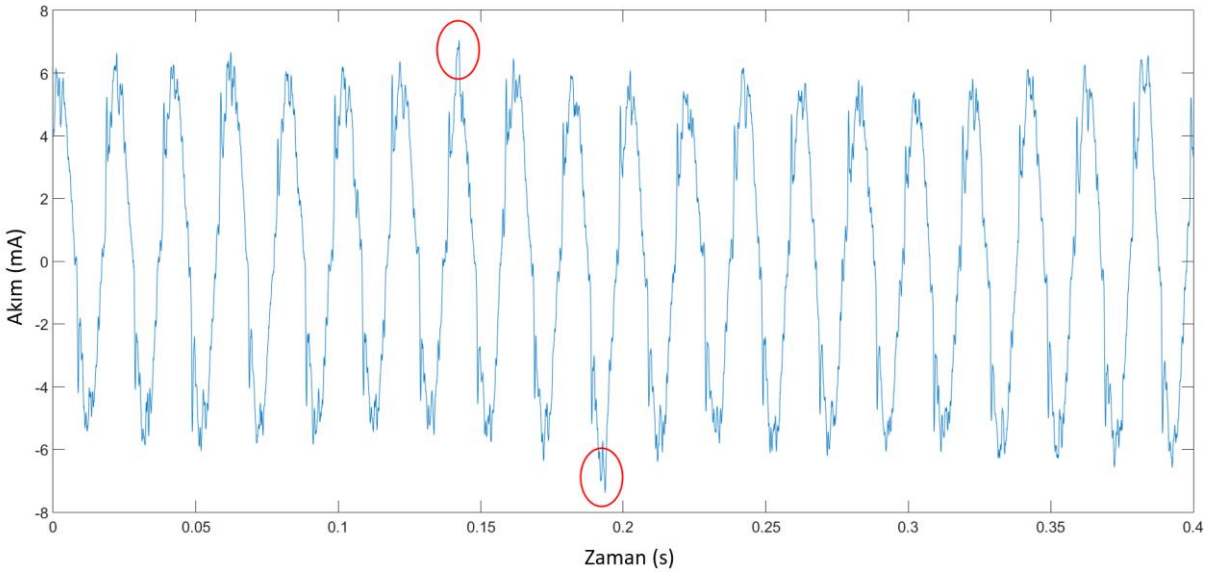
a



b

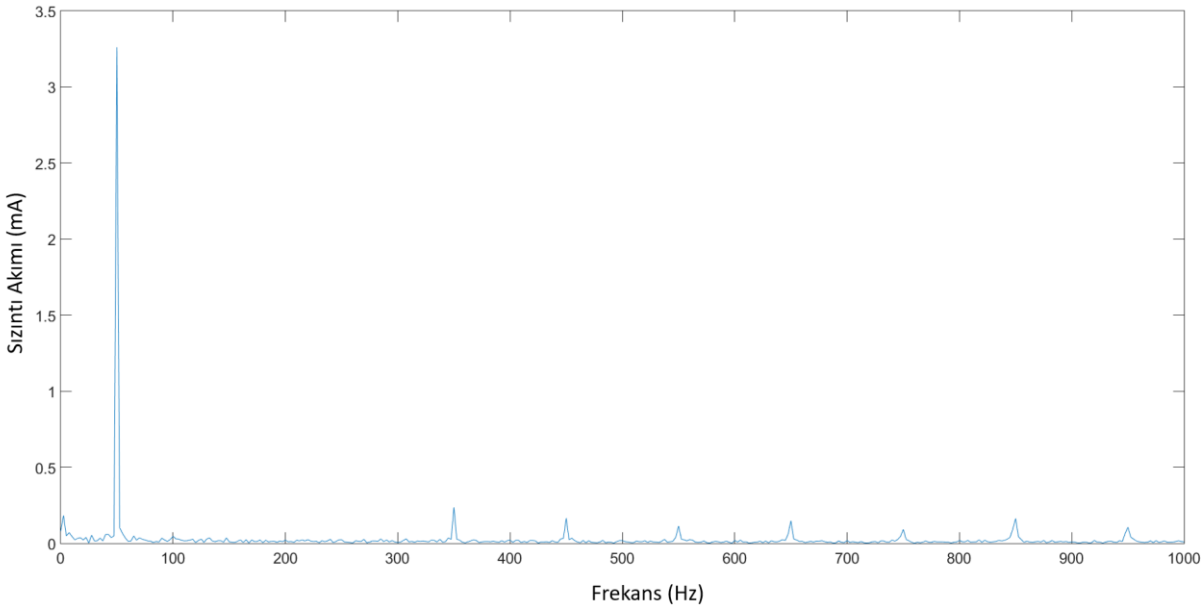
Şekil 4.5.4: Bakır Katkılı Mineral Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

Bakır partiküller disk elektrot düzeninde, akım sinyalinde bazı noktalarda genliğin maksimum değerini düşürücü veya arttırıcı bir etki yapmıştır. Bakır tozu eklendikten sonra yapılan ölçümlerde disk elektrot düzeninde 5. harmonik etkisinin ortadan kalktığı görülmektedir. Bu durum bakır parçacıkların disk elektrodun sivri köşelerinde meydana gelen iyonizasyonun metal parçacık varlığından dolayı daha geniş bir alana yayılmasından kaynaklanmaktadır. VDE elektrot düzeninde bakır parçacıklar ciddi bir pike neden olmuştur. Ancak bu pik noktası harmonik kaynağı olarak davranmamıştır. Bu elektrodun kavisli yüzeyinden dolayı yağ kendini toparlamıştır. Bakır parçacıklar VDE elektrot düzeninde de harmonik etkisini azaltacak şekilde etki etmiştir. Mineral yağda 1 mm elektrot açıklığında bakır nano partikül içeren sıvıya, demir partiküllerinin eklenmesi sonucunda 20 periyotluk örnek akım sinyali ve harmonik grafiği sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.5 ve 4.5.6'da verilmiştir.



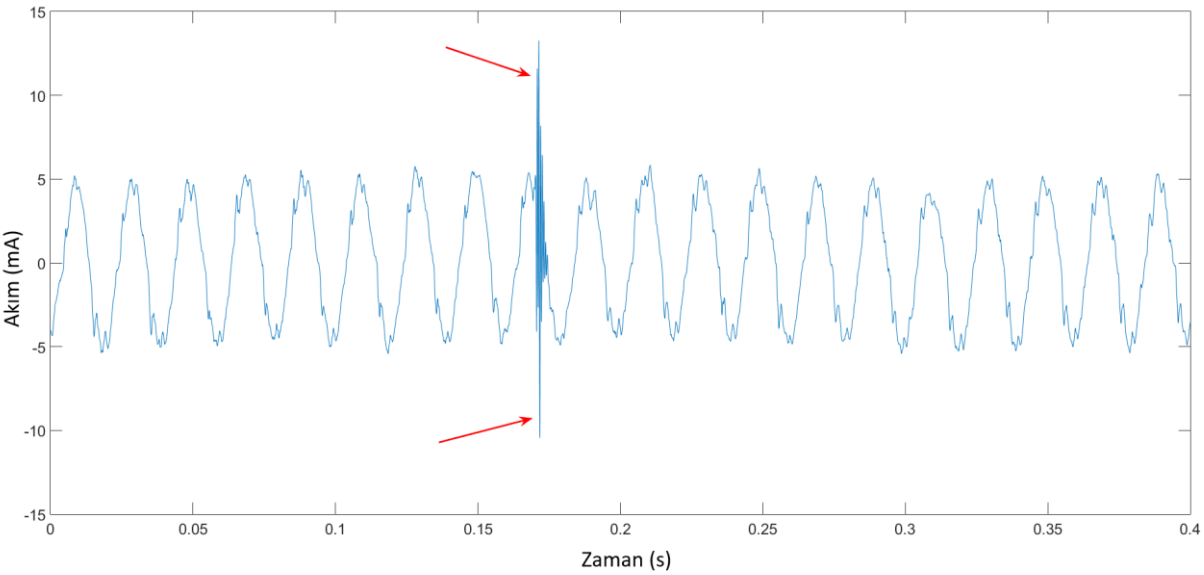
a

Şekil 4.5.5: Bakır Katkılı Mineral Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



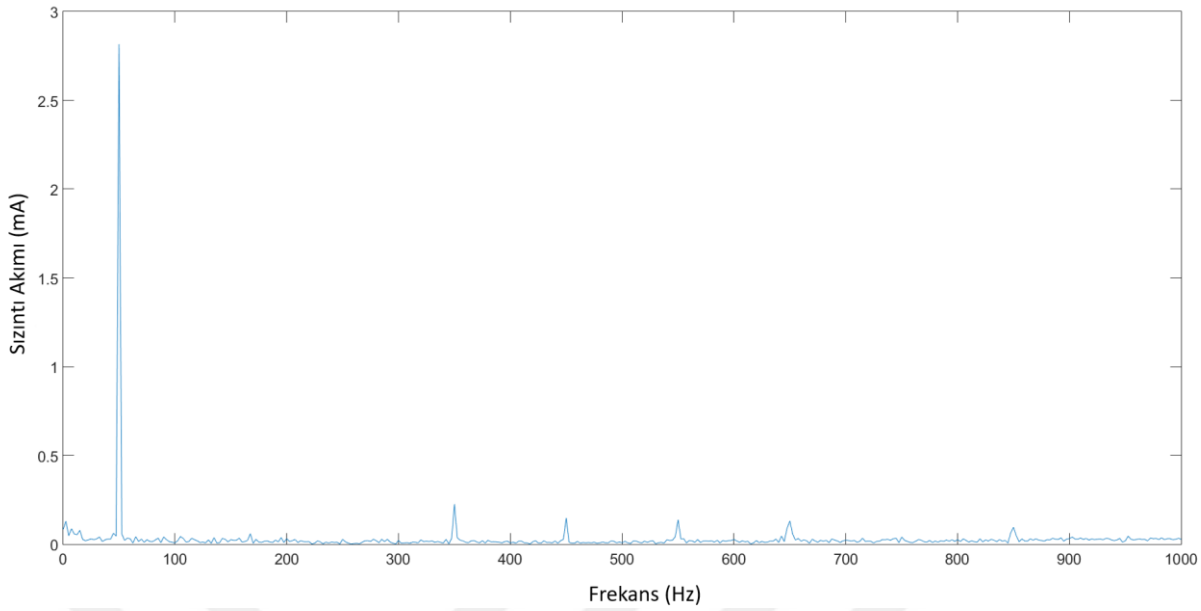
b

Şekil 4.5.5 (devam): Bakır Katkılı Mineral Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



a

Şekil 4.5.6: Bakır Katkılı Mineral Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



b

Şekil 4.5.6 (devam): Bakır Katkılı Mineral Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

1 mm elektrot açıklığında metal parçacık içermeyen mineral yağın disk elektrot düzenindeki delinme gerilimi 4.83 kV iken VDE elektrot düzeninde 18.48 kV olarak ölçülmüştür. Bakır partiküller eklendikten sonra disk elektrotta 3.6 kV, VDE elektrotta ise 4.65 kV olarak ölçülmüştür. Bu durumda yağa, demir metal oksitler eklendikten sonra disk elektrot düzeninde delinme gerilimi 4.97 kV, VDE elektrot düzeninde ise 6.77 kV olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere en küçük elektrot açıklığında sadece bakır metal parçacıklar varken delinme gerilimi değerleri düşüş göstermiştir. Özellikle VDE elektrot düzeninde bu düşüş miktarı çok daha yüksek bir değer olarak ölçülmüştür. Ancak demir tozu eklendikten sonra disk elektrot düzeninde delinme gerilimi katkısız durumdakiyle neredeyse benzer olmasına rağmen, VDE elektrot düzeninde bakır tozlu durumdan yüksek, katkısız durumdan düşük ölçülmüştür. Demir tozları eklendikten sonra mineral yağ tıpkı trafo içerisindeki doğal koşulunda olduğu bir ortamda olduğundan polarize olarak delinme dayanımını arttıracak yönde davranış göstermektedir. Tablo 4.5.1'de 1 mm elektrot açıklığında her iki elektrot düzeninde mineral yağın harmonik değerleri verilmiştir. İlgili tabloda Denklem 4.5.4'teki formülle hesaplanan toplam harmonik bozulma (Total Harmonic Distortion-THD) değerleri de verilmiştir.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{20} I_{rms}^2}}{I_{1-rms}} \tag{4.5.4}$$

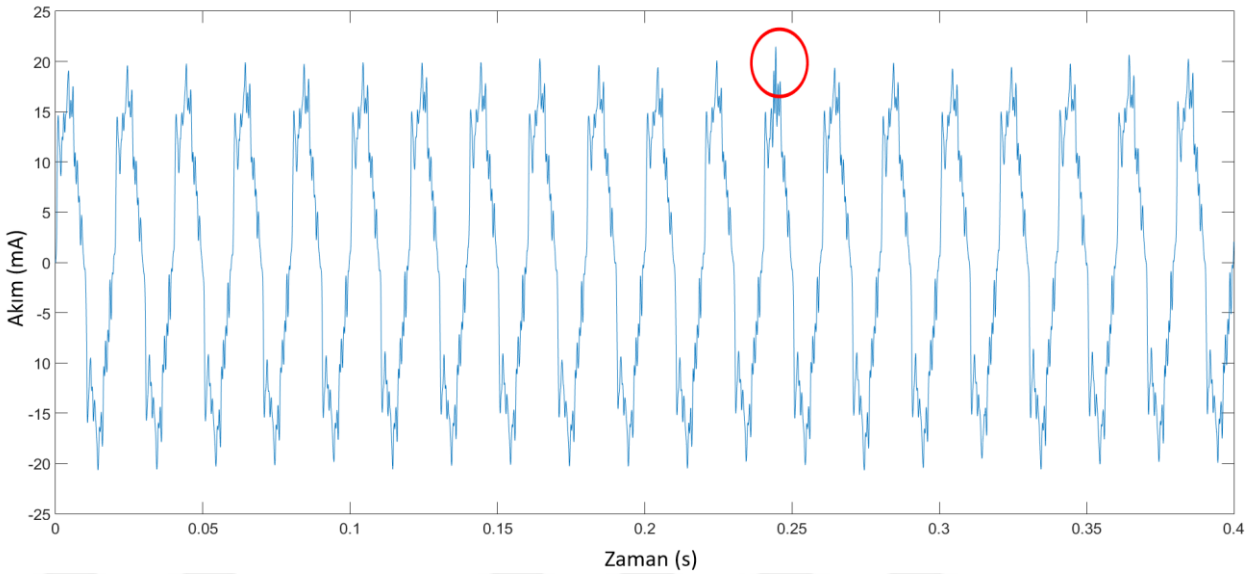
Tablo 4.5.1: Mineral Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm)

	Harmonik Akım Değerleri [mA]					
	DİSK ELEKTROT DÜZENİ			**VDE ELEKTROT DÜZENİ**		
Frekans [Hz]	**Katkısız Mineral Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**	**Katkısız Mineral Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**
0	0.11	0.25	0.18	0.11	0.14	0.13
50	2.72	2.24	3.26	33.56	3.04	2.82
100	0.04	0.04	0.05	1.00	0.09	0.03
150	0.03	0.03	0.04	0.16	0.08	0.03
200	0.03	0.03	0.02	0.08	0.07	0.04
250	0.12	0.03	0.02	0.51	0.06	0.03
300	0.02	0.02	0.02	0.13	0.05	0.02
350	0.23	0.18	0.24	1.92	0.26	0.23
400	0.01	0.02	0.02	0.16	0.06	0.02
450	0.15	0.13	0.17	1.97	0.14	0.15
500	0.02	0.01	0.02	0.05	0.05	0.02
550	0.20	0.11	0.11	1.46	0.13	0.14
600	0.03	0.02	0.02	0.35	0.07	0.03
650	0.15	0.11	0.15	1.35	0.10	0.13
700	0.02	0.01	0.02	0.18	0.05	0.02

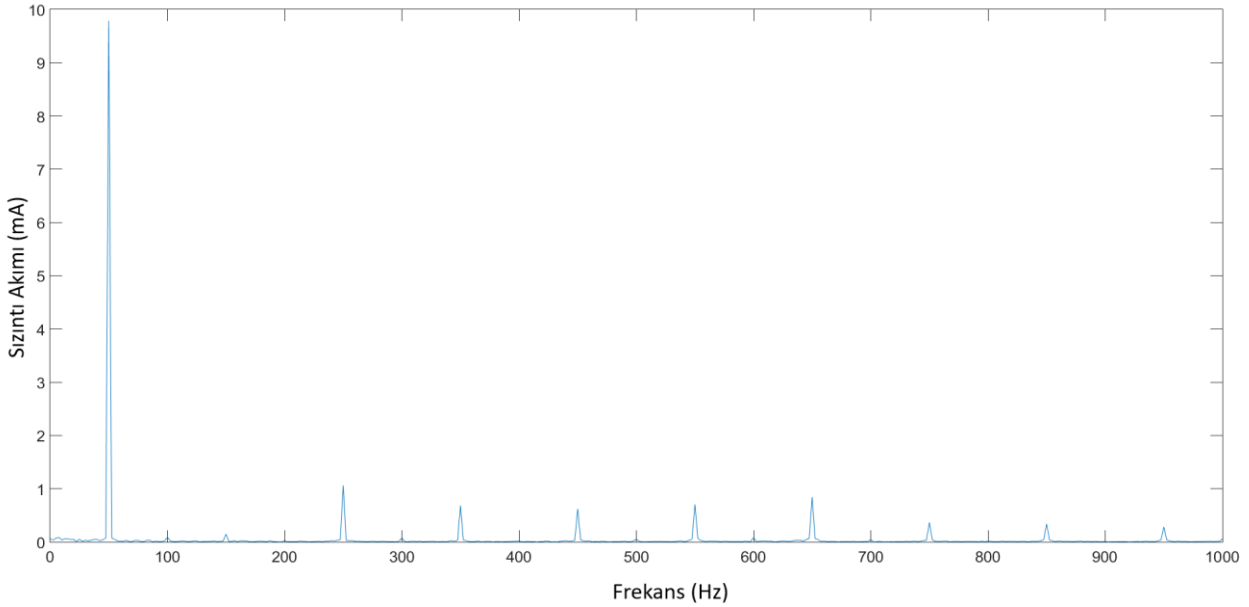
Tablo 4.5.1 (devam): Mineral Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm)

	Harmonik Akım Değerleri [mA]					
	DİSK ELEKTROT DÜZENİ			**VDE ELEKTROT DÜZENİ**		
Frekans [Hz]	**Katkısız Mineral Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**	**Katkısız Mineral Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**
750	0.09	0.08	0.09	1.29	0.09	0.04
800	0.02	0.01	0.02	0.21	0.05	0.03
850	0.17	0.15	0.16	2.33	0.16	0.10
900	0.01	0.02	0.01	0.13	0.04	0.04
950	0.09	0.06	0.11	1.03	0.09	0.05
1000	0.02	0.01	0.02	0.18	0.04	0.03
THD	16.723	14.975	12.673	13.743	14.7	12.852

Tablo 4.5.1'de görüleceği üzere disk elektrot düzeninde herhangi bir metal parçacık içermeyen mineral yağda 7. ve 11. harmonik değerleri baskınken bakır tozu etkisiyle 17. harmonik değerinin de baskın olmaya başladığı görülmüştür. Bakır tozlu bu yağa demir tozunun eklenmesi sonucunda ise 9. harmoniğin etkisinin arttığı gözükmektedir. VDE elektrot düzeninde metal parçacık içermeyen durumda 7., 9. ve 17. harmonik değerleri diğerlerine göre baskındır. Bu elektrot düzeninde bakır partiküllerin eklenmesiyle baskın harmonik değerlerinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Demir tozu etkisiyle sadece 17. harmonik değerinin baskınlığı ortadan kalkmıştır. Her iki elektrot düzeninde demir tozu eklenmesiyle THD değeri azalmıştır. Sadece VDE elektrot düzeninde bakır katkısı, THD değerini arttırıcı yönde etki göstermiştir. Doğal ester yağda 1 mm elektrot açıklığında nano partikül içermeyen sıvıya ait 20 periyotluk örnek akım sinyali ve harmonik grafiği sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.7 ve 4.5.8'de verilmiştir.

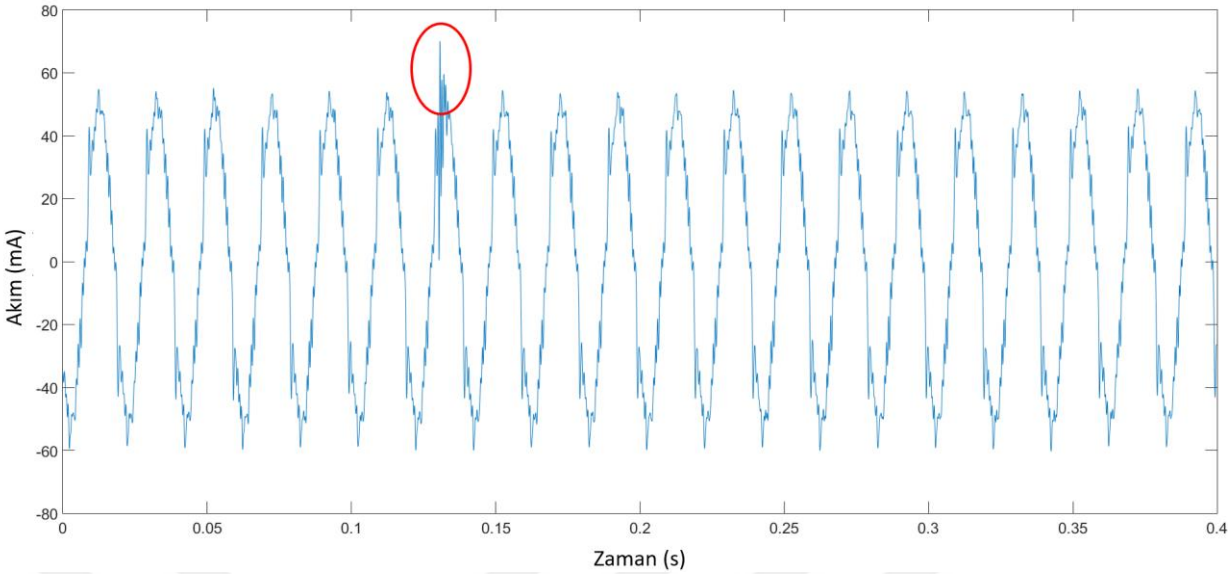


a

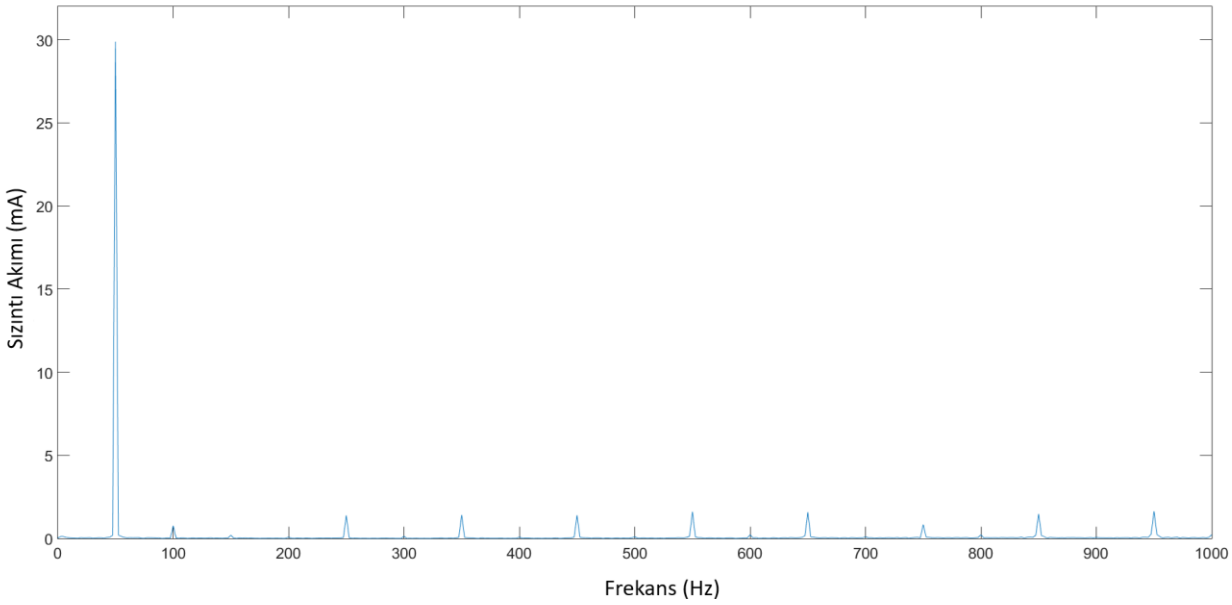


b

Şekil 4.5.7: Doğal Ester Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



a

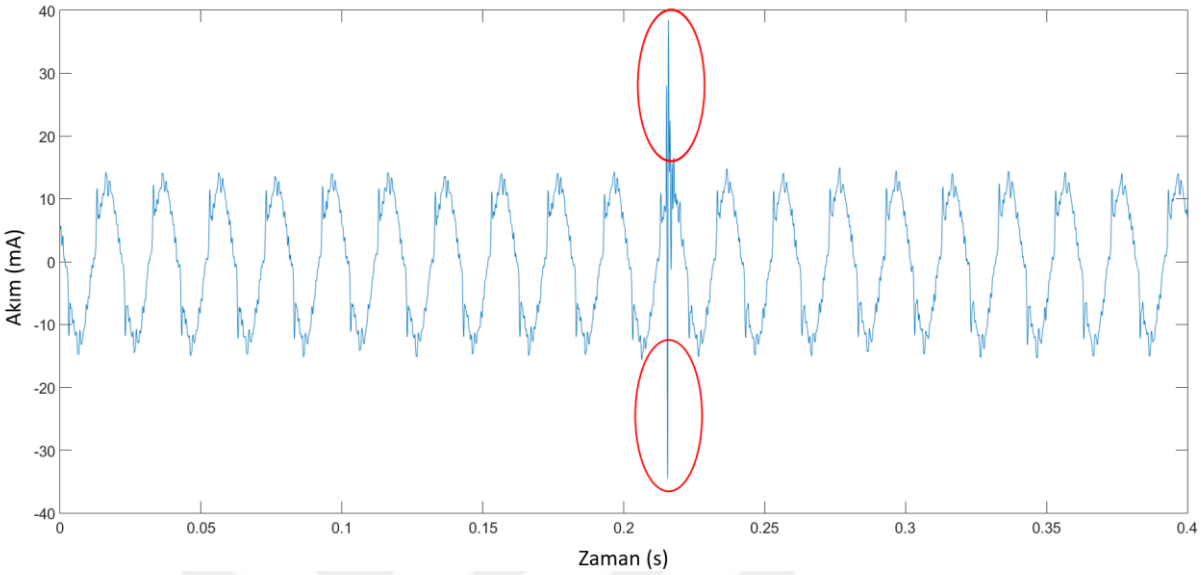


b

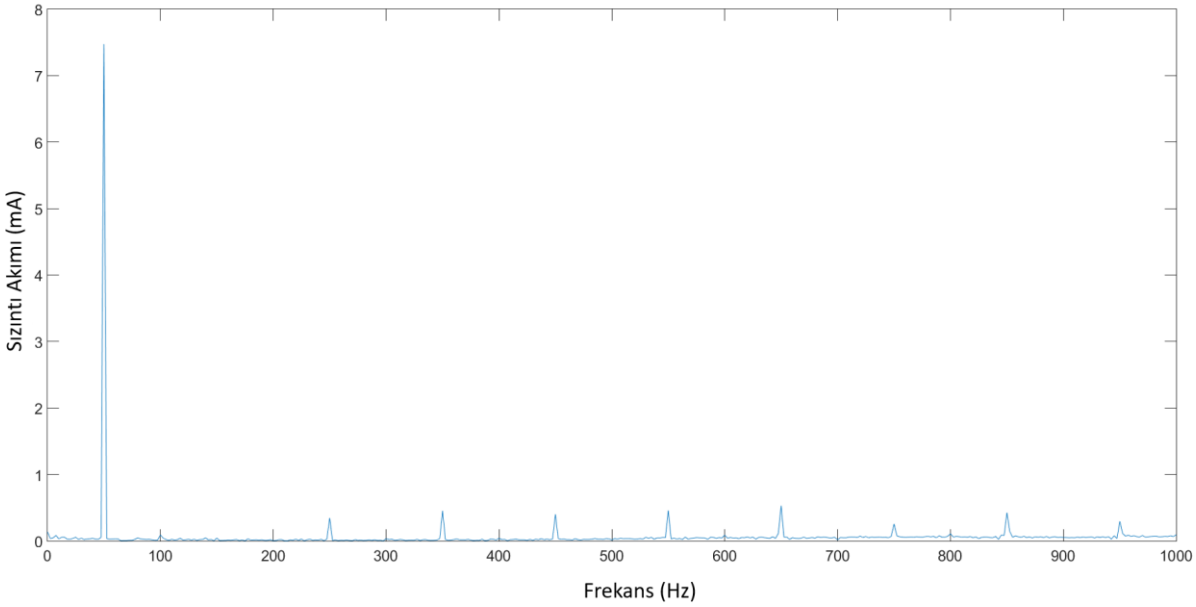
Şekil 4.5.8: Doğal Ester Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

Saf doğal ester yağda disk elektrot düzeninde mineral yağa göre daha az pik noktası görülmüştür. VDE elektrot düzeninde ise benzer bir davranış söz konusudur. Ayrıca saf doğal ester yağın disk elektrot düzeninde harmonikleri daha belirgin bir şekilde görülmektedir. İki elektrot düzeni arasındaki bu fark mineral yağda da benzer şekilde gözlenmektedir. Disk elektrodun geometrik yapısından dolayı harmonik akım grafiğinde harmoniklerin görüldüğü frekanslarda daha belirgin şekilde görülmektedir. Doğal ester yağda 1 mm elektrot açıklığında

bakır nano partikül eklenmesi durumunda 20 periyotluk örnek akım sinyali ve harmonik grafiği sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.9 ve 4.5.10'da verilmiştir.

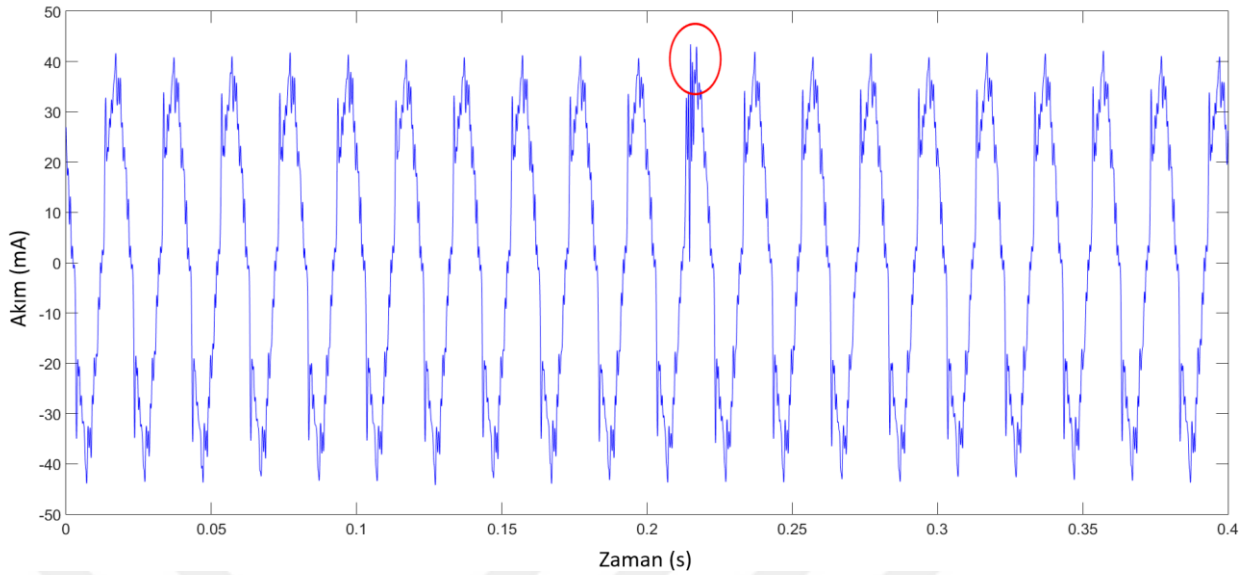


a

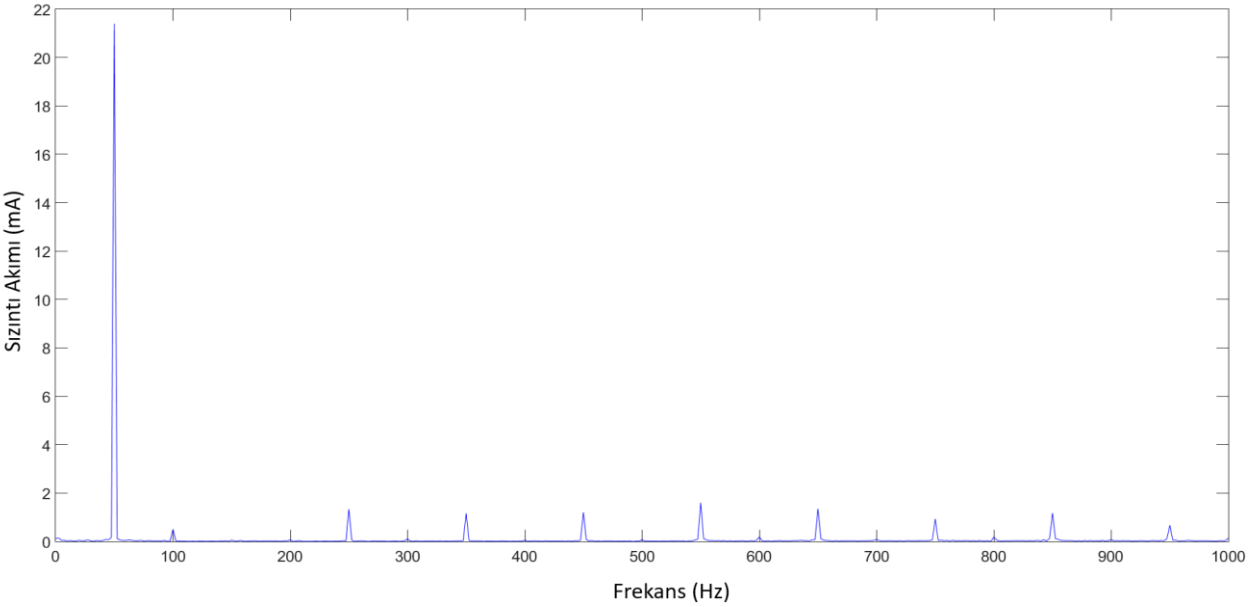


b

Şekil 4.5.9: Bakır Katkılı Doğal Ester Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



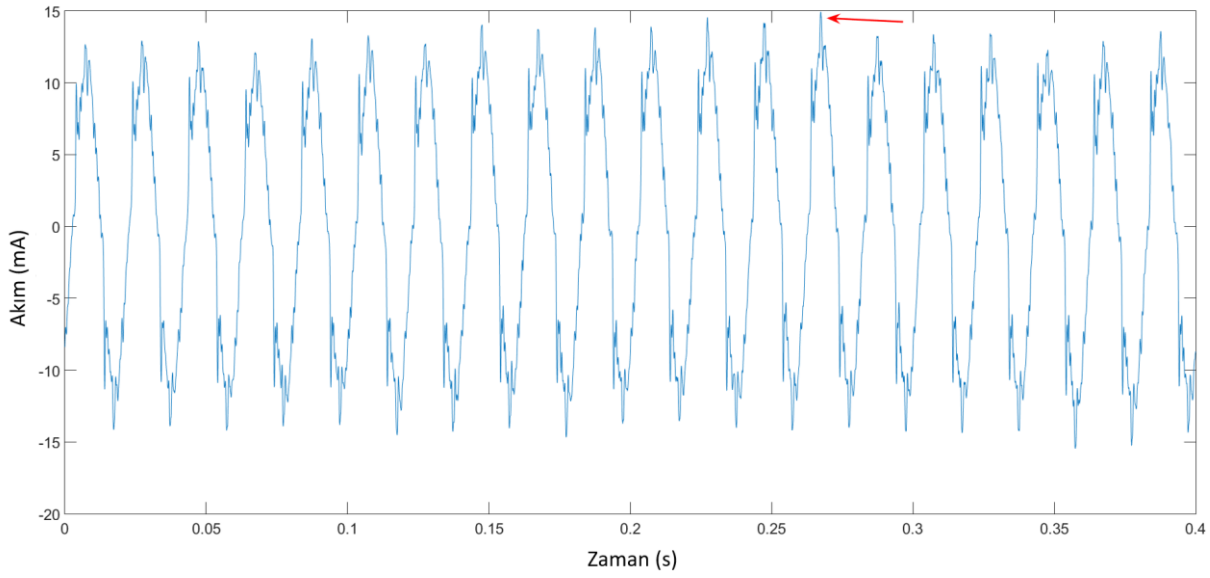
a



b

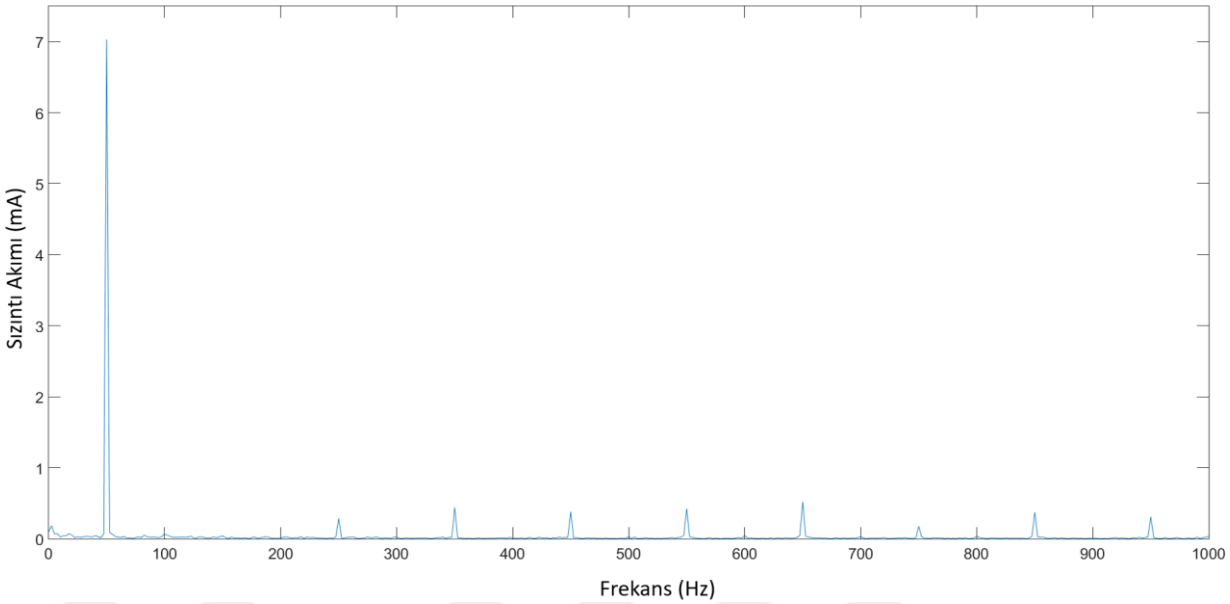
Şekil 4.5.10: Bakır Katkılı Doğal Ester Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

Disk elektrot düzeninde doğal ester yağa bakır nano partikül eklenmesi durumunda çok yüksek bir pik görülmüştür. VDE elektrot düzeninde ise bakır parçacıklar sinyali çok fazla etkilememiştir. Mineral yağda bakır tozlar eklendikten sonra VDE elektrot düzeninde çok keskin bir pik gözlenmişti. Ancak doğal ester yağın farklı yapıda olmasından dolayı böyle bir pik disk elektrot düzeninde görülmüştür. Ayrıca bakır tozu eklenmesiyle harmonik grafiğinde VDE elektrot düzeninde daha yüksek harmonikler görülmektedir. Saf yağda bu durum disk elektrot düzeninde ölçülmüştü. Doğal ester yağın nispeten daha yapışkan yapısından dolayı VDE elektrotların kavisli küresel kısmında iyi tutunduğu söylenebilir. Bu durumda eklenen bakır tozları buralarda harmonik akımların daha görünür hale gelmesine neden olmuştur. Doğal ester yağda 1 mm elektrot açıklığında bakır nano partikül içeren sıvıya demir partiküllerin eklenmesi sonucunda 20 periyotluk örnek akım sinyali ve harmonik grafiği sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.11 ve 4.5.12'de verilmiştir.



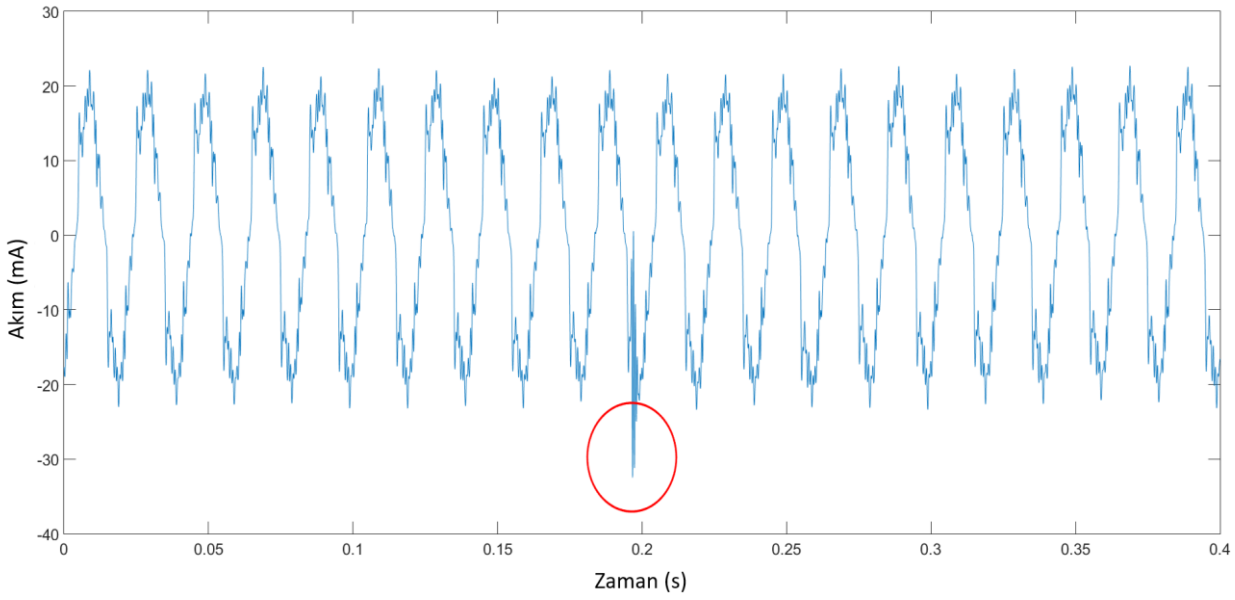
a

Şekil 4.5.11: Bakır Katkılı Doğal Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



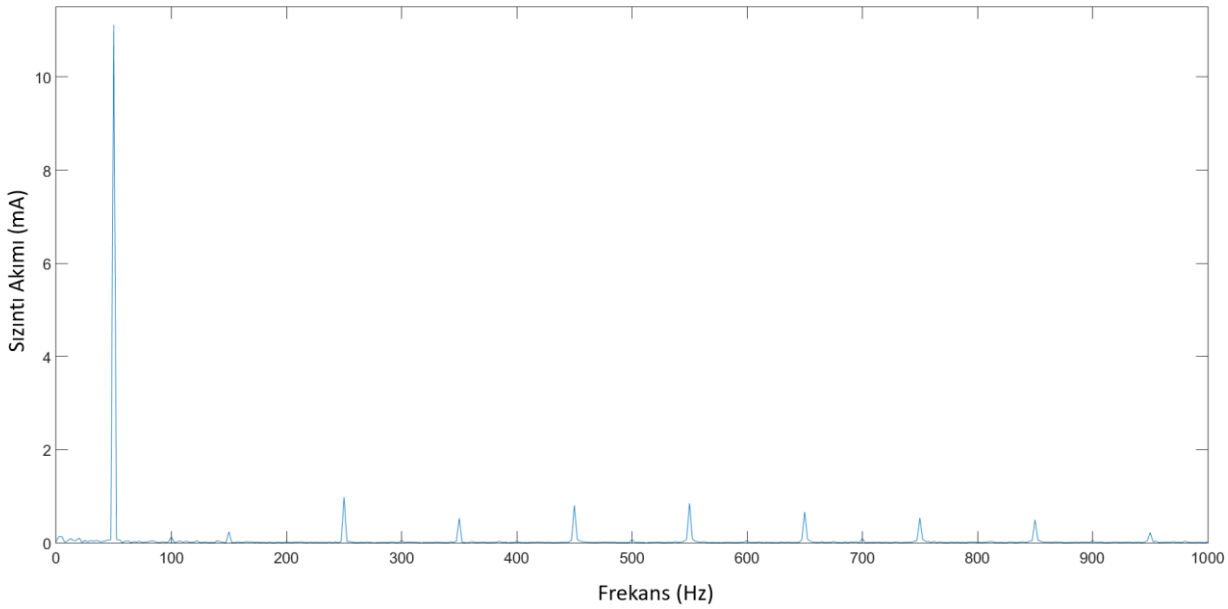
b

Şekil 4.5.11 (devam): Bakır Katkılı Doğal Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



a

Şekil 4.5.12: Bakır Katkılı Doğal Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



b

Şekil 4.5.12 (devam): Bakır Katkılı Doğal Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

Doğal ester yağda disk elektrot düzeninde bakır partikül etkisiyle oluşan bozucu pik, demir tozunun eklenmesiyle görülmemiştir. Ferromanyetik bir malzeme olan demirin elektrik alanda değil de manyetik alanda daha fazla etkili olmasından dolayı yüksek elektrik alan stresi altında bu sıvı dielektrikte disk elektrotun sivri köşe etkisi hem demirin hem de yağın kendisi yapısal özelliklerinden dolayı daha az gözükmektedir. VDE elektrot düzeninde ise negatif alternansta bozucu pikler görülmektedir. VDE elektrot düzeninde görülen bu durum doğal ester yağın nispeten daha yapışkan etkisinin bu elektrotta daha etkili görülmesinden kaynaklanmaktadır. Saf doğal ester yağın disk ve VDE elektrot düzenlerinde 1 mm elektrot açıklığında sırasıyla 7.68 kV ve 18.96 kV gerilim seviyelerinde delindiği ölçülmüştür. Bakır tozu eklenmesiyle disk elektrotta 6.04 kV ve VDE elektrotta 14.29 kV delinme gerilimleri ölçülmüştür. VDE elektrot düzeninde her ne kadar metal parçacık doğal ester yağın akım sinyalinde yüksek piklere neden olsa bile, delinme gerilimi değeri mineral yağa göre daha az bir düşüş göstermiştir. Bakır tozu her iki yağ için her iki elektrot düzeninde de delinme gerilimini düşürmüştür. Demir tozunun eklenmesiyle birlikte doğal ester yağın delinme gerilimi disk elektrot düzeninde 5.18 kV, VDE elektrot düzeninde ise 12.57 kV olarak ölçülmüştür. Mineral yağda demir tozlu delinme gerilimleri bakır tozlu durumdan daha yüksek olarak ölçülmüştü. Doğal ester yağın nispeten daha yapışkan fiziksel özelliğinden dolayı her yeni metal parçacık eklenmesi delinme gerilimini

düşürücü yönde etki etmiştir. Tablo 4.5.2'de 1 mm elektrot açıklığında her iki elektrot düzeninde doğal ester yağın harmonik değerleri verilmiştir.

Tablo 4.5.2: Doğal Ester Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm)

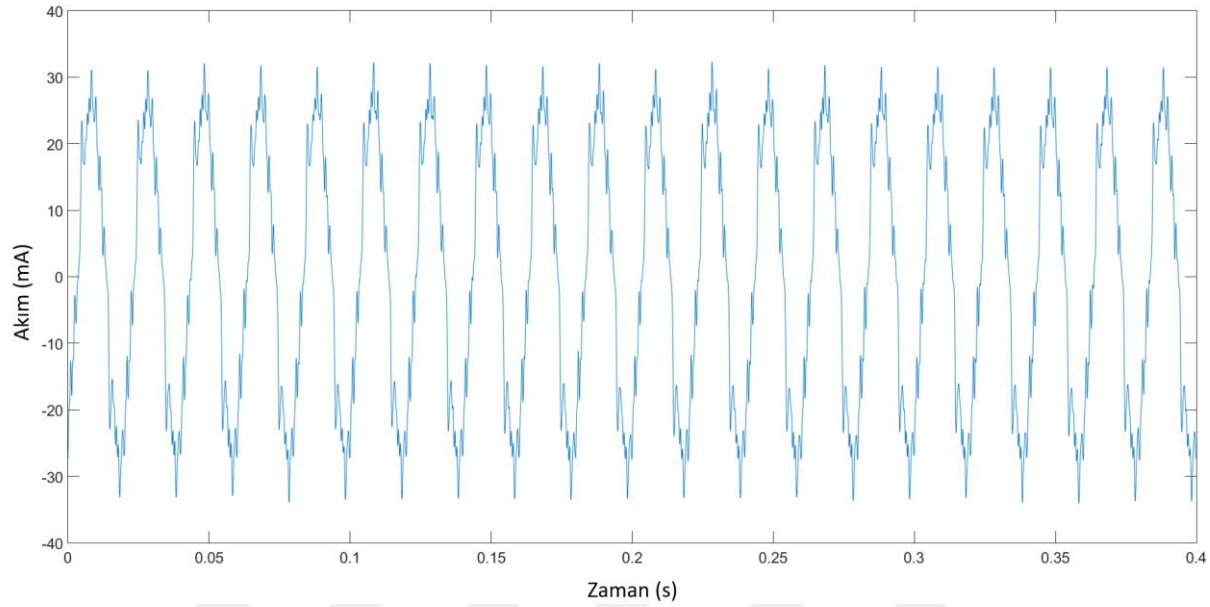
	Harmonik Akım Değerleri [mA]					
	DİSK ELEKTROT DÜZENİ			**VDE ELEKTROT DÜZENİ**		
Frekans [Hz]	**Katkısız Doğal Ester Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**	**Katkısız Doğal Ester Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**
0	0.09	0.13	0.18	0.12	0.11	0.14
50	9.78	7.47	7.03	29.88	14.68	11.12
100	0.09	0.09	0.07	0.76	0.27	0.13
150	0.15	0.04	0.04	0.19	0.06	0.24
200	0.03	0.02	0.02	0.08	0.04	0.03
250	1.06	0.34	0.29	1.38	1.09	0.98
300	0.08	0.03	0.02	0.14	0.08	0.06
350	0.68	0.45	0.44	1.41	0.64	0.53
400	0.02	0.04	0.02	0.09	0.05	0.03
450	0.62	0.40	0.38	1.40	0.74	0.81
500	0.06	0.04	0.03	0.10	0.06	0.07
550	0.70	0.46	0.42	1.60	1.01	0.85
600	0.08	0.09	0.05	0.22	0.13	0.05
650	0.84	0.53	0.52	1.58	0.93	0.66

Tablo 4.5.2 (devam): Doğal Ester Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm)

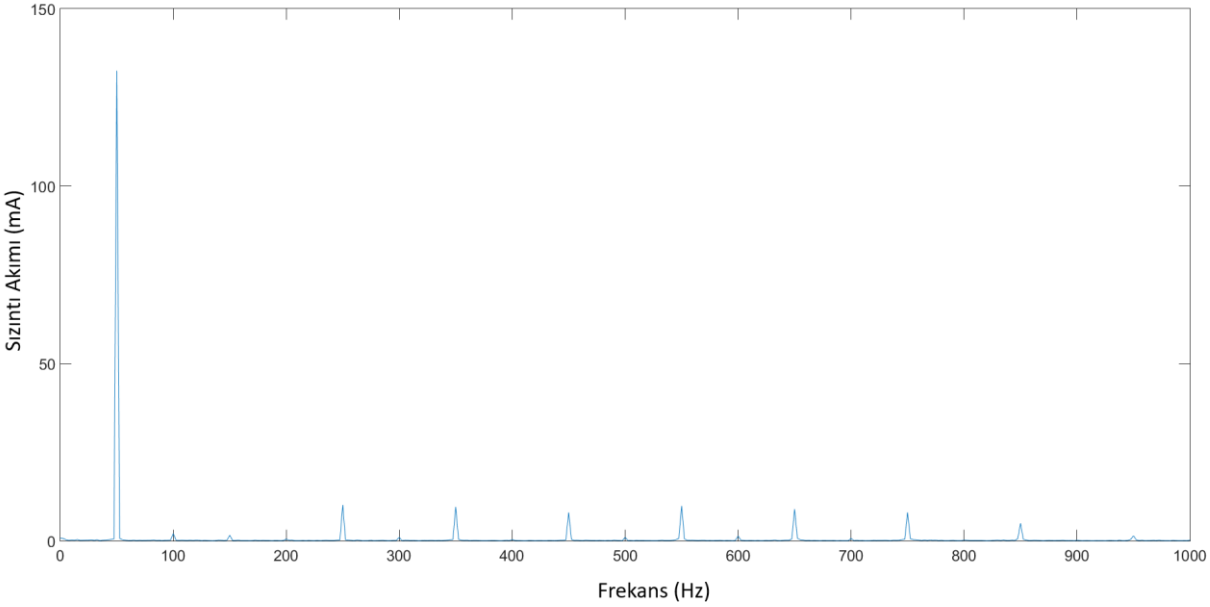
	Harmonik Akım Değerleri [mA]					
	DİSK ELEKTROT DÜZENİ			**VDE ELEKTROT DÜZENİ**		
Frekans [Hz]	**Katkısız Doğal Ester Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**	**Katkısız Doğal Ester Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**
700	0.05	0.05	0.03	0.11	0.05	0.10
750	0.36	0.26	0.18	0.84	0.61	0.53
800	0.02	0.11	0.04	0.22	0.07	0.02
850	0.34	0.43	0.37	1.47	0.80	0.50
900	0.01	0.06	0.01	0.07	0.03	0.04
950	0.28	0.29	0.31	1.63	0.39	0.22
1000	0.06	0.09	0.04	0.22	0.05	0.02
THD	19.28	15.59	15.3	13.9	15.7	17.36

Saf doğal ester yağda disk elektrot düzeninde 5. ve 13. harmonikler baskınken, VDE elektrot düzeninde ise 11. ve 19. harmonikler baskın görülmektedir. Bakır metal partiküllerin eklenmesi durumunda disk elektrot düzeninde 11. ve 13. harmonikler baskın hale gelirken, VDE elektrot düzeninde ise 5. ve 11. harmonikler etkindir. Bakır tozlu yağa demir tozu eklenmesiyle birlikte disk elektrot düzeninde 7. ve 13. harmonikler daha yüksek değerlere ulaşmışken, VDE elektrot düzeninde ise 5. ve 11. harmonik değerlerinin baskın olduğu gözükmektedir. Bakır nano partiküller disk elektrot düzeninde 5. harmoniğin etkisini zayıflatarak 11. harmoniğin baskın hale gelmesine, VDE elektrot düzeninde ise 19. harmoniğin etkisini zayıflatarak 13. harmoniğin baskın olmasına neden olmuştur. Demir tozu eklenmesi ilk defa 7. harmoniği disk elektrot düzeninde baskın hale getirmiştir. Doğal ester yağın VDE elektrot yüzeyine daha iyi

yapışmasından dolayı her eklenen nano parçacık etkisiyle THD değeri artmıştır. Sentetik ester yağda 1 mm elektrot açıklığında nano partikül içermeyen sıvıya ait 20 periyotluk örnek akım sinyali ve harmonik grafiği sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.13 ve 4.5.14'de verilmiştir.

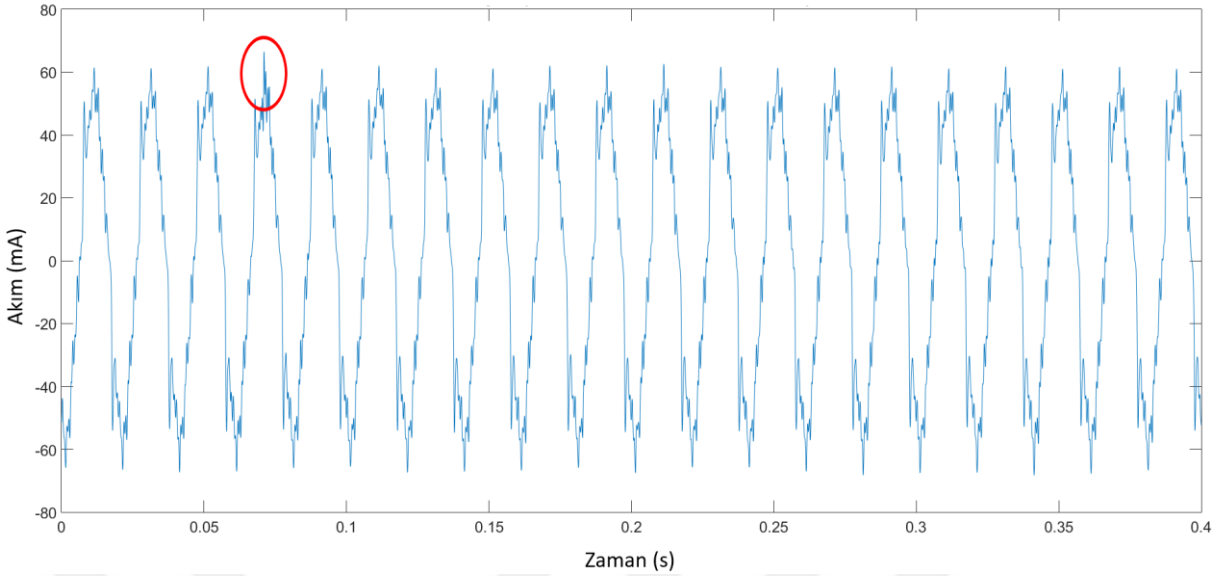


a

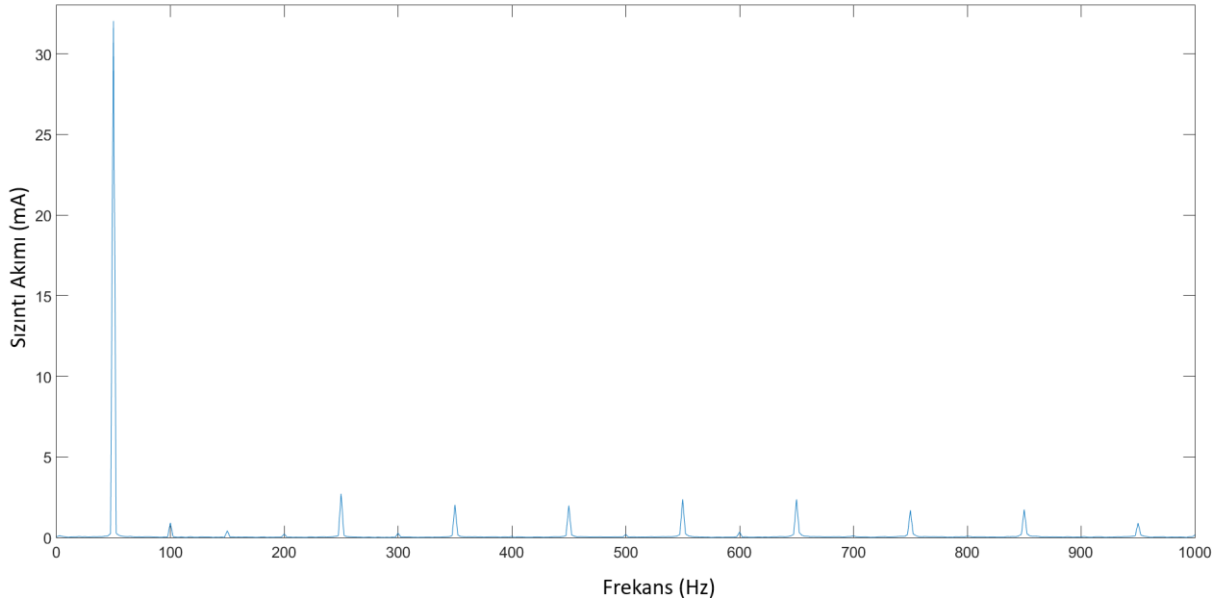


b

Şekil 4.5.13: Sentetik Ester Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



a

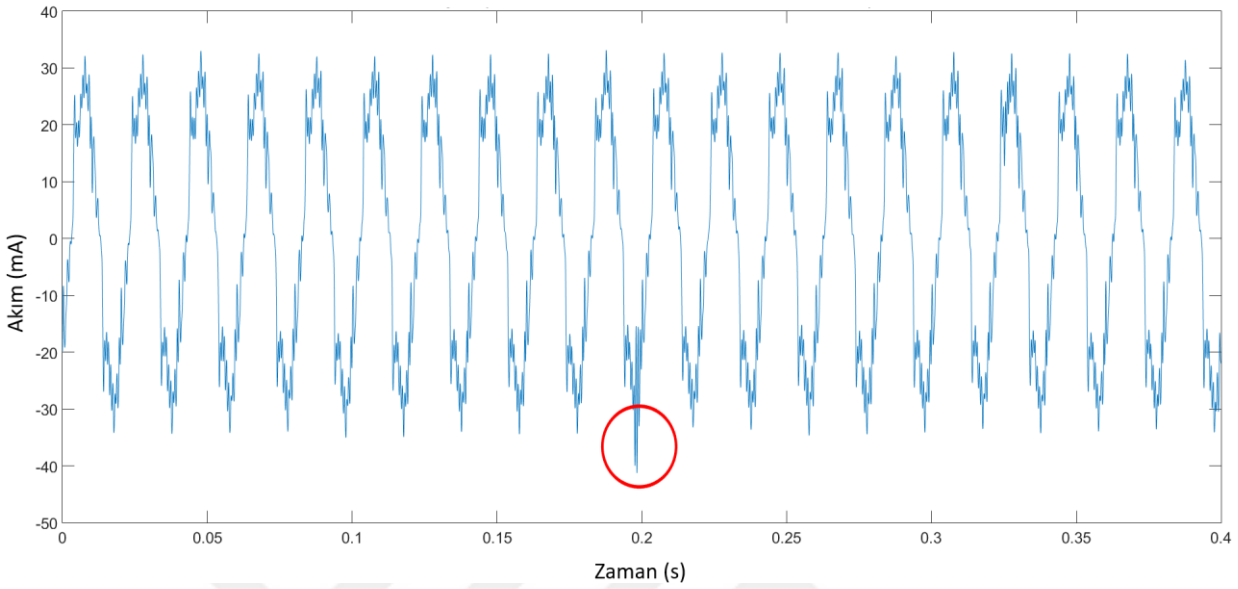


b

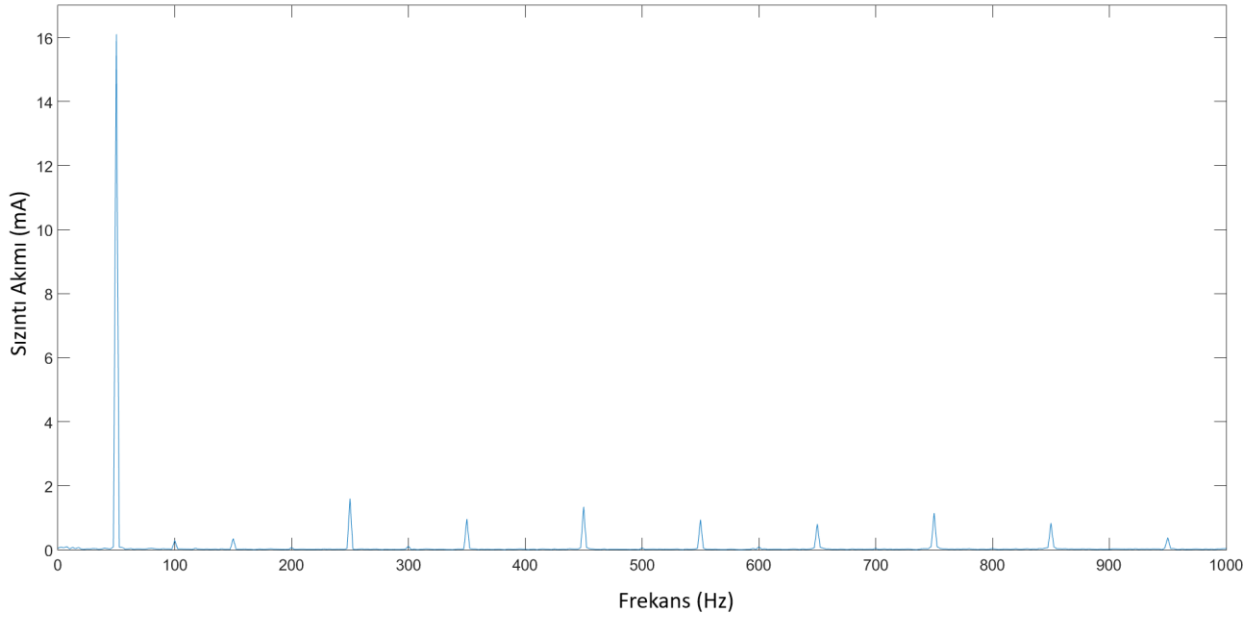
Şekil 4.5.14: Sentetik Ester Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri (a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

Saf sentetik ester yağın disk elektrot düzeninde ölçülen akım sinyalinde herhangi bir pik nokta bulunmamaktadır. Sadece VDE elektrot düzeninde saf mineral yağda ve doğal ester yağda görülenden daha düşük bir pik nokta bulunmaktadır. Ayrıca VDE elektrot düzeninde saf sentetik ester yağın harmonikleri saf durumdaki mineral yağ ve doğal ester yağın aynı elektrot düzenindeki harmoniklerinden daha görünür olduğu yapılan ölçümler ile açıkça gözükmektedir. Sentetik ester yağda 1 mm elektrot açıklığında bakır nano partikül eklenmesi

durumunda 20 periyotluk örnek akım sinyali ve harmonik grafiği sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.15 ve 4.5.16'da verilmiştir.

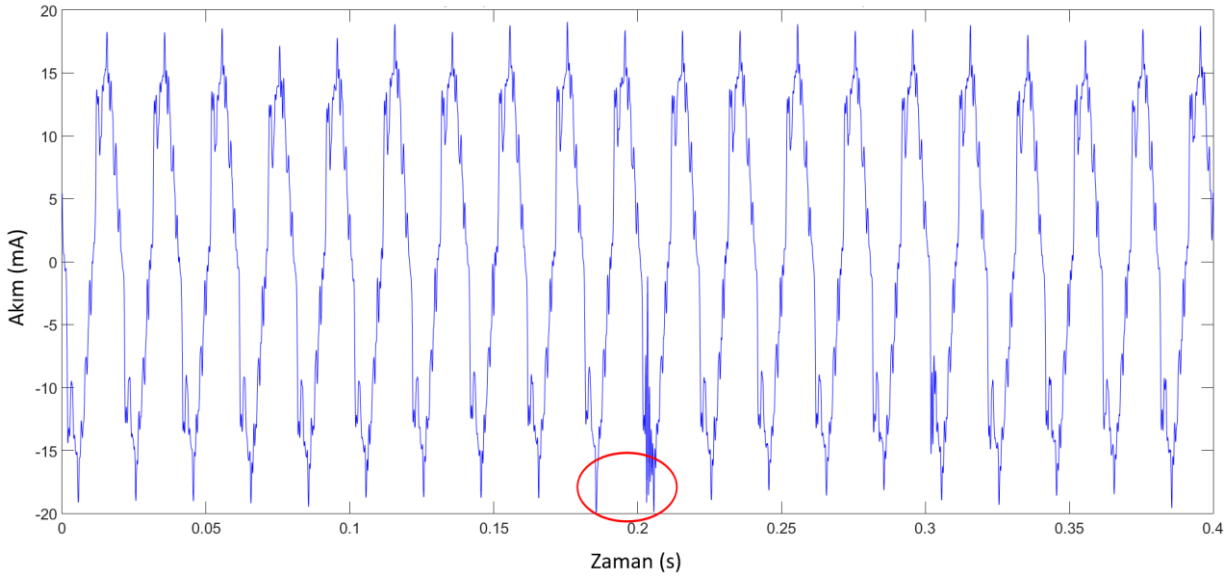


a

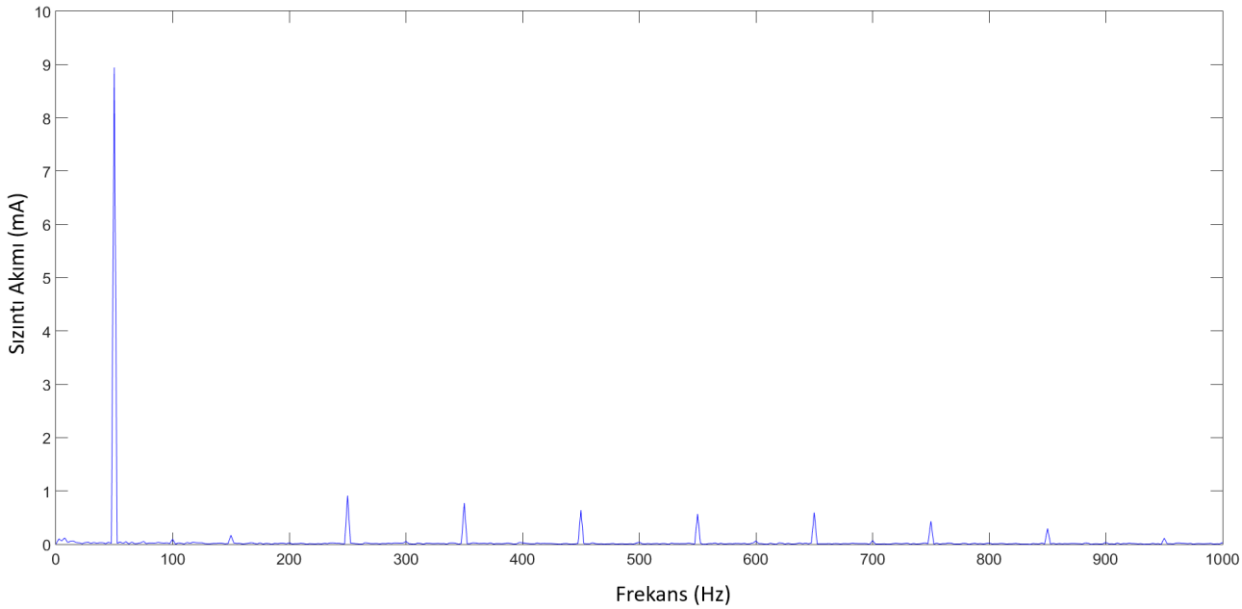


b

Şekil 4.5.15: Bakır Katkılı Sentetik Ester Yağın Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



a

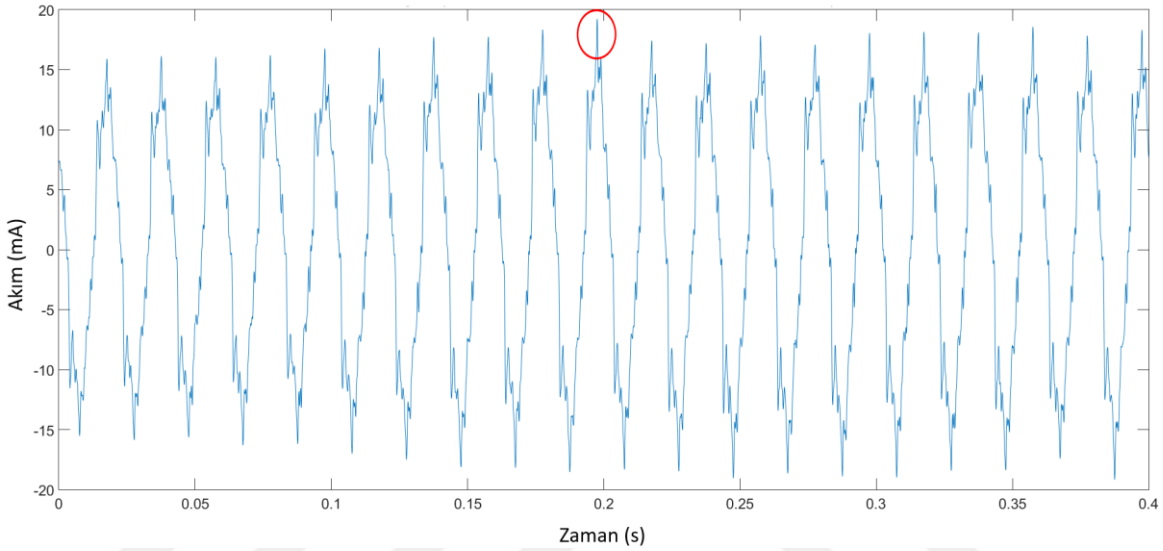


b

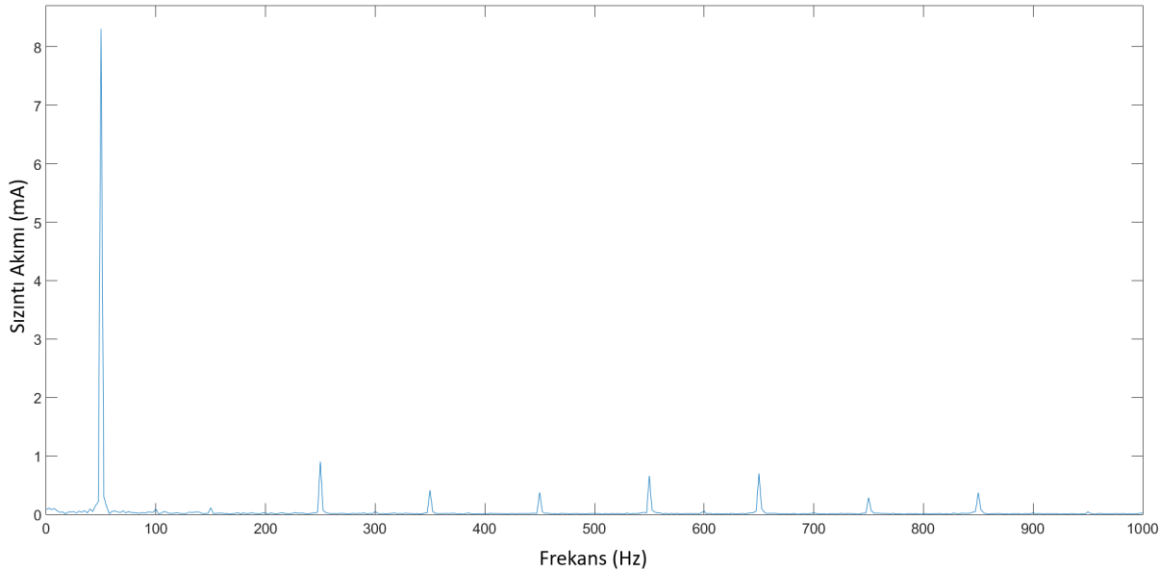
Şekil 4.5.16: Bakır Katkılı Sentetik Ester Yağın VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

Bakır nano partikül eklenmesi sentetik ester yağın akım dalga formunda negatif polaritede pikler meydana getirmiştir. Bu durum katkısız halden katkılı hale geçişte iyonizasyon mekanizmasının hızlandığı anlamına gelmektedir. Elektronlar bakır parçacıkların elektrik alanda yönlenmesinin etkisiyle çarpma suretiyle iyonizasyonu katkısız halden daha fazla gerçekleştirmiştir. Ayrıca bakır parçacıklar disk elektrot düzenindeki harmoniklerin daha

görünür hale gelmesine neden olmuştur. Özellikle mineral yağın bakır nano parçacık katkılandığı durumla karşılaştırıldığında, sentetik ester yağın sızıntı akımının oluşmasında daha fazla harmonik bileşenin katkısının olduğu görülmektedir. Sentetik ester yağda 1 mm elektrot açıklığında bakır nano partikül içeren sıvıya demir nano partiküllerin eklenmesi sonucunda 20 periyotluk örnek akım sinyali ve harmonik grafiği sırasıyla disk ve VDE elektrot düzeninde Şekil 4.5.17 ve 4.5.18'de verilmiştir.

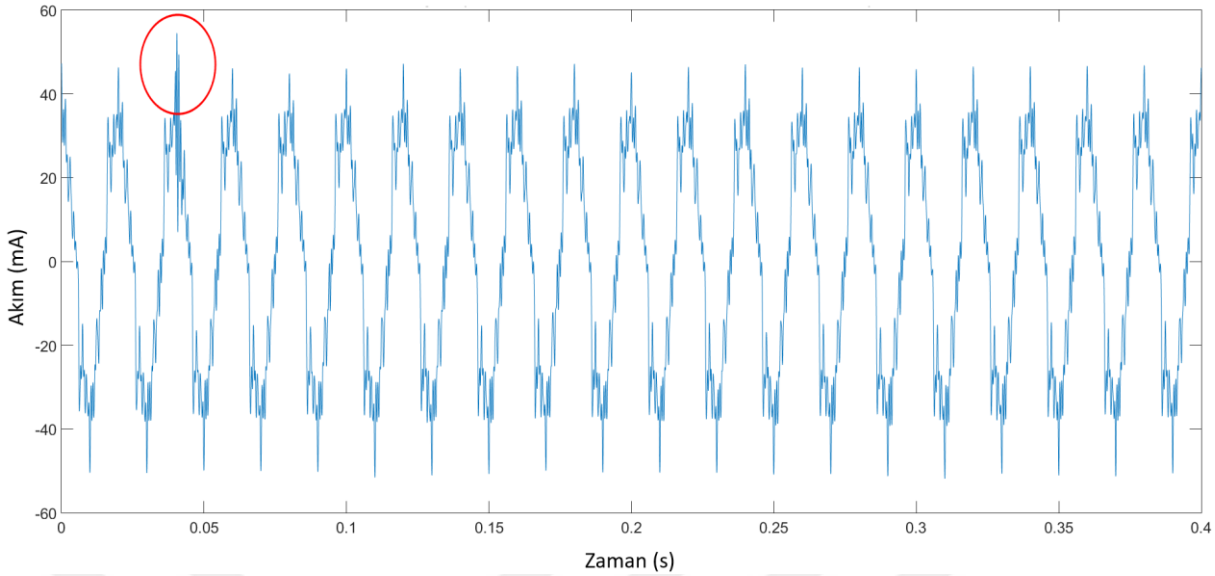


a

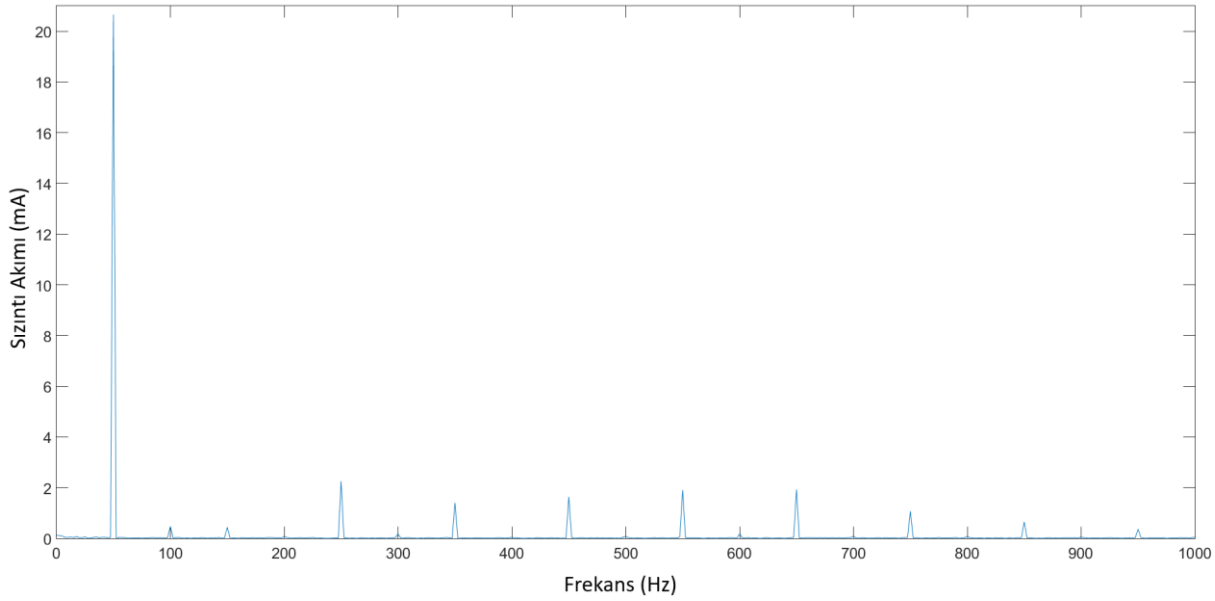


b

Şekil 4.5.17: Bakır Katkılı Sentetik Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle Disk Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)



a



b

Şekil 4.5.18: Bakır Katkılı Sentetik Ester Yağa Demir Tozu Eklenmesiyle VDE Elektrot Düzenindeki Akım ve Harmonik Sinyalleri
(a: 20 periyotluk sinyal, b: Harmonikler)

Saf durumdaki sentetik ester yağın 1 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi disk elektrot düzeninde 14.5 kV, VDE elektrot düzeninde ise 23.04 kV olarak ölçülmüştür. Bu yağa sadece bakır nano partikül eklenmesiyle delinme gerilimi disk elektrot düzeninde 10.66 kV, VDE elektrot düzeninde ise 12.35 kV değerlerine düşmektedir. Bakır nano partikül içeren sentetik ester yağa demir parçacıkların eklenmesiyle delinme gerilimi disk elektrot düzeninde 7.44 kV,

VDE elektrot düzeninde ise 19.33 kV olarak ölçülmüştür. Buna göre sentetik ester yağda da bakır tozu eklenmesiyle delinme gerilimlerinin diğer yağlarda ölçüldüğü gibi düştüğü gözlenmiştir. Demir tozunun eklenmesiyle sadece bakır tozlu duruma göre disk elektrot düzeninde doğal ester yağda olduğu gibi azalan bir delinme gerilimi görülmektedir. Ancak VDE elektrot düzeninde mineral yağ gibi sadece bakır tozlu duruma göre demir tozlu durumda daha yüksek delinme gerilimi ölçülmüştür. Ayrıca her iki elektrot düzeninde demir tozu eklendikten sonra sentetik ester yağın akım dalga formunda pozitif alternansta pikler görülmüştür. Bu durum sadece bakır tozu ile yapılan sentetik ester yağ deneylerinden farklıdır. Ayrıca sentetik ester yağ ve doğal ester yağın sızıntı akımının oluşmasında daha fazla harmonik akımı bileşeninin katkı sağladığı görülmektedir. Tablo 4.5.3'de 1 mm elektrot açıklığında her iki elektrot düzeninde sentetik ester yağın harmonik değerleri verilmiştir.

Tablo 4.5.3: Sentetik Ester Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm)

	Harmonik Akım Değerleri [mA]					
	DİSK ELEKTROT DÜZENİ			**VDE ELEKTROT DÜZENİ**		
Frekans [Hz]	**Katkısız Sentetik Ester Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**	**Katkısız Sentetik Ester Yağ**	**Bakır Katkılı**	**Bakır+Demir Katkılı**
0	0.78	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13
50	132.52	16.10	8.31	32.03	8.94	20.65
100	2.05	0.29	0.09	0.91	0.10	0.47
150	1.55	0.35	0.11	0.41	0.17	0.44
200	0.46	0.07	0.03	0.21	0.03	0.08
250	10.12	1.60	0.90	2.71	0.91	2.25
300	0.98	0.11	0.05	0.27	0.06	0.17
350	9.56	0.96	0.41	2.02	0.77	1.40

Tablo 4.5.3 (devam): Sentetik Ester Yağ için Harmonik Akım Değerleri (d=1 mm)

	Harmonik Akım Değerleri [mA]					
	DİSK ELEKTROT DÜZENİ			VDE ELEKTROT DÜZENİ		
Frekans [Hz]	Katkısız Sentetik Ester Yağ	Bakır Katkılı	Bakır+Demir Katkılı	Katkısız Sentetik Ester Yağ	Bakır Katkılı	Bakır+Demir Katkılı
400	0.34	0.03	0.01	0.06	0.04	0.04
450	7.97	1.34	0.38	1.97	0.64	1.63
500	0.98	0.06	0.02	0.18	0.04	0.09
550	9.83	0.94	0.66	2.36	0.57	1.90
600	1.34	0.09	0.05	0.33	0.06	0.18
650	8.91	0.80	0.70	2.36	0.59	1.92
700	0.65	0.05	0.03	0.11	0.07	0.09
750	8.00	1.15	0.28	1.68	0.43	1.07
800	0.21	0.04	0.01	0.08	0.02	0.09
850	4.93	0.83	0.37	1.72	0.29	0.65
900	0.14	0.03	0.03	0.06	0.03	0.06
950	1.40	0.38	0.04	0.89	0.11	0.37
1000	0.17	0.04	0.02	0.15	0.03	0.05
THD	17.45	18.81	18.25	18.28	18.88	21.23

Tablo 4.5.3'ten açıkça görüleceği üzere sentetik ester yağda ölçülen sızıntı akımlarının oluşmasında her iki elektrot düzenindeki tüm durumlarda 5. harmonik bileşeninin baskın harmoniklerden biri olarak ölçüldüğü görülmektedir. Bu durumun benzeri mineral yağda 7. harmonik değeri için gözlenmiştir. Sentetik ester yağda disk elektrot düzeninde bakır katkısı 11. harmoniğin baskınlığını ortadan kaldırarak 9. harmoniği, VDE elektrot düzeninde ise 11. ve 13. harmoniğin baskınlığını ortadan kaldırarak 7. harmoniği baskın hale getirmiştir. Sentetik ester yağa demir tozu eklenmesi durumunda ise 13. harmonik baskın hale gelmiştir.

Mineral yağın tüm durumlarda akım bileşeninde 7. harmoniğin baskın olması bu harmonik değerine bakarak yağın karakteristiği hakkında bilgi edinilebileceğini göstermektedir. Sentetik ester yağda 5. harmoniğin tüm durumlarda baskın olması bu harmoniğin görüldüğünde dielektrik dayanımın daha yüksek ölçüleceği anlamına gelmektedir. Elde edilen deneysel veriler neticesinde en kötü dielektrik performansa sahip olan mineral yağda 5. harmonik değerinin hiçbir durumda baskın olmadığı görülmektedir. VDE elektrot düzeninde doğal ester yağ ve sentetik ester yağın saf durumdaki ölçümlerinde 5. harmonik baskın değildir. Bu elektrot düzenindeki saf iki yağın delinme gerilimlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu deneysel sonuçlarla ortaya konmuştur. Dolayısıyla 5. harmonik değeri sıvı dielektrik malzemenin yalıtım direnci hakkında bilgi vermektedir. Eğer tüm ölçümlerde bu değer diğer harmoniklere göre baskın çıkıyorsa yağın yalıtım karakteristiğinin daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

5. TARTIŞMA

Üç farklı sıvı dielektrik malzemenin aynı koşullarda deneysel olarak incelendiği bu tez çalışmasında, trafoların AC ve DC gerilim koşulunda çalışması durumunda sentetik ester yağın en yüksek delinme gerilimine sahip olduğu ölçülmüştür. En düşük dielektrik dayanıma sahip mineral yağın darbe gerilim testlerinde en iyi yalıtım performansına sahip olması trafolarda sıvı dielektrik seçiminin kombine bir değerlendirme sonucu yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca mineral yağ ve doğal ester yağın deney tekrarlarında stabilizasyon durumunun da sentetik ester yağa göre daha iyi çıkması literatürde daha önce ölçümü yapılmamış bir sonuç olarak öne çıkmıştır. Bu tez çalışmasında deneysel olarak test edilen 3 farklı sıvı dielektrik malzemenin aynı çalışmada 3 farklı standarda göre test edildiği başka bir çalışma olmaması literatüre kattığı değer açısından önem arz etmektedir [6,7]. Akım sinyallerinin ayrıştırıldığı EMD ve VMD sinyalleri literatürde genel olarak kalp ritmi sinyalleri gibi EEG, ECG sinyallerinin işlenmesinde kullanılmıştır [52,54,56]. Yüksek gerilim stresi altında elektriksel deşarjların incelendiği çalışma olmasına rağmen [58], bu tez çalışmasında olduğu gibi elektriksel tam delinmeden 500 ms önce çok küçük ve ihmal edilebilir düzeyde deşarjlar içeren akım sinyallerinin bu yöntemle işlendiği bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. IMF modlarından sıvı dielektrik malzemenin dayanıklılığını kestirmede bu tezde yapılan sinyal ayrıştırma yöntemleri etkili sonuç vermiştir. Trafo yağlarında deşarjlar sırasında meydana gelen ve bozucu etki yapan harmonik analizlerinin sıvı dielektrik uygulamaları literatürde mevcut [59,60] olmasına rağmen bu tezde yapıldığı gibi üç farklı dielektrik sıvının bakır ve demir nano partikül etkisiyle dielektrik davranışının incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Özellikle 5. harmoniğin baskın olmasının yağın delinme dayanımı hakkında genel bir bilgi vermesi daha önce literatürde olmayan bir katkı olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca nano parçacık etkisinin sıvı dielektrik malzemelerde etkisinin incelendiği çalışmalar olmasına rağmen [30-32] iki farklı elektrot düzeninde bu etki ilk defa bu tez çalışmasında incelenmiştir. Bakır nano parçacıklar tüm durumlarda dielektrik dayanımı düşürürken demir nano parçacıklar farklı yağlarda farklı etkiler ortaya çıkarmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektriksel yalıtım için uygun sıvı dielektrik seçimi oldukça önemlidir. Dielektrik sıvıların farklı üretim şekillerinde ve kimyasal özelliklerde olduğu düşünülürse elektriksel parametrelerinin incelenmesi seçim için en kritik etkendir. Örneğin, trafo uygulamalarında normal koşullarda AC gerilim altında çalışıyor olması farklı gerilim türlerine maruz kalmadığı anlamına gelmemektedir. Bu tez çalışmasında trafo, kesici ve benzeri elektriksel ekipmanların yalıtımında yaygın olarak kullanılan mineral yağ, doğal ester yağ ve sentetik ester yağın elektriksel testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan yağlar ayrı ayrı her bir yağ için aynı üretim bandından çıkmıştır. Dolayısıyla aynı tür her bir yağın her detayıyla aynı özellikte olması bu testlerin sonuçlarının sağlıklı karşılaştırılması açısından oldukça önemlidir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde AC, negatif DC ve darbe gerilimi testleri çevresel koşullar açısından aynı olan laboratuvar koşullarında yapılmıştır. Bütün testler normal çevre koşullarında 25^{o}C±2 sıcaklığında, 768 mmHg±2 basınç ve %50±3 nem altında gerçekleştirilmiştir. Tüm koşullar dinamik olarak ölçülmüştür. AC ve negatif DC gerilimi testleri ASTM D1816-12 ve ASTM D877/87M-19 standartlarına uyularak ve aynı elektrotlar kullanılarak aynı elektrot açıklıklarında gerçekleştirilmiştir. Negatif polariteli darbe gerilimi testleri ise IEC 60897 standardı kapsamında yapılmıştır. Kullanılan sıvı dielektrik malzemelerin dielektrik davranışlarına bakır ve demir nano parçacıklarının etkisi harmonik akımlarının analiz edilmesiyle incelenmiştir. Tüm bu testler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- AC gerilim altında VDE elektrot düzeninde daha yüksek delinme gerilimleri ölçülmüştür. Bu konfigürasyonda elektrot açıklığının azalması yağlar arasındaki delinme gerilimi farklarını da azaltmaktadır. MIDEL 7131 tüm elektrot açıklıklarında en iyi dielektrik dayanıma sahip yağ olarak ölçülmüştür. En küçük elektrot açıklığında, mineral yağın delinme gerilimi MIDEL en1204'e göre sadece 820 V daha düşüktür. Bu kadar küçük bir farkın olması, mineral yağın içinde bulunduğu elektrot düzeninde birbirlerine en yakın olduğu küçük açıklıklarda doğal ester yağ ile benzer yalıtım performansına sahip olduğunu göstermektedir.

- Disk elektrot düzeninde mineral yağ 2.5 mm elektrot açıklığında çok yüksek olmasa da daha iyi bir yalıtım direnci göstermiştir. Bu elektrot konfigürasyonunda sivri köşe etkisinden dolayı yüksek miktarda iyonizasyon bütün yağların delinme gerilimlerini düşürmüştür. Mineral yağ 1 mm'de, doğal ester yağ 2 mm'de ve sentetik ester yağ 2.5 mm'de en fazla delinme geriliminde düşüş yönünde fark ölçülmüştür. Ancak yağların delinme gerilimleri arasındaki farklar daha stabildir.

- AC gerilim altında yağların 5 tekrardaki delinme gerilimlerinden elde edilen standart sapma değerleri yağların stabil durumları ile ilgili bilgi vermektedir. Buna göre her tekrarda birbirine yakın delinme gerilimi seviyesi yağın kontrolünün daha kolay olduğunu göstermektedir. VDE elektrot düzeninde yüksek elektrot açıklıklarında deney tekrarları arasında delinme gerilimi açısından en yüksek kararlılık mineral yağda görülmüştür. Bu yağ her ne kadar daha düşük dielektrik performansa sahip olsa da düşük gerilim seviyesine sahip trafolarda ucuz maliyeti nedeniyle kullanılabilir. Ancak 10 kV ve üzeri trafolarda sentetik yağların tercih edilmesi önemlidir.

- Negatif DC deneylerinde, 2.5 mm elektrot açıklığında yağların delinme gerilimleri iki farklı elektrot konfigürasyonu için benzer seviyelerde ölçülmüştür. Belirli bir frekansa sahip olmayan bu gerilim türü yüksek elektrot açıklığında disk elektrodun sivri köşe etkisini azaltmıştır. Özellikle bu elektrot düzeninde mineral yağ ve sentetik ester yağ yalıtım performanslarını bütün elektrot açıklıklarında arttırmışlardır. Hesaplanan standart sapma değerleri göz önüne alındığında 1 mm elektrot açıklığında yağların stabilizasyonu olumsuz yönde değişmiştir.

- AC gerilim altında delinme anından 500 ms öncesindeki akım sinyallerinin EMD ve VMD yöntemiyle yapılan ayrıştırmasında önemli farklar ortaya çıkmıştır. 2.5 mm elektrot açıklığında EMD yönteminde IMF 5 ve IMF 6 modlarının gürültüsüz olması yağın daha yüksek delinme gerilimine sahip olduğunu göstermektedir. Bu açıklık için VMD'de IMF 8 modunun elektriksel delinmeye ipucu olacak şekilde gürültülü noktalar içermesi doğru bir değerlendirme açısından önemli bir saptamadır. Orta açıklıkta EMD ayrıştırmasının erken bitmesi o yağın daha düşük delinme gerilimine sahip olduğunun göstergesidir. 1 mm açıklıkta EMD'de IMF 5, IMF 6 ve IMF 7'nin çok gürültülü dalga

formuna sahip olması çok kısa mesafede yüksek deşarjların ve iyonizasyonların olduğunu göstermektedir.

- Darbe gerilim testlerinde mineral yağın daha yüksek delinme gerilimine sahip olması AC ve negatif DC gerilim altındaki deneylerden elde edilen sonuçlardan oldukça farklıdır. Bu yağa ait ışıklanma dalga formunda diğer iki yağa göre daha az pik ve bozucu noktanın olması daha yüksek yalıtım direncine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Böylece, özellikle 90 kV- 130 kV darbe gerilimleri için yüksek gerilim seviyelerinde ester yağların kullanımı dezavantaj göstermektedir. Ayrıca ester yağların daha fazla sayıda deşarj olması darbe gerilimi altında kötü yalıtım direncine sahip olduğunu göstermektedir.

- 1 mm elektrot açıklığında sıvı yalıtım malzemelerine demir ve bakır nano partiküllerinin etkisinin incelenmesi sonucunda, 5. harmonik değerinin baskın olmasının yağın dielektrik dayanımının fazla olduğuna, 7. harmonik değerinin baskın olmasının ilgili sıvı dielektrik malzemesinin yalıtım direncinin düşük olduğuna dair ipucu olduğu görülmektedir. Mineral yağda hiçbir durumda bu harmonik değeri baskın değilken sentetik ester yağda her durumda baskın harmoniklerden biri olarak ölçülmüştür. Ayrıca bakır partiküller tüm sıvı dielektriklerde her iki elektrot düzeninde de delinme dayanımını azaltmıştır.

Bütün bu ölçümler ve hesaplamalar neticesinde trafoda bir yağın seçimi için sadece AC delinme gerilimine bakmanın tek doğru yol olmadığı deneysel olarak gösterilmiştir. Çok daha komplike olan bu seçim yapılırken diğer gerilim türleri altında da yağların performanslarının değerlendirilmesi önemlidir. Kombine bir değerlendirme sonucunda doğru sıvı dielektrik seçimi elektriksel ekipmanda maksimum verimi almanın en önemli yoludur. İlerleyen çalışmalarda daha düşük maliyetli olan mineral yağa nano sıvı katılarak delinme dayanımının arttırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca bu nano sıvının daha az miktarda katılması amacıyla delinme dayanımı yüksek olan sentetik ester yağın da mineral yağ içerisine uygun oranlarda karıştırılarak elde edilecek sıvı dielektrik malzemenin delinme dayanımının ölçülmesi de amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] W. G. Hurley, T. Merkin and M. Duffy, *The Performance Factor for Magnetic Materials Revisited: The Effect of Core Losses on the Selection of Core Size in Transformers*, IEEE Power Electronics Magazine, vol. 5, no. 3, pp. 26-34, Sept. 2018, doi: 10.1109/MPEL.2018.2848738.

[2] Z. Ma, J. Yao, Y. Li and S. Wang, *Comparative Analysis of Magnetic Core Loss Measurement Methods with Arbitrary Excitations*, 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 4125-4130, doi: 10.1109/ECCE.2019.8913150.

[3] Atalar, F., 2018, *Mineral Yağa Daldırılmış Mukavvalarda Kısmi Boşalmaların Incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü.

[4] Atalar, F., Uzunoğlu, C.P., Cekli, S., Uğur M., *Statistical Analysis Of Induced Magnetic Fields On Oil-Impregnated Insulation Pressboard*s. Electrical Engineering, 102, 2095–2107 (2020). https://doi.org/10.1007/s00202-020-01012-8.

[5] Tenbohlen, S., Coenen, S., Djamali, M., Müller, A.; Samimi, M., Siegel, M., *Diagnostic Measurements for Power Transformers*, Energies 2016, 9, 347.

[6] Piotrowski, T., Rozga, P., Kozak, R., *Comparative Analysis Of The Results Of Diagnostic Measurements With An Internal Inspection Of Oil-Filled Power Transformers*, Energies 2019, 12, 2155.

[7] Kunicki, M., Cichon, A., Borucki, S., *Measurements On Partial Discharge In On-Site Operating Power Transformer: A Case Study*, IET Gener. Transm. Distrib. 2018, 12, 2487–2495.

[8] Florkowski, M., Kuniewski, M., Zydroń, P., *Measurements and Analysis of Partial Discharges at HVDC Voltage with AC Components*, Energies 2022, 15, 2510.

[9] Fofana, I., *50 Years Of Development Of Insulating Liquids*. IEEE Electr. Insul. Mag. 2013, 29, 13-25.

[10] Mahanta, D.K., Laskar, S., *Electrical Insulating Liquid: A Review*. J. Adv. Dielectr. 2017, 7, 1730001-1-1730001–9

[11] Shen, Z., Wang, F., Wang, Z., Li, J., *A Critical Review Of Plant-Based Insulating Fluids For Transformer: 30 Years Of Development*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021, 41, 110783.

[12] D. K. Mahanta and S. Laskar, "*Electrical insulating liquid: A review*," J. Adv. Dielectr., vol. 7, no. 4, pp. 1730001-1-1730001–9, Aug. 2017, doi: 10.1142/S2010135X17300018.

[13] A. M. Y. Jaber, N. A. Mehanna, G. A. Oweimreen, and A. M. Abulkibash, "*The effect of DBDS, DBPC, BTA and DBP combinations on the corrosion of copper immersed in mineral transformer oil*", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 4, pp. 2029–2035, Aug. 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.7556475.

[14] Y. M. Huang and Q. Liu, "*Comparisons of streaming electrification characteristics between an ester liquid and a mineral oil using pipe flow method*," Proc. 2016 IEEE Int. Conf. Dielectr. ICD 2016, vol. 2, pp. 1028–1031, Aug. 2016, doi: 10.1109/ICD.2016.7547793.

[15] P. Rozga, A. Beroual, P. Przybylek, M. Jaroszewski, and K. Strzelecki, "*A review on synthetic ester liquids for transformer applications*," Energies, vol. 13, no. 23, Dec. 2020, doi: 10.3390/en13236429.

[16] A. Beroual and H. Duzkaya, "*AC and Lightning Impulse Breakdown Voltages of Natural Ester Based Fullerene Nanofluids*," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 28, no. 6, pp. 1996–2003, Dec. 2021, doi: 10.1109/TDEI.2021.009772.

[17] P. Zukowski et al., "*DC and AC Tests of Moisture Electrical Pressboard Impregnated with Mineral Oil or Synthetic Ester— Determination of Water Status in Power Transformer Insulation*," Energies, vol. 15, no. 8, 2022, doi: 10.3390/en15082859.

[18] U. M. Rao, H. Pulluri, and N. G. Kumar, "*Performance analysis of transformer oil/paper insulation with ester and mixed dielectric fluids*," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 5, pp. 1853–1862, Oct. 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.007224.

[19] Y. Zhou and J. Qu, "*Ionic liquids as lubricant additives: A review*," ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 9, no. 4, pp. 3209–3222, Feb. 2017, doi: 10.1021/acsami.6b12489.

[20] S. Ab Ghani, N. A. Muhamad, Z. A. Noorden, H. Zainuddin, N. Abu Bakar, and M. A. Talib, "*Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: A review*," Electr. Power Syst. Res., vol. 163, pp. 655–667, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.10.008.

[21] S. A. Khan, M. Tariq, A. A. Khan, B. Alamri, and L. Mihet-Popa, "*Influence of Area and Volume Effect on Dielectric Behaviour of the Mineral Oil-Based Nanofluids*," Energies, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/en15093354.

[22] G. Shukla and H. Aiyer, "*Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds*," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, no. 4, pp. 2185–2190, Aug. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004678.

[23] P. Kurzweil, C. Schell, R. Haller, P. Trnka, and J. Hornak, "*Environmental Impact and Aging Properties of Natural and Synthetic Transformer Oils under Electrical Stress Conditions,*" Adv. Sustain. Syst., vol. 5, no. 8, 2021, doi: 10.1002/adsu.202100079.

[24] M. Bhatt and P. Bhatt, "*Effect of voltage type and polarity on streamer dynamics in transformer oil,*" Mater. Today Proc., vol. 62, no. P13, pp. 7131–7136, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.184.

[25] H. Cui, S. Li, L. Yang, G. Qu, and Y. Zhu, "*Impact of AC/DC electric field in thermally generated dissolved gases in transformer oil,*" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 27, no. 4, pp. 1136–1142, Aug. 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008723.

[26] R. S. Sai, J. Rafi, S. Farook, N. M. G. Kumar, M. Parthasarathy, and R. A. Bakkiyaraj, "*Degradation studies of electrical, physical and chemical properties of aged transformer oil,*" in Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1706, no. 1, p. 12056, doi: 10.1088/1742-6596/1706/1/012056.

[27] S. Karmakar, A. Dutta, and H. Kalathiripi, "*Investigation of the Effect of High Voltage Impulse Stress on Transformer Oil by Infrared Spectroscopy*," Feb. 2019, doi: 10.1109/ICHVET.2019.8724336.

[28] B. A. Thango and P. N. Bokoro, "*A Novel Approach to Predict Transformer Temperature Rise under Harmonic Load Current Conditions*," Energies, vol. 15, no. 8, 2022, doi: 10.3390/en15082769.

[29] Taghikhani, Z., Taghikhani, M. A. and Gharehpetian, G. B. (2022) "*Comprehensive comparative analysis of Metal-Oxide nanoadditives impacts on Oil-Filled Finemet and Vitroperm alloy core transformers HST concerning nanofluid thermophysical properties accurate estimation"*, Energy Conversion and Management, 260, p. 115594. doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115594.

[30] Liusheng, Z. et al. (2022) "*Interfacial interactions between different metal oxides and dibenzyl disulfide in mineral insulating oil*", Journal of Molecular Liquids, 347, p. 118359. doi: https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.118359.

[31] K. Wang, F. Wang, J. Li, Q. Zhao, G. Wen and T. Zhang, "*Effect of metal particles on the electrical properties of mineral and natural ester oils*," in IEEE Transactions on Dielectrics

and Electrical Insulation, vol. 25, no. 5, pp. 1621-1627, Oct. 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.006909.

[32] I. Atanasova-Höhlein, "*Influence of copper on gassing properties of transformer insulating liquids*," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 35, no. 6, pp. 15-22, Nov.-Dec. 2019, doi: 10.1109/MEI.2019.8878256.

[33] D. Wang et al., "*Influence of metal transformer materials on oil-paper insulation after thermal aging*," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 26, no. 2, pp. 554-560, April 2019, doi: 10.1109/TDEI.2018.007546.

[34] T. Wan, H. Qian, B. Feng, Z. Zhou, S. K. Gong and X. Hu, "*Influence of copper ions in transformer oil properties and adsorption treatment*," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 1, pp. 141-146, February 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6451352.

[35] L'vov, S.Y., Komarov, V.B., Bondareva, V.N. et al. "*Contamination of the transformer oil of power transformers and shunting reactors by metal-containing colloidal particles*", Power Technol Eng 45, 76–81 (2011). https://doi.org/10.1007/s10749-011-0227-3.

[36] I. Tronstad, C. M. Roel, W. R. Glomm, E. A. Blekkan and M. -h. G. Ese, "*Ageing and corrosion of paper insulated copper windings: the effect of irgamet® 39 in aged insulated oil*," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 1, pp. 345-358, Feb. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2014.004171.

[37] S. A. Khan, A. A. Khan and M. Tariq, "*Experimental Analysis for the Effect of Fe/Ti Oxides and Fe-Cu Nanoparticles on the Dielectric Strength of Transformer Oil*," 2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICHVET.2019.8724311.

[38] Makmud, M. Z. H., H. A. Illias, C. Y. Chee, and M. S. Sarjadi. 2018. "*Influence of Conductive and Semi-Conductive Nanoparticles on the Dielectric Response of Natural Ester-Based Nanofluid Insulation*" Energies 11, no. 2: 333. https://doi.org/10.3390/en11020333.

[39] KELDYSH L. V., 1965, "*Ionization In The Field Of A Strong Electromagnetic Wave*", Soviet Physics Jetp, V.20, N.5, 1307-1314.

[40] M. Özkaya, "*Yüksek Gerilim Tekniği Cilt 1*", Birsen Yayınevi, 2008.

[41] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, "*High Voltage Engineering Fundamentals*", Newnes. Butterworth-Heinemann/Newnes, 2000.

[42] Saha Meghnad N., 1921, "*On a physical theory of stellar spectra*", Proc. R. Soc. Lond. A99135–153. https://doi.org/10.1098/rspa.1921.0029.

[43] Ghosh, K. and Ghosh, G. (1998) "*The Saha ionization equation*", European Journal of Physics, 19(1), pp. 7–14. doi: 10.1088/0143-0807/19/1/003.

[44] ASTM D1816-12, "*Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes*," 2019.

[45] ASTM D877/D877M-19, "*Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes*," 2019, doi: 10.1520/D0877-87R95.

[46] International Electrotechnical Commission, "*Methods for the determination of the lightning breakdown voltage of insulating liquids-IEC 60897:1987* ," Geneva, Switzerland, 1987.

[47] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, and M. I. Qureshi, "*Electrical Insulation in Power Systems*", Boca Raton: CRC Press, 2018.

[48] S. Mahmud, G. Chen, I. Golosnoy, G. Wilson, and P. Jarman, "*Experimental studies of influence of DC and AC electric fields on bridging in contaminated transformer oil*," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, no. 1, pp. 152–160, Feb. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2014.004573.

[49] W. Gong, D. He, Z. Xue, H. Zhang, T. Zhang, and Q. Li, "*Simulation Research on Partial Discharge at Wedge-shaped Oil Gaps in Oil-paper Insulated under DC Stress*," 7th IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE 2020 - Proc., Sep. 2020, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279695.

[50] P. Rozga, M. Stanek, and K. Rapp, "*Lightning properties of selected insulating synthetic esters and mineral oil in point-to-sphere electrode system*," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 5, pp. 1699–1705, Oct. 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.007069.

[51] P. Rozga and M. Stanek, "*Comparative analysis of lightning breakdown voltage of natural ester liquids of different viscosities supported by light emission measurement*," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 2, pp. 991–999, Apr. 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006467.

[52] U. Maji and S. Pal, "*Empirical mode decomposition vs. variational mode decomposition on ECG signal processing: A comparative study*," in 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI 2016, Sep. 2016, pp. 1129–1134, doi: 10.1109/ICACCI.2016.7732196.

[53] N. U. Rehman and H. Aftab, "*Multivariate Variational Mode Decomposition*," IEEE Trans. Signal Process., vol. 67, no. 23, pp. 6039–6052, Dec. 2019, doi: 10.1109/TSP.2019.2951223.

[54] S Hadiyoso, E M Dewi, and I Wijayanto, "*Comparison of EMD, VMD and EEMD Methods in Respiration Wave Extraction Based on PPG Waves*," in Journal of Physics: Conference Series, Dec. 2019, pp. 1–9, doi: 10.1088/1742-6596/1577/1/012040.

[55] U. Maji, M. Mitra, and S. Pal, "*Detection and characterisation of QRS complex in VMD domain*," Michael Faraday IET International Summit 2015, Sep. 2015, vol. 2015, no. CP683, pp. 586–590, doi: 10.1049/CP.2015.1697.

[56] U. Maji, S. Pal, and S. Majumder, "*Estimation of arrhythmia episode using variational mode decomposition technique*," Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 2015, vol. 2015-July, pp. 767–772, doi: 10.1109/I2MTC.2015.7151365.

[57] Y. Wang, F. Liu, Z. Jiang, S. He, and Q. Mo, "*Complex variational mode decomposition for signal processing applications,*" Mech. Syst. Signal Process., vol. 86, pp. 75–85, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.YMSSP.2016.09.032.

[58] Uzunoğlu, C. P. (2018) "*A comparative study of empirical and variational mode decomposition on high voltage discharges*", Istanbul University - Journal of Electrical and Electronics Engineering, 18(1), pp. 72–77. doi: 10.5152/iujeee.2018.1811.

[59] Aydoğan, A., 2019, "*Yağlarda kısmi deşarj davranışının düzgün olmayan elektrik alanda incelenmesi*", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü.

[60] Aydogan A, Atalar F, Ersoy Yilmaz A, Rozga P. "*Using the Method of Harmonic Distortion Analysis in Partial Discharge Assessment in Mineral Oil in a Non-Uniform Electric Field*", Energies. 2020; 13(18):4830. https://doi.org/10.3390/en13184830.