

T.C.

DÜZCE ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NANOPARTİKÜL KATKILI TRANSFORMATÖR YAĞLARININ
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

MEHMET KARATAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Doç. Dr. YUNUS BİÇEN**

DÜZCE, 2023

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NANOPARTİKÜL KATKILI TRANSFORMATÖR YAĞLARININ
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet KARATAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Yunus BİÇEN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yunus BİÇEN

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Emin YILDIRIZ

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Faruk ARAS

Kocaeli Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 27/01/2023

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

27 Ocak 2023

Mehmet KARATAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Yunus BİÇEN' e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca özellikle deney süreçlerinde her türlü destek ve alt yapısını paylaşan Schneider Electric ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışması boyunca teknik desteklerini esirgemeyen Erhan YILDIZ'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 2210-D Yurt İçi Sanayiye Yönelik Yüksek Lisans Burs Programı ile desteklenmiştir.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2021.06.03.1172 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

27 Ocak 2023

Mehmet KARATAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
1.1.1. Nano-Akışkanlarda Ac İzolasyon Delinme Gerilimi (Bdv).....	7
1.1.2. Nano-Akışkanlarda Termal İletkenlik.....	13
1.1.1. Nano-Akışkanlarda Viskozite.....	16
2. METERYAL VE METOD.....	20
2.1. MİNERAL YAĞ.....	20
2.2. NANOPARTİKÜL.....	20
2.3. KARIŞTIRMA METODU.....	21
2.3.1. Tek Adım Karıştırma Metodu.....	22
2.3.2. İki Adım Karıştırma Metodu.....	23
2.4. SÜSPANSİYON ORANLARININ HESAPLANMASI.....	26
2.5. TEST METODLARI.....	27
2.5.1. İzolasyon Delinme Gerilimi.....	27
2.3.1. Termal İletkenlik.....	29
2.3.1. Viskozite.....	30
2.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	31
3. DENEY SONUÇLARI.....	33
3.1. İZOLASYON DELİNME GERİLİMİ (BDV) TEST SONUÇLARI.....	33
3.2. NANO-AKIŞKANIN TERMO-FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	41
3.3. SEM GÖRÜNTÜLERİ VE ÇÖKELME OLGUSU.....	46
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
4.1. SONUÇLAR.....	48
4.2. ÖNERİLER.....	49
5. KAYNAKÇALAR.....	51
6. EKLER.....	62
EK 1: FARKLI NUMUNELERDE YAPILAN KONSANTRASYON HESAPLARI.....	62
EK 2: DELİNME GERİLİMİ TEST CİHAZI GÖRSELİ.....	63
EK 3: DELİNME GERİLİMİ TEST CİHAZININ YAĞ HAZNESİ VE ELEKTROTLARI.....	64

EK 4: ÇEŞİTLİ HACİM FRAKSİYONLARINDA DELİNME GERİLİMİ SEVİYELERİ İÇİN GELİŞTİRMELERLE BİRLİKTE WEİBULL VE HİSTOGRAM GRAFİKLERİ (%)	65
7. ÖZGEÇMİŞ.....	67



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. 536 ana arızadan elde edilen bilgilere dayalı olarak trafo merkezi trafolarının (>100 kV) arıza sebepleri.....	3
Şekil 1.2. Yalıtım yağlarının kullanım alanları ve çeşitleri	4
Şekil 1.3. Bazı nanopartiküllerin elektriksel sınıflandırılma	6
Şekil 1.4. Mineral yağ ve SiO ₂ nano-akışkanının farklı su oranlarındaki delinme gerilimi sonuçları	8
Şekil 1.5. Fe ₃ O ₄ nano-akışkanının delinme gerilimi sonuçları	9
Şekil 1.6. Yalıtım yağının içerisindeki nanopartiküllerin çeşitli elektrodinamik davranışları.....	11
Şekil 1.7. Transformatör yağı nanosfer nano-akışkanı ve nanorod nano-akışkanı için pozitif akış yayılım görüntüleri	13
Şekil 1.8. Mineral yağın, ağırlıkça %0.50 AlN nano-akışkanın ve oleik asit eklenmiş ağırlıkça %0.50 AlN nano-akışkanın çeşitli sıcaklıklarda ölçülen dinamik viskozitesi.....	17
Şekil 1.9. Nano-akışkanlardaki tortulaşma ve aglomerasyon olayının resimli gösterimi	19
Şekil 2.1. (a) manyetik karıştırıcı, (b) ultrasonik karıştırıcı, (c) ultrasonik banyo	22
Şekil 2.2. Two-step karıştırma metodu akış diyagramı	23
Şekil 2.3. Tez çalışmasında uygulanan karıştırma metodu akış diyagramı	24
Şekil 2.4. Hassas terazi	25
Şekil 2.5. Hazırlanan numunelerin ultrasonik banyoda karıştırılma işlemi	25
Şekil 2.6. Delinme Gerilimi Cihazı	28
Şekil 2.7. Delinme gerilimi cihazının yağ haznesi ve elektrotları	29
Şekil 2.8. Termal iletkenlik cihazı ölçüm probu	30
Şekil 2.9. Viskozitemetre	31
Şekil 2.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Cihazı	32
Şekil 3.1. (a) SiO ₂ (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (b) SiO ₂ (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (c) SiO ₂ (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (d) SiO ₂ (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (e) SiO ₂ (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (f) SiO ₂ (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği	34
Şekil 3.2. (a) BN (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (b) BN (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (c) BN (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (d) BN (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (e) BN (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (f) BN (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği	35

Şekil 3.3. (a) MgO (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (b) MgO (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (c) MgO (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (d) MgO (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (e) MgO (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (f) MgO (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği.....	36
Şekil 3.4. (a) Al ₂ O ₃ (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (b) Al ₂ O ₃ (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (c) Al ₂ O ₃ (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (d) Al ₂ O ₃ (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (e) Al ₂ O ₃ (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (f) Al ₂ O ₃ (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği	37
Şekil 3.5. SiO ₂ , BN, MgO ve Al ₂ O ₃ nano-akışkanlarının farklı konsantrasyon seviyelerindeki delinme gerilimi sonuçları	38
Şekil 3.6. Yağın konsantrasyon oranına bağlı deşarj yolunun görüntüsü	40
Şekil 3.7. SiO ₂ nano-akışkanının termal iletim gelişimi	42
Şekil 3.8. Mineral yağ ve SiO ₂ (0,01 ve 0,05) nano-akışkanlarının viskozite testi.....	43
Şekil 3.9. SiO ₂ nano-akışkanın termal yayılım ve hacimsel ısı kapasitesi değişiklikleri	43
Şekil 3.10. SiO ₂ nano-akışkanın viskozitesindeki değişiklik	44
Şekil 3.11. Parametrelerdeki değişiklikler için kontur çizimleri; hacim oranı (%), Delinme gerilimi (kV), hacimsel ısı kapasitesi (Mj/m ³ K), viskozite (cSt), termal iletkenlik (% geliştirme)	45
Şekil 3.12. SEM görüntüleri, cam yüzeyine yayılmış ve yağı uzaklaştırılmış nano-akışkan örneklerine aittir; (a) 0,01% hacim fraksiyonu, (b) 0,05% hacim fraksiyonu.	47

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Çeşitli yağların termal, kimyasal ve fiziksel özellikleri	5
Çizelge 1.2. Baz yalıtım yağları ve çeşitli nano-akışkanlar için delinme gerilim karşılaştırmaları	9
Çizelge 1.3. Baz akışkan ve çeşitli nano-akışkanlar için termal iletkenlik karşılaştırmaları	15
Çizelge 1.4. Baz akışkan ve çeşitli nano-akışkanlar için viskozite karşılaştırmaları	18
Çizelge 2.1. Mineral yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri	20
Çizelge 2.2. Kullanılan nanopartiküllerin fiziksel özellikleri	21
Çizelge 2.3. Nano-akışkanlar için literatürde kullanılan karışım metotları	26
Çizelge 2.4. Nanopartikül cinsine ve konsantrasyon seviyesine göre hazırlanan numuneler	27
Çizelge 3.1. Delinme gerilimi test sonuçları ve mineral yağa göre akışkanların yüzde gelişimi	39
Çizelge 3.2. Mineral yağ ve SiO ₂ (0,01 ve 0,05) nano-akışkanının termal iletkenlik, termal yayılma ve özgül ısı ölçüm sonuçları	41

KISALTMALAR

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BDV	Breakdown Voltage (İzolasyon Delinme Gerilimi)
BS	İngiliz Standardı
CIGRE	Uluslararası Büyük Güç Sistemleri Konseyi
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IL-BDV	Yıldırım Darbe Gerilimi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
VDE	Elektrik, Elektronik ve Bilişim Teknolojileri Derneği

SİMGELER

A	Amper, Elektriksel Akım
AC	Alternatif Akım
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
AlN	Alüminyum Nitrit
BaTiO ₃	Baryum Titanat
BCZT	Ba _{0.85} Ca _{0.15} Zr _{0.1} Ti _{0.9} O ₃
BN	Bor Nitrit
CCTO	CaCu ₃ Ti ₄ O ₁₂
CdS	Kadmiyum Sülfür
cSt	Viskozite
Cu ₂ O	Bakır (I) Oksit
CuO	Bakır (III) Oksit
E	Elektrik Alan
Fe ₂ NiO ₄	Nikel Oksit
Fe ₂ O ₃	Demir (III) Oksit
Fe ₃ O ₄	Demir (II, III) Oksit
g (m/s ²)	Yerçekimi Alan Kuvveti
g/L	Kütle Konsantrasyonu
kg/(m*s)	Dinamik Viskozite
kg/m ³	Kütle Yoğunluğu
kV	Kilovolt
MgO	Magnezyum Oksit
Mj/m ³ K	Hacimsel ısı kapasite
Mm	Milimetre
mm ² /s	Termal Yayılma
MWCNT	Karbon Nanotip
Nm	Nanometre
pf	Sıvının Kütle Yoğunluğu
pp	Parçacığın Kütle Yoğunluğu

R (m)	Yarıçap
Si ₃ N ₄	Silisyum Nitrür
SiC	Silisyum Karbür
SiO ₂	Silikon Dioksit
TiO ₂	Titanyum Dioksit
V	Hacim
Vol	Hacim Konsantrasyonu
W	Kütle
W/mK	Termal İletkenlik
wt	Kütle Fraksiyonu
ZnO	Çinko Oksit
ZrO ₂	Zirkonyum (II) Dioksit
°C	Santigrat Derece
μ	Mikro
μs	Mikro Saniye
σ	Öz İletkenlik
Ω	Ohm
Φ	Hacim Fraksiyonu

ÖZET

NANOPARTİKÜL KATKILI TRANSFORMATÖR YAĞLARININ ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet KARATAŞ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Yunus BİÇEN

Ocak 2023, 66 sayfa

Enerji sektörünün iletim ve dağıtım sistemlerinde bulunan güç transformatörleri en kritik ve pahalı ekipmanlar arasındadır. Güç transformatörlerin genel yapısı zamanla çok fazla değişmese de malzeme odaklı geliştirmeler sürekli devam etmektedir. Geçmişten günümüze transformatörlerde kullanılan en yaygın yalıtım sıvıları petrol bazlı mineral yağlardır. Bu yalıtım sıvıları genel olarak transformatörlerde elektriksel yalıtım ve ısı transferi vasıtasıyla soğutma görevlerini üstlenmektedir. Yakın geçmişte mineral yağa alternatif olarak çeşitli yalıtım sıvıları ortaya çıkmıştır. Literatürde çok çeşitli yalıtım sıvıları bulunsa da mineral yağlardan sonra en çok tercih edilenler doğal ester, sentetik ester ve silikon esterlerdir. Her bir yalıtım sıvısı kullanıldığı yere ve kullanım amacına göre seçilmekte olup, geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Son yıllarda ise nanopartikül katkılı yalıtım sıvılarının özelliklerinin belirlenmesi ve performans karşılaştırmaları popüler bir konu haline gelmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yalıtım sıvısı olarak kullanılan mineral yağa nanopartikül olarak adlandırılan iletken, yarı-iletken ve yalıtkan 100 nm'den küçük katı parçacıklar eklenerek, mevcut yağın elektriksel izolasyonunun ve termal iletkenliğinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nanopartiküller BN, Al₂O₃, SiO₂ ve MgO' dur. Tercih edilen nanopartiküllerin boyutları mümkün oldukça küçük seçilmiştir. Nanopartiküller için karışım yöntemi olarak kütle konsantrasyonu temelinde iki-adımlı karıştırma metodu kullanılmıştır. Kütle konsantrasyonuna göre nanopartikül ağırlıkları hesaplanmış, önce mekanik karışım yapılmış, ardından ultrasonik banyo ile kararlı hale getirilmiştir. Numuneler üzerinde AC delinme gerilimi ölçümü, viskozite tayini ve termal iletkenlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Dört farklı nano-akışkan üzerinde gerçekleştirilen ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlar olumlu/olumsuz özellikleri bakımından karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Elektriksel izolasyon, Güç sistemleri, Nanopartikül, Termal iletkenlik, Transformatör,

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE ELECTRICAL PROPERTIES OF NANOPARTICLE ADDED TRANSFORMER OILS

Mehmet KARATAŞ

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Engineering Faculty

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yunus BİÇEN

January 2023, 66 pages

Power transformers are one of the most important and expensive equipment in the transmission and distribution systems of the energy sector. Although the general structure of power transformers does not change much over time, material-oriented developments continue. The most common insulating fluids used in transformers from the past to the present are petroleum-based mineral oils. These insulating fluids generally undertake the functions of cooling by means of heat transfer and electrical insulating in transformers. Various insulating fluids have recently emerged as alternatives to mineral oil. Although there are a wide variety of insulating fluids in the literature, the most preferred ones after mineral oils are natural esters, synthetic esters, and silicone esters. Each insulating fluid is selected according to the place of use and purpose of use, and development studies continue. In recent years, the determination of properties and performance comparisons of nanoparticle-doped insulating fluids has become a popular topic. In this thesis, it is aimed to improve the electrical insulation and thermal conductivity of the existing oil by adding conductive, semi-conducting and insulating solid particles smaller than 100 nm, called nanoparticles, to the mineral oil used as insulating fluid. These nanoparticles are BN, Al₂O₃, SiO₂, and MgO. The sizes of the preferred nanoparticles are chosen as small as possible. The two-step stabilization method based on mass concentration was used as the mixing method for nanoparticles. Nanoparticle weights were calculated according to the mass concentration, first mechanical mixing was made and then stabilized by the ultrasonic bath. AC breakdown voltage measurement, viscosity determination, and thermal conductivity measurement were performed on the samples. The results obtained as a result of the measurements performed on four different nano-fluids were examined comparatively in terms of their positive/negative properties.

Keywords: Electrical isolation, Nanoparticle, Power systems, Thermal conductivity, Transformer

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen teknolojinin ve sanayinin ivmelenerek büyümesi özellikle malzeme biliminde yüksek verimliliği ve tek bir malzemeden birden fazla işlevselliği talep edilmektedir. Öte yandan malzeme prosesleri ve işlevsellikleri, rekabet, maliyet, hammadde sorunu vb. sebeplerden ötürü sürekli geliştirmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda güç sistemlerinde kullanılan ekipmanlar oldukça fazla ar-ge çalışması yapılan ve yatırım alan sektörlerden biridir. Ayrıca elektrik enerjisinin iletiminde ve dağıtımındaki enerji kesintileri müşteri memnuniyetsizliklerine, sanayideki üretimlerin durmasına ve ciddi maddi kayıplara sebep olduğu için minimuma indirilmelidir. Bu sebepten dolayı güç sistemlerinde kullanılan ekipmanların kusursuza yakın çalışması beklenmektedir.

Güç sistemlerinde kullanılan ekipmanların en önemlilerinden biri de transformatörlerdir. Transformatörler, iletim ve dağıtım sistemlerindeki gerilim ve akım seviyesini alçaltmaya ya da yükseltmeye yarar. Transformatörler kullanım alanlarına göre çok farklı tiplerde üretilmektedir. Bu çeşitliliği genel olarak gerilim seviyesi, gücü, frekansı, kullanıldığı ortam ve kullanıcının özel istekleri oluşturmaktadır. Öte yandan transformatörleri yapısal olarak gruplarsak kuru tip ve yağlı tip olarak iki gruba ayırabiliriz. Transformatörlerde elektriksel izolasyon ve soğutma amacıyla çeşitli yağlar kullanılmaktadır. Bu yağlardan en çok tercih edilenleri genel olarak mineral yağ, doğal ester, sentetik ester ve silikon esterlerdir. Öte yandan uzun yıllardır transformatörlerde petrol bazlı mineral yağ kullanılmaktadır. Ancak mineral yağın yenilenemez enerji kaynağı olan petrolden elde edilmesi hem üretilirken hem de kullanılırken çevreye verdiği zararlar, petrolün ekonomideki konjonktürü ve oluşturduğu çeşitli temel problemlerden dolayı sektörün ester yağlarına tercihi artmıştır. Ester yağlarının yüksek oksidasyon seviyesi, alevlenme ve parlama noktasının yüksek olması, doğada çözünebilir olması ve transformatörün ömrüne olan olumlu etkisi öne çıkan özellikleri olarak söylenebilir. Öte yandan ester yağlarının dezavantajları da bulunmaktadır. Yüksek viskozite, krepaj mesafesi, içerisinde yüksek su molekülü tutması, tedarik sıkıntısı ve maliyet ester yağlarının dezavantajları olarak söylenebilir.

Yalıtım yağların kullanım alanları genel olarak transformatörler, buşingler, anahtarlama elemanları, reaktörler, kapasitörler vb. gibi ekipmanlar olarak sayılabilir. Yalıtım yağları temel olarak elektriksel yalıtımı sağlamak ve kullanılan ekipmandaki tasarımsal ve kayıptan kaynaklı oluşan ısıyı ortamdan transfer etmek amacıyla kullanılır. Güç sistemlerinde kullanılan ekipmanlar uzun ömürlü ve kararlı yapıda olmak durumundadır. Çünkü kullanılan ekipmanın arızalanması enerji kesintilerine yol açmakta ve bundan dolayı hem insanların yaşadığı bölgeler elektrik kesintisine maruz kalmakta hem de büyük maddi kayıplara sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı yalıtım yağlarının performansı güç sistemlerinde kritik rol oynamaktadır ve sürekli geliştirilmek için çalışmalar yapılmaktadır. Öte yandan yalıtım yağlarının geliştirilmesi transformatörlerin ömrünü artırmakla beraber performansını da daha iyi bir seviyeye getirmektedir. Yalıtım yağlarının termal ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi transformatörlerdeki patlama veya aşırı ısıdan kaynaklı yağ kaçaklarının sayısının azalmasına katkı sağlamaktadır. Bu sayede yalıtım yağlarının çevreyle temasının azalması sağlanabilir.

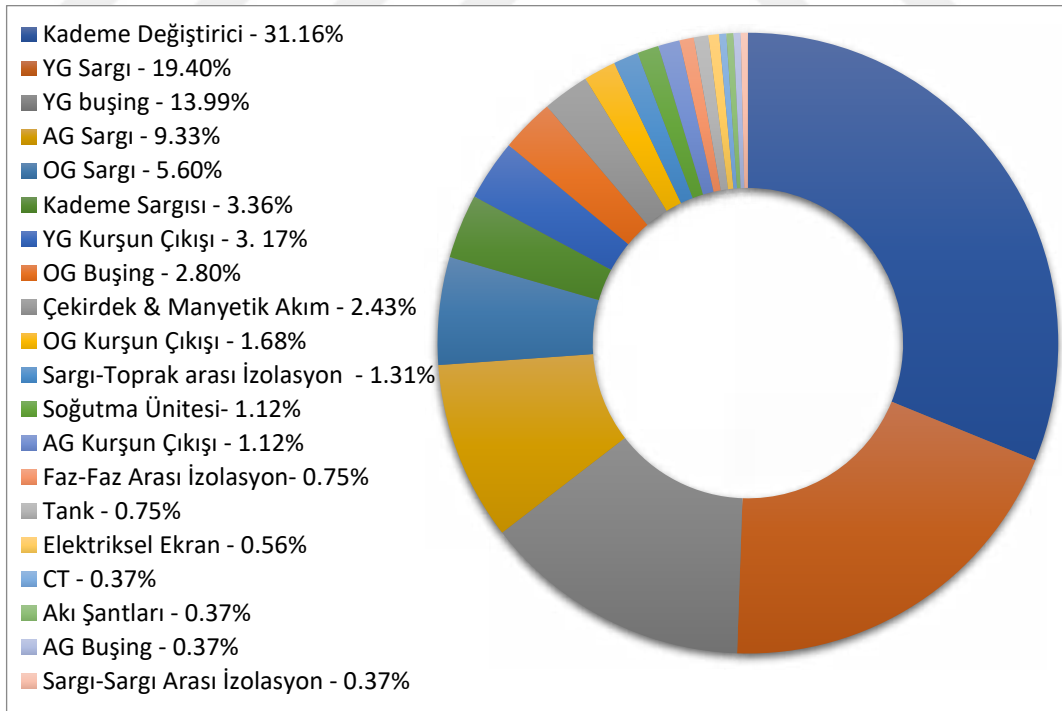
Bu tez çalışmasında transformatörlerde kullanılan yalıtım yağlarına çeşitli nanopartikülleri belirli konsantrasyon seviyelerinde uygun karıştırma metotları ile karıştırılarak mevcut yağın dielektrik dayanımının ve termal iletiminin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılacak nanopartikül seçimi, optimum konsantrasyon oranının hesaplanması, manyetik karıştırıcı kullanarak yalıtım yağı ile nanopartikülün karıştırılması, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) metoduyla yüzey görüntülerinin incelenmesi, numunelere; delinme gerilim testlerinin yapılması, viskozite testlerinin yapılması ve termal iletkenlik testlerinin yapılması aşamaları gerçekleştirilmektedir. Numune üzerinde yapılan deneylerin sonuçları incelenerek nano-akışkanların hem baz yağa oranla elde edilen iyileşmeleri gözlemlemek hem de en verimli konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Bu tezin temel amacı transformatörlerde kullanılan mineral yağın içerisine farklı tipte, farklı boyutta ve farklı konsantrasyon oranında nanopartikül ekleyip geleneksel yağlara alternatif katkılı yeni bir nano-akışkan elde etmektir. Mineral yağın izolasyon kalitesinin artması transformatörlerde oluşabilecek kısmi deşarj sayılarında önemli azalma sağlamaktadır. Dolaylı olarak deşarj sayısının düşmesi yalıtım yağının ve izolasyon kağıdının ömrüne olumlu yönde etki etmektedir. Geniş pencereden bakacak olursak kısmi deşarjların azalmasının yalıtım yağının ve izolasyon kağıdının ömrüne olan olumlu etkisi transformatörün ömrünü ve çalışma standartlarını artırmaktadır. Öte yandan nano katkı

yağın petrol bazlı mineral yağa göre termal iletim performansının daha iyi olması transformatörün ısı yayılımını artırmakta ve transformatörün çalışma sıcaklığını düşürmektedir. Bu bağlamda transformatörün termal çalışma koşullarını iyileştirmek doğrudan nihai ömrünü artırmış olacaktır.

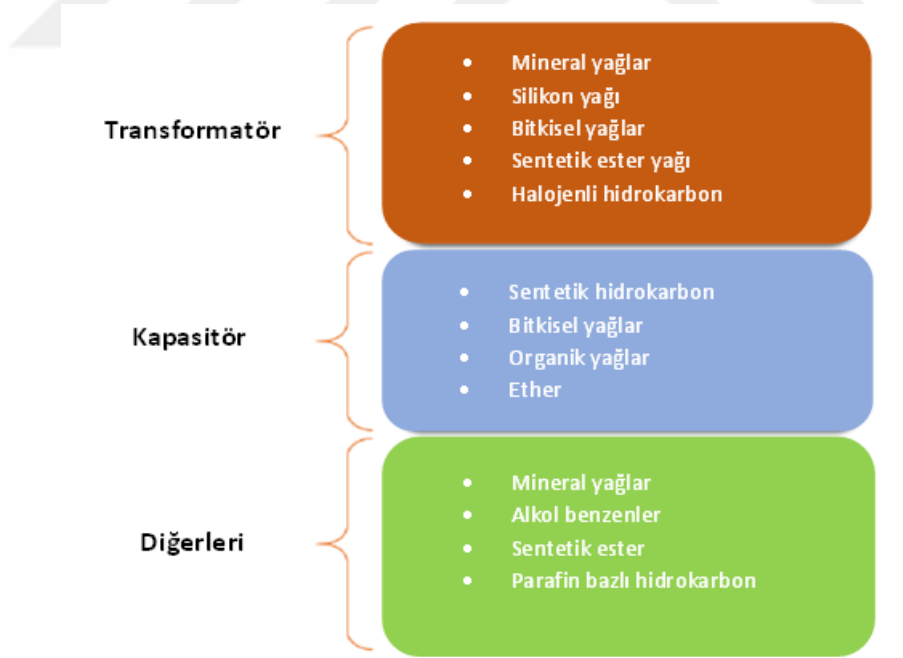
1.1 LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde dünyanın sürekli artan ve talepleri karşılanamayan üretim sektörü ihtiyacından dolayı araştırmacılar güç sistemlerinde sistem iyileştirmelerine ve yatırımcılar sermaye artırımına gitmektedir [1]. Güç sistemlerinde kullanılan en önemli ekipmanlardan biri olan transformatörlerin sağlıklı çalışmaları son derece önemlidir ve transformatör arızalarının büyük bir bölümü izolasyon kusurlarından kaynaklanmaktadır [2]. Şekil 1.1’de Uluslararası Büyük Güç Sistemleri Konseyi (CIGRE) tarafından ile yapılan bir çalışmada transformatörlerin arıza istatistiği verilmiştir [3], [4]. Bu çalışmaya göre transformatörlerdeki izolasyon problemlerinden kaynaklı arızaların toplamı geri kalan arızaların toplamından fazladır. Bu da transformatörlerdeki izolasyonun önemini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 1.1. 536 ana arızadan elde edilen bilgilere dayalı olarak trafo merkezi trafolarının (>100 kV) arıza sebepleri [5], [6].

Transformatörlerdeki izolasyon ekipmanlarının başında şüphesiz izolasyon yağı ve izolasyon kağıdı gelmektedir. İzolasyon sıvılarının kullanım alanları genel olarak transformatörler, buşingler, reaktörler, kapasitörler, anahtarlama elemanları vb. gibi güç sistemi ekipmanlarıdır [7], [8]. Yalıtım yağları, ortamın izolasyon direncini artırmaktadır ve kullanılan ekipmanın yalıtılması gereken bölümlerine ciddi destek sunmaktadır [9]. Öte yandan yalıtım yağları sistemde kayıplar ve tasarım hatalarından ortaya çıkan ısıyı termal iletim vasıtasıyla transfer etme görevi görür [10]. Özellikle izolasyon yağının kalitesi transformatörün performansını ve ömrünü doğrudan etkilemektedir [9]. Yalıtım yağlarının birçok çeşidi bulunmakla beraber özellikle ester yağlarının parlama ve yanma sıcaklıkları yüksek olduğu için patlama ve alevlenme gibi istenmeyen durumları minimize etmektedir [11], [12]. Transformatörlerde geçmişten günümüze kadar yaygın olarak kullanılan yalıtım yağı petrol bazlı mineral yağıdır [6], [9]. Bununla birlikte yakın dönemde mineral yağa alternatif olarak doğal ester, silikon ester ve sentetik ester yağları kullanılmaya başlanılmıştır [11], [13], [14]. Şekil 1.2’de yalıtım yağlarının çeşitleri ve kullanım alanları verilmektedir.



Şekil 1.2. Yalıtım yağlarının kullanım alanları ve çeşitleri [1].

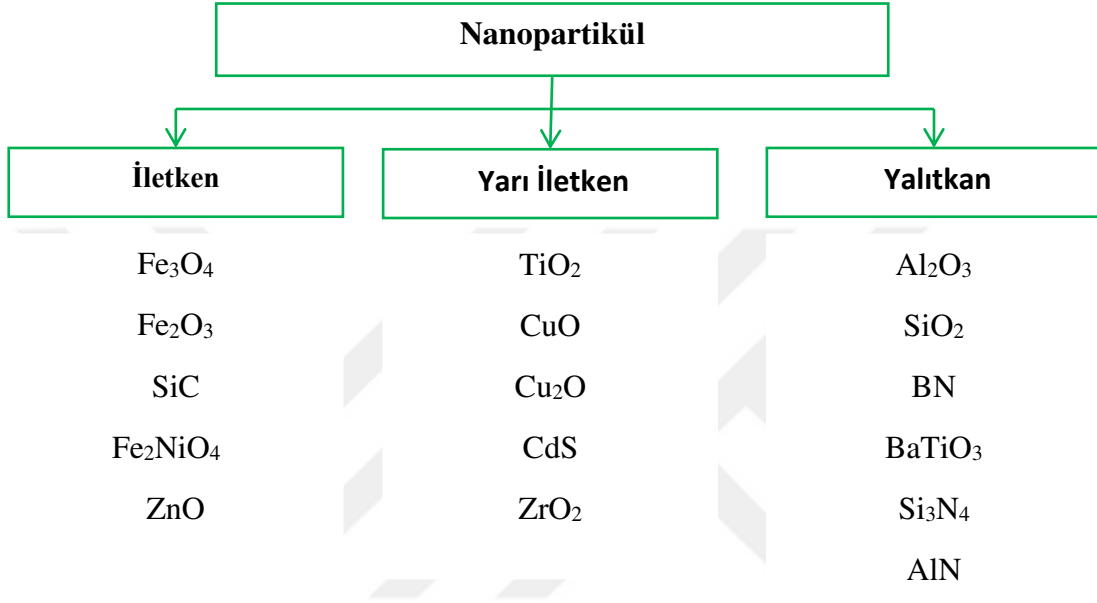
Transformatörlerde kullanılan izolasyon yağlarının kullanım yerlerine göre bazı olumlu ve olumsuz özellikleri vardır. Mineral yağların viskozitesinin düşük olması termal iletim performansını yüksek kılar [15]. Ayrıca yüksek oksidasyon direnci, düşük maliyet ve tedarik kolaylığı en göze çarpan avantajlarıdır [6], [10]. Bunlara ek olarak özellikle zayıf biyolojik çözünürlük ve yanma noktasının düşük olması dezavantaj olarak görünmektedir [16]. Öte yandan, silikon yağları ve ester yağları yüksek viskoziteye sahiptir [17]. Bu da transformatörün soğumasında dezavantaj oluşturur. Ancak doğal esterlerin özellikle izolasyon kağıdı gibi katı malzemelerin ömrünü uzattığı ve silikon esterlerin de yüksek alevlenme ve yüksek parlama noktasından dolayı yangın ve patlama riskini düşürdüğü bilinmektedir. [18], [19]. Bu sebeplerden ötürü yalıtım yağlarını seçerken kullanılacak ekipman ve o ekipmanın kullanılacağı ortam önem arz etmektedir. Çizelge 1.1’de en çok tercih edilen yalıtım yağlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir.

Çizelge 1.1. Çeşitli yağların termal, kimyasal ve fiziksel özellikleri [10], [20], [21].

Parametreler	Birim	Mineral Yağ	Doğal Ester	Sentetik Ester	Silikon Ester
Yoğunluk (20°C)	g/cm ³	< 0,895	< 1,0	< 1,0	0,95-0,97
Delinme Gerilimi	kV	> 30	> 35	> 45	> 40
Parlama Noktası	°C	> 135	> 250	> 250	> 240
Donma Noktası	°C	< - 40	< - 15	< - 45	< - 40
Kinematik Viskozite (100°C)	cSt	3	< 10	6	16
Kinematik Viskozite (40°C)	cSt	< 12	< 50	< 35	40±4
Dağılma Faktörü (90 °C)	-	< 0,005	< 0,05	< 0,03	< 0,001
Su İçeriği	mg / kg	< 30	< 200	< 200	< 50
Özgül Isı	J/Kg.K	1860	1500 - 2100	1800 - 2300	1510

Yalıtım yağları ile ilgili üstün performanslı yeni yağ arayışları ve mevcut yağı geliştirme çalışmaları uzun yıllardır devam etmektedir. İyileştirme çalışmalarının en dikkat çekeni nanopartikül ile yapılan çalışmalardır [1]. Nano-akışkan fikrini ilk kez Choi ve Eastman ortaya atmıştır [22]. Nano-akışkanlar, genel olarak 100 nm’ den küçük nanopartiküller ile

geleneksel yağları süspanse ederek oluşturulan karışımlardır [23]. Choi, yaptığı çalışmada endüstride kullanılan yağları nanopartikülle süspanse ederek kullanılan yağlara oranla termal iletimi daha iyi bir nano-akışkan elde etmiştir [22]. Öte yandan literatürdeki çalışmalarda nano-akışkanlar, mevcut yağların elektriksel yalıtım özelliğini iyileştirdiğini göstermiştir [24], [25]. Şekil 1.3’de literatürde kullanılan bazı nanopartiküllerin elektriksel özelliklerine göre kategori edilerek verilmiştir.



Şekil 1.3. Bazı nanopartiküllerin elektriksel sınıflandırılması [10].

Nano-akışkanların güç sistemleri alanında kullanımı özellikle de elektriksel yalıtım anlamında kullanımı yeni bir konudur. Henüz güç sistemleri ekipmanları üzerinde kullanımı olan bir standarda sahip değildir ve daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır. Ancak transformatör sektöründe literatürdeki çalışmalar incelendiğinde nano-akışkanların potansiyeli oldukça yüksektir. Özellikle mineral yağı baz alan nano-akışkanlardaki gelişim silikon ve ester bazlı nano-akışkanlara göre daha tatmin edicidir [26]-[28].

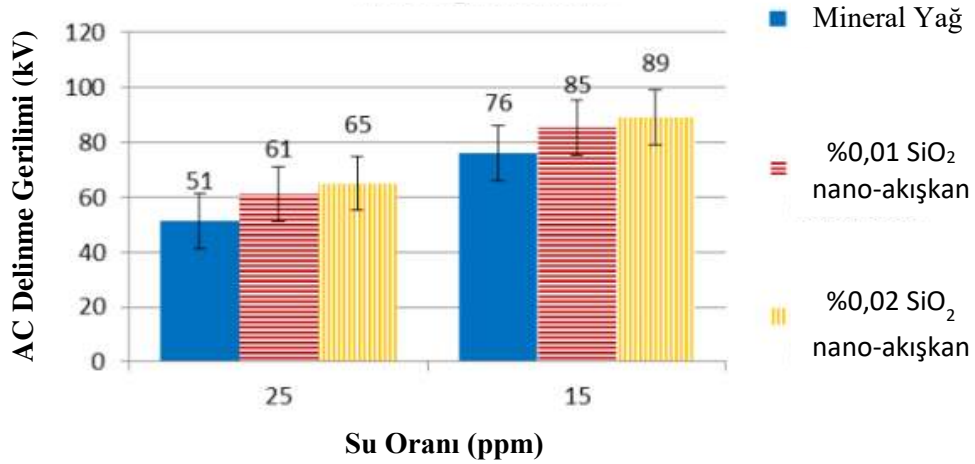
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, nano-akışkanların birçok yönden saf yalıtım yağlarından daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır. İyi bir yalıtkan yağ, yüksek yalıtım özelliğine ve yüksek ısı transfer özelliklerine sahip olmalıdır [29]. Literatürde, dielektrik nano-akışkanların delinme gerilimi ve pozitif yıldırım darbe gerilimi seviyelerini arttırdığı açıkça belirtilmektedir. Ek olarak dielektrik nano-akışkanlarda kısmi deşarjların olasılık ve genlik seviyeleri, saf dielektrik sıvılara göre daha düşüktür [30]. Dielektrik

nano-akışkanların ısı transfer kabiliyeti, baz sıvıya eklenen nanoparçacığın ısı iletkenliğine bağlı olarak değişir ve baz yalıtkan sıvılardan daha yüksektir [31], [32]. Parlama noktası, alevlenme noktası ve akma noktası gibi termo kimyasal özellikler de dielektrik akışkana nanoparçacıkların eklenmesiyle olumlu yönde etkilenir. Bununla birlikte, dielektrik nano-akışkanların bilinen bazı olumsuz yanları vardır. Isı transferini olumsuz etkileyen viskozite artışı bunlardan biridir. Öte yandan dielektrik nano-akışkanlarda stabilizasyon sorunları göz ardı edilemez. Uzun vadede meydana gelebilecek topaklanma ve çökeltme, hem nano-akışkanlardan beklenen pozitif özelliklerin yok olmasına hem de tüm yalıtım sisteminin dielektrik özelliklerinin bozulmasına neden olabilir [33], [34]. Güncel bir konu olan dielektrik nano-akışkanlar üzerine araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Dielektrik nano-akışkanların standart ürünler olarak geleneksel yalıtkan sıvıların yerini alması yıllar alabilir. Bunu başarmak için, alan transformatörlerinde dielektrik nano-akışkanların uzun vadeli performansı araştırılmalıdır. Literatürde selülozik izolasyon ve nano-akışkanlar arasındaki etkileşim hakkında yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu konu arıza olasılıkları ve yaşlanma sorunları ile birlikte ele alınmalıdır.

1.1.1. Nano-Akışkanlarda AC İzolasyon Delinme Gerilimi (BDV)

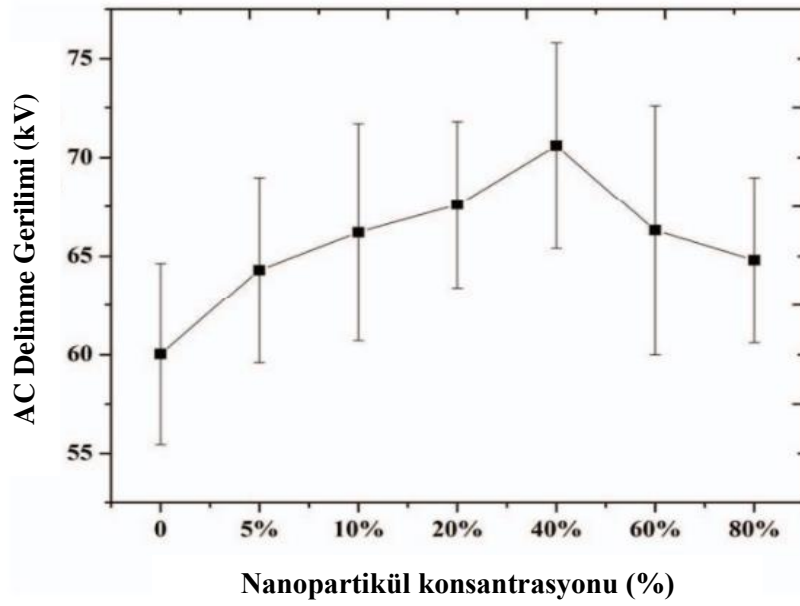
Transformatörlerde kullanılan yalıtım yağının izolasyon kalitesini yağın delinme gerilimi belirler. Yalıtım yağlarına elektrik alan uygulayarak yağın elektriksel strese dayanma kapasitesini ölçen çok sayıda prosedür kullanılır [35]. Literatürde başlıca ASTM D1816, ASTM D877, IEC 60156, BS 148 ve VDE 0370 standartları kullanılmaktadır. Bu standartlardan en çok tercih edileni IEC 60156 standart testidir. 2,5 mm elektrot mesafesi ve 2,5 kV/sn artan gerilim uygulanır [36]. Bir yağın delinme gerilimi, yağın içinde bulunan su molekülleri, asitlik oranı ve furanik bileşiklerin artması sonucu düşer [37], [38]. Özellikle yağın içerisindeki su molekül miktarının artması yağın delinme dayanım kalitesini bozmaktadır [39]. Ancak bazı çalışmalar, çözünmüş su seviyesinin yükselmesine bağlı olarak azalan yağın delinme gerilimi seviyesinin nano-akışkan sıvılarda saf yağlara göre çok daha düşük olduğunu göstermiştir [39]-[41]. Bu, eskimiş yalıtkan yağlarda nano partiküllerin kullanımı için bir tercih olabilir, çünkü eskitilmiş yağların izolasyon bozulma voltajı yeni yağdan çok daha düşüktür [42]. Öte yandan literatürdeki çalışmalar gösteriyor ki eskimiş yağlarda nanopartikül kullanımı delinme geriliminin arttığını göstermektedir [43]-[45]. Jin ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada yalıtım yağının su oranı arttıkça delinme geriliminin düştüğü görülmektedir. Fakat su

oranının fazla olduğu yağda dahi nanopartikül (%0,02) eklenmesi yaklaşık %25’lik bir artışa sebep olmuştur. Bu değer nem oranı daha düşük yağın iyileşmesinden daha büyüktür [46]. Yapılan bu çalışmanın sonuçları Şekil 1.4’de verilmektedir.



Şekil 1.4. Mineral yağ ve SiO₂ nano-akışkanının farklı su oranlarındaki delinme gerilimi sonuçları [46].

Nanopartiküllere fiziksel açıdan yaklaşırsak delinme gerilimi açısından yüksek konsantrasyonlara çıkıldıkça daha küçük nanopartiküllerin seçilmesi daha avantajlıdır [10]. Böylece küçük boyutlu nanopartiküllerle daha yüksek delinme dayanımları elde etmek mümkündür [37], [47]. Bunun sebebi aynı hacim konsantrasyonunda küçük boyutlu nanopartiküllerin daha büyük boyutlu nanopartiküllere göre toplam yüzey alanlarının daha fazla olmasıdır. Bu sebepten ötürü küçük boyutlu nanopartiküller daha fazla serbest elektron yakalayabilirler [48], [49]. Bununla birlikte, çeşidi ve boyutu fark etmeksizin belirli bir konsantrasyon seviyesinden sonra nanopartikül sayısının artırılması delinme gerilimi gelişimini durdurur ve azaltmaya başlar [50], [51]. Hatta belirli bir seviyeden sonra baz yağın delinme gerilimi voltajından da aşağıya düşmektedir [52]. Bunun nedeni partikül miktarının aşırı artışı topaklanma oluşumunu hızlandırması ve deşarj yollarını kısaltmasıdır [53]. Şekil 1.5’de bu durum açıkça görülmektedir. Yapılan çalışmada Fe₃O₄ partikülü %40’lık konsantrasyondan sonra delinme dayanımı gerilimi düşmektedir [54].



Şekil 1.5. Fe_3O_4 nano-akıışkanının delinme gerilimi sonuçları [54].

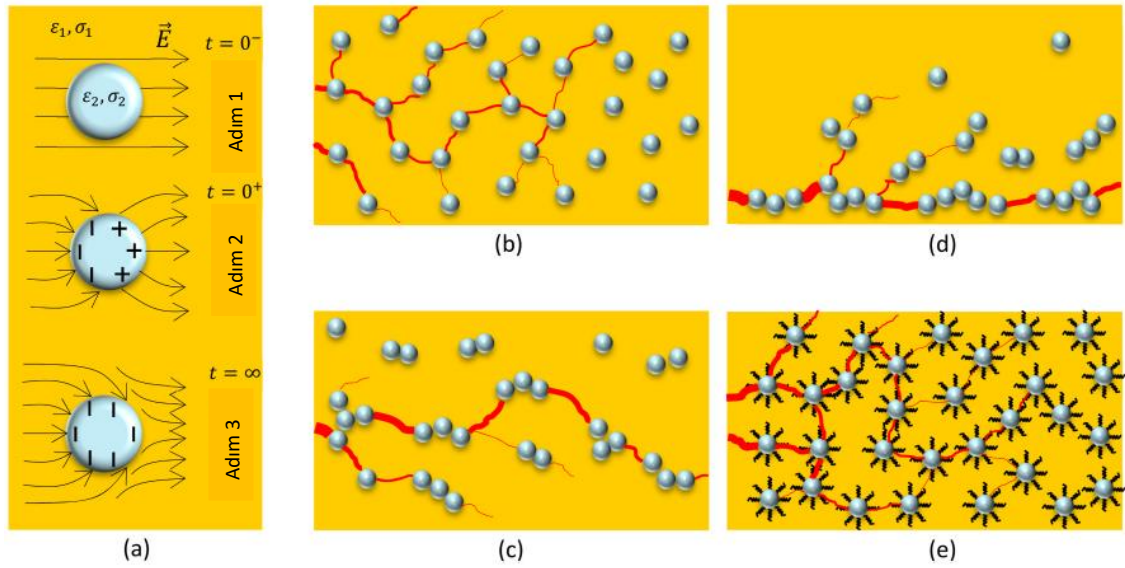
Çizelge 1.2’de literatürdeki bazı nanopartiküllerle ilgili yapılan delinme gerilimi çalışmalarının sonuçları verilmektedir. Bu tabloda farklı nanopartiküllerin, farklı yağlarda ve farklı fiziksel özelliklerde yapılan çalışmaların karşılaştırılması verilmiştir. Literatürde mineral yağ, ester yağlar ve birçok farklı bitkisel yağlara nanopartikül eklenerek araştırmalar yapılmıştır [55], [56], [58], [59]. Öte yandan nanopartiküllerin delinme gerilimine etkisi yağ çeşidine göre farklılık göstermektedir. Özellikle nanopartiküllerin mineral yağa olan olumlu yöndeki etki büyüklüğü ester ve silikon yağlara göre daha yüksektir [55]-[57]. Literatürdeki dikkat çeken çalışmalardan biri de Samy ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadır. Bu çalışmada TiO_2 , SiO_2 , ZrO_2 nanopartikülleri mineral yağ ile süspanse edilerek 2 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi uygulanmış ve 0,2 g/L konsantrasyonunda TiO_2 nanopartikülü %214’lük bir gelişim göstermiştir [58]. Khaled ve Beroual tarafından yapılan çalışmalar, azalan partikül boyutu ile BDV seviyesinin arttığını göstermektedir [56].

Çizelge 1.2. Baz yalıtım yağları ve çeşitli nano-akışkanlar için delinme gerilim karşılaştırmaları [10].

Nanopartikül	Elektrot Mesafesi	Baz Yağ	Süspansiyon Oranı	Tanecek Boyutu	Baz Yağın Delinme Gerilimi (kV)	Nano-akışkanın Delinme Gerilimi (kV)	Artış oran (%)	Ref. No.
Fe ₃ O ₄	2.5mm	Doğal Ester	0.4 g/L	50nm	68.77kV	73.63kV	7.07%	[55]
Al ₂ O ₃	2.5mm	Doğal Ester	0.05 g/L	13nm	68.77kV	73.93kV	7.50%	
SiO ₂	2.5mm	Doğal Ester	0.3 g/L	10-20nm	68.77kV	72.73kV	5.76%	
Fe ₃ O ₄	2.5mm	Sentetik Ester	0.4 g/L	50nm	60kV	88.67kV	47.80%	[56]
Al ₂ O ₃	2.5mm	Sentetik Ester	0.05 g/L	13nm	60kV	80.83kV	34.72%	
Al ₂ O ₃	2.5mm	Sentetik Ester	0.3 g/L	50nm	60kV	75.27kV	25.45%	
SiO ₂	2.5mm	Sentetik Ester	0.4 g/L	10-20nm	60kV	78.9kV	31.50%	
Al ₂ O ₃	2.5mm	Mineral Yağ	0.3 g/L	13nm	38.5kV	58.1kV	50.10%	[60]
Al ₂ O ₃	2.5mm	Mineral Yağ	0.3 g/L	50nm	38.5kV	65.1kV	69.10%	
TiO ₂	2.5mm	Mineral Yağ	0.03 Φ%	>100nm	50.5kV	64.3kV	28.00%	[61]
TiO ₂	2.5mm	Mineral Yağ	0.03 Φ%	>100nm	50.5kV	74.6kV	47.72%	
BaTiO ₃	2.5mm	Mineral Yağ	0.03 Φ%	>100nm	50.5kV	69.7kV	38.00%	
Al ₂ O ₃	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	85.8kV	12.90%	[62]
Fe ₃ O ₄	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	84.1kV	10.65%	
Si ₃ N ₄	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	83.5kV	9.86%	
ZrO ₂	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	81.5kV	9.80%	
TiO ₂	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	80.1kV	5.40%	
AlN	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	80.2kV	5.50%	
SiC	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	79.5kV	4.60%	
ZnO	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	79.3kV	4.30%	
SnO ₂	2mm	Mineral Yağ	0.1 g/L	-	76kV	79.1kV	4.00%	
TiO ₂	2mm	Mineral Yağ	0.2 g/L	25 nm	12kV	37.68kV	214.00%	[58]
SiO ₂	2mm	Mineral Yağ	0.2 g/L	25 nm	12kV	29.88kV	149.00%	
ZrO ₂	2mm	Mineral Yağ	0.2 g/L	25 nm	12kV	32.88kV	174.00%	

Nanopartikülün yağ içerisindeki topaklanmanın artışı kararlılığı bozmakla beraber çökmeyi hızlandırır. Tüm bu süreçler yağın delinme gerilimini düşürmektedir. Öte yandan bu durum nanopartikülün elektrodinamik yapısı incelenerek açıklanabilir. Normalde sistem içerisindeki saf yağ, elektrik alana maruz kalınca elektrik alan çizgileri düz ve eşit dağılmıştır [63]. Yağın içerisine nanopartikül girdiğinde, nanopartikülün dielektrik katsayısı yağinkinden farklı olduğu için ortamdaki elektrik alanın stabilitesi kaybolur ve elektrodinamik yapı değişir [64]. Şekil 1.6 (a)'da elektrik alanın nanopartikül

üzerindeki davranışı gösterilmektedir [10]. Nanopartiküller üzerinde yoğunlaşan alan çizgileri yüzeylerinde polarizasyona neden olur. Polarize olan nanopartikülün pozitif yüzeyi ortamdaki hareketli elektronları yakalama eğilimindedir [63]. Böylece nanopartikül negatif elektronlar için bir elektron tuzağına dönüşür, etrafındaki yükleri ve yayılma hızlarını azaltır [65], [66]. Nanopartiküller negatif yüklü yavaş taşıyıcılara dönüşür [67], [68] ve son aşamada negatif yükler nanopartiküllerin kritik noktaya ulaşmasını sağlar [69], [70]. Bu olgu tek bir nanopatikül için belirtilen şekilde gerçekleşir.

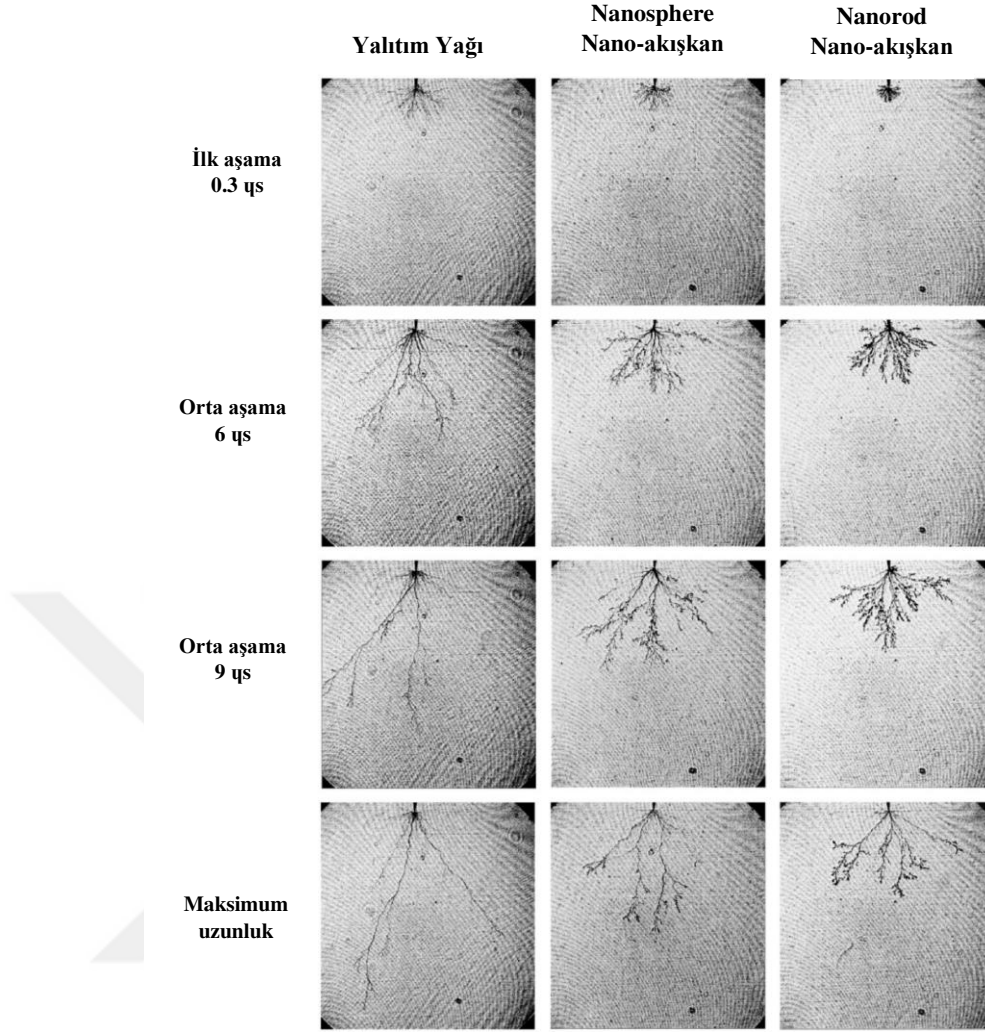


Şekil 1.6. Yalıtım yağının içerisindeki nanopartiküllerin çeşitli elektrodinamik davranışları [10].

Öte yandan şekil 1.6 (b)'de baz yağın içerisinde stabil olarak süspansiyon haldeki nanopartiküllerin deşarj elektronlarının hareketleri gösterilmiştir. Böyle bir durumda hareketli elektronlar, elektrik alan tarafından polarize edilen nanopartikülün pozitif yüzeyine doğru hareket eder [64]. Nanopartiküller kararlı bir şekilde dağılım gösterdiklerinde doğrusal deşarjı geciktirerek dallanmayı artırmaktadır [71]. Deşarj yolunun uzaması hem deşarja başlama süresini uzatmakta hem de deşarj gerilimini artırmaktadır. Şekil 1.6 (c)'de ise nanopartiküllerin yağın içerisindeki topaklanma oluşumu gösterilmektedir. Zaman içerisinde nano tanecikler kendi aralarında çarpışarak birbirlerine yapışmaktadır [72]. Yağ-nanopartikül süspansiyonun içerisindeki topaklanma oluşumu artıkça stabil olan süspansiyona oranla dallanma azalır ve deşarj

yolu kısalmaktadır. Şekil 1.6 (d)'de gösterilen topaklanma oluşumunun sonucu olarak nanopartiküllerin kütlesinin ve hacminin artması tortu oluşumunu ve çökelme problemini ortaya çıkarmaktadır [74], [75]. Süspansiyonun hazırlık aşamasında stabilizasyon ve karışım proseslerinin yeterli yapılmaması zamanla topaklanma oluşumunun ana faktörleridir [72], [73]. Ancak yine de bu prosesler çökelme problemine kalıcı çözüm değildir. Literatürde nanopartiküllerin topaklanma oluşumu ve buna bağlı olarak çökelme problemi için çalışmalar yapılmıştır [48]. Topaklanmayı önlemek için sürfaktan (yüzey aktif madde) kullanımı önerilmiştir. Şekil 1.6 (e)'de görüldüğü gibi yüzey aktif madde kullanımı nanopartiküllerin yüzeylerine yapışarak partiküllerin birbirleri ile birleşip topaklanma oluşumunu engellemekte ve süspansiyonun uzun bir süre kararlı kalmasını sağlamaktadır [76], [77]. Öte yandan yalıtım yağına eklenen nanopartikül yeterli miktarda olmalıdır aksi takdirde verimli bir biçimde katkı sağlayamaz. Fazla eklenmesi de topaklanma oluşumunu artırır.

Şekil 1.7 'de yalıtım yağı, nanoküre nano-akışkanı ve nanorod nano-akışkanı için flama yayılımları üzerine deneysel bir çalışmanın görüntüsü verilmiştir. Yapılan bu çalışmada araştırmacılar bir iğne elektrot aracılığıyla 75 kV uygulamışlar ve maksimum uzunluk sınırına ulaşılan kadar bu bölgedeki değişimi 3 μ s aralıklarla takip etmişlerdir [78]. Yalıtım ortamında elektrotlar arasından çıkan flamanın hızı delinme dayanım düzeyi hakkında önemli fikirler vermiştir. Yapılan çalışmada flama yayılımının nano-akışkanlarda geleneksel yağlardan daha yavaş olduğunu göstermiştir. Ayrıca nano-akışkanlarda flamaların yanal dallanmalarının sayısı daha fazla ve kalınken, uzunlukları daha kısadır [78]-[80]. Şekil 1.7 'de flamaların maksimum uzunluk safhası incelendiğinde özellikle nanorod nano-akışkanının flama boyu mineral yağın flama boyunun neredeyse yarısından bile azdır. Ayrıca dallanmaların yanal dağılımı mineral yağda çok az iken nano-akışkanlarda oldukça fazla olduğu görülmektedir. Öte yandan mineral yağın flama yönün dikey oluşu dikkat çekmektedir. Flama yayılımı dar bir ortamda yavaşladıkça elektrik yükü yoğunluğu artar ancak zıt kutuptan uzaklaşır. Bu nedenle delinme gerilimi değeri ve oluşum süresi artar.



Şekil 1.7. Transformatör yağı nanosfer nano-akışkanı ve nanorod nano-akışkanı için pozitif akış yayılım görüntüleri [78].

1.1.2. Nano-Akışkanlarda Termal İletkenlik

Transformatörlerin nüve ve sargılarında kayıplardan kaynaklı ısı oluşur. Yalıtım yağlarının transformatörlerdeki kullanım amaçlarından biri de bu oluşan ısıyı transfer ederek ortamı soğutmaktır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde nanopartikül katkılı yağların ısı iletimlerinin saf yağlardan daha iyi olduğu görülmektedir [82]. Özellikle metal bileşikli nanopartiküllerin ısı iletkenliğinin yüksek olduğu düşünüldüğünde, nanopartikül katkılı süspansiyonların ısı iletkenliğinin saf yağa göre daha yüksek olması beklenir. Araştırmalar nanopartiküllerin eklenmesinin çok geniş bir aralıkta saf yağların termal iletkenliğini geliştirdiğini göstermektedir [83]-[85]. Ancak ısı iletkenlikteki artış,

sıcak ve soğuk noktalar arasındaki ısı transfer verimini aynı oranda yansıtmamaktadır [86]-[88]. Örneğin güç transformatörleri üzerinde saf yağ ve nano-akışkanlar ile yapılan çalışmalarda, nano-akışkanın ısı iletkenliği saf yağdan daha fazladır. Fakat en sıcak nokta sıcaklıklarındaki farklılıklar sadece birkaç derece ile sınırlı kalmıştır [29], [88]. Bunun nedenlerinden biri nanopartiküllerin eklenmesiyle akışkanın viskozitesinin artması olabilir. Bununla birlikte özellikle en sıcak bölgelerde, transformatörler için birkaç derecelik sıcaklık düşüşü bile çok önemlidir. Çünkü- transformatörün ısısı yaklaşık olarak 7°C sıcaklık artışında hizmet ömrünün yarıya indiği bilinmektedir [89]. Transformatörün hacimsel boyutunun artması yerel sıcaklık farklarını daha fazla artıracağından nanopartikül kullanmanın avantajı daha iyi anlaşılabilir. Bu anlamda çok daha fazla saha uygulaması ve doğrulaması gerekmektedir. Düşük hacimli konsantrasyonlarda termal iletkenlik sıcaklıkla doğrusal olarak değişir. Ancak nanopartikül sayısı sürekli arttığında bu eğride sapmaların olduğu belirtilmektedir [90], [91]. Bu durum topaklanma oluşumu ile açıklanmaktadır. Topaklanma oluşumu meydana geldiğinde ve arttığında nanopartiküllerin toplam yüzey alanı azalır ve bununla doğru orantılı olarak ısı transferi de azalır [92]. Yüzey aktif maddelerin kullanımı topaklanmayı geciktirdiği için termal iletkenliğin daha stabil kalmasına yardımcı olur. Ayrıca daha küçük boyutlu nanopartiküller aynı hacim konsantrasyonlarında büyük boyutlu nanopartiküllere kıyasla toplam yüzey alanının daha fazla olması nedeniyle daha iyi bir termal iletim özelliği sağlar [93], [94].

Literatürde farklı nano parçacık türleri için hazırlanan çeşitli konsantrasyonlarda ısı iletkenlik artışları Çizelge 1.3'de yüzde olarak verilmiştir. Sıcaklık artışı ile ısı iletkenlik arasındaki negatif korelasyonun nano katkılı yağlarda geçerli olduğu anlaşılmaktadır. Sentetik ve doğal esterlerin ısı iletkenliği mineral yağlardan daha yüksektir. Bu nedenle, bu baz akışkanlara nanopartiküllerin eklenmesi, mineral yağlarda olduğu gibi benzer şekilde termal iletkenliklerini artırır. Ancak bu doğal ester bazlı nano-akışkanların ve sentetik ester bazlı nano-akışkanların mineral yağlardan daha iyi ısı yayma kabiliyetine sahip olduğu anlamına gelmez. Çünkü belirleyici faktör baz akışkanın viskozite değeridir. Singh ve Kundan yaptıkları çalışmada nano-akışkanların sıcaklık artışıyla termal iletimin arttığını belirtmişlerdir. Ancak belirli bir sıcaklıktan sonra nanopartiküllerin Brownian hareketinden kaynaklanabilecek sapmaların olduğunu gözlemlenmiştir [91]. Jacob J. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Al_2O_3 nanopartikülünü mineral yağ ve doğal esterle süspanse ederek termal iletimini incelemişlerdir. Ester yağlar ile mineral yağlar

kıyaslandığında esterlerin termal iletimi daha iyidir. Ancak nanopartikül eklendiğinde mineral yağlardaki yüzde artış doğal esterlerinkinden daha fazladır. Buna rağmen %0,1 konsantrasyon seviyesinde doğal ester-nano süspansiyonu saf doğal estere göre %14,6'lık bir gelişim elde edilmiştir [72]. Bir diğer çalışmada Thomas ve Hudedmani sentetik estere nanopartikül ekleyerek 0.005 %wt'lik fraksiyonda %30,26'lık bir gelişme kaydetmiştir [95].

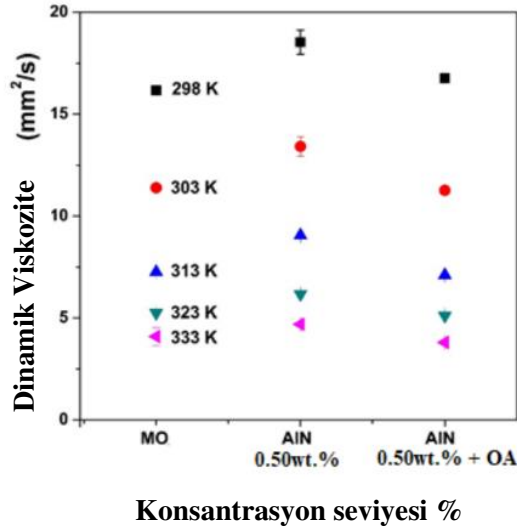
Çizelge 1.3. Baz akışkan ve çeşitli nano-akışkanlar için termal iletkenlik karşılaştırmaları [10].

Nanopartikül	Baz yağ	Tanecik boyutu	Süspansiyon oranı	Sıcaklık (°C)	Baz yağın termal iletkenliği (W/mk)	Nano-akışkanın termal iletkenliği (W/mk)	Yüzde değişim (%)	Ref. No.
TiO ₂	Mineral Yağ	17.6 nm	0.075 Φ%	-	0.3714	0.3758	1.20%	[81]
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	20nm	0.5 Φ%	20	0.116	0.122	5.20%	[91]
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	20nm	0.5 Φ%	30	0.125	0.135	8.00%	
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	20nm	0.5 Φ%	50	0.159	0.17	6.90%	
MWCNT	Mineral Yağ	10-20 nm	0.01 wt%	20	0.109	0.110	0.90%	[96]
MWCNT	Mineral Yağ	10-20 nm	0.01 wt%	40	0.107	0.111	3.74%	
MWCNT	Mineral Yağ	10-20 nm	0.01 wt%	60	0.104	0.112	7.70%	
MWCNT	Mineral Yağ	10-20 nm	0.001wt%	20	0.109	0.109	0.0%	
MWCNT	Mineral Yağ	10-20 nm	0.001wt%	40	0.107	0.1095	2.34%	
MWCNT	Mineral Yağ	10-20 nm	0.001wt%	60	0.104	0.11	5.77%	
SiO ₂	Mineral Yağ	10-20 nm	0.1 wt%	40	0.1097	0.108	-1.60%	[46]
AlN	Mineral Yağ	40nm	0.159 vol%	20	0.1052	0.1108	5.30%	[97]
AlN	Mineral Yağ	40nm	0.159 vol%	70	0.0998	0.1064	6.60%	
AlN	Mineral Yağ	40nm	0.079 vol%	20	0.1052	0.1089	3.50%	
AlN	Mineral Yağ	40nm	0.079 vol%	70	0.0998	0.104	4.20%	
CCTO	Sentetik Ester	50-100nm	0.005 wt%	RT	0.152	0.198	30.26%	[95]
BCZT	Sentetik Ester	50-100nm	0.005 wt%	RT	0.152	0.198	30.26%	
TiO ₂	Mineral Yağ	21nm	0.816 g/L	40	0.132	0.135	2.27%	[98]
TiO ₂	Mineral Yağ	21nm	0.816 g/L	80	0.127	0.129	1.57%	
TiO ₂	Sentetik Ester	21nm	0.816 g/L	40	0.156	0.160	2.56%	
TiO ₂	Sentetik Ester	21nm	0.816 g/L	80	0.151	0.154	1.99%	
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	60nm	0.04 wt%	-	0.165	0.177	7.27%	[72]
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	60nm	0.1 wt%	-	0.165	0.180	9.09%	
Al ₂ O ₃	Doğal Ester	60nm	0.04 wt%	-	0.174	0.185	6.32%	
Al ₂ O ₃	Doğal Ester	60nm	0.1 wt%	-	0.173	0.195	14.6%	

1.1.3. Nano-Akışkanlarda Viskozite

Viskozite seviyesi soğutma amacıyla kullanılan tüm akışkanlar için kritik öneme sahiptir [96], [99]. Viskozitesi düşük olan sıvılar ekipmanın verimli çalışmasını sağlar ve soğutma performansı iyi olduğu için hizmet ömrünü uzatır [100]. Güç transformatörlerinde kullanılan yalıtım sıvıları ısıyı özellikle taşınım ve iletim yoluyla transfer eder. Kullanılan akışkanın viskozitesi taşınım ısı transfer kabiliyetini doğrudan etkiler ve mümkün olduğunca düşük olması istenir [101]. Literatürde aksine çalışmalar olsa da çoğu çalışmada baz yağa nanopartiküllerin eklenmesi genel olarak karışım yoğunluğunu ve viskoziteyi artırır [102], [103]. Bu durum normalde ısı transfer kabiliyetini olumsuz etkileyeceği için istenmemektedir. Ancak literatürdeki çalışmalar nanopartiküllerin tip ve boyutuna bağlı olarak nano-akışkanların termal iletkenliğinin arttığını göstermiştir [104], [105]. Dolayısıyla viskozitedeki olumsuz durum ile ısı iletkenlikteki artışın birbiri arasındaki ters ilişki nanopartikül eklenmesiyle artan viskoziteyi tolere edebilir. Bu bağlamda viskozite değerindeki artışa rağmen nano-akışkanlar, iyi dielektrik özelliklerinden dolayı baz yağlardan daha avantajlıdır. Normalde baz yağların viskozite değeri sıcaklık artışına bağlı olarak azalmaktadır. Literatürde sıcaklığa bağlı olarak baz yağ gibi nano-akışkanlarda da benzer viskozite azalma eğilimleri gözlemlenmiştir [106]. Yüzey aktif maddelerin nano-akışkanlarda kullanılmasının viskoziteyi azalttığı birçok çalışmada belirtilmiştir [101], [107]. İlgili bir çalışma alüminyum nitrit nano parçacıkları baz yağda (%0,5 ağırlık) süspanse edilmiş ve yüzey aktif madde olarak tercih edilen oleik asidin dinamik viskoziteyi önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir [107]. Bu çalışmanın farklı sıcaklıklarda tekrarlanan test sonuçları Şekil 1.8'de gösterilmiştir.

Nano parçacıkların toplam yüzey alanı yüzey aktif maddenin etkisiyle birbirlerinden ayrılarak genişler [108], [109]. Böylece nano-akışkanın ısı iletkenliği artar. Literatürde farklı baz akışkanlar ve nanoparçacık süspanسیونları için viskozite değişikliklerini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır [110].



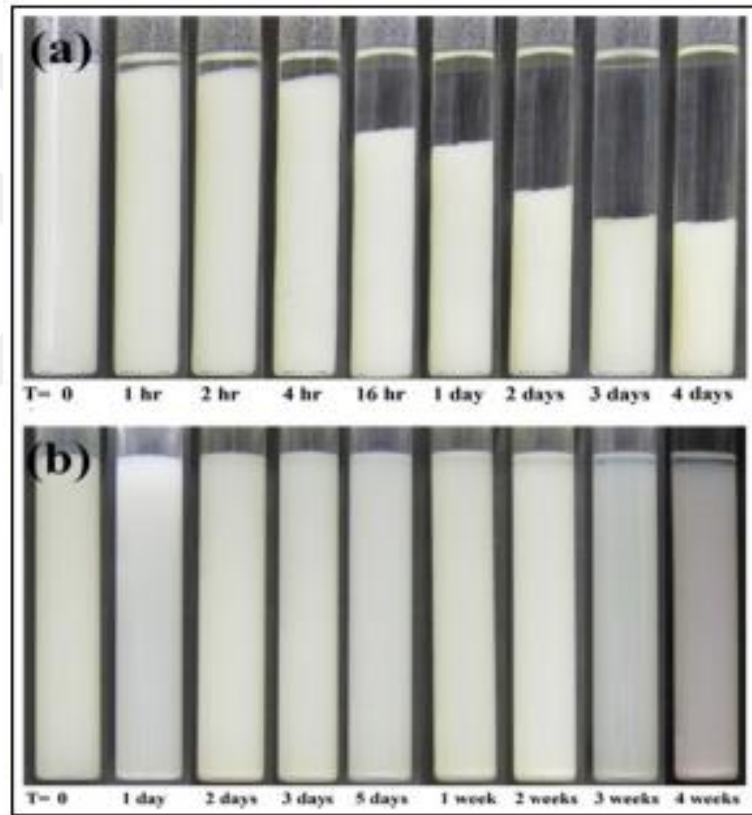
Şekil 1.8. Mineral yağın, ağırlıkça % 0.50AlN nano-akışkanın ve oleik asit eklenmiş ağırlıkça %0.50 AlN nano-akışkanın çeşitli sıcaklıklarda ölçülen dinamik viskozitesi [107].

Ayrıca doğal esterler üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda yoğunlaşmıştır [65], [111], [112]. Bilindiği gibi doğal esterler zaten mineral yağlardan çok daha fazla viskoziteye sahiptir. Benzer şekilde doğal ester bazlı nano-akışkanlarda da nanopartikül sayısına bağlı olarak viskozitenin arttığı gözlemlenmiştir [113]. Ancak doğal ester bazlı nano-akışkanlardaki viskozite artışı mutlak değer olarak mineral yağ bazlı nano-akışkanlara göre daha yüksektir. Fakat orantısal olarak düşünüldüğünde daha azdır. Bu aynı zamanda yüksek viskoziteli sentetik esterler için de geçerlidir ve Çizelge 1.4'deki çalışmalarda bu durum açıkça görülmektedir. Ayrıca Çizelge 1.4'de baz yağda asılı kalan nanoparçacıkların sayısı ile viskozite arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1.4. Baz akışkan ve çeşitli nano-akışkanlar için viskozite karşılaştırmaları [10].

Nanopartikül	Baz Yağ	Tanecik Boyutu	Süspansiyon Oranı	Sıcaklık (°C)	Baz Yağın Viskozitesi	Nano-akışkanın Viskozitesi	Değişim (%)	Ref. No.
AlN	Mineral Yağ	40nm	0.1 wt%	60	3.75mm ² /s	4mm ² /s	6.67%	[107]
AlN	Mineral Yağ	40nm	0.1 wt%	40	7.5mm ² /s	7.6mm ² /s	1.33%	
AlN	Mineral Yağ	40nm	0.5 wt%	60	3.75mm ² /s	4.575mm ² /s	22.00%	
AlN	Mineral Yağ	40nm	0.5 wt%	40	7.5mm ² /s	9mm ² /s	20.00%	
TiO ₂	Mineral Yağ	10-30nm	0.1 wt%	60	3.75mm ² /s	4mm ² /s	6.67%	
TiO ₂	Mineral Yağ	10-30nm	0.1 wt%	40	7.5mm ² /s	7.75mm ² /s	3.33%	
TiO ₂	Mineral Yağ	10-30nm	0.5 wt%	60	3.75mm ² /s	4.5mm ² /s	20.00%	
TiO ₂	Mineral Yağ	10-30nm	0.5 wt%	40	7.5mm ² /s	8.5mm ² /s	13.33%	
SiO ₂	Mineral Yağ	10-20 nm	0.01 wt%	25	11.5mm ² /s	14mm ² /s	21.70%	[44]
SiO ₂	Mineral Yağ	10-20 nm	0.01 wt%	40	9.2mm ² /s	12mm ² /s	30.43%	
SiO ₂	Mineral Yağ	12nm	0.05 wt%	40	9.433mPas	9.573mPas	1.48%	[77]
SiO ₂	Mineral Yağ	12nm	0.1 wt%	40	9.433mPas	11.863mPas	25.76%	
SiO ₂	Mineral Yağ	12nm	0.05 wt%	60	6.915mPas	7.154mPas	3.46%	
SiO ₂	Mineral Yağ	12nm	0.1 wt%	60	6.915mPas	8.833mPas	27.74%	
SiO ₂	Mineral Yağ	12nm	0.05 wt%	100	2.045mPas	2.235mPas	9.30%	
SiO ₂	Mineral Yağ	12nm	0.1 wt%	100	2.045mPas	3.016mPas	47.48%	
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	20nm	0.1 Φ%	20	13mm ² /s	14.5mm ² /s	11.54%	[91]
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	20nm	0.5 Φ%	20	13mm ² /s	19.5mm ² /s	50%	
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	20nm	0.1 Φ%	50	4mm ² /s	5mm ² /s	25%	
Al ₂ O ₃	Mineral Yağ	20nm	0.5 Φ%	50	4mm ² /s	8mm ² /s	100%	
SiO ₂	Sentetik Ester	50nm	0.1 Φ%	25	56.4mm ² /s	60.7mm ² /s	8%	[119]
SiO ₂	Sentetik Ester	50nm	0.5 Φ%	25	56.4mm ² /s	80.9mm ² /s	43%	
Fe ₃ O ₄	Doğal Ester	-	0.1 g/L	-	44mm ² /s	44.55mm ² /s	1%	[120]
Fe ₃ O ₄	Doğal Ester	-	0.2 g/L	-	44mm ² /s	44.75mm ² /s	2%	
Fe ₃ O ₄	Doğal Ester	-	0.4 g/L	-	44mm ² /s	44.9mm ² /s	2%	
TiO ₂	Doğal Ester	30nm	0.01 vol%	-	73.58mPas	75.78mPas	3%	[121]
TiO ₂	Doğal Ester	30nm	0.05 vol%	-	73.58mPas	79.38mPas	8%	
TiO ₂	Doğal Ester	30nm	0.09 vol%	-	73.58mPas	83.54mPas	14%	
TiO ₂	Doğal Ester	45nm	0.04 wt%	20	66mPas	73.4mPas	11%	[108]
ZnO	Doğal Ester	60nm	0.04 wt%	20	66mPas	80mPas	21%	
TiO ₂	Doğal Ester	45nm	0.04 wt%	40	37mPas	40 mPas	8%	
ZnO	Doğal Ester	60nm	0.04 wt%	40	37mPas	40 mPas	8%	
TiO ₂	Sentetik Ester	21nm	0.816 g/L	40	28.25mm ² /s	28.97mm ² /s	3%	[98]
TiO ₂	Sentetik Ester	21nm	0.816 g/L	60	14.02mm ² /s	14.86mm ² /s	6%	
TiO ₂	Sentetik Ester	21nm	0.816 g/L	80	8.11mm ² /s	8.37mm ² /s	3%	

Şekil 1.9’da yüzey aktif maddenin topaklanma ve tortulaşma etkisine dair çalışma görseli verilmiştir [114]. Yapılan çalışmada nano-akışkana yüzey aktif madde kullanarak ve kullanmayarak belirli zaman aralıklarında çökelme ve topaklanma gözlemlenmiştir. Şekil 1.9 (a)’da yüzey aktif madde kullanmadan nano-akışkanlardaki topaklanma oluşumu ve akabinde çökelme oluşumu açıkça gözlemlenmektedir. Dört saatten sonra tortu oluşumu ve çökelme başlamaktadır. Öte yandan Şekil 1.9 (b)’de görüldüğü gibi yüzey aktif madde kullanımı şaşırtıcı sonuçlar verebilmektedir. Yüzey aktif madde kullanımı nano-akışkanda dört hafta sonunda yüksek kararlılık göstermektedir. Tortulaşma ise daha az oluşmaktadır.



Şekil 1.9. Nano-akışkanlardaki tortulaşma ve topaklanma olayının resimli gösterimi [114].

2. MATERYAL VE METOT

2.1. MİNERAL YAĞ

Tez çalışmasında kullanılan yalıtım yağı mineral bazlı Hyvolt Power Oil mineral yağıdır. Uzun yıllardır dağıtım transformatörlerinde, güç transformatörlerinde ve oto transformatörlerde kullanılan bir yağdır. Transformatörlerde kullanılan yalıtım yağlarının içerisindeki su miktarı ve yabancı partikül varlığı delinme geriliminde önemli rol oynamaktadır. Yalıtım yağları içeriğindeki su miktarından arındırılmak için tretman edildikten hemen sonra şişelenmiştir. Bu sebepten dolayı su oranı düşüktür. Çizelge 2.1’de kullanılan petrol bazlı mineral yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri standartları ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 2.1. Mineral yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellikler	Test Metodu	Değer
Yoğunluk @20 °C, g/mL, max.	ISO 3675/ISO 12185	0,895
Renk (ASTM), max.	ASTM D 6045	0,5
Kinematik viskozite@ 40 °C, mm ² /s, max.	ISO 3104	12,0
Kinematik viskozite @- 30 °C, mm ² /s, max.	ISO 3104	1800
Alevlenme Noktası, min.	ISO 2719	135
Donma Noktası, °C, max.	ISO 3016	-40
Su İçeriği, mg/kg, max.	IEC 60814	20
Voltage, kV, min.	IEC 60156	30
Arayüz Voltajı, mN/m, min.	EN 14210/ASTM D 971	40
DDF@90°C, max.	IEC 60247/IEC 61620	0,005
Toplam Asit Sayısı, mgKOH/g, max.	IEC 62021-1/-2	0,01
Toplam Kükürt İçeriği, %, max.	ISO 14596	0,05

2.2. NANOPARTİKÜL

Bu tez çalışmasında Bn (bor nitrür), Al₂O₃ (alüminyum dioksit), SiO₂ (silikon dioksit) ve MgO (magnezyum oksit) olmak üzere dört farklı nanopartikül kullanılmıştır. Nanopartiküller seçilirken literatür araştırması yapılmıştır ve literatürdeki birçok nanopartikül arasından etkinlikleri yüksek olanlar tercih edilmiştir. Öte yandan nanopartiküllerin saflık dereceleri %98,5 ‘den yüksek olanlar kullanılmıştır. Nanopartiküllerin tanecik boyutlarının küçük olması mineral yağın delinme geriliminde

daha olumlu sonuç verdiği görülmektedir. Bu sebeple mümkün oldukça küçük tanecikli nanopartiküller tercih edilmiştir. Ayrıca sadece delinme gerilimi değil termal iletimi ve viskoziteye olumlu etkileri tercih edilirken göz önünde bulundurulmuştur. Çizelge 2.2’de kullanılan nanopartiküllerin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Kullanılan nanopartiküllerin fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikler	BN	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO
Safılık	99.85+%	99.99+%	98.5+%	98.5+%
Tanecik Boyutu	65-75 nm	45 nm	55-75 nm	18 nm
Renk	Beyaz	Beyaz	Beyaz	Beyaz
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	-	25,0-45,0	150-550	>65
Özkütle (g/cm ³)	2,52	4,5	2,2	3,6
Elektriksel özellik	Yalıtkan	Yarı İletken	Yalıtkan	Yalıtkan

2.3. KARIŞTIRMA METODU

Nanopartiküller, baz yağa ısı iletkenlik ve yalıtım katkısını verebilmek için eşit dağılmış bir şekilde süspanse olması gerekir. Bunun için numune hazırlık aşaması ve stabilizasyonu çok önemlidir [10], [115]. Literatürde birçok karıştırma yöntemi bulunmaktadır ancak standartlaşmış bir karışım metodu yoktur. Bunlar tek-adım (one-step) ve iki-adım (two-step) karışım metodları olarak gruplandırılabilir. Fakat bu yöntemlerde kendi içerisinde standart değildir ve farklı varyasyonları bulunmaktadır. Şekil 2.1’de literatürde sıkça kullanılan karıştırıcıların görselleri verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.1. (a) manyetik karıştırıcı, (b) ultrasonik karıştırıcı, (c) ultrasonik banyo.

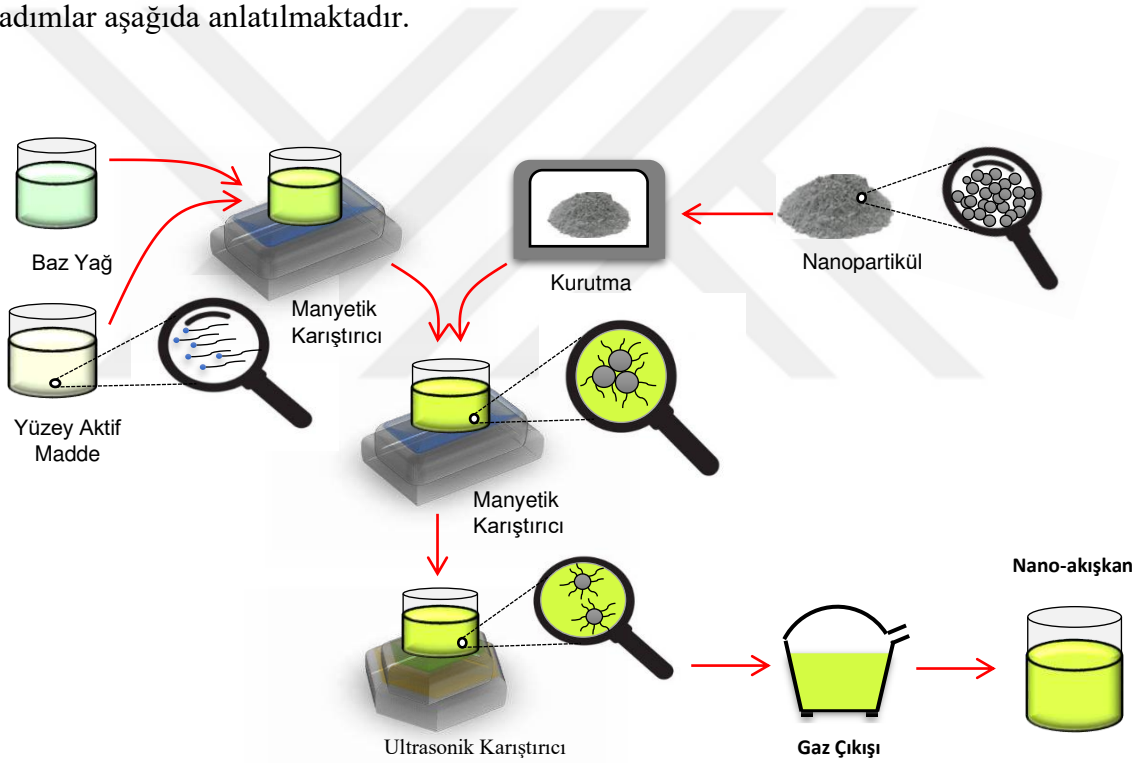
2.3.1. Tek-Adım (One-Step) Karıştırma Metodu

Nano-akışkanlar; su, etilen glikol, propilen glikol, motor yağı, transformatör yalıtım yağları vb. gibi baz akışkanlara metal, metal oksitler ve nanometre boyutunda partiküllerin karıştırılması ile üretilir [101]. Tek adımlı teknikte nano parçacık üretimi ve baz sıvıda süspansiyon işlemleri eş zamanlı olarak gerçekleştirilir. Nanopartiküller fiziksel buhar biriktirme yöntemi veya sıvı kimyasal yöntem kullanılarak hazırlanır. Böylece amaç, nanopartiküllerin kurutulması, depolanması ve taşınması gibi topaklanmaya neden olan fazlar olmaksızın üretim aşamasında nano-akışkan stabilizasyonu sağlamaktır [116], [117]. Tek adımlı yöntem buhar fazından nanofaz tozlarının yoğunlaştırılmasını içerir. Bu teknik metalik bazlı nano-akışkanlarda

oksidasyonun önlenmesi istendiğinde uygulanır. Tek adımlı teknik iki adımlı tekniğe göre daha maliyetlidir [118]. Bu nedenle iki aşamalı tekniğin kullanımı literatürde daha yaygın olarak bulunmaktadır.

2.3.2. İki-Adım (Two-Step) Karıştırma Metodu

Two-step karıştırma yöntemi one-step karıştırma yöntemine oranla daha kolay bir işlemdir. Yalıtım yağının içerisindeki su miktarı arttıkça yağın kalitesi bozulur. Var olan bu su miktarını minimuma düşürmek için yalıtım yağının tasfiye (treatment) etmek son derece önemlidir. Bu sebepten ötürü karıştırma işlemine başlamadan önce yalıtım yağının tasfiye edilmiş olması yapılan deneyin doğruluğunu artıran bir etkidir. Şekil 2.2’de iki-adım karıştırma yönteminin akış diyagramı verilmektedir. İki-adım metodunda izlenen adımlar aşağıda anlatılmaktadır.

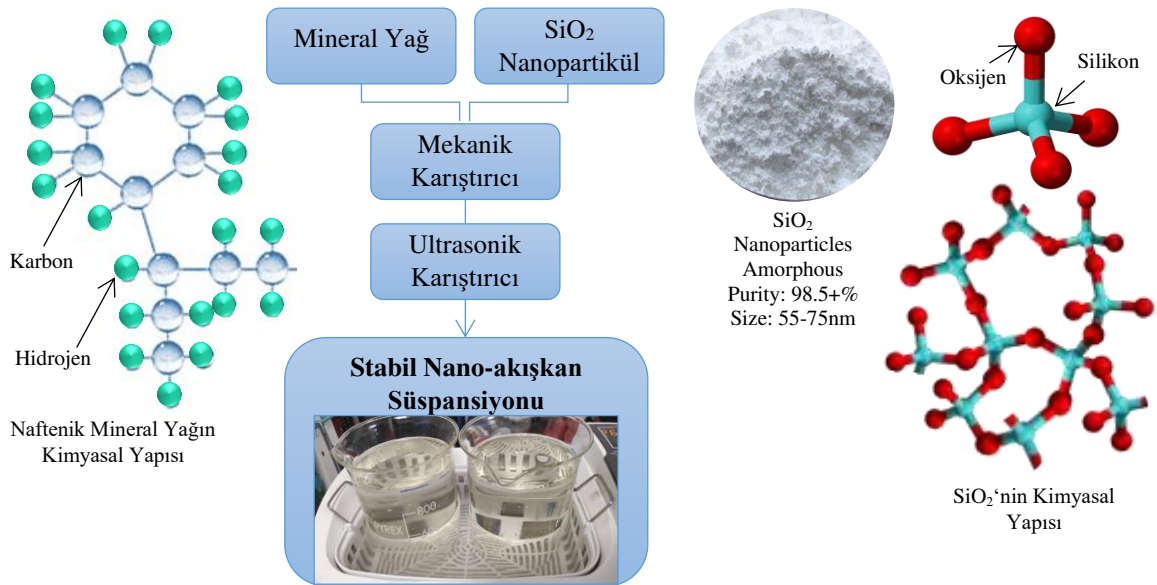


Şekil 2.2. İki-adım karıştırma metodu akış diyagramı [10].

- Nanopartiküller içerisindeki su moleküllerinden arındırılmak için kurutma işlemine tabi tutulur.
- Yüzey aktif madde kullanılacaksa önce baz yağ ile manyetik karıştırıcıda karıştırılır.
- Yüzey aktif madde ile karıştırılan yalıtım yağı nanopartikül ile manyetik karıştırıcıda karıştırılır.
- Manyetik karıştırıcıdan çıkan nano-akışkan ultrasonik karıştırıcıda karıştırılır.
- Karışım işlemleri bittikten sonra karıştırma esnasında oluşan gazlar bertaraf edilir.

Bu çalışmada two-step karıştırma yöntemi kullanılmıştır. Şekil 2.3’de akış diyagramı verilmiştir ve işlem sırası aşağıda anlatıldığı gibidir.

- Numuneler hazırlanırken nanopartiküller konsantrasyon oranına göre hassas terazide tartıldı.
- Mineral yağ ve nanopartikül deney kabına koyularak steril bir çubuk ile mekanik karışım yapıldı.
- Mekanik karışımın ardından ultrasonik banyoda 40 °C de doksan dakika boyunca karıştırıldı.



Şekil 2.3. Tez çalışmasında uygulanan karıştırma metodu akış diyagramı.



Şekil 2.4. Hassas terazi.

Şekil 2.5’ de numunelere yapılan ultrasonik banyo ile karıştırma işleminin görüntüleri verilmiştir. Cihaz 5 dakikadan 45 dakikaya kadar durmaksızın karıştırma işlemi yapılabilmektedir. Yapılan deneyde haznedeki su sıcaklığı 40°C’ ye ayarlanmıştır.



Şekil 2.5. Hazırlanan numunelerin ultrasonik banyoda karıştırılma işlemi.

2.4. SÜSPANSİYON ORANLARININ HESAPLANMASI

Nanopartiküller, yalıtım yağıyla süspanse edildiklerinde üstün performanslarını gösterebilmeleri için stabilizasyonlarının iyi olması gerekir. Bununla birlikte eşit dağılım ve kritik nokta seviyeleri önemli rol oynamaktadır. Çünkü nanopartiküllerin eşit dağıldığı bir süspansiyon oluşmadığı takdirde akışkan yağın delinme gerilim seviyesi ve ısı iletimi yağın her noktasında aynı olmayacaktır. Ayrıca stabil olmayan akışkan topaklanma oluşumuna daha müsaittir. Diğer taraftan nanopartikül baz yağın içerisinde kritik nokta geçtikten sonra hem dibe çökme oluşmaya başlayacak hem de delinme geriliminde düşüş oluşacaktır. Literatürde karıştırma yöntemleri ile ilgili bir kılavuz yoktur. Kullanılan yöntemleri dört başlık altında toplanmıştır ve Çizelge 2.3’de verilmektedir. Bunlar hacim fraksiyonu, hacim konsantrasyonu, kütle fraksiyonu ve kütle konsantrasyonudur.

Çizelge 2.3. Nano-akışkanlar için literatürde kullanılan karışım metotları [10].

-	Sembol	Formül	Birim
Kütle Konsantrasyonu	p_i (g/L)	$\frac{w_i}{V}$	g/L
Kütle Fraksiyonu	w_i (wt%)	$\frac{w_i}{w_{toplam}}$	g/g
Hacim Konsantrasyonu	σ_i (vol%)	$\frac{V_i}{V}$	L/L
Hacim Fraksiyonu	Φ_i (Φ)	$\frac{V_i}{V_i+V_j}$	L/L

Bu tez çalışmasında karışım metodu olarak kütle konsantrasyonu kullanılmıştır ve Denklem 1’ de verilmektedir.

$$\text{Kütle Konsantrasyonu} = \frac{W_{nanopartikül}}{V_{baz yağ}} \quad (1)$$

Çalışmada kullanılan Bn (bor nitrür), Al₂O₃ (Alüminyum dioksit), SiO₂ (silikon dioksit) ve MgO (magnezyum oksit) mineral yağa belirlenen konsantrasyon oranında süspanse edilmiştir. Nanopartiküllerin her biri (0,05 g/L), (0,1 g/L), (0,5 g/L) konsantrasyon seviyesinde 3 er numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Nanopartikül cinsine ve konsantrasyon seviyesine göre hazırlanan numuneler.

Süspansiyon	Konsantrasyon
Mineral Yağ	-
Mineral Yağ + BN	0,05 g/L
	0,1 g/L
	0,5 g/L
Mineral Yağ + Al ₂ O ₃	0,05 g/L
	0,1 g/L
	0,5 g/L
Mineral Yağ +SiO ₂	0,05 g/L
	0,1 g/L
	0,5 g/L
Mineral Yağ +MgO	0,05 g/L
	0,1 g/L
	0,5 g/L

2.5. TEST METODLARI

2.5.1. İzolasyon Delinme Gerilimi

Delinme gerilimi testinde yalıtım yağına iki elektrot açıklığı üzerinden doğrusal olarak artan bir gerilim uygulanır. Yağın ilettime geçtiği yani elektriksel delinme gerçekleştiği andaki gerilim o yağın delinme gerilim seviyesini belirler. Literatüre farklı delinme gerilimi standartları vardır ancak çalışma prensibi bakımından hepsi aynıdır. Farklı olan aynı yağa arka arkaya uygulanan testlerin aralarındaki süre, yağın dinlenme süresi, yağın bekleme süresi, elektrot tipi ve elektrotlar arası açıklık vb. gibi prosedürlerdir. Bu projede IEC 60156 Standardı tercih edilmiştir. Delinme gerilimi testleri 30 °C’de yapılmıştır. Top tipi elektrot kullanılmıştır ve elektrotlar arası mesafe 2,5 mm’dir. Her bir numuneye on iki test yapılmıştır ve bu on iki testin ortalaması alınarak ortalama değer dikkate alınmıştır. IEC 60156 standardına göre yapılan testlerde aşağıdaki yöntem sırası izlenilmiştir.

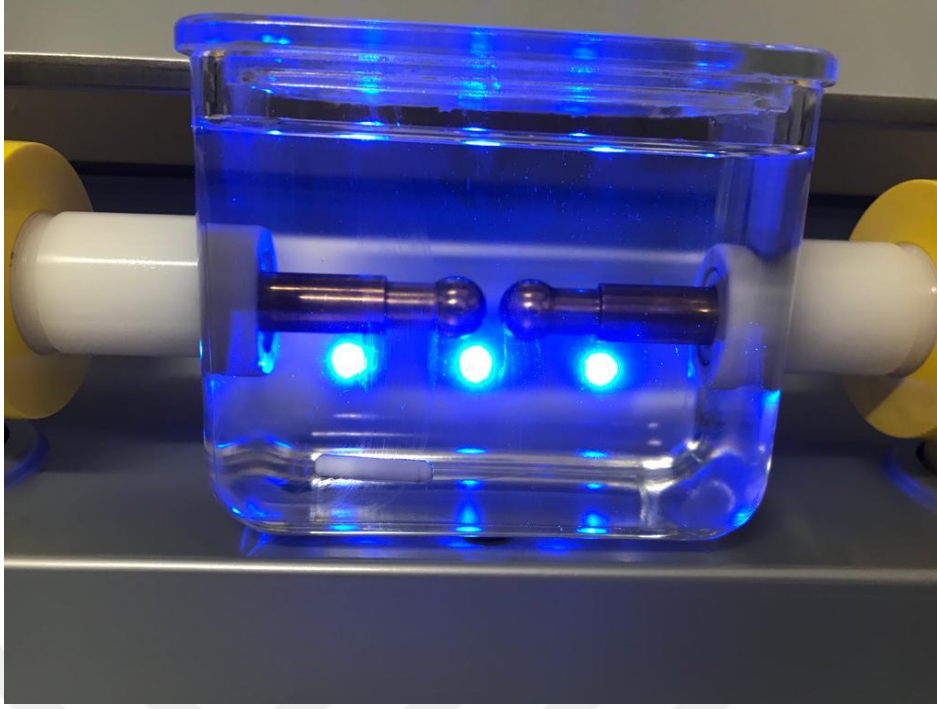
- Numuneler elektrot haznesine alındığında 10 dakika dinlendirilir.
- Numuneler 1 dakika haznede bulunan mekanik karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılır.
- Delinme gerilimi testi yapılır.

- Her test arasında numune 2 dakika dinlendirilir ve ardından 1 dakika mekanik karıştırma yapılır.

Test yapılan delinme gerilimi cihazı 0 ile 100 kV arasında AC gerilim uygulayabilmektedir. Bu cihaz ile ASTM D1816, ASTM D877, IEC 60156, BS 148 ve VDE 0370 standartlarına uygun testler yapılabilir. Öte yandan cihaz numune sıcaklığını vermektedir. Numunelere 500 volt/saniye artan gerilim uygulayarak test yapılmıştır. Elektrotlar arasındaki yağda deşarj başladığı anda cihaz gerilimi durdurmakta ve o andaki gerilim değerini kayıt altına almaktadır. Şekil 2.6'da delinme gerilimi cihazı ve Şekil 2.7'de delinme gerilimi cihazının yağ haznesi ve elektrotları görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.6. Delinme Gerilimi Cihazı.



Şekil 2.7. Delinme gerilimi cihazının yağ haznesi ve elektrotları.

2.5.2. Termal İletkenlik

Elektrik yalıtım sıvıları aynı zamanda istenmeyen ısı enerjisinin dış ortama aktarılmasından sorumludur [26]. Akışkanların ısı iletkenlikleri ısı transfer performansını belirleyen en önemli faktördür. Termal iletkenlik cihazının çalışma prensibi, ölçüm ucuna ayarlanabilir pulse akım uygulanarak numune üzerindeki ısı değişim ölçüm ucundaki sensörler vasıtasıyla kaydedilir ve numunenin termal iletkenliği hesaplanır. Şekil 2.8’de ölçüm ucunun görüntüsü verilmiştir.

Termal iletkenlik testi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ve numunenin test başlangıcında ölçülen sıcaklığı cihazın ara yüzüne işlenmiştir. Her bir numuneye dört test yapılmıştır ve ortalama değer alınmıştır. Test yapılan numuneye ölçüm yapılırken bir dakika boyunca 15 miliwatt enerji verilmiştir.



Şekil 2.8. Termal iletkenlik cihazı ölçüm probu.

2.5.3. Viskozite

Viskozitemetre ile yapılan ölçümü Spindle isimli dönen bir silindirik uç vasıtasıyla gerçekleştirilir. Spindle dönerken numunenin uyguladığı fiziksel direnç numunenin viskozitesini belirler. Bu projede yapılan viskozite ölçümünde L1 tip Spindle kullanılmıştır. 100 rpm Spindle sabit dönüş hızı ile ölçüm yapılmıştır. Bütün numuneler oda sıcaklığında ölçülmüştür ve ölçüm esnasındaki tüm numunelerin sıcaklıkları 25,5 °C'dir. Cihaz sıcaklık ölçümünü thermocouple ile yapmaktadır. Şekil 2.9'da ölçüm yapılan viskozitemetrenin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2.9. Viskozitemetre.

2.5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Bu test yöntemi, numune yüzeyini bir elektron ışını ile tarayarak bir görüntü elde etmek için kullanılır. Bu çalışmada FEI marka 1000000 kat büyütme kabiliyetine sahip Quanta FEG 250 modeli kullanılmıştır. Nano-akışkanlardan alınan numuneler cam bir yüzeye eşit dağılarak bir şekilde yayılarak yağdan arındırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra farklı nanometre boyutlarındaki örneklerin yüksek çözünürlüklü SEM görüntüleri yüksek vakum altında kaydedilmiştir. Şekil 2.10'da SEM cihazının görüntüsü verilmektedir.

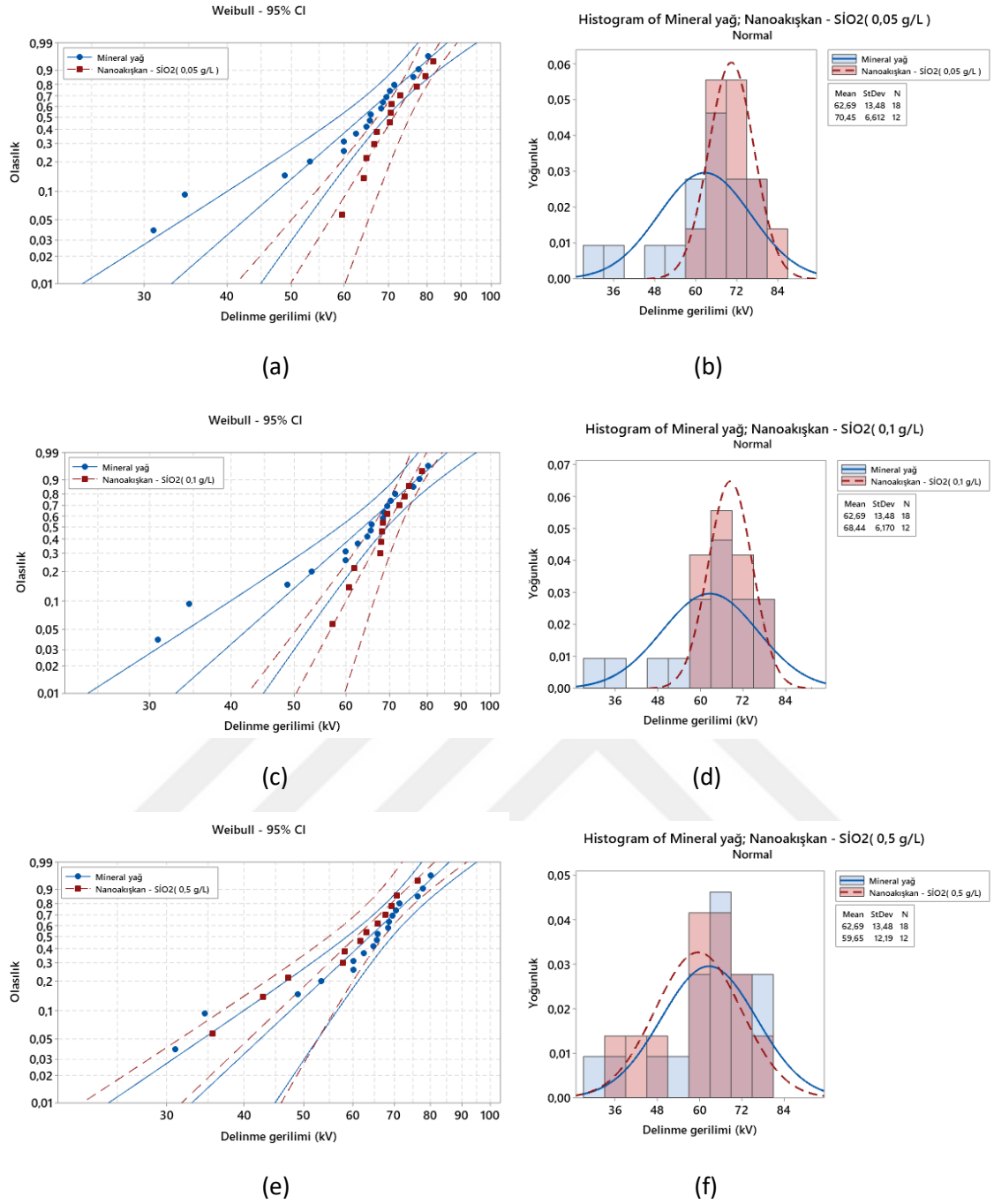


Şekil 2.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Cihazı.

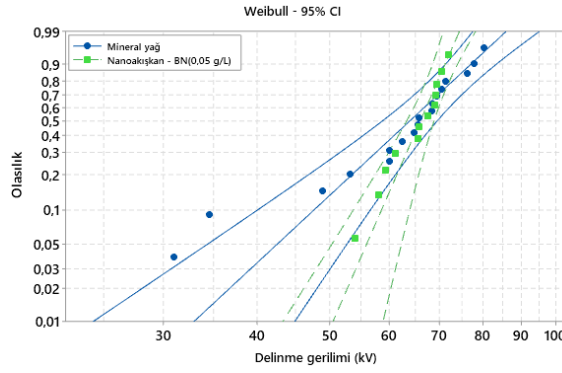
3. DENEYSEL BULGULAR

3.1. İZOLASYON DELİNME GERİLİMİ (BDV) TEST SONUÇLARI

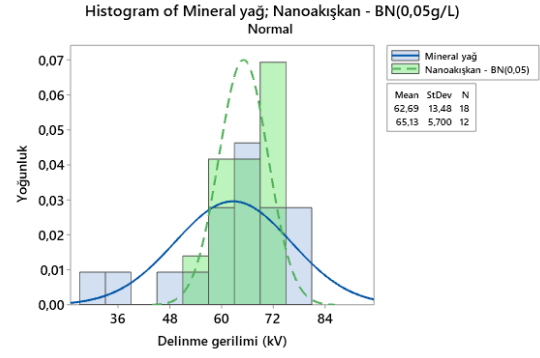
Yapılan tüm testler IEC 60156 standardına göre yapılmıştır. Baz yağ olarak kullanılan treatment edilmiş mineral yağın delinme gerilimi 62,67 kV olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.5'e göre yapılan delinme gerilimi deneyinin test sonuçlarında mineral yağa göre en iyi delinme gerilimindeki gelişim Al_2O_3 nano-akışkanında olmuştur. Al_2O_3 nano-akışkanını 83,47 kV delinme gerilimi değeri ile %33,18'lik artış sağlamıştır. Ayrıca Al_2O_3 nano-akışkanı 0,05 g/L konsantrasyonunda yapılan seri testlerin 3.cüsünde 100,4 kV seviyesinde delinmiştir. 100,4 kV delinme gerilimi oldukça umut verici bir sonuçtur. Al_2O_3 nano-akışkanın sonuçları göz önüne alındığında geleneksel yalıtım yağlarına alternatif olarak kullanılabilecek bir yalıtım sıvısı olduğunu göstermektedir. Al_2O_3 nanopartikülü aynı zamanda manyetik bir izolatördür. Bu açıdan bakıldığında metalik nanopartiküllere göre daha efektif sonuçlar sağlayabilir. Şekil 3.1'de SiO_2 nano-akışkanın delinme gerilimi sonuçları verilmiştir. SiO_2 'nin 0,05 g/L konsantrasyonunda 70,45 kV ile %12,41'lik bir gelişme kaydetmiştir. Ancak 0,05 g/L'den sonra delinme gerilim seviyesi kademeli olarak düşmektedir. BN nano-akışkanı mineral yağa göre kayda değer bir gelişim gösterememiştir. Hatta bu sonuca göre BN nano-akışkanının mineral yağın delinme geriliminin altında kaldığı görülmektedir. Bu deney sonuçlarına göre BN nano-akışkanı transformatörlerde yalıtım sıvısı olarak kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Öte yandan Şekil 3.1'de incelendiğinde MgO partikülü hariç diğer nanopartiküllerin maksimum delinme gerilimi noktasının 0,05 g/L kütle konsantrasyonu olduğu göze çarpmaktadır. 0,05 g/L konsantrasyonundan sonra delinme gerilimlerinin düştüğü hatta 0,1 g/L konsantrasyonundan itibaren baz yağın delinme gerilim seviyesinden de daha az olduğu görülmektedir. MgO nano-akışkanını incelenirse diğer nano-akışkanların aksine 0,05 g/L'den sonra delinme gerilimi artarak devam etmiştir. Bunun nedeni öz kütlesi ve tanecik boyutunun diğer nanopartiküllerden küçük olması şeklinde açıklanabilir. Daha önce tanecik boyutunun küçük olmasının delinme gerilimine olumlu katkı yaptığı belirtilmişti. MgO nano-akışkanı muhtemelen 0,5 g/L konsantrasyonundan sonra belirli bir konsantrasyonda maksimum delinme gerilimi seviyesine ulaşacak ve artış ivmelenmesi yön değiştirerek aşağı yönde olacaktır.



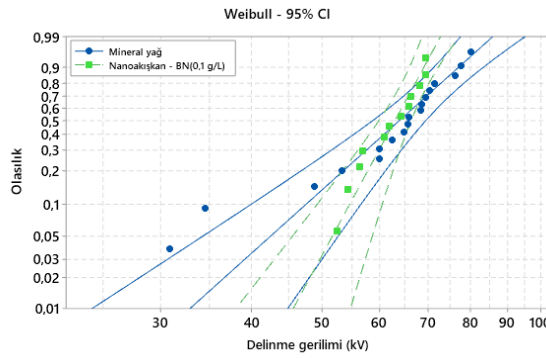
Şekil 3.1. (a) SiO_2 (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (b) SiO_2 (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (c) SiO_2 (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (d) SiO_2 (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (e) SiO_2 (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (f) SiO_2 (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği.



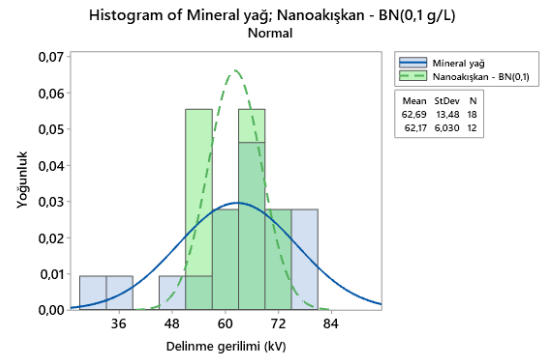
(a)



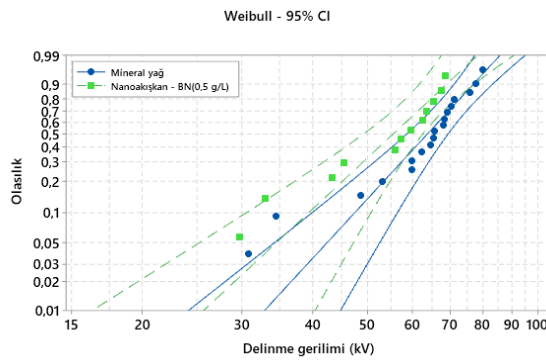
(b)



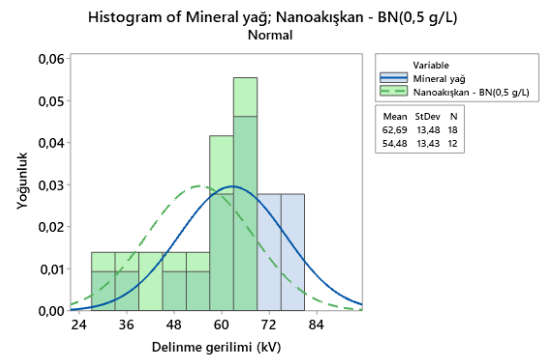
(c)



(d)

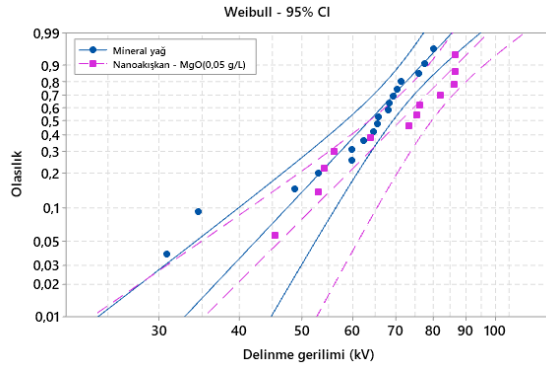


(e)

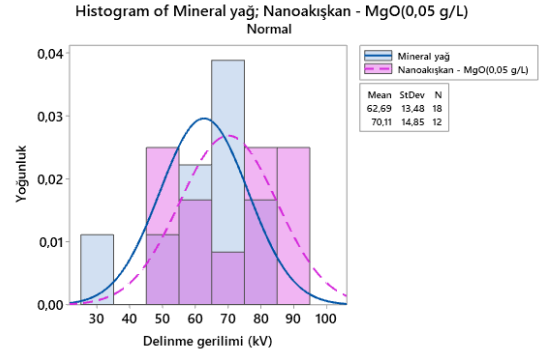


(f)

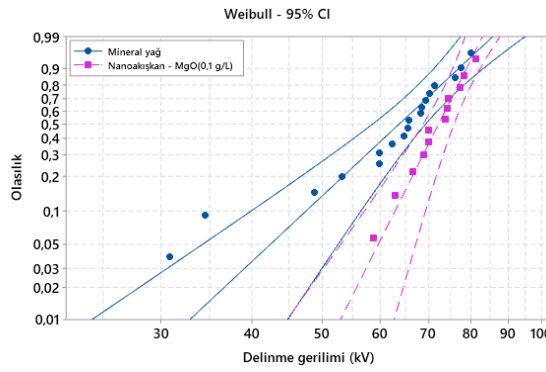
Şekil 3.2. (a) BN (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (b) BN (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (c) BN (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (d) BN (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (e) BN (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (f) BN (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği.



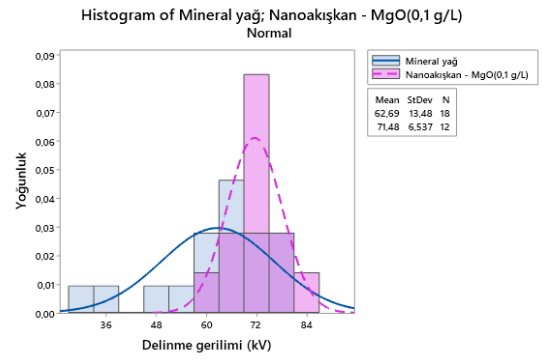
(a)



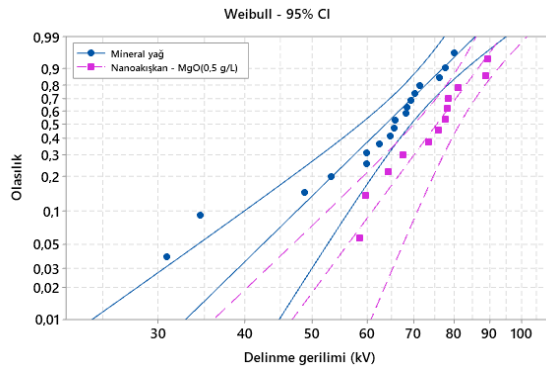
(b)



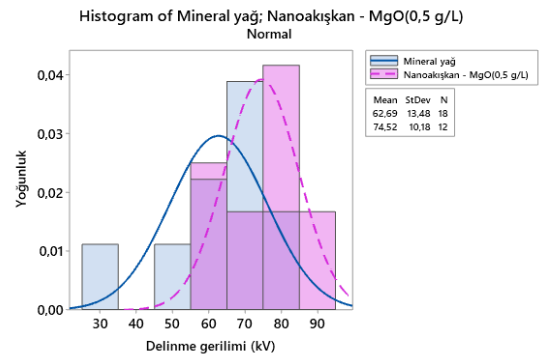
(c)



(d)

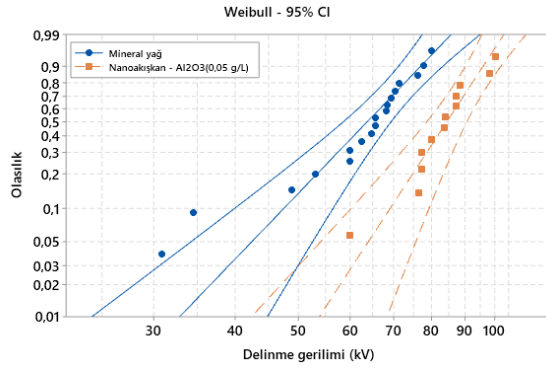


(e)

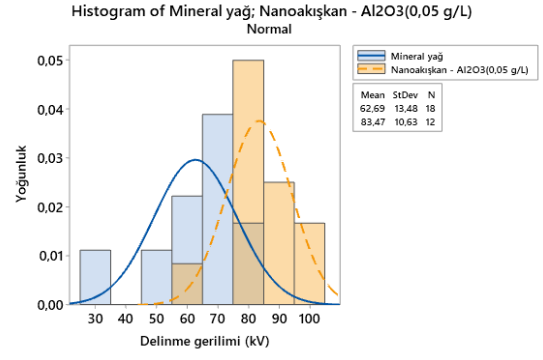


(f)

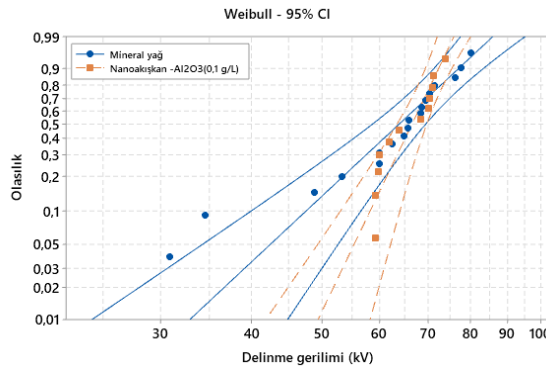
Şekil 3.3. (a) MgO (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (b) MgO (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (c) MgO (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (d) MgO (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (e) MgO (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (f) MgO (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği.



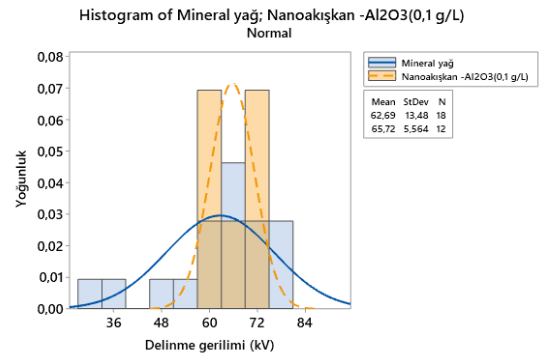
(a)



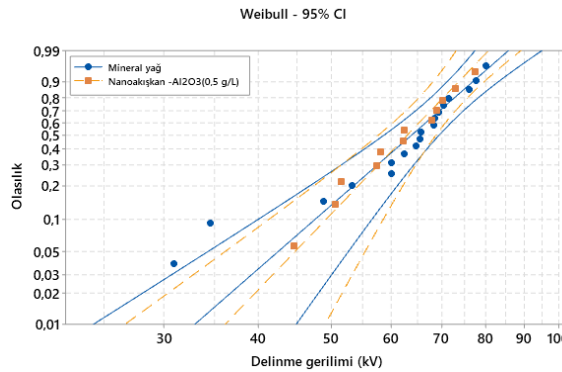
(b)



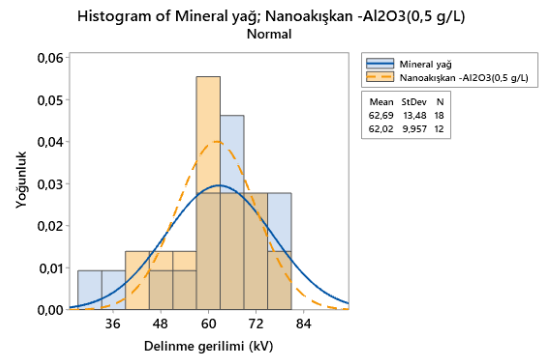
(c)



(d)

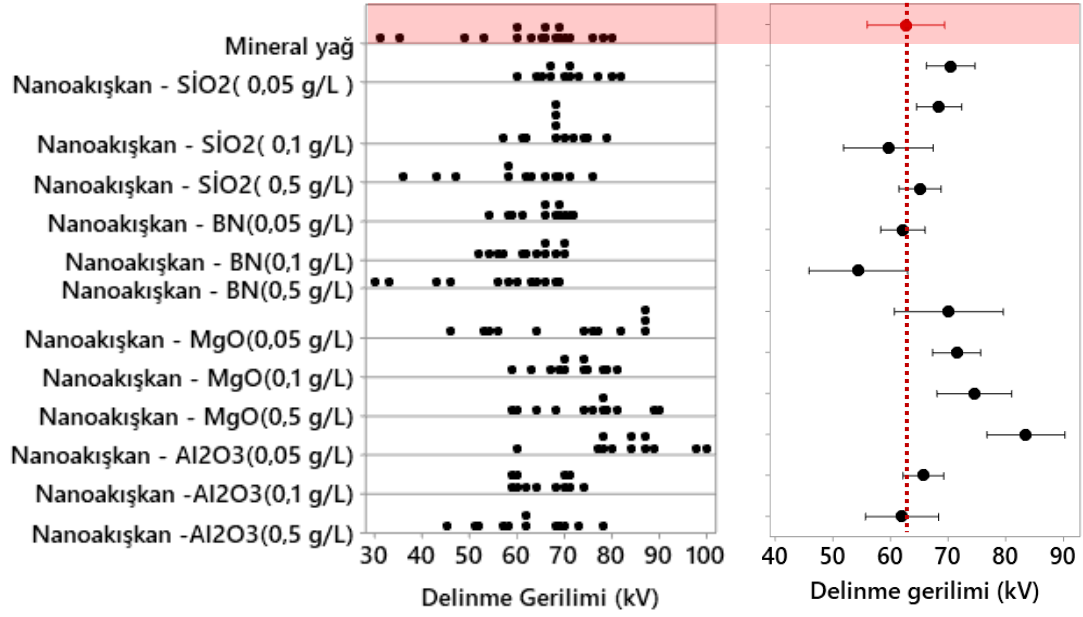


(e)



(f)

Şekil 3.4. (a) Al_2O_3 (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (b) Al_2O_3 (0,05 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (c) Al_2O_3 (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (d) Al_2O_3 (0,1 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği, (e) Al_2O_3 (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Weibull dağılımı grafiği, (f) Al_2O_3 (0,5 g/L) delinme gerilimi sonuçlarının Histogram grafiği.



Şekil 3.5. SiO₂, BN, MgO ve Al₂O₃ nano-akışkanlarının farklı konsantrasyon seviyelerindeki delinme gerilimi sonuçları.

Şekil 3.1’de SiO₂ nano-akışkanının ve mineral yağın karşılaştırmalı olarak weibull dağılımı ve histogram grafiği verilmiştir. SiO₂ nano-akışkanının tepe noktasının 0,05 g/L olduğunu daha önce belirtilmiştir. Şekil 3.1 (b), (d) ve (f) sırasıyla incelendiğinde 0,05 g/L ve 0,1 g/L’de delinme gerilimi testlerinin sapma değerlerinin daha dar aralıkta gerçekleştiğini söylemek mümkündür. 0,5 g/L konsantrasyonunda ise daha fazla nanopartikül olduğu ve topaklanma oluşumları başladığı için kararlılık bozulmuştur ve histogram grafiklerine bakıldığında delinme gerilimi seviyelerinde daha fazla yayılım olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 3.1 (a), (c) ve (e)’deki weibull dağılımları incelenirse SiO₂ nano-akışkanının 0,05 g/L ve 0,1 g/L konsantrasyonları mineral yağa göre daha kararlı yapıda olduğu söylenebilir. Deney sonuçlarına göre BN nano-akışkanının mineral yağa göre karşılaştırıldığında olumlu sonuçlar vermedikleri görülmüştür. Buna rağmen Şekil 3.2 incelendiğinde BN nano-akışkanını 0,05 ve 0,1 g/L seviyelerinde mineral yağa göre daha kararlı bir yapısı vardır. Öte yandan MgO nano-akışkanının diğer nano-akışkanların aksine delinme gerilimi artış ivmesi 0,05 g/L’de kırılmayıp devam etmektedir. Bu seviyede maksimum noktaya ulaşmayan MgO nano-akışkanının Şekil 3.3’ deki histogram grafikleri incelendiğinde sapma yayılımlarının daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Öyle ki Şekil 3.3 (d)’ de 0,1 g/L konsantrasyonunda

MgO nano-akışkan 72 kV civarında yığılma göstermiş ve standart sapması %6,26'dır. Ancak diğer konsantrasyon seviyelerinde mineral yağ gibi dağınık bir yayılım göstermektedir. Hazırlanan konsantrasyon seviyelerindeki numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonucunda en iyi delinme gerilimi performansını Al_2O_3 nano-akışkan vermiştir. Şekil 3.4 incelendiğinde Al_2O_3 nano-akışkan MgO gibi yayılım fazla olsa da 0,05 g/L konsantrasyonunda en düşük ve en yüksek değerler çıkartıldığında delinme gerilimi dağılımı 80 kV civarında yüksek bir yoğunlaşmaya sahiptir. Al_2O_3 nano-akışkan 0,05 g/L ve 0,1 g/L konsantrasyonlarında SiO_2 ve BN nano-akışkanları gibi oldukça kararlı yapıda olduğu söylenebilir. Kısaca nano-akışkanların delinme gerilimi açısından maksimum noktalarındaki yani en verimli olduğu konsantrasyon seviyelerindeki kararlılık seviyeleri mineral yağa oranla oldukça yüksektir. Nano-akışkanlar maksimum delinme gerilim seviyesine ulaştıktan sonraki konsantrasyon seviyelerinde topaklanma oluşumu artmakta ve buna bağlı olarak stabilitenin bozulması sebebiyle delinme dayanımları düşmektedir. Kütle konsantrasyonuna göre hazırlanan numunelere yapılan testlerin sonuçları Çizelge 3.1'de verilmektedir. Ayrıca Çizelge 3.1'de numunelere yapılan tüm delinme gerilimi değerleri, ortalama değer, standart sapma ve nano-akışkanların mineral yağa göre yüzde delinme gerilimi değişimleri verilmektedir.

Çizelge 3.1. Delinme gerilimi test sonuçları ve mineral yağa göre akışkanların yüzde gelişimi.

NANOPARTİKÜL	SiO_2			BN			MgO			Al_2O_3			MİNERAL
KARIŞIM ORANI	0,05 g/L	0,1 g/L	0,5 g/L	0,05 g/L	0,1 g/L	0,5 g/L	0,05 g/L	0,1 g/L	0,5 g/L	0,05 g/L	0,1 g/L	0,5 g/L	YAĞ
1.	70,8	57,3	57,8	54	69,5	29,7	56,2	74,4	88,9	76,5	70,9	72,9	70,4
2.	66,5	67,9	63,1	59,3	68,1	68,9	45,5	73,8	58,6	87,4	63,8	50,5	34,5
3.	70,5	69,5	67,8	69,5	69,5	33	76,5	58,8	77,8	100,4	68,4	77,5	69,4
4.	81,8	78,5	70,6	58	56,4	43,3	64	69,1	78,5	83,9	70,4	58,1	68,6
5.	70,3	72,4	58,1	67,6	61,8	63,8	54,3	81,3	73,6	84	71,1	62,4	64,8
6.	73	68,3	65,8	72	65,8	67,7	82,4	77,5	89,5	77,5	70	57,4	30,9
7.	67,1	68,1	42,9	69	54,2	56,1	73,6	66,7	64,4	77,5	73,9	44,6	77,8
8.	77,3	60,7	47,1	61,2	61	57,5	75,7	63	81,2	80	59,8	70,2	76,2
9.	64,9	67,8	35,5	69,2	66,3	62,8	86,7	70,2	59,8	98,3	59,3	51,5	80,2
10.	64,2	73,8	61,6	65,5	64,3	45,5	86,5	78,5	67,6	88,6	59,9	67,9	65,6
11.	79,5	61,9	76,3	70,5	56,8	65,7	86,7	74,5	76,1	87,4	61,8	68,9	68,3
12.	59,5	75,1	69,2	65,7	52,4	59,7	53,2	70	78,2	60,1	59,3	62,3	71,4
ort.	70,45	68,44	59,65	65,13	62,18	54,48	70,11	71,48	74,52	83,47	65,72	62,02	62,67
Standart Sapma	6,33	5,91	11,67	5,46	5,77	12,86	14,22	6,26	9,75	10,17	5,33	9,53	15,07
% Değişim	12,41	9,21	-4,82	3,92	-0,79	-13,08	11,87	14,06	18,90	33,18	4,86	-1,04	0

Bir başka konu da yüzey aktif madde kullanımıdır. Yüzey aktif madde topaklanma oluşumunu geciktirmektedir ve süspansiyonun kararlılığını artırmaktadır. Bu tez çalışmasındaki amaç nano-akışkanların termal ve yalıtım performanslarını karşılaştırmak olduğu için yüzey aktif madde kullanılmamıştır. Çünkü yüzey aktif madde kullanımı nano-akışkanların termal ve yalıtım özelliklerini etkilemektedir. Yüzey aktif madde kullanıldığı takdirde deney çalışmasındaki nano-akışkanların delinme gerilimi performansını daha da artırabileceği söylenebilir. Şekil 3.6’da farklı bir delinme gerilimi cihazında yapılan testten bir görsel verilmiştir. Yapılan bu testte mineral yağ SiO_2 süspansiyonu kullanılmıştır. Mantar-mantar tipi elektrot kullanılmıştır ve elektrot mesafesi 1,5 mm’dir. Görselde iki elektrot arasında oluşan deşarj yolu net bir şekilde görülmektedir. Bu olayın sebebi nanopartikül miktarının konsantrasyonun kritik seviyesinden sınırından çok daha fazla olmasıdır. Süspansiyondaki partikül miktarı olması gerekenden fazla olursa topaklanma miktarı artar. Oluşan bu durum özellikle elektrotlar arasında meydana geldiğinde deşarj yolunu kısaltır ve delinme gerilimini düşürür. Deşarj yolunun Şekil 3.6’daki gibi gözle görülür olması bütün nanopartiküllerde gözlemlenmeyebilir. Bunun nedeni nanopartiküllerin rengi ve şeffaflığı gibi fiziki özelliklerinden kaynaklanabilir.



Şekil 3.6. Yağın konsantrasyon oranına bağlı deşarj yolunun görüntüsü.

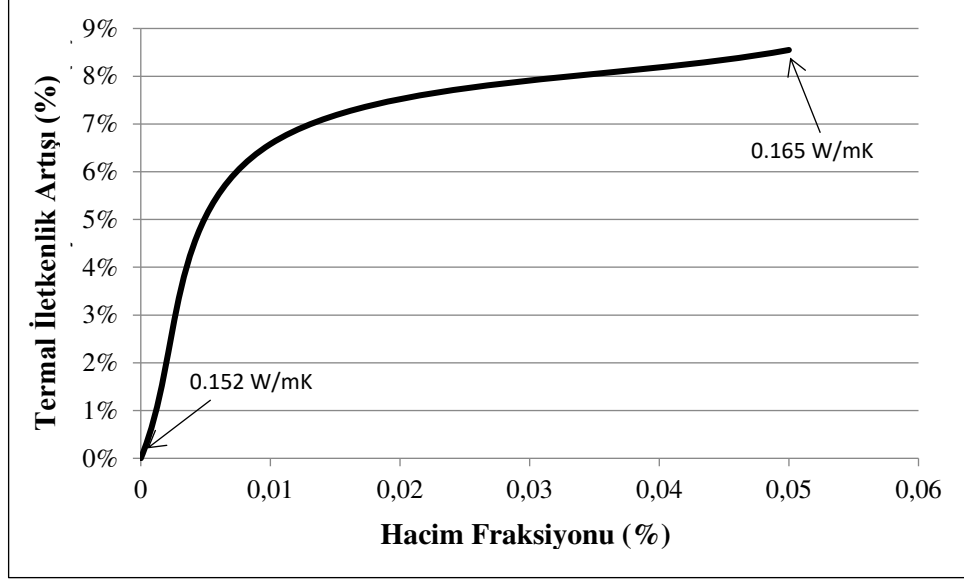
3.2. NANO-AKIŞKANIN TERMO-FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Termal iletkenlik deneyinde mineral yağa SiO_2 nanopartikülünün eklenmesiyle elde edilen nano-akışkanı tercih edilmiştir. Deney baz yağ, $\text{SiO}_2(0,01 \Phi\%)$ ve $\text{SiO}_2(1,05 \Phi\%)$ hacim fraksiyonu ile hazırlanan numuneler ile yapılmıştır. Termal iletkenlik, sıvı içindeki nanopartiküllerin sayısı ile değişmektedir. Ayrıca bu parametre için kritik konsantrasyon oranı, delinme geriliminde belirlenen kritik değerden oldukça farklı olabilir. Ancak elektrik sistemlerinde yalıtım özellikleri daha önemli olduğu için delinme gerilimi test sürecinde belirlenen konsantrasyon oranları dikkate alınmalıdır. Çizelge 3.2’de baz yağ ve $\text{SiO}_2(0,01 \text{ ve } 0,05)$ nano-akışkanının termal iletkenlik deney sonuçları verilmektedir. Ayrıca termal yayılım hızı ve özgül ısı değerleri de bulunmaktadır.

Çizelge 3.2. Mineral yağ ve $\text{SiO}_2(0,01 \text{ ve } 0,05)$ nano-akışkanının termal iletkenlik, termal yayılma ve öz ısı ölçüm sonuçları.

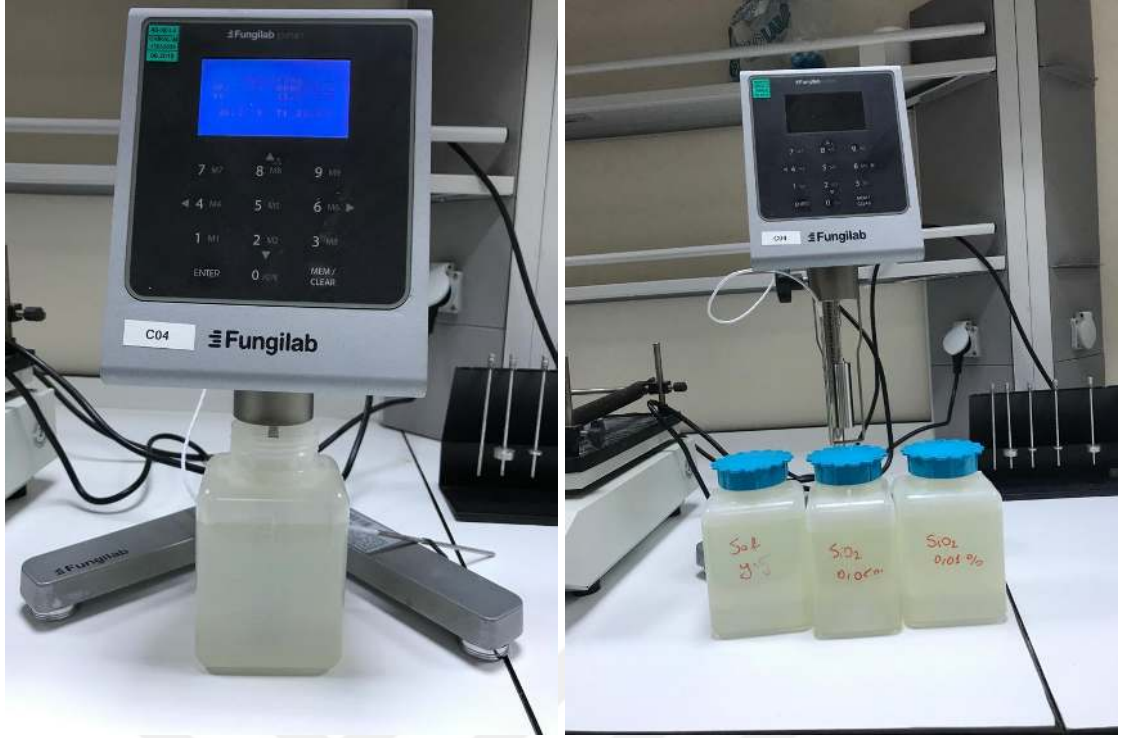
-	Sıcaklık	Termal İletkenlik	Termal Yayılma	Özgül Isı	Termal İletkenlik Yüzde Değişimi
Baz Yağ	21,3 °C	0,152 W/mK	0,09 mm ² /s	1,7014 MJ/m ³ K	0%
$\text{SiO}_2(0,01)$	21,4 °C	0,162 W/mK	0,10 mm ² /s	1,5451 MJ/m ³ K	6,58%
$\text{SiO}_2(0,05)$	21,4 °C	0,165 W/mK	0,11 mm ² /s	1,5508 MJ/m ³ K	8,55%

Farklı konsantrasyonlarda nano-akışkanın termal iletkenliğinin değişimi Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Termal iletkenlikteki artış, farklı hacim fraksiyonlarına göre doğrusal olmayan bir şekilde değişmiştir. %0,05 hacim fraksiyonunda %8,55 oranında termal iletkenlik artışı elde edilmiştir. Hacim fraksiyonunun bu değeri delinme gerilimini maksimize etmektedir. Delinme gerilimi değeri bu değerden sonra düştüğü için daha büyük hacim fraksiyonları için ölçüm yapılmamıştır. Şekil 3.9’da farklı hacim fraksiyonları için termal yayılma ve hacimsel ısı kapasitesi değişiklikleri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre bu iki değer birbiriyle ters orantılı olarak değişmiştir. Test sonuçlarına bakıldığında nano-akışkanların transformatörlerde kullanılan mineral yağlardan daha iyi bir termal performansa sahip olacağını kanıtlamaktadır.

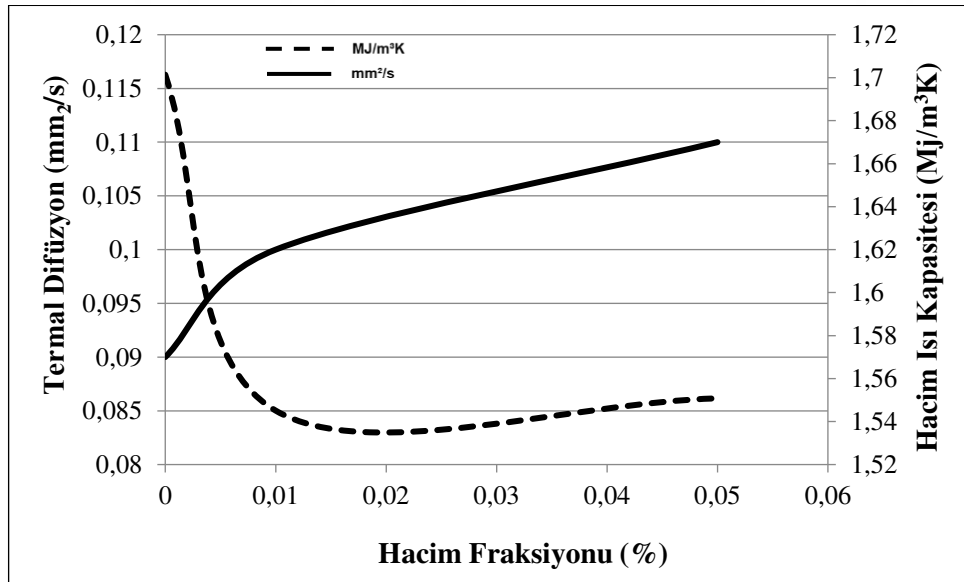


Şekil 3.7. SiO₂ nano-akışkanının termal iletim gelişimi.

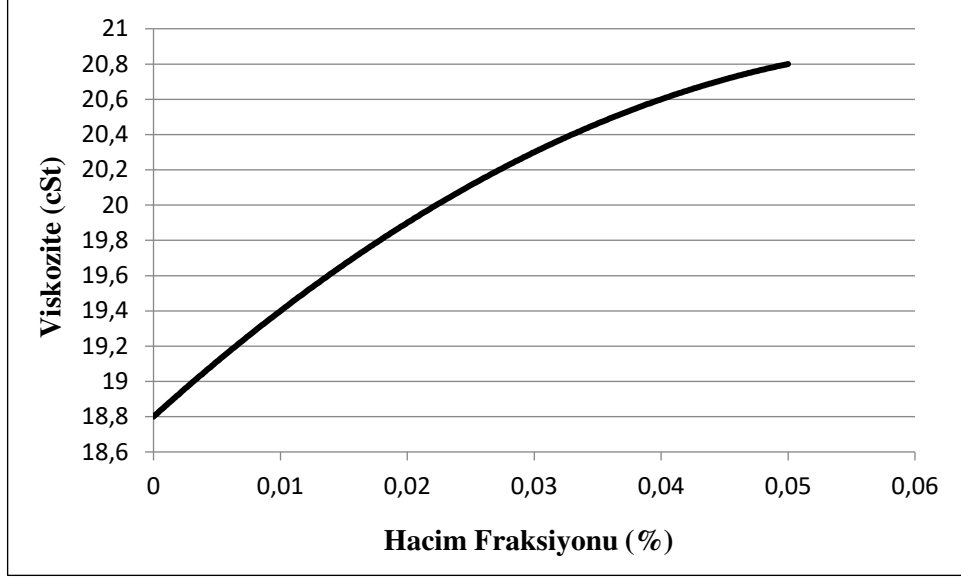
Yalıtım sıvılarının viskozite değeri, soğutma performansını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Çünkü yalıtkan sıvıları, özellikle iletim ve taşınım yoluyla soğutma görevi görebilen malzemelerdir. Viskozite değeri de taşınım ile soğutma performansını büyük ölçüde etkileyen bir parametredir. Şekil 3.8’de viskozite deneyinin ve viskozite cihazının görüntüsü verilmektedir. Viskozite numune sıcaklığına bağlı olarak değişeceğinden numuneler 25,5 °C sabit sıcaklıkta tutularak test işlemi gerçekleştirilmiştir. Saf yalıtım sıvısının ve farklı hacim fraksiyonlarında nanopartikül katkılı yalıtım sıvılarının kinematik viskoziteleri ölçülmüştür. Saf yağda stabil ve asılı kalan nanopartiküllerin, Şekil 3.10’da gösterildiği gibi viskozite değerini arttırdığı ve doğrusal olmayan bir eğilime sahip olduğu açıkça görülmektedir. Mineral yağın kinematik viskozitesi 18,8 cSt olarak ölçülürken, nano-akışkanın viskozitesi ise %0,05 hacim fraksiyonunda 20,8 cSt olarak ölçülmüştür. Viskozite artış oranı %10,64 olarak elde edilmiştir ve bu durum izolasyon sıvısının soğutma performansını olumsuz etkilemektedir. Ancak elektrik sistemlerindeki güç kayıplarından kaynaklanan ısı artışı bu durumu telafi eder çünkü sıcaklık arttıkça viskozite değeri önemli ölçüde düşer. Bu nedenle elektrik sistemlerinde kullanılacak olan yalıtkan akışkanlara belirli bir miktar nanopartikül ilave edilmesi ile oluşan viskozite artışı bir dezavantaj olarak değerlendirilmeyebilir.



Şekil 3.8. Mineral yağ ve SiO₂(0,01 ve 0,05) nano-akışkanlarının viskozite testi.



Şekil 3.9. SiO₂ nano-akışkanın termal yayılım ve hacimsel ısı kapasitesi değişiklikleri.



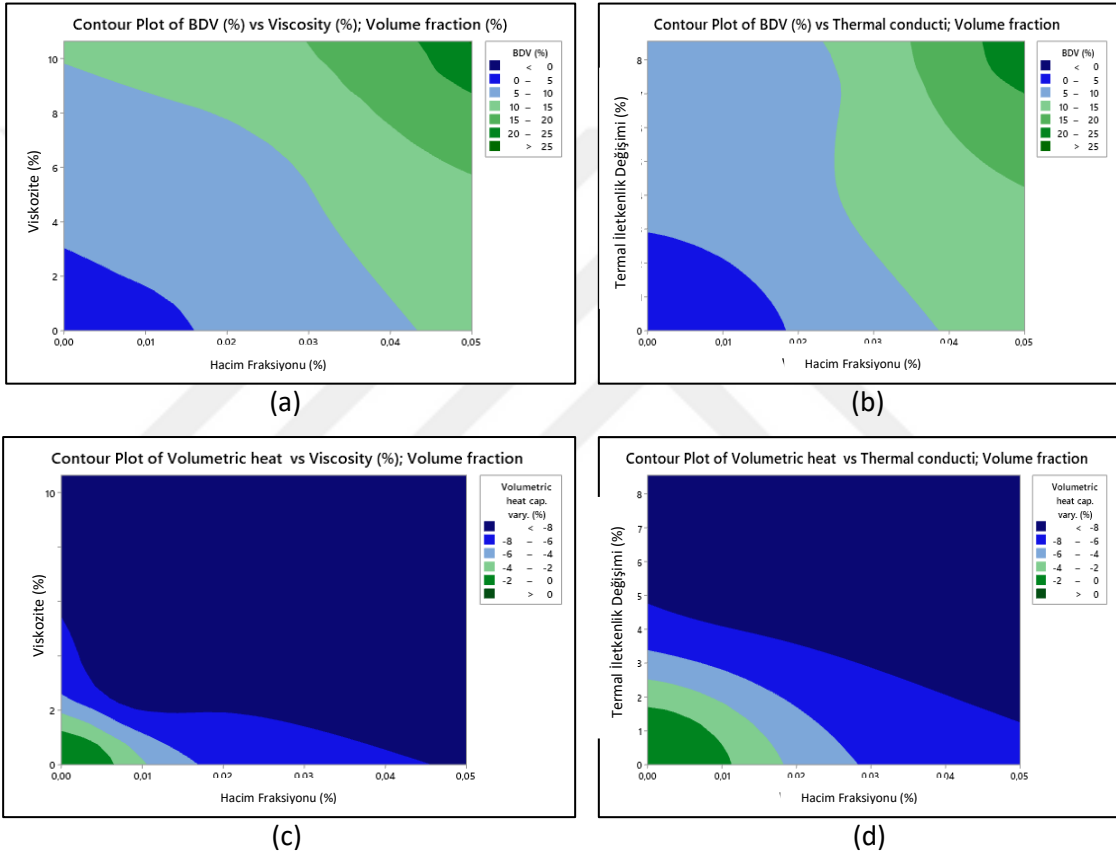
Şekil 3.10. SiO₂ nano-akışkanın viskozitesindeki değişiklik.

Nano-akışkanlarda kritik seviyeyi aşan nanopartikül sayısı Van der Waals ve yerçekimi kuvvetlerinin etkisi ile topaklanma ve çökelme olgusunu ortaya koymaktadır [27]. Daha yoğun parçacıkların boyutu küçüldükçe sıvı içinde askıda kalma olasılıkları artar ve bu durum Denklem (2)'deki Stokes kanunu ile açıklanır. Burada R, küresel parçacığın yarıçapını (m), ρ_p ve ρ_f sırasıyla parçacığın ve sıvının kütle yoğunluğunu (kg/m^3), g yerçekimi alan kuvvetini (m/s^2) ve μ , dinamik viskoziteyi (kg/(m*s)) ifade eder. Parçacık hızının yönü, yoğunluğuna ve sıvının yoğunluğuna bağlı olarak yukarı veya aşağı olabilir. Topaklanma olgusu parçacık boyutunu artırdıkça, çökelme davranışı olasılığını artırır. Bu durumda sıcaklığın artması, viskozitenin düşürülmesi ve yüzey aktif madde kullanılması bu süreci oldukça geciktirebilir.

$$V = \frac{2(\rho_p - \rho_f) \cdot g R^2}{9\mu} \quad (2)$$

Şekil 3.11 delinme gerilimi ve hacimsel ısı kapasitesi için diğer parametrelerdeki değişikliklerin kontur çizimlerini göstermektedir. Hacim oranı eksen değerleri, tüm grafikler için en düşük değerden nano-akışkanın en yüksek delinme gerilimi performansını sergilediği değere kadar yükseltilmiştir. Hacim oranı ve viskozitenin delinme gerilimi üzerindeki etkisi, Şekil 3.11 (a)'da hemen hemen benzerdir. Bununla birlikte, Şekil 3.11 (b)'de gösterildiği gibi termal iletkenliğin delinme gerilimi üzerindeki

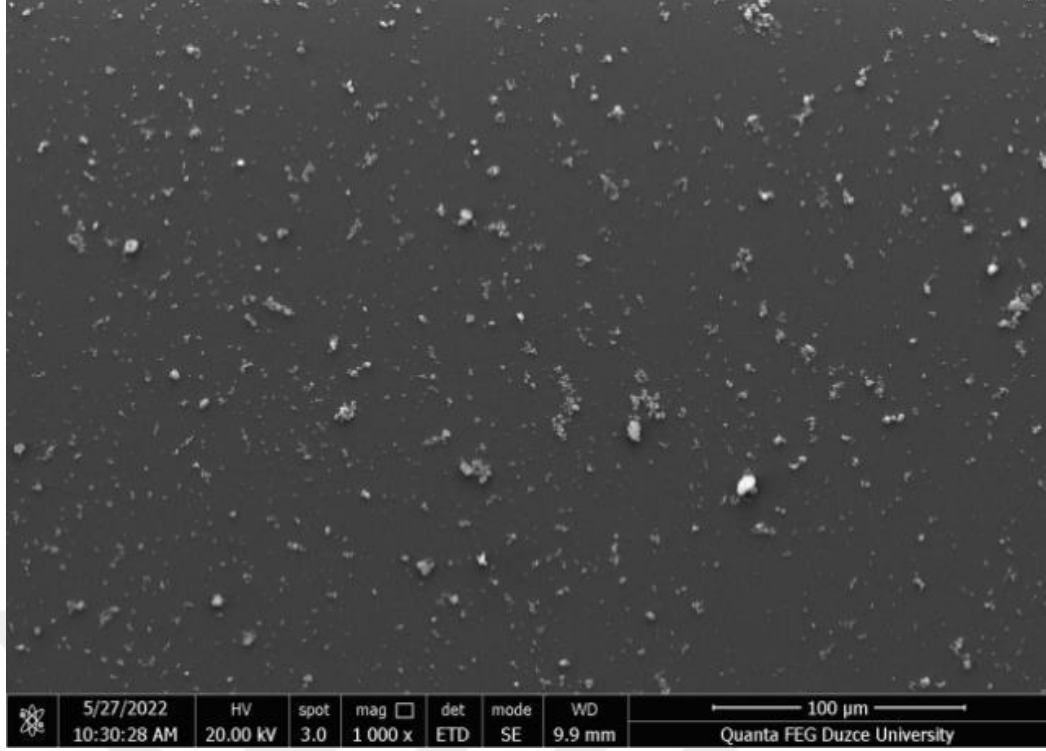
etkisi hacim fraksiyonunununkinden daha azdır. Şekil 3.11 (a) ve Şekil 3.11 (b) birlikte ele alındığında, aynı hacim fraksiyonu için viskozitenin delinme gerilimi üzerinde termal iletkenliğe göre daha büyük bir etkiye sahip olduğu açıktır. Şekil 3.11 (c), viskozite ve hacim fraksiyonunun hacimsel ısı kapasitesi üzerinde benzer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca her iki değişken için de değişimlerin doğrusal olmadığı dikkat çekmektedir. Hacimsel ısı kapasitesi ile termal iletkenlik arasındaki negatif ilişki Şekil 3.11 (d)' de gösterilmektedir.



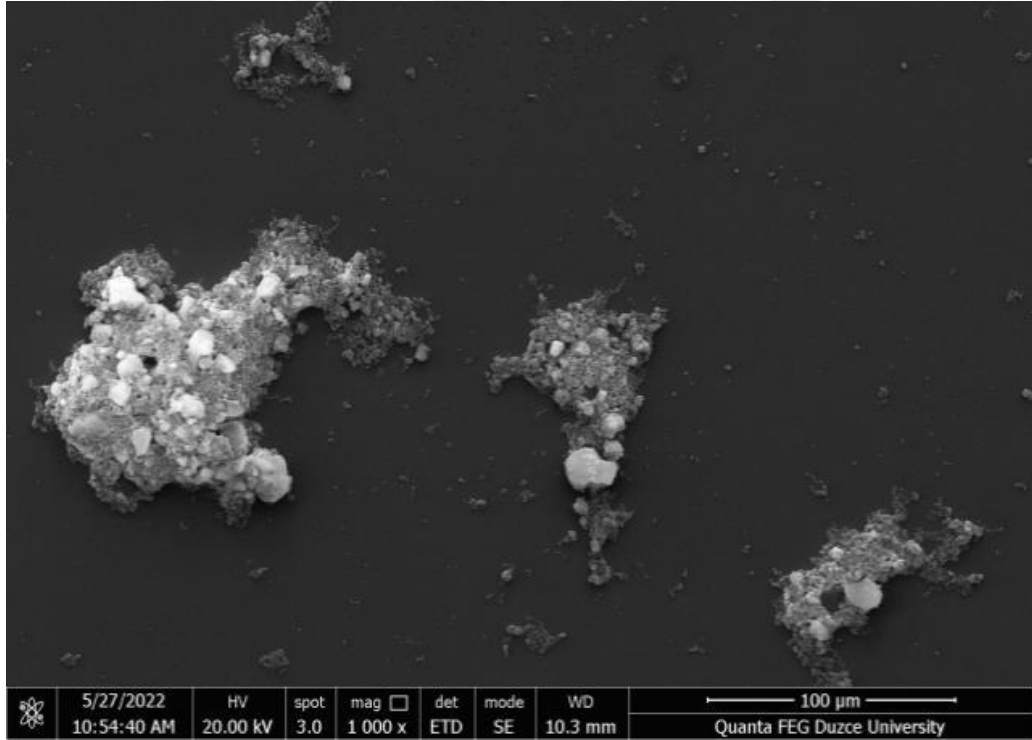
Şekil 3.11. Parametrelerdeki değişiklikler için kontur çizimleri; hacim oranı (%), Delinme gerilimi (kV), hacimsel ısı kapasitesi (Mj/m³K), viskozite (cSt), termal iletkenlik (% geliştirme).

3.3. SEM GÖRÜNTÜLERİ VE ÇÖKELME OLGUSU

Nano-akışkan içerisindeki toplam nano partikül sayısı, nano-akışkanın kararlılığı için büyük önem taşımaktadır. Çok sayıda nano parçacık eklenmesi sistemin soğutma performansı için bir avantaj sağlasa da nano-akışkanın dielektrik özellikleri ve/veya kararlılığı açısından sorun olabilir. Çünkü sabit bir hacimdeki nano parçacık sayısı arttıkça topaklanma olasılığı artar. Bu da uzun vadede çökeltme olgusunu beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, uygun konsantrasyon oranını belirlemek için birden fazla kriteri dikkate almak gerekebilir. Topaklanma ve çökeltme fenomenleri daha küçük boyutlarda incelenebilir ve bu nedenle SEM görüntüleri bu fenomenleri incelemek için en ideal seçimdir. Ancak cihaz numunenin yüzey görüntüsünü alabildiği için numunenin operasyona hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Bu süreçte farklı hacim fraksiyonlarına sahip nano-akışkanlardan alınan numuneler bir cam lamel üzerine yayılarak ve ısıya maruz bırakılarak ortamdaki yağı uzaklaştırılmıştır. Bu talimata göre hazırlanan numunelerin SEM görüntüleri 1000X için Şekil 3.12' de gösterilmiştir. Şekil 3.12 (a)' da ki 0,01 hacim fraksiyonu incelendiğinde nano parçacıkların daha stabil dağıldığı görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 3.12 (b)' deki 0,05 hacim fraksiyonu için durum önemli ölçüde değişmiştir ve uzun vadede yığılma belirgindir. Kısa vadede daha yüksek hacim fraksiyonlarında daha iyi dielektrik özellikler elde edilse bile, uzun vadede nano-akışkanın kararlılığı bozulabileceğinden dielektrik özellikler de bozulabilir. Bu nedenle, daha uzun nano-akışkan stabilitesi için daha düşük hacimli fraksiyonları tercih etmek daha uygun bir seçim olabilir. Nano-akışkanlarda yüzey aktif madde kullanımının nano-akışkan stabilitesini arttırdığını gösteren çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmada nano partiküllerin saf yağdaki doğal stabilitesini araştırdığımız için bu yöntem tercih edilmemiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.12. SEM görüntüleri, cam yüzeyine yayılmış ve yağı uzaklaştırılmış nano-akışkan örneklerine aittir; (a) 0,01% hacim fraksiyonu, (b) 0,05% hacim fraksiyonu.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında transformatörlerde izolasyon sıvısı olarak kullanılan mineral yağa çeşitli boyutlarda ve özelliklerde dört farklı nanopartikül karıştırılarak farklı yalıtım sıvıları elde edilmiştir. Elde edilen nano-akışkanların mevcut mineral yağın elektriksel izolasyonu ve ısı transferi özelliklerinden daha gelişmiş olması hedeflenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde mineral yağa kıyasla Al_2O_3 nano-akışkanı 0,05 g/L konsantrasyonunda %33,18’lik bir gelişim kaydederek bu çalışmadaki en iyi delinme gerilimi değerine ulaşmıştır. Bununla birlikte SiO_2 ve MgO nano-akışkanları mineral yağa göre daha iyi bir yalıtım performansı olduğu görülmüştür. Öte yandan BN nano-akışkanı mineral yağa göre delinme geriliminde olumlu bir sonuç gösterememiştir. Delinme gerilimi deney sonuçları göz önüne alındığında Al_2O_3 , SiO_2 ve MgO nano-akışkanların geleneksel yalıtım yağlarına göre daha iyi yalıtım performanslarının olduğunu gösterilmiştir. Güç sistemleri ekipmanlarından her anlamda yüksek kararlık beklenilmektedir. Bu bağlamda nano-akışkanların mineral yağa göre delinme geriliminde daha kararlı bir yapı sergilemesi bu yalıtım sıvılarının da üstün olduğunu kanıtlamaktadır. Bir başka önemli husus konsantrasyon oranlarının belirlenmesidir. Deney çalışmalarının sonucunda konsantrasyon oranlarının optimum noktasının bulunmasının önem arz ettiği görülmüştür. Çünkü mineral yağın içerisindeki nanopartikül miktarı kritik seviyeye ulaştıktan sonra delinme gerilimi düşüş eğilimine geçmekte ve kararlı yapısı bozulmaktadır. Öte yandan her nanopartikülün farklı özgül ağırlığı, tanecik boyutu ve kesim yöntemleri olabileceğinden kritik seviyeye ulaştığı konsantrasyon seviyeleri farklı olabilmektedir. Buna örnek olarak MgO nanopartikülü söylenilebilir. Bu çalışmada kullanılan Al_2O_3 , SiO_2 ve BN nanopartikülleri 0,05 g/L konsantrasyonunda kritik seviyeye ulaşırken MgO nanopartikülü 0,5 g/L’ de dahi kritik seviyeye ulaşmamış olabilir. MgO nano-akışkanın en verimli noktasını bulmak için 0,5 g/L’ den daha yüksek bir konsantrasyon seviyesi seçilerek test yapılması gerekir.

SiO_2 nano-akışkanına 0,22 g/L ve 1,1 g/L kütle konsantrasyonunda viskozite ölçümleri yapılmıştır. Kütlece yoğun olan nano-akışkanda %10,64’lik bir artış gözlemlenmiştir ve yoğunluk artışı doğal olarak viskoziteyi artırmaktadır. Öte yandan SiO_2 ’nin termal iletkenlik ölçüm sonuçlarına göre %8,55’lik bir artışla nano-akışkanın mineral yağa

kıyasla daha iyi soğutma performansı sağlayabileceği öngörülmüştür. Viskozite artışı olumsuz bir özellik gibi görünse de termal iletkenlikteki gelişme viskozite artışını tolere etmektedir.

Bir başka kritik konu topaklanma oluşumu ve buna bağlı olarak çökelmedir. Topaklanma her konsantrasyon seviyesinde oluşmaktadır. Nanopartikül süspansiyonu içerisinde kritik seviyeye ulaşmadan önce topaklanma oluşumu düşüktür. Ancak kritik seviye geçildikten sonra topaklanma oluşumu oldukça artmaktadır. Bu çalışmadaki SiO₂'nin Sem görüntülerinde bu olgu açıkça görülmektedir. Bunun sonucunda çökelme ve tortulaşma başlar. Topaklanma oluşumunda diğer bir faktör ise özkütledir. Nanopartiküllerin özkütleleri farklı olduğu için farklı miktarlarda topaklanma gerçekleşebilir. Özellikle metalik nanopartiküllerde topaklanma oluşumu ve çökmesi daha fazla meydana gelmektedir. Öte yandan topaklanma oluşumu stabiliteyi bozacağından nano-akışkanın yalıtım kararlılığını da düşürecektir. Literatürdeki çalışmalarda bu problem yüzey aktif madde ile önlenemediği belirtilmiştir. Bu çalışmada yüzey aktif madde kullanılmamıştır. Bu yüzden yüzey aktif maddenin etkisi gözlemlenmemiştir.

4.2 ÖNERİLER

Bu çalışmada numuneler üzerinde yapılan deneylerin çıktıları ümit verici olsa da laboratuvar ortamında gerçekleşmiştir. Gerçek bir trafonun içerisinde kapsamlı bir çalışma yapılması gerekmektedir. Ancak böyle bir çalışmadan önce aşağıda aktarılan konuların üzerine çalışılması gerekir.

- Baz yalıtım yağında asılı duran nanopartiküllerin zamanla kararlılığı bozulmakta, topaklanma oluşumu, çökelme problemleri ve tortu oluşturma eğilimi göstermektedir. Özellikle iletken nanopartiküllerin oluşturacağı tortular transformatörün içerisinde kullanılan yalıtkan malzemelerdeki elektrik arızaları olasılığını artırabilir. Çökelme ve topaklanma sorunu üzerinde çalışılması gerekmektedir.
- Nanopartiküller üstün performanslarını kritik konsantrasyon noktasında verebilmektedir. Bu sebepten dolayı en uygun konsantrasyon seviyesinin belirlenmesi ve stabilizasyonun sağlanması gerekir. Literatürde ve bu çalışmada aralıklı konsantrasyon seviyeleri seçilip deneyler yapılmıştır. En verimli noktayı keşfedebilmek için konsantrasyon aralıklarını daraltarak çok fazla deney

yapılmasına gerek duyulmaktadır. Öte yandan kararlılığı sağlamak adına konsantrasyon oranı, nanopartikül boyutu ve nanopartikül çeşitlerini belirlemek önem arz etmektedir.

- Kullanılmış yağlara yapılan rejenerasyon işlemlerinde küçük nano boyutlarda eliminasyon yapan filtreler kullanılmaktadır. Bu süreçler nanopartiküllere uygun değildir. Öte yandan saf yağlara eklenerek hazırlanan nano-akışkanların maliyetleri saf yağlardan daha yüksektir.
- Nanopartiküllerin yalıtım yağları içerisinde kullanılmasında, sıcaklık ve su içeriği furanik bileşenleri vb. gibi sebeplerden oluşabilecek kimyasal etkiler üzerine çalışmalar yapılabilir.
- Nano-akışkanların transformatörlerde kullanılan katı yalıtım malzemeleri üzerindeki etkileri araştırılmalıdır. Özellikle nano-akışkanların katı yalıtım malzemelerde yaşlanma olgusunu nasıl etkilediği ve çökelpmenin bu materyaller üzerindeki etkileri üzerinde çalışma yapılabilir. Literatürde nano-akışkanların izolasyon kağıtları üzerindeki etkileri araştırılmıştır ancak çok fazla çalışma mevcut değildir.
- Bu çalışmada nano-akışkanların termal etkisi incelenmiş ve bazı yağlara göre daha iyi performans verdiği anlaşılmıştır. Bu yüzden farklı radyatör tiplerindeki soğutma etkileri ve doğal soğutmalı veya dahili soğutmalı transformatör sistemlerdeki etkileri araştırılabilir.

Yapılan bu çalışmanın neticesinde geleneksel yalıtım yağlarına oranla bazı nano-akışkanlar daha iyi yalıtım ve ısı transferi göstermişlerdir. Ancak bu verilerin hepsi laboratuvar ortamında yapılmıştır. Bu çalışmaları gerçek boyutlarda bir prototip transformatörde yük altında çalışırken yapılması daha önemlidir. Yük altında üst yağ sıcaklığı ve en sıcak nokta sıcaklıkları anlık kayıt altına alınarak değişimler gözlemlenmelidir. Öte yandan nano-akışkanların katı yalıtım malzemelere etkileri ve transformatör kazanının dibinde oluşabilecek çökelmeler gözlemlenmelidir. İlerleyen dönemlerde dünya ölçeğinde kayda değer çalışmalar ortaya çıkacağı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] F. Ahmad, A. A. Khan, Q. Khan, & Hussain M. R., "State-of-art in nano-based dielectric oil: A review", *IEEE Access*, c.7, ss. 13396-13410, 2019.
- [2] A. A. Pollitt, "Mineral oils for transformers and switchgear", *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part II: Power Engineering*, c. 90, sayı. 13, ss. 15-22, 1943.
- [3] S. Tenbohlen, Jagers J., Bastos G., Desai B., Diggin B., Fuhr J., ... & Manski, P., "Development and results of a worldwide transformer reliability survey", *Proceedings of the CIGRE SC A2 Colloquium, Shanghai, China*, c. 2025, 2015.
- [4] "Anonim, (2022, 18 Eylül). [Online]. Erişim adresi": <https://www.modernpowersystems.com/> (erişim Eyl. 18, 2022).
- [5] Rao U. Mohan, Yog Raj Sood, & Raj Kumar Jarial., "Oxidation stability enhancement of a blend of mineral and synthetic ester oils", *IEEE Electrical Insulation Magazine* c. 32, sayı. 2 ss. 43-47, 2016.
- [6] Fofana Issouf, "50 years in the development of insulating liquids." *IEEE Electrical Insulation Magazine* c. 2, sayı. 5, ss. 13-25, 2013.
- [7] Rafiq M., Shafique M., Azam A., & Ateeq M., "The impacts of nanotechnology on the improvement of liquid insulation of transformers: Emerging trends and challenges." *Journal of Molecular Liquids*, c.302, ss. 112482, 2020.
- [8] Srivastava Manish, Sunil Kumar Goyal & Amit Saraswat., "Ester oil as an alternative to mineral transformer insulating liquid." *Materials Today: Proceedings*, c.43, ss. 2850-2854, 2021.
- [9] Rouse T. O. "Mineral insulating oil in transformers." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, c.14, sayı.3, ss. 6-16, 1998.
- [10] Mehmet Karatas & Yunus Bicen., "Nanoparticles for next-generation transformer insulating fluids: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c.167, ss.112645, 2022.
- [11] McShane C. Patrick, "Relative properties of the new combustion-resist vegetable-oil-based dielectric coolants for distribution and power transformers", *IEEE Transactions on industry applications*, c. 37, sayı. 4, ss. 1132-1139, 2001.
- [12] Shen, Z., Wang F. Wang Z., & Li, J., "A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c.141, ss. 110783, 2021.
- [13] Goldenhar, L. M., Ruder, A. M., Ewers L. M., Earnest S., Haag W. M., Petersen M. R, "Concerns of the dry-cleaning industry: A qualitative investigation of labor and management." *American journal of industrial medicine*, c. 35, sayı.2, ss. 112-123, 1999.

- [14] Rozga, P., Beroual, A., Przybyłek, P., Jaroszewski, M., & Strzelecki, K., "A review on synthetic ester liquids for transformer applications," *Energies*, c. 13, say1. 23, 6429, 2020.
- [15] Rouabeh, J., M'barki, L., Hammami, A., Jallouli, I., & Driss, A. "Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers." *Heliyon*, c.5, say1. 3, ss. e01159, 2019.
- [16] Yadav Neera, Raj Kumar Jarial & U. Mohan Rao, "Characterization of Mineral oil Based Fe_3O_4 Nanofluid for Application in Oil Filled Transformers." *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*, c.10, say1.2, 2018.
- [17] Perrier Christophe, & A. J. I. E. I. M. Beroual, "Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester, and silicone oils." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, c.25, say1. 6, ss. 6-13, 2009.
- [18] Fernández I., Ortiz A., Delgado F., Renedo C., & Perez S., "Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers." *Electric Power Systems Research*, c. 98, ss. 58-69, 2013.
- [19] Rafiq M., Lv Y. Z., Zhou Y., Ma K. B., Wang W., Li C. R., & Wang Q., "Use of vegetable oils as transformer oils—a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c.52, ss. 308-324, 2015.
- [20] Mazzaro M., De Bartolomeo D., Bemporad E., Berardi S., Ledda A., Calcara L., ... & Salvadori M. "Power transformer fire and environmental risk reduction by using natural esters." *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), IEEE 2017*, Manchester, U.K., 2017, ss. 1-4.
- [21] Mazzaro M., De Bartolomeo D., Pompili M., Calcara L., Sangiovanni S., Scatiggio F., ... & Falconi M., "Fire simulation tests of mineral oil and natural esters transformers." *2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), IEEE 2019*, Roma, Italy, ss. 1-4.
- [22] Choi S. US, & Jeffrey A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles" No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29. Argonne National Lab.(ANL), Argonne 1995, San Francisco, A.B.D.
- [23] Fal Jacek, Omid Mahian, & Gawęł Żyła., "Nanofluids in the service of high voltage transformers: breakdown properties of transformer oils with nanoparticles, a review." *Energies*, c. 11, say1. 11, ss. 2942, 2018.
- [24] Saidur Rahman, K. Y. Leong, & Hussein A. Mohammed., "A review on applications and challenges of nanofluids." *Renewable and sustainable energy reviews*, c.15, say1.3, ss. 1646-1668, 2011.
- [25] Du Y., Lv Y., Li C., Chen M., Zhong Y., Zhou J., ... & Zhou, Y., "Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil." *IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c.19, say1. 3, ss. 770-776, 2012.

- [26] Taheri A. A., Abdali A., Taghilou M., Alhelou H. H., & Mazlumi K., "Investigation of mineral oil-based nanofluids effect on oil temperature reduction and loading capacity increment of distribution transformers." *Energy Reports*, c. 7, ss. 4325-4334, 2021.
- [27] Aslam M., Arbab M. N., Basit A., Haq I. U., Saher S., Khan A. D., & Khattak A. N., "Improved insulation durability to improve transformer aging." *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, c.21, sayı. 1, 2020.
- [28] Mehrvarz Bizhan, Fatemeh Bahadori, & Saeed Zolfaghari Moghaddam, "Heat transfer enhancement in distribution transformers using TiO₂ nanoparticles." *Advanced Powder Technology*, c.30, sayı. 2, ss.221-226, 2019.
- [29] Yang X., Ho S. L., Fu W., Zhang Y., Xu G., Yang Q., & Deng W., "Analysis and design of nanofluid-filled power transformers." *Electrical Engineering*, c.102, sayı.1, ss.321-329, 2020.
- [30] Swati K., Yadav K. S., Sarathi R., Vinu R., & Danikas M. G., "Understanding Corona discharge activity in titania nanoparticles dispersed in transformer oil under AC and DC voltages." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c.24, sayı. 4, ss. 2325-2336, 2017.
- [31] Taghikhani Zahra, Mohammad Ali Taghikhani & G. B. Gharehpetian, "A comprehensive investigation on the efficiency of alumina nanoparticles in ONAN and OFAN cooling performance enhancement of transformers." *Powder Technology*, c. 387, ss. 466-480, 2021.
- [32] Alizadeh H., Pourpasha H., Heris S. Z. & Estelle P., "Experimental investigation on thermal performance of covalently functionalized hydroxylated and non-covalently functionalized multi-walled carbon nanotubes/transformer oil nanofluid." *Case Studies in Thermal Engineering*, c. 31, ss. 101713, 2022.
- [33] Hussain M. R., Khan Q., Khan A. A., Refaat S. S. & Abu-Rub, H., "Dielectric performance of magneto-nanofluids for advancing oil-immersed power transformer." *IEEE Access*, c. 8, ss. 163316-163328, 2020.
- [34] Walvekar R., Zairin D. A., Khalid M., Jagadish P., Mubarak N. M. & Gupta T. C. S. M., "Stability, thermo-physical and electrical properties of naphthenic/POME blended transformer oil nanofluids." *Thermal Science and Engineering Progress*, c. 23, ss. 100878, 2021.
- [35] Bhatt Mihir A. & Praghresh J. Bhatt, "A review on electrical characteristics of nanofluid based transformer oil." *Indian J. Sci. Technol*, c. 12, ss. 27, 2019.
- [36] IEC156 International standard, Insulating liquids-Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency-Test Method, 2nd edition, 1995.
- [37] Khaled Usama, and Abderrahmane Beroual, "AC dielectric strength of mineral oil-based Fe₃O₄ and Al₂O₃ nanofluids." *Energies*, c.11, sayı. 12, ss. 3505, 2018.
- [38] Rajňák M., Kurimský J., Cimbala R., Čonka Z., Bartko P., Šuga M., ... & Timko, M., "Statistical analysis of AC dielectric breakdown in transformer oil-based

- magnetic nanofluids." *Journal of Molecular Liquids*, c. 309, ss. 113243, 2020.
- [39] Zhang C., Wang Y., Yan Z., & He Z., "Effect of the coexistence of Al_2O_3 nanoparticles and water on transformer oil electrical performance." *IEEE Access*, c. 7, ss. 10189-10195, 2019.
 - [40] Zhang C., Wang Y., Yan Z., & He Z., "Interplay between nanoparticles and water on dielectric properties of nanofluids." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 26, sayı. 5, ss. 1456-1462, 2019.
 - [41] Abd-Elhady Amr M., Ahmed A. Abdul-Aleem, & Mohamed A. Izzularab, "Electrical properties evaluation of double-layer nano-filled oil-paper composites." *IET Science, Measurement & Technology*, c. 15, sayı. 1, ss. 77-84, 2021.
 - [42] Lv Y. Z., Zhou Y., Li C. R., Wang Q., & Qi B., "Recent progress in nanofluids based on transformer oil: preparation and electrical insulation properties." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, c. 30, sayı. 5, ss. 23-32, 2014.
 - [43] Yue-Fan D. U., Yu-zhen L. V., Jian-Quan Z., Mu-tian C., Xiao-xin L., & Cheng-rong L., "Effect of ageing on insulating property of mineral oil-based TiO_2 nanofluids." *2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids*. IEEE 2011, Trondheim, Norveç, ss. 1-4.
 - [44] Rajda, Nikita, and R. R. Patel., "Characterization of virgin and aged transformer oil with SiO_2 nanoparticles." *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. IEEE 2017, Vellore, Hindistan, ss. 1-4.
 - [45] Dessouky, S. S., Mansour, D. E. A., Shaban, M., & Abdelwahab, S. A. M., "Insulation performance enhancement of aged current transformers using nanofluids." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 126, ss. 106613, 2021.
 - [46] Jin, H., Andritsch, T., Tsekmes, I. A., Kochetov, R., Morshuis, P. H., & Smit, J. J., "Properties of mineral oil based silica nanofluids." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* c. 21, sayı. 3, ss. 1100-1108, 2014.
 - [47] Ge, Y., Niu, M., Wang, L., Huang, M., Lv, Y., Li, C., & Yuan, J. "Effects of TiO_2 nanoparticle size on dielectric properties of transformer oil." *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, IEEE 2018, Cancun, Meksika, ss. 136-139.
 - [48] Atiya, E. G., Mansour, D. E. A., Khattab, R. M., & Azmy, A. M. "Dispersion behavior and breakdown strength of transformer oil filled with TiO_2 nanoparticles." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 22, sayı. 5, ss. 2463-2472, 2015.
 - [49] Contreras, J. E., E. A. Rodriguez, & J. Taha-Tijerina. "Nanotechnology applications for electrical transformers—A review." *Electric Power Systems Research*, c. 143, 573-584, ss. 2017.
 - [50] Khan, Suhaib Ahmad, Asfar Ali Khan, & Mohd 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)*, IEEE 2019, Hyderabad, India, ss. 1-6.

- [51] Du, Y. F., Lv, Y. Z., Jian-Quan, Z., Li, X. X., & Li, C. R., "Breakdown properties of transformer oil-based TiO₂ nanofluid." *2010 Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena*, IEEE 2010, West Lafayette, A.B.D, ss. 1-4.
- [52] Chakraborty, B., Raj, K. Y., Pradhan, A. K., Chatterjee, B., Chakravorti, S., & Dalai, S., "Investigation of dielectric properties of TiO₂ and Al₂O₃ nanofluids by frequency domain spectroscopy at different temperatures." *Journal of Molecular Liquids*, c. 330, ss. 115642, 2021.
- [53] Hanai, M., Hosomi, S., Kojima, H., Hayakawa, N., & Okubo, H., "Dependence of TiO₂ and ZnO nanoparticle concentration on electrical insulation characteristics of insulating oil." *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE 2013, Chenzhen, Çin, ss. 780-783.
- [54] Rafiq, M., Li, C., Ge, Y., Lv, Y., & Yi, K., "Effect of Fe₃O₄ nanoparticle concentrations on dielectric property of transformer oil." *2016 IEEE international conference on high voltage engineering and application (ICHVE)*, IEEE 2016, Chengdu, Çin, ss. 1-4.
- [55] Khaled, Usama & Abderrahmane Beroual, "Statistical investigation of AC dielectric strength of natural ester oil-based Fe₃O₄, Al₂O₃, and SiO₂ nanofluids." *IEEE Access*, c. 7, ss. 60594-60601, 2019.
- [56] Khaled Usama, & Abderrahmane Beroual., "AC dielectric strength of synthetic ester-based Fe₃O₄, Al₂O₃ and SiO₂ nanofluids—conformity with normal and weibull distributions." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c.26, sayı. 2, ss. 625-633, 2019.
- [57] Khaled Usama, & Abderrahmane Beroual, "AC dielectric strength of mineral oil-based Fe₃O₄ and Al₂O₃ nanofluids." *Energies*, c. 11, sayı. 12, ss. 3505, 2018.
- [58] Samy, A. M., Ibrahim, M. E., Abd-Elhady, A. M., & Izzularab, M. A., "On electric field distortion for breakdown mechanism of nanofilled transformer oil." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 117, ss. 105632, 2020.
- [59] Yao, W., Wang, W., Sun, P., Mehmood, M. A., & Huang, Z., "Effect of h-BN and Fe₃O₄ nanoparticles on streamer propagation and dissipation in vegetable oil based nanofluids." *AIP Advances*, c. 9, sayı. 8, ss. 085306, 2019.
- [60] Khaled Usama, & Abderrahmane Beroual, "Comparative study on the AC breakdown voltage of transformer mineral oil with transformer oil-based Al₂O₃ nanofluids." *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, IEEE 2018, Atina, Yunanistan, ss. 1-4.
- [61] Muangpratoom, P., Kunakorn, A., Pattanadech, N., & Vittayakorn, W., "Effect of different temperatures on AC breakdown voltage of mineral oil based

- nanofluids." *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, IEEE 2018, Chiang Rai, Thailand, ss. 536-539.
- [62] Rafiq, M., Lv, Y., Li, C., & Yi, K., "Effect of different nanoparticle types on breakdown strength of transformer oil." *2016 IEEE conference on electrical insulation and dielectric phenomena (CEIDP)*, IEEE, 2016, Toronto, Canada, ss. 436-440.
 - [63] Hwang, J. G., Zahn, M., O'Sullivan, F. M., Pettersson, L. A., Hjortstam, O., & Liu, R., "Electron scavenging by conductive nanoparticles in oil insulated power transformers." *Electrostatistics Joint Conference*, IEEE 2009, ss. 1.
 - [64] Hwang, J. G., Zahn, M., O'Sullivan, F. M., Pettersson, L. A., Hjortstam, O., & Liu, R., "Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based nanofluids." *Journal of applied physics*, c. 107, sayı. 1, ss. 014310, 2010.
 - [65] Chandrasekar, S., Chandramohan, J., Montanari, G. C., & Uthirakumar, P., "Developing eco-friendly nanostructured oil: Partial discharge and breakdown voltage characterization of transformer corn oil." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 27, sayı. 5, ss. 1611-1618, 2020.
 - [66] Lv, Y., Du, Q., Wang, L., Sun, Q., Huang, M., Li, C., & Qi, B., "Effect of TiO₂ nanoparticles on the ion mobilities in transformer oil-based nanofluid." *AIP Advances*, c. 7, sayı. 10, ss. 105022, 2017.
 - [67] Du, Y., Lv, Y., Li, C., Chen, M., Zhou, J., Li, X., ... & Tu, Y., "Effect of electron shallow trap on breakdown performance of transformer oil-based nanofluids." *Journal of Applied Physics*, c. 110, sayı. 10, ss. 104104, 2011.
 - [68] Mohamad, N. A., Azis, N., Jasni, J., Kadir, M. Z. A. A., Yunus, R., & Yaakub, Z., "Effect of surfactants on the lightning breakdown voltage of palm oil and coconut oil based Al₂O₃ nanofluids." *Nanotechnology*, c. 31, sayı. 42, ss. 425708, 2020.
 - [69] Raymon, A., Sakthibalan, S., Cinthal, C., Subramaniraja, R., & Yuvaraj, M., "Enhancement and comparison of nano-ester insulating fluids." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 23, sayı. 2, ss. 892-900, 2016.
 - [70] Koutras, K., Pyrgioti, E., Naxakis, I., Charalampakos, V., & Peppas, G., "AC Breakdown Performance of Al₂O₃ and SiC Natural Ester Based Nanofluids." *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, IEEE 2020, Madrid, İspanya, ss. 1-5.
 - [71] Abid, M. A., Khan, I., Ullah, Z., Ullah, K., Haider, A., & Ali, S. M., "Dielectric and thermal performance up-gradation of transformer oil using valuable nanoparticles." *IEEE Access*, c. 7, ss. 153509-153518, 2019.
 - [72] Jacob, Joyce, P. Preetha, & T. K. Sindhu. "Stability analysis and characterization

- of natural ester nanofluids for transformers." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 27, say1. 5, ss. 1715-1723, 2020.
- [73] Jacob, Joyce, P. Preetha, & Sindhu Thiruthi Krishnan. "Review on natural ester and nanofluids as an environmental friendly alternative to transformer mineral oil." *IET Nanodielectrics* c. 3, say1. 2, ss. 33-43, 2020.
 - [74] Farade, R. A., Wahab, N. I. A., Mansour, D. E. A., Azis, N. B., Jasni, J. B., Veerasamy, V., ... & Murthy, A. S., "Investigation of the effect of sonication time on dispersion stability, dielectric properties, and heat transfer of graphene based green nanofluids." *IEEE Access*, c. 9, ss. 50607-50623, 2021.
 - [75] Oparanti, S. O., A. A. Khaleed, & A. A. Abdelmalik. "Nanofluid from palm kernel oil for high voltage insulation." *Materials Chemistry and Physics*, c. 259, ss. 123961, 2021.
 - [76] Choi, Cheol, H. S. Yoo, & J. M. Oh., "Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants." *Current Applied Physics* c. 8, say1. 6, ss. 710-712, 2008.
 - [77] Zakaria, I. H., Ahmad, M. H., Arief, Y. Z., Awang, N. A., & Ahmad, N. A., "Characteristics of mineral oil-based nanofluids for power transformer application." *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, c. 7, say1. 3, ss. 1530, 2017.
 - [78] Lv, Y., Ge, Y., Sun, Z., Sun, Q., Huang, M., Li, C., ... & Xing, Z., "Effect of nanoparticle morphology on pre-breakdown and breakdown properties of insulating oil-based nanofluids." *Nanomaterials*, c. 8, say1. 7, ss. 476, 2018.
 - [79] Lv, Y., Ge, Y., Li, C., Wang, Q., Zhou, Y., Qi, B., ... & Yuan, J., "Effect of TiO₂ nanoparticles on streamer propagation in transformer oil under lightning impulse voltage." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 23, say1. 4, ss. 2110-2115, 2016.
 - [80] Lv, Y., Zhou, Y., Li, C., Ge, Y., & Qi, B., "Creeping discharge characteristics of nanofluid-impregnated pressboards under ac stress." *IEEE Transactions on Plasma Science*, c. 44, say1. 11, ss. 2589-2593, 2016.
 - [81] Lv, Y. Z., Li, C., Sun, Q., Huang, M., Li, C. R., & Qi, B., "Effect of dispersion method on stability and dielectric strength of transformer oil-based TiO₂ nanofluids." *Nanoscale research letters*, c. 11, say1. 1, ss. 1-6, 2016.
 - [82] Elsad, R. A., Sh A. Mansour, & M. A. Izzularab. "Loading different sizes of titania nanoparticles into transformer oil: A study on the dielectric behavior." *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, c. 93, say1. 3, ss. 615-622, 2020.
 - [83] Amiri, A., Shanbedi, M., Ahmadi, G., & Rozali, S., "Transformer oils-based graphene quantum dots nanofluid as a new generation of highly conductive and stable coolant." *International Communications in Heat and Mass Transfer*, c. 83, ss. 40-47, 2017.
 - [84] D. Weerapun, & S. Wongwises, "A critical review of convective heat transfer of

- nanofluids." *Renewable and sustainable energy reviews*, c. 11, sayı. 5, ss. 797-817, 2007.
- [85] Farhan, M., Saad Hameed, M., Suleman, H. M., & Anwar, M., "Heat transfer enhancement in transformers by optimizing fin designs and using nanofluids." *Arabian Journal for Science and Engineering*, c. 44, sayı. 6, ss. 5733-5742, 2019.
 - [86] Swati, K., Vishnu, M., Prakash, K. A., & Sarathi, R., "Investigation on heat transfer characteristics of nano titania added transformer oil with hotspot temperature." *Nano Express*, c. 1, sayı. 1, ss. 010051, 2020.
 - [87] Jeong, G. Y., Jang, S. P., Lee, H. Y., Lee, J. C., Choi, S., & Lee, S. H., "Magnetic-thermal-fluidic analysis for cooling performance of magnetic nanofluids comparing with transformer oil and air by using fully coupled finite element method." *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 49, sayı. 5, ss. 1865-1868, 2013.
 - [88] Fang, F., Guan, W., Qian, H., Kong, H., Wang, X., & Zhang, N., "The heat transfer characteristics of transformer vegetable oil-based nanofluid." *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, IEEE 2016, Chengdu, Çin, ss. 1-4.
 - [89] Swift, G. W., Zocholl, E. S., Bajpai, M., Burger, J. F., Castro, C. H., Chano, S. R., ... & Yalla, M., "Adaptive transformer thermal overload protection." *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 16, sayı. 4, ss. 516-521, 2001.
 - [90] Shukla, Gaurav, & Hemantkumar Aiyer, "Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 22, sayı. 4, ss. 2185-2190, 2015.
 - [91] Singh, Mandeep, & Lal Kundan, "Experimental study on thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃-nanotransformer oil." *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME)*, c. 2, sayı. 3, ss. 2319-3182, 2013.
 - [92] Huminic, Gabriela, & Angel Huminic, "Application of nanofluids in heat exchangers: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 16, sayı. 8, ss. 5625-5638, 2012.
 - [93] Estellé, P., Cabaleiro, D., Żyła, G., Lugo, L., & Murshed, S. S., "Current trends in surface tension and wetting behavior of nanofluids." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 94, ss. 931-944, 2018.
 - [94] Ramesh, Gopalan, & Narayan Kotekar Prabhu, "Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment." *Nanoscale research letters*, c. 6, sayı. 1, ss. 1-15, 2011.
 - [95] Thomas, P., & Nandini E. Hudedmani. "The Effect of Nanoparticles on the Insulating Characteristics of Synthetic Esters." *2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET)*, IEEE 2019, Hyderabad, Hindistan, ss. 1-3.

- [96] Beheshti, Amir, Mehdi Shanbedi, & Saeed Zeinali Heris, "Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, c. 118, sayı. 3, ss. 1451-1460, 2014.
- [97] Liu, D., Zhou, Y., Yang, Y., Zhang, L., & Jin, F. "Characterization of high performance AIN nanoparticle-based transformer oil nanofluids." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 23, sayı. 5, ss. 2757-2767, 2016.
- [98] Dombek, G., Z. Nadolny, & P. Przybyłek. "The study of thermal properties of mineral oil and synthetic ester modified by nanoparticles TiO₂ and C₆₀." *2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, IEEE 2014, Poznan, Polanya, ss. 1-4.
- [99] Fontes, Douglas Hector, Gherhardt Ribatski, & Enio Pedone Bandarra Filho, "Experimental evaluation of thermal conductivity, viscosity and breakdown voltage AC of nanofluids of carbon nanotubes and diamond in transformer oil." *Diamond and Related Materials*, c. 58, ss. 115-121, 2015.
- [100] Ramu, T. S., B. K. Keshavan, & KN Balasubramanya Murthy, "Application of a class of nano fluids to improve the loadability of power transformers." *2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, IEEE 2012, Bangalore, Hindistan, ss. 1-6.
- [101] Sundar, L. S., Sharma, K. V., Naik, M. T., & Singh, M. K., "Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review." *Renewable and sustainable energy reviews*, c. 25, ss. 670-686, 2013.
- [102] Karthik, R., T. Raja, & R. Madavan, "Enhancement of critical characteristics of transformer oil using nanomaterials." *Arabian Journal for Science and Engineering*, c. 38, sayı. 10, ss. 2725-2733, 2013.
- [103] Zhang, Y., Ho, S. L., Fu, W., Yang, X., Wu, H., Yang, H., & Jie, Y., "Numerical study on nanofluids natural convection heat transfer inside power transformer windings." *AIP Advances*, c. 9, sayı. 12, ss. 125343, 2019.
- [104] Ghoneim, S. S., Dessouky, S. S., Taha, I. B., Shaaban, M., & Abdelwahab, S. A. M., "A new approach of tap changer maintenance incorporating nanoparticle insulating oil." *Electrical Engineering*, c. 103, sayı. 2, ss. 931-944, 2021.
- [105] Miao, Jin, Ming Dong, & Liang-Ping Shen, "A modified electrical conductivity model for insulating oil-based nanofluids." *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, IEEE 2012, Bali, Endonezya, ss. 1126-1129.
- [106] Mentlik, V., Trnka, P., Hornak, J., & Totzauer, P., "Development of a biodegradable electro-insulating liquid and its subsequent modification by nanoparticles." *Energies*, c. 11, sayı. 3, ss. 508, 2018.
- [107] Taha-Tijerina, J., Cadena-De La Peña, N., Cue-Sampedro, R., & Rivera-Solorio, C., "Thermo-physical evaluation of dielectric mineral oil-based nitride and oxide nanofluids for thermal transport applications." *Journal of Thermal Science and*

Technology, c. 14, sayı. 1, ss. JTST0007-JTST0007, 2019.

- [108] Fernández, I., Valiente, R., Ortiz, F., Renedo, C. J., & Ortiz, A., "Effect of TiO₂ and ZnO nanoparticles on the performance of dielectric nanofluids based on vegetable esters during their aging." *Nanomaterials*, c. 10, sayı. 4, ss. 692, 2020.
- [109] Yu, D., Zhengyong, H., Bin, D., Gang, C., Tianqin, L., & Jian, L., "Analysis of Thermal Conductivity Calculation Model of Nano Insulating Oil." *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, IEEE 2020, Beijing, Çin, ss. 1-4.
- [110] S. Özerinç, S. Kakaç, & A. Güvenç Yazıcıoğlu, "Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review." *Microfluidics and Nanofluidics*, c. 8, sayı. 2, ss. 145-170, 2010.
- [111] Farade, R. A., Wahab, N. I. B. A., Mansour, D. E. A., Azis, N. B., Jasni, J., Banapurmath, N. R., & Soudagar, M. E. M., "Investigation of the dielectric and thermal properties of non-edible cottonseed oil by infusing h-BN nanoparticles." *IEEE Access*, c. 8, ss. 76204-76217, 2020.
- [112] Zhong, Y., Lv, Y., Li, C., Du, Y., Chen, M., Zhang, S., ... & Chen, L., "Insulating properties and charge characteristics of natural ester fluid modified by TiO₂ semiconductive nanoparticles." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 20, sayı. 1, ss. 135-140, 2013.
- [113] Azizie, Nurin Ainanie, & Nuriziani Hussin. "Preparation of vegetable oil-based nanofluid and studies on its insulating property: A review." *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing 2020, Meleka, Malezya, ss. 1432.
- [114] Ilyas, S. U., Pendyala, R., Narahari, M., & Susin, L., "Stability, rheology and thermal analysis of functionalized alumina-thermal oil-based nanofluids for advanced cooling systems." *Energy conversion and management*, c. 142, ss. 215-229, 2017.
- [115] W. Xiang-Qi, & Arun S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review." *International journal of thermal sciences*, c. 46, sayı. 1, ss. 1-19, 2007.
- [116] Khalil, M., Jan, B. M., Tong, C. W., & Berawi, M. A., "Advanced nanomaterials in oil and gas industry: Design, application and challenges." *Applied energy*, c. 191, ss. 287-310, 2017.
- [117] Rajnak, M., Timko, M., Kopcansky, P., Paulovicova, K., Kuchta, J., Franko, M., ... & Cimbal, R., "Transformer oil-based magnetic nanofluid with high dielectric losses tested for cooling of a model transformer." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, c. 26, sayı. 4, ss. 1343-1349, 2019.
- [118] Koutras, K. N., Naxakis, I. A., Antonelou, A. E., Charalampakos, V. P., Pyrgioti, E. C., & Yannopoulos, S. N., "Dielectric strength and stability of natural ester oil based TiO₂ nanofluids." *Journal of Molecular Liquids*, c. 316, ss. 113901, 2020.
- [119] Taro, M., Shill, D., Das, A. K., & Chatterjee, S., "Experimental investigation of transformer oil based nanofluids for applications in distribution

- transformers." *2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. IEEE 2017, Rupnagarss, Hindistan, 367-370.
- [120] Wang, B., Li, J., Du, B., & Zhang, Z., "Study on the stability and viscosity of Fe 3 O 4 nano-particles vegetable insulating oils." *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. IEEE 2012, Shanghai, Çin, ss. 307-310.
- [121] Hussein, A. M., Kadirgamma, K., Noor, M. M., & Aik, L. K., "Palm oil based nanofluids for enhancing heat transfer and rheological properties." *Heat and Mass Transfer*, c. 54, ss. 3163-3169, 2018.



6. EKLER

Tez çalışmasında verilen hazırlanan numuneler ve yapılan delinme gerilimi testlerinin haricinde farklı konsantrasyon seviyelerinde, farklı nano-akışkanlarda ve farklı delinme gerilimi cihazında ayrıca delinme gerilimi çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada hacim fraksiyonu kullanılmıştır. Phenix marka delinme gerilimi cihazı kullanılmış olup elektrotlar arası mesafe 1,5 mm'dir. Yapılan testte IEC 60156 test standardı kullanılmıştır.

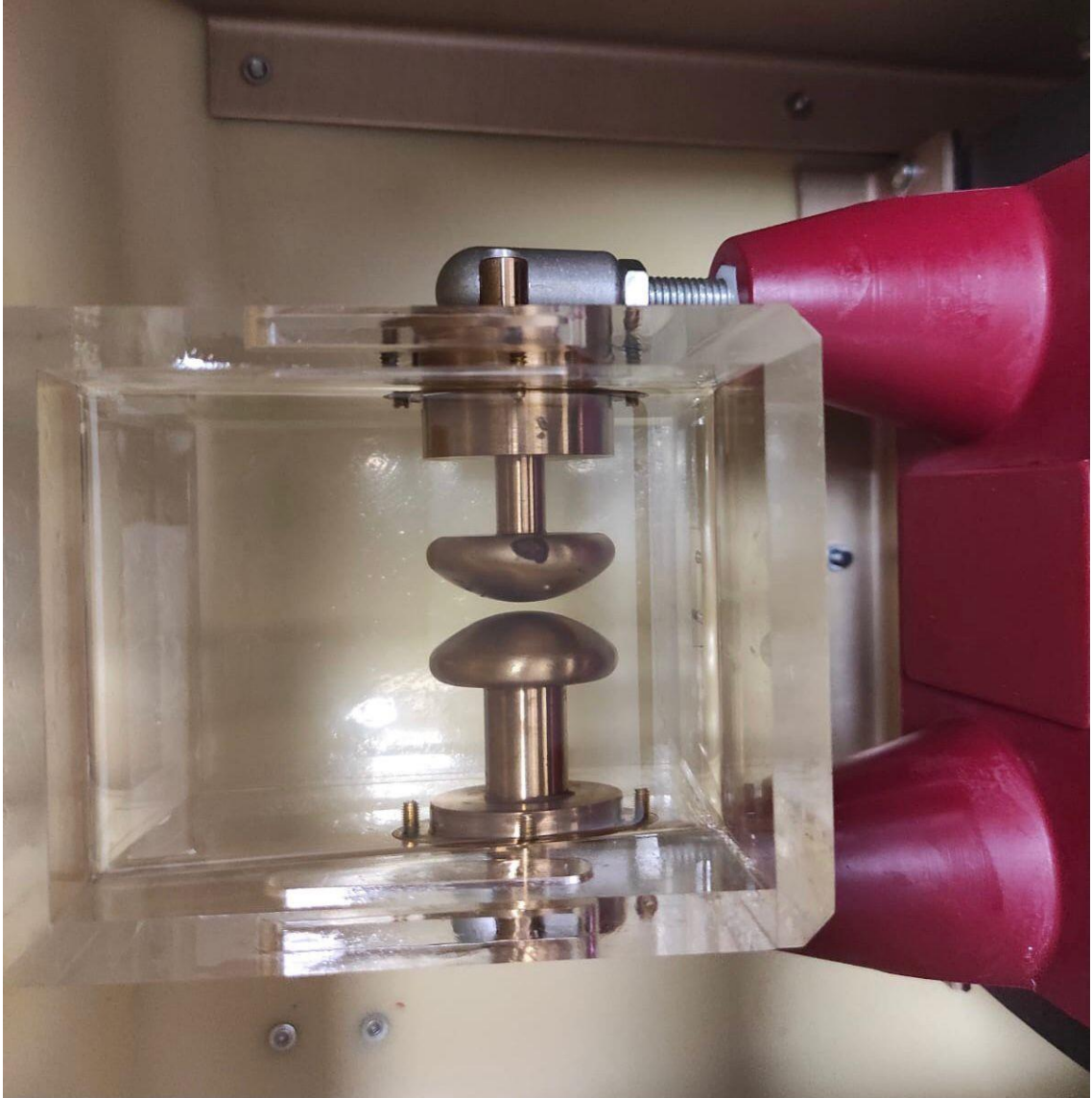
EK 1: FARKLI NUMUNELERDE YAPILAN KONSANTRASYON HESAPLARI

Nanopartikül	Saf Yağ (ml)	Konsantrasyon Seviyesi (% hacim fraksiyonu)
SiO ₂	1000	0,01
		0,025
		0,05
		0,075
		0,1

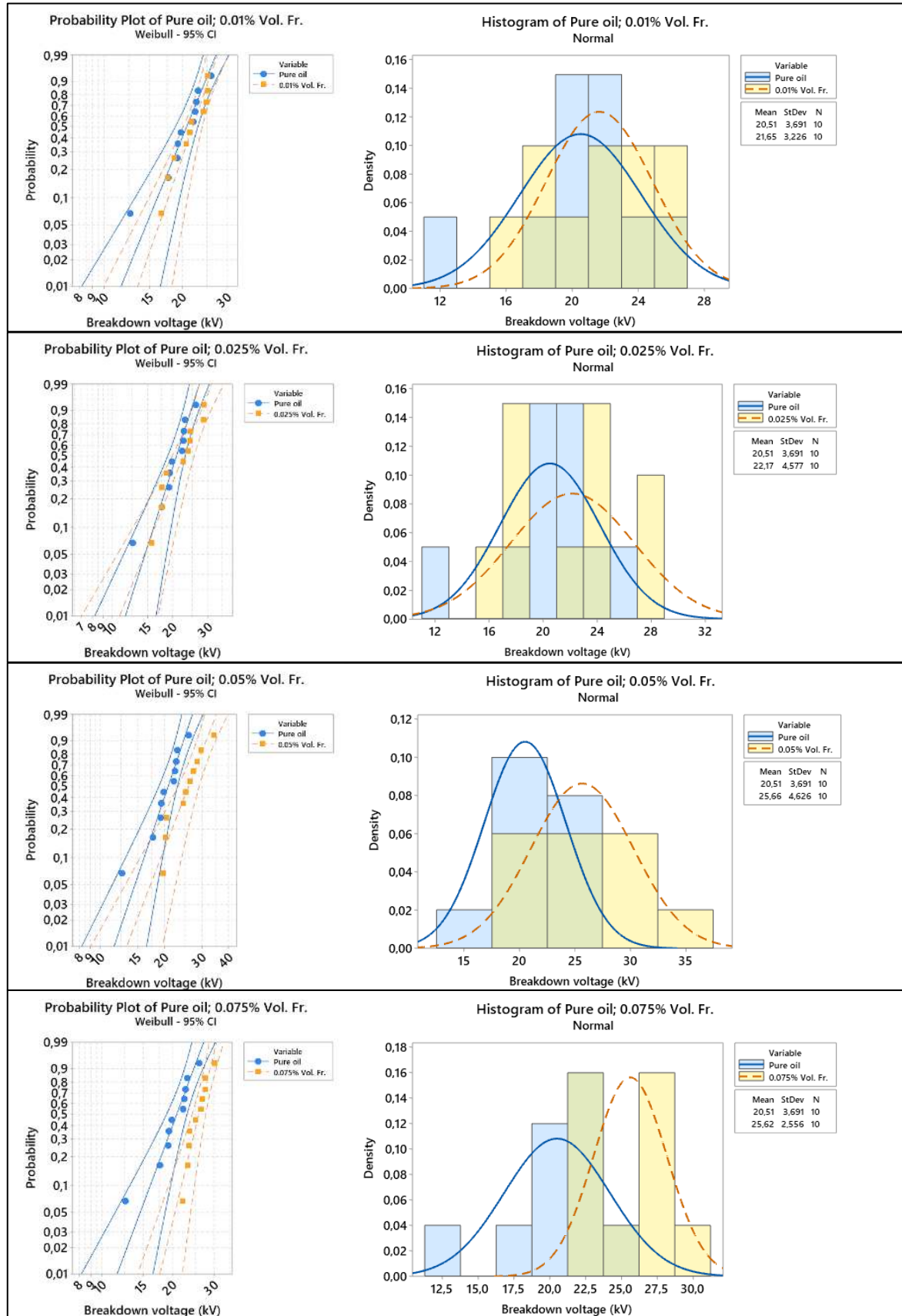
EK 2: DELİNME GERİLİMİ TEST CİHAZI GÖRSELİ



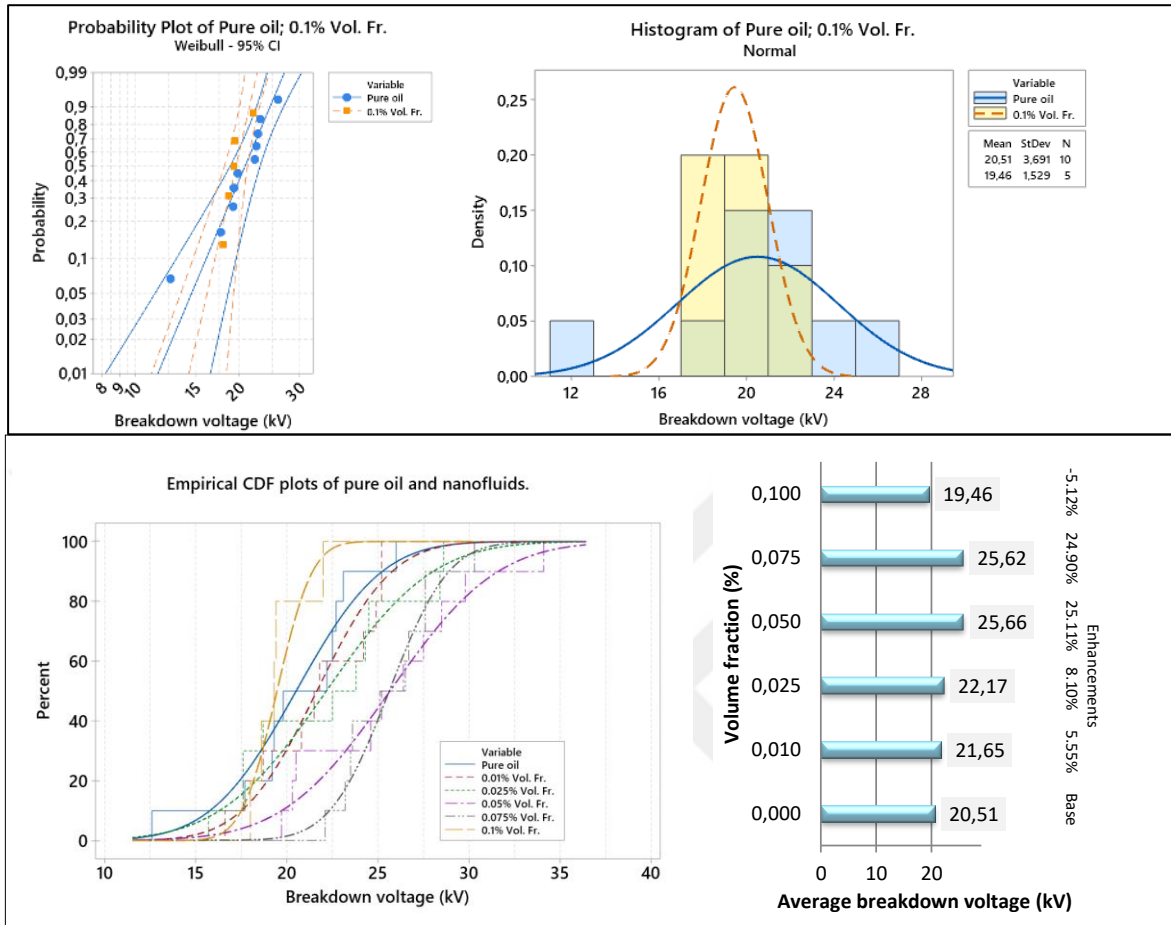
EK 3: DELİNME GERİLİMİ TEST CİHAZININ YAĞ HAZNESİ VE ELEKTROTLARI



EK 4: ÇEŞİTLİ HACİM FRAKSİYONLARINDA DELİNME GERİLİMİ SEVİYELERİ İÇİN GELİŞTİRMELERLE BİRLİKTE WEİBULL VE HİSTOGRAM GRAFİKLERİ (%)-DEVAM



EK 4: ÇEŞİTLİ HACİM FRAKSİYONLARINDA DELİNME GERİLİMİ SEVİYELERİ İÇİN GELİŞTİRMELERLE BİRLİKTE WEİBULL VE HİSTOGRAM GRAFİKLERİ (%)



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet KARATAŞ

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2023
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lise	Sayısal	Beşikdüzü Anadolu Lisesi	2014

YAYINLAR

Karatas, Mehmet, and Yunus Bicen. "Nanoparticles for next-generation transformer insulating fluids: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 167 (2022): 112645.