T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATI YALITKAN MALZEMELERİN FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARI ALTINDA PERFORMANS ANALİZİ

Fırat AKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Temmuz, 2021

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATI YALITKAN MALZEMELERİN FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARI ALTINDA PERFORMANS ANALİZİ

Fırat AKIN tarafından hazırlanan tez çalışması 07.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Oktay ARIKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ, Üye
İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa _____

Danışmanım Doç. Dr. Oktay ARIKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Katı Yalıtkan Malzemelerin Farklı Çalışma Koşulları Altında Performans Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fırat AKIN

İmza

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FYL-2021-4166 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Sevgili Aileme…

TEŞEKKÜR

Nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler ile birlikte her geçen gün gelişmekte olan güç sistemlerinin kalitesi, sürekliliği ve ekonomikliği büyük önem arz etmektedir. Bu niteliklerin sağlanabilmesi adına, güç ekipmanlarının bünyesinde bulunan yalıtkan malzemelerin doğru seçimi ve boyutlandırılması vasıtasıyla yalıtım sistemlerinin uygun bir şekilde tasarlanması elzemdir. Bu tez çalışmasında, yalıtım sistemlerinin temel unsuru olan katı yalıtkan malzemelerin farklı koşullar altındaki dielektrik performans analizleri, kısmi deşarj, dielektrik kayıp ve delinme dayanımı deneyleri aracılığıyla yapılmış ve elde edilen sonuçlar ortaya konmuştur.

Tez çalışmamı gerçekleştirdiğim tüm süreçte, tecrübeleriyle yol göstericim olan, zorlandığım her noktada desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a, gerek yardımları gerekse tavsiyeleri ile laboratuvar çalışmalarıma destek olan Öğr. Gör. C. Çağdaş Uydur'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, her daim sevgilerini ve desteklerini benden esirgemeyerek motivasyon kaynağım olan sevgili aileme en içten şekilde teşekkür ederim.

Fırat AKIN

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ **xi**

TABLO LİSTESİ **xiii**

ÖZET **xv**

ABSTRACT **xvii**

1 GİRİŞ **1**

1.1 Literatür Özeti 1

1.1.1 Katı Yalıtkanların Delinme Dayanımını Etkileyen Faktörler 1

1.1.2 Yaşlandırmanın Yalıtkan Malzeme Üzerindeki Etkileri 6

1.2 Tezin Amacı 13

1.3 Hipotez 15

2 YÜKSEK GERİLİMDE KULLANILAN YALITKAN MALZEMELER **17**

2.1 Katı Yalıtkanlar 17

2.2 Sıvı Yalıtkanlar 18

2.3 Gaz Yalıtkanlar 20

2.4 Vakum 21

2.5 Kompozit Yalıtkanlar 22

2.6 Yalıtkan Malzemelerin Dielektrik Özellikleri 22

2.6.1 Direnç Değerleri 22

2.6.2 Bağıl Dielektrik Sabiti 23

2.6.3 Dielektrik Kayıp Faktörü 23

2.6.4 Delinme Dayanımı 25

2.6.5 Polarizasyon 26

3 YÜKSEK GERİLİMDE KULLANILAN KATI YALITKAN MALZEMELER ve ÖZELLİKLERİ **28**

3.1 Katı Yalıtkanların Kimyasal Sınıflandırılması 28

3.1.1 Organik Yalıtkanlar 29

3.1.2 İnorganik Yalıtkanlar 30

3.1.3 Sentetik Polimerler 33

3.2 Katı Yalıtkanların Termal Sınıflandırılması 42
3.3 Katı Yalıtkan Malzemelerde Delinme Süreçleri 43
3.3.1 Öz Delinme Dayanımı 44
3.3.2 Elektromekanik Delinme 45
3.3.3 Dahili Deşarj Kaynaklı Delinme 46
3.3.4 İz Oluşumu ve Erezyon 47
3.3.5 Termal Delinme 49
3.3.6 Kimyasal ve Elektrokimyasal Bozulma ve Delinme 53
3.4 Katı Yalıtkanlarda Kısmi Deşarj Mekanizması 54
3.4.1 Dahili Deşarj Mekanizması 54
3.5 Dielektrik Ölçümler 55
3.5.1 Delinme Dayanımı 56
3.5.2 Dielektrik Kayıp Faktörü Ölçümü 62
3.5.3 Kısmi Deşarj Ölçümü 65
4 DENEYSEL UYGULAMA 69
4.1 Deneylerde Kullanılan Katı Yalıtkan Malzemeler 69
4.2 Elektrot Tipi ve Gerilim Yükselme Hızının Delinme Olayına Etkisi 71
4.2.1 Deney Düzeneği ve Prosedürü 71
4.2.2 Deney Sonuçları ve Sonuçların Analizi 74
4.3 Isıl Yaşlandırmanın Yalıtkan Malzemelerin Dielektrik Performansına Etkisi 83
4.3.1 Isıl Yaşlandırma Süreci ve Uygulanan Dielektrik Testler 84
5 SONUÇ VE ÖNERİLER 143
KAYNAKÇA 150
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 157

SİMGE LİSTESİ

$U_{\%10}$	%10 İhtimal ile Numuneyi Delecek Gerilim
$U_{\%50}$	%50 İhtimal ile Numuneyi Delecek Gerilim
$U_{\%90}$	%90 İhtimal ile Numuneyi Delecek Gerilim
κ_{0dc}	20 °C Sıcaklıktaki DC İletkenlik
ω	Açısal Frekans
I_R	Aktif Akım
$P_{kayıp}$	Aktif Güç Kaybı
f	Alan Gelişme Faktörü
ε_r	Bağıl Dielektrik Sabiti
P_{dc}	DC Güç Kaybı
κ	DC İletkenlik
ΔE	Delinme Dayanımı Değişimi
$\tan\delta$	Dielektrik Kayıp Faktörü
r	Eğrilik Yarıçapı
$\vec{E}$	Elektrik Alan
A	Elektrot Yüzey Alanı
U	Gerilim
ΔV	Gerilim Değişimi
$\cos\varphi$	Güç Faktörü
R_i	İzolasyon Direnci
C	Kapasite
I_C	Kapasitif Şarj Akımı
θ	Malzeme Sıcaklığı
θ_o	Ortam Sıcaklığı
ρ_D	Özgül Direnç
χ	Polarizasyon
$\overrightarrow{D_p}$	Polarizasyon Kaynaklı Akı Yoğunluğu
$\overrightarrow{D_{ylt}}$	Sıvı, Katı ya da Gaz Ortamdaki Akı Yoğunluğu
$\overrightarrow{D_0}$	Vakum Ortamındaki Elektriksel Akı Yoğunluğu
ε_0	Vakum Ortamının Dielektrik Sabiti
α	Weibull Ölçek Parametresi

β	Weibull Şekil Parametresi
d	Yalıtkan Kalınlığı
P_{yay}	Yayılan Isı
Y	Young Modülü

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Gerilim (Alternating Current)
AD	Anahtarlama Darbesi
ÇBPS	Çapraz Bağlı Polistiren
ÇHGD	Çok Hızlı Geçici Darbe
DC	Doğru Gerilim (Direct Current)
DYPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
EMG	Elektromanyetik Girişim
EPK	Etilen-Propilen Kauçuk
GFRP	Fiberglas Takviyeli Plastik
KD	Kısmi Deşarj
KDBG	Kısmi Deşarj Başlangıç Gerilimi
KDD	Karakteristik Delinme Dayanımı
KDG	Karakteristik Delinme Gerilimi
KDSG	Kısmi Deşarj Sönüm Gerilimi
LDYPE	Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen
OYPE	Orta Yoğunluklu Polietilen
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PCB	Poliklorbifenil
PE	Polietilen
PET	Polietilen Tereftalat
PMMA	Polimetilmetakrilat
PP	Polipropilen
PPS	Polifenilen Sülfit
PTFE	Politetrafloretilen
PVC	Polivinilklorür
SBR/NR	Stiren-Butadien/Doğal Kauçuk
YD	Yıldırım Darbesi
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 (a) Yalıtkan malzemenin paralel modellenmesi ve (b) yalıtkan üzerindeki akım mekanizmalarının fazör gösterimi 23

Şekil 3.1 Moleküler yapılar (a) PVC (b) etilen (c) polietilen 34

Şekil 3.2 Polietilen türlerinin moleküler zincir yapısı 36

Şekil 3.3 Elektrik alanın sıkıştırma etkisi 45

Şekil 3.4 Dahili deşarjlar 47

Şekil 3.5 ÇBPE yalıtkanda oluşan ağaçlanma tipleri (a) çalı (b) ağaç (c) iplik (d) öz.....49

Şekil 3.6 Isı üretimi ve ısı yayılımının farklı durumları için grafik gösterimi....51

Şekil 3.7 Farklı gerilim seviyelerinde sıcaklık değişim süreleri 52

Şekil 3.8 Gerilim altındaki yalıtkan malzemede sıcaklık artışı ile sıcak bölgenin oluşum süreci.....53

Şekil 3.9 Katı yalıtkan içindeki farklı boşluk yapıları 55

Şekil 3.10 Yukarı-aşağı yöntemi örnek uygulama gösterimi 60

Şekil 3.11 Çoklu seviye yöntemi ile örnek uygulama gösterimi 61

Şekil 3.12 Schering köprüsü (a) seri (b) paralel modelleme 62

Şekil 4.1 Deneylerde kullanılan yalıtkan malzemeler (YYPE-PET-prespan SBR/NR).....70

Şekil 4.2 Delinme deneylerine ait genel bağlantı şeması 72

Şekil 4.3 Elektrotlar ve ölçüleri (a) silindir – silindir (b) küre – silindir (c) sivri uç - silindir.....73

Şekil 4.4 Isıl yaşlandırmada kullanılan endüstriyel fırın 84

Şekil 4.5 SBR/NR – YYPE – PET yalıtkanların ısıl yaşlandırılması 85

Şekil 4.6 Prespanın mineral yağ içinde ısıl yaşlandırılması 86

Şekil 4.7 Isıl yaşlandırma sürecinin akış diyagramı 87

Şekil 4.8 Omicron CPC 100/CPTD1 88

Şekil 4.9 CPC100/CPTD1 bağlantı şeması.....88

Şekil 4.10 Yüksek gerilim ve ölçüm uçlarının elektrot düzeneği ile bağlantısı 91

Şekil 4.11 SBR/NR dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV 98

Şekil 4.12 SBR/NR dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV 100

Şekil 4.13 PET dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV 107

Şekil 4.14 PET dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV 109

Şekil 4.15 YYPE dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV 116

Şekil 4.16 YYPE dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV 118

Şekil 4.17 Prespan dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV 126

Şekil 4.18 Prespan dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV 128

Şekil 4.19 PET – delinme geriliminin ısıl yaşlandırma ile değişimi.....133

Şekil 4.20 SBR/NR – delinme geriliminin ısıl yaşlandırma ile değişimi.....134

Şekil 4.21 Prespan – delinme geriliminin ısıl yaşlandırma ile değişimi.....135

Şekil 4.22 Darbe üreteç devresi (a) devre şeması (b) devre görüntüsü 136

Şekil 4.23 MPD 600 bağlantı şeması 138

Şekil 4.24 Kısmi deşarj test düzeneği 138

Şekil 4.25 SBR/NR - ortalama deşarj yükünün ısıl yaşlandırma ile değişimi .140

Şekil 4.26 YYPE - ortalama deşarj yükünün ısıl yaşlandırma ile değişimi 141

Şekil 4.27 SBR/NR – 15 kV'daki kısmi deşarjların ısıl yaşlandırma ile değişimi 142

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Başlıca yalıtım sıvılarının fiziksel ve dielektrik özellikleri 19
Tablo 2.2 Gaz yalıtkanların fiziksel ve dielektrik özellikleri.....21
Tablo 2.3 Gerilim altındaki bir yalıtkanı etkileyen iletim mekanizmaları 24
Tablo 3.1 Katı yalıtkanların sınıflandırılması.....28
Tablo 3.2 Doğal ve sentetik mikanın dielektrik özellikleri 31
Tablo 3.3 Bazı seramik türlerinin dielektrik özellikleri 32
Tablo 3.4 PVC'nin dielektrik özellikleri 35
Tablo 3.5 Düşük ve yüksek yoğunluklu polietilenin dielektrik özellikleri 36
Tablo 3.6 PS ve PTFE'nin dielektrik özellikleri 37
Tablo 3.7 PET ve polikarbonatın dielektrik özellikleri.....38
Tablo 3.8 Bazı kauçuk türlerinin yapısal ve dielektrik özellikleri.....41
Tablo 3.9 Epoksi reçinenin dielektrik özellikleri.....42
Tablo 3.10 Katı yalıtkanların termal sınıflandırılması 43
Tablo 3.11 Gerilim adımları arasındaki yükselme miktarları.....57
Tablo 4.1 Delinme deneyi sonuçları 74
Tablo 4.2 Weibull parametreleri.....76
Tablo 4.3 Yükselme hızlarına göre KDG ve KDD değerleri.....79
Tablo 4.4 Elektrot sistemlerinde farklı yalıtkan malzemeler için görülen maksimum alan gelişme faktörü değerleri 81
Tablo 4.5 Elektrot geometrilerine göre delinme dayanımları 82
Tablo 4.6 Yalıtkan malzemelerin maksimum çalışma sıcaklıkları 84
Tablo 4.7 Gerilim ve frekansa bağlı dielektrik kayıp değerleri.....89
Tablo 4.8 Gerilim ve frekansa bağlı dielektrik kayıp faktörü değerleri 90
Tablo 4.9 SBR/NR dielektrik kayıp değerleri.....92
Tablo 4.10 SBR/NR dielektrik kayıp faktörü değerleri 95
Tablo 4.11 PET dielektrik kayıp değerleri 102
Tablo 4.12 PET dielektrik kayıp faktörü değerleri.....105
Tablo 4.13 YYPE dielektrik kayıp değerleri 111
Tablo 4.14 YYPE dielektrik kayıp faktörü değerleri.....113
Tablo 4.15 Prespan dielektrik kayıp değerleri 120

Tablo 4.16 Prespan dielektrik kayıp faktörü değerleri.....122
Tablo 4.17 Referans ve yaşlandırılmış numunelerin darbe gerilimi altındaki delime gerilimleri.....137
Tablo 4.18 Kısmi deşarj parametrelerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi.....139

ÖZET

Katı Yalıtkan Malzemelerin Farklı Çalışma Koşulları Altında Performans Analizi

Fırat AKIN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Artan nüfus ve dünya üzerindeki gelişmeler sebebiyle, elektrik enerjisine olan talep her geçen yıl artmaktadır. Bu talebin karşılanması adına yüksek gerilim tesisleri, yapılan yatırımlar ile geliştirilmektedir. Tüm bunlar, güç sistemlerinin büyümesi ve karmaşıklaşmasına sebep olmaktadır. Bu sistemlerin; güvenilir, kesintisiz, arızasız, güç kalitesi parametrelerine uygun ve uzun ömürlü işletilebilmesi, büyük önem arz etmektedir. Güç sistemlerinden beklenen bu niteliklerin karşılanması için yalıtkan malzeme seçiminin ve boyutlandırılmasının doğru yapılarak elektrikli ekipmanlara ait yalıtım sistemlerinin iyi bir şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Katı yalıtkan malzemeler, güç sistemlerinin temelini oluşturan; jeneratörler, transformatörler, devre kesicileri, kablolar, izolatörler, havai hatlar, parafudrlar, kapasitörler ve döner makinalar gibi birçok yüksek gerilim bileşenine ait yalıtım sistemlerinin ana ögesidir. Bu nedenle, ilgili ekipmanlardaki yalıtım arızalarının önüne geçilebilmesi adına, katı yalıtkan malzemelerin farklı çalışma koşullarında göstereceği dielektrik performans, derinlemesine araştırılmalıdır.

Bu tez çalışmasında, katı yalıtkanlar arasında yaygın şekilde kullanılmakta olan; prespan, polietilen tereftalat (PET), stiren-butadien/doğal kauçuk (SBR/NR) ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) yalıtkanların, delinme dayanımına, kısmi deşarj ve dielektrik kayıp performansına dayalı analizler gerçekleştirilmiştir.

Katı yalıtkan malzemelerin delinme dayanımları, görece, sıvı ve gaz yalıtkanlara göre daha yüksek olsa da delinme süreçleri tersinmezdir. Yani, katı yalıtkanlarda delinme meydana geldiğinde, dielektrik özellikleri geri döndürülemez şekilde bozulmaktadır. Bu sebeple, katı yalıtkanların delinme dayanımı analizlerinin çok yönlü ve detaylı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, bahsi geçen dört tip yalıtkanın delinme dayanımları, 3 farklı elektrot tipi ve 2 farklı gerilim yükselme hızı kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen deney verilerinin istatistiki analizi, Weibull Dağılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Bilindiği üzere, güç sistemi ekipmanları, işletim süreleri boyunca çeşitli sıcaklıklara maruz kalmaktadırlar. Gerek işletim koşulları gerekse bulundukları ortam şartlarına bağlı oluşan ısı, ilgili ekipmanların yalıtım malzemelerini de etkileyerek, uzun vadede dielektrik özelliklerinde olumsuz değişimler yaratmaktadır. Isıl zorlanmaların katı yalıtkan malzemelerde yarattığı olumsuz etkilerin incelenmesi adına, yukarıda bahsedilen 4 yalıtkana, 120°C sıcaklıkta, bir çevrimi 120 saat olmak üzere, toplam 720 saat sürecek 6 çevrimlik ısıl yaşlandırma uygulanmıştır. Bu süreçte, belirli periyotlarda, tahribatsız ölçümler olarak nitelendirilen ve yalıtkanların durum değerlendirilmesi adına önemli bilgiler sunan kısmi deşarj ve dielektrik kayıp parametrelerinin ölçümleri alınmıştır. Bunun yanında, yalıtkan malzemelerin ısıl yaşlandırma sürecindeki delinme dayanımlarında meydana gelen değişim, alternatif gerilimler ve darbe gerilimleri altında takip edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı yalıtkanlar, delinme dayanımı, ısıl yaşlandırma, kısmi deşarj, dielektrik kayıp

ABSTRACT

Performance Analysis of Solid Insulating Materials Under Different Working Conditions

Fırat AKIN

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Oktay ARIKAN

Due to the increasing population and developments in the world, the demand for electrical energy is increasing every year. In order to meet this demand, high voltage installations are being developed with the investments made. All this causes power systems to grow and become more complex. It is very important for power systems being continuous, reliable, fault-free, long-lasting and comply with quality parameters during the operation. In order to meet these qualities expected from power systems, the insulation systems of electrical equipment must be designed well, by making the selection and sizing of the insulating materials correctly.

Solid dielectric materials are the main insulation elements of many high voltage components such as generators, transformers, circuit breakers, cables, insulators, overhead lines, surge arresters, capacitors, and rotating machines which form the basis of power systems. Therefore, dielectric performance of solid insulating materials under different operating conditions should be investigated in depth to prevent insulation failures in related equipment.

In this thesis, analyzes based on breakdown strength, partial discharge and dielectric loss performance are carried out on presspaper, polyethylene

terephthalate (PET), styrene-butadiene/natural rubber (SBR/NR) and high density polyethylene (HDPE) insulation materials, which are widely used among solid insulations.

Although the breakdown strength of solid insulating materials is higher than the breakdown strength of liquid and gas insulating materials, their breakdown mechanism is irreversible. That is, when breakdown occurs in solid dielectrics, their dielectric properties are irreversibly deteriorated. For this reason, breakdown analyzes of solid insulating materials should be done in a versatile and in detail. In this study, the breakdown strengths of the mentioned insulation materials were determined by using 3 different electrode types and 2 different voltage rise rates. Statistical analysis of the obtained experimental data was carried out with the Weibull Distribution.

As is known, power system equipment is exposed to various temperatures during their operating periods. The heat generation depending on both the operating conditions and ambient conditions affects the insulation materials of the electrical equipment and creates negative changes in the dielectric properties in the long-term. In order to examine the effects of thermal stresses on solid insulating materials, 6 cycles (one cycle - 120 hours) of thermal aging were applied to the 4 insulation materials mentioned above at 120°C for 720 hours total. In this process, measurements of partial discharge and dielectric loss parameters were taken at certain periods, which are considered as non-destructive measurements and provide important information for the evaluation of the condition of insulating materials. In addition, the change in breakdown strength of insulating materials during the thermal aging process was observed under alternating and impulse voltages.

Keywords: Solid dielectrics, breakdown strength, thermal ageing, partial discharge, dielectric loss

1
GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, elektrot tipi ve gerilim yükselme hızının katı yalıtkan malzemelerin delinme dayanımına etkisi ile ısıl yaşlandırmanın yalıtkanların dielektrik parametrelerine etkileri, 4 farklı katı yalıtkan kullanılarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

1.1 Literatür Özeti

Tez çalışması kapsamında hazırlanan literatür özeti, katı yalıtkanların delinme dayanımını etkileyen faktörler ve yaşlandırmanın yalıtkan malzemeler üzerindeki etkileri olmak üzere iki bölümde paylaşılmıştır.

1.1.1 Katı Yalıtkanların Delinme Dayanımını Etkileyen Faktörler

Yalıtkan malzemelerin, farklı koşullarda gösterdiği delinme dayanımlarının bilinmesi güç sistemlerinin sürdürülebilirliği ile malzeme ve cihaz tasarımları için büyük önem arz etmektedir. Literatürde bu amaçla gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Mason, elektrik alanın elektrot yarı çapı ve elektrotlar arası mesafeye bağlı olarak değişiminin hesaplanmasında kullanılan alan gelişme faktörü (field enhancement factor - (f)) formülünü sunduğu çalışmasında, polisobütilen ve polietilen yalıtkanların delinme dayanımlarını; sivri elektrotun yarıçapına, elektrodlar arası mesafeye, ortam sıcaklığına ve gerilim polaritesine göre incelemiştir[1]. Düşük yoğunluklu polietilenin delinme geriliminin ve ağaçlanma olayının incelendiği bir çalışmada, çubuk - düzlem elektrotta, çubuk elektrotun farklı sivrilik çapları ve farklı gerilim polaritelerinin etkileri incelenmiştir. Alternatif gerilim (AC), negatif doğru gerilim (DC) ve pozitif DC gerilim tipleri için, delinme gerilimi sivrilik (eğrilik) çapı ile artış göstermiştir. Diğer yandan, uygulanan gerilimin polaritesinin delinme gerilimine ciddi bir etkisi olduğu ortaya

konmuştur[2]. Mason'ın Alan geliştirme faktörünün kullanıldığı bir diğer çalışmada, düşük yoğunluklu polietilenin nano saniyelik darbe gerilimleri altındaki delinme dayanımını farklı elektrot materyalleri ve şekilleri ile gerilim polariteleri altında incelemiştir. İlgili çalışmada, delinme dayanımının elektrotu oluşturan malzemenin iş fonksiyonuna bağlı değiştiğini ayrıca, elektrot eğrilik çapı azaldıkça delinmenin gerçekleştiği elektrik alanın arttığı sonucuna varmıştır [3].

Gaz yalıtımlı bir boşluğun düzgün olmayan elektrik alanlar altındaki delinme dayanımı, boşluğa katı yalıtkan yerleştirilmesi ile artırılabilmektedir [4], [5]. Elham Foruzan ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışmada, hava yalıtımlı sistemde dielektrik bariyer kullanımını, farklı malzemelerden ve elektrod sistemlerinden oluşan senaryolarda incelemiş ve bariyerlerin, yalıtım sisteminin delinme dayanımını, düzgün olmayan elektrik alanlar altında daha çok arttırdığını belirlemiştir. Bu durumu alan gelişme faktörü (field enhancement - non uniformity factor) ile ilişkilendirmiştir [4].

Delinme dayanımına elektrot şeklinin yaptığı etki incelenirken genellikle yüksek gerilim elektrotunda değişikliğe gidilmektedir. Ancak, Phloymuk ve ekibinin çalışmasında, enerjili elektrot sabit tutularak toprak elektrotu değiştirilmiş ve çeşitli yalıtkan malzemelerin delinme dayanımına etkisi DC gerilimler altında gözlemlenmiştir[6].

Literatürde, farklı boyutlarda elektrotlar ile farklı kalınlıklardaki malzemelerin delinme dayanımlarının ölçüldüğü ve görülen etkilerin çeşitli analizlerinin yapıldığı çalışmalar mevcuttur [7]–[10]. Polyimide filmlerin DC gerilimler altında delinme dayanımı farklı malzeme kalınlığında, farklı sıcaklıkta ve farklı elektrod geometrilerinde incelenmiş ve Weibull parametreleri üzerinden değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Elektrot alanının artışı, delinme dayanımına ait Weibull şekil ve ölçek parametrelerinde düşüşe sebep olduğu, malzeme kalınlığının artışında ise ölçek parametresinin düştüğü ancak şekil parametresinde ise artış yaşandığı gözlenmiştir [7]. Bir diğer çalışmada, dört çeşit polimerin nano saniyelik darbe gerilimleri altındaki delinme dayanımına malzeme kalınlığının etkisi incelenmiştir. Weibull birikimli olasılık fonksiyonundan yola çıkarak oluşturulan

ifadeler, deneysel sonuçlar ile desteklenmiştir. Son olarak, kalınlık ve delinme dayanımı arasındaki bağıntıyı belirleyerek polimer malzemelerin farklı kalınlıkları için nano saniyelik darbe gerilimleri altındaki delinme dayanımının tahmin edilebileceği bir ifade oluşturulmuştur [10].

Bilindiği üzere, yalıtkan malzemeler işletme süreleri boyunca şebekedeki geçici olaylardan dolayı farklı artış hızlarındaki gerilimler tarafından zorlanmaktadırlar. Bu nedenle, farklı gerilim artış hızlarının delinme dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmalıdır. Literatürdeki çalışmalar, gerilim artış hızı yükseldikçe, delinme dayanımının arttığını göstermektedir [11]–[13]. Nedjar, gerçekleştirdiği çalışmada gerilim artış hızının etkilerini Weibull istatistiği ile incelemiştir. Gerilim artış hızının delinme dayanımına etkisini, Jonscher ve Lacoste'un çalışmasındaki [14] birikimli delinme (Cumulative Dielectric Breakdown) modelinden yola çıkarak, yüksek artış hızlarında, elektriksel ağaçlanmanın meydana gelmesi ve delinmeye sebep olacak kusurların ve yüklerin birikmesi için yeterli sürenin oluşmamasına bağlamıştır [11].

Yalıtkan malzemelerin, AC gerilimler, DC gerilimler ve darbe gerilimleri altında gösterdiği dielektrik dayanımların araştırılması elzemdir. Literatürde, farklı gerilim türlerine gösterilen delinme dayanımlarının araştırıldığı çalışmalar mevcuttur[15]–[17]. Jonggi Hong'un gerçekleştirdiği çalışmada fiberglas takviyeli plastik (GFRP), epoksi ve bakalit üzerinde AC ve darbe gerilimleri altında dielektrik dayanım testleri yürütülmüştür. Yapılan çalışmada yalıtkan kalınlığının ve gerek aynı tip gerekse farklı tip malzemelerin üstü üste konularak istiflenmesi sonucu oluşturulan yapay kalınlığın Darbe Delinme Gerilimi/ AC Delinme Gerilimi oranına etkisi araştırılmış ve yalıtkan kalınlıklarından yola çıkılarak delinme dayanımlarının hesaplanabildiği bir formülasyon oluşturulmuştur. Aynı kalınlıktaki yekpare yalıtkan ve aynı malzemeden oluşan istifli yalıtkanlar karşılaştırıldığında, istifli yalıtkanların delinme performansının daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. İstifli durumda, yüksek gerilim elektroduna yakın olan malzemenin delinme dayanımını belirlediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, AC gerilim altında oluşan delinme, elektrod-yalıtkan temas noktasında oluşurken, darbe gerilimi altında oluşan delinme, temas noktasından farklı bir noktada meydana

gelmiştir [16]. Aravind yaptığı çalışmada, kompozit ve porselen olmak üzere iki tip mesnet izolatörün AC gerilim altındaki ve hem pozitif hem negatif polaritedeki yıldırım ile anahtarlama darbeleri altındaki dielektrik dayanımlarını incelemiştir. İki tip izolatörde de en düşük dayanım AC gerilim altında, en yüksek dayanım ise negatif yıldırım darbesi altında görülmüştür. Yıldırım darbesinin dalga şeklinin dik yapısı bu duruma sebep olarak gösterilmiştir [17].

Uygulamada, yalıtkan malzemelerin maruz kaldıkları darbe gerilimleri farklı dalga şekillerine sahip olup değişken cephe ve sırt sürelerinden meydana gelebilmektedir. Belirli sürelere sahip darbe gerilimlerinin; yıldırım darbesi (YD-1.2/50μs), anahtarlama darbesi (AD - 250/2500 μs) ve çok hızlı geçici darbe (ÇHGD-0.064/50 μs) gibi standart isimleri bulunurken, farklı süre parametrelerine sahip standartlaştırılmamış darbe gerilimleri de bulunmaktadır. Sima ve ekibinin yaptığı çalışmada, yağ emdirilmiş kraft kağıdına farklı cephe ve sırt sürelerine sahip darbe gerilimleri uygulanmış ve delinme dayanımları incelenmiştir. Yapılan çalışmada, delinme dayanımının cephe süresi ile doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Testlerde cephe süresi 1.2 μs – 26 μs aralığında 9 farklı değer alırken, özellikle cephe süresi 15.6 μs değerine kadar yükseltildiğinde delinme dayanımında net bir artış gözlenmiş olup sonrasında artış hızı azalmıştır. Toplamda %26'lık bir değişim gözlemlenmiştir. Sırt süresi değişiminin yarattığı etki çok büyük değişimlere yol açmamıştır [18]. Shengtao Li ve arkadaşları, darbe gerilimlerinin oluşturduğu yüzeysel atlamaların etkilerini incelemek için gerçekleştirdiği çalışmada, çapraz bağlı polistiren (ÇBPS) malzemeye 8 farklı darbe gerilimi uygulamış ve bunun sonucunda yalıtkan üzerinde farklı akım ve gerilim değerleri taşıyan yüzeysel atlamalar meydana getirmiştir. Atlama akımlarının ölçülmesi sonucu, atlama enerjisi hesaplanmıştır. Yüksek enerjili atlamalar tekrarlı meydana geldiği zaman, yalıtkan yüzeyinde bozulmalara sebep olarak atlama gerilimini düşürürken, düşük enerjili atlamalar (< 1 kA) yüzeydeki yabancı unsurları temizleyerek önce yüzeyde iyileşmeye sebep olmuş ve atlama gerilimini yükseltmiş, belirli bir sayıdan sonra ise yüzeyin yapısını bozarak atlama gerilimini düşürmüştür [19]. Yapılan bir diğer çalışmada, salınımlı yıldırım darbeleri ile standart yıldırım darbesi, standart anahtarlama darbesi ve standart

olmayan darbelerin farklı kalınlıktaki kağıt yalıtkan üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Bunun için elektrot ölçüm düzeneği ve sargı arası yalıtımı simüle etmek üzere ayrı bir düzenek oluşturulmuştur. Yapılan çalışmaya göre delinme dayanımı uygulanan darbenin cephe süresinin düşmesiyle artmıştır. 0.25 μs'lik cephe süresine sahip darbe altındaki delinme dayanımı standart yıldırım darbesine oranla 1.16 kat daha yüksek ölçülmüştür. Sargı düzeneğinde, kağıt yalıtımın gösterdiği delinme dayanımı, 1.3 μs cephe süresine sahip salınımlı darbe için standart yıldırım darbesine göre 1.26 kat daha fazla olmuştur. Özellikle, belirli bir yalıtkan kalınlığına erişmek için daha fazla ince kağıt katmanı kullanıldığında, delinme dayanımının daha yüksek seviyelere çıktığı gözlenmiştir [20].

Gerilim cinsi, gerilim yükselme hızı, elektrot tipi, malzeme kalınlığı… vb. temel unsurların yanı sıra, malzemeye etkiyen çevresel faktörler de delinme olayında etkili olmaktadır. Elastosil P 7670 ismiyle bilinen silikon elastomer malzeme üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, malzemenin delinme dayanımı, malzeme kalınlığı, elektrot çapı, doluluk oranı ve yüksek gerilim elektrotu vasıtasıyla uygulanan basınç kuvvetine göre incelenmiştir. Malzeme kalınlığının arttırılması sonucu yalıtkan malzemenin delinme dayanımının düştüğü belirlenmiştir. Bu durum, yalıtkan hacmi artışının, hacim içindeki boşluklu ve kusurlu yapının artmasına sebep oluşuna bağlanmıştır. Yalıtkan malzemenin delinme dayanımı, farklı basınç kuvvetleri uygulanırken ölçülmüş ve uygulanan kuvvet arttıkça yalıtkan malzemede meydana gelen sıkışmadan dolayı delinme dayanımının arttığı belirlenmiştir. Aynı kuvvetler daha küçük çaptaki elektrotlar ile uygulandığında, daha küçük çapta yalıtkan malzemeye daha çok basınç uygulandığından yalıtkanda daha fazla sıkışma meydana gelmiştir. Bu durum, delinme dayanımının daha da artmasına sebep olmuştur [21]. Bir diğer çalışmada, alümina plakalar, iki ucundan sabitlenerek orta noktasından kuvvet uygulanması yoluyla 1 dakikalık bükülmeye maruz bırakılmış ve uygulanan farklı kuvvetler neticesinde delinme dayanımındaki değişim gözlenmiştir. 20, 40, 60 ve 80 N kuvvet uygulanması sonucunda, uygulanan kuvvetin artması ile delinme dayanımının düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Weibull dağılımı ile yapılan

değerlendirmelerde, 80 N kuvvetlik bükme sonucunda Weibull Ölçek Parametresi neredeyse yarı değerine düşmüştür [22].

Başka bir çevresel faktör olan ortam sıcaklığının delinme olayına etkisinin incelenmesi için yapılan çalışmalarda, etilen-propilen kauçuk (EPK) yalıtkanı, farklı ortam sıcaklıklarında farklı elektrik alan değerlerine maruz bırakılmış ve delinme süreleri gözlemlenmiştir. Uygulanan elektrik alan değeri ve ortam sıcaklığı arttıkça yalıtkan malzemenin delinme süresinin azaldığı belirlenmiştir. Örneğin, yalıtkan malzemelere, 70 kV/mm sabit elektrik alan uygulanırken, 70°C sıcaklık altında malzemede delinme gözlenmezken; 140°C sıcaklıkta, 43. saatte, 190°C sıcaklıkta ise 12. saatte delinme meydana gelmiştir [23]. Bir diğer çalışmada, polyester filmin 0.025 – 0.35 mm arasında değişen kalınlıktaki numuneleri, 20, 40, 60, 75 °C ortam sıcaklıklarında delinme deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneyler sonucunda, sıcaklığın yükseltilmesinin ince malzemelere daha çok etki ettiği ve delinme dayanımında daha fazla düşüşe sebep olduğu belirlenmiştir [24]. EPR üzerinde gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, yalıtkan malzemeye basınç ve sıcaklık birlikte uygulanmış ve delinme dayanımında yarattığı değişim gözlenmiştir. Ek bir basınç uygulanmadığı durumda, sıcaklık 60°C'den 120°C'ye çıkartıldığında delinme dayanımının %7.3 değerinde azaldığı tespit edilmiştir. Sabit sıcaklıkta basınç arttırıldığı zaman, 4 bar civarına kadar delinme dayanımında artış meydana gelirken daha yüksek basınç değerlerine çıkıldığında malzemenin delinme dayanımı düşüş göstermiştir. Ortam sıcaklığında ve basınç uygulanmayan durumda, malzemenin delinme dayanımı 39.0 kV/mm olarak ölçülmüştür. 120°C sıcaklık ve 10 bar basınç altında ise delinme dayanımı değeri %28.6'lık bir azalma göstererek 27.8 kV/mm değerine düşmüştür [25].

1.1.2 Yaşlandırmanın Yalıtkan Malzeme Üzerindeki Etkileri

Yalıtkan malzemeler birden çok zorlayıcı faktör ile yaşlandırılabilmekte ve ilgili malzemeler uygulanan faktörlere göre farklı davranışlar gösterebilmektedir. Bu yaşlandırıcı faktörler genellikle termal, elektro-termal, elektriksel ve mekanik… vb. zorlanmalar olarak sınıflandırılmaktadır.

Literatürde, katı yalıtkan malzemelerin bu zorlayıcı unsurların başında gelen ısıl zorlanmalar ile yaşlandırıldığı ve dielektrik parametrelerinde meydana gelen değişimlerin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. M.G Niasar ve ekibinin gerçekleştirdiği çalışmada yağ emdirilmiş yalıtkan kağıt malzeme, 160 °C sıcaklıkta 31 güne kadar yaşlandırılmıştır. Yalıtkan malzemenin yaşlanma sonrası dielektrik performansı; malzeme delinene kadar uygulanan sabit bir gerilimde alınan kısmi deşarj ölçümleri ve anlık delinme dayanımı ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar, kısmi deşarj sayısının ve büyüklüğünün ısıl yaşlandırılmış kağıtta arttığını göstermiştir. Ancak, kısmi deşarj ölçümleri sırasında malzemenin kısmi deşarjlara dayanabildiği sürenin ısıl yaşlandırma sonrası daha fazla olduğunu ortaya konmuştur. Bu durum, gerçekleştirilen ısıl yaşlandırmada malzemenin yapısındaki nemden arınmasına bağlanmıştır. Delinme dayanımı değerlerinde ise büyük bir fark ortaya çıkmamıştır [26]. Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, yağ emdirilmiş kraft kağıdı; yaşlandırılmamış, 90°C'de 750 saat ve 1500 saat yaşlandırılmış olarak 3 gruba ayrılmış olup, dielektrik dayanımları ve dielektrik parametreleri (dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik sabiti) ölçülerek değerlendirmelerde bulunulmuştur. Delinme dayanımları ilk 750 saatlik yaşlandırma periyotlarında artış eğiliminde olurken, yaşlandırma sürecinin devam etmesiyle birlikte azalma sürecine girse de ilk değerinden daha yüksek bir seviyede kalmıştır. Dielektrik kayıp faktörü (tanδ) değerleri, yaşlandırmada 750. saate erişildiğinde bir azalma göstermiş ve sonrasında sabit kalmıştır. Son olarak, yalıtkan malzemenin bağıl dielektrik sabiti, maruz kalınan yaşlandırma çevrimleri ile düşüş yaşamıştır [27]. H. Ran ve ekibi, kraft kağıdının delinme dayanımını, deney anındaki ortam sıcaklığına ve yaşlandırma süresine bağlı olarak 2 farklı şekilde incelemiş, ardından Weibull birikimli olasılık fonksiyonunun parametreleri ile değerlendirmiştir. Deney sıcaklığı 20°C'den 120°C'ye çıkartıldığında Weibull ölçek parametresi 15.86 kV'dan 7.60 kV'a gerilemiştir. Yani, karakteristik delinme gerilimi değerinde düşüş yaşanmıştır. Isıl yaşlandırmayla yapılan incelemede, 80 güne kadar gerçekleştirilen yaşlanmada ölçek parametresinin 15.75'den 11.17'ye gerilediği görülmüştür [28]. PVC/B yalıtkanın ısıl yaşlandırıldığı bir çalışmada, yaşlandırma

işlemi 80°C ve 120°C sıcaklıkta 126 günlük sürede gerçekleştirilmiştir. Belirli yaşlandırma periyotlarında 2-4-6-8-10-12 kV altında yalıtkan üzerindeki kümülatif yükün ölçümü gerçekleştirilmiş ve elde edilen yük değerinden kayıp enerji hesabı yapılmıştır. İki sıcaklıkta da kayıpta artışlar meydana gelirken, 120°C sıcaklıktaki artış çok daha hızlı ve şiddetli olmuştur [29]. Yudi Saputra ve ekibinin gerçekleştirdiği çalışmada, epoksi malzemeye mikro boron nitrit partiküller %10 ve %20 oranlarında eklenerek; saf epoksi, %10 mikro BN katkılı epoksi ve %20 mikro BN katkılı epoksi yalıtkanlar 150°C sıcaklıkta 500 saatlik bir ısıl yaşlandırmaya bırakılmıştır. Isıl yaşlandırma süresince; 3 çeşit malzemenin; tanδ, delinme dayanımı ve bağıl dielektrik sabiti ölçümü gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Isıl yaşlandırma süresince, tanδ sonuçları karşılaştırıldığında, en yüksek değerlere saf epoksinin sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak, saf epoksinin kayıp faktörü ısıl yaşlandırma değeri ile düşüş eğilimindeyken, katkılı epoksilerin dielektrik kayıp faktörleri ısıl yaşlandırma karşısında nerdeyse sabit kalmıştır [30]. Çapraz bağlı polietilen üzerinde yapılan bir çalışmada, 100°C sıcaklıkta 2500 saate kadar yaşlandırma yapılmıştır. Yaşlandırma süresince yalıtkan malzemenin kayıp faktörü değerleri, yüzey ve hacim direnci ölçülmüştür. Kayıp faktörü, 5 kHz ve 10 kHz'de değerlendirilmiştir. İki frekanstaki dielektrik kayıp faktörlerinin, 400 saat yaşlanmaya kadar neredeyse yarı değerine kadar düştüğü ve ardından yaklaşık 1750. saate kadar büyük bir değişim gözlenmediği görülmüştür. Ardından gelen, yaşlandırma sürelerinde, dielektrik kayıp değerleri yükselişe geçmiştir. Başlangıç aşamasında, 5 kHz'deki kayıp faktörü daha fazlayken, kayıp faktörünün azalma süresinde (ilk 400 saat 10 kHz'teki kayıp faktörüne göre daha çok azalma göstermiş ve 10 kHz'teki kayıp faktörü değerinin altına düşmüştür. Aynı çalışmada, 2000 saat yaşlanmış ve hiç yaşlanmamış iki numunenin frekansa göre dielektrik kayıp faktörü değişimi incelendiğinde, frekans arttıkça iki numunede de kayıp faktörünün azaldığı ve bu süreçte yaşlanmış numunenin dielektrik kayıp faktörünün daha az olduğu belirlenmiştir. Isıl yaşlandırma sonucunda; DC yüzey direnci, $10^{16}\ \Omega$ seviyelerinden $10^{13}\ \Omega$ seviyelerine düşerken, hacim direnci ise büyük bir değişim göstermemiş ve $8.08 \times 10^{14}\ \Omega.cm$ değerinden $1.21 \times 10^{15}\ \Omega.cm$ değerine yükselmiştir [31].

Yalıtkan malzemelerin aynı anda elektriksel ve termal zorlanmalara maruz bırakılması, elektro-termal yaşlandırma olarak adlandırılmaktadır. Literatürde, elektro-termal yaşlanmanın yalıtkan malzemeler üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur [32]–[34]. Wang ve diğerleri gerçekleştirdiği çalışmada, kraft kağıdı ve polikarbonat (PC) malzemeyi 90℃, 110℃ ve 130℃ sıcaklık altında her bir sıcaklık değeri için maksimum 300 gün olacak şekilde farklı sürelerde yaşlandırmış ve eş zamanlı olarak 3 kV/mm elektrik alana maruz bırakmıştır. Uygulanan elektro-termal yaşlandırmanın etkilerini incelemek için ise dielektrik spektroskopi (frekans ve sıcaklığa bağlı tanδ ölçümü) uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, polikarbonatın yaşlanmamış ve 3 farklı sıcaklıkta yaşlandırılmış numunelerinin tanδ değerlerinin aynı koşuldaki kraft kağıdına göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yaşlanma sıcaklığının yükseltilmesi, iki malzeme için de daha yüksek tanδ değerlerini beraberinde getirmiştir [32]. Transformatör içinde kullanılmak üzere Kraft kağıdına alternatif bir yalıtkan belirlemek üzere yapılan bir diğer karşılaştırmalı çalışmada, kraft kağıdı, polifenilen sülfit (PPS), polikarbonat (PC) ve PET malzemeler 90℃, 110℃ ve 130℃ sıcaklık ve 4 kV/mm elektrik alan altında, 2 ay sürecek şekilde elektro-termal yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Yaşlandırılan numunelerin, dielektrik sabiti, dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik dayanımı ölçülmüştür. Yaşlanma ile birlikte dielektrik dayanım her malzeme için her zaman aynı doğrultuda bir değişim göstermemiştir. Örnek vermek gerekirse, kraft kağıdının delinme dayanımı 90℃ sıcaklık altında 30 gün yaşlanmanın ardından 42.8 kV/mm'den 39.16 kV/mm'ye düşerken, 60. günde ise dielektrik dayanım, 43.8 kV/mm'ye yükselmiştir. 90℃ sıcaklık altında 2 ay süren yaşlanmanın ardından, dielektrik dayanımını en iyi şekilde koruyan yalıtkan PPS olurken diğer sıcaklıklarda, en iyi dayanımı kraft kağıdı göstermiştir. Farklı yaşlanma sıcaklıkları ve süreleri için, kraft kağıdının dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörü kullanılan polimer yalıtkanlara göre çok daha büyük olmuştur [33].

Kısmi deşarj parametrelerinden olan, kısmi deşarj başlangıç gerilimi (KDBG), yalıtkan malzemelerin kısmi deşarj davranışını yorumlamak adına önemli bir parametredir. Chen ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, yalıtkan malzemenin yaşlanma derecesi ile KDBG arasındaki ilişkiyi belirlemek için PPS,

PC, PET ve teflon (PTFE) malzeme ile birlikte kraft kağıt üzerinde elektro termal yaşlandırma gerçekleştirilmiş ve belirli periyotlarda KDBG ölçümleri alınmıştır. Ayrıca, malzemede meydana gelen değişimler SEM analizi ile tespit edilmiştir. KDBG'de kayda değer bir değişim yaşanmadığından, ilgili malzemeler özelinde yaşlanma derecesi ile KDBG arasında bir ilişki tespit edilememiştir. Ayrıca, yaşlanma periyotlarında yapılan yalıtkan direnci ölçümlerinde kraft kağıdının direncinde büyük bir azalış tespit edilmiştir [34].

Yalıtkan malzemeler, nem ile etkileşime girdiklerinde, meydana gelen hidroliz nedeniyle yapıları bozulmakta ve dielektrik parametreleri kötüleşmektedir. Bu sürecin gözlenmesi ve araştırılması adına, yalıtkan malzemelere, hidrotermal yaşlandırmanın uygulandığı ve dielektrik parametre değişimlerinin gözlendiği çalışmalar mevcuttur. ÇBPE/Silika nano-kompozit sistem üzerinde yapılan bir çalışmada, saf ÇBPE ve çeşitli yüzdelerde silika katkılı ÇBPE numuneler (%5wt ve %12.5wt oranlı iki tip), deiyonize su kullanılarak elde edilen %100 ve %75 bağıl neme sahip ortamda, 50°C sıcaklıkta yaşlandırmaya bırakılmıştır. Bahsi geçen yaşlandırmanın, 1 ay sonunda, delinme dayanımına etkisi incelendiğinde, %100 bağıl nem ile yaşlandırmanın daha etkili olduğu görülmüştür. Malzemelerin maruz kaldığı nemin, kalıcı bir etki yaratıp yaratmadığının araştırılması adına malzemeler kurutulmuş ve delinme dayanımları tekrardan ölçülmüştür. Saf ÇBPE, uygulanan kurutma sonrasında, yaşlandırma öncesi delinme dayanımına ulaşabilirken, katkılı ÇBPE'lerin delinme dayanımları, eski seviyelerine geri dönüş yapamamıştır. Katkılı ÇBPE'lerin yaşlandırma öncesi delinme dayanımları, saf ÇBPE'ye göre daha yüksek seviyelerdeyken, yaşlandırma sonrasında, saf ÇBPE'nin aksine, delinme dayanımları geri döndürülemez şekilde düşüş göstermiştir [35]. ÇBPE üzerinde gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, yalıtkan malzeme 5600 saat boyunca, %100 bağıl neme sahip ortamda yaşlandırılmıştır. Yaşlandırmanın malzeme üzerindeki etkileri; delinme dayanımı, tanδ, izolasyon direnci ve bağıl dielektrik sabiti (ε_r) ölçümleri ile takip edilmiştir. Malzemenin yaşlanmış ve yaşlanmamış numunelerinin, ε_r ve tanδ değerlerinin, 20°C-140°C sıcaklık aralığındaki değişimi incelendiğinde, ε_r değerinin sıcaklık ile düşüş gösterdiği ve bu esnada, yaşlanmış numunedeki ε_r değerlerinin daha yüksek olduğu

belirlenmiştir. tanδ değeri ise 100°C'den yüksek sıcaklıklarda büyük miktarda artış göstermiş ve yaşlanmış numunenin tanδ değeri, sıcaklık değişiminden daha çok etkilenmiştir. İzolasyon direnci ve delinme dayanımı, yaşlandırma ile benzer bir değişim göstermiştir. İki değer de ilk aşamalarda (2000. saat öncesi) bir miktar artış gösterirken, yaşlandırma tamamlandığında toplamda büyük bir düşüş görülmüştür. İzolasyon direnci, 10^{13} Ω.cm seviyelerinden, 10^{12} Ω.cm mertebesine inerken; delinme dayanımı, 42.5 kV/mm'den 24 kV/mm'ye düşmüştür [36]. M. A. Douar ve diğerlerinin gerçekleştirdiği karşılaştırmalı çalışmada, çeşitli termoplastik yalıtkanlar (poliamid 6, poliamid 66, poliakrilamid, polikarbonat, YYPE, PPS) ve etilen propilen dien monomer (EPDM) bazlı kauçuk yalıtkanlara (EPDM ve EPDM V0), 35.5°C sıcaklıkta, %5 tuz yoğunluklu su buharında, hidrotermal yaşlandırma uygulanmış ve delinme dayanımlarının değişimi takip edilmiştir. Su çekme eğilimi fazla olan amid gruplarının varlığından dolayı, poliamid bazlı yalıtkanlar, hidrotermal yaşlandırmadan en çok etkilenen grup olmuş ve delinme dayanımlarında, neredeyse, 10 katlık bir azalma meydana gelmiştir. YYPE ve EPDM grubu, polar yapılı olmamaları nedeniyle yaşlandırmadan en az etkilenen yalıtkanlar olmuştur [37].

Katı yalıtkan malzemelerin elektriksel zorlanma faktörlerinden olan darbe gerilimlerinin yalıtkan malzemelere tekrarlı uygulanması sonucu oluşturduğu birikimli etkiyi incelemek adına yapılan bir çalışmada, yağ-polipropilen yalıtımına farklı sayıda negatif anahtarlama darbeleri, malzeme delinene kadar uygulanmıştır. Ardından elde edilen veriler ışığında, malzemenin hangi gerilimde kaç darbede delineceğini ifade eden V-N karakteristiği elde edilmiş ve belirlenen gerilim seviyeleri için Weibull analizi gerçekleştirilmiştir. Yalıtkan malzemelerin, 100, 200 ve 300 adet anahtarlama darbesinde delinebildiği senaryolarda, uygulanan darbelerin genlikleri, işlem uygulanmamış yalıtkanın delinme dayanımının sırasıyla %98.81'sı, %94.26'sı ve %82.26'sı olmuştur [38]. S. P. Balaji ve arkadaşlarının 2011 yılında yaptığı çalışmada, farklı dalga şekillerine sahip darbe gerilimleri için V-N karakteristikleri elde edilmiş ve Weibull dağılımı ile analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde, V-N karakteristiğinin üstel modeli oluşturularak istenilen darbe gerilimleri için V-N karakteristiklerinin

tahminini gerçekleştirilmiştir [39]. 2012'de yapılan diğer çalışmalarında ise farklı zaman parametrelerine sahip darbe gerilimleri, farklı sıklıklarda kraft kağıdına uygulanmıştır. Oluşan etki malzemenin V-N karakteristiği üzerinden incelenmiş, ardından malzeme yapısında yaşanan değişiklikleri yorumlamak için polimerizasyon derecesi ölçümleri alınmıştır. Polimerizasyon derecesinin düşmesi, yalıtkanın yapısında bozulmaların meydana geldiğini ifade etmektedir. Delinme dayanımının, tekrarlı darbeler arasında bulunan süre arttıkça arttığı, polimerizasyon derecesinin ise gerilim yükselme hızı ile orantılı şekilde düşüş yaşadığı ortaya konmuştur [40]. V-N karakteristikleri ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada AD, YD ve ÇHGD altında tekrarlanan darbelerde delinme dayınımı ve bozulmaların kalınlığa bağlı değişimini ölçmek ve karşılaştırmak için 0,25 ila 0,75 mm arasında değişen yağ emdirilmiş farklı kalınlıklardaki kağıt yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Farklı kalınlıktaki yalıtkan malzemelere ait V-N karakteristikleri, literatürde halihazırda kullanılmakta olan mevcut üstel modele yalıtım kalınlığı da eklenecek şekilde geliştirilmesiyle matematiksel olarak modellenmiş ve ardından deneyler ile modeller doğrulanmıştır. Oluşturulan modeller ile farklı kalınlıktaki OIP numuneler için tahminler yapılmıştır [41].

Polimerik yalıtkanlar üzerinde yapılan bir diğer çalışmada ise polipropilen (PP), YYPE ve DYPE malzeme üzerinde kısmi deşarj testleri ve tanδ ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar metodu ile elektrik alan dağılımının simülasyonu yapılmıştır. Yalıtkan malzemeler 30 saniye 12.5 kV gerilime ve 2 saat 12.5 kV gerilime maruz bırakılmış numuneler olarak 2 farklı gruba ayrılmışlardır. Yaşlanma sonucu ortalama kısmi deşarj yükü, maksimum kısmi deşarj yükü ve meydana gelen kısmi deşarj sayısı gibi parametrelerde artış meydana gelmiştir. Yapılan karşılaştırmada, en iyi performansı en düşük tanδ ve kısmi deşarj ile polipropilen göstermiştir [42].

H. Abdallah ve ekibinin çalışmasında, ısıl yaşlandırmanın yanında, elektriksel yaşlandırma da gerçekleştirilmiş ve çapraz bağlı poliletilen 5 kV/mm elektrik alan altında 25 saate kadar yaşlandırılmıştır. Öncelikle, 5 ve 10 kHz'teki dielektrik kayıp faktörü değerlerinin yaşlandırma karşısındaki değişimleri takip edilmiştir. 20. saate kadar büyük bir değişim gözlenmezken, 20. saate büyük bir artış

meydana gelmiş ve sonrasındaki 5 saatlik yaşlandırma sonucunda, kayıp değeri başlangıç değerine yakın bir değere geri düşmüştür. Bu süreçte kayıp faktörünün düşük frekansta daha yüksek olduğu görülmüştür. Yaşlandırma ile birlikte, yüzey direnci 10^{16} Ω seviyelerinden, 4.10^{12} Ω seviyesine düşmüştür. Hacim direncinde ise büyük bir değişim gözenmemiştir [31].

Dao, gerçekleştirdiği çalışmalarda polietilen çeşitleri olan; yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), düşük yoğunluklu polietilen (DYPE) ve çapraz bağlı polietilen (ÇBPE) malzemeleri darbe gerilimleri ile yaşlandırmış ve AC gerilim altında rampa yöntemiyle dielektrik dayanım, dielektrik sabiti ve uzay yükü ölçümleri gerçekleştirmiştir [43]–[45]. Yapılan çalışmalarda, 3000-6000 adet aralığında yıldırım darbeleri uygulanmış ve genellikle yaşlanma sonucunda delinme dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen malzemelerin karşılaştırmalı testlerinde, yıldırım darbelerinin yüksek yoğunluklu numune üzerindeki etkileri delinme dayanımı üzerinden rahatlıkla görülebilirken, düşük yoğunluklu numunede kayda değer bir değişim gözlenmemiştir [44]. Anahtarlama darbelerinin katı yalıtım malzemeleri üzerinde yarattığı etkiyi incelemek adına Grzybowski, etilen propilen kauçuk (EPK) ve ÇBPE malzemeler üzerinde karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada iki kablo yalıtkanına maksimum 5000 kez olacak şekilde farklı sayılarda anahtarlama darbeleri uygulanmış ardından kısmi deşarj ve dielektrik dayanım performansları incelenmiştir. Sonuçlar, iki malzemenin de yaşlanmadan net şekilde etkilendiğini göstermiştir. Özellikle, gerilim negatif yarı dalgası üzerindeki kısmi deşarj aktivitesinin artışı bunun en büyük işaretidir. ÇBPE malzemenin delinme gerilimi, 101 kV'dan 90 kV'a düşerken; EPK'nın delinme gerilimi, 85 kV'dan 109 kV'a yükselmiştir. Bu durum, ÇBPE'nin yapısının, yaşlanma neticesinde daha çok bozulduğunu göstermektedir [46].

1.2 Tezin Amacı

Güç ekipmanlarına ait yalıtım sistemlerinin, uygun bileşenler ile doğru bir şekilde tasarlanması, güç sistemlerinin kalitesi, sürekliliği ve ekonomikliği için büyük önem taşımaktadır. Yalıtım sistemlerinin temel unsuru olan, katı yalıtkan

malzemelerin dielektrik performansı; kullanım yerine bağlı olarak maruz kaldığı elektriksel, kimyasal ve fiziksel zorlanmalara göre değişmektedir. Bu nedenle, seçimi ve boyutlandırılmasında gerekli analizlerin yapılıp, güç ekipmanlarının ve yalıtım sistemlerinin yapılan analizlere göre tasarımları gerçekleştirilmelidir. Bunun yanında, malzemenin bahsi geçen zorlanmalardan etkilenme miktarı, boyutlarına, cinsine ve dolayısıyla yapısal özelliklerine göre değişim göstermektedir.

Yukarıda bahsedilenler göz önünde bulundurularak, bu tez çalışmasında, katı yalıtkan malzemelerin; delinme dayanımları, dielektrik kayıpları, tanδ değerleri ve kısmi deşarj performansları, farklı koşullar altında alınan ölçümler ile değerlendirilmiştir. Ölçümler sırasında 4 tip katı yalıtkan kullanılarak, farklı türdeki malzemelerin aynı zorlayıcı unsur karşısındaki davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır

Buradan hareketle, yalıtkan malzemelerin delinme dayanımları, 3 farklı elektrot tipi ve 2 farklı gerilim yükselme hızı için ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, Weibull Dağılımı ile değerlendirilmiştir. Bunun yanında, yalıtkan malzemelere ısıl yaşlandırma uygulanarak, ısıl yaşlandırmanın belirli periyotlarında, kısmi deşarj ölçümleri ile farklı gerilim ve frekanstaki dielektrik kayıp ile dielektrik kayıp faktörü ölçümleri alınarak, ısıl yaşlandırmanın farklı frekanslarda gözlenen etkileri vurgulanmıştır.

Elde edilen tüm sonuçlar neticesinde, 4 çeşit yalıtkan üzerinde, elektrot tipi ve gerilim yükselme hızının yalıtkan malzemelerin delinme dayanımlarına etkisi ile yalıtkan malzemelere ait dielektrik parametrelerin (ortalama kısmi deşarj yükü, kısmi deşarj başlangıç gerilimi, dielektrik kayıp, dielektrik kayıp faktörü) ısıl yaşlandırma karşısındaki davranışı değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler ve gerçekleştirilen değerlendirmeler, yalıtkan malzemeleri arızalanmaya götüren süreçleri detaylı bir şekilde açıkladığından dolayı, arızaların erken tespiti, kestirimci bakım işlemleri ve işletme sırasında mevcut durumun değerlendirilmesi adına önem arz etmektedir. Bu çalışmada, gerçekleştirilen deneyler ışığında, istenmeyen arızaların önüne geçilmesi, arıza meydana gelmeden gerekli

önlemlerin alınması, enerji kesintilerinin ve ekonomik kayıpların azaltılmasına katkı sağlayacak sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Güç sistemlerinde kullanılan ekipmanların, tutarlı ve etkin çalışabilmesi için elektriksel izolasyonun sağlanması önemli bir unsurdur. Güç sistemlerinin güvenilir bir şekilde işletilebilmesi, ömrünün uzatılması ve arızaların önüne geçilebilmesi için, kullanılan izolasyon malzemelerinin, farklı özelliklerdeki; ısıl, elektriksel, mekanik, kimyasal… vb. zorlanmalara karşı değişken koşullarda göstereceği performansın bilinmesi önem arz etmektedir.

Bilindiği üzere, güç sistemlerinde, farklı geometrilere sahip ekipmanlar ve dolayısıyla iletken kısımlar yer almaktadır. Bu durum, ekipman bünyesinde, farklı karakteristiklere sahip elektrik alanların oluşmasına sebebiyet verir. Elektrikli ekipmanlarda kullanılan katı yalıtkan malzemelerin, bahsedilen farklı elektrik alanlar altındaki dielektrik dayanımları değişim gösterecektir. Bu nedenle, yalıtkan malzemelerin delinme dayanımlarının tespiti, çok yönlü bir şekilde, farklı elektrot yapıları kullanılarak gerçekleştirilmeli ve yalıtkan malzemenin dielektrik davranışı gözlenmelidir. Bunun yanında, yalıtkan malzemelerin; AC, DC ve darbe gibi farklı cinsteki gerilimlere veya yükselme hızı, frekans, genlik gibi özelikleri farklı olan, aynı türdeki gerilimlere karşı dayanımı farklılık göstermektedir. Dielektrik dayanımının tespitinde bu durum da göz önünde bulundurulmalı ve çalışmalar buna göre gerçekleştirilmelidir. Böylelikle, farklı alanlarda kullanılacak ve farklı türden elektrik alan ve gerilimler tarafından zorlanacak yalıtkanların seçimi doğru bir şekilde yapılabilecek ve yalıtım sistemleri başarıyla tasarlanabilecektir.

Yalıtkan malzemeler, kullanım süreleri boyunca maruz kaldığı çeşitli zorlanmalar neticesinde, yapılarındaki kısmi deşarj ve dielektrik kayıp olaylarında artış meydana gelmektedir. Bu olaylar, ciddi boyuta eriştiğinde, ilgili yalıtkanın ısıl delinmesine veya dahili deşarj kaynaklı delinmesine sebep olabilmektedir. Bahsedilen kısmi deşarj ve dielektrik kayıp miktarlarının, zorlanmalar karşısında ne şekilde değiştiği, laboratuvar ortamında hızlandırılmış yaşlandırma deneyleri

ile birlikte gerçekleştirilen tahribatsız ölçümler (dielektrik kayıp, kısmi deşarj) ile takip edilebilmektedir. Ayrıca, dahili deşarjların ve dielektrik kaybın, maruz kalınan gerilimin frekansından etkilendiği bilinmektedir. Bu nedenle, ısıl yaşlandırma ile yalıtkanda meydana gelen dielektrik özellik değişimleri takip edilirken, şebeke yapısı da göz önünde bulundurulmalıdır. Yani, güç ekipmanlarını besleyen gerilimlerin harmonikli yapısı dikkate alınmalı ve ısıl yaşlandırmanın, temel frekansın yanında farklı frekanslardaki etkileri de araştırılmalıdır. Harmoniklerin, yalıtkan malzemeler üzerinde yarattığı fazladan zorlanma derecesi bilindiği takdirde, yalıtkanların performans analizi daha doğru bir şekilde yapılmış olacak ve uzun vadede beklenmedik yalıtkan arızalarının önüne geçilebilecektir.

2
YÜKSEK GERİLİMDE KULLANILAN YALITKAN MALZEMELER

Elektrik güç sistemleri; jeneratörler, transformatörler, devre kesicileri, kablolar, izolatörler, havai hatlar, parafudrlar, gaz izoleli şalt sahaları, kapasitörler, ve döner makinalar gibi birçok yüksek gerilim bileşenine sahiptir. Bu sistemlerin, kesintisiz, arızasız, kalite parametrelerine uygun ve uzun ömürlü işletimi için, bu bileşenlerin elektriksel yalıtımının aşağıda belirtilen dört temel alana doğru bir şekilde uygulanması gerekmektedir [47], [48].

- Sargı ve toprak arasına (faz-toprak)
- Farklı fazlara ait sargılar arasına (faz-faz)
- Sarım katları arasına (sarımlar arası)
- Aynı faza ait sargılar arasına (sargılar arası)

Bu amaçta kullanılan yalıtkan malzemeler; katı, sıvı, gaz, kompozit ve vakum olarak farklı kategorilerde değerlendirilmektedir.

2.1 Katı Yalıtkanlar

Katı yalıtkanlar, sıvılara ve gazlara kıyasla yüksek delinme dayanımına sahiptir. İyi bir katı yalıtkan, yüksek dielektrik dayanıma sahip olmasının yanı sıra, düşük dielektrik kayba, yüksek mekanik dayanıma ve sağlam bir yapıya sahip olmalıdır. Bunun yanında, yapısında gaz ve nem gibi yabancı partiküller içermemelidir. Ayrıca, termal ve kimyasal bozulmalara karşı dirençli olup kullanıldığı alandaki ortam koşullarından etkilenmemelidir [47].

Güç sistemlerinde çok sayıda katı yalıtım malzemesi kullanılmaktadır. Kullanım tipi açısından, katı yalıtkan malzemeler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır [49]:

Kalıp Malzemeleri: Bu tarz malzemelere, izolatör ve buşing gibi rijit yapıdaki yalıtım ekipmanlarının üretiminde kullanılan; seramik, cam (sertleştirilmiş cam), cam elyafı, takviyeli plastikler ve epoksi reçineler örnek

verilebilir. Bu tür malzemelerin elektriksel yalıtım özelliklerinin iyi olmasının yanı sıra yüksek mekanik dayanıma sahip olması gerekmektedir.

Kılıf Malzemeleri: Polimerler, iletkenlerin kılıflanması için uygun yapıdaki malzemelerdir. Örneğin, güç kablolarında iletken üzerine polietilen (PE), polivinilklorür (PVC), doğal ve sentetikkauçuk ekstrüde edilmektedir. Ayrıca, polipropilen ve kağıt yalıtkanlar kondansatörlerde ve transformatörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik makinalarında ise mika ve fiberglas bazlı polipropilen bantların kullanımı yaygındır.

Dolgu Malzemeleri: Güç kablolarında, transformatörlerde, kondansatörlerde ve ölçü transformatörlerinde kullanılan dielektrik kağıdı emprenye etmek için kullanılan yağların yanı sıra kullanılan farklı tipteki mum bazlı bileşikler (balmumu, Karnauba mumu, parafin), dolgu malzemelerine örnek gösterilebilir.

Mekanik Destek Malzemeleri: Transformatörlerde, devre kesicilerde ve izolatörlerde; plaka, boru ve kiriş şeklinde mekanik destek sağlayabilecek yalıtkanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, prespan, sert kağıt (lamine edilmiş ince kağıtlar), ahşap gibi ürünler kullanılmaktadır.

2.2 Sıvı Yalıtkanlar

Sıvı yalıtkanlar çeşitli güç ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek gerilim kablolarında ve kapasitörlerde emdirilerek uygulaması yapılırken transformatörler, devre kesiciler gibi ekipmanların yalıtkan sıvılar ile yalıtımı, tümüyle doldurularak gerçekleştirilmektedir [48]. İlgili ekipmanlarda:

- Transformatörlerde, gerilim taşıyan parçalar ile topraklanmış kazan arasındaki yalıtımın sağlanması,
- Transformatörlerde ve yağ dolu kablolarda soğutmanın sağlanması,
- Transformatör, kablo ve kapasitör gibi ekipmanlarda kullanılan ince kağıt veya diğer yalıtkan türlerinin emprenye edilmesi,
- Yalıtkan malzemenin boşluklarının doldurarak dielektrik özelliklerinin kuvvetlendirilmesi,

- Devre kesicilerinde ark söndürülmesi,

görevlerinde kullanılmaktadırlar [49].

Yalıtım amacıyla kullanılan çok sayıda doğal ve sentetik sıvı yalıtkan bulunmaktadır. Bunlar; petrol bazlı mineral yağlar, sentetik hidrokarbonlar, poliklorbifeniller (PCB), silikon yağlar, esterler, yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlar, tetraklor etilen(C_2Cl_4) olarak sıralanmaktadır [47].

Yalıtım sıvıları, yüksek dielektrik dayanıma sahip olup, viskozite ve dielektrik sabiti sıvı yalıtkan türüne göre geniş aralıkta değişmektedir. Sıvı yalıtkan uygulamasında, sıvının fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri ve kullanılacağı alanın gereksinimleri göz önünde bulundurulmaktadır [49]. Başlıca yalıtım sıvılarının, bazı fiziksel ve dielektrik özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Başlıca yalıtım sıvılarının fiziksel ve dielektrik özellikleri [50]

Özellik	**Birim**	**Mineral Yağ**	**PCB**	**Silikon**	**Doğal Ester**	**Sentetik Ester**
Yoğunluk	gr/cm^3	0.88	1.5	0.96	0.89	0.97
Akma Noktası	°C	-50	-40	-60	-30	-60
Parlama Noktası	°C	>140	Yok	>300	>300	>275
Yanma Noktası	°C	>170	>400	>350	>330	>320
Delinme Gerilimi	kV (2.5mm)	>70	35	50	56 (2 mm)	>60
tanδ 90°C	-	<0.002	<0.5	-	<0.1	<0.03
tanδ 25°C	-	<0.0001	<0.1	<0.01	<0.001	<0.001

2.3 Gaz Yalıtkanlar

İdeal bir yalıtkan gaz; kimyasal ve termal yönden kararlı olup maliyeti düşük olmalıdır. Ayrıca, süreli gerilim altındayken toksik, yıpratıcı veya yanıcı yan ürünler oluşturmamalıdır. Bunların yanı sıra, ısı transferi ve ark söndürme görevlerini yerine getirebilmeli ve basınç altındayken dahi düşük sıcaklıklarda yoğunlaşmalıdır. En önemlisi, DC, AC ve darbe gerilimleri altında düzgün ve düzgün olmayan alanlar tarafından zorlanırken, yüksek delinme dayanımına sahip olmalıdır. Süreklilik açısından, uzun süreli kullanımda, tüm bu değerlerde herhangi bir kayıp yaşanmamalıdır [47].

Yalıtım amacıyla kullanılan gazlar elektropozitif ve elektronegatif olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Elektropozitif gaz molekülleri, pozitif iyonlar oluşturmak için elektronları bırakmaya meyilliyken, elektronegatif gazlarda moleküller, negatif iyonlar oluşturmak için serbest elektronları absorbe etmektedirler. Saf nitrojen (N_2), en ucuz ve kullanımı en yaygın olan elektropozitif gaz yalıtkan türüdür. Elektronegatif gazlar arasında ise sülfürhekzaflorid (SF_6), günümüzde en çok kullanılan gaz yalıtkandır ve kullanımı 1960'lardan beri artmaktadır [49]. Ancak, SF_6 çevre dostu bir gaz değildir ve karbondioksitten 23900 kat daha fazla küresel ısınma potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle SF_6 yerine, alternatif yalıtkan gaz arayışları sürmektedir [51].

Bunun yanında, yüksek gerilim yalıtımında sınırlı şekilde kullanımı olan başka türdeki birçok gaz mevcuttur. Bunlar, oksijen (O_2), hidrojen (H_2), karbon dioksit (CO_2), helyum (He), neon (Ne), karbon tetraklorür (CCl_4), sodyum buharı (Na), freon (CCl_2F_2) vb. olarak sıralanabilir. Hava ise en önemli, en rahat bulunabilen ve en ucuz yalıtkan gaz türüdür [49]. Başlıca gaz yalıtkanların fiziksel ve dielektrik özellikleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Gaz yalıtkanların fiziksel ve dielektrik özellikleri [49]

0.1 Mpa Basınç İçin		Dielektrik Dayanım (20 °C)	Bağıl molekül kütlesi	Yoğunluk (20 °C)	Ortalama Elektron Serbest Yolu	İyonizasyon Enerjisi	Yoğuşma Sıcaklığı
Gaz	Sembol	kV/cm	M	kg/m3	μm	eV	°C
Helyum	He	3.7	4	0.17	1.10	24.6	-269
Neon	Ne	4.2	20	0.87	0.70	21.5	-246
Argon	Ar	6.5	40	1.73	0.39	15.7	-186
Hidrojen	H_2	15	2	0.09	0.65	15.8	-243
Metan	CH_4	21	16	0.72	0.29	13.1	-162
Karbondioksit	CO_2	25	45	1.91	0.24	14.4	-29
Oksijen	O_2	27	32	1.38	0.40	12.1	-183
Su buharı	H_2O	30	18	0.78	-	13	+100
Hava	-	32	29	1.25	0.37	-	-193
Nitrojen	N_2	33	28	1.21	0.35	15.7	-196
Tetraflorometan	CF_4	36	88	3.81	-	15.4	-
Karbonmonoksit	CO	42	28	1.24	0.36	14.1	-192
Sülfürdioksit	SO_2	64	64	2.93	0.17	13.4	-10
Freon	CCl_2F_2	80	121	5.33	0.30	≤18	-28
Sülfürhekzaflorid	SF_6	89	146	6.39	0.22	15.9 -19.3	-63
Selenyumhekza-florid	SeF_6	144	193	8.2	-	-	+49
Karbontetraklorür	CCl_4	180	154	6.65	0.08	11.1	+77
Florin	F_2	-	18	1.695	-	16.5	-188

2.4 Vakum

Elektrotlar arası boşlukta herhangi bir gaz partikülünün bulunmaması, mükemmel dielektrik ve ark söndürme özelliklerine sahip bir vakum ortamını yaratmaktadır. Ancak, gerçek bir vakumu elde etmek çok zordur ve vakum yalıtımlı ekipmanda 10^{-9} ile 10^{-12} bar aralığında arta kalan gazlardan kaynaklı basınç mevcut olabilmektedir. Bu tür ekipmanlarda, elektrotların malzemesi, şekli ve yüzey kalitesi, artık gaz basıncı ve yabancı partiküller önem arz etmektedir. Vakum ortamı, yalıtım amacıyla orta gerilim anahtarlama sistemlerinde ve devre kesicilerde sık olarak kullanılmaktadır [47].

2.5 Kompozit Yalıtkanlar

Farklı dielektrik malzemeleri bir araya getirerek yüksek kaliteye sahip yalıtım malzemeleri üretilebilmektedir. Fiberglas takviyeli plastikler, mika bazlı plastik bantlar, elektrik makinelerinde kullanılan sentetik reçinelerle karıştırılmış kuvars, elyaf ve mika yalıtkanları, kompozit malzemelere örnek olarak gösterilebilmektedir. Ayrıca, güç kabloların, kapasitörlerin ve transformatörlerin yalıtımında, kağıt ve polimer bantların yağ ve balmumu esaslı bileşikler ile emprenye edilmiş halleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Son zamanlarda geliştirilen tek eksenli yönlendirilmiş polietilen bandın, iyi mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra yağlarla çok iyi uyumluluğa sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bu tür kompozit yalıtım sistemleri, kendisini oluşturan bileşenlerinin avantajlı özelliklerinden yararlanmaktadır. Böylelikle daha iyi ısıl, mekanik ve elektriksel özelliklere sahip yalıtım sistemleri oluşturmak mümkün hale gelmektedir [49] .

2.6 Yalıtkan Malzemelerin Dielektrik Özellikleri

Bir malzemenin elektrik güç sistemlerinde yalıtkan olarak kullanılabilmesi o malzemenin elektriksel, ısıl ve mekanik özelliklerine bağlıdır [52].

2.6.1 Direnç Değerleri

Gerilim bulunduran iki elektrot arasına konumlandırılmış yalıtkan cisimlerin göstermiş olduğu ve ölçülerek bulunan direnç değeri izolasyon direnci (hacim direnci) olarak adlandırılır. Bu direnç değerinden yola çıkılarak birim boyut başına hesaplanan direnç değerine, özgül direnç adı verilir. Özgül direncin birimi Ω.cm'dir. Özgül direncin hesap formülü denklem (2.1)'de gösterilmiştir [52].

$$\rho_D = R_i \times \frac{A}{d} \tag{2.1}$$

Burada;

ρ_D=Özgül direnç [Ω.cm],

R_i=İzolasyon direnci [Ω],

A=Elektrot yüzey alanı [cm^2],

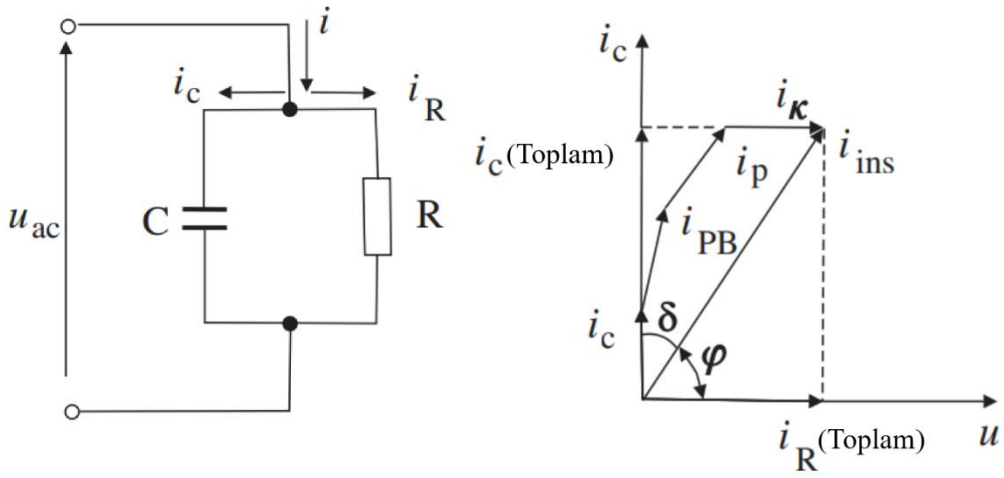
d=Yalıtkan kalınlığını [cm] ifade etmektedir.

2.6.2 Bağıl Dielektrik Sabiti

Kondansatörlerde yalıtkan madde olarak hava (vakuma eşit varsayılıyor) yerine başka bir yalıtkan kullanıldığında bu yalıtkanın kondansatörün kapasitesine ne oranda etki edeceği, malzemenin bağıl dielektrik sabitini (ε_r) ifade etmektedir [52].

2.6.3 Dielektrik Kayıp Faktörü

Yalıtkan malzemeler gerilim altındayken, üzerlerinden kapasitif şarj akımlarının yanı sıra, farklı iletkenlik türleri ve polarizasyondan kaynaklı aktif akımlar da akmaktadır. Bu akımlar uygulanan gerilimin frekansına, büyüklüğüne ve yalıtkan malzemenin termal koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bir yalıtım malzemesi üzerinden akan akımlar, yalıtkanın dielektrik kaybını belirlemektedir. Her bir akım mekanizması, farklı özelliklere sahip akım türlerine neden olmaktadır. Gerilim altındaki bir yalıtkan üzerinden akan akımlar ve mekanizmaları Tablo 2.3'de, fazör diyagramı ise Şekil 2.1'de gösterilmiştir [49].

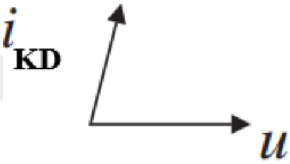
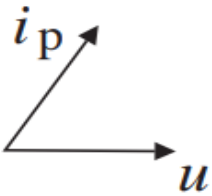


(a) (b)

Şekil 2.1 (a) Yalıtkan malzemenin paralel modellenmesi ve (b) yalıtkan üzerindeki akım mekanizmalarının fazör gösterimi [49]

Tablo 2.3'den de görüleceği üzere yalıtkan malzeme de aktif güç kayıplarına sebep olan faktörler, polarizasyon kayıpları, iletim kayıpları ve kısmi deşarj kaynaklı kayıplar olarak sıralanmaktadır.

Tablo 2.3 Gerilim altındaki bir yalıtkanı etkileyen iletim mekanizmaları [49]

İletim Mekanizması - Kaynak		
Kapasitif şarj akımı	$\overrightarrow{I_c}$	
Kısmi deşarj kaynaklı akımlar	$\overrightarrow{I_{KD}}$	
Polarizasyon akımları	$\overrightarrow{I_P}$	
İletim akımları	$\overrightarrow{I_K}$	

Kapasitif şarj akımı, aktif akım ve yalıtkan üzerindeki aktif güç kaybı (2.2)-(2.4) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$I_C(toplam) = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \omega \times C \times U \quad (2.2)$$

$$I_R\,(toplam) = I_c \times \tan\delta \quad (2.3)$$

$$P_{kayıp} = \omega \times C \times U^2 \times \tan\delta \quad (2.4)$$

Buradaki dielektrik kayıp faktörü, "tan δ", bir kapasitördeki/yalıtkandaki aktif güç kaybının, reaktif güç kaybına oranı olarak tanımlanmaktadır [49].

$$\tan\delta = \frac{Aktif\ Güç}{Reaktif\ Güç} = \frac{u \times \imath \times \cos\varphi}{u \times \imath \times \sin\varphi} = \frac{I_R\,(toplam)}{I_C\,(toplam)} \quad (2.5)$$

Ayrıca, dielektrik kayıp faktörü, bir yalıtkandaki güç kaybını tümüyle temsil eden bir ifadedir. Dolayısıyla bir kapasitördeki/yalıtkandaki güç kayıplarının tahmin edilebileceği bir parametre olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, tanδ uygulanan gerilimin frekansı ve büyüklüğünün yanı sıra yalıtkanın sıcaklığının bir fonksiyonudur, çünkü bunlar yalıtkan malzemedeki iletkenliği ve polarizasyon süreçlerini etkileyen faktörlerdir [49].

2.6.4 Delinme Dayanımı

Delinme dayanımı, yalıtkan malzemelerin maruz kaldığı elektriksel zorlanmaya karşı gösterdiği dayanım karakteristiğidir. Malzemenin belirli bir kalınlığının delinmesine sebep olacak minimum elektrik alan değerini ifade etmektedir ve kV/mm veya volt/mm cinsinden ölçülmektedir [53]. Delinme mekanizması sıvı ve gaz yalıtkanlarda tersinir bir yapıdayken, katı yalıtkanlar delindiği zaman, tamamıyla yalıtkan özelliği kaybolur [49]. Yalıtkan malzemelerin dielektrik dayanımı, geçici gerilim yükselmesi durumlarında ve yüksek çalışma sıcaklıklarında dahi elektrik sisteminden kaynaklı elektriksel zorlanmaya güçlü bir şekilde dayanabilecek şekilde olmalıdır. Yalıtkan malzemelerin delinme dayanımı, malzemenin saflığına, gerilim uygulama zamanına ve yöntemine, uygulanan gerilimin türüne ve diğer deneysel-çevresel parametrelere bağlıdır [47].

2.6.5 Polarizasyon

Polarizasyon, yalıtım malzemelerinin moleküler yapısında bulunan pozitif ve negatif yüklerin geri döndürülebilir bir şekilde yer değişmesidir. Yani, malzemeye uygulanan elektrik alan ile malzemenin yük taşıyıcıları (atomlar, iyonlar veya moleküller), arasındaki etkileşime dayanan bir olgudur. Bu etkileşim, yalıtkanın temel yapısal elemanları (yük taşıyıcıları) üzerine uygulanan bir kuvvet tarafından gerçekleştirilir. Elektrik alan, yalıtkan malzemede polarizasyona yol açtığı gibi, polarizasyon da aynı zamanda, yalıtkan içindeki elektrik alana etki etmektedir. Dolayısıyla, karşılıklı bir etkileşim söz konusudur [49].

Polarizasyonun etkisi analitik olarak bağıl dielektrik sabiti ε_r ile açıklanmaktadır. Şöyle ki, Vakum ortamına düzgün elektrik alan uygulandığı varsayılırsa, elektriksel akı yoğunluğu (deplasman) $\overrightarrow{D_0}$ aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$\overrightarrow{D_0} = \varepsilon_0 \vec{E} \tag{2.6}$$

Aynı elektrot sistemi ve elektrik alan büyüklüğü için, vakum yerine bir yalıtım malzemesi (katı, sıvı veya gaz) yerleştirildiğinde, elektriksel akı yoğunluğunda aşağıdaki formülde gösterilen artış meydana gelir:

$$\overrightarrow{D_{ylt}} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \tag{2.7}$$

Akı yoğunluğundaki artış malzemedeki polarizasyondan kaynaklıdır ve (2.8) formülü ile ifade edilir.

$$\overrightarrow{D_p} = \overrightarrow{D_{ylt}} - \overrightarrow{D_0} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\vec{E} \tag{2.8}$$

$$\frac{\overrightarrow{D_p}}{\overrightarrow{D_0}} = (\varepsilon_r - 1) = \chi \tag{2.9}$$

(2.9) ifadesinde belirtilen D_p/D_0 oranı malzemedeki polarizasyonu ifade etmektedir ve χ sembolü ile gösterilmektedir.

Burada,

$\overrightarrow{D_0}$ [C.m^{-2}], vakum ortamındaki elektriksel akı yoğunluğunu,

$\overrightarrow{D_{ylt}}$ [C.m^{-2}], sıvı, katı ya da gaz ortamdaki akı yoğunluğunu,

$\overrightarrow{D_p}$ [C.m^{-2}], polarizasyon kaynaklı akı yoğunluğu,

$\varepsilon_0 = 8.854\text{x}10^{-12}$ [F/m], vakum ortamının dielektrik sabitini,

ε_r, ilgili malzemenin bağıl dielektrik sabitini,

$\vec{E}$ [kV/mm] ise uygulanan elektrik alanı ifade etmektedir.

Gaz halindeki yalıtkanların çoğunun bağıl dielektrik sabiti neredeyse bire eşittir. Dolayısıyla, polarizasyon gazlarda önemli bir olgu değildir. Ancak, sıvı ve katı yalıtkanların iletkenliğinin ve dielektrik kayıplarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır [49].

3
YÜKSEK GERİLİMDE KULLANILAN KATI YALITKAN MALZEMELER ve ÖZELLİKLERİ

Tezin bu bölümünde, katı yalıtkan malzemeler kimyasal özelliklerine göre sınıflandırılarak kullanım alanları ve yapısal özellikleriyle ilgili bilgiler verilmiştir. İlerleyen kısımda, yalıtkan malzemelerin arızalanmalarına sebep olacak delinme ve kısmi deşarj mekanizmaları açıklanmıştır. Son olarak katı yalıtkanların dielektrik özelliklerinin ölçülmesine yönelik yöntemler anlatılmıştır.

3.1 Katı Yalıtkanların Kimyasal Sınıflandırılması

Yalıtkan malzemeler, genellikle kimyasal özelliklerine göre sınıflandırılmakta olup bu sınıflandırma organik, inorganik ve sentetik polimerler çerçevesinde yapılmaktadır [47]. Temel sınıflandırma tablosu Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Katı yalıtkanların sınıflandırılması

		Sentetik Polimerler	
Organik	**İnorganik**	**Termoplastikler**	**Termosetler**
Kehribar	Seramikler	Polimetilmetakrilat	Epoksi Reçine
Kağıt	Cam	Polietilen	Fenolikler
Prespan	Mika ve Türevleri	Polipropilen	Melamin
Doğal Kauçuk	Fiberglas (Cam elyaf)	Polistiren	Üre Formaldehid
Ahşap	Emaye	Polivinilklorür	Çapraz Bağlı Polietilen
Sert Karton		Poliamid	Elastomerler
		Polikarbonat	
		Polietilen tereftalat	

3.1.1 Organik Yalıtkanlar

Organik malzemeler bitkiler ve hayvanlardan elde edilmektedir. Genellikle verniklendikten sonra veya yağ emdirildikten sonra kullanılan organik yalıtkanlar oldukça iyi dielektrik özelliklere sahiptirler. Ancak, çalışma sıcaklıkları 100 °C'yi aşarsa yapıları hızlıca bozulma göstermektedir. Tahta, reçine, doğal kauçuk, prespan, kağıt gibi malzemeler organik yalıtkanlara örnek olarak gösterilebilir [47].

3.1.1.1 Dielektrik Kağıt

Dielektrik kağıt ve kartonlar; ağaçtan, pamuktan, organik liflerden elde edilebilmektedirler. Kağıt ile karton arasında çok büyük bir fark olmamasına rağmen en belirgin farklılıkları kalınlıklarıdır. Kağıt 0.8mm'den az kalınlığa sahip iken kartonlar 0.8 mm'den büyük kalıklardadır. 6 mm'den büyük kalınlıklara sahip kartonlar elde edebilmek için kartonlar yapışkanlar ile lamine edilip istenilen kalınlığa getirilirler [47]. Yalıtım amacıyla kullanılan kağıtlar, kraft kağıdı olarak da adlandırılmaktadır.

Kağıtlar yapılarında nem tutabilen maddelerdir. Bu yüzden yalıtkan olarak kullanılmadan önce kurutulmalı ve yalıtkan yağ emdirilmelidirler. Kağıtların bağıl dielektrik sabitleri; hammaddesi olan selülozun dielektrik sabitine, emdirilen yağın dielektrik sabitine ve kağıdın yoğunluğuna göre değişim gösterir. Kağıtların kalınlıkları ve hacimsel yoğunlukları kullanım alanlarına göre değişmektedir. Düşük yoğunluklu kağıt (0.8g/cm^3) yüksek frekans kabloları ve kondansatörlerde tercih edilirken orta yoğunluktaki kağıtlar güç kondansatörlerinde kullanılmaktadırlar. Yüksek yoğunluğa sahip kağıtlar ise bataryalar ile birlikte kullanılan enerji depolama kapasitörleri ve DC makine yalıtımında kullanılırlar. Transformatör ve buşinglerde ise emprenye edilmiş halde kullanılmaktadır [47] .

- **Vernikli Kağıt**

Bir diğer izolasyon kağıdı olarak bilinen vernikli kağıt ise 0,06-0,15 mm kalınlıklarda tabakalardan oluşan izolasyon verniği emdirilmiş kağıtlardır. Vernikli kağıtlar transformatör sargılarının yalıtılmasında ve bobinlerin

örtülmesinde kullanılmaktadır. Elektriksel özellikleri kullanılan verniğin türüne göre değişim göstermektedir [52].

- **Prespan**

Selüloz liflerinden meydana gelen prespan sert ve dayanıklı bir yapıya sahiptir. Islatılmış kağıt tabakalarının haddelenmesi ile elde edilmektedir. Endüvi prespanı, transformatör prespanı ve kondansatör prespanı olmak üzere çeşitleri mevcuttur [52].

- **Sert Karton**

Sert karton, kağıt liflerine sertleşebilir sentetik bir reçinenin emdirilmesinin ardından ısı altında preslenmesiyle elde edilmektedir. Sert kartondan plakalar, borular ve çubuklar elde edilebilmekte olup bu yapılar 120°C sıcaklığa kadar dayanıklıdır. Sert karton ve türevleri yağ içinde, örneğin transformatör içinde, kullanılabilmektedir. Elektriksel özellikleri kullanılan reçinenin türüne bağlı olarak değişmektedir [52].

3.1.1.2 Doğal Kauçuk

Doğal kauçuk, lateks olarak da bilinen kauçuk ağacının sütünden elde edilmektedir. İşlem sırasında kauçuk sütü içine asetik asit katılır ve ham kauçuk elde edilir. Fakat, ham kauçuğun yapışma eğilimi vardır ve bu istenen bir özellik değildir. Bu yüzden ham kauçuğa vulkanizasyon işlemi uygulanır ve bu özelliği giderilir. Vulkanizasyon, kauçuğa kükürt katılarak 145°C sıcaklığa ve 5 bar basınca maruz bırakılması işlemidir. Ham kauçuk içine farklı oranlarda kükürt katılmasıyla birlikte ebonit ve lastik elde edilebilir. Her iki malzemenin de elektriksel özellikleri iyidir [52].

3.1.2 İnorganik Yalıtkanlar

İnorganik malzemeler, organik malzemelere kıyasla oldukça farklı yapıya sahiptirler. Organik malzemeler gibi 100°C sıcaklıkta mekanik ve elektrik özelliklerinde bir düşüş yaşamazlar ve 250°C'ye kadar yapısal özelliklerini sürdürebilirler. Üretimleri zordur ve kompakt fiziksel yapıları yüzünden yağ ve vernik katkısı ile kullanılamazlar. Yine de dielektrik özellikleri oldukça iyidir.

İnorganik malzemelere verilebilecek en iyi örnekler cam, mika ve porselen grubudur [47].

3.1.2.1 Mika ve Türevleri

Yalıtım amaçlı kullanılan mika inorganik bir madde olarak doğada bulunmaktadır. Ayrıca, sentetik olarak elektrotermal işlemler sonucu elde edilebilmektedir. Temelinde alüminyum silikat bulunur ve yapısında birçok farklı element barındırabilir. Mika ince yapraklı esnek bir yapıya sahiptir ve sıcağa dayanıklıdır. Aynı zamanda, yüksek dielektrik dayanıma sahip ve dielektrik kayıpları oldukça düşüktür. Sıcağa dayanıklı yapısı yüzünden, çalışma sıcaklıkları yüksek olan ekipmanlarda kullanılmaktadırlar. Isıya olan dayanıklılığını arttırmak için istenilen tipte reçine ile karıştırılarak işletme sıcaklığını karşılayacak yapıya getirilebilir. Ayrıca, mika yaprakları ve mika tozu yalıtım malzemelerinde dolgu maddesi olarak kullanılabilmektedir. Bu sayede dolduran malzemenin yalıtkanlığı arttırılır, dielektrik kaybı azaltılır, sıcaklığa karşı dayanımı arttırılır ve malzemeye sertlik kazandırılır [47]. Doğal ve sentetik mikanın dielektrik özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Doğal ve sentetik mikanın dielektrik özellikleri [47]

Özellik	Doğal Mika	Sentetik Mika
Delinme Dayanımı [kV/mm]	1000 kV/mm	1000 kV/mm
tan δ (1 MHz)	0.0001	0.0002
Dielektrik Sabiti (1 kHz – GHz)	6.5-8.7	6.5

Mikanın önemli bir formu olan cam bağlı mika. Eriyik haldeki cam ile öğütülmüş mikanın birbirine bağlanması ile elde edilir. Bu sayede hem işenebilen hem de kalıplanabilen bir malzeme elde edilmiş olur. Cam bağlı mika, yüksek mekanik, sıcaklık ve dielektrik dayanımına sahiptir. Kesicilerde, panolarda, ark bariyerlerinde ve geçit izolatörlerinde kullanılırlar [47].

3.1.2.2 Seramikler

Seramikler, soğuk halde pres ile şekillendirildikten sonra 900°C ile 2000 °C arasında fırınlanarak sertlik kazandırılan inorganik maddelerdir [52]. Dielektrik sabitlerine göre düşük dielektrik sabitli (< 12) ve yüksek dielektrik sabitli (>12) olmak üzere göre iki gruba ayrılırlar. Düşük dielektrik sabitliler izolatörlerde kullanılırken, yüksek dielektrik sabitliler kapasitör ve transdüserlerde kullanılmaktadırlar [47].

En çok bilinen seramik çeşitlerinden olan porselen ve steatitler gaz geçirmezdir, korozyona dayanıklıdır, alkalilerin ve asitlerin çoğuna kimyasal olarak inerttir. Tüm bu nedenlerden dolayı yabancı maddeler tarafından kirletilmeye karşı dayanıklıdır. Steatit, porselene göre daha yüksek mekanik dayanıma ve daha düşük dielektrik sabite sahiptir. Ayrıca, elektronik elemanlarda kullanılmaya uygundur. Bir diğer seramik türü alumina ise tüm seramikler içinde en düşük kayıp faktörüne sahip seramiktir. Diğer elektriksel özellikleri mükemmel derecede olmasa da yüksek mekanik dayanımı ve ısıl iletkenliği alüminayı en çok tercih edilen yalıtkanlardan biri yapmaktadır. Vakumlu kesiciler olmak üzere birçok elektrikli elemanın yapımında kullanılmaktadır. Tozu ise çeşitli kompozit izolatörlerin ve levhaların üretiminde tercih edilmektedir. Günümüzde alumina tabanlı porselenler, askı izolatörlerde, mesnet izolatörlerde yani yüksek mekanik dayanım gerektiren alanlarda kullanılmaktadır [47]. Bazı seramik türlerinin dielektrik özellikleri Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Bazı seramik türlerinin dielektrik özellikleri

Özellik	**Alümina** [47]	**Steatit** [48]	**Alüminyum Silikat**[47]	**Porselen**[48]
Delinme Dayanımı [kV/mm]	13.4	8-25	6	3-25
tan δ	0.0002	0.001	0.027	0.005-0.02
Dielektrik Sabiti	10.1	6	4.1	5-7

3.1.2.3 Cam ve Fiberglas

Cam, karmaşık oksit sistemlerinden (SiO_2) oluşan termoplastik özellikte inorganik bir maddedir. Camsı geçiş sıcaklığı olarak adlandırılan sıcaklık değeri altında cam katıdır ve kristal özellikleri taşır. Camsı geçiş sıcaklığının üzerinde ise yumuşaklaşır ve viskozdur. Yalıtım amacıyla kullanılan camlar genellikle silikat bazlıdır. Cam yoğunluğu 2.2 ile 6 gm/cm^3 arasında değişirken dielektrik sabiti ise 3.7 ile 10 arasında değişmektedir. Hacim direnci 10^{14} ile 10^{22} ohm-m arasında değişir. Dielektrik kayıp faktörü ise frekansa bağlı olarak 0.004 ile 0.02 arasında değişir. Son olarak, delinme dayanımı 3 ile 5 MV/cm arasında değerler almaktadır. Elektrik sistemlerinde cam genellikle fiberglas formunda kullanılmaktadır. Fiberglasın Kullanım alanları ise şu şekildedir:

1) Transformatör Çekirdek Yalıtımında
2) Reçine emdirilmiş halde kompozit izolatörlerde
3) Reçine emdirilmiş halde izolasyon kaplamalarında ve levhalarında
4) Plastiklere takviye olarak uygulanarak bant şeklinde elektrik makinalarında

Ayrıca, camlar kağıt formuna sokularak da yalıtım amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu çeşit malzemeler cam elyaflarından oluşmaktadır. En önemli özellikleri termal kararlılıklarını 538°C sıcaklığa kadar sürdürülebilmeleri olup yüksek ısı iletkenliği, düşük miktarda nem tutmaları ve kimyasal etkenlere dayanımlarının yüksek olması gibi başka pozitif özellikleri de mevcuttur [47].

3.1.3 Sentetik Polimerler

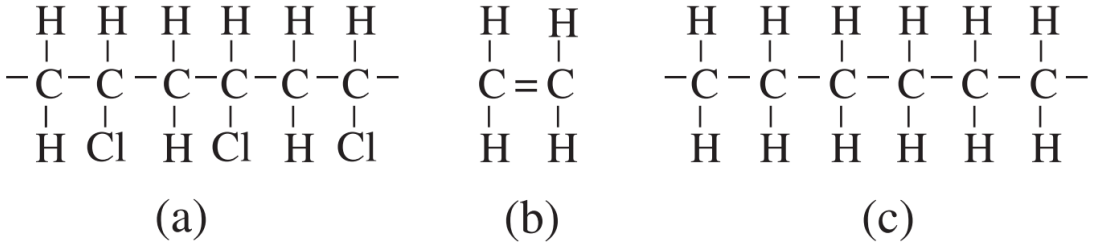
Sentetik polimelerler çeşitli endüstriyel işlemlerin ardından elde edilmekte olup termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki alt başlık altında incelenirler. Termoplastikler, 100 ile 120°C civarında erime sıcaklığına sahiptirler ve esnek bir yapıya sahip olduklarından erime sıcaklıklarının altında kalıplama ve ekstrüsyon işlemlerine sokulabilirler. Şekillendirilmedeki bu avantajları nedeniyle termoplastiklerin piyasadaki payı büyüktür. Termosetler ise ısıtıldıkça dayanıklılık ve sertlik kazanan maddelerdir [47].

3.1.3.1 Termoplastikler

Termoplastik polimerler, ısıtıldığında yumuşak ve esnek bir hale gelir, soğutulduğunda ise tekrar katılaşır. Termoplastikler, özelliklerini kaybetmeden belirli sıcaklık limitlerinde bu ısıtılma ve soğutulma döngülerine maruz bırakılabilirler [49]. Polimetilmetakrilat (PMMA), polietilen (PE), polipropilen(PP), polistiren(PS), polivinilklorür(PVC), poliamid(PA), polikarbonat(PC) ve polietilenteraflat (PET) elektrik sistemlerinde kullanılan başlıca sentetik termoplastik polimerlerdir .

- **Polivinilklorür (PVC)**

PVC, etilenin yapısındaki H atomlarından birinin Cl atomuyla değiştirilmesi sonucu elde edilen vinilklorid monomerinin polimerizasyonu ile elde edilmektedir. PVC polar bir dielektrik olup, çok sert, kırılgan ve termal olarak kararsız bir yapıya sahiptir. Tüm bu özelliklerinden dolayı yalıtım amaçlı kullanımı için yapısına yardımcı maddelerin eklenmesi gerekir. Bunlar; yumuşatıcı, stabilize edici, pürüzsüzleştirici ve renklendirici etkiye sahip maddeler veya dolgu maddeleri olabilir. Stabilize ediciler PVC'nin hava koşullarına ve ultraviyole ışınlara karşı direncini arttırmaktadır [49]. PVC, etilen ve polietilenin moleküler yapıları Şekil 3.1'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.1 Moleküler yapılar (a) PVC (b) etilen (c) polietilen [49]

Elektrik uygulamalarında PVC'den kablo izolasyonları, makaron boru, izole band ve sargı şeridi yapımında faydalanılmaktadır [52]. PVC'nin dielektrik özellikleri Tablo 3.4'te paylaşılmıştır.

Tablo 3.4 PVC'nin dielektrik özellikleri [53]

Özellik	Polivinilklorör
Delinme Dayanımı [kV/mm]	25
tan δ	0.015-0.02
Dielektrik Sabiti	3.5

- **Polietilen**

Polietilen (PE), etilen monomerinin polimerizasyonu sonucu elde edilmektedir. İşlem sırasında uygulanan basıncın büyüklüğüne göre "düşük basınç" ve "yüksek basınç" olarak isimlendirilen iki farklı üretim tekniği bulunmaktadır [49]. Üretimden sonra ham halde bulunan PE, granüller halinde bulunmakta olup bir iletken ile ekstrüzyon işlemine sokulduktan sonra kablo yalıtımında kullanılacak hale getirilmiş olur [47].

Polietilenin, Ziegler-Natta katalizörü eşliğinde birkaç atmosfer basınçta ve 100° C sıcaklıkta elde edilmesi işlemine "düşük basınç" yöntemi denilmektedir. Bu yöntem sonucu elde edilen ürün, 0.94 ile 0.98 g/cm^3 arası yoğunluğa ve görece daha kristalize bir yapıya sahip olup "yüksek yoğunluklu polietilen" (YYPE) olarak adlandırılır [49].

"Yüksek basınç" işleminde ise polimerizasyon, 200° C sıcaklık civarında ve 150 ile 300 atmosfer basınç arasında gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sırasında katalizör görevini düşük miktarda oksijen sağlamaktadır. Elde edilen ürün ise 0.91 ile 0.923 g/cm^3 arasında yoğunluğa sahip olup "düşük yoğunluklu PE" (DYPE) olarak adlandırılır. DYPE'nin kristalize yapısı YYPE'ye göre daha düşük seviyededir [49]

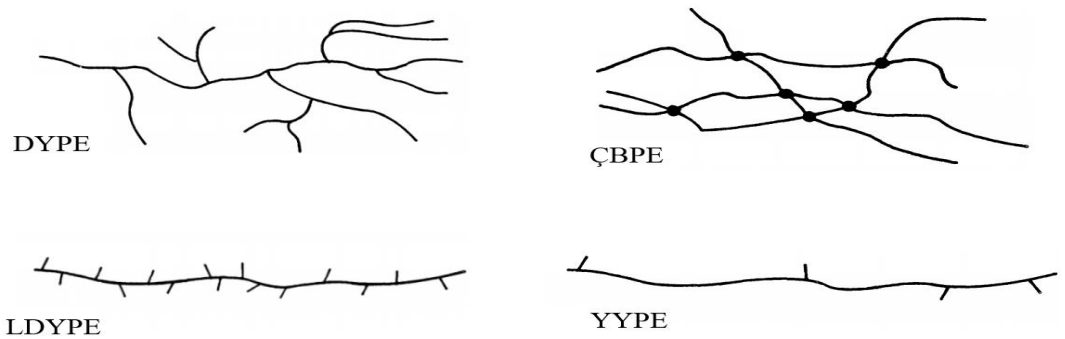
Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), düşük yoğunluklu polietilene (DYPE) göre daha yüksek delinme dayanımı ve dielektrik sabite sahiptir[47]. İki polietilen türünün dielektrik özellikleri Tablo 3.5'de gösterilmiştir.

Tablo 3.5 Düşük ve yüksek yoğunluklu polietilenin dielektrik özellikleri [53]

Özellik	Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)	Düşük Yoğunluklu Polietilen (DYPE)
Delinme Dayanımı [kV/mm]	45-50	30-35
tan δ (1 MHz)	5	0.001
Dielektrik Sabiti	3-4	2.3-3

Gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan üretim teknikleri sonucu PE grubuna "lineer düşük yoğunluklu PE" (LDYPE) ve "orta yoğunluklu PE" (OYPE) olmak üzere yeni polietilen türleri katılmıştır. LDYPE, DYPE'e göre moleküler yapısında daha kısa dallara sahiptir. LDYPE, YYPE, DYPE ve ÇBPE'nin moleküler zincir yapıları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Moleküler yapılarındaki bu temel fark, mekanik ve dielektrik özelliklerinde büyük farklar meydana getirmektedir. LDYPE, geniş sıcaklık aralığında döşenebilmesi, yüksek buhar direnci, çevresel etmen kaynaklı çatlamalara karşı yüksek direnç gibi özellikleri nedeniyle yer altı güç kablosu kılıflarında en çok kullanılan plastiklerden biri haline gelmiştir. Diğer iki lineer yapıdaki polietilen türleri olan HDPE ve MDPE de oldukça iyi yalıtkan özelliklerine sahiptirler. Ancak, yoğunluklarının yüksek olmasından kaynaklı sahip oldukları sert yapıları nedeniyle kablo yalıtımında kullanılmaya uygun değillerdir [47].



Şekil 3.2 Polietilen türlerinin moleküler zincir yapısı [47]

- **Polistiren (PS)**

Polistirenin ham maddesi kömürdür ve genel olarak püskürtme – döküm yöntemiyle şekle sokulmaktadır. Saf hali saydam ve kırılgan bir yapıdadır.

Dielektrik kayıpları az ve direnci oldukça yüksektir. Bu nedenle yüksek frekans uygulamalarında, bobin göbeklerinin terminal kirişlerinin ve yalıtkan plaklarının yapımında polistiren kullanılır. Ayrıca, bir türevi olan köpük maddesi strafordan yüksek frekanslı akım taşıyan kabloların yalıtılması ve yataklanmasında, ısı izolasyonunda ve ambalajlamada yararlanılmaktadır [52]. Dielektrik Özellikleri Tablo 3.6'da paylaşılmıştır.

- **Politetrafloretilen (Teflon)**

Politetrafloretilen (PTFE), bir diğer adıyla teflon, karbon ve flordan oluşmaktadır ve 2.2 kg/dm^3 yoğunluğa sahiptir. Kimyasal etkenler ve çözücü maddelere dayanıklı olup 325°C sıcaklığa kadar sıcaklıklara oldukça dayanıklıdır. Üretim aşamalarında toz halindeki PTFE preslenir ve ardından 350-380°C arasında sinterlenir ve istenilen malzeme elde edilir. Contalarda, kablo izolasyonunda ve korozyondan koruma amacıyla metal yüzey kaplamalarında kullanılır [52]. Dielektrik özellikleri aşağıdaki tabloda paylaşılmıştır.

Tablo 3.6 PS ve PTFE'nin dielektrik özellikleri [53]

Özellik	**Polistiren**	**PTFE**
Delinme Dayanımı [kV/mm]	25-35	30
tan δ	0.0007(50 Hz)	0.0001-0.0003
Dielektrik Sabiti	2.5(50 Hz)	2-2.2 (1MHz'e kadar)

- **Polyester**

Asitlerin, alkoller veya anhidritleri ile polikondansasyonu sonucu elde edilmektedir. Hem termoplastik hem de termoset sınıfında değerlendirilen türleri mevcuttur. Polyester malzemeler; çoğu çözücüye, aside, bazlara vb. dayanıklıdırlar. Ayrıca, dielektrik özellikleri oldukça iyi olup elektrik arkına dirençleri yüksektir, dielektrik kayıpları ise düşüktür. Polikarbonat ve polietilen tereftalat (PET) en bilindik üyeleridir [53]. Her iki malzemenin dielektrik özellikleri Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7 PET ve polikarbonatın dielektrik özellikleri[53]

Özellik	**PET**	**Polikarbonat**
Delinme Dayanımı [kV/mm]	90	140
tan δ	0.006	0.001
Dielektrik Sabiti	3-4	2.3-3

Mylar polyester filmler, polietilen tereftalat (PET) reçineden üretilmekte olup PET film olarak da adlandırılmaktadır. Bu malzemeler, düşük kayıp faktörüne, yüksek hacim direncine ve yüksek dielektrik dayanıma sahiptirler. Hava koşullarının yarattığı etkilere dayanımı iyi seviyededir. Bu özellikler, PET filmin (Mylar) motor ve transformatör izolasyonunda, kağıt izolasyonun yerine kullanımına olanak sağlamaktadır. Ayrıca, yumuşuma noktası yüksek olduğundan dolayı, PET film, kağıt yalıtkanın çalışma sıcaklığı açısından sınırlı kaldığı sıcaklıklarda da kullanılabilir [48].

* Polikondansasyon, polimer üretmek için tekli veya çoklu monomer türlerini bağlayarak uzun zincirler oluşturan kimyasal bir yoğunlaştırma işlemidir. Bunun sonucunda su veya benzer bir madde serbest bırakılır [54].

3.1.3.2 Termosetler

Termoset malzemeler bir kez ısıyla şekillendirildikten sonra bir daha yumuşatılamayan ve şekil verilemeyen aksine ısıtıldıkça sertleşen polimerlerdir. Çünkü ısıl işlemden sonra kimyasal yapıları değişmekte, molekülleri arasında çapraz bağlar (üç boyutlu ağ yapı) oluşmaktadır. Oluşan bu çapraz bağlar sayesinde ısıl ve mekanik dayanımları yüksek olmaktadır [49].

- **Çapraz Bağlı Polietilen**

Polietilenin su tutma özelliği düşük olmasına rağmen, su buharından etkilenebilmektedir. Ayrıca, mekanik çatlaklara karşı hassas yapıdadır. Polietilenin termal ve mekanik özelliklerini geliştirmek için "Çapraz Bağlama" işlemi uygulanmakta ve çapraz bağlı polietilen (ÇBPE) elde edilmektedir. ÇBPE üretiminde genellikle DYPE kullanılmaktadır. ÇBPE, sürekli olarak 90 °C sıcaklığa, kısa süreli olarak ise 250° C sıcaklığa kadar dayanabilmektedir. Çapraz bağlı polietilen kimyasal işlemler yoluyla veya ışıma yoluyla elde edilebilmektedir. İlgili yöntemler aşağıda anlatılmıştır [49].

a. Kimyasal İşlem

Güç kablolarında yalıtkan malzeme olarak kullanılan polietilene çapraz bağlama işlemi ilk kez 1953 yılında General Electric şirketi tarafından uygulanmıştır. Uygulanan bu işlemde DYPE malzemesi ile dikumil peroksit gibi bir çapraz bağlayacı kimyasal madde, yüksek basınç ve sıcaklık altında kimyasal reaksiyona sokulmaktadır. Yüksek sıcaklıkta peroksit molekülleri parçanlanmakta ve serbest radikaller ortaya çıkmaktadır. Peroksitin ürettiği serbest radikaller, polimer zincirinden hidrojeni ayırarak polimerik serbest radikalin üretilmesini sağlar. Ortaya çıkan serbest radikaller birleşerek, çapraz bağlanma olayının oluşumunu sağlar.

Günümüzde ÇBPE üretiminde kullanılan 3 farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar:

- Yüksek sıcaklık ve buhar basıncında gerçekleştirilen "ıslak kürleme"
- Yüksek sıcaklık ve nitrojen gazı basıncında "kuru kürleme"
- Yüksek sıcaklık ve silikon yağı basıncında "yağlı kürleme"

olarak sıralanmaktadır.

b. Işıma İşlemi

Çapraz bağlı polietilenin üretilmesinde serbest radikallerin ortaya çıkarılması ışıma yardımı ile de sağlanabilmektedir. Bu teknik ile üretilen ÇBPE, 33 kV gerilim seviyesine kadar dayanım göstermektedir. Çapraz bağlanmanın derinliği sınırlı olduğundan daha yüksek gerilim seviyeleri için başarılı bir yöntem değildir. Ayrıca, pahalı ekipman ve kapsamlı koruyucu önlemler gerektirmektedir.

- **Sentetik Kauçuk (Elastomer)**

Kauçuk yüksek esnekliğe sahip bir polimerdir ve “polyisoprene” olarak da adlandırılır, kauçuk ağacından doğal yollarla veya sentetik bir madde olan “caoutchouc”dan üretilmektedir. Sentetik kauçuktan elde edilen kauçuk ürünler, doğal kauçuktan elde edilenlere göre daha iyi elektriksel ve termal özelliklere sahiptir [49]. Doğal kauçuk, termoplastik ve termoset arasındaki farkın klasik bir örneğidir. Termoplastik yapısı nedeniyle sıcak günlerde yumuşak ve yapışkan bir hal alır ve bu durum ticari olarak kullanılmasına bir engeldir. 1839 yılında Charles Goodyear kükürt ile kürleme (çapraz bağ oluşturma) işlemini keşfederek kauçuğa termoset özelliğini kazandırmış ve böylelikle kauçuk, yüksek sıcaklıklarda da yapısal özelliklerini koruyabilmiştir [55].

Kauçuk üretimi sırasında karışım için farklı oranlarda baz malzemeleri seçmek ve onlara farklı derecelerde vulkanizasyon uygulamak, çeşitli özelliklere sahip farklı kauçuk ürünleri meydana getirmektedir [49]. Başlıca sentetik kauçuk türleri, stiren-butadien kauçuk, butil kauçuk, etilen-propilen kauçuk, nitril-butadien kauçuk, silikon kauçuk , etilen – propilen dien monomer kauçuk olarak sıralanabilir.

Kauçuk çeşitleri esnek yapıları sayesinde kablo yalıtımı, dielektrik kaplama gibi çok amaçlı olarak kullanılabilir. Çeşitli kauçuk türleri birbirleriyle karıştırılarak, kullanılacağı alana göre özellikleri optimize edilebilmektedir. Farklı kauçuk türlerinin çeşitli özellikleri Tablo 3.8’de gösterilmiştir.

Tablo 3.8 Bazı kauçuk türlerinin yapısal ve dielektrik özellikleri [53]

Özellik	Nitril Butadien Kauçuk	Stiren Butadien Kauçuk	Butil Kauçuk	Neoprene Kauçuk	Silikon Kauçuk
Yoğunluk [gm/cm^3]	1	0.94	0.92	1.24	1.6-2
Delinme Dayanımı [kV/mm]	12	30	25	25	25
Hacim Direnci [ohm-cm]	1×10^9	5×10^4	5×10^{15}	5×10^{11}	1×10^{14}
tan δ – 50 Hz	2×10^{-1}	7×10^{-3}	6×10^{-6}	1×10^{-1}	5×10^{-2}
Dielektrik Sabiti	16	2.5	2.2	7	4.5
Mekanik Dayanımı	Ortalama	İyi	Ortalama	İyi	Kötü
Isıl Dayanımı	İyi	Yeterli	İyi	İyi	Mükemmel
Donma Dayanımı	İyi	Mükemmel	İyi	İyi	Mükemmel
Ozon Dayanımı	Yeterli	Kötü	İyi	İyi	Mükemmel
Ateşe Dayanım	İyi	İyi	Mükemmel	Mükemmel	İyi
Suya Dayanım	Kötü	Kötü	Kötü	İyi	İyi
Aside Dayanım	İyi	İyi	Mükemmel	Mükemmel	İyi

- **Epoksi Reçine**

Epoksi reçineler, oldukça iyi mekanik ve dielektrik özelliklere sahiptir. Oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda bile döküm yoluyla istenilen şekle sokulabilmektedirler. Çok yönlü yapıları sayesinde, üretim aşamasında son ürünün fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek ve maliyet kontrolünü

sağlamak için epoksi reçineler; cam elyafı, füme silika ve diğer inorganik dolgu malzemeleriyle karıştırılarak yapısal özellikleri kolaylıkla değiştirilebilir. Güç sistemlerinde izolatör yapımında, motor ve transformatör sargılarının kaplama yalıtımında tercih edilmektedirler. Ayrıca, porselen, tahta, metal, plastik türevi birçok malzeme için bağlayıcı madde görevinde kullanılmaktadırlar [47], [48].Epoksi reçinenin dielektrik özellikleri Tablo 3.9'da paylaşılmıştır.

Tablo 3.9 Epoksi reçinenin dielektrik özellikleri [53]

Özellik	**Epoksi Reçine**
Delinme Dayanımı (kV/mm)	30-70
tan δ	0.003-0.01
Dielektrik Sabiti	2.5-3.5

3.2 Katı Yalıtkanların Termal Sınıflandırılması

Katı yalıtkan malzemelerin performansı, çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir. Çalışma süresince maruz kaldıkları sıcaklık ne kadar yüksekse, yapılarının bozulma oranı o kadar yüksek olacak ve dolayısıyla kullanım ömrü düşüş gösterecektir. Yalıtkan malzemelerin kullanım ömrü uzun tutulmak isteniyorsa, çalışma sıcaklığı düşük tutulmalıdır. Bu nedenle, yalıtımın beklenen ömrü boyunca güvenli çalışmasını sağlayacak sıcaklık sınırlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden, yalıtım malzemeleri farklı termal sınıflara ayrılmıştır [48]. İlgili sınıflandırma, Tablo 3.10'da paylaşılmıştır.

Tablo 3.10 Katı yalıtkanların termal sınıflandırılması

Malzeme Sınıfı		Malzeme İsmi	Çalışma Sıcaklığı Limiti
Y		emprenye edilmemiş pamuk, ipek, kağıt, pvc, doğal kauçuk	90 °C
A		Y sınıfının emprenye edilmiş halleri ve naylon	105 °C
E		PET, selüloz triasetat, poliüretan, polivinil asetat bazlı emaye	120 °C
B		mika, asbest, bakalit, fiberglas ve polyester emaye	130 °C
F		B sınıfının alkid ve epoksi reçineyle birlikte kullanıldığı durumlar	155 °C
H		B sınıfının silikon reçine katkılı halleri, silikon kauçuk, aromatik Poliamid, Poliimid film	180 °C
C (IEC 60085:2004)	N ve R (IEC 60085:2008)	B sınıfının inorganik bağlayıcı katkısıyla kullanıldığı halleri ve Teflon	180°C ve üzeri

Yukarıda belirtilen sıcaklıklar, kesin olarak sınırlayıcı sıcaklık değeri olarak nitelendirilmemektedir. Yalnızca, çeşitli yalıtım malzemelerini karşılaştırmak için bir indeks olarak kabul edilebilir. Tüm ulusal standartlar, ilgili ekipmanların çalışma sıcaklıklarını bu değerlerden yola çıkarak belirlemektedir. Ancak, çeşitli sebeplerden dolayı, uygulamada bu değerler belirli farklar gösterebilmektedir [48].

3.3 Katı Yalıtkan Malzemelerde Delinme Süreçleri

Katı yalıtkanların delinme sürecinde, malzemenin karşılaştığı mekanik zorlanma, malzeme içindeki ısı iletimi, elektrik yükü enjeksiyonu ve birikimi, malzemenin kimyasal ve mekanik kararlılığı gibi faktörler etkin olmaktadır. Bir arada ve doğrusal olmayan bir şekilde etkili olan bu faktörlerden dolayı delinme

süreci oldukça karmaşık bir yapıdadır [49]. Yalıtkan malzemeye gerilim, 10^{-8} s düzeyinde kısa bir süre için uygulandığında, katı yalıtkanların dielektrik dayanımı, çok hızlı bir şekilde, "öz delinme" olarak adlandırılan üst sınıra yükselmektedir. Ancak, bu durumun gerçekleşmesi için deney koşullarının son derece kontrollü olması gerekmektedir [48]. Bu sebeple, yalıtkan malzemeler uygulamada;

- elektro-mekanik delinme,
- dahili deşarjlar nedeniyle delinme,
- iz oluşumu ve erozyon,
- termal delinme,
- elektro-kimyasal delinme,
- kimyasal bozulma,

mekanizmalarının biri nedeniyle öz delinme dayanımlarının altındaki gerilim seviyelerinde delinebilmektedirler [56].

3.3.1 Öz Delinme Dayanımı

Öz delinme, yalıtkan hacim boyunca hareket edebilen serbest elektronların varlığına bağlıdır. Yalıtkanın yapısında bulunan yabancı (saflığı bozan) atomlar veya moleküller, belirli bir elektrik alan ve sıcaklık değerine kadar iletim elektronları için tuzak görevi görmektedir. Bu değerler aşıldığında hem tuzaklanmış haldeki elektronlar hem de yalıtkan yapısındaki başka elektronlar harekete geçer ve iletim sürecine dahil olur. Bu ilkeye dayanan, elektronik delinme ve çığ delinmesi olmak üzere iki tür öz delinme mekanizması mevcuttur [48].

3.3.1.1 Elektronik Delinme

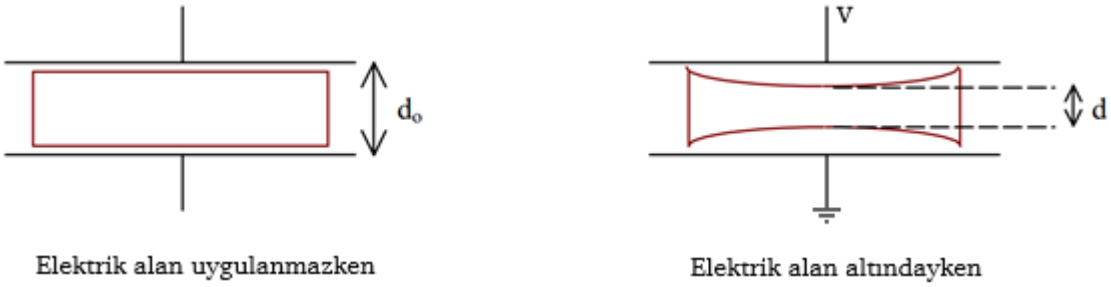
Daha önce de belirtildiği gibi, öz delinme 10^{-8} s gibi çok kısa bir sürede meydana gelmektedir ve bu nedenle doğası gereği elektronik olduğu varsayılmaktadır. Yalıtkan malzemeye elektrik alan uygulandığında, elektronlar elektrik alandan enerji alırlar ve aradaki yasak bandı aşarak valans bandından iletim bandına geçiş yaparlar. Bu olay tekrarlı şekilde yaşandıkça, iletim bandında gittikçe daha fazla elektron bulunmaya başlar ve bunun sonunda delinme gerçekleşir [48].

3.3.1.2 Çığ Delinmesi

Bu olay, gazlardaki birikimli iyonlaşma nedeniyle oluşan delinme mekanizmasına benzemektedir. Yalıtkan içindeki bir elektron, elektrik alan altındayken katottan anoda doğru hareketi sırasında elektrik alandan kazandığı enerjiyi yalıtkan hacmi içindeki çarpışmalar sırasında kaybetmektedir. Eğer bir elektron tarafından kazanılan enerji, kafes iyonlaşma potansiyelini aşarsa, çarpışma nedeniyle ek bir elektron serbest kalmaktadır. Bu olayın tekrarlı şekilde yaşanması elektron çığına neden olmaktadır. Bu çığ ciddi boyutlara erişirse delinme olayı gerçekleşecektir. Tek bir elektron çığının oluşması, yalıtkan malzemenin delinmesine yeterli olmamaktadır. Delinme olayının gerçekleşmesi için, elektron çığının tekrarlı bir şekilde oluşması ve malzeme boyunca ilerlemesi gerekmektedir [48].

3.3.2 Elektromekanik Delinme

İki elektrot arasındaki bir yalıtkan malzemeye elektrik alan uygulandığında, yüzey yükleri arasındaki çekim kuvveti nedeniyle, yalıtkan mekanik bir kuvvete maruz kalmakta ve yalıtkan malzeme sıkışmaktadır. Bu sıkışma, malzeme kalınlığını azaltarak malzemenin maruz kaldığı zorlanmayı arttırmaktadır [56].



Şekil 3.3 Elektrik alanın sıkıştırma etkisi [56]

Şekil 3.3'te gösterilen V gerilimi altındaki, d_0 kalınlığına sahip yalıtkan malzemenin elektrik alan etkisi ile kalınlığının d seviyesine düştüğü durumda, yalıtkana etkiyen elektriksel kuvvet ile malzemenin mekanik dayanımı arasında aşağıdaki ifadede gösterilen denge hali mevcuttur [48].

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = Y \ln\left[\frac{d_o}{d}\right] \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte; ε_0 boşluğun dielektrik sabiti, ε_r ilgili malzemenin bağıl dielektrik sabiti ve Y, Young Modülü'dür. Young Modülü, malzemeye uygulanan kuvvetin yüzey alanı başına düşen miktarının, kuvvet sonucu meydana gelen boyut değişimi oranına bölümüdür ve malzemeler için karakteristik bir özelliktir. (3.2) eşitliğinde belirtilen oranda sıkışma meydana geldiği zaman, yalıtkan malzeme mekanik kararsızlığa girmekte ve delinme süreci başlamaktadır.

$$\frac{d_o}{d} = 0.6 \quad (3.2)$$

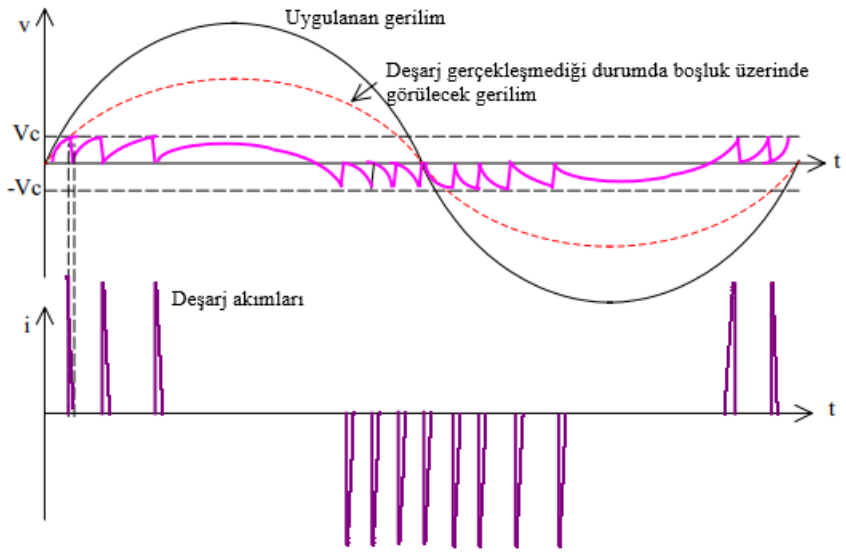
Buradan yola çıkarak, (3.2) ifadesindeki oran değeri (3.1) eşitliğinde yerine koyulduğunda. Yalıtkan malzemelerin elektromekanik delinme gerçekleşmeden dayanabileceği maksimumum elektrik alan değeri, aşağıdaki ifadede gösterildiği şekilde elde edilir [48].

$$\mathrm{E_{maksimum}} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{d_0}} = 0.6\left[\frac{\mathrm{Y}}{\varepsilon_0 \varepsilon_\mathrm{r}}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

3.3.3 Dahili Deşarj Kaynaklı Delinme

Katı yalıtkan malzemeler, iç yapılarında veya elektrotlar ile olan sınırlarında boşluklar barındırabilmektedir. Bu boşluklar ise malzemenin kendisinden daha düşük dielektrik dayanıma sahip gaz ya da sıvılar ile doludur. Dahası, boşluğun dielektrik sabiti katı yalıtkan malzemenin dielektrik sabitinden oldukça düşük değerdedir ($\varepsilon_r$hava=1). Bu durum, boşluktaki elektrik alan şiddetinin ana malzemenin üzerindeki elektrik alan şiddetinden daha fazla olmasına sebep olur. Yani, yalıtım sisteminin normalde dayanabileceği gerilimler altında bu boşluk yapılarında delinme meydana gelip deşarj gerçekleşebilir [56].

Yalıtkan malzeme üzerine uygulanan ve boşlukta görülen gerilim ile deşarj darbeleri arasındaki ilişki Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Dahili deşarjlar [56]

Görüldüğü üzere boşuk üzerine düşen gerilim, boşluğun dayanım gerilimi olan V_c'ye eriştiğinde deşarj başlar ve üzerindeki gerilim hızlıca azalır. Bu durum tekrarlı şekilde yaşanır. Her bir deşarj ısı üretmekte ve deşarj sırasında boşluğu çevreleyen yalıtkan malzeme erozyona uğrayarak zarar görmektedir. Dahili deşarjların uzun süreli tekrarlaması sonucu malzeme delinecek kadar zarar görebilir. Deşarj darbelerinin sayısı, genliği ve sıklığı uygulanan gerilimin içeriğine göre değişim gösterir [56].

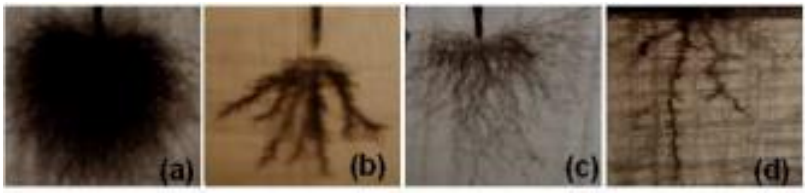
3.3.4 İz Oluşumu ve Erezyon

Katı yalıtkanların kullanımları sırasında, yüzeyinde, nemden kaynaklı olarak iletken film görevi gören bir yapı oluşmaktadır. Malzemeye gerilim uygulandığı zaman, bu film üzerinde elektrik iletimi başlar ve aynı zamanda, yüzeyde ısı üretilir. Üretilen ısı, yüzeyde kurumaya sebebiyet vererek, yüzeydeki nemli yapının bütünlüğünü bozar. Böylelikle nemli bölgeler arasında atlamalar (kıvılcım) meydana gelir. Bu olay sırasında yalıtkan yüzey zarar görür. Malzeme yapısının bozulması, tamamen atlamalar sonucu oluşan ısının bir sonucudur [48]. Isı nedeniyle, iz oluşumu meydana gelirse, karbonlaşmaya neden olmaktadır. Eğer, erozyon meydana gelirse, yalıtkan yüzeylerinin pürüzlenme oluşur. Her iki durum da elektrotları köprüleyen bir iletken yolun oluşmasına sebep olmaktadır [56].

İz oluşumu ile meydana gelen karbonizasyon sonucu, yalıtkanın ilgili bölgesi kalıcı şekilde iletkenlik özelliği kazanmakta ve malzemenin geri kalanı için elektriksel zorlanmayı arttırmaktadır. Bu, birikimli şekilde ilerleyen bir süreçtir ve karbonize yollar, elektrotları köprülediği zaman, yalıtkan arızası meydana gelmiş olur. Bu olay, kısaca “iz oluşumu” olarak adlandırılmaktadır. Erozyon veya iz oluşumu sonucu oluşan iletken yolların ağaç dalları şeklinde yayılması ile birlikte ağaçlanma denilen olay meydana gelmektedir [48].

Elektriksel ağaçlanma, malzemenin delinmesinden önce, düzgün olmayan elektrik alanlar altında gerçekleşen bir yalıtkan yaşlanma mekanizmasıdır. Deşarjların ilerleyiş yolu bir ağacı andırdığı için “ağaçlanma” denmektedir. Yalıtkan malzemenin çıkıntılarında, içerdiği yabancı partiküllerde ve yapısındaki boşluklarda oluşan alan bozulmaları ağaçlanmanın temel sebebidir. Kısmi deşarjlar vasıtasıyla bir süreç içinde yavaşça oluşabileceği gibi, malzeme darbe gerilimlerine maruz kalırsa, ani bir oluşum da gözlenebilir. Eğer yalıtkan nemli bir yapıya sahipse, ölçülen bir kısmi deşarj olmasa bile zamanla ağaçlanma görülebilmektedir. Ağaçlanma, yalıtkanların arızalanmasının en yaygın nedenlerindendir. Ancak, her ağaçlanma, yalıtkanın tümüyle delinmesi ile sonuçlanmayabilir [49].

Elektriksel Ağaçlanma, yalıtkanın maruz kaldığı gerilimin genliğine ve frekansına göre farklı şekillerde meydana gelmektedir. Bu şekiller genel olarak çalı tipi, ağaç tipi, iplik tipi ve öz tip olarak sınıflandırılabilir. Ağaçlanma başladığında toprağa ulaşan tek bir dal görünüyorsa, bu ağaçlanma tipine “öz tip” ağaçlanma denmektedir. Eğer uygulanan gerilim genliği yüksek ise frekanstan bağımsız olarak “çalı tipi” ağaçlanlanma, düşük gerilimlerde ise “ağaç tipi” ağaçlanma gözlemlenir. Son olarak, yüksek frekanslarda ise “iplik tip” ağaçlanma oluşmaktadır [57]. Bahsi geçen ağaçlanma tiplerine ait örnek gösterim Şekil 3.5’de sunulmuştur.



Şekil 3.5 ÇBPE yalıtkanda oluşan ağaçlanma tipleri (a) çalı (b) ağaç (c) iplik (d) öz [57]

3.3.5 Termal Delinme

İletim, polarizasyon ve kısmi deşarj gibi olaylardan kaynaklı meydana gelen dielektrik kayıplardan dolayı, malzeme içinde sürekli olarak ısı üretilmektedir. Termal delinme olayı, malzeme içindeki bu ısı artışından kaynaklı meydana gelmektedir. Malzeme sıcaklığı, uygulanan gerilimin büyüklüğüne, süresine ve malzemenin ısı iletimine bağlı olarak yükselmektedir. Eğer, malzemenin içinde üretilen ısı, ısı iletimi ile çevreye dağıtılan ısıya eşitse bu sıcaklık değeri denge değerine yükselecektir ve yalıtım malzemesi, termal dengede kararlı şekilde çalışacaktır. Ancak, yalıtkandaki güç kayıpları sıcaklığın da bir fonksiyonudur. İyonik iletkenlik artan sıcaklıkla arttığından, güç kayıpları da sıcaklık yükselişi ile birlikte artmaktadır. Isı yayılımı yoluyla malzemenin soğuma hızı yeterli seviyelerde değil ise, ısıl anlamda kararsız bir durum ortaya çıkabilmektedir. Bu kararsız durum, sıcaklığın sınırsız şekilde artmasını mümkün kılarak malzemenin delinmesine sebep olabilmektedir [49].

DC ve AC gerilimler altındaki ısıl delinme olayları aşağıdaki alt başlıklarda anlatılmıştır [49].

3.3.5.1 DC Gerilim Altında Termal Delinme

Düzgün DC elektrik alan altındaki bir yalıtkan malzemede, polarizasyon ve diğer kayıp mekanizmalarının yok sayıldığı durumda oluşacak aktif güç kayıpları (3.4) ifadesinde gösterilmiştir.

$$P_{dc} = U^2 \times \frac{A}{d} \times \kappa_{dc} \tag{3.4}$$

Burada,

A= Elektrod yüzey alanı [cm^2],

d = Elektrodlar arası boşluk mesafesi (yalıtkan kalınlığı) [cm],

κ = DC iletkenlik [Siemens/cm],

U = Uygulanan gerilimdir [V],

DC iletkenlik (3.5) ifadesinde gösterildiği gibi sıcaklığa bağlı olarak üstel şekilde değişmektedir.

$$\kappa_{dc}(\theta) = \kappa_{0dc} \times e^{\beta(\theta-\theta_0)} \tag{3.5}$$

Buradan yola çıkarak (3.4) ifadesi aşağıdaki gibi uyarlanabilir.

$$P_{dc}(\theta) = U^2 \times \frac{A}{d} \times \kappa_{0dc} \times e^{\beta(\theta-\theta_0)} \tag{3.6}$$

Bu ifadede,

κ_{0dc}= 20 °C sıcaklıktaki dc iletkenlik,

θ= malzeme sıcaklığı [°C],

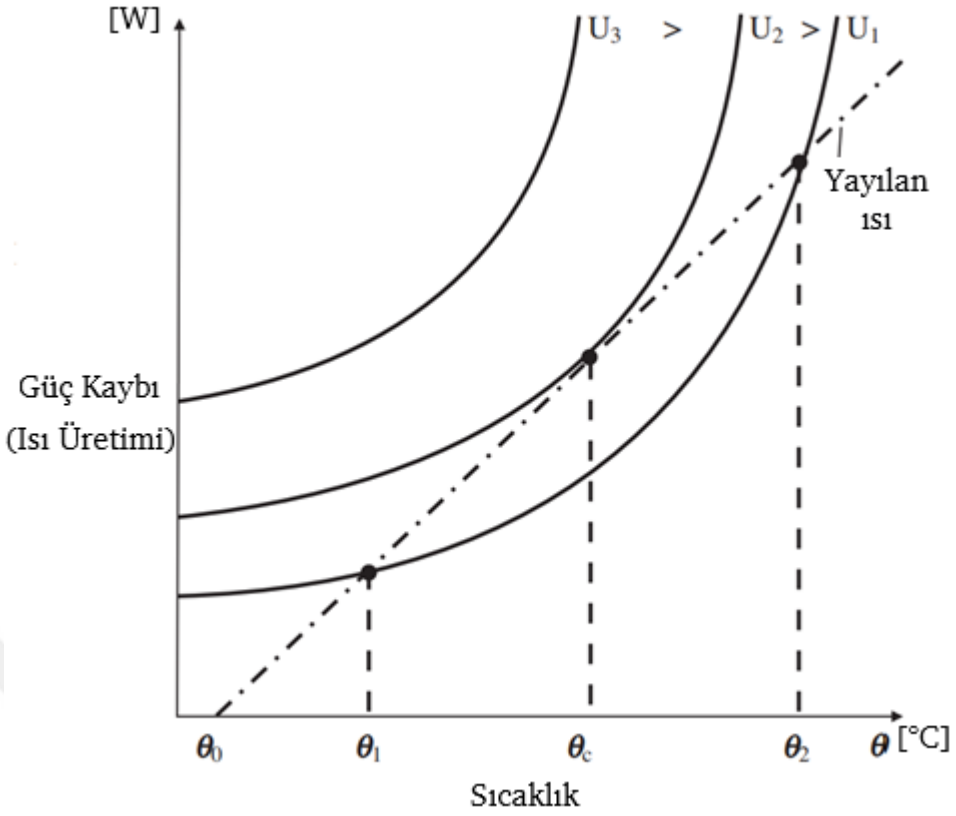
θ_0= ortam sıcaklığı [°C],

olarak tanımlanmaktadır

Yalıtkan malzemenin çevreye yaydığı ısı ise sıcaklık ile doğrusal şekilde değiştiği kabul edilmektedir. B yüzden, bir K sabiti yardımıyla ifade (3.7)'deki gibi gösterilebilir.

$$P_{yay}(\theta) = K(\theta - \theta_0) \tag{3.7}$$

$P_{dc}(\theta)=P_{yay}(\theta)$ eşitliği ve eşitsizliğini içeren farklı durumların grafiksel gösterimi farklı sıcaklık ve gerilim değerleri için Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Isı üretimi ve ısı yayılımının farklı durumları için grafik gösterimi [49]

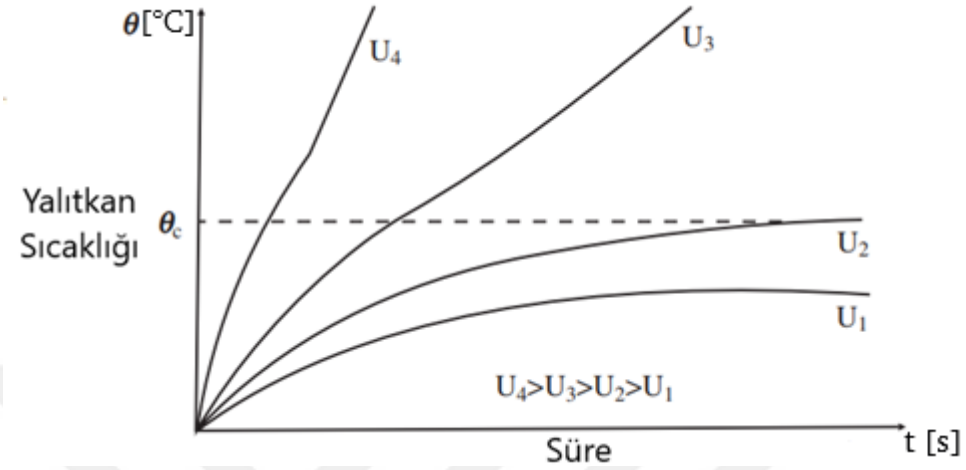
İlgili grafikte; örnek bir yalıtkan malzemenin U_1, U_2 ve U_3 gerilimleri altında farklı sıcaklık değerlerindeki ısı üretimi ve ısı yayılımları gösterilmiştir. θ_1, θ_c ve θ_2 sıcaklık değerlerinde malzeme içinde üretilen ve malzemenin etrafa yaydığı ısı eşittir yani yalıtkan termal olarak kararlı bir haldedir. Burada, θ_c ve U_2 kritik değerlerdir. U_2 gerilimi altında sadece θ_c sıcaklığında termal kararlılık söz konusudur. Diğer sıcaklıklarda, yalıtkan malzeme termal delinmeye maruz kalacaktır. U_2 değerinden yüksek herhangi bir gerilim (örneğin U_3), malzemeye uygulandığında malzemede üretilen ısı miktarı, yayılan ısıya göre daha fazla olacağından zamanla delinme kaçınılmaz olarak gerçekleşecektir.

3.3.5.2 AC Gerilim Altında Termal Delinme

V hacmine sahip bir katı yalıtkanın, E, düzgün elektrik alanı altındaki aktif güç kaybı (3.8) ifadesindeki gibi hesaplanmaktadır. Burada sıcaklığa bağlı olarak değişen parametreler kayıp indisini oluşturan, kayıp faktörü ve bağıl dielektrik sabitidir. Bu yüzden, geri kalan tüm değerler K sabitine indirgenebilir.

$$P_{ac} = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times \omega \times V \times E^2 \times \tan\delta = K \times (\varepsilon_r \times \tan\delta) \text{ [watt]} \qquad (3.8)$$

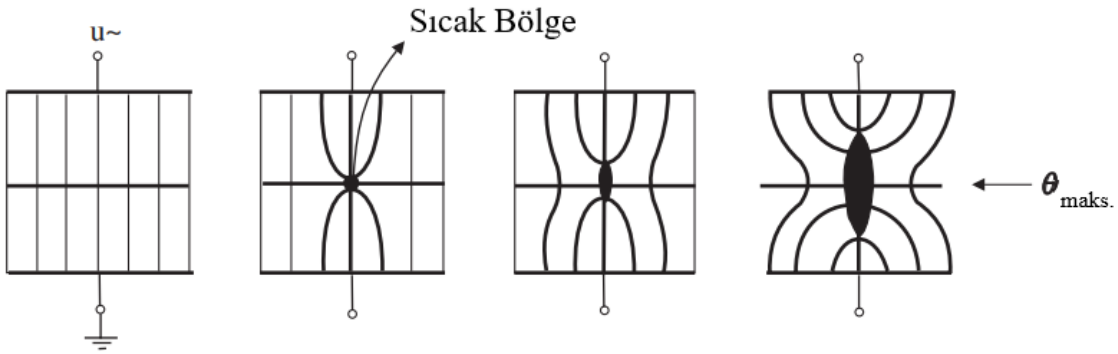
Şekil 3.7'de farklı gerilim seviyeleri ve uygulama süreleri için yalıtkan malzemede görülen sıcaklık değişimine ait bir grafik gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Farklı gerilim seviyelerinde sıcaklık değişim süreleri [49]

Bu grafikte, görece düşük bir gerilim değeri olan U_1 yalıtkan malzemeye uygulandığında, malzeme kritik sıcaklık değerine (θ_c) ulaşmayacak ve delinme gerçekleşmeyecektir. Ancak, grafikten de görüldüğü üzere yalıtkan malzeme, U_2 gerilimi altında çok uzun süreler sonra termal delinmenin yaşanabileceği kritik eşiğe ulaşmaktadır. Daha da büyük gerilimler olan U_3 ve U_4 gerilimleri altında, kritik sıcaklık değeri çok kısa sürelerde aşılmakta ve termal kararsızlığa ulaşılmaktadır.

Genel itibariyle, malzemenin sıcaklığı çevreye yayma hızı yetersiz kalırsa, malzeme içinde "sıcak bölge" oluşumu gözlenmektedir. Bu bölgede elektrik iletiminin artışından dolayı uzay yükleri serbest kalmakta ve yüksek elektrik alan yoğunluğu gözlenmektedir. Sonuç olarak, bahsedilen sıcak bölge elektrotlar arasında bir delinme kanalı oluşturmaktadır. Kademeli şekilde meydana gelen oluşum, Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Gerilim altındaki yalıtkan malzemede sıcaklık artışı ile sıcak bölgenin oluşum süreci [49]

3.3.6 Kimyasal ve Elektrokimyasal Bozulma ve Delinme

Yalıtkan malzemeler, sürekli gerilim altındayken hava ve diğer gazlar ile etkileşimde olduklarından dolayı bir takım kimyasal değişikliklere uğramaktadırlar [48].

Meydana gelen önemli kimyasal reaksiyonlardan bazıları şunlardır[48]:

Oksitlenme: Hava veya oksijen ile etkileşim sonucu, kauçuk ve polietilen gibi malzemelerin yüzeylerinde oksitlenme kaynaklı çatlamalar meydana gelir.

Hidroliz: Katı yalıtkanların yüzeyinde nem veya su buharı bulunduğunda, su ile etkileşim sonucu meydana gelen yıkım reaksiyonu olarak tanımlanan hidroliz olayı meydana gelir ve malzemelerin elektriksel ve mekanik özellikleri kötüleşir. Kağıt, pamuk bant, vb. selüloz malzemelerin elektriksel özellikleri, hidroliz nedeniyle çok hızlı bozulur. Ayrıca, polietilen gibi plastik yalıtkanlarda da yapısal değişiklikler meydana gelir ve ömürleri azalır.

Kimyasal Etkileşim: Malzeme elektrik alan altında değilken bile, yüksek sıcaklıklar altındaki kimyasal kararsızlık, oksidasyon sonucu yüzey çatlaması ve hidroliz gibi çeşitli süreçler nedeniyle yalıtım malzemelerinde aşamalı olarak kimyasal bozulma meydana gelebilir.

Sıcaklığın kimyasal ve elektrokimyasal bozulmalara etkisi çok fazladır ve bu nedenle yüksek çalışma sıcaklıklardan kaçınılmalı veya ortam sıcaklığına uygun yalıtım malzemeleri kullanılmalıdır. Gerekli hallerde, soğutma sistemlerinden faydalanılmalıdır.

3.4 Katı Yalıtkanlarda Kısmi Deşarj Mekanizması

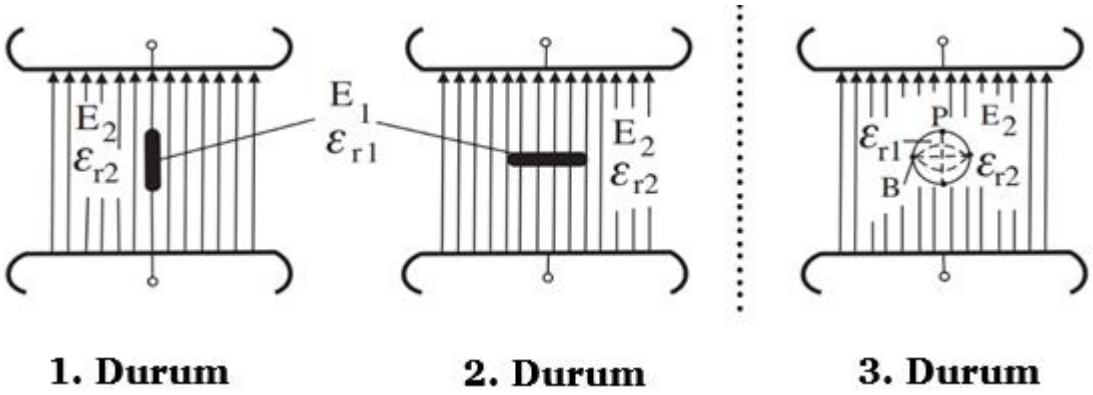
Kısmi deşarj (KD), yalıtım malzemelerinin belirli bir bölgesinde elektrotları köprülemeden meydana gelen bölgesel delinme olayıdır. KD; gaz, sıvı, katı veya bunların kombinasyonu olan yalıtkanlarda, düzgün olmayan elektrik alan yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde oluşmaktadır. KD'ın oluşması için üzerine çıkılması gereken elektrik alan yoğunluğu, malzemenin fiziksel koşullarına ve yapısal özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir [49].Genel olarak, kısmi deşarjlar darbeleri 1 μs'den çok daha kısa sürelerde meydana gelmekte ve ses, ışık, ısı yayılımı ile kimyasal reaksiyonlar bu darbelere eşlik etmektedir [58].

Kısmi deşarj, birkaç çeşit deşarj olayını kapsayan bir terimdir: (a) katı veya sıvı yalıtkanlar içindeki boşluklarda meydana gelen dahili deşarjlar; (b) yalıtım malzemelerinin farklı ortamlar ile sınır yüzeylerinde görülen yüzey deşarjları, (c) homojen olmayan alanların varlığında gazlarda meydana gelen korona deşarjları, (d) katı yalıtkanların içinde sürekli olarak meydana gelen deşarjların etkisi (ağaçlanma) [59].

Gazlarda meydana gelen korona deşarjı kaynaklı bozulmalar, yalıtkanda geri dönüşü olmayan bir hasara neden olmamaktadır. Sıvı yalıtkanlarda meydana gelen dahili deşarjlar, ilk aşamada yalıtım özelliklerinde büyük düşüşlere sebep olmamaktadır. Ancak, bu durum tekrarlı şekilde meydana gelirse, uzun vadede yalıtım sıvılarının dielektrik özelliklerinde düşüş yaşanacaktır. Katı yalıtkanlar içinde meydana gelen dahili deşarjların yarattığı etki ise geri döndürülemezdir. Her deşarj olayı, yüksek enerjili elektronların ve hızlandırılmış iyonların etkisiyle, yalıtkan malzemede kimyasal ve elektriksel değişimler yaratarak yapısal bozulmalara sebep olur [49].

3.4.1 Dahili Deşarj Mekanizması

Katı yalıtkanlarda dahili deşarj olayı, malzeme yapısındaki zayıf noktalarda meydana gelen elektrik alan yoğunlaşması sonucu gerçekleşmektedir. Bu zayıf noktalar, yalıtkanlardaki boşluklar, oyuklar, kesikler, yabancı partiküller veya çıkıntılar olarak tanımlanabilir [49].



Şekil 3.9 Katı yalıtkan içindeki farklı boşluk yapıları [49]

Şekil 3.9'da yalıtkan içinde olabilecek farklı boşluk yapıları gösterilmiştir. 1. Durumda, boşluk ve elektrik alan çizgileri paralel olduğundan dolayı boşluğun elektrik alan yoğunluğu her koşulda uygulanan elektrik alana eşit olmaktadır. Bu türdeki boşluk yapıları son derece tehlikeli olabilmekte ve bu boşlukta oluşacak deşarjlar yalıtkan malzemenin dielektrik dayanımına ciddi şekilde etki edebilmektedir. 2. Durumda ise boşluk ve elektrik alan çizgileri birbirlerine dik konumdadır. Bu tipteki boşluklar için elektrik alan hesabı, (3.9) ifadesinde gösterilmiştir.

$$E_1 = E_2 \times \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} \tag{3.9}$$

Boşluğun üzerine düşen elektrik alan, boşluğun ve esas malzemenin dielektrik sabitine göre değişim göstermektedir. ε_{r1}, ε_{r2}'den küçükse, boşluk üzerindeki elektrik alan yoğunluğunda bir artış gözlenecektir. Yalıtkan içindeki boşluklar özellikle gaz ile doluysa, bu durum sıklıkla yaşanmaktadır. 3. durumda, malzemenin içindeki boşluk küresel bir yapıdadır. Bu durum, 1. ve 2. durumun kombinasyonu olarak varsayılabilir. Bu nedenle, kürenin farklı eksenlerinde 1. ve 2. durum için bahsedilen elektrik alan şiddetleri gözlenecektir [49].

3.5 Dielektrik Ölçümler

Tez çalışmasının bu bölümünde, katı yalıtkan malzemelerin temel dielektrik karakteristikleri olan; delinme dayanımı, dielektrik kayıp ve kısmi deşarj performansının ölçülmesinde kullanılan yöntemler anlatılmıştır.

3.5.1 Delinme Dayanımı

Katı yalıtkan malzemelerin delinme dayanımının tespiti için çeşitli yöntemler mevcuttur. IEC-60243 standardı [60] ve IEC-60060 [61] standartları tarafından farklı gerilim tipleri için aşağıdaki yöntemler önerilmiştir. Test edilecek yalıtkan malzemelerin delinme dayanımları görece düşük seviyelerde ise bu bölümde bahsedilecek test yöntemlerinin hava ortamında uygulanmasında bir sakınca yoktur. Ancak, yüzey deşarjının şiddetli olacağı gerilim seviyelerine ulaşılacaksa, ilgili delinme deneyleri; mineral yağ, silikon sıvı ya da ester sıvılar gibi daha güçlü yalıtım özelliklerine sahip ortamlarda gerçekleştirilmelidir.

3.5.1.1 AC Gerilimler Altında Delinme Dayanımının Tespiti

Bu kısımda, 48-62 Hz aralığında frekansa sahip AC gerilimler için katı yalıtkan malzemelerin delinme dayanımının tespitinde kullanılan yöntemler anlatılmıştır [60].

- **Yüksek Artış Hızlı Gerilimlerin Kullanıldığı Yöntem**

IEC 60243-1'in 10. bölümünde "Short-time (rapid-rise) test" olarak adlandırılan bu yöntemde, test gerilimi, sıfırdan yalıtkan malzemede delinme gerçekleşene kadar 100 V/s, 200 V/s, 500 V/s, 1 000 V/s, 2 000 V/s, 5 000 V/s vb. hızlarında yükseltilmektedir. Bu yükselme hızları içerisindeki 500 V/s hızı, farklı çeşitteki malzemelerin delinme dayanımı tespitinde en yaygın olarak tercih edilen yükselme hızıdır.

- **20 Saniye Adımlı Yöntem**

Bu yöntem, IEC 60243-1'de "20 s step-by-step test" olarak adlandırılır. İlk aşamada, test malzemesinin hızlı yükselim yöntemi ile elde edilmiş delinme geriliminin %40'ı malzemeye uygulanmaktadır. Eğer bu değer bilinmiyorsa, ilgili yöntem ile elde edilmelidir. Eğer yalıtkan bu %40'lik gerilim değerine 20 saniye boyunca dayanabilirse, test gerilimi Tablo 3.11'de gösterilen miktarlara göre arttırılmalı ve aynı şekilde 20 saniye beklenerek süreç devam ettirilmelidir. Sağlıklı bir ölçüm için en az 120 saniyelik test süresine erişilmelidir. Test süreci

sonunda, yalıtkan malzemenin 20 saniye boyunca dayanabildiği en son gerilim seviyesi, delinme dayanımı olarak kabul edilmektedir.

Tablo 3.11 Gerilim adımları arasındaki yükselme miktarları [60]

Başlangıç Gerilimi [kV]	**Yükselme Miktarı [kV]**
1 kV veya Daha Azı	Başlangıç Geriliminin %10'u
1-2	0.1
2-5	0.2
5-10	0.5
10-20	1
20-50	2
50-100	5
100-200	10
200 Üzeri	20

- **Düşük Artış Hızlarının Kullanıldığı Yöntem**

IEC 60243-1'in ilgili bölümünde "Slow rate-of-rise test "olarak adlandırılan bu yöntemde yöntemde, deney numunesine uygulanan gerilim, tahmini delinme geriliminin %40'ından başlayarak delinme meydana gelene kadar düzgün şekilde yükseltilmektedir. Bu yöntemde, delinmenin 120-240 s aralığında meydana gelmesi beklenmektedir. Gerilim yükselme hızları yukarıda belirtilen süre aralığını sağlayacak şekilde; 2 V/s, 5 V/s, 10 V/s, 20 V/s, 50 V/s, 100 V/s, 200 V/s, 500 V/s, 1 000 V/s hızları arasından seçilmelidir. Eğer, başka bir yükselme hızının beklenen süre aralığını sağlayacağı düşünülüyorsa, ilgili gerilim yükselme hızı da kullanılabilmektedir.

- **60 Saniye Adımlı Yöntem**

Uygulama açısından "20 Saniye Adımlı Yöntem" ile aynıdır ve standartta "60 s step-by-step test" başlığında anlatılır. Ancak, gerilim adımlarının süresi 20 saniye yerine 60 saniye olarak ayarlanmalıdır.

- **Aşırı Düşük Artış Hızlarının Kullanıldığı Yöntem**

Bu yöntemde, delinmenin 300-600 s aralığında gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu yüzden, daha düşük yükselme hızları olan, 1 V/s, 2 V/s, 5 V/s, 10 V/s, 20 V/s, 50 V/s, 100 V/s ve 200 V/s gibi hızlar tercih edilmeli ve gerilim 0 değerinden kademeli olarak delinme gerçekleşene kadar uygulanmalıdır. IEC 60243-1 standardında, "Very slow rate-of-rise test" başlığı altında açıklanmaktadır.

3.5.1.2 Darbe Gerilimleri ile Delinme Dayanımının Tespiti

Güç sistemlerinde kullanılan katı yalıtkan malzemeler, çalışma süreleri boyunca darbe gerilimlerine maruz kalabilmektedirler. Bu sebeple, katı yalıtkan malzemelerin darbe gerilimleri altındaki dayanımı önem arz etmekte olup araştırılması gereken bir konudur. Bu amaçla, yalıtkan malzemelerin darbe gerilimleri altındaki dielektrik kayıplarını belirlemek adına farklı yöntemler önerilmiştir.

Bunlar:

IEC 60060-1 [61]

- Yukarı – Aşağı Yöntemi (Up-and-Down Method)
- Çoklu Seviye Yöntemi (Multiple-Level Method)

IEC 60243-3 [60]

- IEC 60243-3 Yöntemi

olarak sıralanmaktadır.

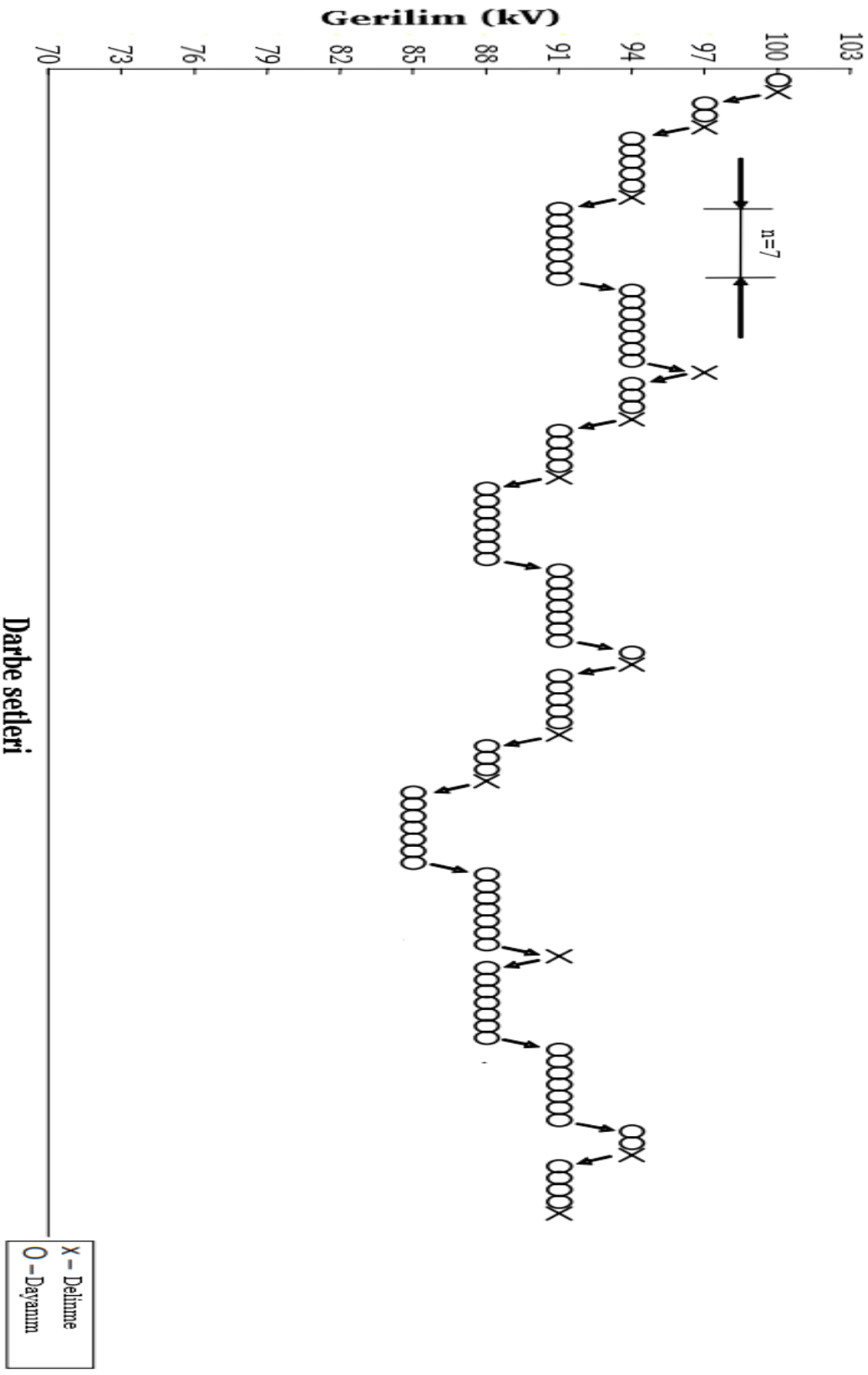
- **Yukarı-Aşağı Yöntemi**

Yukarı aşağı yöntemi, test numunesini farklı olasılıklarda delebilecek darbe gerilim seviyelerinin tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yalıtkan malzemeye, eşit genlikli darbelerden oluşan gerilim setleri uygulanmakta ve bunun sonucunda malzemede delinme gerçekleşip gerçekleşmemesinden hareketle, uygulanan gerilim bir sonraki adımda arttırılmakta ya da azaltılmaktadır. Yükselen ve alçalan olmak üzere iki farklı uygulama türü mevcuttur. Yükselen Yukarı Aşağı Yöntemi'nde, test numunesine uygulanan darbe

seti sonunda numunede delinme meydana gelmezse, bir sonraki darbe setine geçilmekte ve genlik değeri belirlenen miktarda arttırılmaktadır. Eğer, darbe setlerinin uygulanması sırasında delinme gözlenirse, genlik değeri aynı miktarda azaltılmaktadır. Alçalan Yukarı Aşağı Yöntemi'nde ise yukarıda bahsedilen uygulamanın tam tersi gerçekleştirilmektedir. Her iki yöntem için de işlem tekrarlı olarak devam ettirilerek en sonunda, malzemeye bir kereden fazla uygulanan gerilimlerin ağırlıklı ortalaması alınmaktadır. Darbe setlerinde uygulanacak maksimum darbe sayısı, istenilen yüzdesel olasılık değerine göre değişim göstermektedir. Örneğin, darbe setleri maksimum 7 darbe uygulanacak şekilde oluşturulursa, Alçalan Yukarı Aşağı Yöntemi ile IEC tarafından "darbe dayanım gerilimi" olarak belirlenen, $U_{\%10}$ (%10 ihtimal ile numuneyi delecek gerilim) bulunmaktadır. Yükselen Yukarı Aşağı Yöntemi kullanılarak ise malzeme için "yıkıcı gerilim seviyesi" olarak tanımlanan $U_{\%90}$ (%90 ihtimal ile numuneyi delecek gerilim) değeri bulunmaktadır. Diğer yandan, setler birer darbeden oluşturulursa, yukarıda bahsedilen iki yöntemle de $U_{\%50}$ (%50 ihtimal ile numuneyi delecek gerilim) değeri elde edilmektedir.

Şekil 3.10'da, örnek olarak, Alçalan Yukarı-Aşağı Yöntemi uygulaması gösterilmiştir. Burada, gerilim seviyelerinin kaç kere uygulandıklarına göre ağırlıklı ortalaması alınmakta (birden fazla olanlar) ve $U_{\%10}$ değeri bulunmaktadır. Buna göre, ilgili hesaplama aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

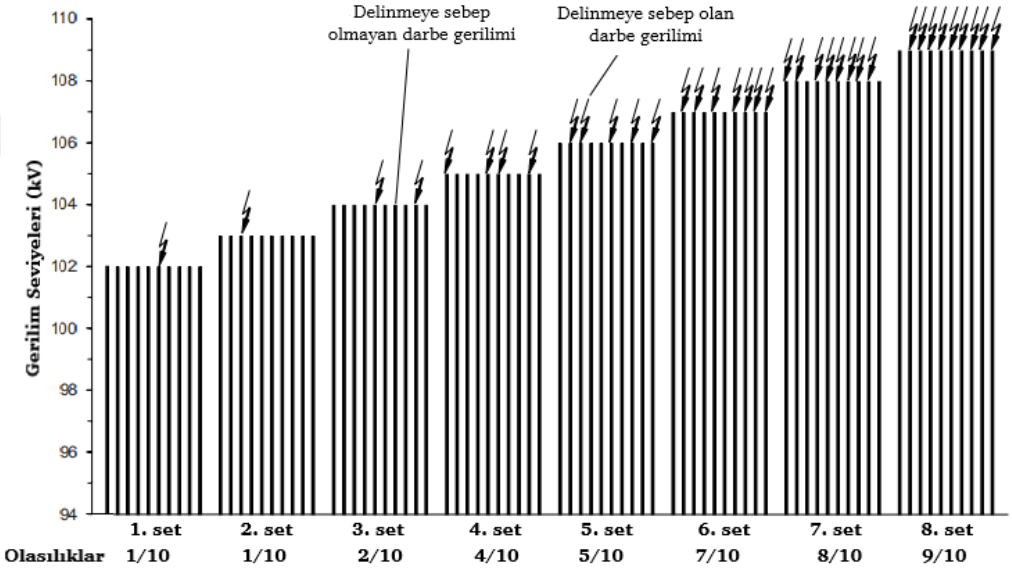
$$U_{\%10} = \frac{(2 \times 97) + (5 \times 94) + (7 \times 91) + (4 \times 88)}{18} = 91.8\ kV \qquad (3.10)$$



Şekil 3.10 Yukarı-aşağı yöntemi örnek uygulama gösterimi

- **Çoklu Seviye Yöntemi**

IEC 60060 tarafından önerilen bir diğer yöntem olan Çoklu Seviye Yöntemi'nde; eşit genlikli ve en az 10 darbe geriliminden oluşmakta olan darbe setleri (En az 5 set) yalıtkan malzemeye uygulanmakta ve her set için malzemenin delinmesine yol açan darbe sayısının toplam darbe sayısına oranı bulunmaktadır. Böylelikle, yalıtkan malzemeyi farklı olasılıklarda delecek darbe gerilim değerleri bulunabilmektedir. Örnek bir uygulama Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Çoklu seviye yöntemi ile örnek uygulama gösterimi

Ayrıca, ilgili gerilim-olasılık verileri ile bu verilere en uygun eğri çizilerek, farklı delinme olasılıklarına sahip gerilim değerleri bulunabilmektedir [59].

- **IEC 60243-3 Yöntemi**

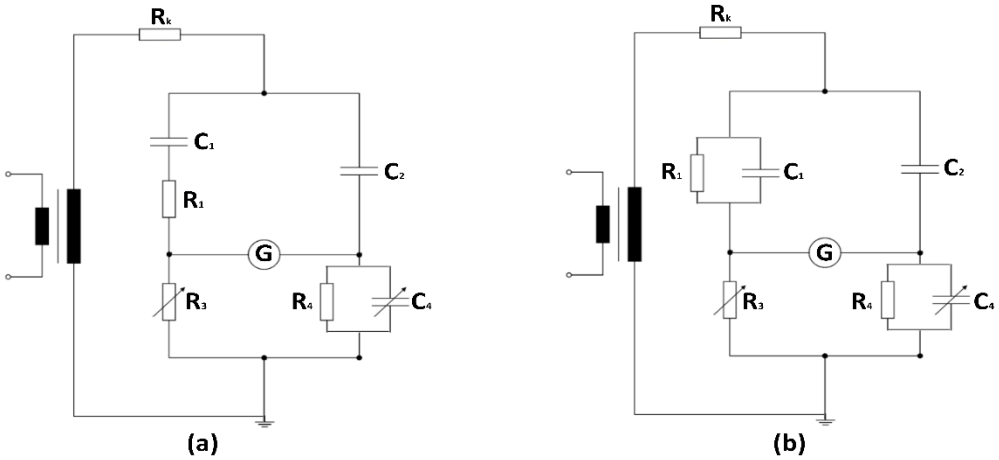
Katı yalıtkanların delinme dayanımlarının darbe gerilimi ile tespiti için IEC 60243-3'te [62] aşağıdaki yöntem tavsiye edilmiştir.

Yalıtkan malzemeye test gerilimi, eşit genliğe sahip 3 darbeden oluşan setler halinde uygulanmalıdır. Eğer, numune 3 darbeye de dayanım gösterirse bir sonraki 3 darbelik sete geçilmeli ve darbe gerilimlerinin genlik değeri %5-%10 aralığındaki bir oranda arttırılmalıdır. Uygulanan ilk setin genlik değeri tahmini delinme geriliminin %70'i civarında olmalıdır. Delinme geriliminin başarı ile

ölçülme kriteri, test süresince yalıtkan malzemenin en az iki adet darbe setine dayanım göstermesidir. Uygulanacak olan başlangıç darbe gerilim setinin genliği, bu kriter göz önünde bulundurularak seçilmelidir.

3.5.2 Dielektrik Kayıp Faktörü Ölçümü

Yalıtkan malzemelerde ısı olarak ortaya çıkan dielektrik kayıplar, tanδ ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, tan δ, yalıtım kalitesinin yansıtılması için önemli bir değerdir. Tanδ 'nın uygulanan gerilim ile değişimi, yalıtımın kalitesi ve yalıtımda bir kusur olup olmadığı hakkında bilgi sahibi olmak için kritik bir parametredir. Katı yalıtkan malzemelerin tanδ değeri; sıcaklık, mekanik zorlanma, kimyasal reaksiyonlar, su emilimi ve yüzey bozulmaları gibi nedenlerden kaynaklı olarak zamanla değişmektedir. Bu yüzden, dielektrik kayıp faktörünün periyodik olarak ölçümü, yalıtkan malzemelerin durumunu takip etmek için önemlidir. Kapasite ve tanδ ölçümleri, test numunesi ve standart bir kapasitenin oluşturduğu sabit iki kol ve ayarlanabilir iki koldan oluşan köprü düzenekleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.12'de gösterilen Schering Köprüsü, tanδ ölçümünde en çok kullanılan köprü düzeneğidir [47]. Schering Köprüsü, test numunesinin kapasite değerini ve dielektrik kayıp faktörünü, geniş frekans aralığında ihmal edilebilecek kadar düşük kayba sahip olan bir standart kapasitör (C_2) ile karşılaştırarak ölçer [59].



Şekil 3.12 Schering köprüsü (a) seri (b) paralel modelleme

Burada,

C_1 ve R_1, test numunesini temsil etmektedir,

C_2, referans kapasite,

C_4-R_4 ve R_3 ise denge koşulunu sağlayan ayarlanabilir kollardır.

Deney numunesinin dielektrik kayıp faktörü, yalıtkanın seri modellenmesi için (3.11) ifadesinde gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$\tan \delta = \omega \times C_1 \times R_1 \tag{3.11}$$

Denge koşulunda aşağıdaki ifadede gösterilen eşitlik geçerlidir.

$$Z_1 \times Z_4 = Z_2 \times Z_3 \tag{3.12}$$

Kollara ait empedanslar sırasıyla (3.13)-(3.16) ifadelerinde gösterildiği gibidir.

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \tag{3.13}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2} \tag{3.14}$$

$$Z_3 = R_3 \tag{3.15}$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \tag{3.16}$$

(3.13)-(3.16) eşitlikleri, (3.12) ifadesinde yerlerine koyulup ortaya çıkan denklemlerde imajiner ve reel kısımlar eşitlendiğinde, deney numunesine ait kapasite ve direnç değeri, ayarlanabilir kollara ait elemanlar cinsinden aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$C_1 = \frac{R_4}{R_3} C_2 \tag{3.17}$$

$$R_1 = \frac{C_4}{C_2} R_3 \tag{3.18}$$

Elde edilen C_1 ve R_1 eşitlikleri (3.10) ifadesine yerleştirilirse, dielektrik kayıp faktörü 4. kola ait elemanlar cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\tan\delta = \omega \times C_4 \times R_4 \tag{3.19}$$

Yalıtkan malzemenin paralel modellendiği durumda, tanδ (3.20) eşitliğinde gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega \times C_1 \times R_1} \tag{3.20}$$

Yalıtkan haricindeki diğer 3 kolda bir değişiklik olmadığından ilgili empedans eşitlikleri geçerliliğini sürdürmektedir. Yalıtkan malzemeyi temsil eden kolun empedansı ise (3.21) ifadesinde gösterildiği şekilde değişir.

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1} \tag{3.21}$$

(3.12) ifadesindeki denge ifadesinde, empedans eşitlikleri yerine yerleştirilip imajiner ve reel kısımlar eşitlendiğinde yalıtkana ait kapasite ve direnç değerleri (3.22)-(3.23) ifadelerindeki gibi elde edilmektedir.

$$C_1 = \frac{R_4 C_2}{R_3 + R_3 \omega^2 {R_4}^2 {C_4}^2} \tag{3.22}$$

$$R_1 = \frac{1}{\omega^2 C_1 R_4 C_4} \tag{3.23}$$

(3.23) ifadesi (3.20) eşitliğinde yerine yerleştirildiğinde tanδ ifadesi 4. kola ait elemanlar cinsinden aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

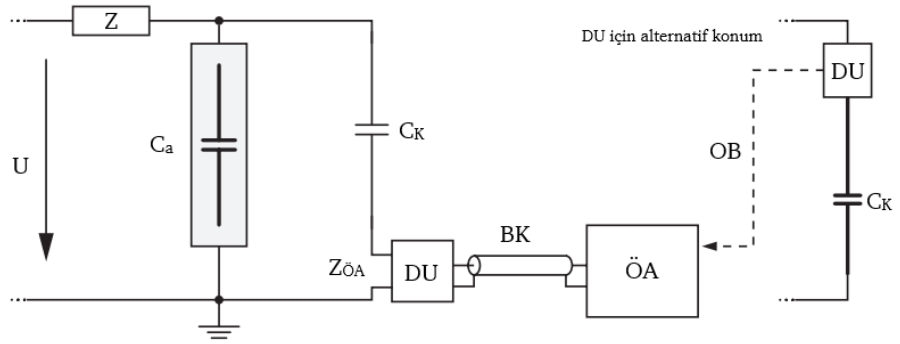
$$\tan\delta = \omega \times C_4 \times R_4 \tag{3.24}$$

3.5.3 Kısmi Deşarj Ölçümü

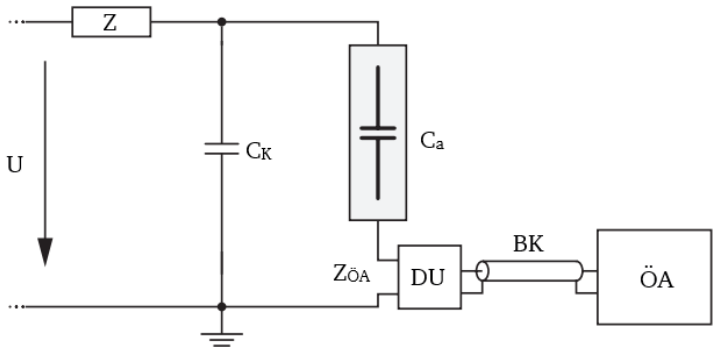
Yalıtkan malzemelerde kısmi deşarjın oluşumu sırasında; ısı, ışık, ses yayılımı, elektromanyetik girişim (EMG) ve çeşitli kimyasal olaylar gözlenmektedir. Ortaya çıkan bu yan ürünlerin gözlemine ve analizine dayanan ölçüm yöntemleri, dolaylı kısmi deşarj ölçüm yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Dolaylı ölçüm yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır [49]:

- EMG Algılama (EMG aktivitesi)
- Akustik Ölçüm (Ses oluşumu)
- Optik Ölçüm (Işık oluşumu)
- Gaz Analizi (Kimyasal reaksiyonlar sonucu gaz oluşumu)

Yukarıda bahsedilen ölçümlerin yanında, en sık kullanılan ve en başarılı sonuçlar veren tespit yöntemleri, ilgili IEC standardında [58] da bahsedilen elektriksel yöntemlerdir (doğrudan ölçüm). Bu yöntemler, kısmi deşarj darbe akımları üzerinden gerekli ölçümleri gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır [59]. Kısmi deşarjları doğrudan ölçmek için kullanılan temel devre şemaları, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Dört uçlu ve kuplaj kondansatörünün seri bağlı olduğu düzenek [58]



Şekil 3.14 Dört uçlu ve deney numunesinin seri bağlı olduğu düzenek [58]

Bu devrelerdeki elemanlar, ilgili IEC standardına [58] göre,

U: Yüksek gerilim beslemesi,

Z: Filtre,

C_a: Deney numunesi,

BK: Bağlantı kablosu,

C_k: Kuplaj kondansatörü,

OB: Optik bağlantı,

DU: Ölçü dört uçlusu - Kuplaj düzeneği,

$Z_{ÖA}$: Ölçü sisteminin giriş empedansı,

ÖA: Ölçü aleti,

olarak tanımlanmıştır.

Bu devrelerde, $Z_{ÖA}$ empedansı ile ölçü dört uçlusu/kuplaj düzeneği ölçü aletinin giriş ucunu oluşturmaktadır. Giriş empedansı ve dört uçlunun oluşturduğu düzenekte, kısmi deşarj darbeleri sonucu meydana gelen akımlar, gerilim işaretlerine dönüştürülerek ölçü aletine iletilmekte ve ölçüm gerçekleştirilmektedir.

Şekil 3.13'de gösterilen bağlantı şekli, bir ucu topraklı ekipmanların kısmi deşarj ölçümleri için uygun olduğundan dolayı avantajlıdır. Bu düzenekte, test numunesinin bağlantısı direkt olarak kaynak ile toprak arasına yapılmaktadır. Şekil 3.14'teki düzenekte ise dört uçlu, test numunesinin toprak ucuna

bağlandığından dolayı, test numunesinin alçak gerilim tarafı topraktan izole edilmelidir. Her iki düzenekte de, dört uçlu alternatif olarak yüksek gerilim tarafına konumlandırılabilmektedir. Bu durumda, dört uçlunun ölçü aleti ile bağlantısı optik bağlantılar vasıtasıyla yapılmalıdır [58].

Kısmi deşarj başlangıç ve sönüm gerilimlerinin belirlenmesinde ve kısmi deşarj ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde birtakım prosedürler takip edilmektedir. Bu prosedürler, AC gerilimler için ilgili IEC standardında [58] aşağıda anlatıldığı şekilde tarif edilmektedir.

3.5.3.1 Kısmi Deşarj Başlangıç ve Sönüm Gerilimlerinin Belirlenmesi

Test numunesine uygulan gerilim, belirlenen eşik deşarj değeri geçilene kadar kademeli şekilde arttırılmaktadır. Belirlenmiş olan eşik değere ulaşıldığı anda görülen gerilim değeri, kısmi deşarj başlangıç gerilimidir (KDBG). KDBG, gerilim yükselme hızına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Test gerilimi, KDBG tespit edildikten sonra test gerilimine yükseltilir. Ardından, kademeli şekilde, deşarj değeri eşik değerin altına düşene kadar azaltılmaya başlanır. Deşarj seviyesinin tekrardan eşik değerin altına düştüğü gerilim değeri, kısmi deşarj sönüm gerilimi (KDSG) olarak adlandırılmaktadır. KDSG, gerilimin azalma hızına, öncesinde uygulanmakta olan gerilimin genliğine ve uygulanma süresine bağlı olarak değişim göstermektedir.

3.5.3.2 Kısmi Deşarj Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

Yalıtkan malzemelerin kısmi deşarj ölçümü, ön zorlanmalı ve ön zorlanmasız olmak üzere iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir.

- **Ön Zorlanmasız Ölçüm**

Kısmi deşarj ölçümleri, KDBG üzerinde belirlenmiş olan bir gerilim değerinde gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde, test gerilimi, belirlenmiş olan kısmi deşarj ölçüm gerilimine yükseltilmekte ve o değerde ölçüm süresi boyunca beklenilmektedir. Bu süre boyunca, ilgili kısmi deşarj büyüklükleri kaydedilmektedir.

- **Ön Zorlanmalı Ölçüm**

Test gerilimi, ölçümün alınacağı gerilim seviyesinden üst bir seviyeye yükseltilmekte ve bu gerilim seviyesinde bir süre beklenilmektedir. Ardından, gerilim seviyesi, belirlenmiş olan test gerilimine düşürülerek kısmi deşarj ölçümleri alınmaktadır.

4
DENEYSEL UYGULAMA

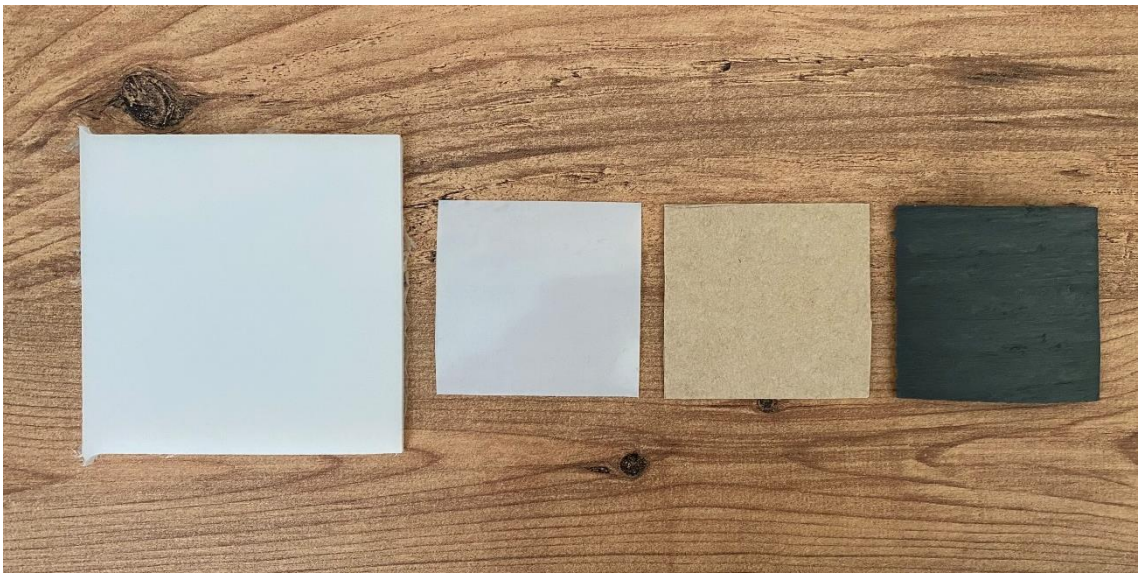
Katı yalıtkan malzemeler, kullanım süreleri boyunca çeşitli faktörler (elektriksel, ısıl, kimyasal, mekanik… vb.) tarafından zorlanmaktadırlar. Bu zorlayıcı faktörler, malzemenin dayanım sınırlarını aşarsa, katı yalıtkanlar özelinde genellikle geri dönüşü olmayan zararlara sebep olmaktadırlar. Bu sebeple, katı yalıtkan malzemelerin çeşitli zorlayıcı faktörlere karşı gösterdiği performansın, deneysel çalışmalar ile araştırılması ve analiz edilmesi gereklidir.

Bu tez çalışmasında, katı yalıtkan malzemelerin farklı çalışma koşullarında performans analizlerinin gerçekleştirilmesi için Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda 4 çeşit yalıtkan malzeme üzerinde delinme dayanımı, dielektrik kayıp ve kısmi deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler kapsamında, aşağıda belirtilen başlıklar altında incelemeler yapılmıştır:

1. Gerilim yükselme hızı ve elektrot geometrisinin delinme dayanımına etkisi
2. Isıl yaşlandırmanın dielektrik parametreler üzerine etkisi
    - Malzemelerin alternatif gerilimler altındaki delinme dayanımı
    - Malzemelerin darbe gerilimleri altındaki delinme dayanımı
    - Malzemelerin dielektrik kaybı
    - Malzemelerin kısmi deşarj performansı

4.1 Deneylerde Kullanılan Katı Yalıtkan Malzemeler

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, selüloz bazlı organik yalıtkanlar sınıfından prespan, elastomer sınıfından stiren-butadien/doğal kauçuk karışımı (SBR/NR), termoplastik polyesterler sınıfından polietilen tereftalat (PET) ve termoplastik bir yalıtkan olan yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kullanılmıştır. Şekil 4.1'de kullanılan numunelere ait örnek gösterim sunulmuştur.



Şekil 4.1 Deneylerde kullanılan yalıtkan malzemeler (YYPE-PET-prespan-SBR/NR)

Polietilen, kablo yalıtımının temel malzemelerinden biridir. PET, alçak gerilim motor statorlarında sargı oluğunda, transformatörlerde ve yüksek gerilim ekipmanlarında da kat arası izolasyonu olarak kullanılmaktadır. Selüloz bazlı bir yalıtkan olan prespan, transformatör yalıtımının en temel öğelerinden biri olup yağlı tip dağıtım transformatörlerinde sargı arası yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Test edilecek bir diğer malzeme olan SBR/NR ise kablo yalıtımı ve yalıtkan zemin kaplaması gibi alanlarda çok amaçlı kullanılmaktadır. İlgili malzemelerin, yapısal özellikleri detaylı olarak Bölüm 3.1'de anlatılmıştır.

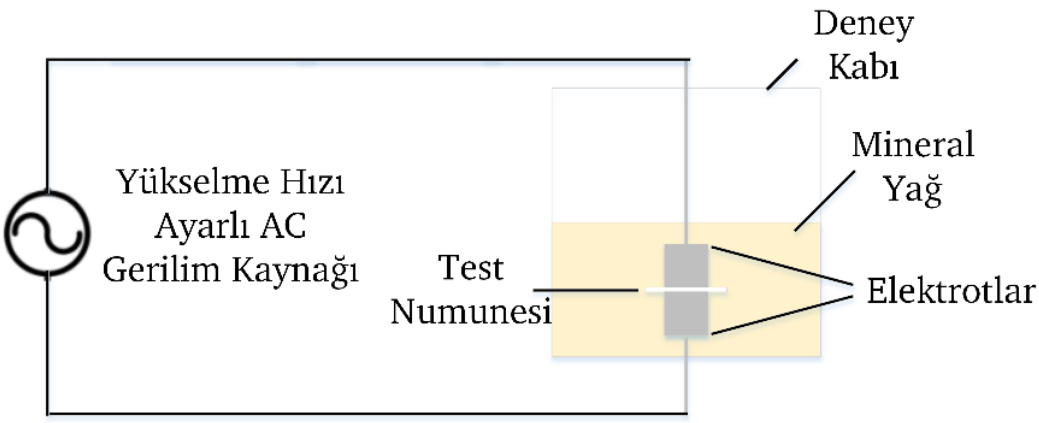
Numunelerin kalınlıkları sırasıyla; YYPE için 4 mm, SBR/NR için 2.5 mm, prespan için 0.4 mm ve son olarak PET için 0.3 mm'dir. Yalıtkan malzemelerin yüzey alanları, yapılan ön çalışmalar ile yüzeysel atlamaları engelleyecek şekilde belirlenmiştir. YYPE 100x100 mm^2 boyutlarında, diğer yalıtkanlar ise 60x60 mm^2 olacak şekilde hazırlanmıştır. Prespan, deneylerde kullanılmadan önce yapısındaki nemden arınması için 1 gün boyunca 120 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Ardından, 48 saat boyunca mineral yağ emdirilmiştir. Diğer numuneler ise oda koşullarında dinlendirilmiştir.

4.2 Elektrot Tipi ve Gerilim Yükselme Hızının Delinme Olayına Etkisi

Katı yalıtkan malzemelere uygulanan gerilimin cinsi, frekansı, yükselme hızı, elektrot yapısı, malzeme cinsi ve kalınlığı, malzemenin delinme dayanımını etkileyen başlıca faktörlerdir. Pratikte, katı yalıtkan malzemeler, farklı elektrik alan tipleri tarafından zorlanmakta ve şebekedeki geçici olaylardan dolayı farklı artış hızlarındaki gerilimlere maruz kalmaktadırlar. Tez çalışmasının bu bölümünde, iki farklı gerilim yükselme hızına sahip test gerilimleri, üç farklı elektrot yapısı aracılığıyla deney numunelerine uygulanarak delinme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

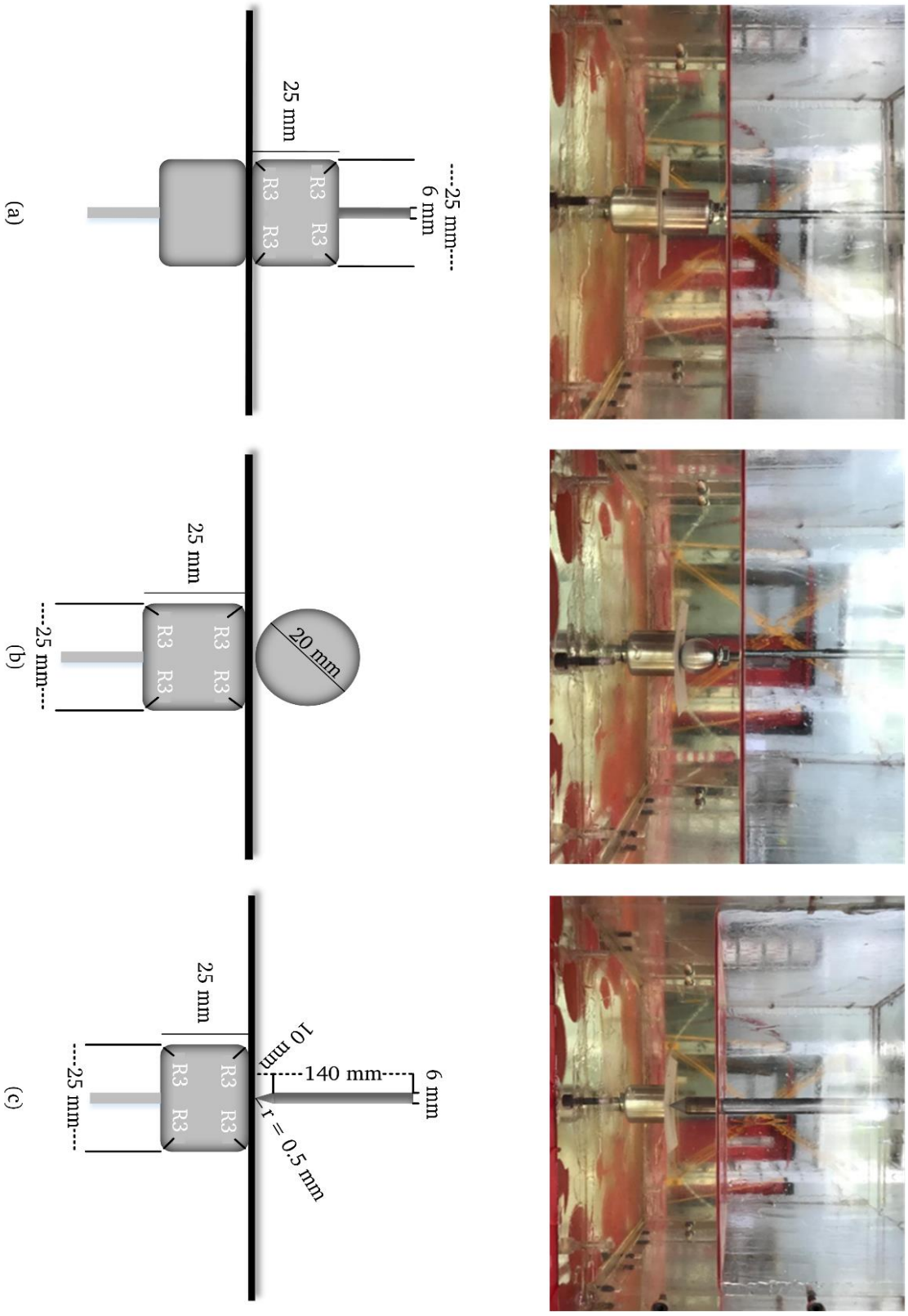
4.2.1 Deney Düzeneği ve Prosedürü

Delinme deneyleri 200x200x200 mm^3 boyutlarındaki polimetil metakrilat (pleksi) deney kabı içinde gerçekleştirilmiştir. Yalıtkan malzemelere gerilim uygulanmasında, 90 kV kapasiteli, 500 V/s, 2000 V/s ve 3000 V/s yükselme hızlarına sahip AC gerilim kaynağı kullanılmıştır. Elektrotlar ve test numunesi, yüzey deşarjlarının önlenmesi için, deney kabı içinde Nytro Lyra X mineral yağına batırılmıştır. Farklı elektrik alan yapılarının katı yalıtkan malzemelerin delinme dayanımına etkisini gözlemek için silindir-silindir, küre-silindir ve sivri uç-silindir alüminyum elektrot düzenekleri kullanılmıştır. Gerilim yükselme hızının delinme olayına etkisini incelemek için ise 500 V/s ve 3000 V/s hızlarına sahip gerilimler, bahsedilen elektrot sistemleri vasıtasıyla numunelere uygulanmıştır. İlgili bağlantı şeması Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Test elektrotları içindeki silindir-silindir elektrot düzeneği, IEC 60243-1 [60] standardında bahsedilen köşeleri 3 mm yarıçapında yuvarlatılmış, 25 mm çap ve 25 mm yüksekliğe sahip eş silindir elektrotlardan oluşan sistemdir. Diğer elektrotlar, standart dışı olup farklı elektrik alanlar altında delinme olayını gözlemlemek amacıyla kullanılmıştır. İlgili deney düzenekleri ve ölçüleri, Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Delinme deneylerine ait genel bağlantı şeması

Deneyler sırasında, Bölüm 3.5.1.1'de anlatılan, IEC:60243-1'e ait "Yüksek Artış Hızlı Gerilimlerin Kullanıldığı Yöntem" takip edilmiştir. Delinme dayanımı deneylerinde elde edilen sonuçların istatistiki değerlendirmesinin yapılabilmesi adına, her senaryo için en az 10 adet delinme gerilimi değerinin elde edilmesi önerildiğinden dolayı, uygulanan her kombinasyon için, yalıtkan malzemelerden 10'ar adet numune test edilmiştir [63]. Numunelerin yüzeyleri, test edilmeden önce etil alkol ile temizlenmiştir.



Şekil 4.3 Elektrotlar ve ölçüleri (a) silindir – silindir (b) küre – silindir (c) sivri uç - silindir

4.2.2 Deney Sonuçları ve Sonuçların Analizi

Delinme deneyleri öncesinde gerçekleştirilen ön çalışma neticesinde, tüm yalıtkan malzemelere 500 V/s, 2000 V/s ve 3000 V/s yükselme hızlarına sahip gerilimler uygulanmıştır. Gerilim kaynağının kapasitesi, YYPE malzemenin delinmesi için yeterli olmamıştır. Ayrıca, diğer malzemeler için elde edilen, 2000 V/s ve 3000 V/s hızlarına ait delinme gerilimi sonuçlarının birbirlerine çok yakın değerler taşıdığı belirlenmiştir. Bu nedenle, gerçekleştirilen çalışmada 500 V/s ve 3000 V/s gerilim yükselme hızları kullanılmıştır.

Ön çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde, delinme deneyleri, SBR/NR, PET ve prespan yalıtkanlar üzerinde, 3 farklı elektrot düzeneği ve 2 farklı gerilim yükselme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yalıtkan malzemelerin 10'ar numunesi için, farklı elektrot tiplerinde ve yükselme hızlarında elde edilen delinme gerilimi sonuçları, kV cinsinden, küçükten büyüğe doğru sıralanarak Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Tablo 4.1'deki sonuçlar kullanılarak malzemelerin delinme gerilimlerinin Weibull parametreleri elde edilmiş ve gerekli analizler, Tablo 4.2'de gösterilen ilgili Weibull parametreleri üzerinden yapılmıştır.

Tablo 4.1 Delinme deneyi sonuçları

	PET - Delinme Gerilimleri [kV]					
	Silindir - Silindir		**Küre - Silindir**		**Sivri Uç - Silindir**	
i	500 V/s	3000 V/s	500 V/s	3000 V/s	500 V/s	3000 V/s
1	20.4	23.6	20.2	27	20	23.4
2	21	23.8	21	27.4	20.1	24.4
3	21.4	23.8	21.5	27.4	21	24.9
4	21.9	24	22	27.6	21.3	25
5	22	24.4	22.2	28.2	22.4	25.5
6	22.2	24.9	22.5	28.4	22.8	26.3
7	22.3	25	23	28.8	23.7	26.3
8	22.6	25.4	23.2	28.9	23.9	26.8
9	23.8	25.5	23.4	30.1	24.2	27.6
10	23.8	26.3	24.8	30.3	24.5	28.2

Tablo 4.1 Delinme deneyi sonuçları (devamı)

	Prespan - Delinme Gerilimleri [kV]					
	Silindir - Silindir		**Küre - Silindir**		**Sivri Uç - Silindir**	
i	500 V/s	3000 V/s	500 V/s	3000 V/s	500 V/s	3000 V/s
1	22.2	27.5	23.7	25.4	25.6	29.8
2	22.40	27.8	24	28.3	25.7	30.1
3	23	28	24.1	31	26	30.3
4	23.6	28.5	24.2	31.3	26.3	30.7
5	23.80	29.2	24.7	31.6	26.6	31.2
6	24.20	29.3	26	32	27.6	31.7
7	25.1	30.1	26.1	32.4	28.1	32
8	25.30	30.2	26.7	32.9	28.6	33.3
9	25.50	31	27.5	33.4	28.7	34
10	25.70	31.7	27.9	33.5	29.8	34.2
	SBR/NR - Delinme Gerilimleri [kV]					
	Silindir - Silindir		**Küre - Silindir**		**Sivri Uç - Silindir**	
i	500 V/s	3000 V/s	500 V/s	3000 V/s	500 V/s	3000 V/s
1	45	50.9	46	53	39.4	49.7
2	46.4	52.6	48,4	56	45.6	49.8
3	47	55	50,3	57.5	46	50.6
4	47.5	55.5	51,7	58	46.5	51.2
5	49	57.6	52,1	58.1	48.3	52.4
6	50	59	52,2	60	48.4	53.2
7	52.6	59.5	52,6	60.2	49.5	54.3
8	53.4	60.5	54,6	60.8	49.5	55.8
9	54	61.5	55,7	62.2	50.5	56
10	57.6	62.9	57,5	62.8	51.6	56.3

Üç yalıtkan malzeme için elde edilen delinme gerilimi değerlerinin istatistiki değerlendirilmesi, IEC-62539'da [63] önerildiği gibi, Weibull Dağılımı ile gerçekleştirilmiştir. Weibull Parametreleri White Yöntemi [64] ile belirlenmiştir. Silindir – silindir (I), küre – silindir (II) ve sivri uç – silindir (III) elektrot düzenekleri için elde edilen Weibull parametreleri Tablo 4.2'de paylaşılmıştır.

Tablo 4.2 Weibull parametreleri

PET		**I**		**II**		**III**	
Hız	**i**	**α**	**β**	**α**	**β**	**α**	**B**
500 V/s	10	22.6	21.5	23.0	18.38	23.2	14.2
3000 V/s	10	27.1	25.1	28.9	24.57	26.5	18.3
Prespan		**I**		**II**		**III**	
Hız	**i**	**α**	**β**	**α**	**β**	**α**	**B**
500 V/s	10	24,7	19,99	26.2	16.13	28,0	18,44
3000 V/s	10	30,0	20,75	32.3	18.36	32,5	19,11
SBR/NR		**I**		**II**		**III**	
Hız	**i**	**α**	**β**	**α**	**β**	**α**	**B**
500 V/s	10	52	12.48	53.6	17.20	49.1	18.7
3000 V/s	10	59.4	16.33	60.2	22.99	54.2	20.8

Weibull birikimli olasılık fonksiyonu ifadesi (4.1) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$F(V) = 1 - e^{(-\frac{V}{\alpha})^{\beta}} \tag{4.1}$$

Burada,

V, olasılık hesabı yapılacak delinme gerilimini [kV],

α, F=%63.2 eşitliğini sağlayan ölçek parametresini [kV],

β, Weibull eğrisinin eğimi olan şekil parametresini

ifade etmektedir.

Bu ifadelerdeki, α parametresi, Weibull ölçek parametresidir. Yalıtkan malzemelerin ilgili elektrot düzeneği ve gerilim yükselme hızından elde edilmiş veri setine ait karakteristik delinme gerilimini temsil etmektedir. β ise şekil parametresi olup, deney verileri ile elde edilen regresyon eğrisinin eğimidir. Delinme gerilimi değerlerinin alacağı değer aralığının genişliğini ifade eder.

Elektrot geometrisi ve gerilim yükselme hızının yalıtkan malzemelerin delinmesine olan etkisi, bu parametrelerden hareketle delinme gerilimi (kV) ve delinme dayanımı (kV/mm) olmak üzere iki başlık altında değerlendirilmiştir.

4.2.2.1 Gerilim Yükselme Hızının Delinme Olayına Etkisi

Gerilim yükselme hızının delinme olayına etkisi, delinme gerilimi (kV) ve delinme dayanımı (kV/mm) olmak üzere iki farklı başlıkta tüm elektrot düzeneklerini kullanılarak elde edilen karakteristik delinme gerilimleri üzerinden incelenmiştir.

- **Gerilim Yükselme Hızının Delinme Gerilimine (kV) Etkisi**

Yalıtkan malzemelere, 3000 V/s artış hızında gerilim uygulandığında, üç yalıtkanın da delinme gerilimlerinde 500 V/s'deki delinme gerilimlerine göre artış meydana gelmiştir. Tablo 4.2'de görüldüğü üzere, tüm yalıtkan malzemelerde ve tüm elektrot düzeneklerinde gerilim artış hızının yükseltilmesi sonucu, Weibull Karakteristik Delinme Gerilimi artış göstermiştir. Bunun yanında, şekil parametrelerinde de artış eğilimi görülmüştür. Bu durum, yalıtkan malzemelerin delinme gerilimlerinin daha kısa bir aralıkta değer aldığını göstermektedir.

IEC tarafından, delinme dayanımı ölçümleri için önerilen eş silindir elektrot düzeneğinin sonuçları incelendiğinde, gerilim artış hızı 3000 V/s'ye çıkartıldığında, karakteristik delinme gerilimindeki artış oranının PET malzeme için %20, prespan için %21,5, SBR/NR için ise %14 olduğu görülmektedir.

Yalıtkan malzemeler gerilim altındayken, elektrik alanın ve gerilim uygulanma süresinin birikimli etkisine maruz kalmaktadırlar [11]. Bu yüzden, gerilim artış hızlarının yüksek olduğu durumda, gerilim kademelerinin malzemeye etki edeceği süre daha az olacağından, delinme olayı daha yüksek gerilim seviyelerinde meydana gelmiştir.

- **Gerilim Yükselme Hızının Delinme Dayanımına (kV/mm) Etkisi**

Silindir-Silindir elektrot düzeneğinde görülen düzgün elektrik alanlar altında delinme dayanımı değerini elde etmek için (4.2) ifadesi kullanılmaktadır.

$$E_{av} = \frac{V}{d} \tag{4.2}$$

Kullanılan diğer elektrot düzeneklerinde görülen düzgün olmayan elektrik alanların hesabında, elektrik alanın düzgün olmama katsayısı olan, alan gelişme faktöründen yararlanılmaktadır. Elektrik alan hesaplamalarında, Mason'ın eğrilik yarıçapına sahip elektrotlar için geliştirdiği, düzgün olmayan elektrik alanların hesaplamalarında kullanılan (4.3) ifadesindeki formülden yararlanılmıştır [1].

$$E = 2E_{av} \times d \times \frac{\frac{d^{\frac{1}{2}} \times (d+r)^{\frac{1}{2}}}{(d^2 - z^2) + (d \times r)}}{\ln\left(\frac{2d + r + 2d^{\frac{1}{2}} \times (d+r)^{\frac{1}{2}}}{r}\right)} = f \times E_{av} \qquad (4.3)$$

(4.2) ve (4.3) eşitliklerdinde,

V, uygulanan gerilim [kV]

r, elektrot eğrilik yarıçapı [mm],

d, elektrotlar arası mesafe – numune kalınlığı [mm],

z, hesap noktasının toprak elektrotuna olan mesafesi [mm],

E_{av}, düzgün elektrik alanlarda görülen ortalama elektrik alan şiddeti

f, alan gelişme faktörü

E(V,d,r,z), uygulanan gerilimin, yalıtkan kalınlığının, elektrot eğrilik yarıçapının ve toprak elektrotuna olan mesafenin fonksiyonu olan elektrik alan değeri,

olarak tanımlanmaktadır. Bu formüller ile yalıtkan malzemelerin Tablo 4.2'de gösterilen karakteristik delinme gerilimleri (KDG) kullanılarak karakteristik delinme dayanımları (KDD) hesaplanmıştır. İlgili sonuçlar Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

Tüm elektrot sistemleri ile elde edilen delinme gerilimlerinden yola çıkarak yapılan hesaplamalarda, gerilim yükselme hızının artırılması, görece daha ince yalıtkanlar olan PET ve prespan malzemenin delinme dayanımına SBR/NR'ye göre daha çok etki etmiştir. (4.4) ifadesinde de görüleceği üzere, yükselme hızının değiştirilmesi sonucu yalıtkan malzemelerin delinme geriliminde aynı miktarda

değişim yaşandığı varsayılırsa, bu değişimin delinme dayanımına olan etkisi yalıtkan kalınlığı inceldikçe daha çok olacaktır.

$$\Delta E_{PET} = \Delta V/0.3 > \Delta E_{Prespan} = \Delta V/0.4 > \Delta E_{SBR/NR} = \Delta V/2.5 \qquad (4.4)$$

Bu ifadede,

ΔV, ortak gerilim değişimi [kV]

ΔE, delinme dayanımı değişimi [kV/mm]

olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.3 Yükselme hızlarına göre KDG ve KDD değerleri

I	**PET**		**Prespan**		**SBR/NR**	
Hız (V/s)	**500**	**3000**	**500**	**3000**	**500**	**3000**
KDG [kV]	22.6	27.1	24.7	30	52	59.4
KDD [kV/mm]	75.3	90.4	61.75	75	20.8	23.76
Fark (kV/mm)	15.1		13.25		2.96	
II	**PET**		**Prespan**		**SBR/NR**	
Hız (V/s)	**500**	**3000**	**500**	**3000**	**500**	**3000**
KDG [kV]	23	28.9	26.2	32.3	53.6	60.2
KDD [kV/mm]	78.1	98.2	67.2	82.8	24.9	28
Fark (kV/mm)	20.1		15.6		3.1	
III	**PET**		**Prespan**		**SBR/NR**	
Hız (V/s)	**500**	**3000**	**500**	**3000**	**500**	**3000**
KDG [kV]	23.2	26.5	28	32.5	49.1	54.2
KDD [kV/mm]	106.3	121.4	104.3	121.1	69.64	76.88
Fark (kV/mm)	15.1		16.8		7.24	

Tablo 4.3'ten de görüleceği üzere, PET ve prespan malzemelerin delinme dayanımlarında yakın miktarda değişimler meydana gelmiştir.

Diğer yandan, gerilim artış hızının yükseltilmesi sonucunda, SBR/NR malzemede delinme gerilimleri diğer malzemeler görece daha çok artmış olmasına rağmen, malzemeler arasındaki kalınlık farkı, gerilim artış hızının delinme dayanımına yaptığı etkide belirleyici unsur olmuş ve tüm elektrot tiplerinde SBR/NR'nin delinme dayanımındaki artış miktarı PET ve prespan malzemeye göre çok daha az olmuştur.

4.2.2.2 Elektrot Geometrisin Delinme Olayına Etkisi

Elektrot geometrisinin delinme olayına etkisi, Tablo 4.2'deki karakteristik delinme gerilimlerinden (ölçek parametresi) yola çıkarak delinme gerilimi (kV) ve delinme dayanımı (kV/mm) olmak üzere iki farklı başlıkta incelenmiştir.

- **Elektrot Geometrisinin Delinme Gerilimine (kV) Etkisi**

Görece daha ince yalıtkanlar olan PET ve prespan malzemeler için karakteristik delinme gerilimleri (KDG) Tablo 4.2'de de görüleceği üzere genellikle $KDG_{\text{Sivri uç – Silindir}} > KDG_{\text{Küre – Silindir}} > KDG_{\text{Silindir-Silindir}}$ şeklinde sıralanmıştır. SBR/NR yalıtkanda ise sivri uç-silindir elektrot düzeneği, diğer iki elektrot sistemine kıyasla, malzemeyi daha düşük gerilim değerlerinde delebilmiştir. Bu durum, (4.3) ifadesindeki, E_{av} harici katsayıların oluşturduğu, yalıtkan kalınlığı ve elektrot eğrilik yarıçapına bağlı değişen "alan gelişme faktörü -field enhancement factor (f)" ve elektrot yüzey alanı ile açıklanmaktadır. Alan gelişim faktörü, aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmaktadır [1].

$$f = 2 \times d \times \frac{\frac{d^{\frac{1}{2}} \times (d+r)^{\frac{1}{2}}}{(d^2 - z^2) + (d \times r)}}{\ln\left(\frac{2d + r + 2d^{\frac{1}{2}} \times (d+r)^{\frac{1}{2}}}{r}\right)} \tag{4.5}$$

Silindir – silindir elektrot düzeneğinde, düzgün elektrik alan görüleceğinden dolayı, bu düzeneğe ait alan gelişme faktörü her durumda 1 değerini almaktadır.

Diğer elektrot düzenekleri (4.5) ifadesindeki formül ile hesaplanan f değerleri Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Elektrot sistemlerinde farklı yalıtkan malzemeler için görülen maksimum alan gelişme faktörü değerleri

Yalıtkan İsmi	Kalınlık	f Silindir-Silindir	f Küre-Silindir	f Sivri uç - Silindir
PET	0.3	1	1.0199	1.3747
Prespan	0.4	1	1.0265	1.4912
SBR/NR	2.5	1	1.1617	3.5463

Alan gelişme faktörü, oluşan elektrik alanın düzgünlükten ne derece uzak olduğunu temsil eden bir katsayıdır. Yüksek gerilim elektrotunun ucu ile toprak elektrotu arasındaki eksende istenilen nokta için hesaplanabilmektedir. Maksimum değeri (enerjili elektrotun uç noktasında) ne kadar yüksek olursa, elektrot ucunda oluşacak olan elektrik alan değeri o kadar yüksek olacaktır.

Yapılan çalışmalarda, aynı tipteki elektrik alanların uygulandığı senaryolarda, enerjili elektrotun yüzey alanı (yalıtkan ile temas yüzeyi) büyüdükçe, test edilen yalıtkan malzemelerin delinme dayanımın düştüğü belirlenmiştir [7], [8]. Küre – silindir düzeneğinin farklı yalıtkanlar için hesaplanan f katsayılarından görüleceği üzere, bu sistemde oluşan elektrik alanlar, neredeyse düzgün bir yapıya sahiptir. Yalıtkan malzeme ile temas yüzeyi ise, eş silindir elektrot sistemine göre daha azdır. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen çalışmalar ile uyumlu olarak, yalıtkan malzemeler, küre-silindir elektrot sistemi ile eş silindir düzeneğe göre daha yüksek gerilimlerde delinmiştir.

Sivri Uç – silindir ölçüm düzeneğinde görülen delinme gerilimleri, eş silindir elektrotlar ve küre-silindir elektrotlarda görülen değerler ile karşılaştırıldığında yalıtkan kalınlığının etkisi net şekilde görülmektedir. PET ve prespan malzemelerin ince yapısı yüzünden, sivri uç elektrota ait maksimum f katsayısı SBR/NR'de görülene göre daha düşük olmaktadır. Aynı zamanda, yalıtkan malzeme ile temas yüzeyi, silindir ve küresel elektrotlara göre çok daha düşüktür. Bu iki malzeme özelinde, sözü edilen temas yüzeyi unsuru baskın geldiğinden

dolayı, PET ve prespan malzemenin sivri uç elektrot ile daha yüksek gerilimlerde delindiği görülmüştür. Daha kalın bir yalıtkan olan SBR/NR'de ise farklı bir durum gözlenmektedir. Et kalınlığı yüksek olan yalıtkanlarda, elektrotlar arası mesafe açıldığından dolayı, sivri uç elektrot için f katsayısı yükselmekte ve elektrot ucunda daha düşük gerilimlerde daha şiddetli elektrik alanlar oluşmaktadır. Bu nedenle, SBR/NR yalıtkan özelinde, sivri uç elektrot kullanıldığı zaman, diğer elektrot düzeneklerine göre daha düşük gerilim değerlerinde daha yüksek elektrik alanlar meydana gelerek malzemenin delinme dayanımına erişilmekte ve malzeme delinmektedir.

- **Elektrot Geometrisinin Delinme Dayanımına (kV/mm) Etkisi**

Elektrot geometrisinin, yalıtkan malzemelerin delinme dayanımına etkisi incelenirken 500 V/s gerilim yükselme hızına sahip test gerilimi ile elde edilmiş sonuçlar baz alınmıştır. Üç malzemenin, üç elektrot düzeneği ile elde edilmiş karakteristik delinme gerilimlerinden yola çıkarak, (4.2) ve (4.3) ifadeleri ile delinme olayının gerçekleştiği elektrik alan değerleri yani, delinme dayanımları elde edilmiştir.

Tablo 4.5 Elektrot geometrilerine göre delinme dayanımları

	PET			**Prespan**			**SBR/NR**		
Düzenek	**I**	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**
KDG [kV]	22.6	23	23.2	24.7	6.2	28	52	53.6	49.1
KDD [kV/mm]	75.3	78.1	106.3	61.75	67.2	104.3	20.8	24.9	69.64
%KDD Farkı$_{I-III}$	%41.1			%69			%234.8		

Tablo 4.5'deki KDD değerleri incelendiğinde, delinmenin meydana geldiği elektrik alan değerlerinin tüm yalıtkanlarda silindir-silindir (I) düzeneğinden sivri-uç silindir(III) düzeneğine doğru arttığı görülmektedir. Yani, yüksek gerilim elektrotunun eğrilik yarı çapı küçüldükçe yalıtkan malzemelerin delinme dayanımı artış göstermiştir. Bir önceki bölümde bahsedilen elektrot

düzeneklerinin f değerleri ile doğru orantılı olarak, yalıtkan malzemelerin silindir-silindir ve küre-silindir elektrot sistemlerindeki delinme dayanımları birbirlerine yakın değerlerde olmuştur. Sivri uç – silindir düzeneğinde ise delinme dayanımı değerlerinde büyük bir artış meydana gelmiştir. Sivri uç – silindir düzeneği ile elde edilen sonuçların, standart düzenek olan eş silindir sistem sonuçları ile karşılaştırması yapıldığında, elektrik alan değerleri arasındaki fark; PET için %41.1, prespan için %69, SBR/NR için ise %234.8 olduğu görülmüştür. Yalıtkan malzemelerin kalınlıklarının sırasıyla 0.3 mm, 0.4 mm ve 2.5 mm olduğu düşünüldüğünde, bu farkın kalınlık ile orantılı olarak artış gösterdiği görülmektedir.

4.3 Isıl Yaşlandırmanın Yalıtkan Malzemelerin Dielektrik Performansına Etkisi

Katı yalıtkan malzemeler, elektrikli ekipmanların işletme süreleri boyunca ısıl zorlanmalara maruz kalmaktadırlar. Bu zorlanmaların yalıtkan malzemelerin performansları üzerinde göstereceği etkileri, laboratuvar ortamında hızlandırılmış testler ile kısa sürede incelemek ve yalıtkan malzemeyi arızalanmaya götüren süreçleri gözlemlemek mümkündür. Bu bağlamda, ilgili tez çalışmasında, ısıl yaşlandırmanın katı yalıtkan malzemelerin dielektrik performansına etkisi, hızlandırılmış ısıl yaşlandırma sürecinde gerçekleştirilen dielektrik testler ile incelenmiştir.

Bilindiği üzere, katı yalıtkan malzemelerin kullanım ömrü, malzemenin delinmesi ile son bulmaktadır. Yalıtkan malzemenin delinmesine, şebeke yapısında bulunan AC gerilimler sebep olabileceği gibi ekipmanlara etki edebilen darbe gerilimleri de sebep olabilir. Bu yüzden, ısıl yaşlandırmanın yalıtkan malzemelerin delinme dayanımına etkisi iki farklı gerilim tipinde de incelenmiştir. Diğer yandan, işletme sırasında yalıtkan malzemede meydana gelen kısmi deşarj ve dielektrik kayıp olayları ciddi boyuta erişirse, bu durum ilgili yalıtkanın uzun vadede ısıl delinmesine veya dahili deşarj kaynaklı delinmesine sebep olabilmektedir [56]. Bu sebeple, yalıtkan malzemelerin ısıl zorlanma koşulları altında göstereceği kısmi deşarj ve dielektrik kayıp davranışlarının bilinmesi,

yalıtkanın durum değerlendirmesi adına önemlidir. Gerçekleştirilen dielektrik kayıp ölçümlerinde, dielektrik kayıp ve dielektrik kayıp faktörü; kısmi deşarj ölçümlerinde ise ortalama deşarj yükü (Q_{ort}) ve kısmi deşarj başlangıç gerilimi (KDBG) parametrelerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Isıl Yaşlandırma Süreci ve Uygulanan Dielektrik Testler

Bölüm 4.1'de tanıtılan yalıtkan malzemeler; Şekil 4.4'te gösterilen hava dolaşımlı endüstriyel fırın kullanılarak 120 °C sıcaklık altında, bir çevrimi 120 saat olmak üzere, toplam 720 saat sürecek 6 çevrimlik ısıl yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır.

Uygulanacak olan sıcaklık değerine, Tablo 4.6'da gösterilen, yalıtkan malzemelerin maksimum çalışma sıcaklıklarından yola çıkılarak karar verilmiştir. Maksimum çalışma sıcaklıklarından daha yüksek bir sıcaklık değeri seçilerek ısıl yaşlanma etkisinin daha hızlı bir şekilde gözlenmesi hedeflenmiştir.

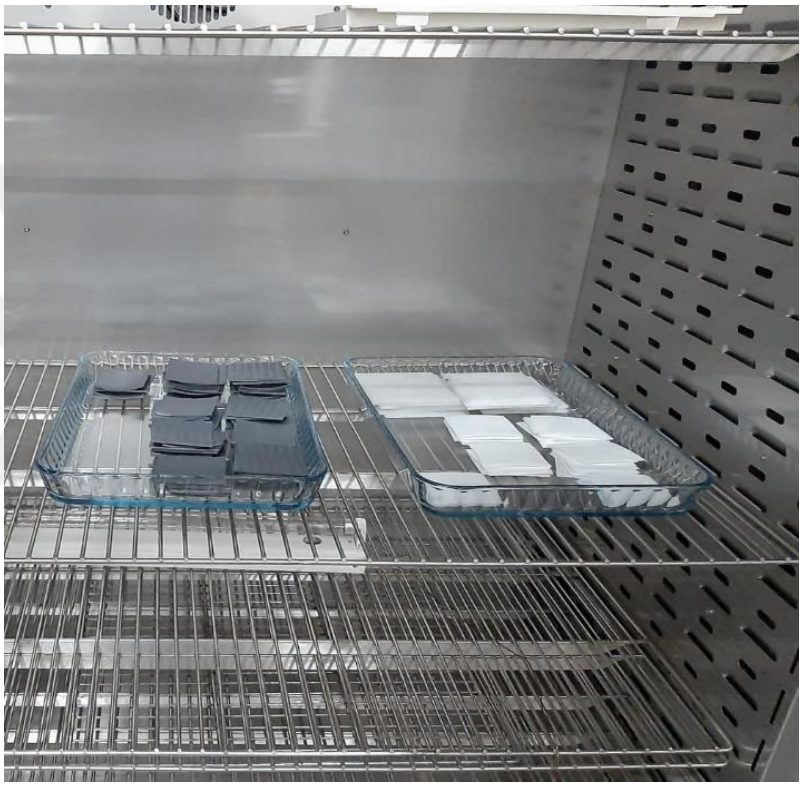
Tablo 4.6 Yalıtkan malzemelerin maksimum çalışma sıcaklıkları

Yalıtkan	Prespan	SBR/NR	PET	YYPE
Maksimum Çalışma Sıcaklıkları [°C]	90	70	110	80



Şekil 4.4 Isıl yaşlandırmada kullanılan endüstriyel fırın

Polietilen malzeme 130-140°C aralığında erime sıcaklığına sahip olduğundan, daha yüksek sıcaklıklara çıkılamamıştır. Transformatör yalıtımında, prespan yalıtkanın mineral yağ içinde kullanımı yaygın bir uygulamadır. Buna uygun olarak, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görüleceği üzere, diğer yalıtkanlardan farklı olarak, ısıya dayanıklı kap içinde mineral yağ ile birlikte yaşlandırılırmıştır.

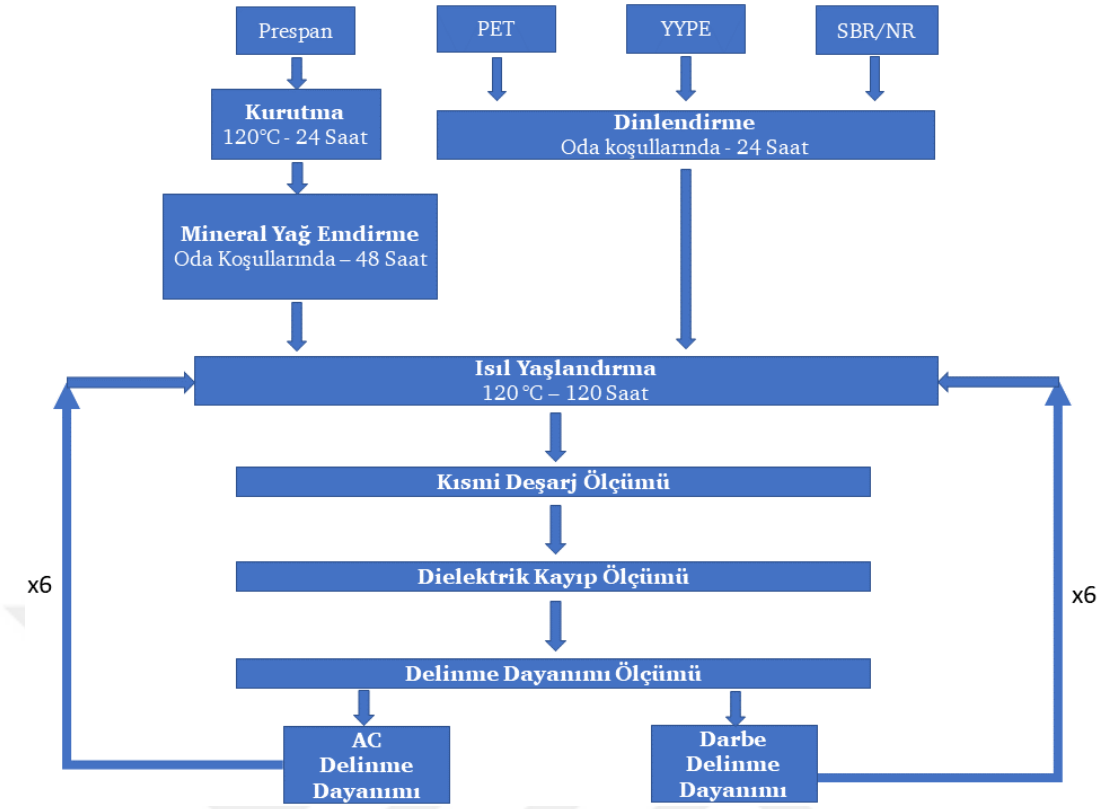


Şekil 4.5 SBR/NR – YYPE – PET yalıtkanların ısıl yaşlandırılması



Şekil 4.6 Prespanın mineral yağ içinde ısıl yaşlandırılması

Isıl yaşlandırma öncesinde, referans olarak kabul edilmek üzere, yalıtkan malzemelerin AC ve darbe gerilimleri altındaki delinme dayanımları, dielektrik kaybı ile dielektrik kayıp faktörü ve kısmi deşarj parametreleri (KDBG ve Q_{ort}) ölçülmüştür. Referans değerler "0" çevrimi olarak kabul edilmiştir. Ardından, ısıl yaşlandırma sürecine başlanarak, her çevrim sonunda aynı dielektrik testler tekrarlanmış ve yalıtkan malzemelerin dielektrik özelliklerinin ısıl zorlanmaya bağlı değişimi takip edilmiştir. Yaşlandırma – dielektrik test sürecinde uygulanacak olan işlemlerin akış diyagramı Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Isıl yaşlandırma sürecinin akış diyagramı

4.3.1.1 Dielektrik Kayıp/Dielektrik Kayıp Faktörü Testleri

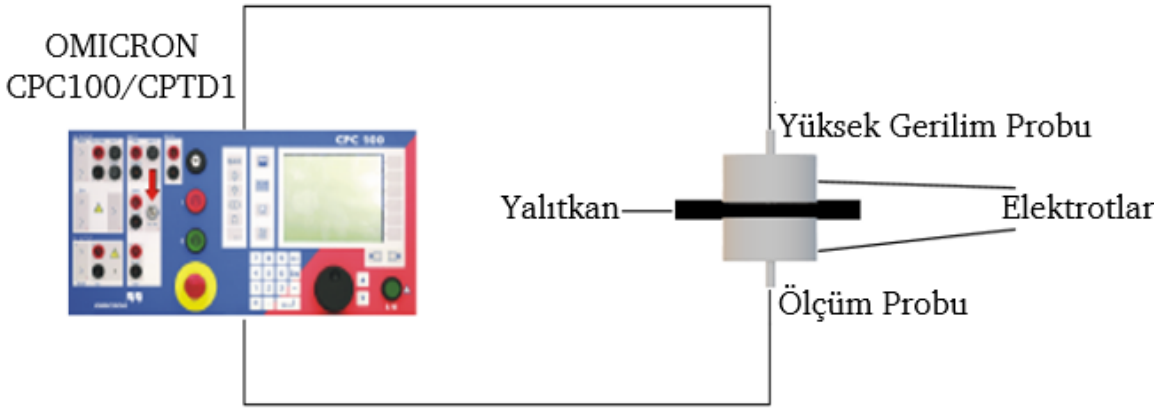
Yalıtkan malzemelerin dielektrik kayıplarının ısıl yaşlandırma altındaki değişiminin takibi, Omicron CP100/CPTD1 ölçüm cihazı kullanılarak yapılan testler ile gerçekleştirilmiştir. CPTD1 test kartı, CPC100'ün bir eklentisi olup, Schering Köprüsü prensibinden yola çıkarak geliştirilmiştir. CPC100/CPTD1 cihazı 0-12 kV aralığında 0-400 Hz aralığındaki frekans değerlerinde aşağıdaki ölçümleri:

- Dielektrik Kayıp(Görünür – Aktif – Reaktif)
- tanδ
- Kalite Faktörü
- Endüktans
- Empedans ve faz açısı
- Akım

gerçekleştirebilmektedir. İlgili ölçüm cihazı, Şekil 4.8'de, deneylerdeki bağlantı şeması ise Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Omicron CPC 100/CPTD1



Şekil 4.9 CPC100/CPTD1 bağlantı şeması

- **Ön Çalışma**

Isıl yaşlandırmanın dielektrik kayıplara etkisi farklı gerilim büyüklüğü ve farklı frekans değerleri ile alınan ölçümler üzerinden değerlendirilecektir. Bu yüzden,

dielektrik kayıp ve dielektrik kayıp faktörünün gerilim büyüklüğü ve frekansına karşı davranışının anlaşılması için bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 15x15cm^{2}'lik SBR/NR yalıtkan plakasının, farklı gerilim ve frekans kademelerinde dielektrik kayıp ölçümleri, 80 mm çaplı eş silindir elektrot kullanılarak alınmıştır. Numunelerin kayıp ölçümleri, 2'şer kV aralıklarla 2 ile 12 kV aralığında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan her gerilim basamağında, frekans 50 Hz'den 400 Hz'e, 50 Hz aralıklarla arttırılmıştır. Böylelikle, toplam 48 ölçüm elde edilmiştir. Bu işlem aynı özelliklerdeki 3 numuneye uygulanmış ve değerlerin ortalamaları deney sonucu olarak kabul edilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen dielektrik kayıp (P_k [W]) değerleri Tablo 4.7'de, dielektrik kayıp faktörü değerleri Tablo 4.8'de gösterilmiştir. Yalıtkan üzerinde meydana gelen kaybın, gerilim ve frekans artışıyla orantılı olarak arttığı görülürken; dielektrik kayıp faktörünün, gerilim ile doğru, frekans ile ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir.

Tablo 4.7 Gerilim ve frekansa bağlı dielektrik kayıp değerleri

	Dielektrik Kayıp [W]					
kV / Hz	**2**	**4**	**6**	**8**	**10**	**12**
50	0,014	0,157	0,593	1,237	2,182	3,564
100	0,019	0,241	0,930	1,919	3,373	5,478
150	0,023	0,308	1,243	2,561	4,489	7,335
200	0,026	0,368	1,545	3,196	5,613	9,215
250	0,030	0,426	1,846	3,808	6,691	11,028
300	0,033	0,480	2,154	4,439	7,817	13,003
350	0,036	0,539	2,488	5,082	8,963	15,028
400	0,040	0,585	2,762	5,695	10,119	17,098

Dielektrik kayıp, sabit frekansta gerilim değişimine göre ve sabit gerilimde frekans değişimine göre incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre; 50 Hz 12 kV'daki kayıp değeri, 50 Hz 2 kV'daki kayıp değerinin yaklaşık olarak 254,5 katıdır. Aynı değerlendirme 400 Hz için yapıldığında, aradaki farkın 427,45 kat olduğu bulunmuştur. Frekans etkisini gözlemek adına, sabit gerilim değerlerinde frekans yükseltilmesi için incelemeler yapıldığında, 2 kV 400 Hz'teki kayıp değerinin 2 kV

50 Hz'teki kayba göre %285,71 oranında daha fazla olduğu, 12 kV'luk gerilim için aynı işlem tekrarlandığında ise %479,7'lik bir artışın yaşandığı görülmüştür. Gerilim değişiminin dielektrik kayıplar üzerinde yarattığı etki, frekans değişiminin etkisine göre çok daha fazla olmuştur. Ayrıca, sabit gerilim değerinde frekans değişimi veya sabit frekans değerinde gerilim değişimi senaryolarında, sabit tutulan değer ne kadar büyük olursa, değiştirilen büyüklüğün etkisi o kadar fazla olmuştur.

Tablo 4.8'den de görüleceği üzere, değişen gerilim ve frekansa göre dielektrik kayıp faktörü incelendiğinde, gerilim ile doğru orantılı, frekans ile ters orantılı bir değişim saptanmıştır.

Tablo 4.8 Gerilim ve frekansa bağlı dielektrik kayıp faktörü değerleri

	Dielektrik Kayıp Faktörü					
kV / Hz	**2**	**4**	**6**	**8**	**10**	**12**
50	0,165	0,402	0,531	0,546	0,561	0,592
100	0,117	0,318	0,431	0,439	0,449	0,471
150	0,096	0,277	0,391	0,397	0,405	0,426
200	0,084	0,251	0,368	0,375	0,383	0,404
250	0,077	0,236	0,355	0,360	0,369	0,390
300	0,071	0,223	0,346	0,352	0,360	0,384
350	0,067	0,217	0,344	0,346	0,355	0,381
400	0,064	0,207	0,337	0,342	0,352	0,379

Kayıp faktörüne gerilim etkisini incelemek için, 50 Hz 2 kV'daki tanδ ile 50 Hz 12 kV'daki tanδ karşılaştırıldığında, %358'lik bir fark görülmüştür. Aynı karşılaştırılma, 400 Hz 2 kV ve 400 Hz 12 kV için yapılırsa farkın %592 olduğu bulunmuştur. Bu durum, yüksek frekanslardaki gerilim artışının tanδ değerine daha çok etki yaptığını göstermiştir. Frekansın yükselmesi sonucu, kayıp faktöründe meydana gelen azalma, gerilim seviyesi düşük olduğunda daha şiddetli olmuştur. Örneğin, 50 Hz 2 kV ve 400 Hz 2 kV'daki dielektrik kayıp faktörleri arasında %157'lik bir fark söz konusuyken, 50 Hz 12 kV ve 400 Hz 12 kV arasında %57'lik bir fark gözlenmiştir.

- **Isıl Yaşlandırmaya Bağlı Dielektrik Kayıp ve Dielektrik Kayıp Faktörü Değişimi**

Gerçekleştirilen ön çalışmanın ardından, tüm yalıtkan malzemelerin dielektrik kayıp ve dielektrik kayıp faktörü değerlerinin ısıl yaşlandırma karşısında değişimi takip edilmiştir. Isıl yaşlandırma dahilindeki dielektrik kayıp ölçümlerinde, Bölüm 4.2.1'de bahsedilen 25 mm çaplı eş silindir elektrotlar kullanılmıştır. Ölçümleri gerçekleştirilecek olan yalıtkan malzemeler, eş silindir elektrotlar arasına konumlandırılmış halde mineral yağa batırılmıştır. Ölçüm kabı ve ölçüm problarının fotoğrafı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Yüksek gerilim ve ölçüm uçlarının elektrot düzeneği ile bağlantısı

Isıl yaşlandırmanın dielektrik kayıplara etkisi incelenirken, her yaşlandırma çevriminin ardından PET, YYPE, SBR/NR ve prespan yalıtkan malzemelerin üçer numunesinin dielektrik kayıpları ve dielektrik kayıp faktörleri ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm sonuçlarının ortalaması, ilgili çevrime ait deney sonucu olarak kabul edilmiştir. Ölçümler; 2,4,6,8,10,12 kV'luk gerilimler altında ve her gerilim değerinde 50-100-150-200-250-300-350-400 Hz frekans değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

- **SBR/NR Ölçüm Sonuçları**

Bu kısımda, SBR/NR yalıtkanın farklı gerilim ve frekans değerlerinde elde edilen dielektrik kayıp ve tanδ ölçüm sonuçları, Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da verilmiştir. Meydana gelen değişimlerin daha belirgin şekilde görülebilmesi için Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de dielektrik kayıp ve tanδ değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişiminin grafikleri paylaşılmıştır. Sonuç tabloları ve grafikleri üzerinden görülen değişimler ve davranışlar yorumlanmıştır.

Tablo 4.9 SBR/NR dielektrik kayıp değerleri

Dielektrik Kayıp [mW]								
2 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	1.02	1.58	2.11	2.62	3.13	3.62	4.13	4.83
1	0.74	1.24	1.74	2.24	2.73	3.23	3.73	4.23
2	0.76	1.31	1.84	2.37	2.9	3.42	3.95	4.48
3	0.55	1	1.45	1.9	2.35	2.79	3.24	3.69
4	0.43	0.83	1.22	1.62	2.01	2.41	2.8	3.19
5	0.46	0.87	1.28	1.69	2.11	2.52	2.93	3.35
6	1.29	1.92	2.49	3.03	3.55	4.06	4.56	5.05
%Fark	26.8162	21.753	18.1385	15.8324	13.5648	11.977	10.4579	4.73409
4 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	2.93	4.76	6.47	8.12	9.77	11.38	13.01	14.62
1	2.25	3.79	5.3	6.8	8.3	9.8	11.31	12.81
2	2.35	4.02	5.63	7.23	8.83	10.43	12.04	13.64
3	1.7	3.07	4.44	5.8	7.16	8.52	9.89	11.26
4	1.24	2.37	3.49	4.8	5.81	6.83	6.83	7.17
5	1.24	2.35	3.46	4.58	5.69	6.81	7.92	9.03
6	3.91	5.86	7.59	9.2	10.78	12.3	13.82	15.32
%Fark	33.1778	23.1351	17.3092	13.3163	10.3697	8.06032	6.28949	4.76312
6 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	8.22	16.44	21.27	26	30.66	35.3	39.88	44.45
1	6.85	11.48	16.04	20.56	25.09	29.64	34.16	38.7
2	8.32	13.79	19.11	24.38	29.65	34.91	40.13	45.36
3	5.53	9.67	13.73	17.67	21.8	25.94	30.06	34.19

Tablo 4.9 SBR/NR dielektrik kayıp değerleri (devamı)

4	5.32	9.93	14.54	18.87	23.54	27.54	31.41	35.68
5	9.27	18.08	21.87	25.64	29.46	33.23	37.05	40.81
6	15.07	21.59	27.24	32.57	37.7	42.67	47.52	52.3
%Fark	83.3974	31.3060	28.0709	25.2637	22.9677	20.8746	19.1611	17.6505
8 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	10.43	20	24.9	37.52	46.04	54.51	62.91	71.19
1	12.36	20.65	28.78	36.87	44.96	53.08	61.17	69.28
2	13.3	22.13	30.93	39.66	48.33	57.02	65.69	74.36
3	10.01	17.68	25.36	32.54	39.67	46.15	53.37	60.24
4	8.67	15.92	22.66	29.4	36.27	43.11	49.91	56.77
5	17.82	24.68	31.48	38.33	48.14	51.93	68.73	75.51
6	27.39	39.21	49.46	58.87	68.09	77.09	85.81	94.38
%Fark	162.647	96.0634	98.6088	56.9359	47.9020	41.4267	36.3965	32.5787
10 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	28.03	43.46	57.9	71.63	85.11	93.36	106.69	110.78
1	19.87	33.06	45.93	58.73	71.44	84.13	97.07	109.62
2	21.18	35.39	49.18	62.99	76.6	90.23	103.93	117.38
3	16.4	29.25	41.58	53.13	63.26	74.59	87.54	97.77
4	16.7	30.01	42.71	55.1	67.7	80.16	92.79	105.12
5	22.76	33.83	44.56	55.3	65.99	76.68	87.41	98.1
6	35.1	52.08	66.96	81.1	94.89	108.41	121.58	134.71
%Fark	25.2225	19.8220	15.6401	13.2209	11.5021	16.1168	13.9514	21.6031
12 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	40.1	56.1	75.5	94.6	123	134	154.9	170.6
1	29.2	48.4	67.3	85.6	104	122.5	140.8	159.3
2	31.2	52	72.2	92.4	112.2	131.7	151.4	171.2
3	24.9	43.9	63	80.6	95.2	110.7	127.2	144.1
4	25.8	46	63.5	80.8	98.5	116.7	134.3	151.7
5	39.5	65.8	81.6	107.2	122.9	148.7	164.2	179.7
6	52.6	77.9	100.2	121.5	141.8	162	181.8	201.1
%Fark	31.1946	38.9119	32.7675	28.4718	15.3172	20.8969	17.4089	17.8523

Tablo 4.9'daki verilerden de görüleceği üzere dielektrik kayıp değerleri, yapılan ön çalışma ile uyumlu olarak test gerilimi ve test frekansı yükseltildikçe, artmaktadır. Bu durum, tez kapsamında kullanılan tüm malzemeler için geçerli olmuştur. Ayrıca, sabit gerilim ve frekans değerlerinde alınan ölçümlerde 6 çevrimlik ısıl yaşlandırma sonucunda farklar, tablolardaki "%Fark" satırında gösterilmiştir. Isıl yaşlandırmanın etkisi SBR/NR için incelendiğinde, 2,4,6 ve 8 kV'daki dielektrik kayıp değerleri 4. çevrime kadar düşüş eğilimindeyken, 10 ve 12 kV'daki kayıp değerleri için dip noktası 3. çevrim olduğu görülmektedir. Ancak, iki durumda da kayıp değerlerinin, 5. çevrimden itibaren, net şekilde artmaya başladığı görülmektedir. İlk aşamada görülen kayıp düşüşü, sürekli olarak sıcaklık altında kalan yalıtkan malzemenin kuruyarak, nemden arınmasına bağlanabilir. İlerleyen süreçte ise yaşlandırma etkisiyle yalıtkanda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, malzemenin yapısal özelliklerinin bozulmasına neden olarak kayıp artışına sebep olmuştur. Isıl yaşlandırmaya bağlı kayıp değişimlerine örnek verilirse, 50 Hz 6 kV'daki kayıp değeri 4. çevrim sonunda %35'lik bir azalma yaşamıştır. Devam eden iki çevrimin ardından kayıplar artış göstermiş ve toplamda, referans değere göre %92'lik bir artış görülmüştür. Aynı gerilimin 400 Hz frekanstaki kayıp değerindeki toplam artış miktarı %24'tür. 8 kV'tan üst değerlere çıkıldığında ise tüm frekanslardaki toplam artış miktarları, birbirlerine daha yakın değerler almıştır.

Referans kayıp değerlerinde (0 yaş), 50 Hz frekanstaki kayıp değerleri içinde 2 kV ile 12 kV'daki kayıplar karşılaştırıldığında, 39 katlık bir fark görülmektedir. 400 Hz frekansta, aynı karşılaştırılma yapıldığında değişim miktarı 35 kat olmuştur. Bu farklar, 6 çevrim süresince yaşlandırılmış numunede sırasıyla 40.7 kat ve 40 kattır. Yani, yaşlanmış numunelerde yüksek frekansların etkinliği artış göstermiştir.

Tablo 4.10 SBR/NR dielektrik kayıp faktörü değerleri

tanδ								
2 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.07378	0.05867	0.05276	0.04956	0.04758	0.04621	0.04523	0.04641
1	0.05592	0.04788	0.04515	0.04382	0.04307	0.04259	0.04228	0.04207
2	0.05621	0.04902	0.04647	0.04523	0.04452	0.04406	0.04376	0.04353
3	0.04376	0.04039	0.03935	0.03892	0.03868	0.03854	0.03849	0.03844
4	0.03543	0.03441	0.03419	0.03411	0.03409	0.03408	0.03407	0.03408
5	0.03621	0.03494	0.03465	0.03461	0.03462	0.03465	0.03469	0.03473
6	0.09779	0.07502	0.06572	0.06054	0.05715	0.05472	0.05290	0.05152
%Fark	32.5325	27.8652	24.5500	22.1522	20.1184	18.4079	16.9799	11.0110
4 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.05307	0.04408	0.04038	0.03833	0.03705	0.03618	0.03556	0.03511
1	0.04244	0.03630	0.03419	0.03315	0.03256	0.03217	0.03194	0.03176
2	0.04312	0.03746	0.03539	0.03437	0.03377	0.03339	0.03316	0.03297
3	0.03354	0.03086	0.02999	0.02959	0.02939	0.02926	0.02921	0.02917
4	0.02505	0.02439	0.02409	0.02502	0.02436	0.02395	0.02065	0.01906
5	0.02454	0.02362	0.02340	0.02333	0.02333	0.02332	0.02335	0.02337
6	0.07392	0.05710	0.04995	0.04587	0.04324	0.04136	0.04001	0.03893
%Fark	39.2809	29.5419	23.7093	19.6613	16.7019	14.3223	12.4993	10.8969
6 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.06593	0.06739	0.05887	0.05438	0.05162	0.04976	0.04834	0.04733
1	0.05711	0.04874	0.04587	0.04443	0.04364	0.04312	0.04277	0.04253
2	0.06759	0.05708	0.05329	0.05137	0.05027	0.04952	0.04901	0.04864
3	0.04831	0.04303	0.04112	0.03997	0.03966	0.03948	0.03936	0.03929
4	0.04742	0.04499	0.04430	0.04340	0.04355	0.04261	0.04177	0.04163
5	0.08149	0.08055	0.06553	0.05803	0.05354	0.05057	0.04844	0.04685
6	0.12662	0.09326	0.07957	0.07197	0.06709	0.06359	0.06096	0.05892
Fark %	92.032	38.387	35.175	32.337	29.988	27.787	26.097	24.495
8 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.04694	0.04609	0.03867	0.04403	0.04348	0.04308	0.04279	0.04252
1	0.05787	0.04929	0.04624	0.04476	0.04390	0.04337	0.04301	0.04275
2	0.06052	0.05137	0.04841	0.04690	0.04600	0.04543	0.04504	0.04475
3	0.04900	0.04402	0.04258	0.04124	0.04046	0.03941	0.03919	0.03885

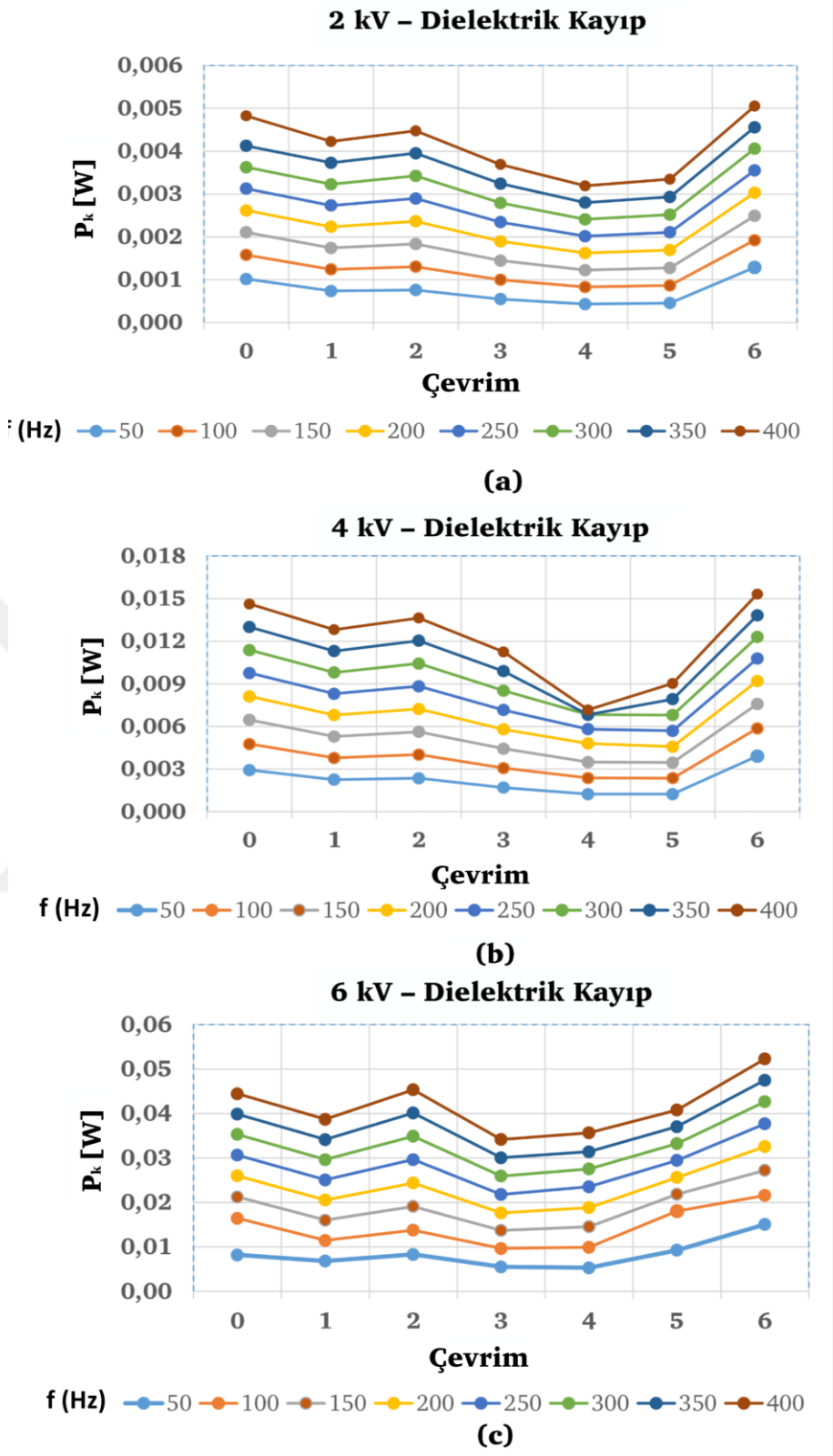
Tablo 4.10 SBR/NR dielektrik kayıp faktörü değerleri (devamı)

4	0.04319	0.04030	0.03864	0.03781	0.03750	0.03729	0.03712	0.03706
5	0.08787	0.06179	0.05300	0.04866	0.04914	0.04436	0.05048	0.04867
6	0.12906	0.09514	0.08108	0.07305	0.06803	0.06452	0.06180	0.05970
%Fark	174.916	106.398	109.661	65.8863	56.4617	49.7464	44.4139	40.4051
10 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0805	0.0638	0.0573	0.0537	0.0513	0.0471	0.0463	0.0422
1	0.0594	0.0503	0.0471	0.0455	0.0446	0.0439	0.0436	0.0432
2	0.0616	0.0526	0.0492	0.0475	0.0466	0.0459	0.0455	0.0451
3	0.0513	0.0466	0.0446	0.0430	0.0413	0.0407	0.0411	0.0403
4	0.0529	0.0484	0.0464	0.0451	0.0446	0.0442	0.0440	0.0437
5	0.0717	0.0540	0.0479	0.0449	0.0430	0.0418	0.0410	0.0404
6	0.1055	0.0806	0.0701	0.0642	0.0605	0.0579	0.0559	0.0544
%Fark	31.1339	26.1949	22.1885	19.6795	17.9301	22.8571	20.6588	28.7839
12 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0797	0.0570	0.0517	0.0489	0.0513	0.0468	0.0465	0.0450
1	0.0606	0.0511	0.0478	0.0459	0.0449	0.0442	0.0438	0.0435
2	0.0629	0.0534	0.0500	0.0482	0.0472	0.0464	0.0459	0.0456
3	0.0539	0.0484	0.0467	0.0450	0.0429	0.0418	0.0413	0.0411
4	0.0564	0.0511	0.0476	0.0458	0.0449	0.0445	0.0441	0.0437
5	0.0862	0.0730	0.0607	0.0603	0.0556	0.0562	0.0534	0.0512
6	0.1099	0.0833	0.0723	0.0656	0.0617	0.0590	0.0570	0.0554
%Fark	37.9065	46.1259	39.6814	34.0706	20.3374	26.0392	22.4621	22.9236

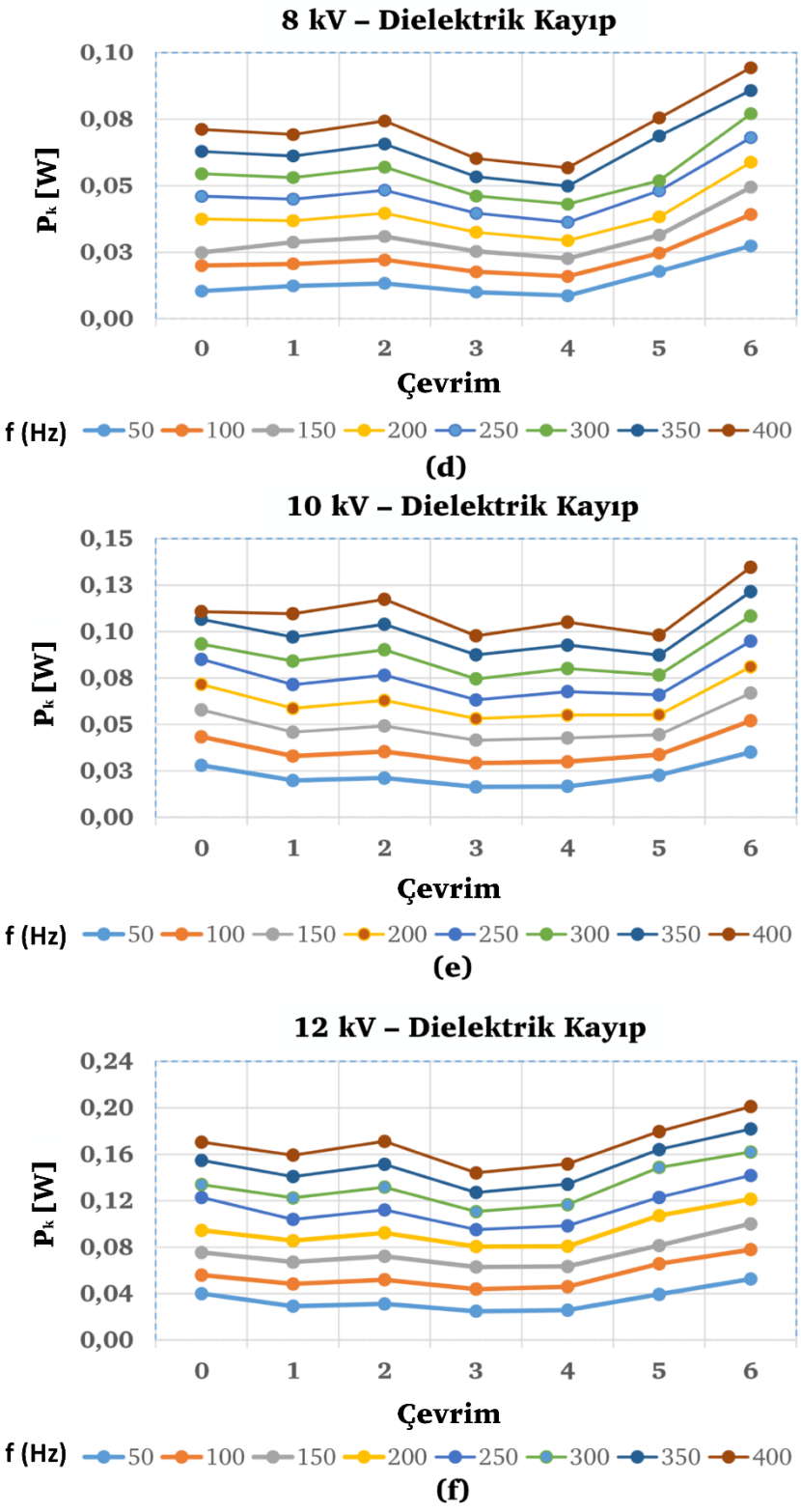
SBR/NR'nin Tablo 4.10'da gösterilen tanδ değerleri incelendiğinde, tüm gerilim değerleri için yüksek frekanslara çıkıldıkça tanδ değerlerinin düştüğü görülmektedir. Tüm test gerilimlerinde, 50 Hz'teki ve 400 Hz'teki tanδ değerleri arasındaki farkın, referans numunelerde en fazla olduğu görülmüştür. Aradaki bu fark 4. yaşlandırma çevrimine kadar azalmış, ardından artış eğilimine girmiştir. Isıl yaşlandırmanın etkileri sabit gerilimde frekans bazlı incelendiğinde, görülen değişimler dielektrik kayıp değişimleri ile uyumludur. Aynı şekilde, 6 çevrimlik ısıl yaşlandırma sonucunda görülen toplam kayıp faktörü farkı, 8 kV'a kadar tüm frekans değerleri için kademeli olarak artmış ve sabit gerilimde frekans değeri yükseldikçe artış miktarında azalma gözlenmiştir. 10 ve 12 kV değerlerinde farklı

frekanslardaki dielektrik kayıplarda ve tanδ değerinde görülen artış miktarları ise birbirlerine yakın değerler almıştır. Isıl yaşlandırma sonucunda, dielektrik kayıp faktörü değerlerindeki maksimum artış, %174.9 ile 8 kV - 50 Hz ölçümlerinde meydana gelmiştir.

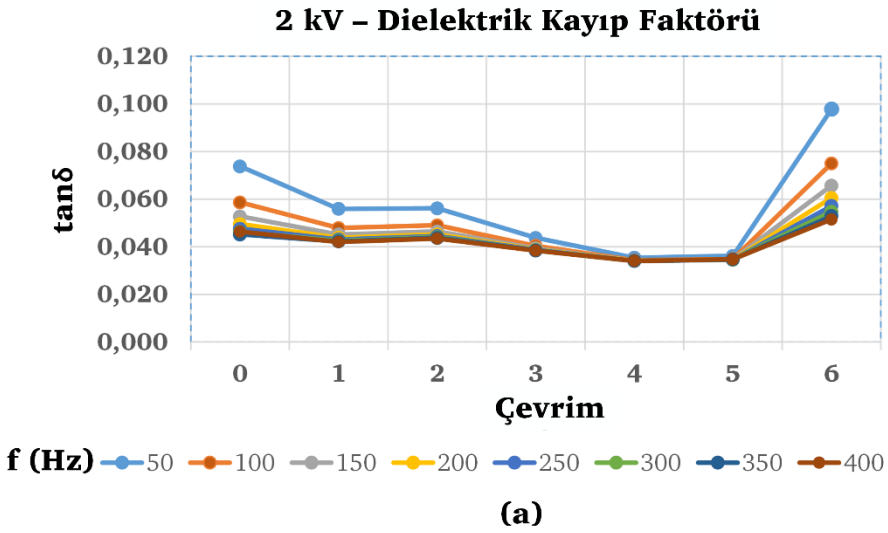
Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'de paylaşılan değerlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde, kayıp değerlerinin 3-4 çevrimlerine kadar düşüş eğiliminde olduğu 5. ve 6. çevrimlerde ise ciddi artışların meydana geldiği açık şekilde görülmektedir. Şekil 4.12'de görüldüğü üzere, tüm frekanslardaki tanδ, 8 kV'a kadar 4. çevrimde dip noktasına ulaşırken, 10 kV ve 12 kV'da 3. çevrime kadar bir azalma görülmektedir. Ardından, 5. ve 6. çevrim ile birlikte tanδ'da net artışlar görülmektedir. Tüm gerilimlerdeki tanδ, 50 Hz frekansında maksimum değerindedir. Isıl yaşlandırma süreci ile birlikte 50 Hz'teki tanδ 4. çevrime kadar azalmış ve diğer frekanslarda görülen tanδ değerlerine yaklaşmıştır. Dielektrik kaybın yüksek miktarda arttığı 5. ve 6. çevrimde ise, 50 Hz'teki tanδ değerleri diğer frekanslara göre çok daha fazla yükselmiştir. Tüm bu süreçte, dielektrik kayıp ve tanδ değerleri yalıtkanın kuruması ve iletkenliğin düşmesi ile birbirlerine uyumlu olarak azalma göstermişlerdir. Ardından gelen yaşlandırma çevrimleri neticesinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sebebiyle, yalıtkan malzemenin dielektrik perfromansı kötüleşmiş ve dielektrik kayıp ile dielektrik kayıp faktörü değerleri artış göstermiştir.



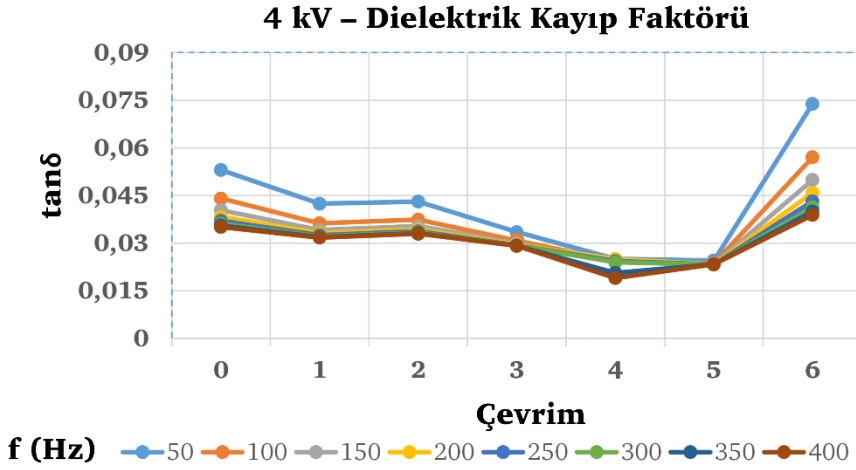
Şekil 4.11 SBR/NR dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV



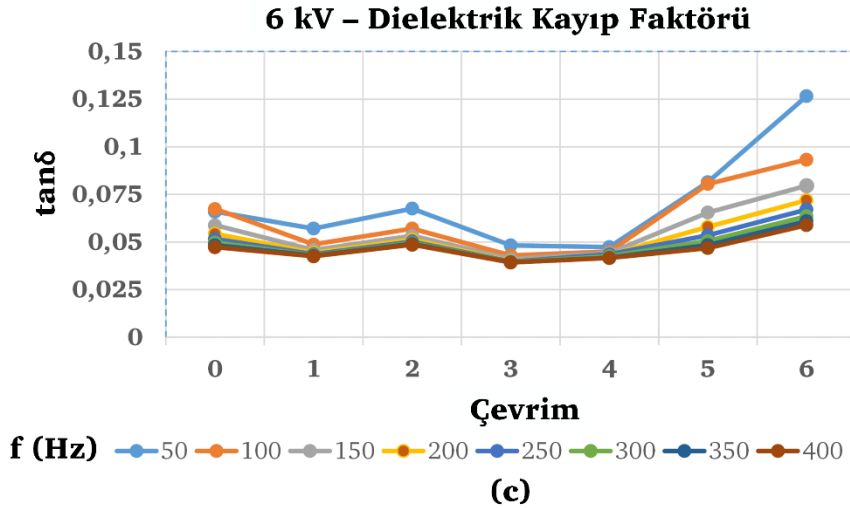
Şekil 4.11 SBR/NR dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV (devamı)



(a)

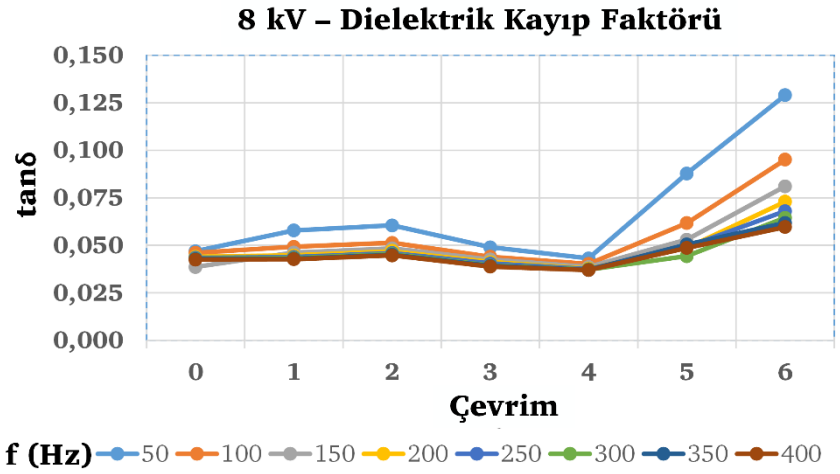


(b)

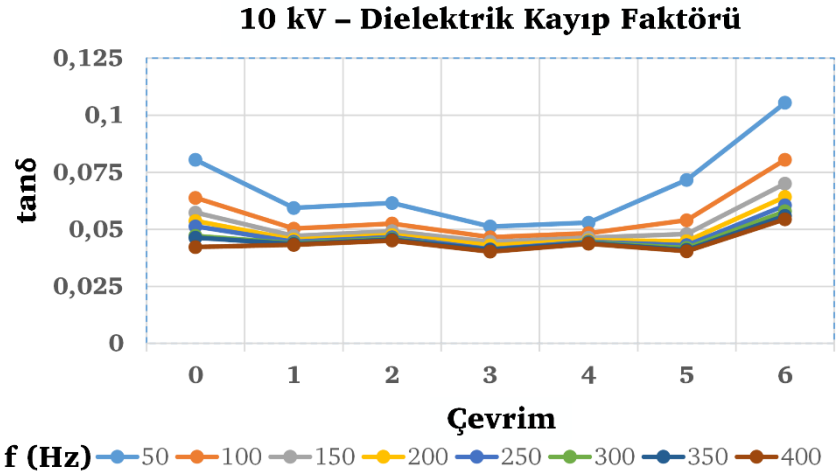


(c)

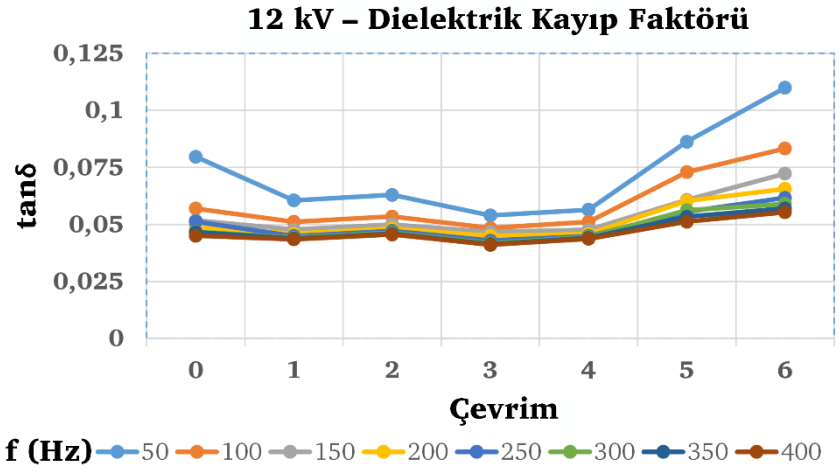
Şekil 4.12 SBR/NR dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.12 SBR/NR dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV (devamı)

- **PET Ölçüm Sonuçları**

PET yalıtkanın farklı frekans ve gerilimlerdeki dielektrik kayıp ve tanδ ölçüm sonuçları Tablo 4.11 ve Tablo 4.12'de verilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde, ısıl yaşlandırma ile meydana gelen değişimlerin daha net şekilde görülebilmesi adına, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'deki grafikler paylaşılmıştır. PET yalıtkanın dielektrik kayıp performansı için gerçekleştirilen değerlendirmeler, ilgili tablolar ve şekiller üzerinden yürütülmüştür.

Tablo 4.11 PET dielektrik kayıp değerleri

Dielektrik Kayıp [mW]								
2 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0729	0.1372	0.2180	0.3083	0.4097	0.5142	0.6287	0.7493
1	0.0600	0.1268	0.2090	0.3035	0.4072	0.5233	0.6478	0.7767
2	0.0814	0.1623	0.2645	0.3712	0.4915	0.6199	0.7609	0.9236
3	0.0545	0.1213	0.1989	0.2895	0.3914	0.5058	0.6353	0.7718
4	0.0541	0.1277	0.2141	0.3143	0.4240	0.5447	0.6758	0.8125
5	0.0799	0.1508	0.2289	0.3147	0.4137	0.5197	0.6454	0.7529
6	0.0971	0.1702	0.2448	0.3325	0.4367	0.5519	0.6714	0.8076
%Fark	33,4764	24.0177	12.3291	7.8375	6.6014	7.3339	6.7919	7.7795
4 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.90898	1.39304	1.74672	2.16310	2.57609	2.99101	3.48722	3.94729
1	0.86143	1.28044	1.71921	2.11963	2.54945	3.01609	3.52061	4.03470
2	0.93530	1.48801	1.99359	2.56577	3.05233	3.59628	4.18981	4.78353
3	0.60529	1.02104	1.45210	1.86694	2.29429	2.72842	3.26098	3.79238
4	0.64205	1.12576	1.56823	2.02226	2.47983	2.93201	3.44946	3.95462
5	0.79145	1.28113	1.75651	2.18691	2.67543	3.17071	3.70857	4.26401
6	1.07717	1.68594	2.28594	2.79451	3.36885	3.96995	4.61419	5.23768
%Fark	18.5032	21.0263	30.870	29.1901	30.7739	32.7295	32.3171	32.6906
6 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	5.12824	6.83032	8.19857	8.98682	10.0803	11.4423	12.5219	13.5486
1	4.97922	6.65881	8.15735	9.52154	10.8955	12.1712	13.3627	14.6291
2	4.76047	6.59675	7.96473	9.10283	10.5154	11.9160	13.1291	14.4403
3	3.09304	4.50640	5.76160	7.10079	8.11603	9.56428	10.4973	11.5137

Tablo 4.11 PET dielektrik kayıp değerleri (devamı)

4	3.34130	4.87338	6.19336	7.35107	8.52828	9.83990	10.9220	12.0635
5	3.64524	4.94979	6.14644	7.36329	8.63894	9.95766	11.3561	12.6115
6	5.30314	6.86514	8.54943	10.1545	12.0204	13.7692	14.7877	16.5631
%Fark	3.41064	0.50985	4.27962	12.9942	19.2467	20.3357	18.0953	22.2494
8 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	11.1515	15.7547	18.3400	20.8778	23.5581	25.4774	27.0918	28.7934
1	12.1601	16.7168	19.9144	22.9061	26.0986	28.2868	31.0376	33.5895
2	10.2967	14.7041	17.9864	21.3236	24.0557	26.5577	29.4743	31.6588
3	9.3520	12.7898	15.3626	18.2617	20.4664	23.0343	25.5532	27.6016
4	9.3209	12.6686	15.5746	17.8436	20.2223	22.5461	24.9390	27.2562
5	10.7921	14.3136	17.2994	20.1143	23.0596	25.9144	29.3249	30.3393
6	13.4775	18.3345	21.8310	24.9290	28.2254	31.7861	36.2446	41.1117
%Fark	20.8576	16.3747	19.0346	19.4043	19.8121	24.7618	33.7842	42.7816
10 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	25.4206	36.6515	43.9773	48.7084	53.1434	57.2909	61.3742	62.6993
1	28.9758	44.8780	55.4806	60.6599	68.9775	75.2491	81.8082	87.0626
2	26.7071	38.7472	46.8690	52.8860	57.1558	61.9430	67.0314	70.6352
3	21.7388	32.2539	39.4174	43.7810	47.6603	51.6937	55.9474	60.2404
4	19.2972	26.3318	31.8241	36.2594	40.2658	44.2785	48.3747	51.9680
5	26.6569	37.7816	44.5538	51.7325	58.2069	70.6890	100.089	152.025
6	30.7649	45.0618	54.3536	62.7728	76.3232	91.3269	119.739	153.730
%Fark	21.0234	22.9467	23.5946	28.8747	43.6174	59.4091	95.0982	145.186
12 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	52.798	-	-	-	-	-	-	-
1	69.7133	-	-	-	-	-	-	-
2	57.8620	-	-	-	-	-	-	-
3	48.2253	-	-	-	-	-	-	-
4	43.3257	-	-	-	-	-	-	-
5	92.9079	-	-	-	-	-	-	-
6	105.834	-	-	-	-	-	-	-
%Fark	100.451	-	-	-	-	-	-	-

12 kV geriliminde alınan ölçümler sırasında, frekans değeri temel bileşen frekansının üzerine çıkartıldığında, numunelerde delinme meydana gelmiştir. Bu

nedenle, 12 kV özelinde ilgili frekanslarda ölçüm gerçekleştirilememiştir. Ölçüm alınabilen tüm gerilim ve frekans seviyelerinde, ısıl yaşlandırma ile birlikte dielektrik kayıp miktarında artış yaşanmıştır. Toplamda meydana gelen artış miktarlarını, SBR/NR'de olduğu gibi frekans bazında net bir şekilde sıralamak mümkün olmasa da 2 kV haricinde, ısıl yaşlandırma, en çok 400 Hz'teki dielektrik kayıplara etki etmiştir. Örneğin, 8 kV'luk gerilimin 50 Hz frekansındaki kayıp değerleri %20,85 artarken, 400 Hz frekansta %42,78'lik bir artış görülmüştür. Bu oranlar, daha düşük gerilimlerde birbirine çok daha yakın değerlerdedir. 10 kV gerilime kadar maksimum %42'lik bir kayıp artışı görülürken; 400 Hz 10 kV'daki dielektrik kayıplar, ısıl yaşlandırma sonucunda %145'lik ciddi bir artış göstermiştir. Yalıtkan malzemenin, temel frekansın üzerindeki frekanslara sahip 12 kV gerilimde delindiği düşünüldüğünde, 10 kV'un yüksek frekans değerlerinde yalıtkan malzemenin ciddi şekilde zorlandığı söylenebilir. Buradan, uygulanan ısıl yaşlandırmanın, malzemenin hali hazırda dayanım göstermekte zorlandığı gerilim ve frekans değerlerinde kaybı daha çok arttırdığı görülmektedir.

Yaşlandırılmamış referans numunede, 2 kV 50 Hz ile 2 kV 400 Hz'teki kayıp miktarları arasında 10.3 katlık bir fark mevcutken, 6 çevrim sonunda bu fark 8.3'e düşmüştür. Yüksek gerilim seviyelerinde, numunelerin yaşlanma derecesi arttıkça, frekans değişimi dielektrik kayıplara daha çok etki etmiştir. Örneğin, 10 kV'luk test geriliminde frekans, 50 Hz'den 400 Hz'e çıkartıldığında, referans numunelerin dielektrik kaybı 2,46 kat artarken, 6 çevrim yaşlandırılmış numunelerde bu fark 5 kat olmuştur.

Referans numunesinde, 2 kV 50 Hz ve 10 kV 50 Hz'teki dielektrik kayıplar arasındaki fark 348 kattır. 400 Hz'de aynı gerilim değişimi için dielektrik kayıp farkı 83 kat olmuştur. 6 çevrim yaşlandırılmış numunede, aynı şekilde 50 Hz ve 400 Hz için gerilim değişimi yapıldığında, görülen farklar sırasıyla 316 ve 192 kattır. Yalıtkan malzemenin yaşlanması, temel frekansta gerilim değişiminin dielektrik kayıplarda yarattığı etkide büyük bir değişim meydana getirmezken, 400 Hz frekanstaki değişim miktarını 2 katından fazla yükseltilmiştir. Maruz kaldıkları ısıl zorlanma sonrası yıpranan yalıtkanların yüksek frekanslardaki performansı, yaşlanmamış hallerine göre düşüş göstermiştir.

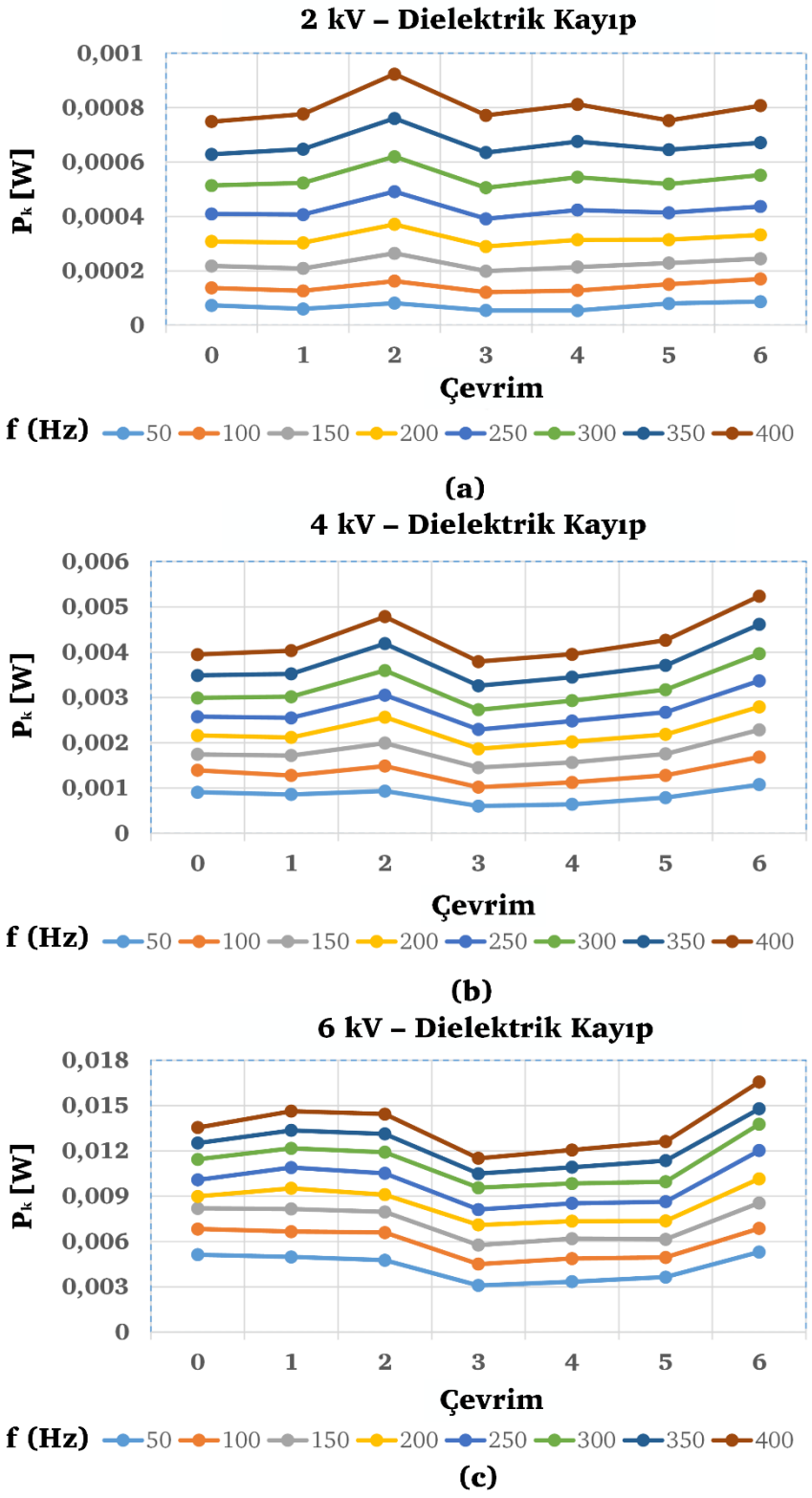
Tablo 4.12 PET dielektrik kayıp faktörü değerleri

tanδ								
2 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.00214	0.00201	0.00213	0.00226	0.00240	0.00251	0.00264	0.00275
1	0.00156	0.00165	0.00181	0.00198	0.00212	0.00227	0.00241	0.00253
2	0.00240	0.00239	0.00260	0.00274	0.00290	0.00305	0.00322	0.00341
3	0.00160	0.00178	0.00194	0.00212	0.00230	0.00247	0.00266	0.00283
4	0.00162	0.00191	0.00213	0.00235	0.00254	0.00272	0.00289	0.00304
5	0.00237	0.00223	0.00226	0.00234	0.00246	0.00257	0.00274	0.00279
6	0.00261	0.00256	0.00245	0.00250	0.00263	0.00276	0.00289	0.00304
%Fark	22.3615	27.5303	15.0673	10.3760	9.1723	9.9572	9.3737	10.5809
4 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.00664	0.00511	0.00426	0.00396	0.00378	0.00365	0.00365	0.00362
1	0.00557	0.00415	0.00372	0.00344	0.00331	0.00327	0.00327	0.00329
2	0.00688	0.00548	0.00490	0.00473	0.00450	0.00442	0.00442	0.00442
3	0.00442	0.00373	0.00354	0.00342	0.00336	0.00333	0.00342	0.00348
4	0.00479	0.00420	0.00390	0.00378	0.00371	0.00365	0.00369	0.00370
5	0.00585	0.00474	0.00433	0.00405	0.00396	0.00392	0.00393	0.00395
6	0.00805	0.00631	0.00571	0.00524	0.00505	0.00496	0.00495	0.00491
%Fark	21.2653	23.6353	33.8077	32.2771	33.7721	35.7419	35.4090	35.7880
6 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.01659	0.01108	0.00888	0.00730	0.00656	0.00621	0.00582	0.00552
1	0.01428	0.00958	0.00783	0.00687	0.00629	0.00586	0.00552	0.00529
2	0.01550	0.01076	0.00869	0.00745	0.00689	0.00651	0.00615	0.00592
3	0.01002	0.00731	0.00624	0.00577	0.00528	0.00519	0.00488	0.00469
4	0.01103	0.00806	0.00684	0.00610	0.00566	0.00544	0.00518	0.00501
5	0.01193	0.00813	0.00673	0.00605	0.00568	0.00546	0.00534	0.00519
6	0.01755	0.01141	0.00946	0.00844	0.00799	0.00763	0.00703	0.00689
Fark %	5.7778	2.9226	6.5378	15.5430	21.8281	22.9438	20.7892	24.9831
8 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.02021	0.01433	0.01115	0.00953	0.00861	0.00777	0.00708	0.00659
1	0.01956	0.01348	0.01075	0.00928	0.00847	0.00765	0.00720	0.00683
2	0.01877	0.01347	0.01102	0.00980	0.00885	0.00815	0.00775	0.00729
3	0.01699	0.01164	0.00934	0.00834	0.00749	0.00702	0.00668	0.00632

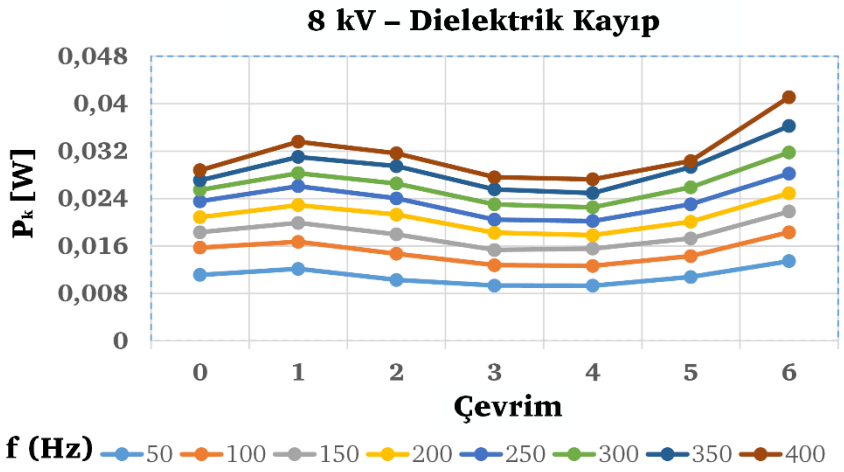
Tablo 4.12 PET dielektrik kayıp faktörü değerleri (devamı)

4	0.01726	0.01175	0.00966	0.00831	0.00754	0.00702	0.00665	0.00636
5	0.01979	0.01318	0.01064	0.00927	0.00851	0.00797	0.00773	0.00701
6	0.02496	0.01704	0.01356	0.01162	0.01053	0.00988	0.00967	0.00959
%Fark	23.5416	18.8936	21.6716	21.9810	22.3753	27.1901	36.5547	45.5997
10 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.02929	0.02122	0.01704	0.01418	0.01239	0.01114	0.01024	0.00916
1	0.02970	0.02309	0.01907	0.01568	0.01430	0.01300	0.01213	0.01130
2	0.03097	0.02262	0.01827	0.01552	0.01343	0.01214	0.01127	0.01040
3	0.02518	0.01874	0.01530	0.01277	0.01114	0.01008	0.00935	0.00881
4	0.02281	0.01560	0.01261	0.01079	0.00960	0.00880	0.00825	0.00776
5	0.03107	0.02213	0.01746	0.01519	0.01369	0.01382	0.01666	0.02183
6	0.03613	0.02662	0.02143	0.01858	0.01803	0.01791	0.02001	0.02230
%Fark	23.3506	25.4464	25.7887	31.0345	45.4952	60.7675	95.3350	143.461
12 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.04180	-	-	-	-	-	-	-
1	0.04938	-	-	-	-	-	-	-
2	0.04584	-	-	-	-	-	-	-
3	0.03853	-	-	-	-	-	-	-
4	0.03534	-	-	-	-	-	-	-
5	0.07185	-	-	-	-	-	-	-
6	0.08336	-	-	-	-	-	-	-
%Fark	99.4	-	-	-	-	-	-	-

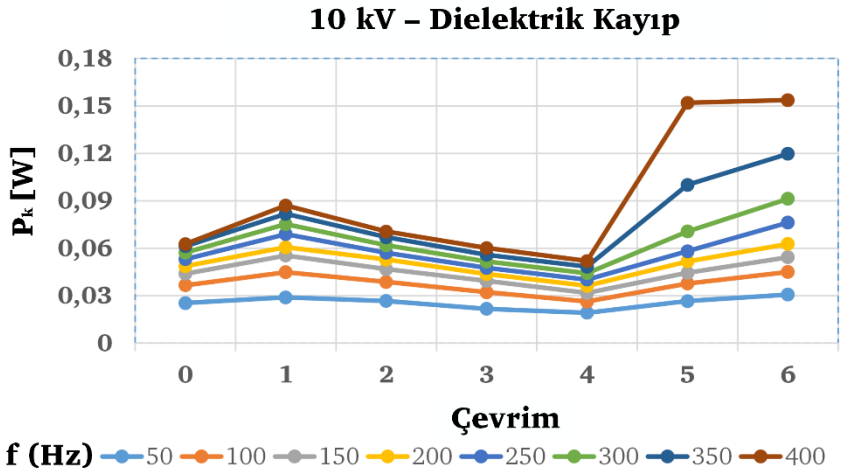
Tablo 4.12'de gösterilen PET malzemeye ait dielektrik kayıp faktörü değerleri, ısıl yaşlandırma karşısında dielektrik kayıp değerlerinde görülen değişim ile uyumlu şekilde değişmiştir. 2 kV'daki tanδ değerleri arasında en düşük değerler 50 Hz frekansında görülmüş ve frekans arttıkça tanδ değerleri de artış göstermiştir. Diğer gerilimlerde bu durum tam tersidir. Bunun yanında, 5. yaşlandırma çevriminden sonra 50 Hz'te görülen kayıp faktöründeki artış, dikkate değerdir. Şekil 4.14'ten de görüleceği üzere, test geriliminin seviyesi yükseldikçe, tanδ en yüksek değerlerini 50 Hz'lik gerilimlerde almış ve frekans yükseldikçe düşüş yaşamıştır. Diğer frekanslardaki tanδ değerleri birbirlerine çok yakın seyrederken, 50 Hz'te görülen tanδ, gerilim seviyesi yükseldikçe diğer frekanslardaki tanδ değerleri ile olan farkını arttırmıştır.



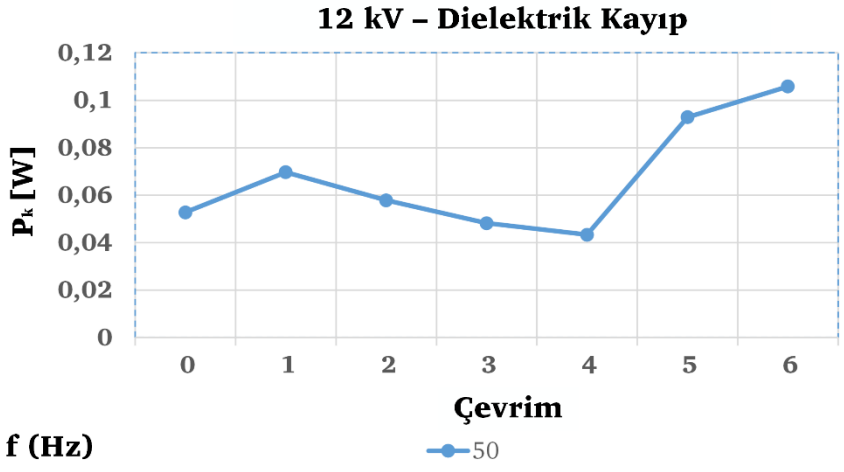
Şekil 4.13 PET dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV



(d)

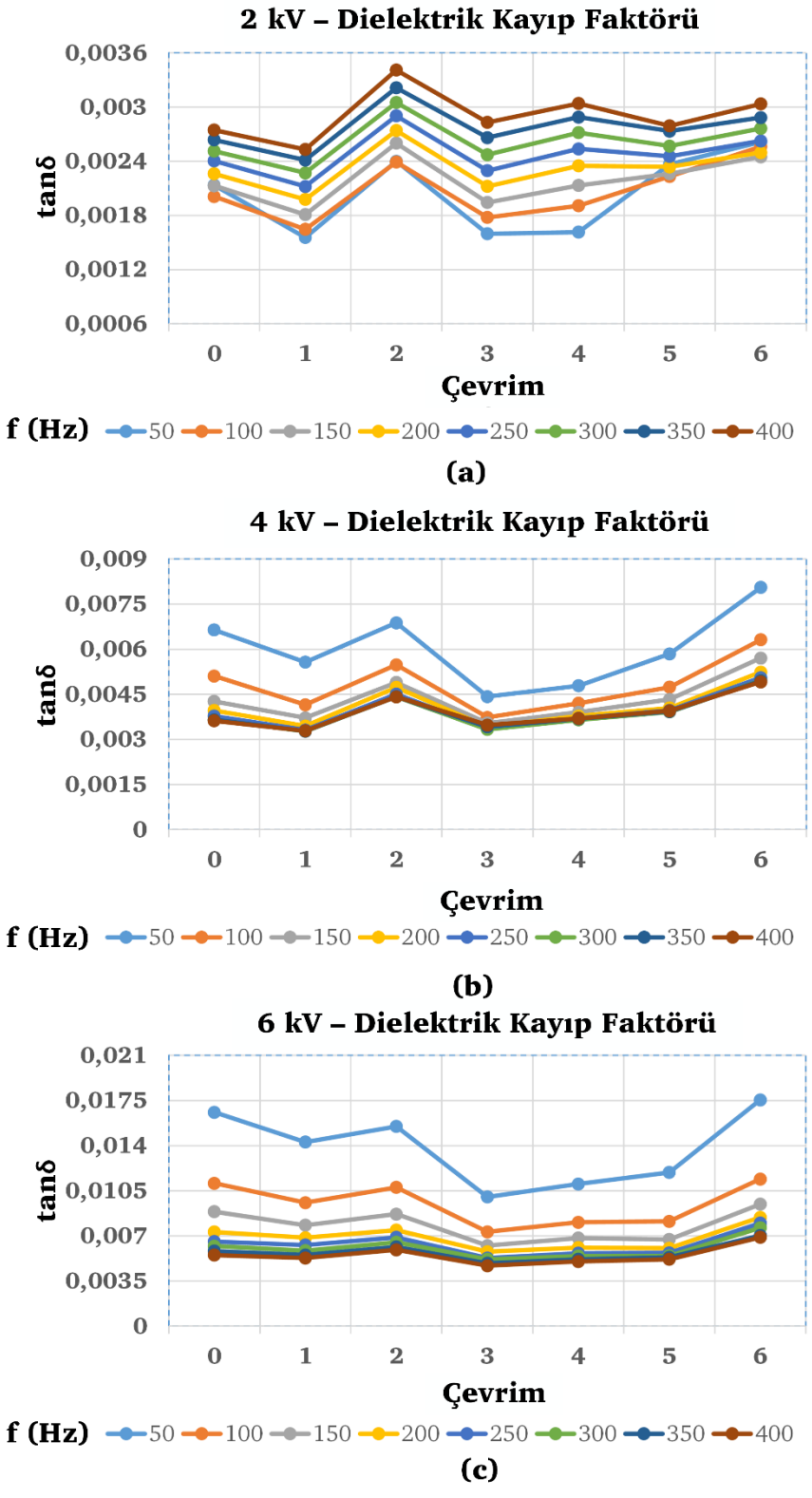


(e)

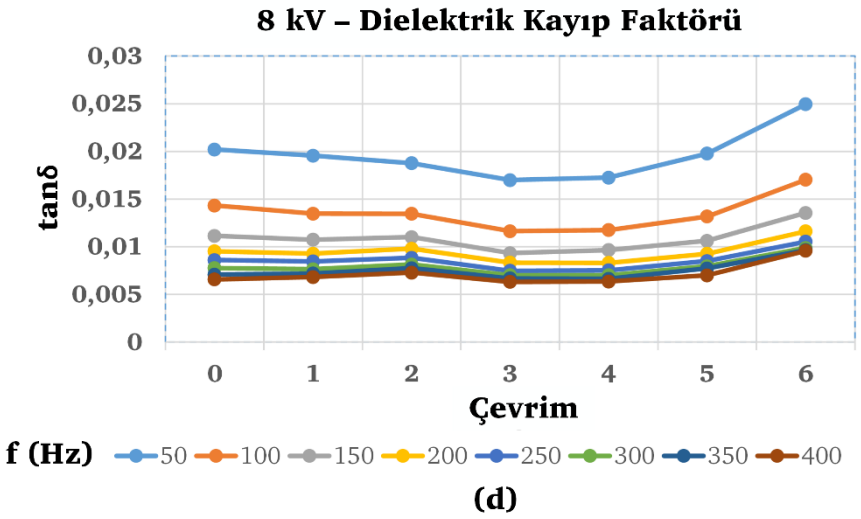


(f)

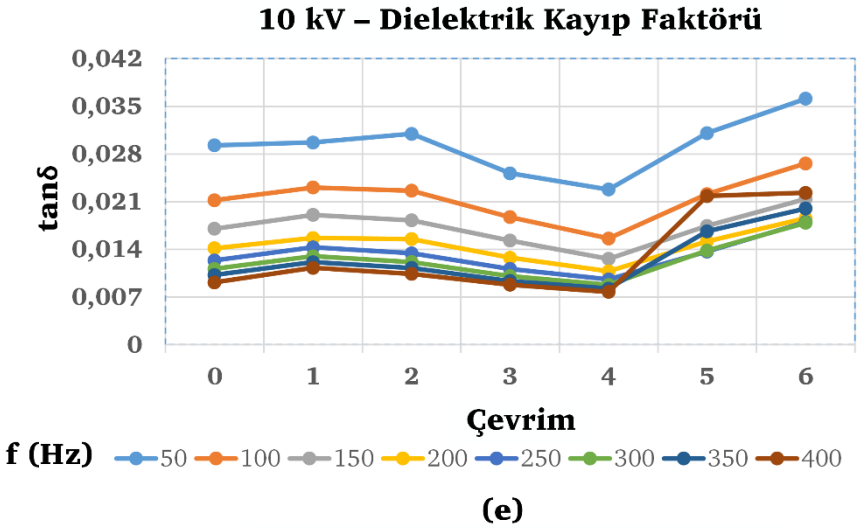
Şekil 4.13 PET dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV (devamı)



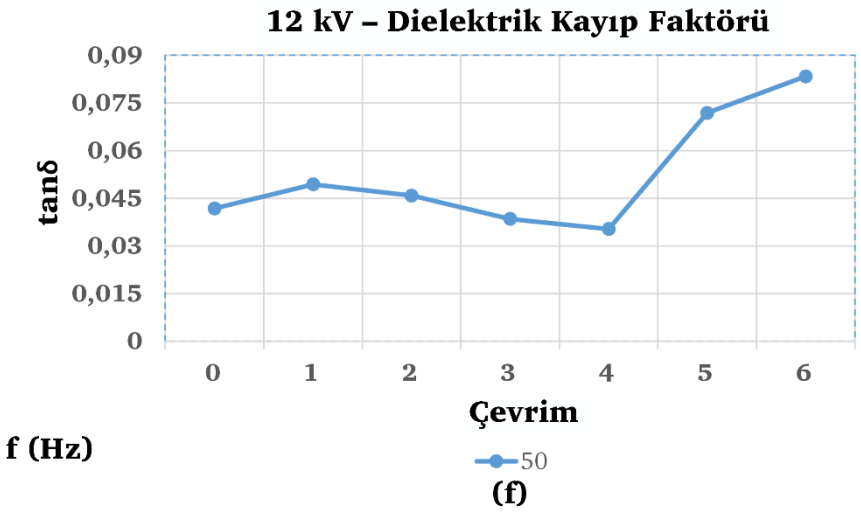
Şekil 4.14 PET dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.14 PET dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV (devamı)

- **YYPE Ölçüm Sonuçları**

YYPE yalıtkanın, farklı frekans ve gerilimlerde gösterdiği dielektrik performansını gösteren, dielektrik kayıp ve tanδ ölçüm sonuçları Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'de verilmiştir. Bu değerlerin, ısıl yaşlandırma ile değişimine ait grafikler ise Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir

Tablo 4.13 YYPE dielektrik kayıp değerleri

Dielektrik Kayıp [mW]								
2 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0363	0.0558	0.0683	0.0771	0.0853	0.0897	0.0940	0.0958
1	0.0309	0.0482	0.0608	0.0699	0.0773	0.0829	0.0874	0.0910
2	0.0293	0.0450	0.0571	0.0665	0.0733	0.0790	0.0834	0.0859
3	0.0373	0.0578	0.0730	0.0834	0.0918	0.0984	0.1028	0.1072
4	0.0301	0.0464	0.0587	0.0686	0.0764	0.0821	0.0867	0.0916
5	0.0341	0.0569	0.0725	0.0845	0.0943	0.1008	0.1064	0.1108
6	0.0344	0.0552	0.0708	0.0823	0.0918	0.0995	0.1059	0.1107
%Fark	-5.2683	-1.1149	3.6848	6.7610	7.5515	10.8961	12.7197	15.6192
4 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.1414	0.2173	0.2713	0.3123	0.3426	0.3617	0.3697	0.3771
1	0.1153	0.1846	0.2323	0.2696	0.2970	0.3176	0.3303	0.3412
2	0.1063	0.1689	0.2164	0.2440	0.2668	0.2855	0.2967	0.3059
3	0.1502	0.2348	0.2912	0.3347	0.3680	0.3914	0.4064	0.4203
4	0.1187	0.1841	0.2332	0.2728	0.3033	0.3282	0.3424	0.3586
5	0.1379	0.2269	0.2910	0.3384	0.3755	0.4034	0.4207	0.4376
6	0.2142	0.2959	0.3578	0.4062	0.4452	0.4766	0.4956	0.5131
%Fark	51.4440	36.2075	31.8780	30.0536	29.9351	31.7733	34.0688	36.0536
6 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.3152	0.4848	0.6089	0.6968	0.7533	0.7986	0.8373	0.8758
1	0.2517	0.4076	0.5186	0.6054	0.6647	0.7107	0.7476	0.7904
2	0.2209	0.3582	0.4449	0.5090	0.5461	0.5806	0.5982	0.6296
3	0.3397	0.5332	0.6659	0.7614	0.8302	0.8843	0.9278	0.9714
4	0.2736	0.4270	0.5375	0.6283	0.6940	0.7518	0.7967	0.8400
5	0.3106	0.5165	0.6605	0.7688	0.8452	0.9082	0.9555	1.0038

Tablo 4.13 YYPE dielektrik kayıp değerleri (devamı)

6	1.0952	1.2823	1.4209	1.5291	1.6047	1.6698	1.7217	1.7733
%Fark	247.463	164.476	133.357	119.444	113.009	109.094	105.636	102.470
8 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.5526	0.8607	1.0880	1.2395	1.3463	1.4009	1.4620	1.5286
1	0.4378	0.7142	0.9166	1.0638	1.1745	1.2776	1.3473	1.4123
2	0.3808	0.6643	0.8040	0.9602	1.0482	1.0716	1.1347	1.1628
3	0.6033	0.9519	1.1917	1.3614	1.4930	1.6084	1.6900	1.7544
4	0.4801	0.7570	0.9637	1.1201	1.2486	1.3608	1.4502	1.5215
5	0.5540	0.9240	1.1861	1.3753	1.5239	1.6455	1.7410	1.8110
6	1.3222	1.6537	1.8965	2.0820	2.2312	2.3582	2.4556	2.5314
%Fark	139.248	92.1286	74.3108	67.9747	65.7313	68.3378	67.9614	65.6043
10 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.8524	1.3982	1.6812	1.8880	2.1633	2.3294	2.4049	2.4955
1	0.6500	1.0936	1.4043	1.6648	1.8543	2.0061	2.1122	2.1965
2	0.5740	0.9945	1.2432	1.4429	1.6303	1.7415	1.8206	1.8782
3	0.9435	1.5222	1.8649	2.1425	2.3605	2.5276	2.6679	2.7720
4	0.7429	1.1845	1.5095	1.7735	1.9939	2.1675	2.3112	2.4228
5	0.8645	1.4480	1.8551	2.1594	2.4100	2.5957	2.7454	2.8634
6	1.7911	2.3162	2.6929	2.9895	3.2299	3.4141	3.5715	3.6890
%Fark	110.117	65.6614	60.1776	58.3484	49.3040	46.5612	48.5085	47.8274
12 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	1.1719	1.9974	2.4716	2.8252	3.0514	3.3039	3.4038	3.4310
1	0.9084	1.5301	2.0215	2.3615	2.6033	2.8109	2.9638	3.0674
2	0.7561	1.3696	1.6744	2.0186	2.2492	2.4753	2.6599	2.8707
3	1.3634	2.1965	2.7019	3.1107	3.4217	3.6769	3.8734	4.0218
4	1.0368	1.6642	2.1209	2.5062	2.8289	3.0627	3.3217	3.4515
5	1.2431	2.0804	2.6776	3.1376	3.4797	3.7650	3.9857	4.1592
6	2.1046	2.8438	3.3655	3.7908	4.2413	5.3924	5.6092	6.7754
%Fark	79.5910	42.3796	36.1648	34.1810	38.9959	63.2123	64.7925	97.4768

2 kV 50 Hz'deki kayıplar ısıl yaşlandırma sonucunda %5.26'lık bir azalma yaşarken, frekans miktarı yükseldikçe 150 Hz'den itibaren ısıl yaşlandırma ile dielektrik kayıpta görülen değişim azalıştan artışa dönmüştür. Diğer ölçüm

gerilimleri ile elde edilen kayıp değerleri, tüm frekanslarda, yaşlandırma sonucunda artmıştır. Numunelerin kayıp değerleri, ısıl yaşlandırma sırasında ilk 2 çevrim boyunca azalma eğilimindeyken, 3. Çevrim ile birlikte artışa geçmiştir. Özellikle, 5. ve 6. çevrimde, kayıplardaki artış net şekilde görülmektedir. Örnek vermek gerekirse, 50 Hz 4 kV'daki kayıp değerleri, 2. çevrim sonunda, referans değere göre %22 azalmıştır. 3. çevrim sonunda ise referans değere göre %8'lik bir artış göstermiştir. Isıl yaşlandırma sonucunda dielektrik kayıptaki toplam artış %51.4 olmuştur.

Artış miktarları frekans bazında değerlendirilirse, 2 kV'tan sonraki gerilimlerde kayıplardaki artış 50 Hz frekanslı gerilimlerde diğer frekanslara göre çok daha fazladır. Örneğin, 6 kV geriliminde, 50 Hz sonuçlarında %247'lİk bir artış görülürken, 200 Hz'de %119'luk, 400 Hz'de ise %102.4'lük artış meydana gelmiştir. Bu durum 12 kV'da dengelenmiş ve 50 ile 400 Hz'te görülen artış miktarları görece daha yakın değerlerde olmuştur.

Tablo 4.14 YYPE dielektrik kayıp faktörü değerleri

tanδ								
2 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0058	0.0045	0.0036	0.0031	0.0027	0.0024	0.0021	0.0019
1	0.0050	0.0039	0.0033	0.0028	0.0025	0.0022	0.0020	0.0018
2	0.0048	0.0037	0.0031	0.0027	0.0024	0.0022	0.0020	0.0018
3	0.0059	0.0046	0.0039	0.0033	0.0029	0.0026	0.0023	0.0021
4	0.0049	0.0038	0.0032	0.0028	0.0025	0.0022	0.0020	0.0019
5	0.0056	0.0046	0.0039	0.0034	0.0031	0.0027	0.0025	0.0022
6	0.0056	0.0044	0.0038	0.0033	0.0029	0.0027	0.0024	0.0022
%Fark	-4.6267	-0.3430	4.3048	7.2786	8.1780	11.6040	13.5389	16.4120
4 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0057	0.0043	0.0036	0.0031	0.0027	0.0024	0.0021	0.0019
1	0.0047	0.0037	0.0031	0.0027	0.0024	0.0021	0.0019	0.0017
2	0.0044	0.0035	0.0030	0.0025	0.0022	0.0020	0.0017	0.0016
3	0.0060	0.0047	0.0038	0.0033	0.0029	0.0026	0.0023	0.0021
4	0.0049	0.0038	0.0032	0.0028	0.0025	0.0022	0.0020	0.0018
5	0.0056	0.0046	0.0039	0.0034	0.0030	0.0027	0.0024	0.0022

Tablo 4.14 YYPE dielektrik kayıp faktörü değerleri (devamı)

6	0.0086	0.0059	0.0048	0.0041	0.0036	0.0032	0.0028	0.0026
%Fark	52.587	37.127	32.723	30.927	30.774	32.735	34.959	37.017
6 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0056	0.0043	0.0036	0.0031	0.0027	0.0024	0.0021	0.0019
1	0.0045	0.0036	0.0031	0.0027	0.0024	0.0021	0.0019	0.0018
2	0.0040	0.0033	0.0027	0.0023	0.0020	0.0018	0.0016	0.0014
3	0.0060	0.0047	0.0039	0.0033	0.0029	0.0026	0.0023	0.0021
4	0.0050	0.0039	0.0032	0.0028	0.0025	0.0023	0.0021	0.0019
5	0.0056	0.0047	0.0040	0.0035	0.0030	0.0027	0.0025	0.0023
6	0.0196	0.0115	0.0084	0.0068	0.0057	0.0050	0.0044	0.0040
%Fark	249.60	166.67	134.57	120.92	114.56	110.68	107.07	103.89
8 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0055	0.0043	0.0036	0.0031	0.0027	0.0023	0.0021	0.0019
1	0.0044	0.0036	0.0031	0.0027	0.0024	0.0021	0.0019	0.0018
2	0.0039	0.0034	0.0028	0.0025	0.0022	0.0018	0.0017	0.0015
3	0.0060	0.0047	0.0039	0.0034	0.0030	0.0026	0.0024	0.0022
4	0.0049	0.0039	0.0033	0.0029	0.0025	0.0023	0.0021	0.0019
5	0.0056	0.0047	0.0040	0.0035	0.0031	0.0028	0.0025	0.0023
6	0.0133	0.0083	0.0063	0.0052	0.0045	0.0039	0.0035	0.0032
%Fark	140.896	93.4433	75.6285	69.1801	66.8236	69.4542	69.0820	66.7232
10 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0055	0.0045	0.0036	0.0030	0.0028	0.0025	0.0022	0.0020
1	0.0042	0.0035	0.0030	0.0027	0.0024	0.0022	0.0019	0.0018
2	0.0038	0.0033	0.0027	0.0024	0.0021	0.0019	0.0017	0.0015
3	0.0060	0.0048	0.0039	0.0034	0.0030	0.0027	0.0024	0.0022
4	0.0049	0.0039	0.0033	0.0029	0.0026	0.0024	0.0022	0.0020
5	0.0056	0.0047	0.0040	0.0035	0.0031	0.0028	0.0025	0.0023
6	0.0115	0.0074	0.0058	0.0048	0.0041	0.0036	0.0033	0.0030
%Fark	111.443	66.8609	60.9902	59.3015	50.2165	47.4889	49.4694	48.8762
12 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.0052	0.0044	0.0036	0.0031	0.0027	0.0024	0.0021	0.0019
1	0.0041	0.0034	0.0030	0.0026	0.0023	0.0021	0.0019	0.0017
2	0.0035	0.0031	0.0025	0.0023	0.0020	0.0019	0.0017	0.0016

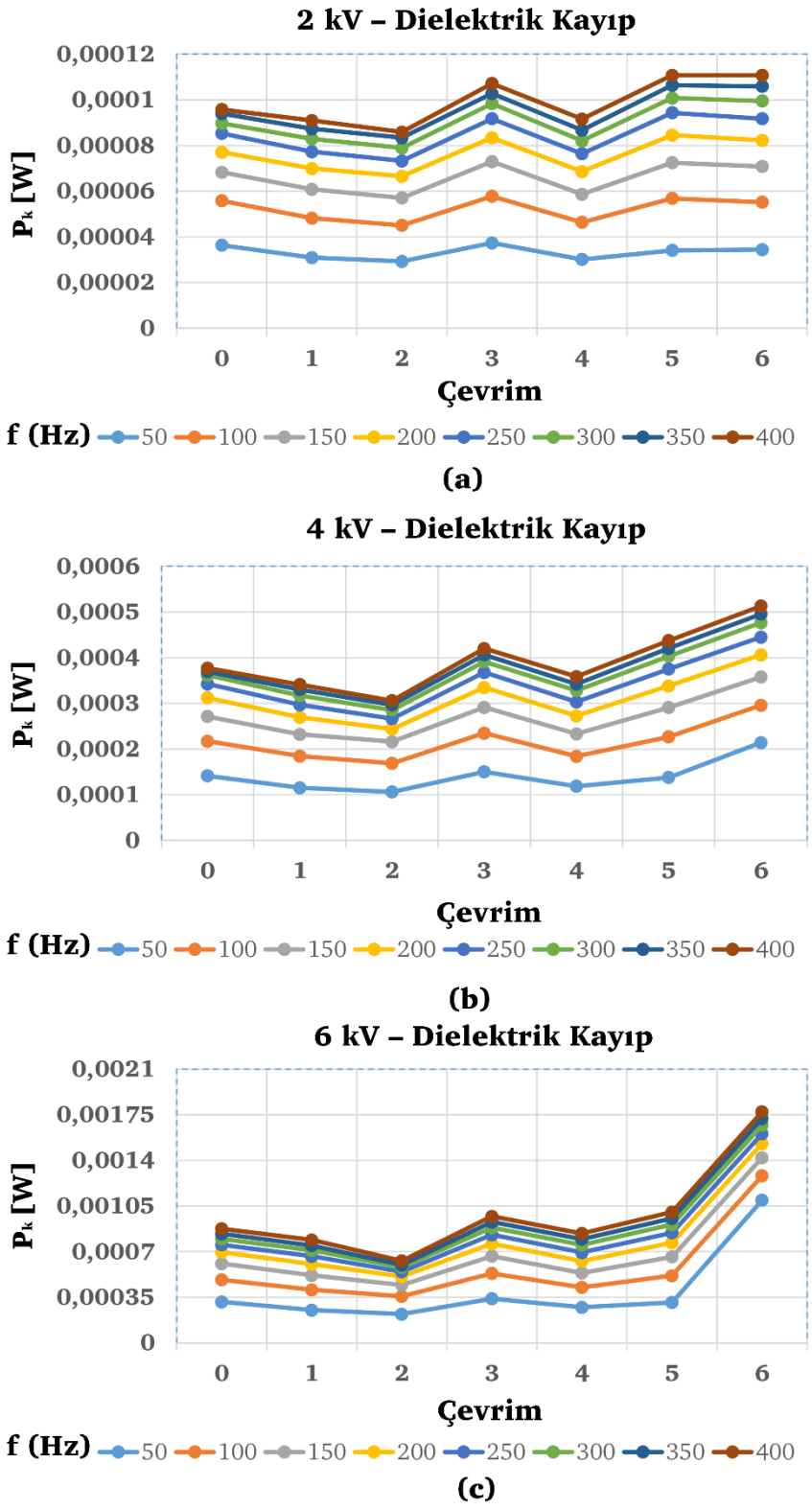
Tablo 4.14 YYPE dielektrik kayıp faktörü değerleri (devamı)

3	0.0060	0.0048	0.0039	0.0034	0.0030	0.0027	0.0024	0.0022
4	0.0047	0.0038	0.0032	0.0028	0.0026	0.0023	0.0021	0.0020
5	0.0056	0.0047	0.0040	0.0035	0.0031	0.0028	0.0026	0.0023
6	0.0094	0.0063	0.0050	0.0042	0.0038	0.0040	0.0036	0.0038
%Fark	80.6938	43.2334	36.9725	34.9339	39.8262	64.4838	65.9207	98.7378

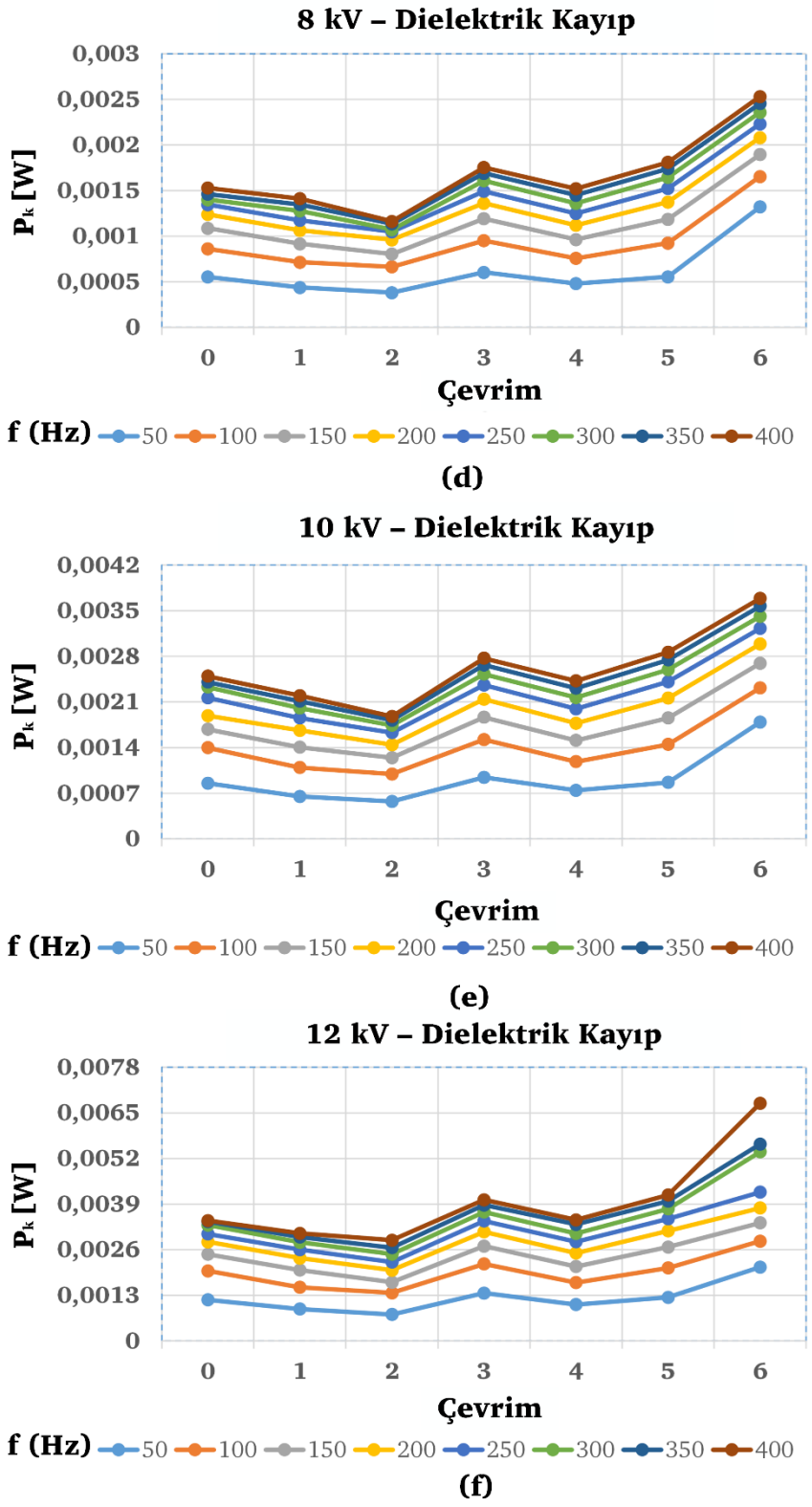
Tablo 4.14'de görüleceği üzere, tanδ, 50 Hz frekanstaki gerilimlerde diğer malzemeler ile uyumlu olarak en yüksek değerlerini almıştır. Şekil 4.16'da, 50 Hz'e ait tanδ değerlerinin diğer frekanslarda meydana gelen tanδ değerleri ile arasındaki farkın 6 kV'a kadar azaldığı ve daha yüksek gerilimlere çıkıldıkça tekrardan arttığı görülmektedir.

Bunun yanında, kayıp faktörü, ısıl yaşlandırma karşısında, beklenildiği üzere, kayıp değerleri ile uyumlu şekilde değişmiştir. Kaybın en çok artış gösterdiği 50 Hz 6 kV'luk gerilimde, kayıp faktörü, 6 çevrim sonucunda %249.6 oranında artmıştır. Ayrıca, 2 kV'dan büyük gerilimlerde, 50 Hz'te görülen tanδ değerlerinde 6. yaşlandırma itibariyle büyük bir artış meydana gelmiştir.

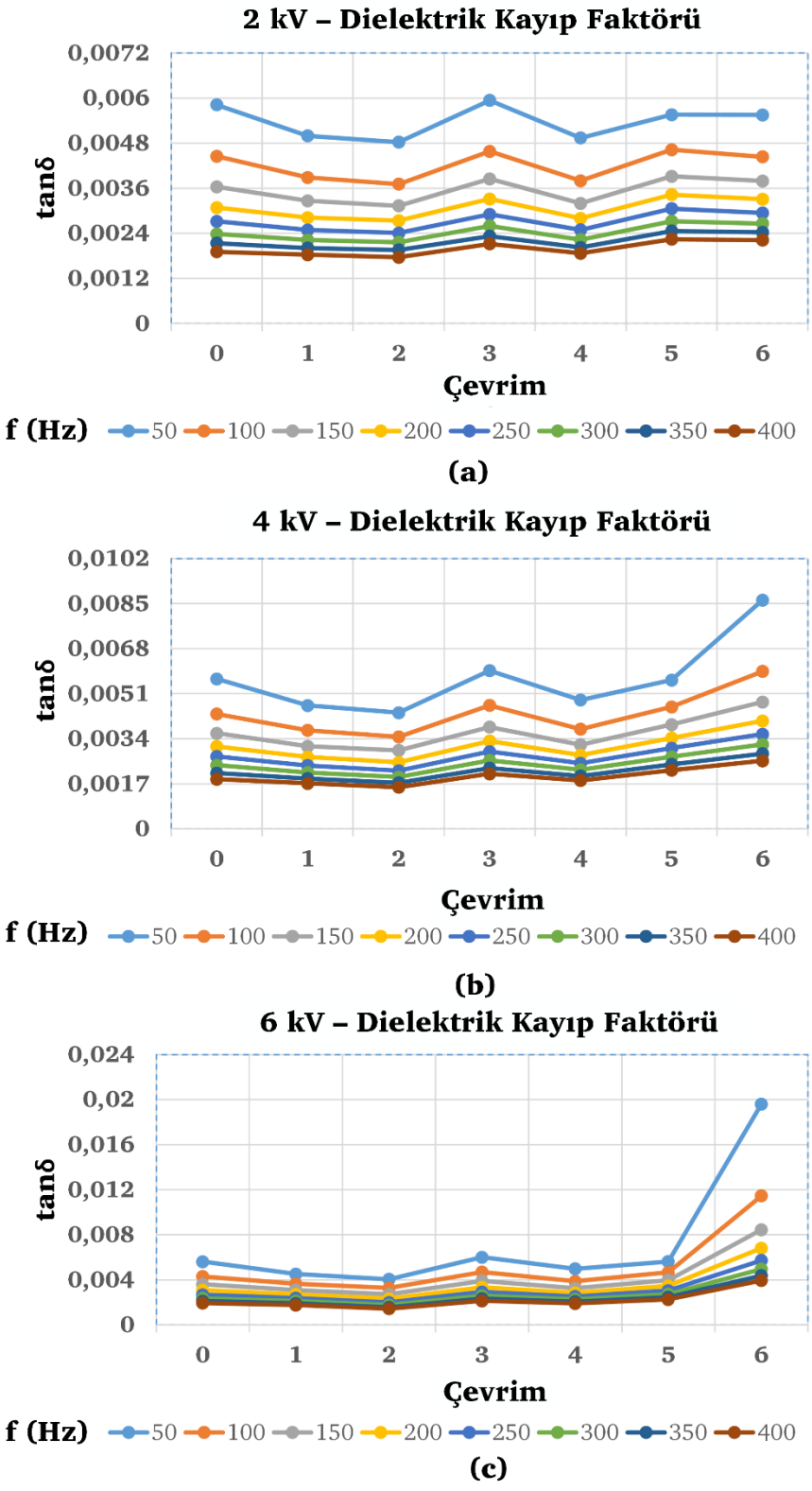
Şekil 4.15 incelendiğinde, 2. çevrime kadar kuruma etkisiyle meydana gelen dielektrik kayıpların azaldığı ve 3. çevrim ile birlikte artış eğilimine girdiği gözükmektedir. Ayrıca, gerilim seviyesi yükseldikçe, ısıl yaşlandırma çevrimlerinin daha etkili olmaktadır. Şekil 4.16'da görüldüğü üzere, temel frekansın üzerindeki tanδ değerleri, birbirlerine çok yakın değerlerde seyrederken; 50 Hz'deki tanδ, diğer frekanstakilere göre büyük oranlarda daha fazladır.



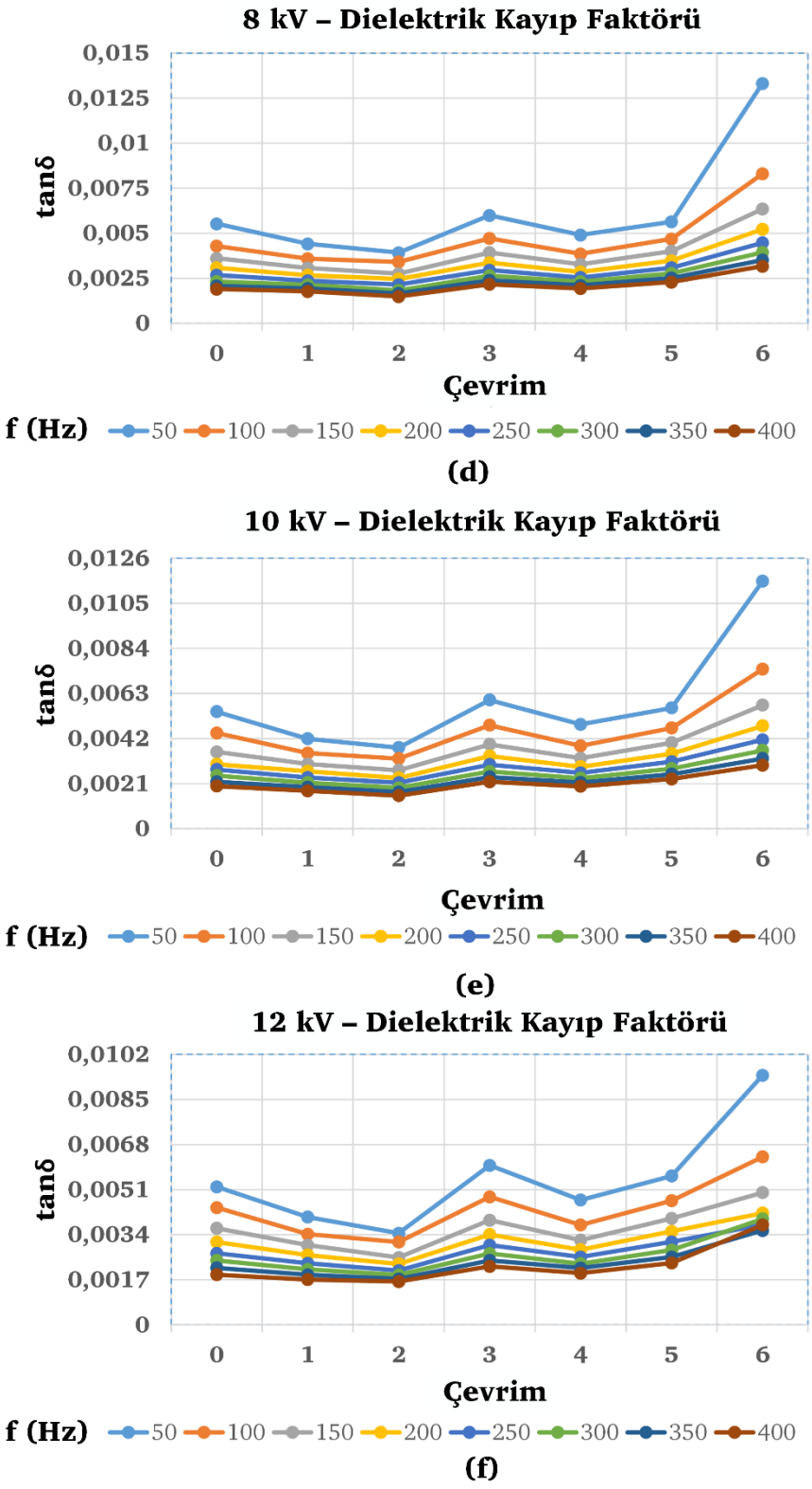
Şekil 4.15 YYPE dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV



Şekil 4.15 YYPE dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV (devamı)



Şekil 4.16 YYPE dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV



Şekil 4.16 YYPE dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV (devamı)

- **Prespan Ölçüm Sonuçları**

Prespan yalıtkanın farklı frekans ve gerilimlerdeki dielektrik kayıp ve tanδ ölçüm sonuçları Tablo 4.15 ve Tablo 4.16'da verilmiştir. Isıl yaşlandırma ile meydana gelen değişimlerin daha net şekilde görülebilmesi adına, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'deki grafikler paylaşılmıştır. Prespan yalıtkanın, dielektrik kayıp performansı için gerçekleştirilen değerlendirmeler, ilgili tablolar ve şekiller üzerinden yürütülmüştür.

Tablo 4.15 Prespan dielektrik kayıp değerleri

Dielektrik Kayıp [mW]								
2 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.23343	0.47523	0.72724	0.98816	1.25416	1.52864	1.80756	2.08810
1	0.16762	0.37815	0.60933	0.84796	1.10000	1.35886	1.62331	1.89375
2	0.17399	0.39181	0.62967	0.87328	1.12460	1.38357	1.64735	1.91643
3	0.16602	0.37404	0.60441	0.84093	1.08993	1.34616	1.60742	1.87603
4	0.16536	0.37396	0.59789	0.83116	1.07455	1.32360	1.58123	1.84136
5	0.18158	0.34109	0.53836	0.74555	0.96630	1.19455	1.42925	1.67248
6	0.20461	0.33653	0.52073	0.71024	0.90612	1.10778	1.31515	1.52747
%Fark	-12.348	-29.185	-28.396	-28.125	-27.750	-27.531	-27.241	-26.848
4 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	1.20940	2.23468	3.29907	4.38283	5.47711	6.59324	7.75323	8.90633
1	0.96921	1.89555	2.86353	3.85284	4.87847	5.92725	7.02116	8.11304
2	0.86532	1.79140	2.76465	3.76604	4.78881	5.83512	6.92091	8.00221
3	0.90070	1.83494	2.79565	3.79174	4.80145	5.83366	6.91806	7.99730
4	0.93679	1.83572	2.78880	3.75260	4.74669	5.75648	6.81103	7.85702
5	0.78051	1.55345	2.36425	3.21704	4.10826	5.03119	6.01390	6.98506
6	0.86356	1.61817	2.37580	3.15131	3.95510	4.77375	5.62573	6.46455
%Fark	-28.596	-27.588	-27.985	-28.098	-27.788	-27.596	-27.440	-27.416
6 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	3.75295	6.17713	8.74011	11.2749	13.9119	16.4772	19.1319	21.7118
1	3.69747	5.97853	8.36782	10.8367	13.3137	15.7763	18.2396	20.7225
2	3.00119	5.24961	7.59645	9.99775	12.4381	14.8764	17.2961	19.7291
3	3.39622	5.70946	8.02143	10.3854	12.8161	15.1916	17.6260	20.0496

Tablo 4.15 Prespan dielektrik kayıp değerleri (devamı)

4	3.44498	5.70388	8.03485	10.3968	12.8025	15.1615	17.5666	19.9634
5	2.40631	4.30102	6.31329	8.40373	10.5774	12.7346	14.9148	17.0711
6	2.87001	4.84840	6.77361	8.67530	10.6243	12.5403	14.5327	16.3885
%Fark	-23.526	-21.510	-22.500	-23.057	-23.632	-23.893	-24.042	-24.518
8 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	9.6539	14.4115	19.1060	23.9691	28.7995	33.7003	38.5361	43.2977
1	10.0937	15.2189	19.9516	24.6912	29.5262	34.3335	39.0756	43.4708
2	8.2347	12.6866	17.1875	21.8510	26.4346	31.2671	35.9757	40.3996
3	9.5072	14.3038	19.0034	23.6324	28.1420	32.9734	37.5674	41.9704
4	9.6817	14.6961	19.3683	24.1047	28.5770	33.0391	37.5846	41.8214
5	6.4931	10.5040	14.5738	18.7171	22.8900	27.1251	31.3187	35.3283
6	7.9749	12.3939	16.4024	20.3408	24.2361	28.0936	31.9100	35.4854
%Fark	-17.391	-13.999	-14.150	-15.137	-15.845	-16.637	-17.194	-18.043
10 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	18.8974	27.9557	36.1979	44.5955	52.9362	61.2373	69.1699	76.8919
1	21.9188	31.8116	40.1022	48.1727	55.9955	64.1894	71.9553	79.0447
2	18.4957	27.1561	35.1462	43.1756	50.4450	58.1803	65.5974	72.6574
3	22.5807	32.3377	41.0582	48.7932	56.4764	64.2930	72.1279	78.9746
4	22.4521	32.6065	40.9040	48.7443	56.5326	64.2030	72.2131	78.9699
5	15.9196	-	-	-	-	-	-	-
6	20.0736	-	-	-	-	-	-	-
%Fark	6.2238	16.6365	13.0012	9.3031	6.7940	4.8430	4.3997	2.7025
12 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	48.36	-	-	-	-	-	-	-
1	45.02	-	-	-	-	-	-	-
2	54.57	-	-	-	-	-	-	-
3	53.45	-	-	-	-	-	-	-
4	74.89	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
%Fark	54.8415	-	-	-	-	-	-	-

Prespan malzemede meydana gelen dielektrik kayıplar, diğer yalıtkanlara göre farklı davranış göstererek ısıl yaşlandırma ile birlikte 10 kV gerilime kadar

azalmıştır. İlgili azalma oranları, genel olarak %10-%30 aralığında olmuştur. Isıl yaşlandırma için, kritik olan gerilim seviyesi 10 kV'tur. İlgili gerilim seviyesinde, ısıl yaşlandırma sonucunda dielektrik kayıp değerleri artış göstermeye başlamış ve 4. yaşlanma çevriminden sonra temel frekans üzerindeki frekanslarda numuneler delinmiştir. 12 kV'luk test geriliminde ise dielektrik kayıp ölçümleri sadece 50 Hz'te 4. çevrime kadar alınabilmiş, sonraki çevrimlerin ardından numuneler delinmiştir. Gerilim seviyesinin yükselmesi, malzemeyi daha çok zorlamış ve ısıl yaşlandırmanın olumsuz etkisi yüksek gerilimlerdeki kayıplarda daha net şekilde görülmüştür. 50 Hz 10 kV'da, 4. çevrim itibariyle %19'luk bir artış görüldükten sonra temel frekansın üzerindeki frekanslarda delinme meydana gelmiştir. 50 Hz 12 kV'da delinme meydana gelmesinden önce ise kayıplar %54.8'lık bir artış göstermiştir. Bu malzeme özelinde, bu oranlar önem arz etmekte ve yalıtkan malzemenin delinme dayanımının azaldığını göstermektedir.

Delinme kaynaklı, yaşlandırmanın tamamlanamadığı tablolardaki "%Fark" satırları, referans değer ile tamamlanabilen son çevrime ait değer arasındaki farkı göstermektedir.

Tablo 4.16 Prespan dielektrik kayıp faktörü değerleri

tanδ								
2 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.00609	0.00622	0.00636	0.00648	0.00659	0.00669	0.00679	0.00687
1	0.00434	0.00491	0.00527	0.00553	0.00573	0.00590	0.00605	0.00617
2	0.00468	0.00529	0.00566	0.00590	0.00608	0.00624	0.00637	0.00649
3	0.00428	0.00484	0.00520	0.00544	0.00564	0.00581	0.00595	0.00608
4	0.00430	0.00487	0.00520	0.00543	0.00561	0.00577	0.00591	0.00602
5	0.00488	0.00458	0.00484	0.00503	0.00522	0.00538	0.00552	0.00565
6	0.00596	0.00490	0.00506	0.00518	0.00529	0.00540	0.00550	0.00558
%Fark	-2.284	-21.176	-20.403	-20.070	-19.702	-19.329	-19.011	-18.770
4 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.00788	0.00730	0.00720	0.00718	0.00719	0.00721	0.00728	0.00732
1	0.00627	0.00615	0.00619	0.00626	0.00634	0.00643	0.00653	0.00661
2	0.00581	0.00603	0.00621	0.00635	0.00647	0.00657	0.00668	0.00677

Tablo 4.16 Prespan dielektrik kayıp faktörü değerleri (devamı)

3	0.00579	0.00590	0.00601	0.00612	0.00621	0.00629	0.00640	0.00647
4	0.00608	0.00598	0.00605	0.00612	0.00620	0.00627	0.00636	0.00642
5	0.00524	0.00521	0.00530	0.00542	0.00554	0.00566	0.00580	0.00589
6	0.00627	0.00588	0.00577	0.00575	0.00578	0.00581	0.00587	0.00591
%Fark	-20.407	-19.45	-19.896	-19.923	-19.594	-19.428	-19.324	-19.232
6 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.01085	0.00896	0.00846	0.00820	0.00810	0.00801	0.00797	0.00792
1	0.01061	0.00860	0.00803	0.00781	0.00768	0.00759	0.00753	0.00749
2	0.00894	0.00785	0.00758	0.00749	0.00746	0.00745	0.00742	0.00741
3	0.00969	0.00817	0.00766	0.00745	0.00736	0.00728	0.00724	0.00721
4	0.00992	0.00824	0.00775	0.00752	0.00742	0.00733	0.00728	0.00724
5	0.00716	0.00641	0.00629	0.00628	0.00633	0.00635	0.00638	0.00640
6	0.00924	0.00784	0.00731	0.00703	0.00689	0.00678	0.00674	0.00665
%Fark	-14.791	-12.543	-13.692	-14.337	-14.965	-15.312	-15.471	-16.026
8 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.01565	0.01172	0.01040	0.00979	0.00942	0.00920	0.00902	0.00887
1	0.01624	0.01227	0.01077	0.01000	0.00958	0.00929	0.00907	0.00883
2	0.01377	0.01065	0.00964	0.00920	0.00891	0.00878	0.00867	0.00853
3	0.01521	0.01149	0.01019	0.00952	0.00908	0.00887	0.00867	0.00848
4	0.01563	0.01190	0.01049	0.00980	0.00930	0.00897	0.00875	0.00853
5	0.01085	0.00881	0.00816	0.00786	0.00770	0.00761	0.00753	0.00744
6	0.01442	0.01125	0.00993	0.00926	0.00883	0.00854	0.00831	0.00810
%Fark	-7.8858	-3.9887	-4.5012	-5.4725	-6.2479	-7.1759	-7.8589	-8.7236
10 kV								
f (Hz) / Çevrim / Yaş	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.01956	0.01453	0.01257	0.01163	0.01106	0.01068	0.01035	0.01007
1	0.02247	0.01636	0.01379	0.01245	0.01161	0.01109	0.01067	0.01026
2	0.01973	0.01454	0.01258	0.01161	0.01086	0.01045	0.01011	0.00980
3	0.02304	0.01656	0.01405	0.01255	0.01164	0.01106	0.01064	0.01020
4	0.02311	0.01686	0.01414	0.01266	0.01176	0.01114	0.01075	0.01029
5	0.01698	-	-	-	-	-	-	-
6	0.02311	-	-	-	-	-	-	-
%Fark	18.1543	16.0721	12.4688	8.85188	6.31980	4.36870	3.89146	2.22404

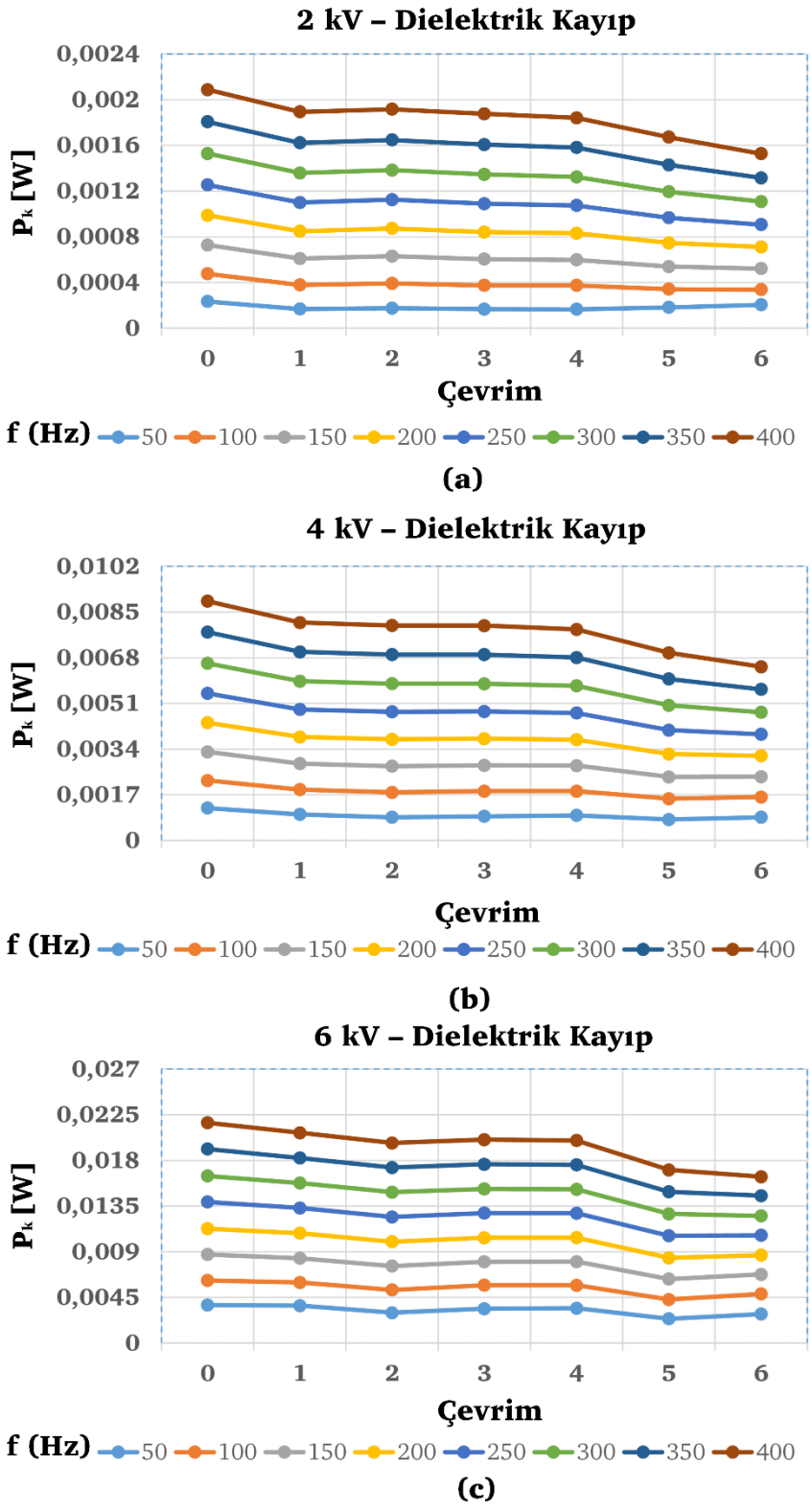
Tablo 4.16 Prespan dielektrik kayıp faktörü değerleri (devamı)

12 kV								
f (Hz) / Çevrim	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**
0	0.03394	-	-	-	-	-	-	-
1	0.03189	-	-	-	-	-	-	-
2	0.03992	-	-	-	-	-	-	-
3	0.03753	-	-	-	-	-	-	-
4	0.05319	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
%Fark	56.6784	-	-	-	-	-	-	-

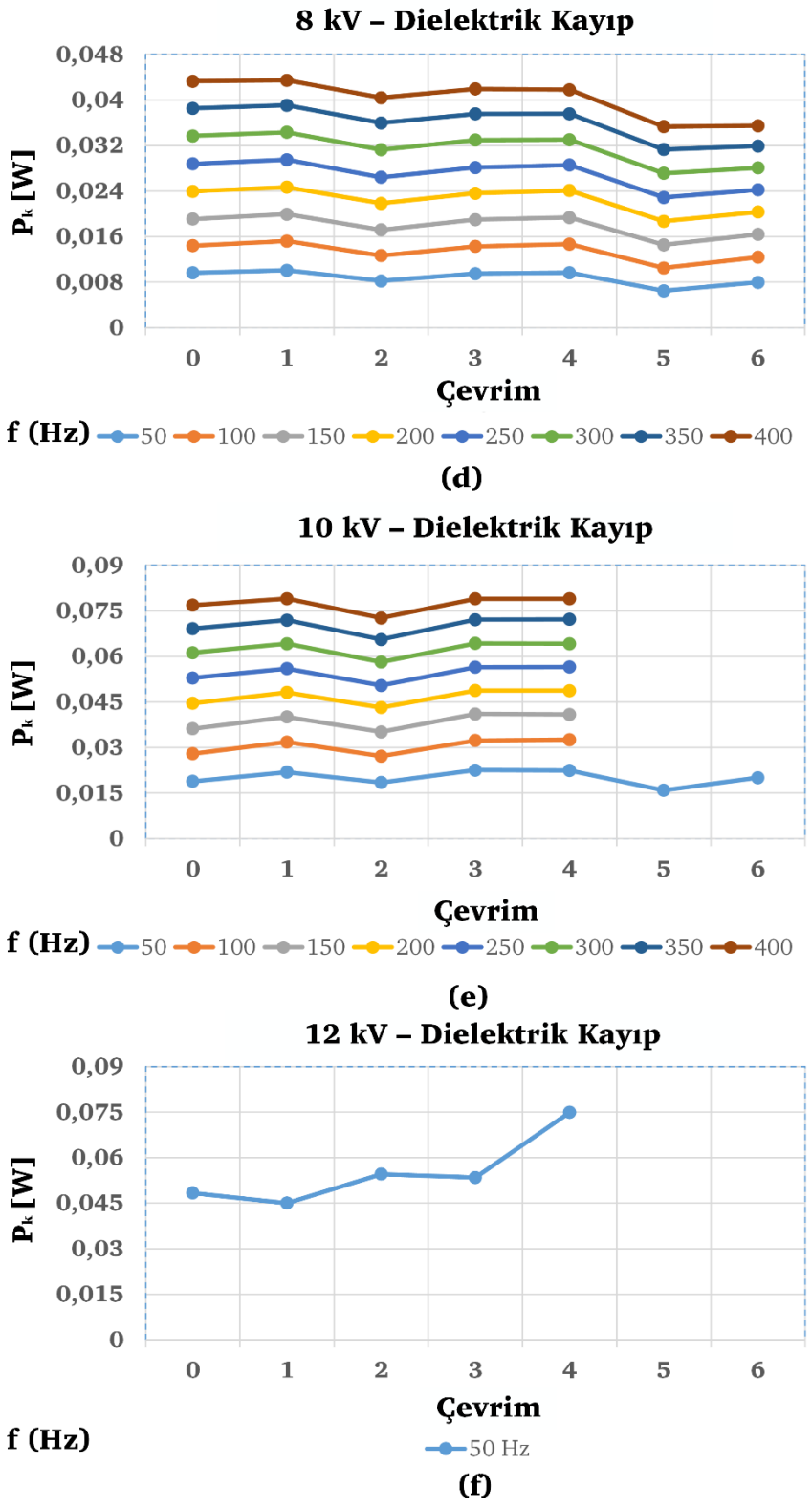
Tablo 4.16'da gösterilen prespana ait dielektrik kayıp faktörü değerleri, kayıp değerleri ile uyumlu şekilde değişmiş ve 10 kV gerilim seviyesine kadar ısıl yaşlandırma ile azalmıştır. 10 kV'a doğru ilerlendikçe, azalış miktarlarında belirgin bir düşüş görülmekte ve son olarak, kayıp faktörü değerleri yaşlandırma ile artışa geçmektedir. Isıl yaşlandırma sonucunda, 10 kV seviyesinde meydana gelen kayıp faktörlerindeki artış miktarları, temel frekanstan 400 Hz'e doğru azalmıştır. Isıl yaşlandırmanın sebep olduğu en yüksek artış ise %56.67 ile 50 Hz 12 kV'daki kayıp faktöründe meydana gelmiştir.

Prespana ait dielektrik kayıp ve dielektrik kayıp faktörü değerlerinin ısıl yaşlandırmaya bağlı değişiminin grafiği Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir. 50 Hz 2 kV'daki kayıp faktörü değeri, 5. çevrime kadar diğer frekanslara göre çok daha az değerler almıştır. 5. çevrimden sonra ise ciddi bir artış yaşanmıştır. Gerilim seviyesi yükseldikçe 50 Hz'e ait kayıp faktörü değerleri diğer frekanslara ait değerlerin üstüne çıkmış ve aralarındaki fark, test geriliminin yükselmesi ile birlikte artmıştır. Grafiklerden de görüleceği üzere, 50 Hz harici frekanslara ait dielektrik kayıp faktörleri birbirlerine çok yakın seyrederken, 6 kV ve sonrasında 100 ve 150 Hz'e ait dielektrik kayıp faktörleri de yüksek değerler alarak grafiklerde belirgin şekilde görülmeye başlanmıştır. 6. çevrim neticesinde ise tüm gerilim ve frekans değerlerinde kayıp faktörü değerlerinin büyük bir artış yaşadığı belirgin şekilde görülmektedir.

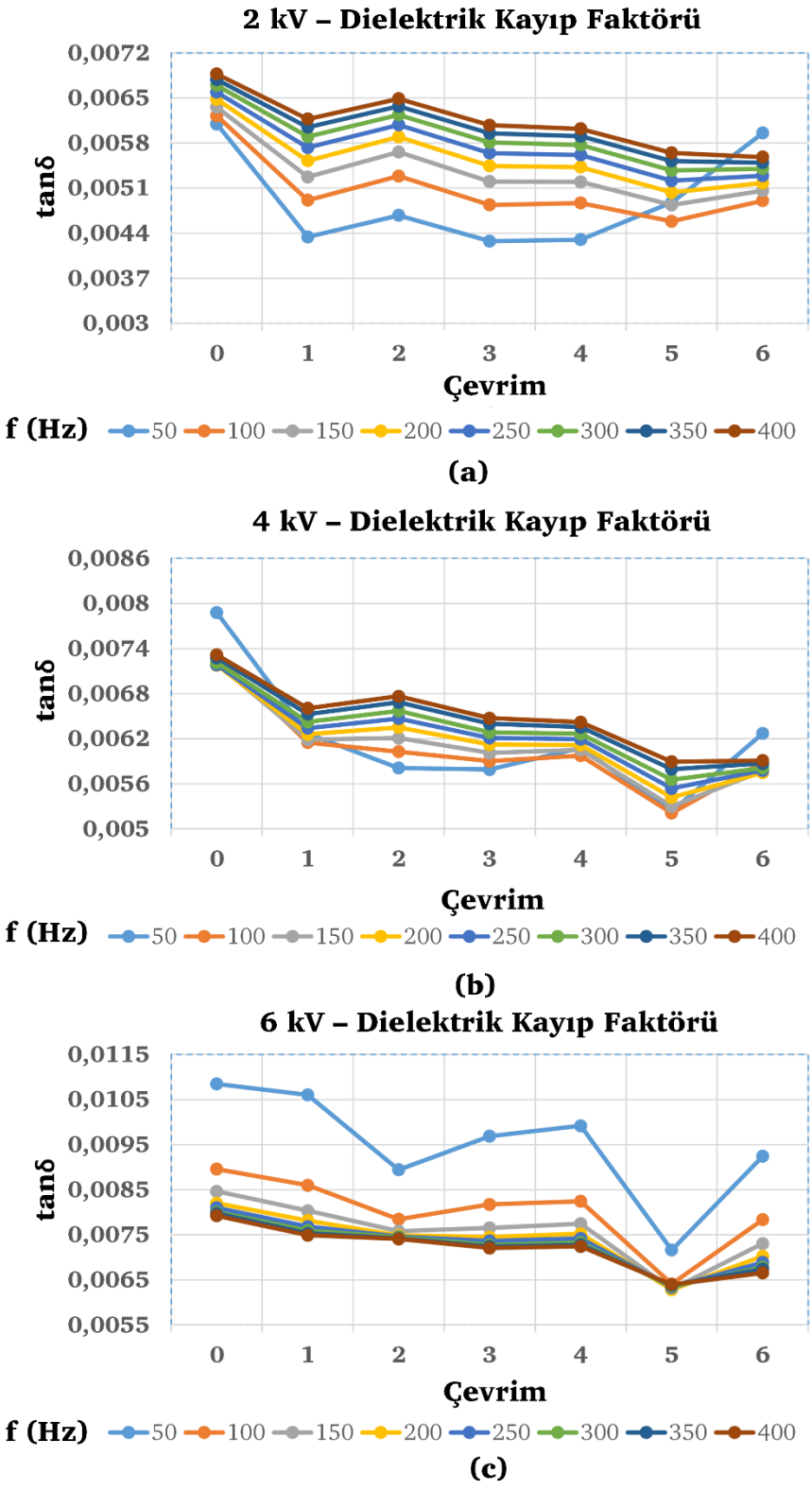
Dielektrik kaybın 10 kV'a kadar tüm gerilimlerde benzer bir davranış gösterdiği, 10 kV'da hafif şekilde artış eğilimine girdiği 12 kV'daki kayıplarda ise ısıl yaşlandırma ile net şekilde bir artış olduğu Şekil 4.17'de açık şekilde görülmektedir.



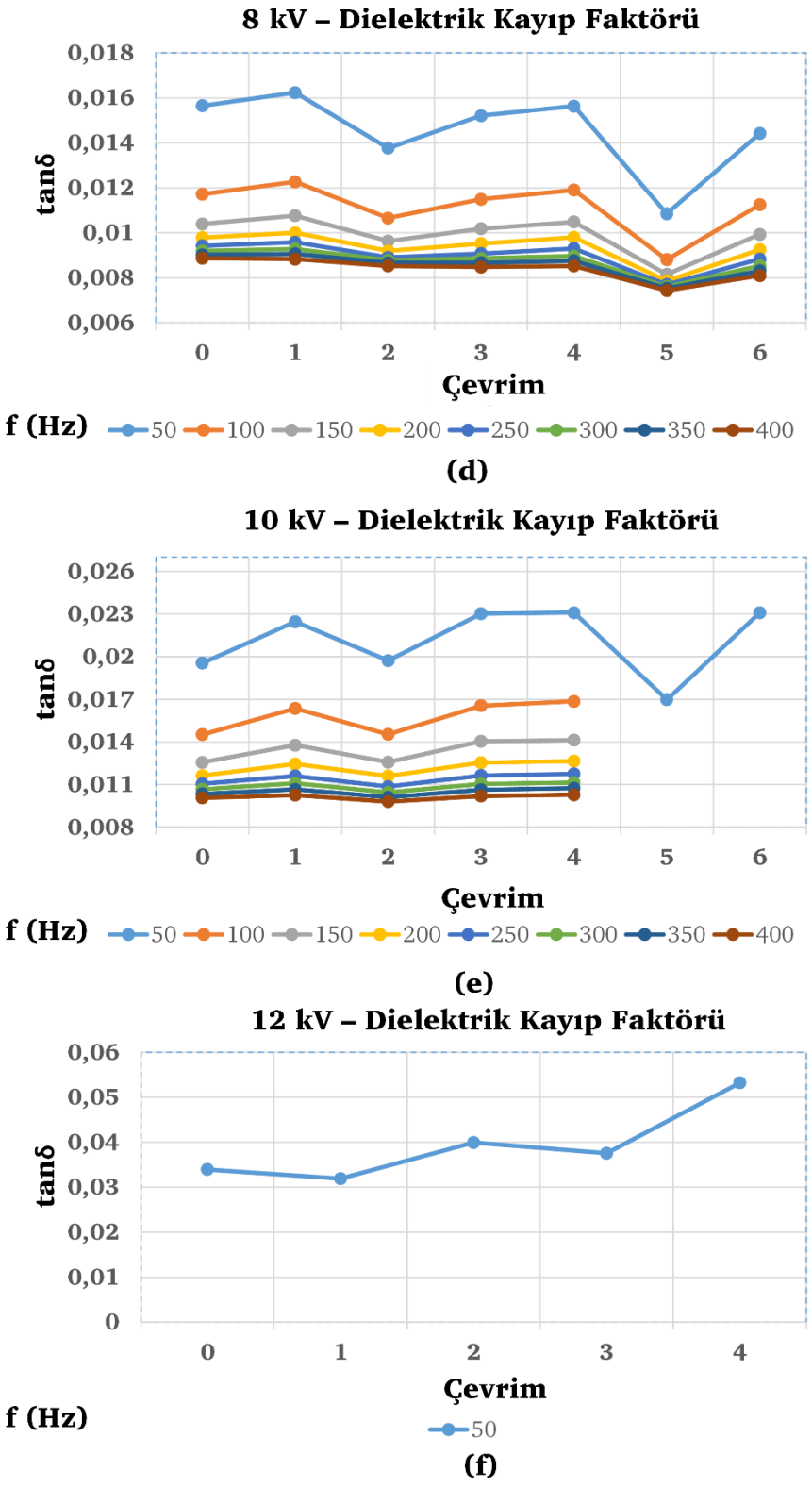
Şekil 4.17 Prespan dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV



Şekil 4.17 Prespan dielektrik kayıp sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV (devamı)



Şekil 4.18 Prespan dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV



Şekil 4.18 Prespan dielektrik kayıp faktörü sonuçları (a) 2 kV (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV (e) 10 kV (f) 12 kV (devamı)

- **Değerlendirme**

Tezin bu bölümünde; SBR/NR, PET, YYPE ve prespan malzemelerin dielektrik kayıp ve tanδ değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişimleri; 2-12 kV aralığında 2'şer kV'luk artışlar ile temel frekans ve 8 katına kadar olan katlarında takip edilmiştir.

SBR/NR özelinde, 10 kV'luk gerilime kadar olan gerilimlerde, ısıl yaşlandırmanın etkisi frekans yükseldikçe azalmıştır. Yani, frekans yükseldikçe, ısıl yaşlandırma sonundaki dielektrik kayıp ve kayıp faktöründeki artış miktarı azalmıştır. 10 ve 12 kV'da ise kayıplardaki frekans bazında artış miktarları birbirlerine daha yakın değerler almıştır. Çevrimler sırasında SBR/NR'nin davranışı için incelendiğinde, 2,4,6 ve 8 kV'daki dielektrik kayıp/kayıp faktörü değerleri 4. çevrime kadar düşüş eğilimindeyken, 10 ve 12 kV'daki dielektrik kayıp/kayıp faktörü değerleri için dip noktası 3. çevrim olmuştur. Tüm gerilimlerde ise kayıp değerlerindeki net artışın 5. çevrimden itibaren olduğu söylenebilmektedir. Yaşlandırılmamış numunede, 50 Hz 2 kV'daki kayıp değeri ile 50 Hz 12 kV'daki kayıplar karşılaştırıldığında, 39 katlık bir fark görülmektedir. 400 Hz frekansta, aynı karşılaştırılma yapıldığında değişim miktarı 35 kat olmuştur. Bu farklar, 6 çevrim süresince yaşlandırılmış numunede sırasıyla 40.7 kat ve 40 kattır. Yani, yaşlanmış numunelerde yüksek frekansta gerilim değişiminin etkisi daha çok artış göstermiştir.

PET yalıtkanda, yüksek frekanstaki kayıp değerlerinin ısıl yaşlandırmadan etkilenme miktarı gerilim seviyesi ile orantılı olarak artmıştır. Örneğin, 2 kV 400 Hz'teki dielektrik kayıplar 6 çevrim sonunda %7.7 artarken, 10 kV 400 Hz'deki kayıplar %145 artmıştır. Ayrıca, yaşlanmamış numunelerde, 50 Hz ve 400 Hz'te minimum ve maksimum gerilim seviyelerindeki kayıplar arasındaki farklar birbirlerine yakın değerlerdeyken, 6 çevrim yaşlanmış numunelerde, 400 Hz frekansta gerilim seviyesi uygulanabilen maksimum değerine çıkartıldığında, dielektrik kayıpta meydana gelen fark 50 Hz frekansta gerilim değişimi nedeniyle oluşan farka göre çok daha büyüktür. Yani, yaşlanmış numunelerde, yüksek frekans değerleri çok daha büyük dielektrik kayıplara neden olmaktadır. PET'in dielektrik kayıplarında görülen en büyük artış, 10 kV 400 Hz'deki kayıplarda

olmuştur. PET'in temel frekansın üzerindeki frekanslara sahip 12 kV gerilimde delindiği düşünüldüğünde, 10 kV'un yüksek frekans değerlerinde yalıtkan malzeme, ciddi şekilde zorlanmaktadır. Malzemenin, dayanım göstermekte zorlandığı gerilim seviyelerindeki kaybı, diğer gerilimlerdeki kayıplarına göre, ısıl yaşlandırma ile daha çok artış göstermiştir.

YYPE'nin dielektrik kayıp değerleri incelendiğinde, 50 Hz 2 kV ve 100 Hz 2 kV'daki kayıplarında, ısıl yaşlandırma sonucunda, %5,26'lık bir azalma söz konusu olduğu görülmektedir. Diğer tüm frekanslarda ve gerilimlerdeki kayıp değerleri ısıl yaşlandırma ile artış göstermiştir. Numunelerin kayıp değerleri, ilk iki çevrimde azalış gösterirken, 3. çevrim ile birlikte artmaya başlamıştır. 2 kV'dan sonraki gerilimlerde, temel frekanstaki kayıplar diğer frekanslardaki kayıplara göre ısıl yaşlandırma ile daha çok artış göstermiştir. Örneğin, 6 kV geriliminde, 50 Hz sonuçlarında %249'luk bir artış görülürken, 200 Hz'de %120'lik, 400 Hz'de ise %103.8'lik artış meydana gelmiştir. Bu durum, 12 kV'da dengelenmiş ve 50 ile 400 Hz'te görülen artış miktarları görece daha yakın değerlerde olmuştur.

Prespan malzemenin 2,4,6 ve 8 kV'daki dielektrik kayıpları, ısıl yaşlandırma ile %20-%30 aralıklarında düşüş yaşamıştır. 10 kV'daki dielektrik kayıpları ise ısıl yaşlandırma ile artmış ve 4. çevrimden sonra temel frekansın üzerinde frekansa sahip gerilimler numunelerde delinmeye neden olmuştur. Isıl yaşlandırma neticesinde, malzemenin yüksek frekanslardaki dayanımı azaltmıştır. Bunun yanında, 12 kV gerilimde, 4. Çevrime kadar sadece temel frekansta dielektrik kayıp ölçümleri alınabilmiş, diğer frekanslarda malzeme delinmiştir.

Isıl yaşlandırma sürecinde, malzemelerin dielektrik kayıpları, genellikle belirli bir çevrime kadar azalmış, ardından gelen ısıl yaşlandırma çevrimleri neticesinde yüksek miktarlarda artış göstererek başlangıç değerlerinin üzerine çıkmıştır. Bu davranış, [65], [66] çalışmalarında da bahsedilen kuruma etkisi ile açıklanabilir. Yalıtkan malzeme, ısıl zorlanma sürecine bırakıldığında ilk aşamalarda yapısındaki nemden arınmakta ve kurumaktadır. Kuruma sonucu malzemenin iletkenliği azalmakta ve böylelikle kayıplarında azalma meydana gelmektedir. İlerleyen süreçte, maruz kalınan sıcaklığın maksimum çalışma sıcaklıklarından

yüksek olmasından dolayı, bir noktadan sonra, kimyasal reaksiyonlar malzeme yapısına zarar vererek dielektrik kayıplarda artışa sebebiyet vermektedir. Bu eşik noktası, ilgili çalışmada; YYPE için 3. çevrime denk gelen 360. Saat, SBR/NR ve PET için 5. çevrime denk gelen 600. saat olmuştur. Prespanın davranışı farklı olduğu için prespan özelinde bir eşik saat tanımlamak mümkün değildir. Prespan için kritik olan durum, 10 kV ve 12 kV ölçümlerinde görülen, 4. çevrimden sonra meydana gelen delinme olayıdır. 10 kV ölçümlerinde, 4. çevrim sonunda %19'luk bir dielektrik kayıp artışı görüldükten sonra temel frekansın üzerindeki frekanslarda delinme meydana gelmiştir. 50 Hz 12 kV'da delinme meydana gelmesinden önce ise kayıplar %54.8'lık bir artış göstermiştir. Bu malzeme özelinde, bu oranlar önem arz etmekte ve yalıtkan malzemenin delinme dayanımının azaldığını göstermektedir.

Tüm malzemelerde kayıp faktörü değerlerinin ısıl yaşlandırma karşısındaki değişimi, dielektrik kayıplardaki değişimler ile orantılı şekilde olmuştur. Ölçüm alınan gerilim seviyesi arttıkça, kayıp faktörünün yaşlandırma ile değişimi daha belirgin olmuştur.

Ayrıca, malzemelerin dielektrik kayıp faktörleri değerleri genellikle, 50 Hz'te maksimum değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Gerilim seviyesi yükseldikçe, 50 Hz'deki kayıp faktörünün, diğer frekanslarda görülen dielektrik kayıp faktörleriyle olan farkı açılmıştır. Dielektrik kayıp faktörü, aktif kaybın reaktif kayba oranıdır. Frekans değeri yükseldikçe, reaktif kayıpta büyük miktarda artış yaşanacağından dolayı, yüksek frekanslarda, dielektrik kayıp faktörünün azalması beklenen bir sonuçtur.

4.3.1.2 Delinme Gerilimlerinin Isıl Yaşlandırma Karşısındaki Değişimi

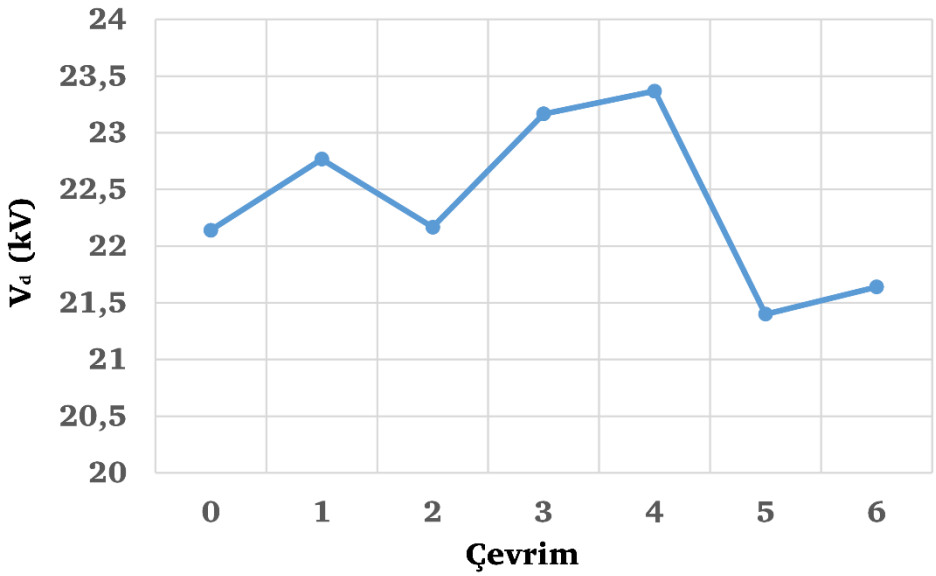
Yalıtkan malzemelerin AC gerilimler altındaki delinme dayanımının yanı sıra darbe gerilimleri altındaki dayanımı da önem arz etmektedir. Ayrıca, söz edilen iki tür gerilime karşı dayanımın ısıl yaşlandırma karşısında davranışı farklı olabilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde, PET, SBR/NR ve prespanın, ısıl

yaşlandırma karşısındaki delinme dayanımlarının değişimi, AC ve darbe gerilimleri altında incelenmiştir.

- **AC Delinme Geriliminin Isıl Yaşlandırma ile Değişimi**

Isıl yaşlandırma çevrimleri sonunda, AC delinme gerilimlerinin belirlenmesi için Şekil 4.3 a'da gösterilen eş silindir elektrot düzeneği kullanılarak Bölüm 3.5.1.1'de anlatılan "Yüksek Artış Hızlı Gerilimlerin Kullanıldığı Yöntem" uygulanmış ve çevrim başına her yalıtkandan 5'er numune test edilmiştir. Gerilim yükselme hızı olarak 500 V/s belirlenmiştir. Yüzey deşarjını önlemek için elektrot düzeneği ve test numunesi mineral yağa batırılmıştır.

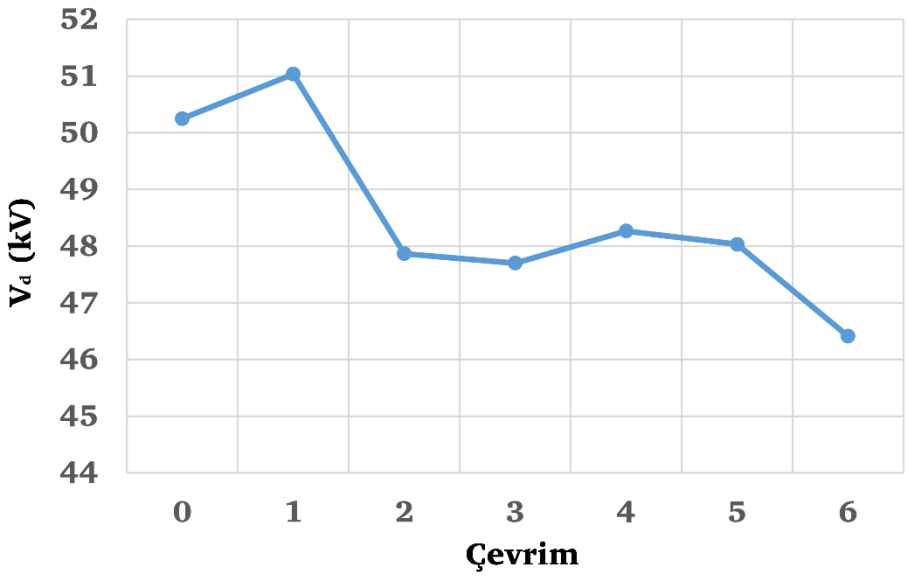
PET yalıtkanın ısıl yaşlandırmaya bağlı delinme geriliminin değişimi Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 PET – delinme geriliminin ısıl yaşlandırma ile değişimi

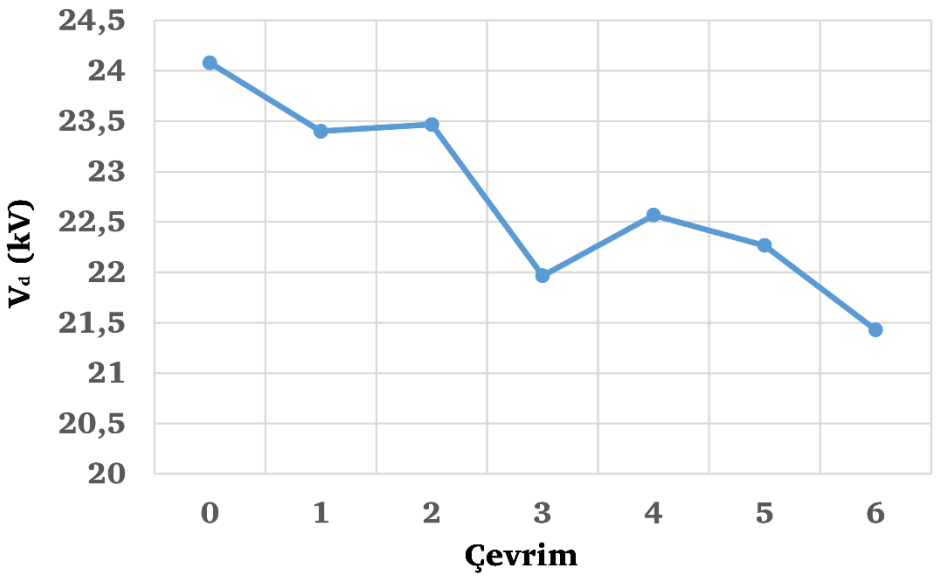
Isıl yaşlandırma süresinde PET malzemenin delinme gerilimi 4. Çevrime kadar artış eğilimindedir. 5. çevrim ile birlikte düşüşe geçmiştir. Bu davranış, dielektrik kayıpların belirli bir yaşlandırma süresine kadar artmasının nedeni olan kuruma etkisi ile ilişkilendirilebilir. 5. çevrimde dielektrik kayıplarda görülen artış ile uyumlu olarak delinme dayanımı 5. çevrimde azalmaya başlamıştır. Delinme geriliminde toplamda %2.5'luk bir azalma gözlenmiştir.

SBR/NR yalıtkanın delinme geriliminin değişim grafiği Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Delinme gerilimi, ilk çevrimin ardından bir miktar artış gösterse de sonrasında, kademeli olarak düşmeye başlamış ve toplamda %7.64'lük bir azalma meydana gelmiştir. Delinme dayanımındaki net düşüşün PET yalıtkana göre daha erken olması SBR/NR'nin çalışma sıcaklığının PET'e göre çok daha düşük olmasına bağlanabilir.



Şekil 4.20 SBR/NR – delinme geriliminin ısıl yaşlandırma ile değişimi

Isıl yaşlandırma karşısında delinme dayanımı oransal olarak en çok düşen malzeme, toplamda %11'lik düşüş ile prespan olmuştur. Prespanın delinme geriliminin değişimi Şekil 4.21'de gösterilmiştir.

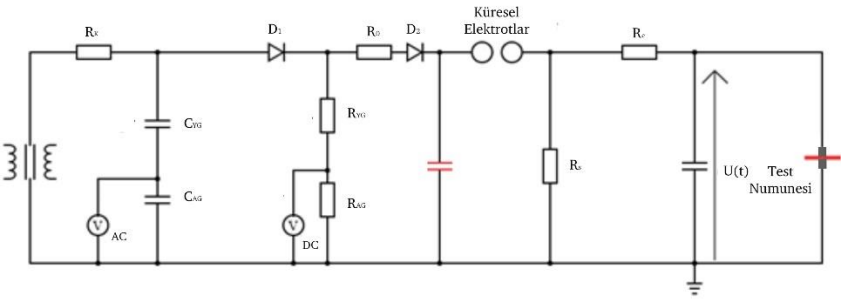


Şekil 4.21 Prespan – delinme geriliminin ısıl yaşlandırma ile değişimi

Dielektrik kayıp ölçümlerinde, 5. yaşlandırma çevriminden sonra, temel frekansın üzerindeki frekanslara sahip, 10 kV genlikli test gerilimleri prespanın delinmesine sebep olmuştur. Önceki çevrimlerde ise prespan yalıtkan, ilgili gerilimlere dayanım gösterebilmektedir. Şekil 4.21'de gösterilen delinme gerilimindeki %11'lik büyük düşüş, kayıp ölçümleri sırasında 10 kV'da görülen davranışı açıklamaktadır.

- **Yalıtkan Malzemelerin Darbe Delinme Geriliminin Isıl Yaşlandırma ile Değişimi**

Elektrikli ekipmanlar, işletme süreleri boyunca şebeke kaynaklı ya da atmosferik olaylardan kaynaklı darbe gerilimlerine maruz kalabilmektedir. Bu nedenle, yalıtım malzemelerinin darbe gerilimlerine dayanımının araştırılması önem arz etmektedir. Buradan hareketle, ilgili tez çalışmasında yalıtkan malzemelerin darbe gerilimi altındaki dayanımı, ısıl yaşlandırma çevrimleri süresince takip edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.22 Darbe üreteç devresi (a) devre şeması (b) devre görüntüsü

Darbe generatörünün kapasitesi, 4 mm kalınlıkta YYPE yalıtkanı delmek için yetersiz olduğundan dolayı, ilgili deneyler, SBR/NR, PET ve prespan üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yalıtkan malzemelere uygulanmak üzere 1.2/20 μS'lik darbe gerilimleri Şekil 4.22'deki üreteç devresi kullanılarak üretilmiştir. Numunelerin darbe dayanımlarının belirlenmesinde, Bölüm 3.5.1.2'de anlatılan IEC-60243-3 standardından yararlanılmıştır. Beklenilen delinme geriliminin, %70'i civarından başlayarak delinme gerçekleşene kadar kademeli artışlar ile darbe gerilimi yükseltilmiştir.

Isıl yaşlandırma sürecinde, gerçekleştirilen deneylerde, ara çevrim değerlerine ait delinme gerilimlerinde büyük farklar görülememiştir. Bu nedenle, ısıl yaşlandırmanın etkisini incelemek için, 6 çevrim yaşlanmış ve hiç yaşlanmamış yalıtkanlardan üçer numuneye ait delinme gerilimleri kullanılmıştır. Bu gerilim

değerlerinin ortalaması deney sonucu olarak kabul edilmiştir. İlgili deney sonuçları Tablo 4.17'de gösterilmiştir.

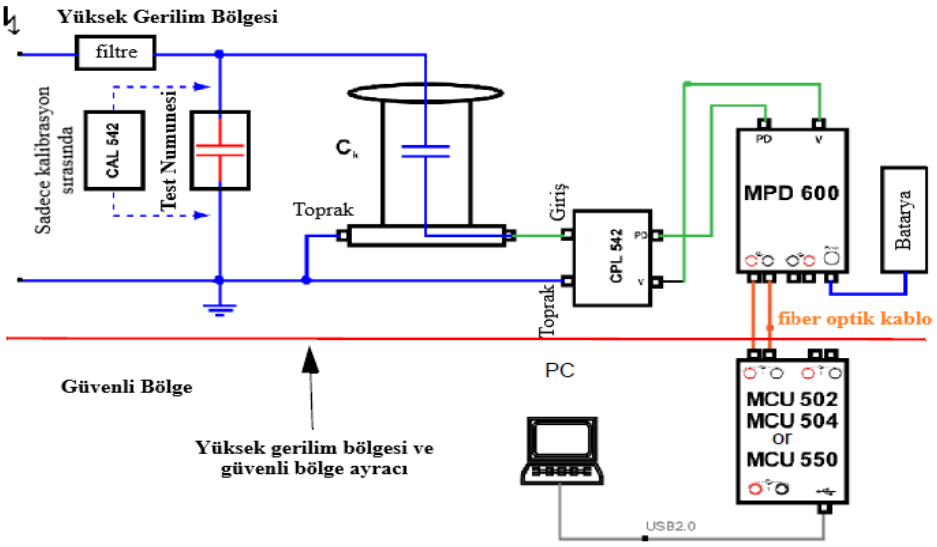
Tablo 4.17 Referans ve yaşlandırılmış numunelerin darbe gerilimi altındaki delime gerilimleri

	Delinme Gerilimi [kV_{tepe}]		
Malzeme	**SBR/NR**	**PET**	**Prespan**
Referans	90	28	42
	91	24	40
	95	27	38,5
Ortalama	92	26.3	40.1
6. Çevrim	81	23,5	39
	83	25	35
	79	27	37
Ortalama	81	25.16	37
%Fark	%13.5	%4.5	%8.37

Isıl yaşlandırma sonucunda darbe delinme gerilimi en çok azalan %13.5 ile SBR/NR, en az azalan ise %4.5 ile PET yalıtkan olmuştur. Bu oranlar, yalıtkan malzemelerin çalışma sıcaklığıyla uyumludur. Isıl yaşlandırma süreleri uzatıldığında, bu değerlerin daha da düşecek olması muhtemeldir.

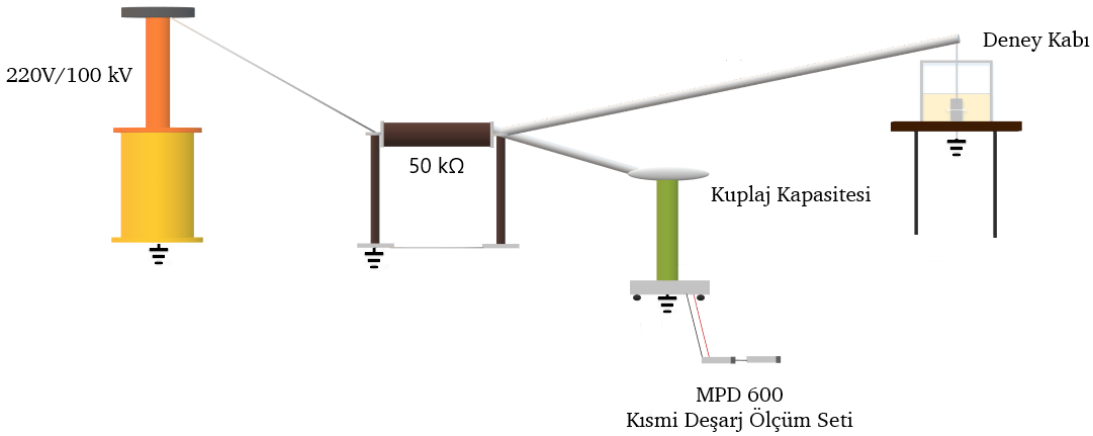
4.3.1.3 Yalıtkan Malzemelerin Kısmi Deşarj Performansının Isıl Yaşlandırma Karşısındaki Değişimi

Tahribatsız ölçümlerden biri olan kısmi deşarj ölçümleri yalıtkan malzemenin bulunduğu koşulun değerlendirilmesi adına oldukça faydalı bilgiler sunmaktadır. Bu nedenle, periyodik olarak bu ölçümlerin yapılması elzemdir. Kısmi deşarj ölçümlerinde, doğrudan ölçüm prensibiyle çalışan Omicron MPD 600 kısmi deşarj ölçüm seti kullanılarak ortalama deşarj yükü ve kısmi deşarj başlangıç gerilimi ölçümleri alınmıştır. MPD 600 bağlantı şeması Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23 MPD 600 bağlantı şeması [67]

Ölçümler IEC 60270'te önerildiği üzere 100 kHz ≤ Δf ≤ 400 kHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında, kısmi deşarj başlangıç geriliminin belirlenmesinde ve testin uygulanmasında IEC 60270 standardı [58] takip edilmiştir. Test gerilimi, eş silindir elektrot sistemi kullanılarak uygulanmıştır. Elektrotlar ve yalıtkan numune, şiddetli yüzey deşarjlarını engellemek için deney kabı içinde mineral yağa batırılmıştır. MPD 600 ve deney düzeneğinin bağlantısı Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Ölçüm devresi, Şekil 3.13'te gösterilen "Dört uçlu ve kuplaj kondansatörünün seri bağlı olduğu düzenek" prensibine göre düzenlenmiştir.



Şekil 4.24 Kısmi deşarj test düzeneği

Kısmi deşarj deneyleri sırasında, YYPE ve SBR/NR'ye göre daha ince olan PET ve prespan yalıtkanlarda büyük miktarda deşarj meydana geldiğinden dolayı sağlıklı ölçümler alınamamıştır. Bu nedenle, kısmi deşarj deneyleri, YYPE ve SBR/NR yalıtkanların 3'er numunesi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Üç numunede ölçülen parametrelerin ortalaması, deney sonucu olarak kabul edilmiştir. Deneyler sırasında, öncelikle, her yalıtkanın yaşlanmamış numuneleri üzerinden kısmi deşarj başlangıç gerilimleri tespit edilmiş ve her çevrimin ardından, başlangıçta elde edilen KDBG değerinin 1.25 ve 1.5 katında kısmi deşarj ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında "Ön Zorlanmasız Yöntem" uygulanmıştır. Isıl yaşlanmanın etkilerini incelemek için numunelerin ortalama deşarj yükü (Q_{ort}) ve KDBG değerleri takip edilmiştir. İlgili parametrelerin değişimleri Tablo 4.18'de gösterilmiştir.

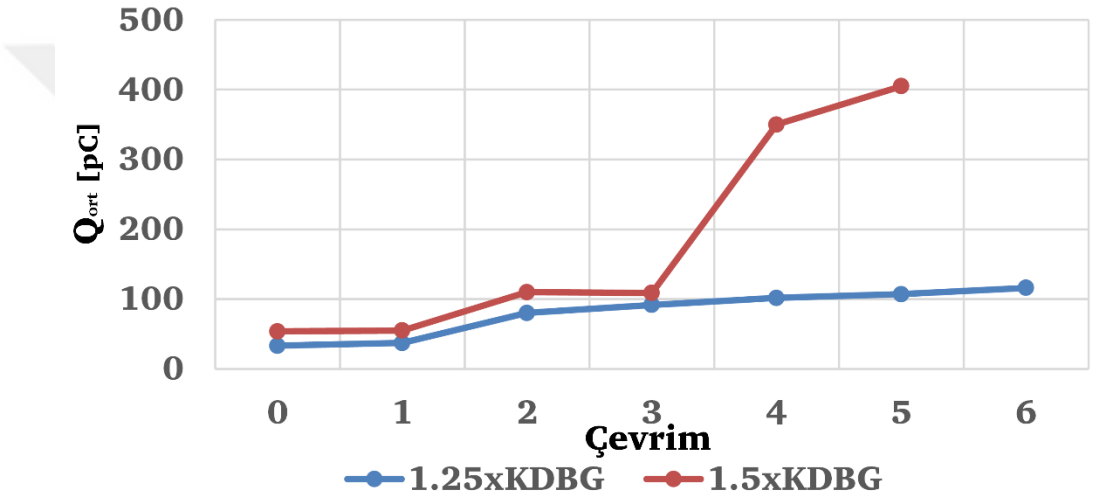
Tablo 4.18 Kısmi deşarj parametrelerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi

SBR/NR				**YYPE**			
Çevrim	**KDBG**	**1.25 X KDBG Q_{ort} [pC]**	**1.5 X KDBG Q_{ort} [pC]**	**Çevrim**	**KDBG**	**1.25 x KDBG Q_{ort} [pC]**	**1.5 x KDBG Q_{ort} [pC]**
0	10	33.1	53.67	0	24.69	25.5	119.0
1	9.22	37.1	54.9	1	24.09	28.5	135.5
2	7.29	80.0	110.0	2	24.3	42.2	142.0
3	8.61	91.7	108.8	3	24.64	43.5	146.8
4	6.89	101.7	350.0	4	21.87	42.5	139.6
5	5.06	107.0	405.0	5	22.76	47.1	152.0
6	4.3	116.0	X	6	24,88	48.4	157.5

KDBG değerlerinin bulunmasında eşik deşarj yükü 5 pC olarak ayarlanmıştır. Bunun neticesinde, KDBG, SBR/NR'nin için 10 kV, YYPE için 24 kV olarak

ölçülmüştür. Buradan hareketle, SBR/NR'nin kısmi deşarj ölçümleri 12.5 ve 15 kV'da, YYPE'nin ölçümler ise 30 ve 36 kV'da gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.18'den de görüşeceği üzere, SBR/NR yalıtkanın 12.5 kV'daki Q_{ort} değeri, ısıl yaşlandırma sonrasında 3 katına, 15 kV'daki Q_{ort} değeri ise 7.5 katına çıkmıştır. 6. yaşlandırma çevrimlerinin ardından SBR/NR'nin üç numunesi de 15 kV'daki ölçümler sırasında delinmiştir. KDBG ise %57 oranında azalmıştır. 5. çevrim sonunda ortalama kısmi deşarj yükündeki 7.5 katlık artış ile KDBG'inde görülen %57'lik azalış, malzeme yapısındaki bozulmayı net şekilde göstermekte ve 6. çevrim ölçümlerindeki delinmeyi açıklamaktadır.

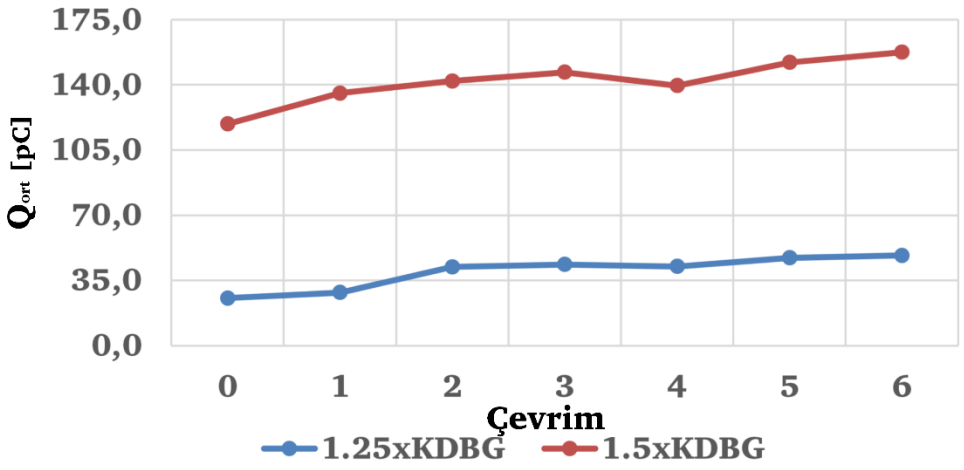


Şekil 4.25 SBR/NR - ortalama deşarj yükünün ısıl yaşlandırma ile değişimi

Şekil 4.25'ten de görüleceği üzere 12.5 ve 15 kV'daki Q_{ort} 3. yaşlandırma çevrimine kadar görece birbirlerine daha yakın değerlerdeyken 4. çevrim itibariyle, 15 kV'daki Q_{ort} büyük oranda artış göstermiştir.

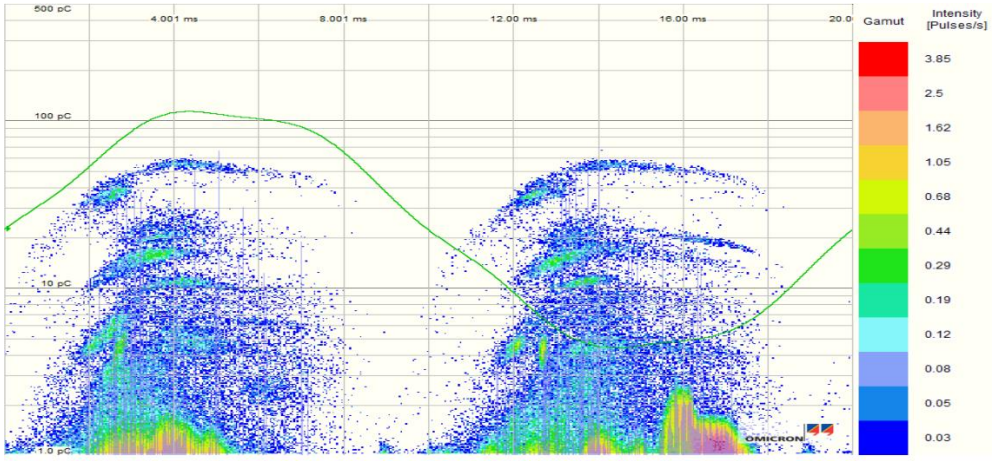
Şekil 4.26'dan da görüleceği üzere, YYPE'nin KDBG değerleri, ısıl yaşlandırma sonucunda, SBR/NR'de görüldüğü kadar büyük bir değişime uğramamıştır. Bunun yanında, 30 kV'daki Q_{ort} değeri, 1.9 katına, 36 kV'daki Q_{ort} değeri ise 1.3 katına çıkmıştır. YYPE'ye ait farklı gerilimlerdeki Q_{ort} değişimleri, SBR/NR'deki değişimlere kıyasla daha yakın değerlerde olmuştur. İlk 3 çevrimde SBR/NR'nin farklı ölçüm gerilimlerindeki deşarj miktarı benzer değerlerdeyken, YYPE'nin ilk

çevrimden itibaren farklı gerilimlerdeki deşarj değerleri arasında büyük bir fark olduğu net şekilde görülmektedir

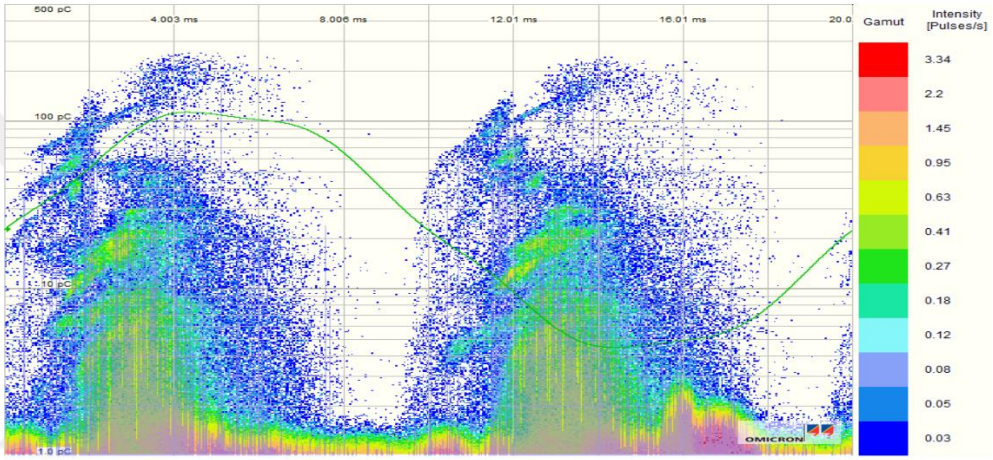


Şekil 4.26 YYPE - ortalama deşarj yükünün ısıl yaşlandırma ile değişimi

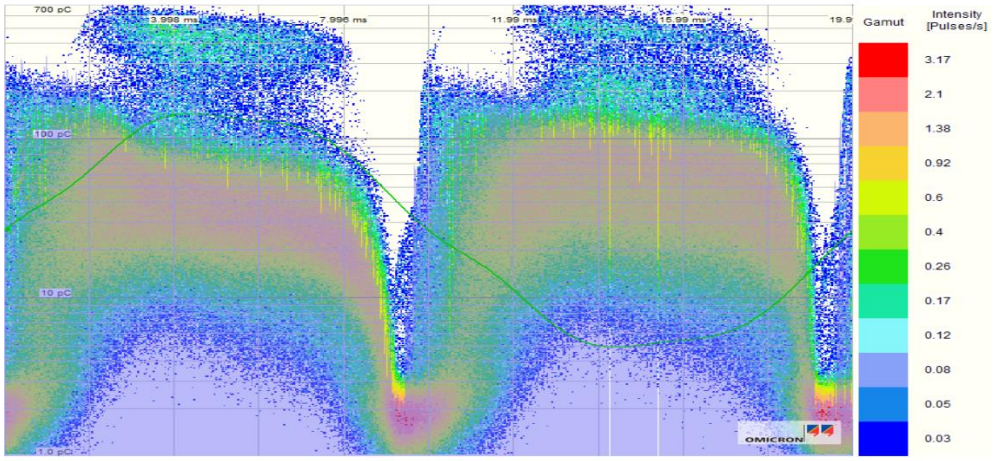
Şekil 4.27'de, SBR/NR malzeme için, 15 kV'daki kısmi deşarjın ısıl yaşlandırma ile değişimi gösterilmiştir. Referans numunede meydana gelen deşarjlar, 100 pC'un altında değerlere sahiptir. 3. çevrim ile birlikte deşarjların sıklığı artmış ve deşarj genlikleri 100 pC'un üzerine çıkmıştır. 6. yaşlandırma çevrimine ait kısmi deşarj grafiği ise delinme gerçekleşmeden hemen önce çizdirilmiştir. Deşarj miktarının aşırı derecede artmış olduğu net şekilde görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.27 SBR/NR – 15 kV'daki kısmi deşarjların ısıl yaşlandırma ile değişimi

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Yalıtım sistemlerinin temelini oluşturan katı yalıtkan malzemelerden, verimli bir şekilde faydalanmak ve iyi performans alabilmek için, yapısal özelliklerinin yanı sıra, bozulmalarına, arızalanmalarına ve ömürlerinin kısalmasına sebep olabilecek süreçlerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere, katı yalıtkan malzemelerde meydana gelen delinme olayları, malzemenin yalıtkan özelliğini kaybederek ömrünü tamamlamasına sebep olmaktadır. Katı yalıtkanlar için büyük önem arz eden bu olay, birden çok faktörden etkilenen karmaşık bir süreçtir. Katı yalıtkanların delinmesine sebep olan başlıca etmenlerden biri ısıl etkinin meydana getirdiği zorlanmadır. Yalıtkanların, kullanım süreleri boyunca maruz kaldıkları sıcaklık etkilerinden dolayı, dielektrik parametreleri değişmekte ve performansları uzun vadede düşüş göstermektedir. Dielektrik parametrelerde meydana gelen bu değişim, teşhis yöntemleri ile gözlemlenerek uygulamaya yönelik ömür tahminleri yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, selüloz bazlı organik yalıtkanlar sınıfından prespan, elastomer sınıfından stiren-butadien/doğal kauçuk karışımı (SBR/NR), termoplastik polyesterler sınıfından polietilenteraftalat (PET) ve termoplastik bir yalıtkan olan yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) malzemeler üzerinde; delinme dayanımı, dielektrik kayıp, dielektrik kayıp faktörü ve kısmi deşarj ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel uygulamalar, “elektrot tipi ve gerilim yükselme hızının delinme olayına etkisi” ve “ısıl yaşlandırmanın yalıtkan malzemelerin dielektrik performansına etkisi” başlıkları altında sunulmuştur.

Elektrot tipi ve gerilim yükselme hızının delinme dayanımına etkisinin araştırılması amacıyla; PET, SBR/NR ve prespan yalıtkanlara 3 farklı elektrot tipi (silindir-silindir, küre-silindir, sivri uç-silindir) kullanılarak 2 farklı gerilim yükselme hızına (500 V/s-3000 V/s) sahip gerilimler uygulanmıştır. Elde edilen delinme gerilimlerinin değerlendirilmesi, Weibull Dağılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Weibull Dağılımı kullanılarak, yalıtkan numunelerin ilgili elektrot tipindeki ve yükselme hızındaki karakteristik delinme gerilimleri (KDG) belirlenmiştir. KDG değerlerinden yola çıkarak, kullanılan elektrot tipine uygun şekilde, elektrik alan hesaplamaları yapılmış ve yalıtkanların karakteristik delinme dayanımları (KDD) hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan güç kaynağının gerilim kapasitesi yeterli olmadığından dolayı, YYPE malzeme delinememiş ve dolayısıyla, delinme deneylerinde kullanılamamıştır.

Yalıtkan malzemelere uygulanan gerilimlerin yükselme hızları 500 V/s'den 3000 V/s hızına arttırıldığında, tüm malzemelerin Weibull karakteristik delinme gerilimlerinin arttığı ve buna bağlı olarak karakteristik delinme dayanımı değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. PET ve prespanın karakteristik delinme dayanımları, ince yapıları nedeniyle, SBR/NR'ye göre daha çok artış göstermiştir.

Elektrot tipinin delinme olayına etkisinin incelendiği deneyler sonucunda, yalıtkan malzemelerin KDD değerlerinin enerjili elektrotun eğrilik yarıçapı ile ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir. Silindir elektrotun yalıtkan ile temas yüzeyi düzlem olduğundan, sonsuz bir eğrilik yarıçapına sahip olduğu düşünülebilir, 20 mm çaplı küresel elektrotta ise eğrilik yarıçapı 10 mm'dir, deneylerde kullanılan sivri uçlu elektrotun eğrilik yarıçapı ise 0.5 mm'dir. Tüm yalıtkanlara ait KDD değerlerinin $KDD_{\text{Sivri uç – Silindir}} > KDD_{\text{Küre – Silindir}} > KDD_{\text{Silindir-Silindir}}$ şeklinde sıralandığı belirlenmiştir. Sivri uç – silindir ve silindir – silindir elektrot düzeneklerinde görülen delinme dayanımları kıyaslandığında, aralarındaki farkın malzeme kalınlığı ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. 0.3 mm kalınlığındaki PET yalıtkanda bu fark, %41.1'ken, 2.5 mm kalınlığındaki SBR/NR yalıtkanda delinme dayanımı farkı %234.8'dir.

Elektrotların meydana getirdiği elektrik alanların, ne kadar şiddetli olduğunu ve düzgün olmama derecesini gösteren alan gelişme faktörü (field enhancement factor) değerleri Tablo 4.4'de gösterilmiştir. Bu değerlerin sahip olduğu sıralama, tespit edilen KDD sıralamasıyla aynı şekildedir. Küre – silindir elektrot düzeneğine ait alan gelişme faktörleri, 3 malzeme için de 1'e oldukça yakın değerlerdedir ve "neredeyse düzgün (quasi-uniform)" elektrik alanlar yarattığı söylenebilir. Bu

nedenle, bu düzenekte elde edilen delinme dayanımı değerleri, silindir-silindir düzeneği ile elde edilen delinme dayanımı değerlerine oldukça yakın olmuştur. sivri uç – silindir düzeneğinin alan gelişme faktörü, görece ince malzemeler olan PET ve prespanda, düzgün elektrik alanı temsil eden 1 değerine daha yakınken, SBR/NR yalıtkanda 3.54 değerindedir. Bu nedenle, bu yalıtkan üzerinde sivri uç - silindir düzeneğinde görülen delinme dayanımı, çok daha yüksek seviyelerdedir.

Yalıtkan malzemelerin, karakteristik delinme gerilimleri incelendiğinde, PET ve prespanda, $KDG_{Sivri\ uç\ -\ Silindir} > KDG_{Küre\ -\ Silindir} > KDG_{Silindir\text{-}Silindir}$ sıralaması görülmektedir. Bu durum ile ters olarak, SBR/NR yalıtkanda, en düşük KDG'e sahip düzenek, sivri uç – silindir düzeneği olmuştur. İnce malzemelerde, 3 elektrot sisteminin de alan gelişme faktörleri birbirine yakın değerlerde olduğu için, elektrotların yüzey alan büyüklüğü, delinme geriliminin belirlenmesinde belirleyici unsur olmuştur. Böylelikle, en büyük yüzey alanına sahip silindir-silindir elektrot düzeneği, yalıtkan malzemeyi daha düşük gerilimde delmiştir. Sivri uç – silindir sistemine ait alan gelişme faktörünün neredeyse 3 katına çıktığı SBR/NR yalıtkanda, sivri uç elektrot, daha düşük gerilimlerde daha şiddetli elektrik alanlar meydana getirebildiğinden dolayı, ilgili yalıtkan malzemeyi diğer elektrot türlerine göre daha düşük gerilimlerde delmiştir.

Görece daha ince olan yalıtkan malzemeler ile çalışıldığında, malzemenin düzgün olmayan alanlardan etkilenme miktarı daha düşük olmakta ve yalıtkan malzemenin zorlanma derecesi, enerjili elektrotun yüzey alanı ile orantılı olarak değişmektedir. Yalıtkan kalınlığının yüksek olduğu uygulamalarda, malzemenin düzgün olmayan elektrik alanlar karşısındaki zorlanma derecesini arttığından dolayı, enerjili elektrotun eğrilik yarıçapı önem arz etmektedir. Bu nedenle, yalıtım tasarımında, enerjili kısımların geometrisi dikkate alınmalı ve yalıtkan boyutlandırmaları buna göre yapılmalıdır.

Isıl yaşlandırma kapsamında, yalıtkan malzemeler, 120℃ sıcaklıkta, bir çevrimi 120 saat olmak üzere, 6 çevrimlik, toplam 720 saat sürecek ısıl zorlanmaya maruz bırakılmıştır. Isıl yaşlandırma sürecinde, yalıtkan malzemelerin, 500 V/s hızındaki AC gerilim ve 1.2/20 μs cephe ve sırt yarı değer

sürelerine sahip darbe gerilimleri altındaki delinme dayanımları, silindir - silindir elektrot düzeneği kullanılarak ölçülmüştür. Bunun yanında, gerçekleştirilen tahribatsız ölçümler ile dielektrik kayıp, tanδ, ortalama kısmi deşarj yükü ve kısmi deşarj başlangıç gerilimi parametrelerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi takip edilmiştir. Dielektrik kayıp ve tanδ ölçümlerinde, güç sistemlerinin harmonikli yapısı göz önünde bulundurulmuştur. Bu sebeple, ölçümler, temel frekans ve katlarındaki frekanslara sahip farklı gerilimlerde gerçekleştirilmiştir.

Yalıtkanların dielektrik kayıp değerleri incelendiğinde, frekans ve gerilim ile orantılı olarak bir artış söz konusudur. Tüm yalıtkanlarda, maksimum ölçüm frekansı (400 Hz) ve maksimum ölçüm geriliminde (12 kV) kayıp değerleri maksimum değerine ulaşmıştır. Dielektrik kayıp faktörü değerlerinde ise frekans ile ters, gerilim ile doğru orantılı bir değişim meydana gelmiştir. Frekans yükseldikçe, kapasitif reaktans düşeceğinden dolayı, malzeme üzerinden daha fazla reaktif akım akacaktır. Bu durum, malzemedeki reaktif kayıpların artmasına neden olur. Aktif kayıpların, reaktif kayıplara oranının dielektrik kayıp faktörü ifade ettiğinden dolayı, frekans artışı, dielektrik kayıp faktörünü düşürmektedir.

Isıl yaşlandırmanın malzemelerin dielektrik kayıp ve tanδ değerlerine etkisi değerlendirildiğinde, SBR/NR, PET ve YYPE yalıtkanların, belirli bir yaşlandırma çevrimine kadar tüm gerilim ve frekanslardaki (YYPE'nin 2 Kv 50-100 Hz ölçümleri hariç) dielektrik kayıp ve tanδ değerlerinin azaldığı, ardından gelen yaşlandırma çevrimleri ile yaşlanmamış hallerine göre artış gösterdikleri görülmektedir. Yalıtkan malzemeler, belirli bir sıcaklığa maruz kaldıklarında kurumakta ve yapılarındaki nemden arınmaktadırlar. Bu durum, iletkenliklerini azaltarak, dielektrik kayıplarının düşmesine neden olmaktadır. Ancak, belirli bir eşikten sonra, malzemede ısıl yaşlandırma kaynaklı meydana gelen kimyasal reaksiyonların yarattığı bozucu etkiler, kuruma etkisine baskın gelmekte ve yalıtkan malzemelerin dielektrik kayıpları artış göstermektedir.

Isıl yaşlandırmanın etkileri, frekans bazlı düşünüldüğünde, SBR/NR ve YYPE'de meydana gelen artış miktarları, genellikle, frekans ile ters orantılı olarak değişmiştir. PET yalıtkanda ise ısıl yaşlandırma, yüksek frekanslardaki kayıp

değerlerine daha çok etki etmiştir. Bunun yanında, sabit gerilimde frekans artırımı ve sabit frekansta gerilim artırımı senaryolarında, frekans seviyesinin yükseltildiği uygulamaların yaşlanmış numunelerde daha etkili olması, harmonik bileşen barındıran şebekelerde kullanılacak olan yalıtkan malzemelerin ısıl yaşlanmadan daha çok etkileneceğini ortaya koymaktadır.

Diğer malzemelerden farklı olarak, prespanın, 2-8 kV aralığındaki dielektrik kayıpları ve dielektrik kayıp faktörü değerleri, ısıl yaşlandırma ile düşüş yaşamıştır. 10 kV ve 12 kV'daki dielektrik kayıpları ise artış göstermiş ve 4. çevrimden itibaren yalıtkan malzeme, bu gerilimlerde delinmiştir. 10 kV'daki delinme olayları, 4. çevrim itibariyle, temel frekansın dielektrik kayıplarında oluşan %19'luk dielektrik kayıp artışından sonra meydana gelmiştir. Aynı çevrim itibariyle, 50 Hz 12 kV'daki kayıplar %54.8 oranında artmış ve sonraki çevrim dahilindeki ölçümlerde yalıtkan malzeme 50 Hz 12 kV'da delinmiştir. 10 kV ve 12 kV'da meydana gelen delinme olaylarının başlangıcı öncesinde, görülen dielektrik kayıp artış oranları, prespan malzeme için önem arz etmektedir. Prespan için dielektrik kayıp ölçümleri ile durum değerlendirmesi yapılırken, bu değerlere yakın bir dielektrik kayıp artışı saptanırsa, yalıtkan malzemenin ömrünü tamamlamaya yaklaştığı söylenebilir.

YYPE ve SBR/NR malzemenin ısıl yaşlandırma karşısındaki davranışı, dielektrik kayıp ve dielektrik kayıp faktörü ölçümlerinin yanı sıra kısmi deşarj ölçümleri ile de takip edilmiştir. Kısmi deşarj ölçümleri, yaşlandırma öncesi tespit edilen KDBG'nin 1.25 ve 1.5 katlarında gerçekleştirilmiştir. Yalıtkanların kısmi deşarj performansı, her çevrim sonunda gerçekleştirilen ortalama deşarj yükü ve kısmi deşarj başlangıç gerilimi ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, malzemenin kısmi deşarj aktivitesinin ısıl yaşlandırma ile artış gösterdiği belirlenmiştir. SBR/NR yalıtkanın kısmi deşarj başlangıç geriliminin 1.5 katındaki ortalama deşarj yükü, 4. çevrim itibariyle büyük miktarda yükselmiş ve 6. çevrimden sonra, 1.5xKDBG gerilimdeki kısmi deşarj ölçümleri sırasında, malzeme delinmiştir. 5. çevrim sonunda, ortalama deşarj yükünde meydana gelen 7 katlık değişim ve KDBG değerinin 6. çevrim sonunda, 10 kV'dan 4.3 kV'a düşmesi meydana gelen delinmeyi açıklamaktadır.

Yalıtkanların, ısıl yaşlandırma ile delinme dayanımlarının değişimi incelendiğinde, AC delinme gerilimi en çok azalan malzemenin %11'lik bir azalma ile prespan, darbe delinme gerilimi en çok azalan malzemenin ise %13'lük azalma ile SBR/NR olduğu belirlenmiştir. Bu durum, prespan malzemenin, ısıl yaşlandırmanın ilerleyen çevrimlerindeki dielektrik kayıp ölçümleri sırasında delinmesi ve ısıl yaşlandırmanın son çevrimindeki kısmi deşarj ölçümlerinde SBR/NR'nin delinmesi ile uyumludur.

Delinme deneyleri ve ısıl yaşlandırma kapsamında gerçekleştirilen deneyler neticesinde, yalıtkan malzemelerin dielektrik parametrelerinin çeşitli zorlayıcı faktörler karşısındaki davranışı ortaya konmuştur. Delinme dayanımı deneylerinde uygulanan farklı senaryolar ile iletken ve yalıtkan geometrilerinin delinme olayındaki önemi vurgulanmıştır. Yalıtım malzemelerine düzgün olmayan elektrik alanların etki ettiği durumda, iletken kısımların sivrilik yarı çapı ve yalıtkan kalınlığı, zorlayıcı faktör olan elektrik alan şiddetinde belirleyici unsur olmaktadır. Yalıtkan malzemeleri zorlayan düzgün elektrik alanların varlığında ise yalıtım malzemesi ile iletken kısmın temas yüzeyi malzemelerin delinme dayanımında etkili olmaktadır. Tasarlanması planlanan elektrik ekipmanlarda, bu durumlar göz önünde bulundurulmalı ve boyutlandırmalar dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Ek olarak, ısıl yaşlandırma deneyleri sırasında, yalıtkan malzemelerin, delinme dayanımlarının düşmesi, dielektrik kayıpların ve kısmi deşarj aktivitelerinin artması, dielektrik performanslarının olumsuz yönde etkilendiğini göstermektedir. SBR/NR, başlangıç çevrimlerinde dayanabildiği kısmi deşarj ölçüm gerilimine, 6. çevrim sonunda dayanamayarak delinmiştir. Aynı durum, prespanın 5. çevrimdeki dielektrik kayıp ölçümlerinde meydana gelmiştir. Her iki yalıtkanın da çalışma sıcaklıklarının, uygulanan yaşlandırma sıcaklığından çok daha düşük seviyelerde olduğu düşünüldüğünde, doğru malzeme seçiminin önemi görülmektedir. Ayrıca, dielektrik kayıp ve kısmi deşarj aktivitesinin artışı, delinme dayanımlarının düşüşü ile eş zamanlı olarak meydana gelmiştir. Bu durum, tahribatsız ölçümlerin; arızaların erken tespitindeki, kestirimci bakım işlemlerindeki ve işletme sırasında mevcut durumun değerlendirilmesindeki önemini ortaya koymaktadır. Bu sebeple, tahribatsız

ölçümlerin periyodik olarak gerçekleştirilmesi konusunda gerekli hassasiyet gösterilmelidir.

Tez kapsamında, yalıtkan malzeme seçimi ve yalıtım sistemlerinin boyutlandırılması konularına fayda sağlayacak sonuçlar ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, güç sistemi ekipmanlarında istenmeyen arızaların önüne geçilmesi, arıza meydana gelmeden gerekli önlemlerin alınması ve enerji kesintilerinin önlenmesi konularına katkıda bulunarak, ekonomik kayıpların azaltılmasına katkı sağlayacak niteliktedir.

KAYNAKÇA

[1] J. H. Mason, “Breakdown of solid dielectrics in divergent fields,” *Proc. IEE Part C Monogr.*, vol. 102, no. 2, p. 254, 1955,

[2] K. Kudo, “Impulse treeing breakdown in polyethylene under non-uniform and quasi-uniform fields,” in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1989, pp. 259–264.

[3] L. Zhao, J. Su, X. Zhang, and Y. Pan, “Experimental investigation on the role of electrodes in solid dielectric breakdown under nanosecond pulses,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 4, pp. 1101–1107, 2012,

[4] E. Foruzan, A. A. S. Akmal, K. Niayesh, J. Lin, and D. D. Sharma, “Comparative study on various dielectric barriers and their effect on breakdown voltage,” *High Volt.*, vol. 3, no. 1, pp. 51–59, 2018,

[5] Y. Zheng, Y. Chen, H. Zhang, and Y. V. Serdyuk, “AC Breakdown Characteristics of Air Insulated Sphere-Plane Gaps with Glass Barriers,” *ICHVE 2018 - 2018 IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, pp. 6–9, 2019,

[6] S. Seela-Or, K. Tonmitr, A. Kaewrawang, and A. Suksri, “Solid investigation in oil barrier dielectric under non-uniform electric field,” *2013 10th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol. ECTI-CON 2013*, pp. 1–4, 2013,

[7] S. Diaham, S. Zelmat, M. L. Locatelli, S. Dinculescu, M. Decup, and T. Lebey, “Dielectric breakdown of polyimide films: Area, thickness and temperature dependence,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 1, pp. 18–27, 2010,

[8] S. Ul-Haq and G. R. Govinda Raju, “Weibull statistical analysis of area effect on the breakdown strength in polymer films,” *Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP), Annu. Rep.*, pp. 518–521, 2002,

[9] S. Cygan and J. R. Laghari, “Dependence of the electric strength on

thickness area and volume of polypropylene," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-22, no. 6, pp. 835–837, 1987,

[10] L. Zhao, G. Z. Liu, J. C. Su, Y. F. Pan, and X. B. Zhang, "Investigation of thickness effect on electric breakdown strength of polymers under nanosecond pulses," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 39, no. 7, pp. 1613–1618, 2011,

[11] M. Nedjar, "Statistical study on short-term dielectric breakdown of poly(vinyl chloride)," *J. Vinyl Addit. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 177–182, 2013,

[12] P. K. Fischer and G. A. Schneider, "Influence of the experimental set-up and voltage ramp on the dielectric breakdown strength and breakdown site in borosilicate glass," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 41, no. 2, pp. 1332–1341, 2021,

[13] B. Mieller, "Influence of test procedure on dielectric breakdown strength of alumina," *J. Adv. Ceram.*, vol. 8, no. 2, pp. 247–255, 2019,

[14] A. K. Jonscher and R. Lacoste, "On a cumulative model of dielectric breakdown in solids," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-19, no. 6, pp. 567–577, 1984,

[15] X. Li, J. Li, C. Xiang, J. Zhang, L. Bao, and H. Ran, "The influence of oil-impregnated insulation paper's thickness on electrical breakdown strength," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, vol. 2016-Decem, pp. 392–395, 2016,

[16] J. Hong, J. Il Heo, S. Nam, and H. Kang, "Analysis on the dielectric characteristics of solid insulation materials in LN2 for development of high voltage magnet applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, pp. 10–13, 2014,

[17] K. A. Aravind, P. Rajamani, B. Krishna, K. Sandhya, and P. M. Nirgude, "Flashover Performance of Composite and Porcelain Insulators," *Proc. 2019 Int. Conf. High Volt. Eng. Technol. ICHVET 2019*, pp. 1–3, 2019,

[18] W. Sima, P. Sun, M. Yang, J. Wu, and J. Hua, “Impact of time parameters of lightning impulse on the breakdown characteristics of oil paper insulation,” *High Volt.*, vol. 1, no. 1, pp. 18–24, 2016,

[19] S. Li, W. Wang, S. Yu, and J. Li, “Degradation of cross linked polystyrene by repetitive impulse surface flashovers in vacuum,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 5, pp. 1934–1941, 2013,

[20] Z. Wang, Q. Zhang, T. Wang, and J. Li, “Oil-paper insulation breakdown characteristics under non-standard lightning impulse voltages,” *Gaodianya Jishu/High Volt. Eng.*, vol. 40, no. 9, pp. 2931–2937, 2014,

[21] A. Ziegmann, C. Berner, and D. W. Schubert, “Investigation and modeling of various influencing factors on the dielectric breakdown strength of silicone elastomers,” *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 243, no. March, pp. 65–70, 2019,

[22] Z. Jouini, D. Malec, and Z. Valdez-Nava, “Effect of mechanical prestress on the dielectric strength of alumina,” *Proc. 2016 IEEE Int. Conf. Dielectr. ICD 2016*, vol. 2, pp. 1089–1092, 2016,

[23] L. Cao and S. Grzybowski, “Life-time characteristics of EPR cable insulation under electrical and thermal stresses,” *Proc. IEEE Int. Conf. Solid Dielectr. ICSD*, pp. 632–635, 2013,

[24] K. KELEŞ, F. ARAS, and Y. ÇİLLİYÜZ, “Farklı Kalınlıktaki Yalıtkan Malzemelerin Delinme Dayanımına Elektrot tipi ve Sıcaklığın Etkisi,” 2004.

[25] Y. Liu *et al.*, “Dielectric Strength of Ethylene Propylene Rubber under Thermal and Mechanical Stress,” *7th IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE 2020 - Proc.*, pp. 50–53, 2020,

[26] M. G. Niasar, N. Taylor, P. Janus, X. Wang, H. Edin, and R. C. Kiiza, “Partial discharges in a cavity embedded in oil-impregnated paper: Effect of electrical and thermal aging,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 1071–1079, 2015,

[27] I. Kolcunova, M. Pavlik, and L. Liso, “Assessment of long thermal ageing on the oil-paper insulation,” *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 506–511, 2016,

[28] H. Ran, J. Li, J. Zhang, X. Li, and J. Chen, “Influence of temperature and thermal aging on breakdown voltage of oil-paper insulation,” in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Sep. 2016, pp. 1–4.

[29] Y. Kemari, A. Mekhaldi, and M. Teguar, “Investigation into the dissipated energy under accelerated thermal aging in PVC/B used in low-voltage cables insulation,” *Proc. 2016 IEEE Int. Conf. Dielectr. ICD 2016*, vol. 2, pp. 666–669, 2016,

[30] Y. Saputra, M. Kim, S. Suwarno, Y. Jeon, and Y. Byeon, “The Effect of Thermal Aging on Dielectric Properties and Tracking Erosion Test of Micro Bn Composites,” *Proc. 2nd Int. Conf. High Volt. Eng. Power Syst. Towar. Sustain. Reliab. Power Deliv. ICHVEPS 2019*, 2019,

[31] A. Hedir, M. Moudoud, O. Jbara, S. Rondot, and F. Slimani, “Degradation Mechanisms of Cross-linked Polyethylene Insulation by Thermal and Electrical Aging,” *11 Conférence la Société Français d’Electrostatique*, no. June 2019, 2018.

[32] W. Wang, K. Yang, C. Yue, S. Chen, and D. He, “Study on aging characteristics of oil-immersed paper and polymer material based on dielectric loss,” *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 882–885, 2012,

[33] C. Yue, W. Wang, G. Chen, Y. Wu, and D. He, “Study on dielectric properties of polymer material in mineral oil under electro-thermal aging,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, no. 50977025, pp. 21–24, 2012,

[34] S. Chen, C. Yue, W. Wang, D. He, and K. Yang, “Volume resistivity and PDIV characteristics of polymer materials under electro-thermal aging,” *ICHVE 2012 - 2012 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, no. 50977025, pp. 190–193,

2012,

[35] L. Hui, J. K. Nelson, and L. S. Schadler, “Hydrothermal aging of XLPE/silica nanocomposites,” *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 2–5, 2010,

[36] Y. Mecheri, M. Nedjar, A. Lamure, M. Aufray, and C. Drouet, “Influence of moisture on the electrical properties of XLPE insulation,” *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 1–4, 2010,

[37] M. A. Douar, A. Beroual, and X. Souche, “Comparative study of AC breakdown voltage for various polymers: Influence of electrodes shape, thermal and hydrothermal ageing,” *ICHVE 2014 - 2014 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, no. ii, pp. 0–3, 2014,

[38] C. Zhang, S. Xie, and Y. Zhang, “Repeated impulse aging of oil-polypropylene insulation,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 5, pp. 1581–1587, 2019,

[39] S. P. Balaji, L. Lavanya, and S. Usa, “Effect of Repeated Impulses on Transformer Insulation,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 6, pp. 2069–2073, 2011,

[40] S. P. Balaji, L. Lavanya, and S. Usa, “Effect of repeated impulses on OIP,” *ICHVE 2012 - 2012 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, pp. 558–561, 2012,

[41] Z. A. Mubarak and U. Savadamuthu, “Effect of oil impregnated paper thickness and impulse waveshapes on voltage–number characteristics,” *Electr. Eng.*, vol. 101, no. 4, pp. 1189–1197, 2019,

[42] S. Z. Dabbak, H. A. Illias, and B. C. Ang, “Effect of surface discharges on different polymer dielectric materials under high field stress,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 6, pp. 3758–3765, 2017,

[43] N. L. Dao, P. L. Lewin, and S. G. Swingler, “Lightning Impulse Ageing of Hv Cable Insulation,” *Proc. 16th Int. Symp. High Volt. Eng.*, pp. 1–4, 2009.

[44] N. L. Dao, P. L. Lewin, I. L. Hosier, and S. G. Swingler, “A comparison

between LDPE and HDPE cable insulation properties following lightning impulse ageing," *Proc. 2010 IEEE Int. Conf. Solid Dielectr. ICSD 2010*, pp. 10–13, 2010,

[45] N. L. Dao, P. L. Lewin, I. L. Hosier, and S. G. Swingler, "The changes in electrical properties of XL4421 insulation under repetitive lightning impulse voltages," *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, 2010,

[46] S. Grzybowski, P. Trnka, and J. C. Fulper, "Aging of high voltage cables by switching impulse," *IEEE Electr. Sh. Technol. Symp. ESTS 2007*, pp. 165–168, 2007,

[47] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, and M. I. Qureshi, *Electrical insulation in power systems*. MARCEL DEKKER, 1998.

[48] K. V. Naidu, M. S., *High Voltage Engineering 2nd Edition*. McGraw-Hill, 1995.

[49] R. Arora and W. Mosch, *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*. Wiley-IEEE Press, 2011.

[50] S. Musa, *Trafo Bakımı ve Yalıtım Yağı.pdf*. Çağdaş Basımevi, 2014.

[51] L. Zhong, J. Wang, X. Wang, and M. Rong, "Comparison of dielectric breakdown properties for different carbon-fluoride insulating gases as SF 6 alternatives," *AIP Adv.*, vol. 8, no. 8, p. 085122, Aug. 2018,

[52] E. Haluk, "Pratik Elektrik ve Uygulamaları ile Elektroteknik," vol. 2. İnkilap ve Aka Basımevi, 1979.

[53] T. K. Basak, *Electrical Engineering Materials*. New Academic Science, 2012.

[54] F. I. Chowdhury, *Sustainable resin systems for polymer composites*. LTD, 2021.

[55] CHRISTOPHER S. BRAZELSTEPHEN L. ROSEN, *Fundamental Principles of Polymeric Materials*. Wiley-IEEE Press, 2012.

[56] J. . Lucas, *High Voltage Engineering*. Department of Electrical Engineering University of Moratuwa, Sri Lanka, 2001.

[57] R. Sarathi, A. Nandini, and T. Tanaka, “Understanding electrical treeing phenomena in XLPE cable insulation under harmonic AC voltages adopting UHF technique,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 3, pp. 903–909, 2012,

[58] “High-voltage test techniques. Partial discharge measurements,” IEC standard 60270:2001+A1:2016, 2016,

[59] W. S. Z. John Kuffel, E. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*. Newnes, 2000.

[60] "Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies," IEC standard 60243-1, 2013,

[61] “High-voltage test techniques Part 1 : General definitions and test requirements,” IEC standard 60060-1, 2010,

[62] “Electric strength of insulating materials — Test methods Part 3: Additional requirements for 1,2/50 μs impulse tests,” IEC standard 60243-3, 2014,

[63] “Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data,” IEC standard 62539, 2007,

[64] J. S. White, “The Moments of Log-Weibull Order Statistics,” *Technometrics*, vol. 11, no. 2, pp. 373–386, 1969,

[65] M. Farahani, E. Gockenbach, H. Borsi, K. Schäfer, and M. Kaufhold, “Behavior of machine insulation systems subjected to accelerated thermal aging test,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 5, pp. 1364–1372, 2010,

[66] X. Liu, T. Zhang, Y. Bai, X. Ding, and Y. Wang, “Effects of accelerated repetitive impulse voltage aging on performance of model stator insulation of wind turbine generator,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 4, pp. 1606–1615, 2014,

[67] Omicron MPD 600 User Manual.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. F. Akın ve O. Arıkan, " Harmonik Bileşenlerin Katı Yalıtkan Malzemelerin Dielektrik Performansına Etkisi," 12. Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO), 2020, sf. 1-5

Projeler

1. Isıl Yaşlandırmaya Maruz Bırakılmış Katı Yalıtkan Malzemelerin Farklı Gerilimler Altında Dielektrik Performanslarının Analizi, YTÜ Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, Proje Kodu: FYL-2021-4166, Araştırmacı, 18/03/2021-Devam Ediyor (Öngörülen Bitiş Tarihi, 18/11/2021).