



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KATKI MALZEMELERİNİN POLYESTERİN ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Salih NİŞANCI

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mukden UĞUR

II. DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARHAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma 17.08.2021 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

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

Prof. Dr. Cem CİVELEK
Türk-Alman Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

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

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübesiyle çalışmalarına yön vererek tezimin bilimsel temeller ışığında şekillenmesini sağlayan değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Mukden UĞUR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARHAN'a, çalışmalarına eleştiri ve önerileriyle ışık tutan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İPEKOĞLU'na ve hayatımın her anında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek yanımda olan kıymetli aileme şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması kapsamında katkı malzemelerinin ve yazılım lisansının alınması için 2020BFE02 numaralı BAP projesi ile maddi destek veren Türk-Alman Üniversitesi BAP Birimine ve numunelerin üretilmesi için Türk-Alman Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nın kullanımı konusunda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Zeynep ERDÖL'e teşekkür ederim."

Ağustos 2021

Salih NİŞANCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1. ELEKTRİKSEL YALITIM MALZEMELERİ	4
2.1.1. Yalıtkan Malzemelerin Elektriksel Özellikleri.....	4
2.1.1.1. <i>Yüzey Sızıntı Akımı Direnci</i>	4
2.1.1.2. <i>Hacim Direnci</i>	6
2.1.1.3. <i>Dielektrik Dayanım</i>	7
2.1.2. İnorganik Katı Yalıtkan Malzemeler	7
2.1.2.1. <i>Alüminyum Oksit Yalıtkanlar</i>	7
2.1.2.2. <i>Porselen Yalıtkanlar</i>	7
2.1.2.3. <i>Magnezyum Oksit Yalıtkanlar</i>	8
2.1.2.4. <i>Cam Yalıtkanlar</i>	8
2.1.2.5. <i>Mika Yalıtkanlar</i>	9
2.1.3. Organik Katı Yalıtkanlar	9
2.1.4. Polimerik Yalıtkanlar	9
2.1.4.1. <i>Polietilen (PE) Yalıtkanlar</i>	10
2.1.4.2. <i>XLPE</i>	11
2.1.4.3. <i>Polivinilchlorür (PVC)</i>	11
2.1.4.4. <i>Elastomer</i>	11
2.1.4.5. <i>Epoksi Reçineler</i>	12
2.1.4.6. <i>Polyesterler</i>	12
2.2. ELEKTRİKSEL YALITKANLARDA BOZULMA TÜRLERİ.....	13
2.2.1. Yaşlanma	14

2.2.2.	Kısmi Boşalma	15
2.2.3.	Elektriksel Ağaç Oluşumu.....	16
2.2.4.	Termik Delinme.....	17
2.2.5.	Elektromekanik Delinme	18
2.2.6.	Erozyon.....	19
2.2.7.	Yüzey Aşınımı.....	19
2.3.	TEST TÜRLERİ	20
2.3.1.	CTI Testi (Comparative Tracking Index Test).....	21
2.3.2.	Dust Fog Test	22
2.3.3.	Salt Fog Test.....	23
2.3.4.	Kuru Ark Testi.....	24
3.	MALZEME VE YÖNTEM.....	26
3.1.	EĞİK DÜZLEM DENEYİ	26
3.1.1.	Eğik Düzlem Deneyini Etkileyen Faktörler	28
3.1.1.1.	<i>Gerilim Seviyesinin Etkisi</i>	28
3.1.1.2.	<i>Elektrolit Türünün Etkisi</i>	28
3.1.1.3.	<i>Elektrolit Çözeltinin Akış Hızının Etkisi</i>	28
3.1.1.4.	<i>Diğer Faktörlerin Etkisi</i>	28
3.1.2.	Numunelerin Hazırlanması.....	29
3.1.2.1.	<i>Silikon Kalıp Üretimi</i>	29
3.1.2.1.	<i>Saf Polyester Üretimi</i>	30
3.1.2.2.	<i>Katkılı Polyester Üretimi</i>	34
3.1.3.	Eğik Düzlem Deney Düzenine Hazırlanması.....	38
3.1.4.	Testlerin Gerçekleştirilmesi.....	44
3.1.5.	Elektrik Alan Dağılımının Nümerik Analizi	48
3.1.5.1.	<i>Numunelerin Bağlı Dielektrik Sabiti Değerlerinin Hesaplanması</i> .	48
3.1.5.2.	<i>Numunelerin Bağlı Manyetik Geçirgenlik Katsayılarının Hesabı</i> ..	53
4.	BULGULAR.....	57
4.1.	KATKI MADDE TÜRÜNÜN SAF POLYESTERİN KULLANIM ÖMRÜNE ETKİSİ.....	57
4.2.	NUMUNELER ÜZERİNDE OLUŞAN KAÇAK AKIM MİKTARI	58
4.3.	KATKI MALZEMESİ TÜRÜNÜN SAF POLYESTERİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNE ETKİSİ.....	68
4.4.	NÜMERİK ANALİZLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	69
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	82

KAYNAKLAR.....	86
EKLER	93
ÖZGEÇMİŞ	99



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Uygulanan gerilim süresine bağlı olarak katı yalıtkanlardaki delinme dayanımının değişimi [64].....	14
Şekil 2.2: Boşluk içeren yalıtkanın elektriksel eşdeğer devresi [69].....	15
Şekil 2.3: Perspektif içinde çubuk düzlem elektrotlar arasında meydana gelen delinme kanalları [64].	16
Şekil 2.4: CTI deney düzeneği şeması [69].....	22
Şekil 2.5: Kuru ark deney düzeneği şeması [71].	24
Şekil 3.1: Deney sonucunda yüzeyinde karbon iz oluşmuş numunenin yüzey görüntüsü.	27
Şekil 3.2: Standartlarda belirtilen numunelerin boyutlarının görseli.	29
Şekil 3.3: Alüminyumdan üretilen kalıbın (a) yandan ve (b) üstten görünümü.	30
Şekil 3.4: (a,b) RTV2 kalıp silikonun kaba ilave edilmesi (c,d) kabın içerisine RTV miktarının % 2,5'i kadar sertleştirici ilave edilmesi (e) sertleştiricinin RTV2'nin içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması (f,g) karışımın alüminyum kalıba dökülmesi (h,ı) silikon kalıbın alüminyum kalıptan çıkarılması.	31
Şekil 3.5: (a) 50 gr polyester içerisine %0,2 oranında kobalt ilave edilmesi (b) ilave edilen kobaltın karışımın içinde homojen bir şekilde dağılması için karıştırılması (c) karışım işlemi tamamlandıktan meydana gelen kütle kaybının görüntüsü.	32
Şekil 3.6: Hızlandırıcı ve sertleştiricinin aynı anda eklenmesi ile oluşan hava kabarcıklarının üstten görüntüsü.	32
Şekil 3.7: Deneye hazır hale getirilen numune görüntüsü.	33
Şekil 3.8: Katkılı polimerin (a) pişirilme öncesinde (b) pişirilme işleminin tamamlanmasının ardından hassas terazi ile tartılmasının görüntüsü.	34
Şekil 3.9: Katkı maddesinin (a) öğütülmemiş ve (b) agat havan yardımı ile öğütülmüş halinin görüntüsü.	34
Şekil 3.10: (a) Karışım kabına polyesterin ilave edilmesi (b) ağırlıkça %3 katkı maddesinin ayarlanması (c) katkı maddesinin agat havan ile öğütülmesi (d) katkı maddesinin polyestere ilave edilmesi (e) katkı maddesinin karıştırılması (f) katkı maddesinin polyestere ilave edilmesi (g) hızlandırıcının içerisine %0,2 oranında hızlandırıcı ilave edilmesi (g) hızlandırıcının	

karıştırılması (h) karışıma sertleştirici ilave edilmesi (i) karışımın silikon kalıba dökülmesi ve oda sıcaklığında 24 saat bekletilmesi.....	35
Şekil 3.11: (a) Saf polyesterin çinko oksit ilave edilmesi ile beyaz renk alması (b) katkılı polyestere %1 MEKP ve %0,02 Co ilave edilmesi ile renginin su yeşiline dönmesi.	36
Şekil 3.12: Polyester içerisine katkı maddesi olarak (a) kobalt (b) manyetit ilave edilmesiyle meydana gelen renk değişiminin görüntüsü.....	37
Şekil 3.13: Polyester içerisine katkı maddesi olarak nikel ilave edilmesiyle meydana gelen renk değişiminin görüntüsü.	37
Şekil 3.14: Sertleşmenin başlamasının ardından silikon kalıba dökülen katkılı polimerlerin yüzeyinde meydana gelen dalgalanmanın görüntüsü.	38
Şekil 3.15: (a) Gerilimi seviyesini ayarlamak için kullanılan varyağın ve (b) standartta belirtilen 33 kΩ direncin görüntüsü.	39
Şekil 3.16: Trafo, varyak ve dirençten oluşan deney panosunun görüntüsü.	39
Şekil 3.17: Yüksek gerilim elektrotuna ait teknik çizim detaylarının görüntüsü.	40
Şekil 3.18: Toprak elektrotuna ait teknik çizim detaylarının görüntüsü.	40
Şekil 3.19: Numunenin yatayla 45° açı yapacak şekilde durmasını sağlayan desteğin görüntüsü.	41
Şekil 3.20: Test sırasında kirletici sıvı akışında kullanılan infüzyon pompası.	41
Şekil 3.21: Elektrolit çözeltinin numune yüzeyine düzgün dağılması için 8 katlı whatman tipi filtre kâğıdının yüksek gerilim elektrotu ile numune arasına sıkıştırılmış görüntüsü.	42
Şekil 3.22: Deney sırasında olası iş kazalarının önüne geçmek için üretilen kafesin görüntüsü.....	42
Şekil 3.23: Kafes topraklamasının görüntüsü.....	43
Şekil 3.24: (a) Eğik düzlem deney düzeneğinin şematik gösterimi	43
Şekil 3.25: Elektriksel bağlantıları tamamlanarak standartlara uygun şekilde konumlandırılmış numune görüntüsü.....	45
Şekil 3.26: Yüksek gerilim elektrotu ile toprak elektrotu arasında oluşan iletken yolun görüntüsü.....	45
Şekil 3.27: Deney sırasında alt elektroda yakın yüzeylerde meydana gelen elektriksel boşalmaların görüntüsü.	46
Şekil 3.28: Sistemin enerjisi kesildikten sonra iletken kısımlarda kalan yüklerin stanka ile toprağa aktarılmasının görüntüsü.	46

Şekil 3.29: Numune üzerinde akan akımın belirlenmesinde kullanılan ölçüm düzeneği.....	47
Şekil 3.30: Sinyal jeneratörü yardımıyla Scobemeter ve problemlerin test edilmesinin görüntüsü.....	47
Şekil 3.31: Kapasitans ölçümü için bakır levhalar arasına yerleştirilmiş saf polyesterden üretilen numunenin görüntüsü.....	49
Şekil 3.32: İki yüzeyi iletken bant ile kaplanarak kordon kablo lehimlenen numunenin (a) üst yüzeyinin (b) alt yüzeyinin görüntüsü.....	50
Şekil 3.33: Kapasitans ölçüm düzeneğinin görüntüsü.....	50
Şekil 3.34: Saf polyester için ölçümler sonucu elde edilen bağıl dielektrik sabiti değerinin grafiği.....	52
Şekil 3.35: İçi boş olarak sarılan bobin teline ait ölçüm görüntüsü.....	54
Şekil 3.36: İçerisinde saf polyester numunesi olarak sarılan bobin tellerinin endüktans ölçümü görüntüsü.....	55
Şekil 4.1: İz oluşumu deneyini tamamlamış saf polyester numune görüntüsü.....	58
Şekil 4.2: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda ve farklı zaman aralıklarında saf polyester numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.....	59
Şekil 4.3: Saf polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği andaki sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.....	60
Şekil 4.4: İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 çinko oksit katkılı polyester numune görüntüsü.....	60
Şekil 4.5: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda farklı zaman aralıklarında %3 çinko oksit katkılı numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri....	61
Şekil 4.6: %3 çinko oksit katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği andaki sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.....	62
Şekil 4.7: İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 kobalt katkılı polyester numune görüntüsü.....	62
Şekil 4.8: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda farklı zaman aralıklarında %3 kobalt katkılı numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.....	63
Şekil 4.9: %3 kobalt katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği andaki sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.....	64
Şekil 4.10: İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 manyetit katkılı polyester numune görüntüsü.....	64

Şekil 4.11: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda farklı zaman aralıklarında %3 manyetit katkılı numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.	65
Şekil 4.12: %3 manyetit katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği andaki sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.	66
Şekil 4.13: İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 nikel katkılı polyester numune görüntüsü.	66
Şekil 4.14: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda farklı zaman aralıklarında %3 nikel katkılı numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.	67
Şekil 4.15: %3 nikel katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği anda sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.	68
Şekil 4.16: Nümerik analizler için 3D tasarımı yapılarak üzerine yüksek gerilim ve toprak elektrodu yerleştirilen numunenin (a) perspektif (b) üstten görünümü....	69
Şekil 4.17: Nümerik analizler için 3D tasarımı yapılan numunenin üçgensel ağ örgülü yapısının görüntüsü.	70
Şekil 4.18: Nümerik analiz sırasında karşılaşılan hata mesajı görüntüsü.....	70
Şekil 4.19: Nümerik analizler için iz oluşumunun numune üzerine tanımlanması.	71
Şekil 4.20: %3 çinko oksit katkılı numunenin (a) elektrik alan dağılımı için (b) manyetik alan dağılımı için uyarılması.	72
Şekil 4.21: Polimerik yalıtkan malzemenin üzerinde oluşan elektrik ve manyetik alanların vektör dağılımları (a) nümerik analiz sonucu elde edilen E dağılımı (b) nümerik analiz sonucu elde edilen H dağılımı (c) E ve H dağılımının teorik gösterimi.	73
Şekil 4.22: Saf polyester numune yüzeyinde meydana gelen iz oluşumunun (a) görseli (b) benzetim modeli.....	74
Şekil 4.23: Saf polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen elektrik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.....	75
Şekil 4.24: Saf polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen manyetik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.	75
Şekil 4.25: %3 çinko oksit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen iz oluşumunun (a) görseli (b) benzetim modeli.....	76
Şekil 4.26: %3 çinko oksit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen elektrik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.	77
Şekil 4.27: %3 çinko oksit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen manyetik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.....	77

Şekil 4.28: %3 nikel katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen iz oluşumunun (a) görseli (b) benzetim modeli.....	78
Şekil 4.29: %3 nikel katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen elektrik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.	78
Şekil 4.30: %3 nikel katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen manyetik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.....	79
Şekil 4.31: %3 manyetit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen iz oluşumunun (a) görseli (b) ağ yapısı	80
Şekil 4.32: %3 manyetit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen elektrik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.....	80
Şekil 4.33: %3 manyetit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen manyetik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.....	81
Şekil 5.1: Numunelerin eğik düzlem deneyine dayanma sürelerinin ortalaması	83
Şekil 5.2: Numunelerin bozulmaya başladığı sıcak değeri.....	83
Şekil 5.3: Deney sırasında V/m cinsinden numune üzerinde oluşan maksimum elektrik alan miktarı.....	84
Şekil 5.4: Deney sırasında A/m cinsinden numune üzerinde oluşan maksimum manyetik alan miktarı.....	84

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: CTI gerilim seviyelerine göre numuneleri sınıflara ayrılması.	22
Tablo 3.1: Saf polyesterin kapasitans ölçüm sonuçları ve dielektrik sabitinin hesaplama sonuçları.	51
Tablo 3.2: Martin Fimberger ve arkadaşlarının 50 Hz frekansında yapmış olduğu çalışmanın sonuçları.	52
Tablo 3.3: Katkılı polimerlerin ölçülen kapasitans değerleri ve hesaplanan bağıl dielektrik sabiti değerleri.	53
Tablo 3.4: Katkılı polyesterlerin bağıl dielektrik sabiti değerlerinin ortalaması ve standart sapması.....	53
Tablo 3.5: İçi boş olarak sarılan bobin teline ait endüktans ölçüm sonuçları.	55
Tablo 3.6: Numunelerin bağıl manyetik geçirgenlik katsayıları.	56
Tablo 3.7: Katkılı polyesterlerin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı değerlerinin ortalaması ve standart sapması	56
Tablo 4.1: Numunelerin ortalama ömür süreleri.	57
Tablo 4.2: Manyetik alan dağılımı için yüksek gerilim elektrodunun uyarıldığı akım değerleri.....	71

SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
G	: Katı yalıtkanın yüzey sızıntı akımı direnci (ohm)
R'	: Dikdörtgen filmin direnci (ohm)
l	: Dikdörtgen filmin uzunluğu (m)
b	: Dikdörtgen filmin genişliği (m)
t	: Katı yalıtkanın kalınlığı (m)
ρ	: Katı yalıtkanın hacim direnci (ohm)
R_T	: $T^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki yalıtkan malzemenin direnci (ohm)
R_0	: 0°C 'deki yalıtkan malzemenin direnci (ohm)
q	: Hacim direnci ile ilgili olarak katı yalıtkan malzemeye ait sabit
Ω	: ohm
U_{kr}	: Katı yalıtkanın termik bozulmaya uğramadan dayanabileceği maksimum gerilim miktarı (V)
a	: Elektromekanik kırılma ile ilgili katı yalıtkan malzemeye ait sabit
k_d	: Isı iletim katsayısı
E_d	: Elektrik alan (V/m)
t_0	: Katı yalıtkanın başlangıç kalınlığı (m)
t	: Katı yalıtkanın kalınlığı (m)
Y	: Young modülü
A	: İletken plakanın alanı (m^2)
C	: Kapasitans (F)
ϵ_0	: Serbest uzayın dielektrik sabiti (F/m)
ϵ_r	: Malzemenin bağıl dielektrik sabiti (F/m)
d	: İletken plakalar arasındaki mesafe (m)
L	: Endüktans (H)
μ_0	: Serbest uzayın manyetik geçirgenlik katsayısı (H/m)
μ_r	: Malzemenin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı (H/m)
N	: Sarım sayısı
E	: Elektrik alan (V/m)
H	: Manyetik alan (H/m)

Kısaltmalar	Açıklama
PVC	: Polivinilklorür
PE	: Polietilen
LDPE	: Alçak Yoğunluklu Polietilen
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
UV	: Ultraviyole
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
CTI	: Comparative Tracking Index Test
UL	: Underwriter Laboratories
kV	: Kilovolt
kVA	: Kilovolt-amper
ATH	: Alüminyum Trihidrat
W	: Watt
CNC	: Computer Numerical Control
MEKP	: Metil Etil Keton Peroksit
CST	: Computer Simulation Technology

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATKI MALZEMELERİNİN POLYESTERİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Salih NİŞANCI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Mukden UĞUR

II. Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARHAN

Özet metni

Günümüzde polimerler çeşitli avantajlarından dolayı başta elektrik endüstrisi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajların başında ise mevcut özelliklerinin farklı katkı madde türleri ile değiştirilebilmesi yer almaktadır.

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde katkı maddelerinin, polyesterin elektriksel özelliklerine ve bozulmaya başladığı sıcaklık değerine etkisini incelemek amacıyla her biri ağırlıkça %3 manyetit, çinko oksit, kobalt ve nikel içeren 4 farklı türde katkılı polyester numune üretimi gerçekleştirilmiş, daha sonra bu numunelere eğik düzlem testi uygulanarak iz oluşumu için geçen süre belirlenmiştir. Test uygulanırken numuneler üzerinden akan akım miktarını gözlemlemek amacıyla numuneye seri bağlanan direnç üzerinden gerilim ölçümü yapılmış ve sonuçlar MATLAB yazılım platformunda çizdirilerek yorumlanmıştır. Katkı maddesi türünün numunenin ısı dayanımına etkisini incelemek amacıyla test boyunca numune üzerindeki sıcaklık dağılımı termal kamera ile gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde ise üretilen numunelerin bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenlik katsayıları ölçülmüş, daha sonra bu değerler kullanılarak test sırasında

numune üzerinde oluşan elektrik ve manyetik alan dağılımları Computer Simulation Technology programını ile simule edilmiştir.

Ağustos 2021, 117 sayfa.

Anahtar kelimeler: polyester, manyetit, kobalt, çinko oksit, nikel, yzzey iz oluşumu, elektriksel bozulma, elektrik alan dağılımları, manyetik alan dağılımları, sıcaklık dağılımları



SUMMARY

M.Sc. THESIS

THE EFFECT OF FILLER MATERIALS ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF POLYESTER

Salih NIŞANCI

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Mukden UĞUR

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Mustafa KARHAN

Today, polymers are widely used in many fields, especially in electrical industry, due to their various advantages. One of these advantages is the possibility to change the existing properties of polymeric materials by using different types of fillers.

In the first part of this thesis, in order to define the effect of fillers on the electrical properties of polyester and also to measure the temperature at which it starts to deteriorate, 4 different types of doped polyester samples were produced, which contains 3% by weight magnetite, zinc oxide, cobalt and nickel. Afterwards, to define the breakdown time, inclined plane tracking test was applied to these samples. In order to observe the amount of current flowing through the samples during the test, voltage measurement was carried out over the resistor connected in series with the sample and the results were interpreted by using MATLAB software platform. In order to examine the effect of filler type on the thermal breakdown strength of samples, the temperature distribution over the surface was examined with a thermal camera throughout the test.

In the second part of the thesis, relative dielectric permittivity and magnetic permeability coefficients of the produced samples were measured and according to these results, electric and

magnetic field distribution formed on the sample during the test was simulated with the Computer Simulations Technology program.

August 2021, 117 pages.

Keywords: polyester, magnetite, cobalt, zinc oxide, nickel, surface tracking, electrical breakdown, electric field distribution, magnetic field distribution, temperature distribution.



1. GİRİŞ

19. yüzyılda elektriğin kullanılmaya başlanmasından bu yana, dünya nüfusunun artması ve teknolojik gelişmelerin hızlanmasıyla birlikte elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Artan bu talebi karşılamak için yeni iletim ve dağıtım hatları kurulmakta ayrıca var olan hatların da güç seviyeleri yükseltilmektedir. Hatların güç seviyelerinin yükseltilmesi elektrik sisteminin temelini oluşturan yalıtım konusunda sorunların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu sorunun çözülmesi için üzerinde çalışılan yöntemlerden en yaygın olanı yalıtkan malzemenin türünün değiştirilmesidir. Bu sayede elektriksel ve mekaniksel açıdan daha verimli ekipmanların üretilmesi hedeflenmektedir [1].

Yalıtkan malzeme olarak ilk başlarda porselen, cam, mika gibi az sayıda malzeme çeşidi kullanılırken 1960'lı yıllarda polimerlerin de yalıtım malzemesi olarak kullanılmaya başlamasıyla bu sayı binlere ulaşmıştır [1, 2]. 1976 yılına kadar polimerlerin dış mekân yalıtım uygulamalarındaki performanslarından istenilen verim alınamadığı için kullanım alanları sadece iç mekân yalıtım uygulamaları ile sınırlı kalmış daha sonra Rosenthal şirketinin silikondan yapmış olduğu izolatörler ile beraber polimerler dış mekân yalıtım uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [3].

Polimerlerin yalıtım malzemesi olarak kullanımının yaygınlaşması polimerlerin diğer yalıtım malzemelerine göre sahip oldukları avantajlardan kaynaklanmaktadır. Bu avantajlar arasında daha hafif olmaları, ağırlığına göre mekanik mukavemetlerinin daha fazla olması, delinme dayanımına karşı daha yüksek direnç göstermeleri, ısı iletimlerinin fazla olması ve diğer inorganik maddeler ile katkılanarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilebilmesi yer almaktadır. Bu avantajlarından dolayı polimerik malzemelere olan ticari ilgi artmış ve artan ticari ilgi daha fazla araştırma faaliyeti yapılmasını sağlamıştır [4].

Polimerlerin çok fazla avantajı olmasına rağmen tek başlarına yalıtım malzemesi olarak kullanılmaları pek yaygın değildir [1]. Bu yüzden polimerler farklı polimerlerle veya inorganik maddeler ile katkılanarak kullanılmaktadırlar. Farklı iki ya da daha fazla malzemenin birleşerek oluşturdukları farklı fiziksel özelliklere sahip yeni malzemeye kompozit malzeme adı verilmektedir.

Kompozit malzemeler yüksek mekaniksel mukavemetleri ve ısı dirençleri, termal dayanımları, kimyasallara veya suya karşı göstermiş oldukları dirençten dolayı geleneksel malzemelere göre daha çok tercih edilmektedir [5].

Kompozit malzemeler raylı sistemler, uzay ve havacılık, inşaat, gıda paketlenme gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmasının yanında üstün elektriksel özelliklere sahip olmalarından dolayı elektrik endüstrisinde de kullanılmaktadır [6, 7, 8, 9].

Elektrik endüstrisinde kullanılan kompozit malzemeler servis ömürleri boyunca çeşitli elektriksel ve mekaniksel stres altında kalırlar ve bu stres kompozit malzemelerin bozulmasına neden olabilmektedir [10]. Elektriksel ve mekaniksel stres altında olan kompozit malzemelerin hizmet ömürleri boyunca bu strese karşı göstermiş oldukları performans, yapıldıkları malzemenin türüne ve tasarım şekillerine bağlı olarak değişmektedir [11]. Bu nedenle elektriksel ve mekaniksel stres altındaki kompozit malzemelerin özelliklerini değerlendirmek için birkaç yöntem üzerinde çalışılmış ve daha sonra bu yöntemler standart haline getirilmiştir [11]. Bu yöntemlerden bazıları

- IEC 60093 Katı elektriksel yalıtım malzemelerinin hacim ve yüzey direncini,
- IEC 60243 Yalıtım malzemelerinin elektriksel dayanımını,
- IEC 60250 Güç, ses ve radyo frekanslarında elektrik yalıtım malzemelerinin geçirgenliğini ve dielektrik yayılma faktörünü,
- IEC 60587 Zorlu ortam koşulları altında kullanılan elektriksel yalıtım malzemelerinin izlenmesi ve aşınmasına karşı direnci,
- IEC 60695-11-10, Yangın tehlikesini,
- IEC 61006, Elektrik yalıtım malzemeleri - Cam geçiş sıcaklığını,
- IEC 61109, AC için kompozit izolatörler 1000 V' den büyük nominal gerilime sahip havai hatlar - Tanımlar, test yöntemleri ve kabul kriterleri Değişiklik 1 (1995)
- IEC 61621 Kuru, katı yalıtım malzemeleri - Yüksek voltaj, düşük akımlı ark deşarjlarına karşı direnç testi olarak bilinmektedir.

Bu standartlar arasında yer alan IEC 60587 standardı ve bu standart ile arasında çok küçük farklılıklar bulunan ASTM D2303 standardı zorlu ortam koşulları altında kullanılan yalıtım malzemelerinin yüzey direncinin karşılaştırılmasında kullanılmaktadır [12]. Bu tez çalışmasında polyester içerisine farklı katkı maddeleri ilave edilerek üretilen kompozit

malzemeler eğik düzlem testine tabi tutulmuş ve katkı maddesi türünün kompozit malzemenin yüzey direncine ve malzemenin dayanımına olan etkisi değerlendirilmiştir.

Literatürdeki çalışmalara ek olarak bu çalışmada katkı maddesi olarak manyetit, kobalt ve nikel kullanılarak üretilen katkılı polimerik yalıtkanlara eğik düzlem testi uygulanmış ve deney sırasında numune yüzeyinde oluşan elektrik ve manyetik alan dağılımı Computer Simulation Technology (CST) programı yardımı ile benzetimi gerçekleştirilmiştir [13].



2. GENEL KISIMLAR

2.1. ELEKTRİKSEL YALITIM MALZEMELERİ

Elektriksel yalıtkanlar, içerisinde elektrik akımını iletmeye yetecek miktarda serbest elektron bulundurmayan malzemelerdir. Ancak mükemmel yalıtkan malzeme bulunmadığı için her yalıtkan malzemenin içerisinde az miktarda serbest elektron bulunmaktadır [14]. Bulunan bu serbest elektronlar, yalıtkan malzemenin maruz kaldığı gerilim miktarına ve çevresel koşullara bağlı olarak yalıtkan malzemenin içerisinden kaçak akım akmasına neden olurlar. Yalıtkan malzemelerin kalitesine göre içerisinden mili amper seviyesinde akım akması için bile kilovolt seviyelerinde gerilim uygulanması gerekmektedir [15]. Ayrıca tüm yalıtkan malzemeler negatif direnç katsayısına sahip oldukları için sıcaklık miktarı arttıkça yalıtkan malzemenin elektriksel direnci de azalmaktadır [15].

Bu tez çalışmasında incelenen elektriksel katı yalıtkanlar inorganik, organik ve polimerik katı yalıtkan malzemeler olarak 3 başlık altında incelenecektir.

2.1.1. Yalıtkan Malzemelerin Elektriksel Özellikleri

Bir malzemenin yalıtkanlığını belirleyen malzemeye ait en önemli elektriksel parametreler malzemenin hacim direnci, yüzey sızıntı akımı direnci ve dielektrik dayanımıdır ve bu parametrelerin önemi yalıtkan malzemenin kullanım alanına göre farklılık göstermektedir [16]. Örneğin yüksek gerilim tesislerinde kullanılan yalıtkan malzemeler için dielektrik dayanımı diğer elektriksel parametrelere göre daha önemli bir parametre iken bobin uçlarının yalıtımında kullanılan yalıtkan malzemeler için yüzey sızıntı akımı direnci diğer parametrelere göre daha önemli bir parametre haline gelmektedir [16]. Yalıtkan malzeme seçiminde bu parametrelerin yanında ticari talepler ile yalıtkan malzemenin mekanik özellikleri de etkili olmaktadır.

2.1.1.1. Yüzey Sızıntı Akımı Direnci

Farklı potansiyele sahip iki nokta arasında akım akışı meydana gelmektedir ve yalıtkan malzemelerde, yalıtkan malzemelerin yüzeyinden ve yalıtkan malzemelerin içerisinden olmak üzere iki farklı türde akım akışı görülmektedir. Yüzey sızıntı akımı direnci yalıtkan malzemenin yüzeyi boyunca akan kaçak akıma karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmaktadır [16].

Curtis (1915), yapmış olduğu çalışmada yüzey sızıntı akımı direncini benzetme yoluyla 1cm^2 yüzey alanına sahip bir filmin karşılıklı iki kenarı arasındaki direnç olarak tanımlamaktadır ve yüzey uniform ise yalıtkan malzemenin yüzey sızıntı akımı direncinin Eşitlik 2.1'de olduğu gibi ifade edileceğini belirtmiştir [16].

$$G = R'bl \quad (2.1)$$

Burada G , yalıtkan malzemenin yüzey sızıntı akımı direncini, R' ise l uzunluğundaki ve b genişliğindeki dikdörtgen filmin direncini göstermektedir. Curtis (1915), çalışmanın devamında t kalınlığındaki yalıtkan malzemenin yüzey sızıntı akımı direnci ile hacim direnci arasındaki ilişkiyi Eşitlik 2.2'de olduğu gibi tanımlamıştır.

$$\rho = Gt \quad (2.2)$$

Çevresel faktörlerin yalıtkan malzemelerin yüzey sızıntı akımı direncini etkilediğini düşünen Curtis (1915), bu doğrultuda ortamdaki nem miktarının yalıtkan malzemenin yüzey sızıntı akımı direncine etkisini incelemek amacıyla kauçuk numuneleri ASTM D-257 standartında belirtildiği gibi nem oranının %50 ve %93 olduğu ortamlarda bekletmiş ve kauçuk numunelerin yüzey sızıntı akımı direncinin zamana bağlı olarak ilk 3 saat içerisinde logaritmik bir şekilde hızla azaldığını, sonraki zamanlarda ise nispeten daha yavaş azaldığı gözlemlemiştir [16, 17]. Curtis (1915), daha sonra yapmış olduğu bu çalışmayı farklı yalıtkan malzeme türleri için tekrarlamış ve ortamdaki nem miktarında meydana gelen değişimden, yalıtkan malzeme türlerinin sahip olduğu yüzey sızıntı akımı direnci değerlerinin farklı oranlarda etkilendiğini gözlemlemiştir [17].

Sülfürik asit çözeltisi ile denge halindeki havanın bağıl nemi neredeyse sıcaklıktan bağımsız hale gelmektedir [18]. Bu yüzden Curtis (1915), ortam sıcaklığının yalıtkan malzemenin yüzey sızıntı akımı direncine etkisini incelemek amacıyla ilk olarak ortamdaki nem miktarını sülfürik asit çözeltisi ile ayarlamıştır. Havanın nem miktarının sıcaklıktan bağımsız hale getirilmesinin ardından $25\text{ }^\circ\text{C}$ ve $30\text{ }^\circ\text{C}$ ortam sıcaklıklarında deneyleri gerçekleştirmiş ve deneylerin sonucunda yalıtkan malzemelerin yüzey sızıntı akımı direncinde belirgin bir farklılığın meydana gelmediğini gözlemlemiştir [16].

2.1.1.2. Hacim Direnci

Bir malzemenin hacim direnci, bir santimetre küpünün zıt iki yüzeyi arasından akan akıma karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanır ve bu direnç yüzey sızıntı akımı direnci gibi çevresel koşullardan etkilenmektedir [17].

Literatürdeki çalışmalarda ilk olarak ortamdaki nem miktarının, yalıtkan malzemenin hacim direncine etkisini incelemek amacıyla yalıtkan malzemeler, içerisinde belirli miktarda nem bulunan ortamda bekletilmiş ve bu süre içerisinde sık aralıklarla yalıtkan malzemelerin hacim direnci ölçülmüştür. Daha sonra ortamın nem miktarı değiştirilerek yapılan ölçümler tekrarlanmış ve ölçüm sonuçları incelendiğinde ortamdaki nem miktarının artması ile yalıtkan malzemenin hacim direncinin azaldığı ancak belirli bir süre sonra bu durumun dengeye ulaştığı görülmüştür. Daha sonra bu çalışma farklı yalıtkan malzeme türleri için tekrarlandığında ortamın nem miktarında meydana gelen değişim, farklı türdeki yalıtkan malzemelerin hacim direncini farklı oranlarda etkilediği bilgisine ulaşılmıştır [16].

Literatürde diğer bir çevresel etken olan sıcaklığın yalıtkan malzemenin hacim direnci üzerindeki etkisini incelemek amacıyla birçok çalışma yapıldığı ancak bu çalışmalar sırasında düşük sıcaklıklarda istenilen verimin alınmadığı belirtilmiştir [19]. Konu ile ilgili Dietrich (1909), tarafından yapılan çalışmada 20°C ile 200°C arasında çok sayıda izolator üzerinde araştırma yapılmış ve araştırma sonuçları değerlendirilerek sıcaklık değişiminin malzemenin hacim direncine olan etkisi Eşitlik 2.3'te olduğu gibi formül haline getirilmiştir [17].

$$R_T = R_0 e^{\frac{-qT}{273(273+T)}} \quad (2.3)$$

Burada R_t herhangi bir T sıcaklığındaki yalıtkan malzemenin hacim direncini, R_0 , 0 °C'deki yalıtkan malzemenin hacim direncini ve q ise değeri 4.000 ile 25.000 arasında olan ve yalıtkan malzemeye ait sabiti göstermektedir.

Son olarak uygulanan gerilim miktarının yalıtkan malzemenin hacim direnci üzerindeki etkisi incelendiğinde gözenekli yalıtkanlarda gerilim değerinin artması ile yalıtkan malzemenin direnci azalırken, opal cam gibi yalıtkan malzemelerde belirli bir gerilim seviyesine kadar gerilim ile yalıtkan malzemenin hacim direncinin doğru orantılı olarak değiştiği belirtilmiştir [17].

2.1.1.3. Dielektrik Dayanım

Dielektrik dayanım bir malzemenin elektriksel anlamda herhangi bir bozulmaya uğramadan dayanabileceği elektrik alan miktarı olarak adlandırılmaktadır. Bu yüzden dielektrik dayanımı yüksek olan malzemeler elektriksel zorlanmalara karşı daha fazla direnç gösterirler [20].

2.1.2. İnorganik Katı Yalıtkan Malzemeler

İnorganik katı yalıtkan malzemelerin üretimi zordur ve bu yüzden genellikle organik katı yalıtkan malzemelerin kullanımı için elverişli ortamın bulunmadığı durumlarda inorganik katı yalıtkan malzemelerin kullanılması tercih edilmektedir. İnorganik katı yalıtkan malzemeler çok yüksek sıcaklıklarda bile elektriksel özelliklerinde herhangi bir bozulma meydana gelmeden kullanılabilirler [21].

2.1.2.1. Alüminyum Oksit Yalıtkanlar

Alüminyum oksit mükemmel dielektrik özelliğe sahip olması, mekaniksel mukavemetinin iyi olması gibi özelliklerinin yanında birçok yüzeye iyi yapışması ve özgül ağırlığının düşük olması sebebiyle elektronik endüstrisinde iyon bariyeri ve koruyucu kaplama olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [22].

Ayrıca alüminyum oksit yalıtkan olmasına rağmen orta derecede ısı iletkenlik gösterir ve ısı iletkenliği 30-42 W/mK arasında değişmektedir ve bu değer plastik (0,15-0,3 W/mK), cam ve porselen gibi diğer yalıtkanlara göre oldukça iyidir [23, 24].

2.1.2.2. Porselen Yalıtkanlar

İzolator yapımında oldukça yaygın olarak kullanılan porselen, camsı bir fazın içerisine dağılmış olarak bulunan kristal fazlardan oluşan çok fazlı bir yapıya sahip olan seramik malzeme türüdür [25]. Genel olarak yapısında %50 Kaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), %25 feldspat ($K \cdot Al \cdot SiO_3$ veya $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot P \cdot SiO_2$) ve %25 kuvars (SiO_2 'nin normal sıcaklıkta saydam ve kristal olan şekli) bulunmaktadır [26].

Porselenler iyi derecede dielektrik dayanıma ve mekaniksel mukavemete sahiptir. Porselen hamuru mekanik mukavemetinin ve su emme kapasitesinin artması için, sırlama öncesinde ortalama 1000°C'de pişirilmektedir. Ancak üretimi tamamlanmış porselenlerin uzun süre yüksek sıcaklıklarda kullanılması porselenin içinde bulunan fazların konsantrasyonunu, boyutunu ve şeklini önemli ölçüde etkiler ve bu etkilenme porselenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır [27, 28]. Örneğin oda sıcaklığında $10^{14} \Omega$

elektriksel dirence sahip olan porselenin uzun süre yüksek sıcaklıklarda kullanılması ile elektriksel direnci $10^4 \Omega$ 'a kadar düşmektedir [29].

Sırlama işlemi ise porselenin dielektrik dayanımını artırmak için yapılmaktadır. Porselen izolatörlerde sırlama işlemi sonucunda yüzeyin pürüzsüz hale gelmesi kirlenen izolatörlerin yüzeylerinin yağmur suyu gibi çevresel etkenlerle bile kolayca temizlenmesine imkân sağlayarak porselen izolatörlerin kullanım ömrünü artırmaktadır [30].

Genel olarak porselen, dielektrik dayanımının, mekaniksel mukavemetinin iyi olması, korozyona ve çevresel kirliliklere karşı dayanıklı olmasının yanında asitlerin birçoğu ile tepkimeye girmemesi gibi avantajlarından dolayı elektrik ve elektronik endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir [31].

2.1.2.3. Magnezyum Oksit Yalıtkanlar

İnorganik yalıtım malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan magnezyum oksitin yüksek elektriksel dirence sahip olmasına ($10^{14} \Omega$) rağmen, havadaki karbondioksiti emmesi ve suda çözünmesi nedeniyle yalıtım direncinin değeri oldukça düşmektedir [32]. Bu özelliklerinin yanında magnezyum oksitin termal iletkenliğinin (78 W/mK) fazla olması ise kullanım alanının yaygınlaşmasını sağlamıştır [32].

2.1.2.4. Cam Yalıtkanlar

Cam genellikle kireç kuvars gibi malzemelerin karıştırılarak yüksek sıcaklıklarda pişirilmesinin ardından bulunduğu kalıbın içerisinde aniden soğutulması ile elde edilen ve normal sıcaklıklarda neredeyse mükemmel yakın derecede termal ve elektriksel yalıtkanlık gösteren katı bir yalıtım malzemesidir [33].

Camın oda sıcaklığındaki elektriksel direnci $10^{11} \Omega$ ile $10^{15} \Omega$ arasında iken bu değer sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Ayrıca cam ısıl genleşme katsayısının küçük olmasının yanında yüksek sıcaklıklarda güneş ışığını geçirmesi sayesinde sıcaklık değişimi nedeniyle meydana gelen bozulmalara karşı dayanıklıdır [34, 35, 36]. Ayrıca camın izotropik yapıda olması, yani fiziksel özelliklerinin yönden bağımsız olması nedeniyle malzemenin gerilme mukavemeti, elektriksel direnci ve ısıl genleşme gibi üstün özelliklerinin malzemenin bütün yönlerinde aynı özelliği göstermesini sağlamaktadır [37].

2.1.2.5. Mika Yalıtkanlar

Doğal inorganik malzeme sınıfına giren mika doğada bol miktarda bulunan bir mineral türüdür [38]. Mikaların oda sıcaklığındaki bağıl dielektrik sabiti 3 ile 6 arasında değişirken elektriksel direnci ise yaklaşık olarak $3 \times 10^{12} \Omega$ 'dur. Elektriksel özelliklerinin iyi olmasının yanında 600 °C gibi yüksek sıcaklıklara kadar bozulmadan kullanılabilmesi mikaların kullanım alanını artırmaktadır [39].

Hindistan'da yakut mika olarak adlandırılan yüksek kaliteli mikalar kapasitör yapımında ve transformatör sargılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca mikaların üretim maliyetinin düşük olması ve doğada bol miktarda bulunmasının yanında özgül ağırlığının az olması sebebiyle ($2,4 \text{ gr/cm}^3$) ağırlığın problem olduğu havacılık ve otomotiv sektöründe yalıtım malzemesi olarak yaygın bir şekilde tercih edilmektedir [40].

2.1.3. Organik Katı Yalıtkanlar

Bitkisel ve hayvansal kökenli olan organik katı yalıtkanlar genellikle benzer elektriksel karakteristiğe sahiptir [41]. Organik katı yalıtkanların iyi yalıtım özelliğine sahip olmalarının yanında ekipmanlara uygulanması da oldukça kolaydır ve bu yüzden kablo, kapasite ve transformatör üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Ancak 100 °C' nin üzerinde elektriksel ve mekanik özelliklerinin büyük ölçüde bozulmaya uğraması organik katı yalıtkanların en büyük dezavantajı olarak bilinmektedir ve bu durum kullanım alanlarını kısıtlamaktadır [1].

2.1.4. Polimerik Yalıtkanlar

Monomer adı verilen tek parçalı küçük kimyasal birimlerin tekrarlanması ile elde edilen polimerler başta yalıtım malzemesi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [42].

Yalıtkan olarak kullanılan polimerler doğal ve sentetik olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır [1]. Doğal polimerler su bazlıdır ve doğada doğal olarak bulunurlar. Sentetik polimerler ise petrol bazlı polimerlerdir ve laboratuvar ortamında üretilir. Sentetik polimerler termoset polimerler ve termoplastik polimerler olmak üzere 2 grupta incelenmektedir [1].

Termoset polimerler, polimerizasyon sırasında ısı işlem görek 3 boyutlu çapraz kovalent bağ oluşturan polimerlerdir ve çapraz kovalent bağ oluşturmaları nedeniyle polimerizasyon işleminin tamamlanmasının ardından geri dönüşümsüz olarak üretilirler [43]. Ayrıca termoset

polimerlerin çapraz kovalent bağ oluşturmaları termoplastik polimerlere göre mekaniksel mukavemetlerini artırır ve daha sert bir yapıya sahip olmalarını sağlar. Termoset polimerler arasında polyester, epoksi reçineler gibi polimerler bulunmaktadır.

Termoplastik polimerler, termoset polimerlerin aksine polimerizasyon işleminin tamamlanmasının ardından ısı işlem ile eritebilir ve tekrar şekillendirilebilirler. Termoplastik polimerlerin ısı işlem ile eritilmesi polimerin kimyasal özelliğini bozmayacak bir sıcaklıkta gerçekleştirilirse bu işlem sürekli olarak tekrarlanabilir [43]. Termoplastik polimerlerin yapısında termoset polimerlere oranla daha zayıf kimyasal bağ bulunur ve polietilen (PE), polivinil klorür (PVC) gibi polimerler bu grupta yer almaktadır.

Polimerlerin kolay üretilibilmeleri, hafif olmaları gibi avantajlarına ek olarak farklı türdeki katkı maddeleri ile birlikte üretimlerinin yapılabilmesi polimerlerin önemli avantajları arasında yer almaktadır. Katkı maddeleri polimerlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bu etkileme katkı malzemesinin matris boyunca homojen olarak dağılmasına bağlıdır [44]. Elektrik endüstrisinde, katkılı polimerlerin tercih edilmesindeki en büyük etken polimerik mazlemenin matrisindeki bileşenlerin şeklinin, boyutunun ve iletkenliğinin katkı malzemesinin türüne göre büyük ölçüde değiştirilebilmesidir [44]. Bu sayede ihtiyaca göre istenilen elektriksel ve mekaniksel özelliklere sahip yeni malzemeler üretilir.

2.1.4.1. Polietilen (PE) Yalıtkanlar

Termoplastik polimer sınıfında yer alan polietilen çift bağ ile bağlanmış iki metilen (CH_2) molekülünden oluşan etilen molekülünün (C_2H_4) polimerizasyonu ile elde edilir [45]. Elektriksel dayanımı yüksek olan polietilenin kimyasallara ve korozyona karşı da dayanıklı bir polimer olmasının yanında esnek ve kolay kaplanabilir yapısı sebebiyle kablo yapımında yaygın olarak kullanılan yalıtkan bir malzeme türüdür.

Polietilen alçak yoğunluklu (LDPE) ve yüksek yoğunluklu (HDPE) olmak üzere iki kısma ayrılır. Oda sıcaklığındaki yoğunluğu $0,91 \text{ gr/cm}^3$ ile $0,93 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmekte olan LDPE kopmaya ve kimyasal maddelere karşı dirençli olmasına rağmen maksimum 80°C 'ye kadar olan uygulamalarda kullanılmaktadır [46, 47, 48].

HDPE'nin yoğunluğu $0,94 \text{ gr/cm}^3$ ile $0,97 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmekte olup suya ve kimyasal maddelere karşı dirençli olmasına karşın açık hava koşullarında alçak yoğunluklu polietilen

kadar dayanıklı değildir. LDPE amorf bir yapıya sahipken HDPE ise kristal bir yapıya sahiptir [46, 47, 48].

2.1.4.2. XLPE

Termoset polimerler sınıfında yer alan XLPE, polietilen moleküllerinin çapraz bağlanması sonucu elde edilir [49]. XLPE'nin düşük sıcaklıklardaki elektriksel özellikleri, PE'nin elektriksel özelliklerine yakın olmasına rağmen çapraz bağlı olması sebebiyle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen uygulamalarda PE'ye göre daha üstün performans gösterir. Ayrıca XLPE'nin mekaniksel özellikleri PE'ye göre daha iyidir ve XLPE genel olarak yüksek gerilim yeraltı kablosu yapımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [50].

2.1.4.3. Polivinilklorür (PVC)

Dünyada en çok kullanılan polimerlerden biri olan polivinilklorür (PVC), vinilklorürün polimerizasyonu ile elde edilir [51]. Esnek ve sert olmak üzere iki farklı yapıda bulunan PVC'nin esnek olanı elektrik endüstrisindeki kablo üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [52].

PVC neme, toza, aside ve farklı kimyasallara karşı dirençli olmasına rağmen XLPE'ye göre zayıf bir karakteristiğe sahip olması nedeniyle genel olarak 10 kV'un altındaki elektriksel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [47]. PVC'nin tercih edilmesindeki diğer önemli bir etken elektriksel iletkenliğinin düşük olması ($10^{-8} \text{ S.cm}^{-1}$) sebebiyle yüksek yalıtkanlık özelliği göstermesidir [53]. PVC'nin elektriksel özellikleri kimyasal bileşimine, yapısal özelliklerine ve moleküler düzenine bağlıdır [54].

2.1.4.4. Elastomer

Sentetik ve doğal kauçuk olmak üzere iki gruba ayrılan elastomerler korozyona ve kimyasallara karşı dayanıklı olmaları nedeniyle birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ağaçta bulunan sütun işlem görmesiyle elde edilen doğal kauçuğun mevcut özelliklerini iyileştirmek amacıyla petrol parçalanmış ve daha sonra sentetik kauçuklar elde edilmiştir [55].

Sentetik kauçuklar kısmına giren silikon kauçuk, etilen propilen kauçuk gibi bazı kauçuk türleri elektrik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Silikon kauçuğun esnek bir yapıya sahip olmasının yanında termal ve mekanik özelliklerinin iyi olmasından dolayı katkılı polimer üretiminde matris malzeme olarak tercih edilmektedir ve kablolar için önemli bir elektriksel yalıtım malzemesidir [56]. Silikon kauçuğun bağlı dielektrik sabiti frekansa bağlı olarak 2,9 ile

3,6 arasında değişirken elektriksel direnci ise $3,16 \times 10^{19} \Omega$ ile $10^{22} \Omega$ arasında değişmektedir [57].

2.1.4.5. Epoksi Reçineler

Isı ile sertleşen malzemeler arasında yer alan epoksi reçinelerin üstün mekaniksel ve elektriksel özelliklerinin yanı sıra kolay işlenebilir olmaları nedeniyle elektriksel ve endüstriyel alanlardaki birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [58].

180°C' ye kadar bozulmaya uğramadan kullanılabilen epoksi reçinelerin oda sıcaklığındaki bağıl dielektrik sabiti 3,5 civarındadır ve bu değer sıcaklık ile doğru orantılı olarak değişmektedir [27]. Epoksi reçinelerin bağıl dielektrik sabiti değerinin sıcaklık ile doğru orantılı olarak değişmesine karşın sıcaklığın artması epoksi reçinede meydana gelen kayıp faktörünün de artmasına neden olmaktadır [59].

2.1.4.6. Polyesterler

Polyesterler doymuş ve doymamış polyesterler olmak üzere iki kısımda incelenir [1]. Doymuş polyesterler ısı işlem görmeleri halinde kimyasal yapıları bozulmadan erir ve tekrar şekil alabilirler. Film yapımında yaygın bir şekilde kullanılan doymuş polyesterler, kâğıt yalıtkanların yumuşama sıcaklığından daha yüksek bir yumuşama sıcaklığına sahip olmaları nedeniyle kâğıt yalıtkanlara göre daha verimli bir kullanım alanı sunarlar [1]. 100°C sıcaklıkta $10^{15}\Omega$ elektriksel dirence sahip olan doymamış polyesterlerin, düşük frekanslardaki kayıp faktörünün az olması ve kimyasallara karşı direnç göstermeleri sebebiyle bu yalıtkanlar yer altı kablolarında yaygın olarak kullanılır [1].

Yapısında karbon karbon (C=C) çift bağ bulunduran doymamış polyesterler ise doymuş polyesterlerin aksine sertleşme olayının gerçekleşmesinin ardından tekrar işlenemeyecek şekilde çapraz bağ oluştururlar. Doymamış polyesterler doymuş polyesterlere oranla daha yaygın olarak kullanılırlar ve polyester reçine kullanımının yaklaşık %75'ini oluştururlar [60]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde polyesterlerin, düşük maliyetle iyi bir mekanik dayanıklılık, yüksek elektriksel ve kimyasal dirence sahip olmalarına rağmen farklı katkı malzemeleri ile mevcut elektriksel ve mekaniksel özelliklerinin geliştirilmeye çalışıldığı görülmüştür [60]. Örneğin AKRAM ve diğ. (2006), yapmış olduğu çalışmada saf olarak üretilen polyesterin bağıl dielektrik sabiti değerini 6 civarında bulurken, %50 cam elyaf katkısı ile üretilen polyesterlerin bağıl dielektrik sabiti değerinin cam elyafın türüne bağlı olarak 10 ile

18 arasında değiştiğini ve bu değişimin polyesterin içerisine ilave edilen cam elyafın bağlı dielektrik sabiti değerinin polyesterin bağlı dielektrik sabiti değerine göre daha fazla olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [61]. Ayrıca üretilen polyesterlerin bağlı dielektrik sabiti değerinin frekansın ve sıcaklığın değişmesinden etkilendiğini ve bu yüzden polyesterin bağlı dielektrik sabiti değerini ve dielektrik kaybını sıcaklığın ve frekansın bir fonksiyonu olarak incelenmesi gerektiğini ve bu inceleme yönteminin polimerik yapılar için en uygun ve hassas yöntemlerinden biri olduğunu belirtmişlerdir [61].

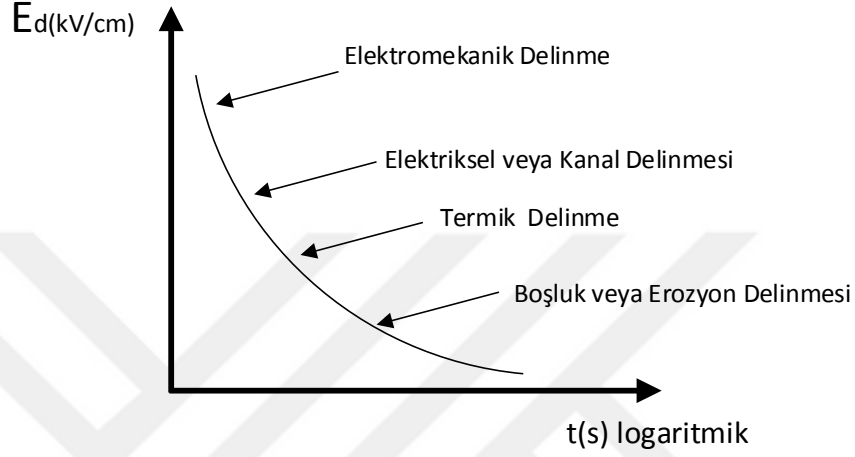
Polyesterin elektriksel ve mekaniksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla katkı malzemesi olarak cam elyafın haricinde magnezyum oksit, alüminyum oksit, kalsiyum oksit gibi farklı türdeki maddeler farklı oranlarda katkılanmaktadır [1].

2.2. ELEKTRİKSEL YALITKANLARDA BOZULMA TÜRLERİ

Yalıtkanlar elektrik endüstrisinin ayrılmaz bir parçasıdır ve kullanımları sırasında çevresel faktörlerin de etkisiyle elektriksel ve mekaniksel strese maruz kalırlar. Strese maruz kalan yalıtkan malzemenin yapısında fiziksel veya kimyasal olarak bozulma meydana gelir ve bu bozulma yalıtkan malzemenin türüne göre farklılık göstermektedir. Örneğin gaz yalıtkanların tamamı bozulmaya uğradıktan sonra tekrar kullanılabilirken, sıvı yalıtkanların bir kısmı ile katı yalıtkanların tamamı onarılamayacak şekilde bozulmaya uğrarlar ve yalıtkanlık özelliğini kaybederler [62]. Bu nedenle elektrik endüstrisinin temelini oluşturan katı yalıtkanlarda meydana gelen bozulma türleri ve katı yalıtkanların bu bozulma türlerine karşı göstermiş oldukları direncin önceden bilinmesi sistemin güvenirliliği açısından çok önemlidir. Katı yalıtkanlarda görülen bozulma olayları

1. Yaşlanma
 2. Kısmi Boşalma
 3. Kanal Oluşumu
 4. Termik Delinme
 5. Elektromekanik Delinme
 6. Erozyon
 7. Yüzey Aşınımı
- başlıkları altında incelenmektedir.

Katı yalıtkanlarda görülen bozulma olaylarında, katı yalıtkanların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanında servis ömürleri boyunca maruz kaldıkları gerilim, nem, ultraviyole (UV), rüzgâr gibi çevresel faktörler de etkilidir [63]. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi katı yalıtkanların delinme dayanımı maruz kaldıkları gerilimin miktarına ve süresine bağlı olarak değişmektedir [64].



Şekil 2.1: Uygulanan gerilim süresine bağlı olarak katı yalıtkanlardaki delinme dayanımının değişimi [64].

Bu bölümde katı yalıtkanlarda görülen bozulma türleri ayrı ayrı incelenecek ve tez çalışmasında kullanılan yüzey aşınımı daha detaylı olarak ele alınacaktır.

2.2.1. Yaşlanma

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission, IEC), katı yalıtkanlarda görülen yaşlanma olayını yalıtkanın kullanıma bağlı olarak geri dönüşümü olmayan bozulma şeklinde tanımlamaktadır.

Nem, sıcaklık değişimi, UV, mekanik stres, güneş ışığı, rüzgâr gibi çevresel etkenler izolatorlerin yaşlanmasını hızlandırır ve elektriksel yaşlanma kaçak akım ve kurubant deşarjları ile beraber iz oluşumu ve erozyonun meydana gelmesinde doğrudan rol oynar [62].

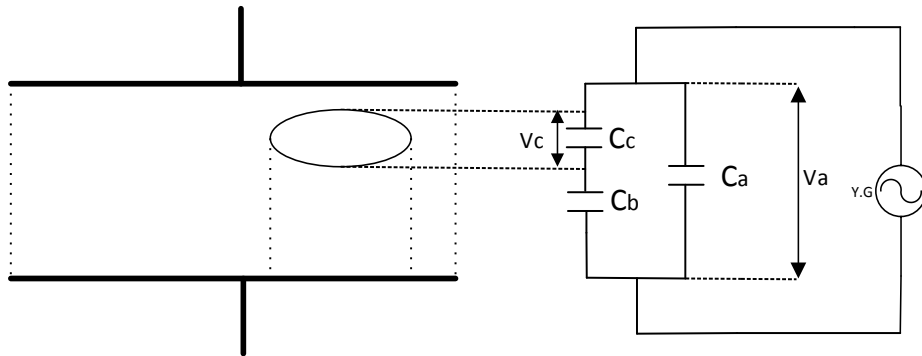
Rüzgâr, yaşlanmayı hızlandıran önemli çevresel etkenlerden bir tanesidir. Rüzgâr, izolatorlerde titreşime sebep olması nedeniyle mekanik yorgunluğa sebep olur ve bu yüzden seramik olmayan izolatorlerin tasarlanması sırasında dikkat edilmesi gereken önemli bir faktördür [62]. Ayrıca izolatorlerin yüzeyleri buldukları ortama bağlı olarak kirlenir. Yüzeydeki kir ile beraber çiy ve sis gibi etkenlerin yalıtkan üzerinde iletken bir yol oluşturmasıyla yalıtkan

yüzeyinde düzensiz bir gerilim dağılımı görülür [65]. Bu çevresel faktörlerin yanında malzemenin bileşimi ve moleküler yapısı da yaşlanma sürecini etkilemektedir [52]. Genellikle elektriksel bozulmaya dayalı yaşlanma, ağaçlanma, kısmi deşarjlar ve dielektrik ısıtma mekanizmalarını içerir [62].

2.2.2. Kısmi Boşalma

İlk olarak keskin kenarlarda gerilimin yoğunlaşması veya seri bağlı olan farklı yalıtım malzemelerinin birinde meydana gelen kısmen yalıtım bozulması olarak adlandırılan tanım daha sonra içerisine iç deşarjların, boşluklarda meydana gelen deşarjların ve yüzey deşarjlarının da dâhil edilmesiyle genişletilmiştir [66]. Şuan kısmi deşarj IEC 60270 standardında elektronların, iletkene bitişik veya iletkenden ayrı olarak bulunan izolasyonu kısmi olarak aşmasıyla meydana gelen elektriksel boşalma olarak tanımlanmaktadır [67].

Kısmi boşalmaların başlıca nedeni üretim teknolojisindeki gelişmelere rağmen yalıtkanların üretimi sırasında veya montajı aşamasında çeşitli problemlerden dolayı kusurların oluşmasıdır [68]. Üretim sırasında yalıtkan malzeme içerisinde kalan hava boşlukları, toz parçacıkları, malzeme üzerindeki kanallar ve sivri uçlar kısmi boşalmaya neden olmaktadır ve bu etkenlerden en önemlisi malzemenin üretilmesi sırasında yalıtım malzemesinin içerisinde kalan hava boşluklarıdır. Malzeme içerisindeki boşluklar genellikle delinme dayanımı katı yalıtkana göre çok daha az olan gaz yalıtkanlar ile dolar. İçerisinde gaz bulunan kısımda bir elektrik alan zorlaması meydana gelir ve artan elektrik alan zorlaması malzeme içerisinde bulunan gazın delinme dayanımını aştığı anda gaz iyonize olur ve yalıtkan delinir [62, 68]. İçerisinde hava boşluğu bulunan yalıtkanın eş değer devresi Şekil 2.2’de verilmiştir [69].



Şekil 2.2: Boşluk içeren yalıtkanın elektriksel eşdeğer devresi [69].

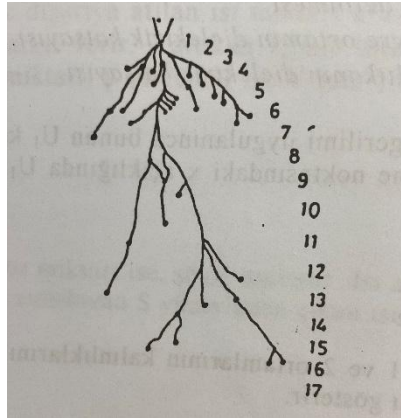
Kısmi boşalma sonucunda yalıtkan malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliğinde meydana gelen değişimler malzemenin yalıtkanlık özelliğinin bozulmasına neden olmaktadır.

2.2.3. Elektriksel Ağaç Oluşumu

Elektrik ağacı oluşumu, yüksek AC gerilim altında polimerik yalıtkanların bozulmasına yol açan bir süreçtir. Delinme olayı sırasında oluşan şekil ağaca benzediği için bu delinme türüne elektriksel ağaç oluşumu şeklinde isim verilmiştir [70].

Yalıtkan malzemenin içinde bulunan elektronlar elektrik alanın etkisiyle belirli miktarda enerji kazanırlar ve serbest kalarak iletim bandına girerler [71]. Elektrik alanın etkisi ile iletim bandına giren elektronlar, diğer elektronlar ile çarpışırlar. Elektronlar bu çarpışma sırasında mevcut enerjilerinin bir kısmını diğer elektronlara aktararak kaybederler ve anoda doğru sürüklenmeye başlarlar. Çarpışmalar sonucunda serbest kalan elektronların sayısı artarak elektron çığı meydana gelir [62]. Oluşan bu çığ uzunluğunun belirli bir büyüklüğü aşmasıyla kanal oluşumu gerçekleşir ve delinme meydana gelir.

Delinme olayı genel olarak tek bir boşalma kanalı şeklinde görülmez. Yapılan çalışmalarda saydam yalıtkan numune içinde gömülü halde bulunan çubuk-düzlem elektrot sistemine darbe gerilimi uygulandığı zaman Şekil 2.3'te görüldüğü gibi ağaç şeklinde delinme kanalları meydana geldiği gözlemlenmiştir [64].



Şekil 2.3: Perspektif içinde çubuk düzlem elektrotlar arasında meydana gelen delinme kanalları [64].

Cooper, Şekil 2.3'te görülen delinme kanallarını aynı genlikli 190 adet darbe gerilimini numuneye $1/30 \mu\text{s}$ boyunca uygulayarak elde etmiştir [64]. Ancak her darbe gerilimi kanal meydana getirmediğini ve oluşan kanalların da uygulanan gerilime bağlı olarak farklı şekillerde meydana geldiğini gözlemlenmiştir. Örneğin pozitif DC darbe gerilimi uygulandığında dallı

şekilde ağaç oluşumu meydana gelirken negatif DC darbe gerilimi uygulandığında oluşan ağaç daha sade bir yapıda meydana gelerek çam ağacına benzemektedir [72].

AC gerilimde DC gerilimdeki gibi katı yalıtkan içerisinde gömülü elektrot sistemine pek fazla rastlanmaz [64]. Normal şartlar altında katı yalıtkanlar sıvı veya gaz yalıtkanlar ile birlikte elektriksel zorlanmaya maruz kalır. Katı yalıtkanların çevresinde bulunan diğer yalıtkanların bağıl dielektrik katsayısı katı yalıtkanların bağıl dielektrik katsayısından çok küçük olduğu için katı yalıtkanların çevre ortamı daha fazla elektriksel zorlanmaya maruz kalır. Katı yalıtkanların çevresinde oluşan elektriksel zorlanma ortamının delinme dayanımını aşınca katı yalıtkanın çevresinde delinme meydana gelir ve numunenin yüzeyinde boşalmalar sonucu biriken yük elektrik alanın bozulmasına neden olur. Yük yığılması ile meydana gelen elektrik alan ani delinme alan şiddetinden çok fazladır [64]. Bunun sonucunda kanal uçlarında bölgesel delinme meydana gelir. Yalıtkan içerisinde delinme kanallarının oluşması ve bu kanalların bütün kalınlık boyunca devam etmesi sonucu delinme olayı tamamlanır. AC gerilimlerde bu süreç birkaç saniye ile birkaç dakika arasında meydana gelmektedir ve ağaç oluşumu 3 aşama şeklinde görülür ve bu aşamalar;

1. Oluşum safhası: Enerjinin malzemenin belirli noktalarına iletiildiği safha
2. Ağaç oluşumu safhası: İyonların elektrik alanının fazla olduğu yerlerde toplandığı safha
3. Ağacın büyümesi safhası

şeklindedir [64].

2.2.4. Termik Delinme

Katı yalıtkanlara gerilim uygulandığı zaman yalıtkan malzemenin türüne ve uygulanan gerilim miktarına bağlı olarak yalıtkan malzemenin içerisinde çok küçük miktarda akım akar [64]. Yalıtkan malzeme, içerisinde akan akımın ve dielektrik kayıpların etkisiyle ısınmaya başlar. Yalıtkan malzeme üzerinde meydana gelen ısı artışı iletim ve radyasyon yoluyla çevre ortama aktarılır ancak üretilen ısı miktarı dışarıya aktarılan ısı miktarından fazla olursa yalıtkan malzeme üzerinde sıcaklık artışı meydana gelir ve kararsız bir durum oluşur. Bu kararsız durumun oluşmaması için katı yalıtkanlara uygulanabilecek maksimum gerilim değeri vardır ve bu gerilim değeri belirli bir kalınlığa kadar malzemenin kalınlığı ile doğru orantılı olarak değişmektedir [73]. Kalınlığı t , ısı iletim katsayısı k_a olan yalıtkan malzemeye termik dengeyi

bozmadan uygulanabilecek maksimum gerilim miktarı (U_{kr}) Eşitlik 2.5'teki gibi hesaplanır [64].

$$U_{kr} = E * t = 0,938 * k_d \quad (2.5)$$

U_{kr} gerilim değerinin altındaki gerilim seviyelerinde yalıtkan malzemenin ısı dengesi bozulmazken uygulanan gerilim değeri U_{kr} gerilim değerini aşarsa yalıtkan malzemenin ısı dengesinde bozulma meydana gelir. Isıl dengenin bozulması katı yalıtkanların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bozulmasını hızlandırır ve bozulma sonucunda yalıtkan malzemede delinme meydana gelir [1]. Yalıtkan malzemenin üzerindeki delinmenin meydana geldiği noktalarda sıcaklık artışı ile yanık kokusu meydana gelirken, düz ve dallanmamış şekilde kanal oluşumu gözlemlenir [70]. Ayrıca alternatif gerilimde meydana gelen ısı kayıpları dipol hareketleri ve dielektrik histerezis kayıpları nedeniyle doğru gerilimde meydana gelen ısı kayıplarına göre daha fazladır ve alternatif gerilimlerde frekans arttıkça termik delinme dayanımı azalır [64].

2.2.5. Elektromekanik Delinme

Katı yalıtkanların içerisindeki su miktarının kritik değerin altına düşmesi veya rutubet sonucu yalıtkanın liflerinde meydana gelen şişme ile beraber katı yalıtkanların üretimi aşamasında meydana gelen hatalar, katı yalıtkanların kullanılırken maruz kaldıkları çevresel etkenler, akım ve gerilim miktarları da katı yalıtkanların fiziksel özelliğini etkilemektedir [62].

Katı yalıtkanlara gerilim uygulandığı zaman katı yalıtkanların üzerinde statik elektrik alan meydana gelir ve meydana gelen bu statik elektrik alan numune üzerinde basıncın oluşmasına neden olur. Meydana gelen bu basınç değeri, mekanik basınç değerine eşit veya ondan fazla olursa katı yalıtkanlarda kırılma meydana gelebilir.

Garton'a göre başlangıçta kalınlığı t_0 olan bir yalıtkan malzemeye U gerilimi uygulandığı zaman yalıtkan malzemenin kalınlığı t' 'ye iniyorsa statik elektrik alanın oluşturmuş olduğu basıncın mekanik basınca eşit olma koşulundan $\frac{t}{t_0}$ oranının 0,6' dan küçük hiçbir değerinde yalıtkan malzeme kararlı olamaz. Eğer bu değerde ani delinme dayanımına erişilemezse gerilim seviyesindeki çok az bir artış kalınlığı kararsız kılarak yalıtkan malzemenin kırılmasına neden olur. Young modülü Y olan katı yalıtkanın elektromekanik delinmeye uğramadan dayanabileceği en yüksek delinme dayanımı Eşitlik 2.6'daki gibi hesaplanır [64].

$$E_d = \frac{U}{t_0} = 0,6 * \left(\frac{Y}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (2.6)$$

2.2.6. Erozyon

Yalıtkanların üretimi sırasında kaynaklanan hatalar sebebiyle içerisi genellikle katı yalıtkanın dielektrik dayanımından daha az dielektrik dayanıma sahip gaz ile dolu olan boşluklar meydana gelir.

Uygulanan gerilimin yanı sıra çevresel etkenlerin de etkisi ile polimerik yalıtkanın üzerinde elektrik alan zorlaması meydana gelir ve artan elektrik alan zorlaması yalıtkanın içinde bulunan gazın delinme dayanımını aştığı anda gaz iyonize olarak yalıtkan delinir ve boşluk içinde yük geçişi meydana gelir [62, 68]. Yük geçişi ile anoda çarpan elektronlar yalıtkanın kimyasal bağını kırarken, katodun pozitif iyonlar ile bombardımanı polimerik yalıtkanın yüzey sıcaklığının artmasına neden olur.

Yüzey sıcaklığının artması yalıtkan malzeme üzerinde termik bir kararsızlık meydana getirir. Bu kararsızlığın sonucunda bazı polimerlerde yapısındaki karbonu dışarıya aktaramadığı için polimerin yüzeyinde karbon yol oluşumu gözlenirken bazı polimerlerde ise karbon atomunu karbon elementinin bileşikleri şeklinde polimerin yüzeyinden uzaklaştırılır. Yapısındaki karbon elementini, karbon elementinin bileşikleri şeklinde yüzeyinden uzaklaştıran polimerlerde yüzey aşınımı meydana gelir ve bu olay erozyon olarak adlandırılır. Ayrıca erozyon, boşalmalar sırasında meydana gelen ozon (O₃) ve azot dioksit (NO₂) gibi gazların asit oluşturması ile de gerçekleşir [64].

2.2.7. Yüzey Aşınımı

Yüzey aşınımı yalıtkan malzemesinin bozulması nedeniyle yalıtkan malzemenin yüzeyinde iletken bir yolun oluşması şeklinde tanımlanmaktadır. Yalıtkan malzemelerin yüzeyi kullanımları sırasında çevresel faktörlerin etkisi ile giderek kirlenir. Kir ile atmosferde bulunan nem birleşerek yüksek gerilim elektrodu ile toprak arasında iletken bir yol oluşturur ve nem ile birleşen kir yalıtkan malzemenin yüzey direncini önemli ölçüde azaltarak yalıtkan malzemenin yüzeyinden daha yüksek akımların akmasına neden olur. Yalıtkan malzeme yüzeyinden akan akımın artması sebebiyle yalıtkan malzeme ısınır ve ısınmanın sonucu olarak sıcaklık artışı meydana gelir. Sıcaklık artışı malzeme yüzeyinde bulunan nemi buharlaştırarak kuru bant oluşumuna neden olur ve yüksek güç deşarjları yalıtkan malzemenin yüzeyinde yüksek gerilim

elektrodu ile toprak elektrodu arasında karbon yol oluşturur. Yalıtkan malzemenin yüzeyinde oluşan karbon yol belirli bir uzunluğu geçince yalıtkan malzeme yalıtkanlık özelliğini kaybeder ve uygulanan gerilime dayanamaz hale gelir.

Yüzey aşınımı sırasında malzemelerin hidrofobik yapıya sahip olmaları oldukça önemlidir. Hidrofobik malzemelerde iletken yol oluşumu daha yavaş görülür ancak iletken yol oluşumundan sonra malzeme yüzeyinden akan kaçak akımlar malzemenin hidrofobik yapısını geçici veya kalıcı olarak bozar. Ayrıca yüzey aşınımındaki iz oluşumu ve bozulma süresi yalıtkan malzemenin moleküler yapısına bağlı olmakla birlikte uygulanan gerilime ve iletken yol oluşturan sıvının yapısına da bağlıdır [36].

2.3. TEST TÜRLERİ

Dış mekân uygulamalarında kullanılan polimerik yalıtkanlar işletme ömürleri boyunca maruz kaldıkları radyasyon, asit yağmuru ve toz gibi çeşitli stres koşulları altında yalıtım performanslarını korumalıdır [74, 75]. Bu tür strese maruz kalmanın sonucu olarak polimerik yalıtkanlarda yaşlanma ve bozulma meydana gelmektedir. Üretilen yalıtkanın dış ortam şartları altında ne zaman bozulmaya uğrayacağını tam olarak öğrenmek çok vakit almaktadır. Bu yüzden polimerik yalıtkanlar laboratuvar ortamında hızlandırılmış stres içeren bazı deneylere tabi tutulurlar ve bu deneylerin sonucuna göre polimerik yalıtkanların kullanım ömürleri hakkında değerlendirme yapılmaktadır. Yalıtkanların tabi tutulduğu deneyler

- Karşılaştırmalı iz oluşumu endeksinin belirlenmesi için karşılaştırmalı iz oluşumu indisi deneyi (Comparative tracking index test - CTI)
- Toz-sis testi (Dust Fog Test)
- 1956 yılında General Electric şirketinde kurulan tuzlu sis deneyidir (Salt fog test) [62, 63].
- 1960'larda Ontario Hydro tarafından yapılan iz oluşumuna dayanım çarkı deneyi [64, 65]
- 1948'de ASTM standardı olarak kabul edilen kuru ark deneyi [62, 66]
- Eğik düzlem deneyi

olarak sınıflandırılmaktadır.

İz oluşumuna dayanım çarkı deneyi 1965 yılında ASTM D2302-75 adı altında standartlaştırılmasının ardından 1981 yılında standartlardan kaldırılmıştır [76].

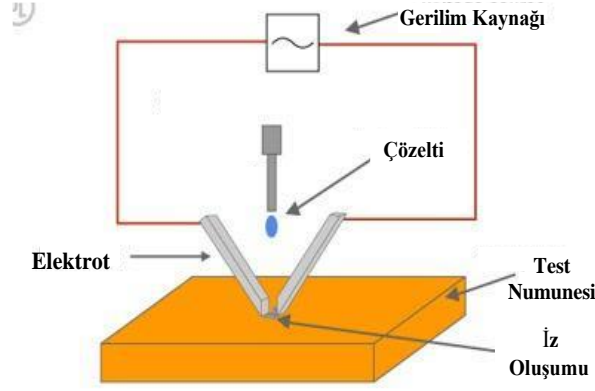
Bu çalışmada nikel (Ni), kobalt (Co), çinko (Zn) elementleri ve manyetit (Fe_3O_4) bileşiğinin polyesterin elektriksel özelliğine etkisi incelenirken eğik düzlem deneyi kullanıldığı için eğik düzlem deneyi tez çalışmasının 3. kısmı olan Malzeme ve Yöntem kısmında detaylı olarak incelenmiştir.

2.3.1. CTI Testi (Comparative Tracking Index Test)

Karşılaştırmalı iz oluşum indisi deneyi yalıtım malzemesinin yüzeyinde, deşarj koşullarının hızlandırılmış bir simülasyonu şeklinde gerçekleştirilir. Yalıtım malzemesinin özelliklerini değerlendirmek amacıyla 1959 yılında IEC tarafından standart olarak kabul edilmiş ve 1979 yılında IEC 112 standardı olarak son halini almıştır.

Karşılaştırmalı iz oluşum indisi, numunenin içerisinde $0,1 \pm 0,002$ amonyum klorür içeren 50 damla kirli suya iz oluşumu meydana gelmeden dayanabileceği maksimum gerilim miktarıdır. Numuneler 3 mm kalınlıkta üretilerek karşılaştırmalı iz oluşumu indisi deneyine tabi tutulur ve deney sonucunda elde edilen sonuçların malzemenin herhangi bir kalınlıktaki performansını temsil ettiği kabul edilir [77].

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi deney düzeneğinde 5 mm x 2 mm ölçülerine sahip platinyum elektrotlar yatayla 30° açı yapacak şekilde konumlandırılır ve numune elektrotlar arasına yerleştirilir. Numune üzerine $23^\circ C$ 'de öz direnci $385 \pm 5 \Omega.cm$ olan amonyum klorür çözeltisi 30 saniye aralıklarla damlatılır. Bu kirletici sıvı iki elektrot arasında elektrik iletimini sağlar ve polimerin karbonizasyonu yavaşça gerçekleşir. Numune yüzeyinde kömürleşme meydana geldiğinde veya elektrotlar arasında akan akımın değeri 2 saniye boyunca 0,5 A'dan fazla olması durumunda deney sonlandırılır [77].



Şekil 2.4: CTI deney düzeneği şeması [69].

Deney sırasında uygulanan gerilimin maksimum değeri 600 V'dir ve standarda göre 50 damla damlatıldıktan sonra iz oluşumunun gerçekleştiği en küçük gerilim değeri kırılma gerilimi değeri olarak adlandırılır [77]. Underwriter Laboratories (UL) standartlarında kırılma gerilimi altı sınıfa ayrılmıştır ve kırılma gerilimine göre ayrılan bu sınıflar Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: CTI gerilim seviyelerine göre numuneleri sınıflara ayrılması.

Sınıf	Karşılaştırmalı İndeks Testi Gerilim Seviyesi
0	$600 \text{ V} \leq \text{CTI}$
1	$400 \text{ V} \leq \text{CTI} < 600 \text{ V}$
2	$250 \text{ V} \leq \text{CTI} < 400 \text{ V}$
3	$175 \text{ V} \leq \text{CTI} < 250 \text{ V}$
4	$100 \text{ V} \leq \text{CTI} < 175 \text{ V}$
5	$0 \leq \text{CTI} < 175 \text{ V}$

2.3.2. Dust Fog Test

1979 yılında ASTM D2132 standardı olarak kabul edilen kir sis deneyi Allbright ile Starr tarafından tanımlanan ve deney sırasında katı kir kullanılan ilk deney türüdür [70]. Deney kapalı bir oda içerisinde gerçekleştirilir ve deney sırasında yüksek gerilim elektrotu olarak 50,8 mm x 12,7 mm x 3,2 mm boyutlarında üç adet bakır elektrot, iki elektrodun arasında 25,4 mm mesafe olacak şekilde konumlandırılır.

Deneyde sırasında kullanılacak numuneler ise yaklaşık 1,6 mm kalınlığında ve yüzey alanı 12 cm² ile 15 cm² arasında olacak şekilde üretilir. Daha sonra numune yüzeyi laboratuvar ortamında hazırlanan ve içerisinde katı kir olarak % 85 oranında SiO₂, % 9 Kil, %3 Tuz, %3 filtre hamuru bulunan toz ile kaplanır [62]. Bu toz karışımındaki tuz numune yüzeyinde iletken

bir tabaka oluşturmak için kullanılırken diğer kullanılan maddeler tozun numune yüzeyine yapışmasını sağlar. Toz ile kaplama işleminin tamamlanmasının ardından numuneler yatay eksen ile 15° açı yapacak şekilde konumlandırılır ve numunelerin yüzeyi sis veya su spreyi ile ıslatılır. Su veya sis ile ıslatılan numunelere 500 V başlangıç gerilim uygulanır ve uygulanan gerilim kademeli olarak 1,5 kV seviyesine kadar yükseltilir. Uygulanan gerilimden dolayı numune yüzeyindeki nem ısınarak buharlaşır ve deneyin devamlılığını sağlamak için numune yüzeyinde gerçekleşen buharlaşma miktarına göre numuneler tekrar ıslatılır. Deney hata kriteri meydana gelene kadar devam eder.

Hata kriteri elektrotların yüzey boyunca bir iz ile köprülenmesi olarak belirtilir ve numuneler hata kriteri meydana gelene kadar geçen süreye göre sınıflandırılırlar. Hata kriteri ilk 5 saat içerisinde meydana gelen numuneler yüzeysel boşalmalara karşı hassas olarak, hata kriteri 5 saat ile 100 saat arasında meydana gelen numuneler yüzeysel boşalmalara karşı etkili olarak, hata kriteri 100 saatten fazla zamanda meydana gelen numuneler ise yüzeysel boşalmaya karşı dirençli olarak adlandırılır. Yüzeysel boşalmaya karşı dirençli olarak adlandırılan numuneler bazı durumlarda 2000 saate kadar dayanabilmektedir [62].

2.3.3. Salt Fog Test

IEC tarafından 1109 adıyla standartlaştırılmış tuz-sis testi polimerik yalıtkanların hizmet ömrü hakkında bilgi vermektten çok polimerik yalıtkanların iz oluşumuna mı yoksa ve erozyona mı meyilli olduğunu belirlemek amacıyla kullanılan bir test yöntemidir [62].

Tuz-sis testinde tuzlu su spreyine maruz bırakılan yalıtkana gerilim uygulanarak yalıtkan üzerinde deşarjların oluşması sağlanır. Oluşan deşarjların meydana getirdiği ısı ile birlikte UV radyasyonu ve gazlar yalıtkanın performansını iki şekilde etkiler. İlk olarak tuzun şiddeti ile beraber yalıtkanın hidrofobikliğinin azalması yalıtkanın dielektrik dayanımının azalmasına neden olur ve bu olay gözle görünür bir yüzey hasarına sebebiyet vermez sadece yüzeyde parlamalara neden olur. İkinci olarak ise izleme, erozyon ve çatlaklar gibi farklı türde hasarlar oluşabilir [62].

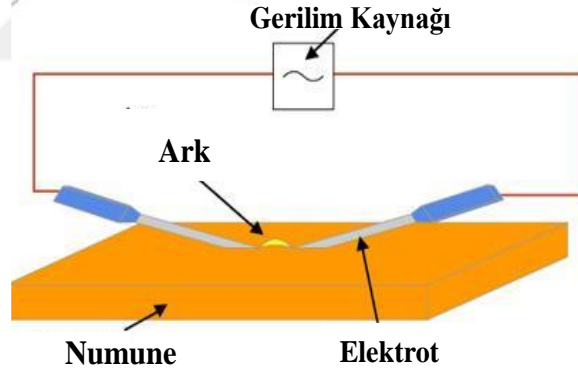
Tuz sis testi, kapalı bir oda içerisinde gerçekleştirilmektedir ve odanın içerisi tanecik büyüklüğü 50µm'den küçük olan sis tanecikleri ile doldurulur. Daha sonra polimerik yalıtkanlar tuzlu su spreyine maruz bırakılır ve polimerik yalıtkanlara 1 inç çapında ve 6-8 inç uzunluğunda olan elektrotlar ile 10 kV gerilim uygulanarak test gerçekleştirilir [62].

2.3.4. Kuru Ark Testi

Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) tarafından D495 adı altında standartlaştırılan kuru ark testi katı yalıtkanların yüksek gerilim ve düşük akıma karşı göstermiş oldukları ark direncini kıyaslar. Ark direnci standartta numune yüzeyine yüksek gerilimin ve düşük akımın uygulanmaya başlamasından itibaren numune yüzeyinde iletken yol oluşumuna kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır [78].

Deney sırasında elektrotlar Şekil 2.5'te görüldüğü gibi yatay düzlem ile 15° açı yapacak şekilde 3 mm kalınlığındaki numune üzerine konumlandırılır ve deney sonucunda elde edilen sonuçlar malzemenin herhangi bir kalınlıktaki test sonucunu da temsil etmektedir.

Deney sırasında akan akımı sınırlandırmak için trafonun primer kısmına 4 adet paralel direnç bağlanır ve numuneye 15 kV gerilim uygulanır [62]. Gerilim uygulanması ile numune üzerinde kesintili olarak ark meydana gelir ve deney, numune üzerindeki iki elektrot arasında iletken yol oluşması, numunenin yanması veya numunenin erimesi gibi durumlar meydana gelene kadar devam eder.



Şekil 2.5: Kuru ark deney düzeneği şeması [71].

Deney sırasında ark direnci zayıf olan numunelerin ayırt edilmesini kolaylaştırmak için şartlar kademeli olarak ağırlaştırılır. Şartların ağırlaşmasıyla numune üzerinde oluşan arkın gücü artarken birbiri ardınca meydana gelen arklar arası geçen süresi azalır. Ayrıca ark direnci zayıf olan numunelerin test edilmesi için paslanmaz çelik elektrotlar kullanılırken, ark direnci yüksek numunelerin test edilmesi sırasında paslanmaz çelik elektrotların yüzeye temas ettiği noktalarda aşınma meydana gelmektedir ve elektrotlarda meydana gelen aşınma miktarı deney süresine bağlı olarak değişmektedir. Bu yüzden ark direnci yüksek numuneler test edilirken tungsten çubuk elektrotların kullanılması önerilmiştir [62].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. EĞİK DÜZLEM DENEYİ

Eğik düzlem deneyi ilk olarak Mathes ve Gowan tarafından 1961 yılında önerilmiş ve 1964 yılında ise ASTM D2303 standardı olarak kabul edilmiştir [78]. İlerleyen yıllarda bu test standardı ile aynı teoriye dayanan ancak içerisinde bazı farklılıklar içeren IEC 587 standardı geliştirilmiştir.

Eğik düzlem deneyinde numune çok fazla elektriksel strese maruz kalır ve bu koşullar genel olarak günlük hayatta meydana gelmeyecek kadar ağır bir şekilde uygulanmaktadır [78]. Deney sırasında üretilen numuneye belirli bir büyüklükte gerilim uygulanır ve numunenin bu gerilim altındaki davranışı incelenerek numunenin elektriksel özellikleri hakkında değerlendirme yapılır. Gerilim kaynağı açıldığı zaman numune üzerinde kuru bant oluşur ve toprak elektroduna yakın yerlerde ark oluşumu şeklinde elektriksel boşalmalar meydana gelir. Lokalize olarak meydana gelen bu boşalmalar numune yüzeyinde sıcaklık artışına neden olmaktadır. Bu sıcaklık artışı kaçak akımın büyüklüğüne, malzemenin ve çevrenin ısı özelliklerine ayrıca belirli bir konumda meydana gelen boşalma süresine bağlı olarak değişir. Polimerik malzeme yapısındaki karbonu karbon elementinin bileşikleri şeklinde yüzeyinden uzaklaştırılmazsa sıcaklık artışı ve yüksek güçlü deşarjlar sonucu polimerik malzemeler üzerinde iletken bir yol oluşur. Oluşan bu karbon yol iz oluşumu (tracking) olarak isimlendirilir [1]. Şekil 3.1’de iz oluşumuna örnek bir görsel verilmiştir.

Ancak karbon, numune yüzeyinden fiziksel veya kimyasal yollarla ayrılabilirse bu tarz maddelerde iz oluşumu görülmez. Örneğin polyester ve epoksi gibi polimerlerde karbon, bozulan yüzeyin üzerinde oluşurken silikon kauçuk gibi diğer polimerlerde karbon gaz halindeki CO₂ ile yan ürünü olarak uzaklaştırılır [78]. Böyle maddelerde iz oluşumu yerine erozyon meydana gelir.

Erozyon ve iz oluşumu direnci polimerin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Polimerin, meydana gelen iz oluşumu ve erozyona karşı gösterdiği direnci artırmak için baz maddeye uygun inorganik dolgular ilave edilerek katkılı polimerik yalıtkanlar

üretilmektedir. En yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri alümina trihidrat ve kuvars olmasına karşın diğer madde türleri de katkı maddesi olarak kullanılabilir [79].



Şekil 3.1: Deney sonucunda yüzeyinde karbon iz oluşmuş numunenin yüzey görüntüsü.

İnorganik katkı maddelerinin ilave edilmesi, katkılı polimerik yalıtkanın saf haline göre bazı özelliklerini olumlu yönde etkilerken bazı özelliklerini de olumsuz yönde etkilemektedir. Genel olarak ilave edilen katkı maddesi miktarına göre, oluşan yeni malzemenin gerilme mukavemeti artarken, malzemenin hidrofobik özelliği azalmaktadır [78].

Mevcut ASTM D2303 standardı istatistiksel olarak sonuçların güvenilirliğini test etmek için 5 numune üzerinde yapılan deney sonuçlarının birbirine benzer çıkmasını istemektedir. Her ne kadar numune üretimleri aynı şartlar altında gerçekleşse de üretim kararsızlıklarından dolayı numuneler arasında bazı tutarsızlıklar olabilmektedir. Böyle durumlarda malzemelerin güvenilirliğini sağlamak için numune sayısının 5'ten 15'e çıkarılması gerektiğini belirtmektedir [3, 78].

Bu 5 numunenin testleri ayrı ayrı yapılabildiği gibi aynı anda da yapılabilmektedir. Eğer numunelerin aynı anda test edilmesi isteniyorsa gerilim kaynağının yeterince güçlü olması gerekmektedir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde aynı anda birden fazla numune test edilirken gerilim kaynağının yeterince güçlü olmadığı durumlarda fazla miktarda gerilim düşümü meydana geldiği ve test sırasında gerilim düşümüne bağlı olarak arkın söndüğü gözlemlenmiştir [78].

3.1.1. Eğik Düzlem Deneyini Etkileyen Faktörler

Eğik düzlem deney sonuçları uygulanan gerilimin seviyesine, elektrolit çözeltinin türüne, elektrolit çözeltinin akış hızına ve rüzgâr, nem gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Eğik düzlem deneyini etkileyen bu faktörler alt başlıklar halinde aşağıda detaylandırılmıştır.

3.1.1.1. Gerilim Seviyesinin Etkisi

Polyester üzerinde yapılan çalışmalarda 3,5 kV'un altındaki gerilimlerde iz oluşumu meydana gelmediği ve bu yüzden kritik gerilimin 3,5 kV olduğu görülmektedir [73]. Bu çalışmanın ardından yapılan diğer bir çalışmada erozyon derinliği ve kütle kaybı çeşitli voltaj seviyelerinde incelenerek 4 kV gerilim seviyesinin en fazla hasara sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır [74].

3.1.1.2. Elektrolit Türünün Etkisi

Elektrolit türünün deney süresine etkisini incelemek amacıyla Liang (2009), farklı kaynama noktası sıcaklığına sahip elektrolit türlerini kullanarak ATH ile katkılanmış silikon kauçuğa 6 kV gerilim uygulayarak eğik düzlem deneyine tabi tutmuş ve deneyin sonucunda numune üzerinde oluşan erozyon ile elektrolit çözeltinin kaynama noktası arasında doğru orantı olduğunu gözlemlemiştir [3].

3.1.1.3. Elektrolit Çözeltinin Akış Hızının Etkisi

Elektrolit çözeltinin akış hızının düşük olduğu durumlarda lokalize ve stabilize ark oluşumu görülmediği için yüzeydeki ısı dağılımı azalır ve elektrolit çözelti dar bir yol boyunca hareket eder. Akış hızının artırılması ark oluşumunu hızlandırır ve dolayısı ile oluşan hasar miktarı artar. Literatürdeki çalışmada akış hızı 45ml/saat' ten fazla olduğu durumlarda elektrolit çözeltinin aktığı ana kanal genişliğinin tekrar azalmaya başladığı gözlemlenmiştir [82].

Ana kanal genişliği daralmaya başlaması elektrolit çözeltinin bir kanal boyunca toprak elektroduna doğru akması yerine numune yüzeyine dağılmasına neden olur ve numunenin yüzey sıcaklığı azalır [82]. Sıcaklığın azalması ise oluşabilecek ciddi hasarların önüne geçer ve deney sonucunun yanıtmasına neden olur. Yapılan çalışmanın sonucunda maksimum kanal genişliğinin 36ml / saat akış hızında olduğu bilgisine ulaşılmıştır [80].

3.1.1.4. Diğer Faktörlerin Etkisi

Deney süresine dış faktörlerin etkisi ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde ultraviyole ışınlarının yüzeyin bozulmasını hızlandırdığı ancak ultraviyole ışınlarının numunenin yüzeyine

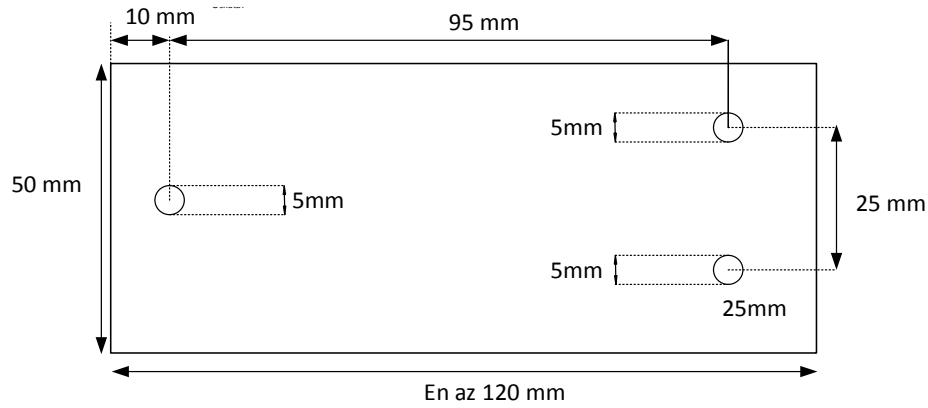
gelme açısının bozulma süresine etkisinin olmadığı görülmüştür. Ayrıca ağırlık etkisinin numune üzerinde gözle görülemeyecek şekilde çatlaklar oluşturmasından dolayı bozulma süresini hızlandırdığı tahmin edilmektedir [36]. Bu tez çalışmasında bütün deneyler normal koşullar altında yapılmış olup herhangi bir dış etken uygulanmamıştır.

3.1.2. Numunelerin Hazırlanması

Test numunelerinin hazırlanması iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada numune hazırlamak için standartta belirtilen ölçülere uygun olarak kalıp üretimi yapılmış olup ikinci aşamada ise üretilen kalıpların yardımı ile numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

3.1.2.1. Silikon Kalıp Üretimi

Numune üretilebilmesi için ilk aşamada yarı akışkan olarak hazırlanan numune karışımlarının döküleceği silikon kalıpların tasarımı CST programında yapılmıştır. Tasarımın ardından Şekil 3.3'te gösterildiği gibi alüminyum malzemeden bloklar, CNC (Computer Numerical Control) teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. CNC kompleks yapıların hassas bir şekilde üretilmelerine olanak sağlayan bilgisayar kontrollü bir teknolojidir ve günümüzde kalıp üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [83].



Şekil 3.2: Standartlarda belirtilen numunelerin boyutlarının görseli.



Şekil 3.3: Alüminyumdan üretilen kalıbın (a) yandan ve (b) üstten görünümü.

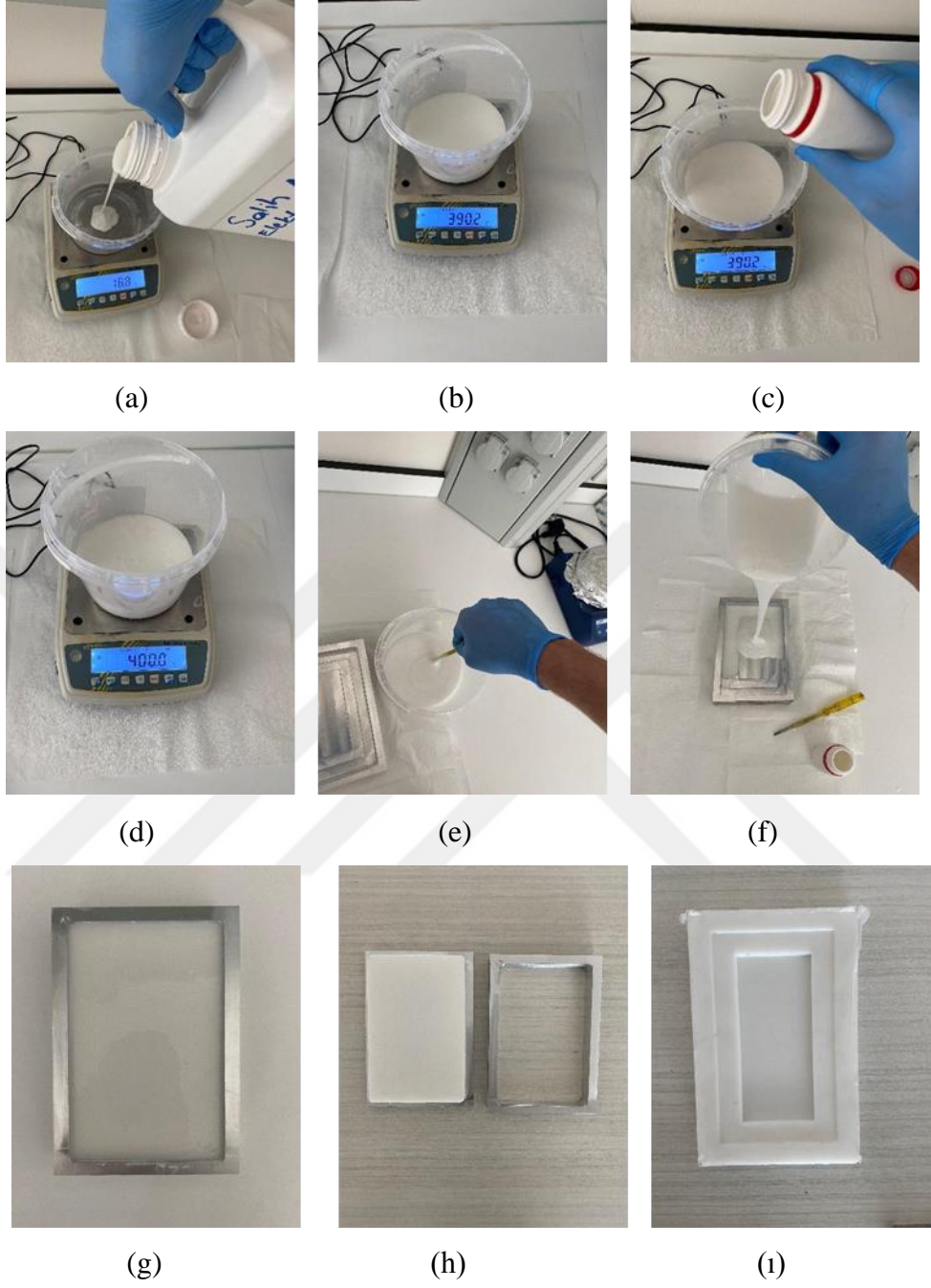
Üretimleri tamamlanan alüminyum kalıplara daha sonra %2,5 oranında sertleştirici içeren RTV-2 kalıp silikonu dökülerek oda sıcaklığında 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Silikon tamamen kurduktan sonra kalıptan ayrılmış ve numune üretiminde kullanılmaya hazır hale gelmiştir. Silikon kalıbın üretim aşamaları detaylı olarak Şekil 3.4’te verilmiştir.

3.1.2.1.Saf Polyester Üretimi

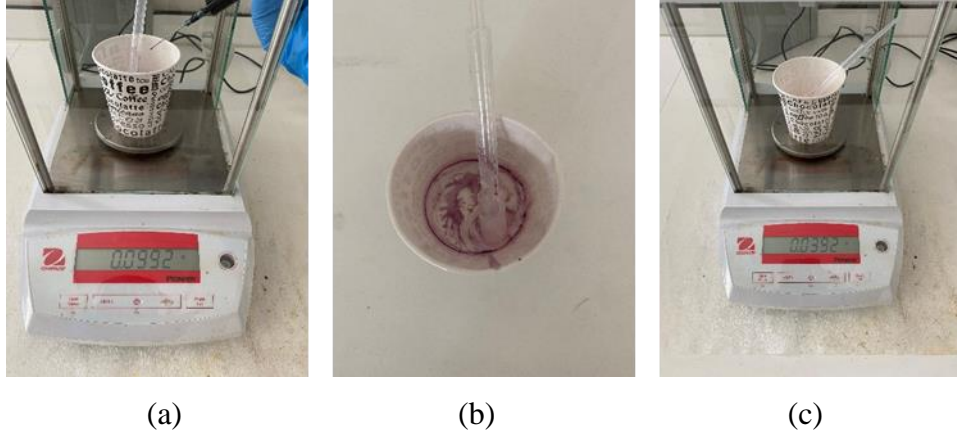
Numuneler, saf polyester içerisine sertleştirici olarak ağırlıkça %1 metil etil keton peroksit (MEKP) ve hızlandırıcı olarak ağırlıkça %0,2 oranında kobalt ilave edilerek aynı laboratuvar ortamında üretilmiştir.

Her kalıp için ayrı numune üretimi yapıp numuneler yaklaşık 50 gr polyester içerisine 0,5 gr MEKP ve 0,1 gr Co (hızlandırıcı) ilave edilerek üretilmiştir. Her yeni madde türü ilave edilmeden önce hassas terazinin darası alınmıştır.

Üretim yapılırken 0,1 gram hızlandırıcı ilave edilip karıştırma işleminin gerçekleştirilmesinin ardından karışım tekrar tartılmış ve karışımda kütle kaybı meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gözlemlenen kütle kaybı Şekil 3.5’te gösterilmiştir.

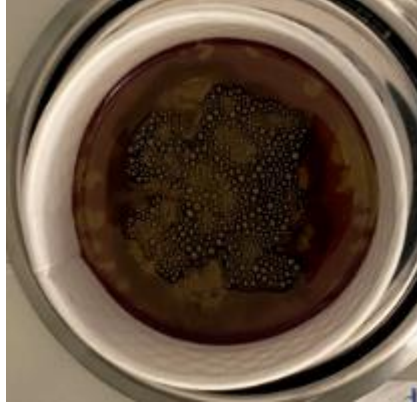


Şekil 3.4: (a,b) RTV2 kalıp silikonun kaba ilave edilmesi (c,d) kabın içerisinde RTV miktarının % 2,5'i kadar sertleştirici ilave edilmesi (e) sertleştiricinin RTV2'nin içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması (f,g) karışımın alüminyum kalıba dökülmesi (h,i) silikon kalıbın alüminyum kalıptan çıkarılması.



Şekil 3.5: (a) 50 gr polyester içerisine %0,2 oranında kobalt ilave edilmesi (b) ilave edilen kobaltın karışımın içinde homojen bir şekilde dağılması için karıştırılması (c) karışım işlemi tamamlandıktan meydana gelen kütle kaybının görüntüsü.

Ayrıca numune üretimi yapılırken polyesterin üzerine sertleştirici ve kobalt aynı anda ilave edilirse, sertleştirici ve kobaltın tepkimeye girerek Şekil 3.6'da görüldüğü gibi karışımın yüzeyinde hava kabarcığı oluşmasına neden olduğu; ilk olarak sertleştiricinin ilave edilmesi durumunda ise hızlandırıcının polyester içerisinde homojen olarak dağılmadığı görülmüştür.



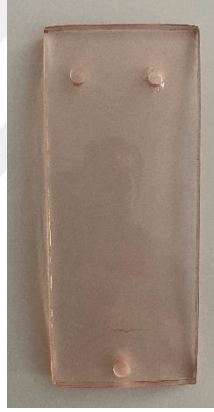
Şekil 3.6: Hızlandırıcı ve sertleştiricinin aynı anda eklenmesi ile oluşan hava kabarcıklarının üstten görüntüsü.

Numune üretimi yapılırken sertleşme olmadan hızlandırıcının polyester içerisinde homojen olarak dağılması ve hava kabarcığı oluşumunu engellemek amacıyla ilk olarak polyester içerisine hızlandırıcı olan kobalt ilave edilip plastik çubuk yardımıyla karıştırılmıştır. Karıştırma işleminin tamamlanmasının ardından MEKP ilave edilmiş ve karıştırma işlemi tekrar gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işleminin hızlı yapılması durumunda karışımın yüzeyinde yine hava kabarcığı olduğu gözlemlenmiş ve bu yüzden hava kabarcığı oluşumunu en aza

indirmek amacıyla karıştırma işlemi analog mikser yardımıyla oldukça yavaş bir şekilde yapılmıştır.

Karıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra eğer hava kabarcığı oluşumu meydana gelmişse oluşan hava kabarcıkları giderilmiş ve daha sonra hazırlanan karışım silikon kalıplara dökülmüştür.

Silikon kalıplara dökülen polyesterin üzerinde iz oluşmaması ve yüzeylerinin pürüzsüz olması için kalıba dökülen polyester üzerine PET film koyulmuş ve ardından polyesterin çapraz bağ oluşturması amacıyla numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra 80° C de 5 saat süreyle fırında pişirilmiştir. Pişirme işleminin ardında numuneler Şekil 3.1’de belirtildiği gibi 3 noktadan standartlara uygun genişliklerde delinerek deneye hazır hale getirilmiştir. Deneye hazır hale getirilen örnek bir numune görseli Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: Deneye hazır hale getirilen numune görüntüsü.

Katkılı polyester üretimi, saf polyester numune üretimi aşamalarını da içerdiği için üretim aşamalarına ait görseller katkılı polyester üretiminin sonunda verilmiştir. Ayrıca son olarak çapraz bağ oluşumunun polimerde kütle kaybına neden olup olmadığını öğrenmek amacıyla hazırlanan numunelerden bir tanesi pişirme işleminin öncesinde ve sonrasında hassas terazi ile tartılmıştır. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi katkılı polimerlerin tartılması ile pişirme işlemi sırasında katkılı polimerde ciddi bir kütle kaybının yaşanmadığı gözlemlenmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3.8: Katkılı polimerin (a) pişirilme öncesinde (b) pişirilme işleminin tamamlanmasının ardından hassas terazi ile tartılmasının görüntüsü.

3.1.2.2. *Katkılı Polyester Üretimi*

Katkılı polyester üretiminde saf polyester üretimindeki aşamalara ek olarak katkı maddesinin polyester içerisine ilave edilme aşaması vardır. Bu aşamada karşılaşılan en büyük zorluk katkı maddesinin polyester içerisinde kümelenerek topak oluşturmasıdır. Bunu en aza indirmek amacıyla katkı maddesi polyester içerisine ilave edilmeden önce agat havan yardımıyla öğütülerek toz haline getirilmiştir. Agat havan yardımı ile öğütülen katkı maddesinin öğütülmeden önceki ve öğütüldükten sonraki görselleri sırası ile Şekil 3.9(a) ve Şekil 3.9(b)'de verilmiştir.



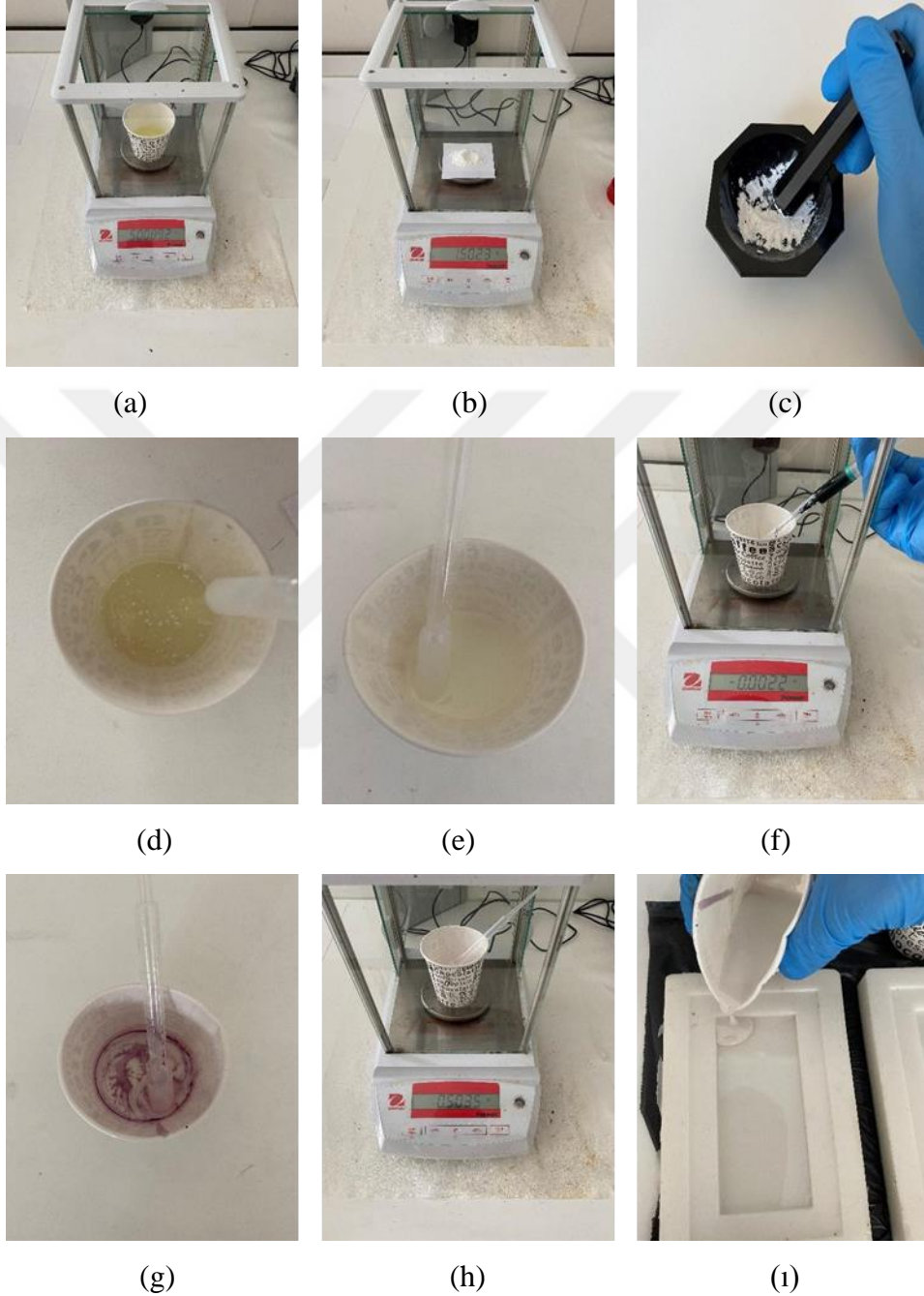
(a)

(b)

Şekil 3.9: Katkı maddesinin (a) öğütülmemiş ve (b) agat havan yardımı ile öğütülmüş halinin görüntüsü.

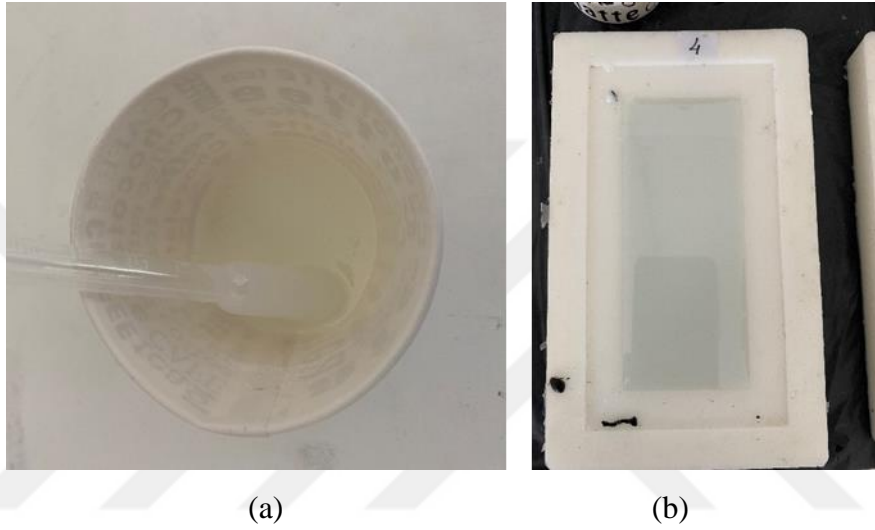
Agat havan ile öğütülen katkı maddesinin polyester içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlamak amacıyla katkı maddesi, polyestere hızlandırıcı ilave edilmeden önceki aşamada

parça parça karıştırılarak saf polyestere ilave edilmiştir. Şekil 3.10’da katkılı polimer üretiminin bütün aşamalarının görselleri verilmiştir.



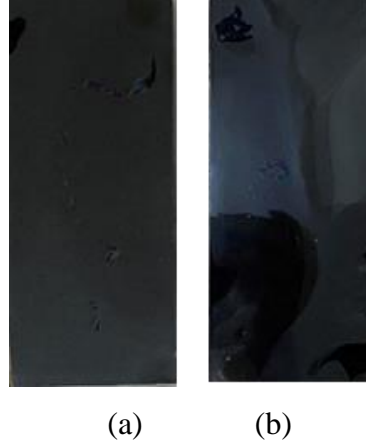
Şekil 3.10: (a) Karışım kabına polyesterin ilave edilmesi (b) ağırlıkça %3 katkı maddesinin ayarlanması (c) katkı maddesinin agat havan ile öğütülmesi (d) katkı maddesinin polyestere ilave edilmesi (e) katkı maddesinin karıştırılması (f) katkılı polyesterin içerisine %0,2 oranında hızlandırıcı ilave edilmesi (g) hızlandırıcının karıştırılması (h) karışıma sertleştirici ilave edilmesi (i) karışımın silikon kalıba dökülmesi ve oda sıcaklığında 24 saat bekletilmesi

Üretim aşamasında katkı maddesinin türüne bağlı olarak numune renginde değişiklik meydana geldiği gözlemlenmiştir. Polyester içerisine çinko oksit ilave edildiği zaman çinko oksitin beyaz olması sebebiyle saf polyester beyaza yakın bir renk alırken içerisine hızlandırıcı ve sertleştiricinin ilave edilmesiyle beyaz olan rengin su yeşiline döndüğü gözlemlenmiştir. Saf polyesterin içerisine çinko oksit, MEKP ve Co ilave edilmesiyle meydana gelen renk değişimi Şekil 3.11’de verilmiştir. Ayrıca numune rengi katkı maddesi olan çinko oksitin katkılanma miktarına bağlı olarak da değişmektedir.



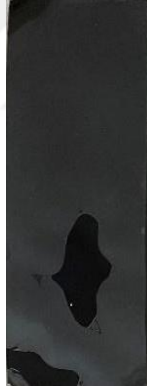
Şekil 3.11: (a) Saf polyesterin çinko oksit ilave edilmesi ile beyaz renk alması (b) katkılı polyestere %1 MEKP ve %0,02 Co ilave edilmesi ile renginin su yeşiline dönmesi.

Kobalt ve manyetitin her ikisi de ayrı ayrı ilave edildiği zaman saf polyester siyah bir renk almış daha sonra hızlandırıcı olan kobaltın ilave edilmesi ile polyesterin renginde gözle görülür bir değişim meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Katkı maddesi olarak manyetit ve kobalt ilave edilen polyesterdeki renk değişimi sırası ile Şekil 3.12(a) ve Şekil 3.12(b)’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Polyester içerisine katkı maddesi olarak (a) kobalt (b) manyetit ilave edilmesiyle meydana gelen renk değişiminin görüntüsü.

Saf polyestere nikel ilave edildiğinde ise katkılı polyester gri bir renk almış daha sonra hızlandırıcı olarak kobalt ilave edilmesi ile manyetit ve kobalt katkılı polyester numunelerde olduğu gibi gözle görünür bir renk değişimi meydana gelmemiştir. Katkı maddesi olarak nikel ilave edilen polyesterdeki renk değişimi Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Polyester içerisine katkı maddesi olarak nikel ilave edilmesiyle meydana gelen renk değişiminin görüntüsü.

Katkı maddesinin ardından hızlandırıcı ve sertleştiricinin de ilave edilmesiyle hazırlanan karışımın yüzeyinde eğer hava kabarcıkları oluşmuşsa, oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için belli bir süre bekledikten sonra saf polyester üretiminde olduğu gibi hazırlanan karışım silikon kalıplara dökülmüştür. Numuneler 24 saat boyunca oda sıcaklığındaki silikon kalıp içerisinde bekletilmiştir. 24 saatin ardında katkılı polyesterler de 80° C'de 5 saat süreyle pişirilmiştir. Üretilen numunelerin görselleri Ek 2'de verilmiştir. Pişirme işleminin tamamlanmasının ardından fırından çıkartılan numunelerde saf polyesterde olduğu gibi

herhangi bir kütle kaybı yaşanmadığı gözlemlenirken numune şekillerinde bükülmeler meydana gelmiştir.

Katkılı polimer üretilirken karşılaşılan diğer bir zorluk ise manyetit, nikel ve kobalt ilave edilerek üretilen numunelerde sertleşme olayının saf polyestere oranla daha kısa sürede gerçekleşmesidir. Numunenin kısa sürede sertleşmesi Şekil 3.14'te görüldüğü gibi silikon kalıplara dökülen katkılı polyesterlerin yüzeylerinde dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu durum oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için ihtiyaç duyulan süreyi kısıtlamaktadır.



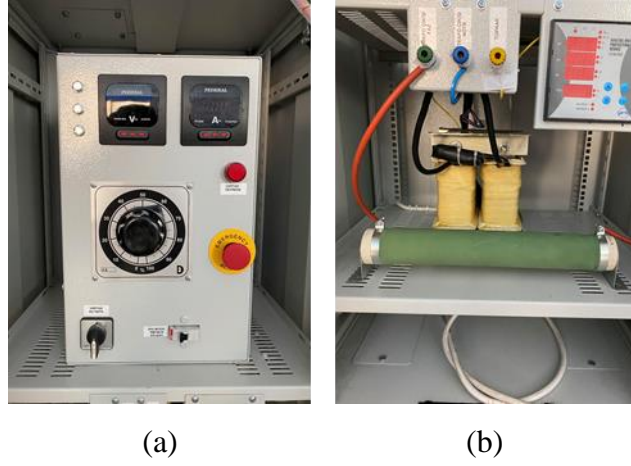
Şekil 3.14: Sertleşmenin başlamasının ardından silikon kalıba dökülen katkılı polimerlerin yüzeyinde meydana gelen dalgalanmanın görüntüsü.

Yapılan tez çalışmasında katkı maddesinin türünün polyesterin elektriksel özelliklerine etkisini incelemek hedeflenmiştir ve bu kapsamda nikel (Ni), kobalt (Co), manyetit (Fe_2O_3) ve çinko oksit (ZnO) katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

3.1.3. Eğik Düzlem Deney Düzenekinin Hazırlanması

ASTM D2303 standardında belirtildiği gibi deney sırasında numunelere 4 kV gerilim uygulamak için Elektra firması tarafından üretilen 1/26,09 çevirme oranına sahip 1.2 kVA'lık izolasyon test cihazı transformatörü kullanılmıştır. İzolasyon test cihazı transformatörüne ait teknik detaylar Ek 1'de verilmiştir.

Testlerde standartta belirtildiği gibi trafonun sekonderinden 4 kV gerilim elde etmek için trafonun primer kısmına 153.31 V gerilim uygulanmıştır. Trafonun primer gerilimi Şekil 3.15(a)'da gösterilen varyak yardımı ile 230 V'luk şebeke geriliminden elde edilmiştir.



Şekil 3.15: (a) Gerilimi seviyesini ayarlamak için kullanılan varyağın ve (b) standartta belirtilen 33 k Ω direncin görüntüsü.

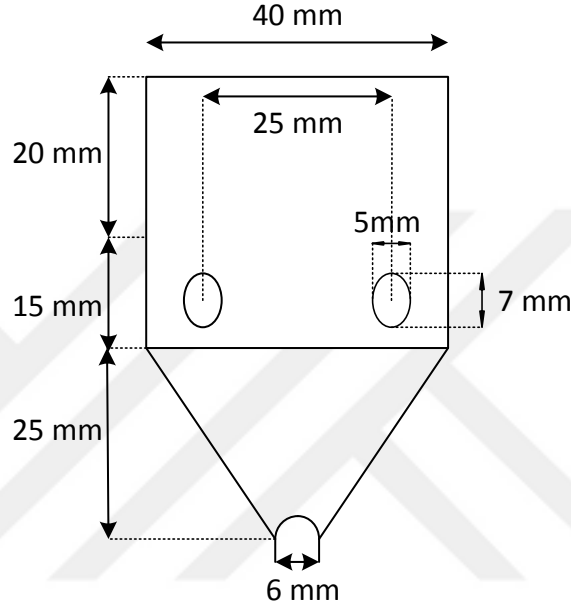
ASTM D2303 standardında belirtildiği gibi trafonun çıkışına Şekil 3.15(b)'de gösterildiği gibi 33 k Ω , 500 W güce sahip bir direnç seri olarak bağlanmış daha sonra trafo, direnç ve varyaktan oluşan düzenek uygun şekilde elektrik bağlantıları yapılarak pano içine konumlandırılmıştır. Malzeme ve ekipman yerleşimi tamamlanmış panonun görseli Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16: Trafo, varyak ve dirençten oluşan deney panosunun görüntüsü.

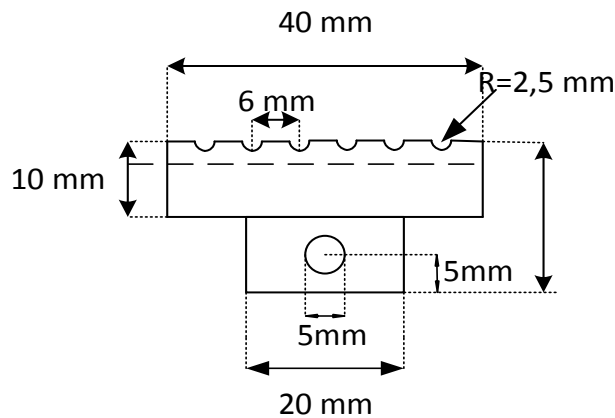
Deney sırasında standartta belirtildiği gibi yüksek gerilim ve toprak elektrodu olmak üzere toplam iki elektrot kullanılmıştır. Elektrotlar 0,5 mm kalınlığındaki korozyona karşı dirençli paslanmaz çelikten lazer kesimi yöntemi ile üretilmiştir.

Yüksek gerilim elektrotu Şekil 3.17’de gösterildiği gibi ASTM D2303 standardında belirtilen ölçülere göre üretilmiş daha sonra numune yüzeyine sabitlenmiştir.



Şekil 3.17: Yüksek gerilim elektrotuna ait teknik çizim detaylarının görüntüsü.

Toprak elektrotu ise Şekil 3.18’de gösterildiği gibi ASTM D2303 standardında belirtilen ölçülere göre üretilmiş daha sonra numune yüzeyine sabitlenmiştir.



Şekil 3.18: Toprak elektrotuna ait teknik çizim detaylarının görüntüsü.

Standartta deney sırasında numunenin yatayla 45° açı yapacak şekilde konumlandırılması istenmektedir [13]. Bunu sağlamak için Şekil 3.19’da gösterildiği gibi demir ayak üretilmiştir.



Şekil 3.19: Numunenin yatayla 45° açı yapacak şekilde durmasını sağlayan desteğin görüntüsü.

Kirletici madde olarak, damıtılmış su içerisine % 0.1 NH₄Cl (amonyum klorür) ve % 0.02 iyonik olmayan triton X-100 bileşiği katılarak 0,253 S/m iletkenliğe sahip elektrolit çözelti hazırlanmıştır [13]. Silikon, kauçuk gibi hidrofobik malzemeleri bile ıslatma özelliğine sahip olan triton X-100, hazırlanan iletken çözeltinin numune yüzeyinde kalması için ilave edilmiştir [77]. Hazırlanan elektrolit çözeltinin standartta belirtildiği gibi numune üzerine 36 ml/saat akış hızında akıtılması için Şekil 3.20’de gösterilen infüzyon pompası kullanılmıştır.



Şekil 3.20: Test sırasında kirletici sıvı akışında kullanılan infüzyon pompası.

Akıtma işlemi sırasında çözeltinin yüzeye düzgün dağılması için 8 katlı Whatman tipi filtre kâğıdı standartlara uygun boyutlarda kesilerek yüksek gerilim elektrotu ile numune arasına Şekil 3.21’de gösterildiği gibi konumlandırılmıştır.



Şekil 3.21: Elektrolit çözeltinin numune yüzeyine düzgün dağılması için 8 katlı whatman tipi filtre kâğıdının yüksek gerilim elektrotu ile numune arasına sıkıştırılmış görüntüsü.

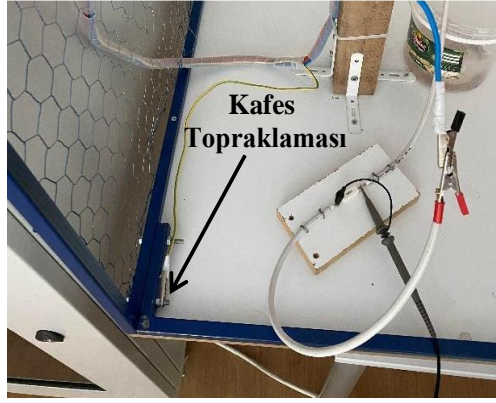
Whatman tipi filtre kâğıdının numune ile yüksek gerilim elektrotu arasına sıkıştırılmasının ardından numune ile trafo arasındaki elektriksel bağlantılar yapılmıştır. Trafo çıkışı ile numune arasındaki elektriksel bağlantı yapılırken faz hattı için 10 kV çalışma gerilimine sahip neon buji kablosu, nötr hattı için 6mm² kesit alanına sahip mavi NYA kablo, toprak hattı için 2,5mm² kesit alanına sahip sarı yeşil NYA kablo kullanılmıştır.

Son olarak elektriksel testler sırasında olası iş kazalarının önüne geçmek ve risk seviyelerini azaltarak sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturmak amacıyla Şekil 3.22’de gösterildiği gibi 100 cm x 80 cm x 70 cm fiziksel boyutlara sahip metal kafes üretimi yapılmış ve deney sırasında numuneler standartlara uygun olarak kafes içerisinde konumlandırılmıştır.



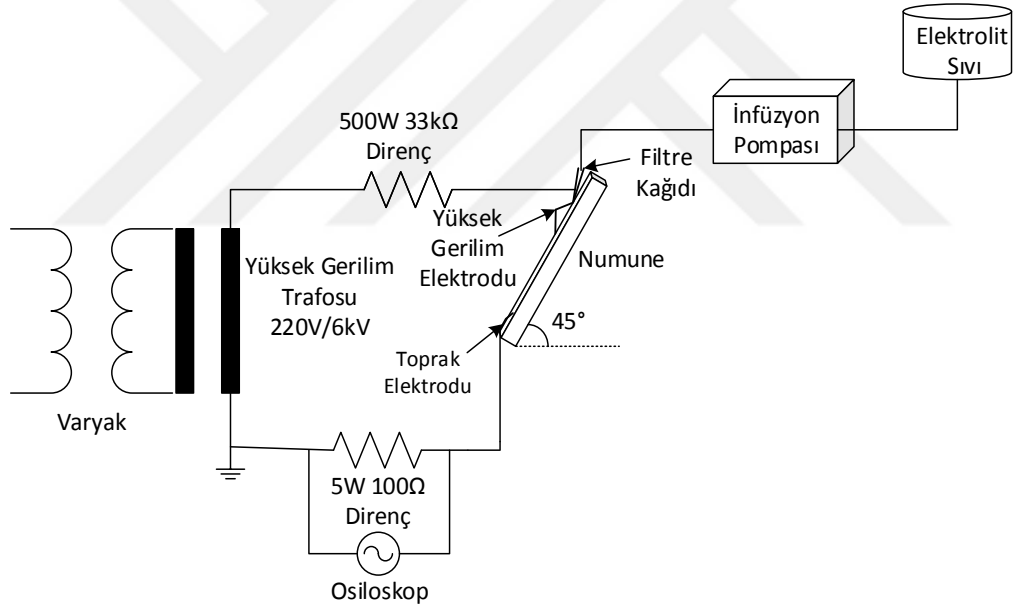
Şekil 3.22: Deney sırasında olası iş kazalarının önüne geçmek için üretimi yaptırılan kafesin görüntüsü.

Ayrıca kafesin topraklanması trafonun toprak hattı kullanılarak Şekil 3.23’te gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 3.23: Kafes topraklamasının görüntüsü.

Kafesin de konumlandırılması ile eğik düzlem deney düzeneği tamamlanmıştır. Standartlara uygun olarak kurulan eğik düzlem deney düzeneğinin şematik gösterimi ve görseli sırası ile Şekil 3.24(a) ve Şekil 3.24(b)'de verilmiştir.



(a)

Şekil 3.24: (a) Eğik düzlem deney düzeneğinin şematik gösterimi

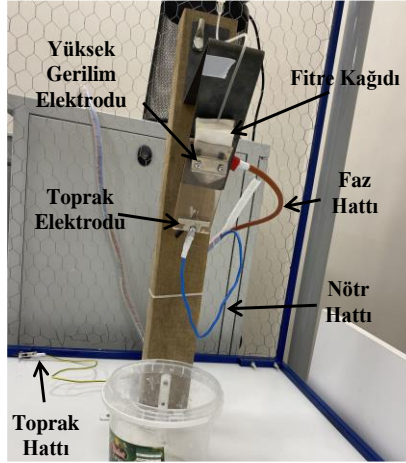


(b)

Şekil 3.24 (devamı): (b) Eğik düzlem deney düzeneğinin genel görünümü.

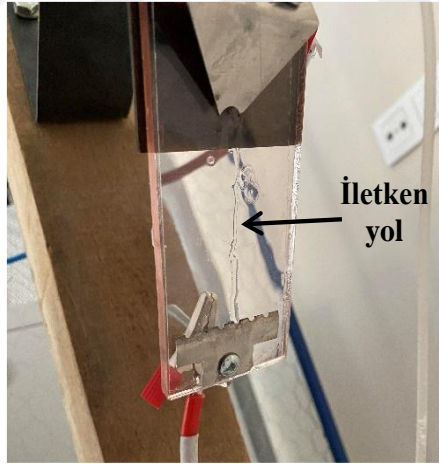
3.1.1. Testlerin Gerçekleştirilmesi

Pişirilme işleminin tamamlanmasının ardından üretilen numuneler, toprak ve yüksek gerilim elektrotlarının montajlarının yapılabilmesi amacıyla standarda uygun olarak delinmiş ve numune elektrotlarla birlikte deney düzeneğine sabitlenmiştir. Bu işlemin ardından numunenin elektriksel bağlantıları ile infüzyon pompasıyla olan bağlantısı Şekil 3.25'te gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 3.25: Elektriksel bağlantıları tamamlanarak standartlara uygun şekilde konumlandırılmış numune görüntüsü.

Bağlantıların tamamlanmasının ardından infüzyon pompasının akış hızı standartta belirtildiği gibi 36 ml/saat olacak şekilde ayarlanmıştır. Sisteme elektrik enerjisi verilmeden önce infüzyon pompası çalıştırılarak yüksek gerilim elektrotu ile toprak elektrotu arasında Şekil 3.26'da görüldüğü gibi iletken yol oluşuncaya kadar beklenilmiştir.



Şekil 3.26: Yüksek gerilim elektrotu ile toprak elektrotu arasında oluşan iletken yolun görüntüsü.

İletken yolun oluşmasının ardından sisteme enerji verilerek deney başlatılmıştır. Deney sırasında Şekil 3.27'de görüldüğü gibi toprak elektrotuna yakın noktalarda elektriksel boşalmalar meydana gelmiştir.



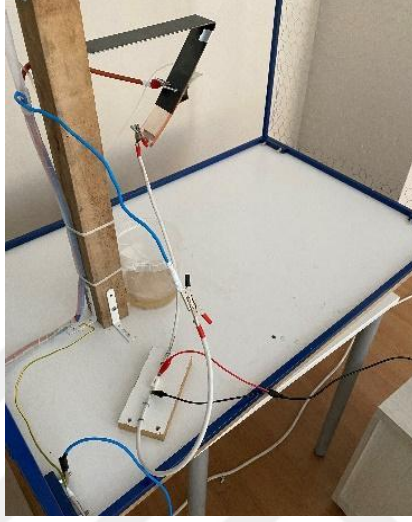
Şekil 3.27: Deney sırasında alt elektroda yakın yüzeylerde meydana gelen elektriksel boşalmaların görüntüsü.

Deney, standartta belirtildiği gibi 2 saniye boyunca numune üzerinden 60 mA ve üzeri seviyelerde kaçak akım akması, toprak elektrotundan yüksek gerilim elektrotuna doğru oluşan iletken yolun uzunluğunun 25 mm'yi geçmesi veya numune üzerinde erozyon görülmesi durumlarından biri meydana gelene kadar devam etmiştir. Bu 3 durumdan herhangi birinin meydana gelmesi durumunda deney sonlandırılarak sistemin enerjisi kesilmiştir. Sistemin enerjisi kesildikten sonra iletken kısımlarda kalan yükü toprağa aktarmak için 6mm² kesit alanına sahip mavi NYA kablodan stanca yapılmıştır. Şekil 3.28'de gösterildiği gibi yapılan stancanın iletken olan bir ucu krokodil ile sistemin toprağına bağlanmış, diğer iletken ucu ise deney sistemindeki bütün iletken kısımlara temas ettirilmiştir.



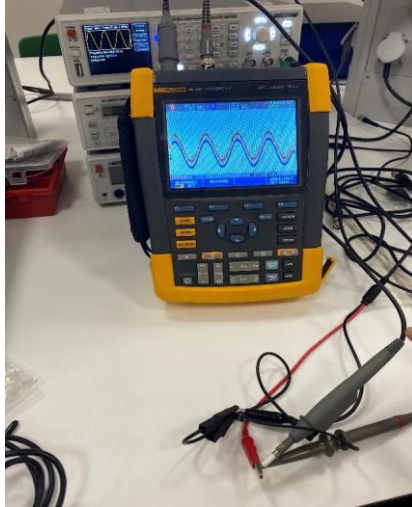
Şekil 3.28: Sistemin enerjisi kesildikten sonra iletken kısımlarda kalan yüklerin stanca ile toprağına aktarılmasının görüntüsü.

Ayrıca deney sırasında numune üzerinden akan akımı ölçmek amacıyla gerilim bölücü yapılarak 5 W gücündeki 100Ω 'luk bir direnç, numune ile toprak arasına seri olarak bağlanmış ve bu direnç üzerindeki gerilim ölçülmüştür. 100Ω 'luk direnç üzerindeki gerilimi ölçerken 5 GS/s'ye kadar yüksek örnekleme hızına sahip dört kanallı Fluke 190-504 marka ölçüm cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.29'da ölçüm düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.29: Numune üzerinde akan akımın belirlenmesinde kullanılan ölçüm düzeneği.

Ölçüm işleminden önce kullanılacak olan ölçüm cihazı ve propların doğruluğu sinyal jeneratörü ile Şekil 3.30'daki gibi test edilmiştir. Ölçüm cihazı test edilirken farklı gerilim ve frekans değerlerine sahip dalga türleri sinyal jeneratörü ile üretilmiştir. Testin sonunda doğruluk payı en yüksek olan probun deney sırasında kullanılması tercih edilmiştir.



Şekil 3.30: Sinyal jeneratörü yardımıyla Scobemeter ve propların test edilmesinin görüntüsü.

Ölçüm sonucunda elde edilen veriler FlukeView yazılımından .csv formatında bilgisayara aktarılmış daha sonra MATLAB yazılım platformu yardımı ile çizdirilerek yorumlanmıştır [84].

İz oluşumu testinde incelenmesi gereken diğer önemli bir konu numunelerin iz oluşumu testine dayanma süreleridir. Numunelerin teste dayanma süreleri sisteme enerji verilmesi anından itibaren testin hata kriterlerinden birinin gerçekleşmesine kadar geçen süreye denir ve bunun için sisteme ilk enerji verildiği andan itibaren süre tutulur.

Bu tez çalışmasının sonuç kısmında numuneler üzerinden akan akımın miktarı ve numunelerin uygulanan gerilime dayanma süreleri karşılaştırılarak katkılı polimerlerin elektriksel karakteristikleri hakkında yorum yapılmıştır.

3.1.5. Elektrik Alan Dağılımının Nümerik Analizi

Eğik düzlem deneyi sırasında numune üzerinde oluşan elektrik alan dağılımını simule etmek amacıyla ilk olarak numunelerin 50 Hz çalışma frekansındaki bağıl dielektrik ve manyetik geçirgenlik sabiti değerleri hesaplanmış, daha sonra bu değerler kullanılarak simülasyonlar CST programıyla gerçekleştirilmiştir.

3.1.5.1. Numunelerin Bağıl Dielektrik Sabiti Değerlerinin Hesaplanması

Numunelerin yüksek frekanslardaki iletim parametreleri vektör ağ çözümleyicileri (Vector Network Analyzer, VNA) ile ölçülebilirken 50 Hz şebeke frekansındaki ölçümlerde bu cihazlar kullanılamamaktadır. Bu yüzden ilk olarak çalışma frekansındaki dielektrik sabitinin ölçüm yöntemleri ile ilgili literatür taraması yapılmış ve paralel plaka yönteminin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür.

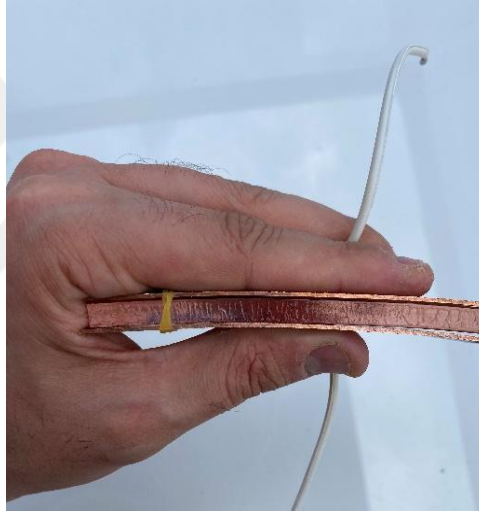
Paralel plaka yönteminde numune, iki adet iletken plakanın arasına yerleştirilir ve LCR metre yardımıyla numunenin kapasitans ölçümü yapılır. Daha sonra ölçüm değeri ile numunenin bağıl dielektrik geçirgenliği Eşitlik 3.1 yardımı ile analitik olarak hesaplanır. Eşitlik 3.1 paralel plakalar arasında oluşan kapasitans değerinin hesabı için literatürde yaygın olarak kullanılan Eşitlik 3.2'den türetilmiştir.

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{A\epsilon_0} \quad (3.1)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (3.2)$$

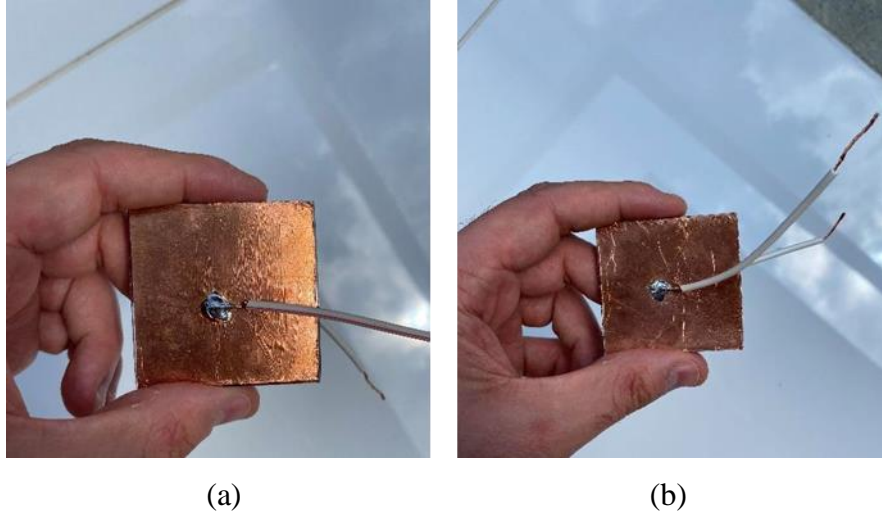
burada A iletken plakaların m^2 cinsinden yüzey alanını, d metre cinsinden plakalar arasındaki mesafeyi, C Farad cinsinden kapasitans değerini ve $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-12}$ F/m serbest uzayın elektriksel geçirgenliğini ifade eder.

Kapasitans ölçümü için ilk olarak paralel plaka yönteminde kullanılması amacıyla 0,5 mm kalınlığındaki bakır levhadan 120 mm x 50 mm boyutlarında iki adet bakır plaka kestirilmiştir. Daha sonra kestirilen plakalar numunelerin her iki tarafına numune ile aralarında hava boşluğu kalmayacak şekilde konumlandırılmışlardır. Ancak, Şekil 3.31’de görüldüğü gibi plakalar ile numune arasında küçük miktarlarda istenmeyen hava boşlukları oluşmuştur.



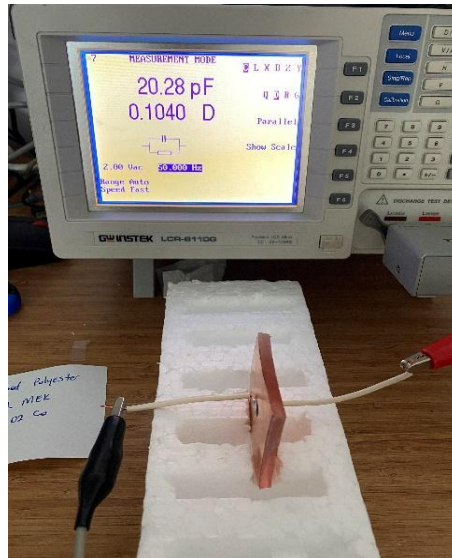
Şekil 3.31: Kapasitans ölçümü için bakır levhalar arasına yerleştirilmiş saf polyesterden üretilen numunenin görüntüsü.

Numune ile iletken plakalar arasında oluşan istenmeyen hava boşluklarının ölçüm sonuçlarını etkilediği bilinmektedir. Bu yüzden numune ile iletken plaka arasında oluşan boşlukları en aza indirmek amacıyla iletken bakır bantların kullanılması tercih edilmiştir. Bunun için 50 mm x 50 mm x 5 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Numunelerin iki yüzeyi de iletken bant ile kaplandıktan sonra LCR metre ile numuneler arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlamak amacıyla iletken bantlara $0,75 \text{ mm}^2$ kesit alanına sahip eşit uzunluktaki kablolar Şekil 3.32’deki gibi lehimlenmiştir.



Şekil 3.32: İki yüzeyi iletken bant ile kaplanarak kordon kablo lehimlenen numunenin (a) üst yüzeyinin (b) alt yüzeyinin görüntüsü.

Ölçümler İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa elektronik laboratuvarında bulunan 20 Hz ile 10 MHz frekans aralığında ölçüm yapabilen GWINSTEK LCR-8110G marka dijital LCR metre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak ölçüm işlemlerine başlamadan önce ölçüm cihazının çalışma frekansı 50 Hz olarak ayarlanmış ve kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işleminin tamamlanmasının ardından önceden hazırlanan numuneler köpük test standına yerleştirilmiş ve LCR metre problemlerinin krokodil uçları iletken bant yüzeyine lehimlenen kordon kablolarla Şekil 3.33’ te gösterildiği gibi bağlanarak ölçümler yapılmıştır.



Şekil 3.33: Kapasitans ölçüm düzeneğinin görüntüsü.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen kapasitans ölçümlerinde dielektrik sabiti değerinin daha doğru elde edilmesi için ölçümlerin 10 kez tekrarlanması kararlaştırılmıştır.

Saf polyesterin kapasitans ölçümleri sonucu elde edilen değerler Eşitlik 3.1’de kullanılarak polyesterin bağıl dielektrik sabiti değerleri hesaplanmış ve Tablo 3.1’de listelenmiştir.

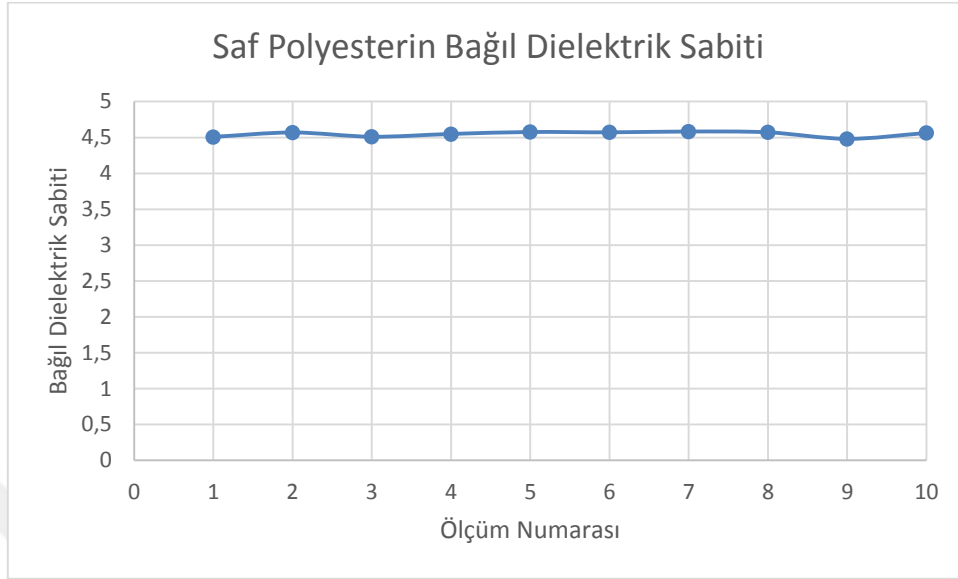
Tablo 3.1: Saf polyesterin kapasitans ölçüm sonuçları ve dielektrik sabitinin hesaplama sonuçları.

	KAPASİTANS (pF)	PLAKALAR ARASI MESAFE (m)	YÜZEY ALANI (m ²)	ϵ_0 ($\times 10^{-12}$)	ϵ_r
5x5 İLETKEN BANT	19,95	0,005	0,0025	8,85	4,5084
	20,22	0,005	0,0025	8,85	4,5694
	19,96	0,005	0,0025	8,85	4,5107
	20,13	0,005	0,0025	8,85	4,5491
	20,25	0,005	0,0025	8,85	4,5762
	20,23	0,005	0,0025	8,85	4,5717
	20,28	0,005	0,0025	8,85	4,5830
	20,23	0,005	0,0025	8,85	4,5717
	19,83	0,005	0,0025	8,85	4,4813
	20,19	0,005	0,0025	8,85	4,5627

Tablo 3.1’de değeri verilen saf polyestere ait bağıl dielektrik sabiti değerlerinin grafiği Şekil 3.34’te verilmiş olup diğer numunelerin hesaplanan bağıl dielektrik sabiti değerlerini gösteren grafikler ise Ek 3’te verilmiştir.

Saf polyesterin kapasitans ölçüm sonucu kullanılarak hesaplanan dielektrik sabiti değerlerinin 4,48 ile 4,58 arasında değiştiği ayrıca bu değerlerin ortalamasının 4,53 ve standart sapmanın da 0,122 olduğu hesaplanmıştır.

Bulunan sonuçlar literatürdeki Martin Fimberger ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma ile karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür [83]. Martin Fimberger ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma sonucunda elde ettikleri sonuçlar Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.34: Saf polyester için ölçümler sonucu elde edilen bağlı dielektrik sabiti değerinin grafiği.

Tablo 3.2: Martin Fimberger ve arkadaşlarının 50 Hz frekansında yapmış olduğu çalışmanın sonuçları.

Parametre	Poliamidit	Polyester	Epoksi Reçine
Yoğunluk (g.cm^{-3})	1,13- 1,21	1,22 – 1,26	1,10 – 1,25
Bağlı dielektrik Sabiti	3,6 - 7	3 – 4,9	3,7 – 4,2
Kayıp Faktörü	0,014 - 0,15	0,008 – 0,6	0,007 – 0,009
İletkenlik (S.m^{-1})	10^{-11} - 10^{-6}	10^{-13} - 10^{-12}	10^{-15} - 10^{-14}

İletken bakır bant kullanılarak saf polyesterin dielektrik sabiti için tutarlı sonuçların alınması neticesinde, bu yöntem katkılı polimerlerin dielektrik sabitinin belirlenmesi aşamasında da kullanılmış olup ölçüm sonuçları Tablo 3.3'te verilmiştir. Ayrıca numunelerin bağlı dielektrik sabiti değerlerine ait grafikler Ek-3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 incelendiğinde katkı maddesinin türüne bağlı olarak çinko oksit hariç bütün katkılı polyester numunelerin bağlı dielektrik sabiti değerlerinde belirgin oranlarda azalma meydana geldiği görülmüş ve numunelere ait bağlı dielektrik sabiti değerlerinin ortalaması ile standart sapması Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.3: Katkılı polimerlerin ölçülen kapasitans değerleri ve hesaplanan bağıl dielektrik sabiti değerleri.

Ölçüm No	%3 Çinko Oksit Katkılı Saf Polyester		%3 Manyetit Katkılı Saf Polyester		%3 Kobalt Katkılı Saf Polyester		%3 Nikel Katkılı Saf Polyester	
	C (nF)	ϵ_r	C (nF)	ϵ_r	C (nF)	ϵ_r	C (nF)	ϵ_r
1.	18,18	4,1084	12,96	2,9288	11,56	2,6124	13,86	3,1322
2.	21,18	4,7864	13,35	3,0169	12,18	2,7525	14,70	3,3220
3.	19,74	4,4610	14,29	3,2293	12,55	2,8361	13,62	3,0779
4.	21,20	4,7909	15,99	3,6135	11,82	2,6711	14,05	3,1751
5.	21,08	4,7638	15,12	3,4169	12,42	2,8067	16,25	3,6723
6.	21,14	4,7774	15,42	3,4847	11,62	2,6259	15,47	3,4960
7.	20,27	4,5807	13,27	2,9988	11,52	2,6033	16,12	3,6429
8.	18,29	4,1334	13,27	2,9988	12,56	2,8384	14,34	3,2406
9.	20,09	4,5401	13,56	3,0644	11,94	2,6983	14,57	3,2926
10.	18,31	4,1378	13,86	3,1322	12,94	2,9242	16,23	3,6677

Tablo 3.4: Katkılı polyesterlerin bağıl dielektrik sabiti değerlerinin ortalaması ve standart sapması

	%3 Çinko Oksit Katkılı Saf Polyester	%3 Manyetit Katkılı Saf Polyester	%3 Kobalt Katkılı Saf Polyester	%3 Nikel Katkılı Saf Polyester
Ortalama	4,5080	3,1884	2,7369	3,3719
Standart Sapma	0,2869	0,2379	0,1114	0,2297

3.1.5.2. Numunelerin Bağıl Manyetik Geçirgenlik Katsayılarının Hesabı

Maddelerin manyetik geçirgenlik katsayıları yüksek frekanslarda analizörler yardımı ile ölçülebilirken 50 Hz şebeke frekansında bu ölçümü yapmak oldukça zordur. Bu yüzden numunelerin 50 Hz'deki manyetik geçirgenlik katsayıları endüktans hesabı yapılarak bulunmuştur. Endüktans

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A}{l} \quad (3.3)$$

formülü ile hesaplanır. Burada L bobinin endüktansını (Henry,H), μ_0 serbest uzayın manyetik geçirgenlik sabitini (Henry/metre,(H/m), N sarım sayısını, A bobinin kesit alanını (m^2), l ise tel

uzunluğunu (m) ifade etmektedir. Bu formülden bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı olan μ_r , çekilerek

$$\mu_r = \frac{Ll}{\mu_0 N^2 A} \quad (3.4)$$

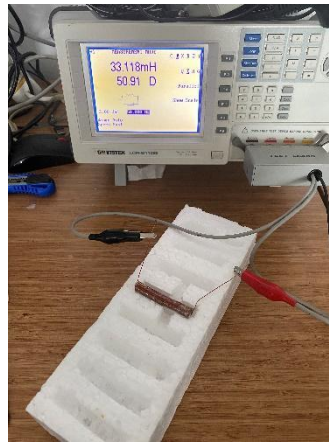
şeklinde hesaplanabilir. Eşitlik 3.5'teki gibi iki maddenin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısını oranlarsak

$$\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} = \frac{\frac{L_1 l}{\mu_0 N^2 A}}{\frac{L_2 l}{\mu_0 N^2 A}} \quad (3.5)$$

eşitliğini elde edilir. Fiziksel boyutları aynı ve üzerinde eşit sayıda sarım bulunan numuneler için her iki tarafta aynı olan uzunluk, kesit alanı, serbest uzayın manyetik geçirgenlik katsayısı ve sarım sayısı sadeleştirilerek iki maddenin bağıl manyetik geçirgenlik katsayılarının oranı Eşitlik 3.6'daki gibi endüktanslarının oranına eşit olur.

$$\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} = \frac{L_{r1}}{L_{r2}} \quad (3.6)$$

Havanın bağıl manyetik geçirgenlik katsayısının 1 olduğu bilindiği için Eşit 3.6'yı kullanmak amacıyla ilk olarak numune ile eşit kesit alanına sahip içi boş olarak bobin teli sarılmış ve Şekil 3.35'teki gibi endüktans ölçümü yapılarak ve ölçüm sonuçları Tablo 3.5'te verilmiştir.

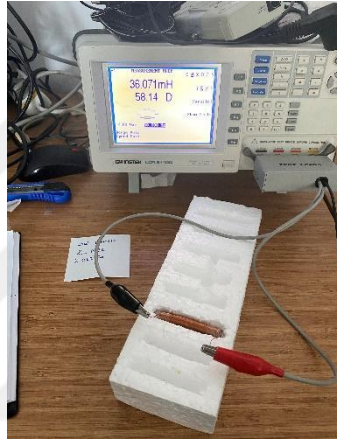


Şekil 3.35: İçi boş olarak sarılan bobin teline ait ölçüm görüntüsü.

Tablo 3.5: İçi boş olarak sarılan bobin teline ait endüktans ölçüm sonuçları.

Ölçüm No:	1.	2.	3.	4.	5.
Endüktans (μH)	35,904	35,861	35,949	35,877	35,698

Daha sonra silikon kalıplara dökülmesi için hazırlanan yarı akışkan karışımlardan silindirik şekilde numuneler üretilmiş ve üretilen numunelerin üzerine eşit sarım sayısına sahip olacak şekilde bobin teli sarılarak Şekil 3.36'daki gibi endüktans ölçümü yapılmıştır.



Şekil 3.36: İçerisinde saf polyester numunesi olarak sarılan bobin tellerinin endüktans ölçümü görüntüsü.

Ölçümler sonucu numunenin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısını hesaplamak için Eşitlik 3.6 kullanılarak iki endüktans değeri birbirine oranlanmıştır.

Ayrıca ölçüm sırasında meydana gelebilecek hata payını en aza indirmek amacıyla tel sarımı yapılırken tellerin üst üste gelmemesi ve teller arasında boşluk kalmamasına özen gösterilmiş ayrıca her bir numune için 5 defa ölçüm yapılmıştır. Ölçümlerde kapasitans ölçümünde olduğu gibi İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa elektronik laboratuvarında bulunan 20 Hz ile 10 MHz arasında ölçüm yapabilen GWINSTEK LCR-8110G marka dijital LCR metre kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan bağıl manyetik geçirgenlik katsayı değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Numunelerin bağıl manyetik geçirgenlik katsayıları.

Ölçüm No:	Saf Polyester	%3 Çinko Oksit Katkılı Saf Polyester	%3 Manyetit Katkılı Saf Polyester	%3 Kobalt Katkılı Saf Polyester	%3 Nikel Katkılı Saf Polyester
	μ_r	μ_r	μ_r	μ_r	μ_r
1	0,9934	1,0851	1,1801	1,3056	1,3575
2	0,9904	1,0753	1,1753	1,2849	1,2511
3	1,0080	1,1003	1,1719	1,2685	1,1734
4	1,0059	1,1002	1,1878	1,2711	1,2299
5	1,0017	1,1031	1,0959	1,2727	1,1970

Ayrıca ölçüm sonuçlarına ait standart sapma ve ortalama değerleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7: Katkılı polyesterlerin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı değerlerinin ortalaması ve standart sapması

	Saf Polyester	%3 Çinko Oksit Katkılı Saf Polyester	%3 Manyetit Katkılı Saf Polyester	%3 Kobalt Katkılı Saf Polyester	%3 Nikel Katkılı Saf Polyester
Standart Sapma	0,007703	0,012069	0,03754	0,015351	0,071239
Ortalama	0,99	1,09	1,16	1,28	1,24

4. BULGULAR

Tez çalışmasında katkı maddesi türünün saf polyesterin elektriksel özelliklerine etkisini incelemek için laboratuvar ortamında ağırlıkça %3 manyetit, nikel, kobalt ve çinko oksit katkılı polyester numuneler üretilerek eğik düzlem deneyine tabi tutulmuştur. Bölüm 4.1’de katkı maddesinin polyesterin kullanım ömrüne etkisi incelenirken, Bölüm 4.2’de katkı maddesi türünün saf polyesterin üzerinden akan kaçak akım miktarına etkisi incelenmiştir. Son olarak Bölüm 4.3’te ise eğik düzlem deneyi sırasında numunelerin üzerinde oluşan elektrik ve manyetik alan dağılımı CST programı ile simüle edilmiştir.

4.1. KATKI MADDE TÜRÜNÜN SAF POLYESTERİN KULLANIM ÖMRÜNE ETKİSİ

Çalışmanın bu bölümünde saf polyesterin içerisine her bir katkı maddesi türünden ağırlıkça %3 oranında ilave edilerek üretilen 5 numunenin ömür sürelerinin ortalaması Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Numunelerin ortalama ömür süreleri.

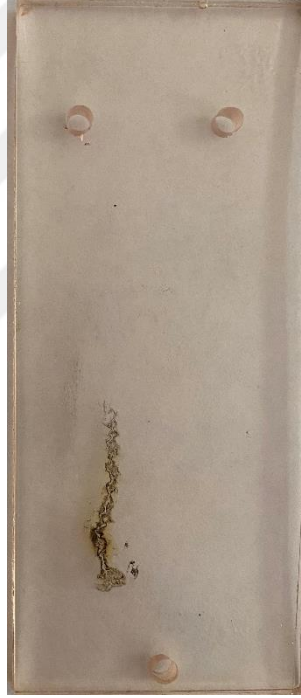
Numune Türü	Ortalama Ömür Süresi
Saf Polyester	16 dakika 17 saniye
%3 Çinko Oksit Katkılı Polyester	27 dakika 24 saniye
%3 Manyetit Katkılı Polyester	43 dakika 18 saniye
%3 Kobalt Katkılı Polyester	61 dakika 43 saniye
%3 Nikel Katkılı Polyester	75 dakika 37 saniye

Tablo 4.1 incelendiğinde eğik düzlem deneyi uygulanan katkısız polyester numuneler ortalama 16 dakika 17 saniye sonra bozulmaya uğrarken saf polyesterin kullanım ömrünü ağırlıkça %3 oranında ilave edilen katkı malzemelerinden çinko oksitin % 61 oranında, manyetitinin %154 oranında, kobaltın % 263 oranında ve nikelin % 344 oranında artırdığı görülmektedir.

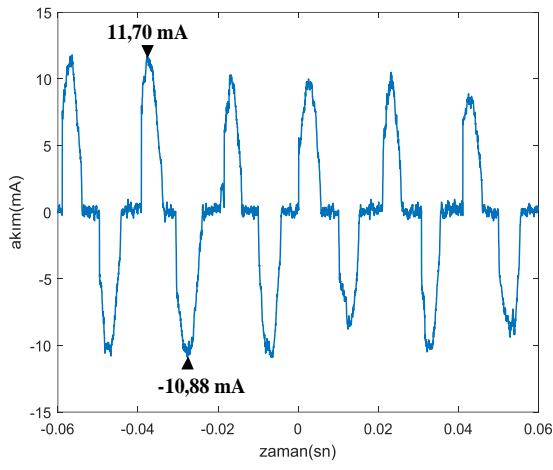
4.2. NUMUNELER ÜZERİNDE OLUŞAN KAÇAK AKIM MİKTARI

Bu bölümde deney sırasında numune üzerinde oluşan kaçak akım miktarını incelemek amacıyla numuneye seri bağlanan 100 Ω 'luk direnç üzerinden gerilim ölçümü yapılmış daha sonra gerilim değeri direncin değerine bölünerek numune üzerinden akan kaçak akım miktarı hesaplanmış ve hesaplanan değerlerin grafiği Matlab platformunda çizdirilmiştir [84].

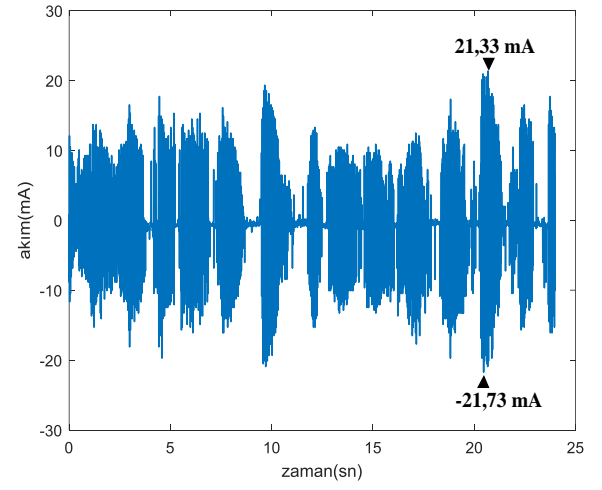
İz oluşumu deneyini tamamlamış saf polyester numune örneğinin görüntüsü ve deney sırasında farklı zamanlarda numune üzerinden akan kaçak akım miktarının grafiği sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.3'te ise saf polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü verilmiştir.



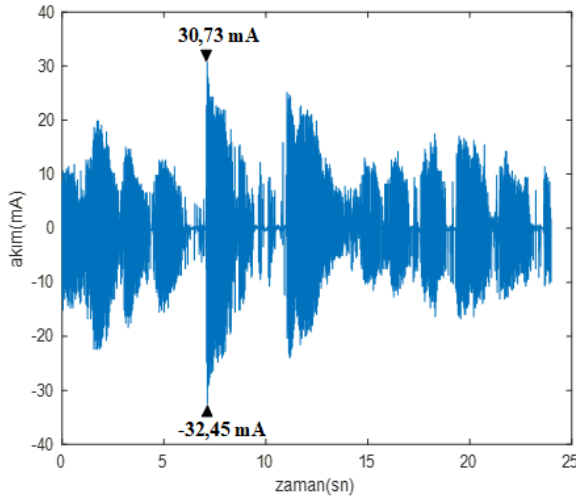
Şekil 4.1: İz oluşumu deneyini tamamlamış saf polyester numune görüntüsü



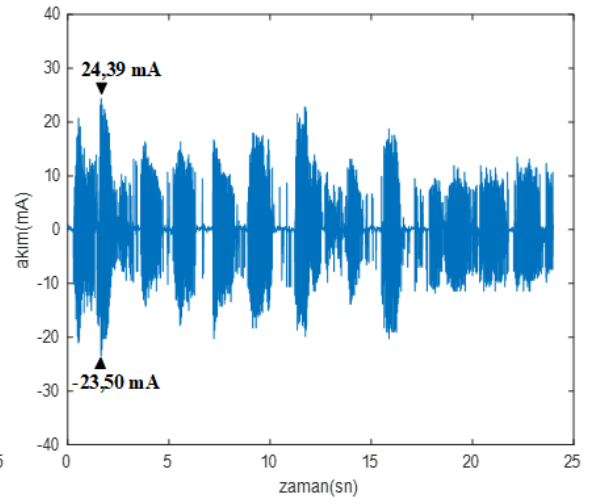
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.2: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda ve farklı zaman aralıklarında saf polyester numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.

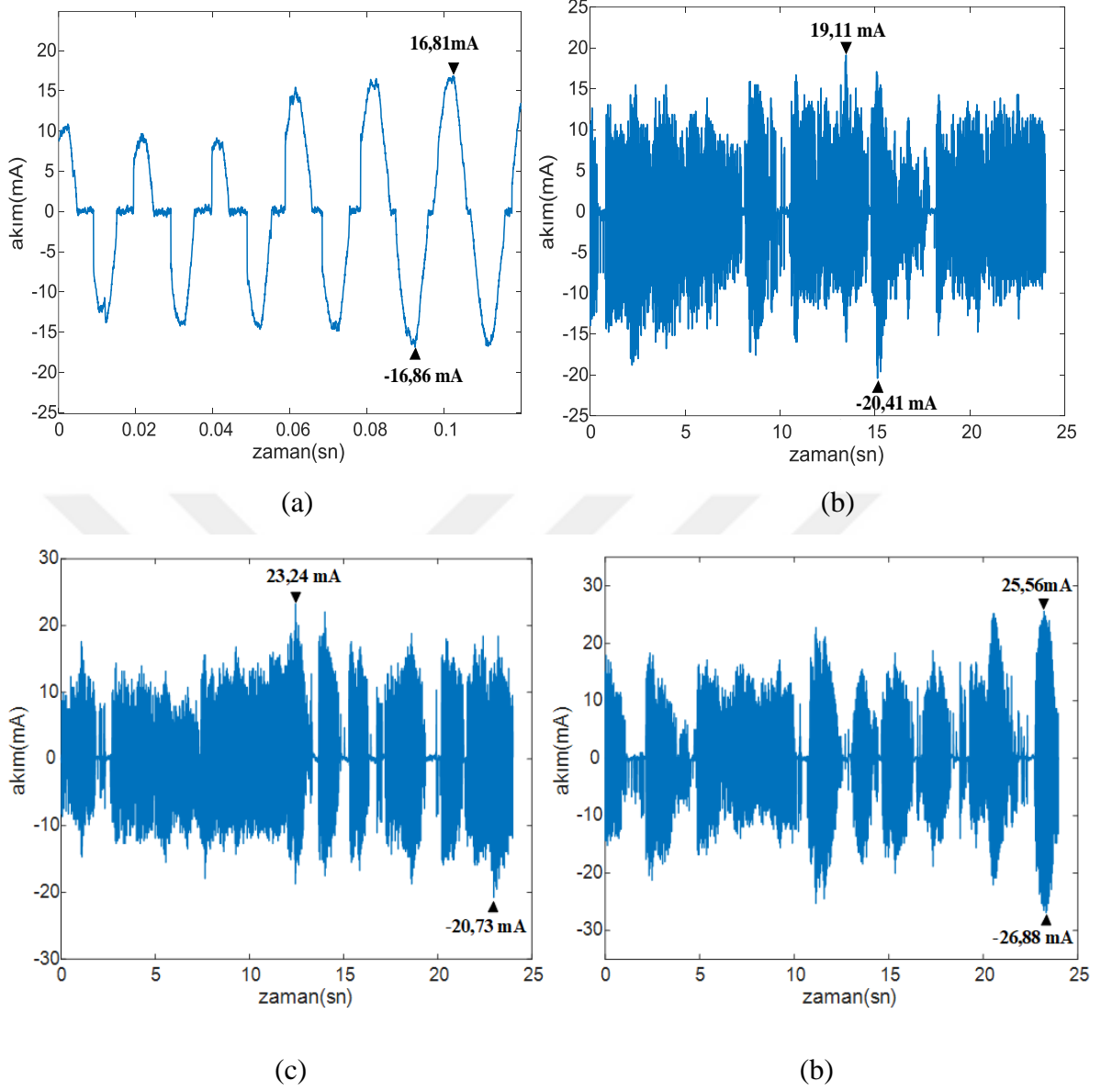


Şekil 4.3: Saf polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği andaki sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.

İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 çinko oksit katkılı polyester numune örneğinin görüntüsü ve deney sırasında farklı zamanlarda numune üzerinden akan kaçak akım işaretleri sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’ te verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.6’da ise %3 çinko oksit katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.4: İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 çinko oksit katkılı polyester numune görüntüsü



Şekil 4.5: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda farklı zaman aralıklarında %3 çinko oksit katkılı numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.

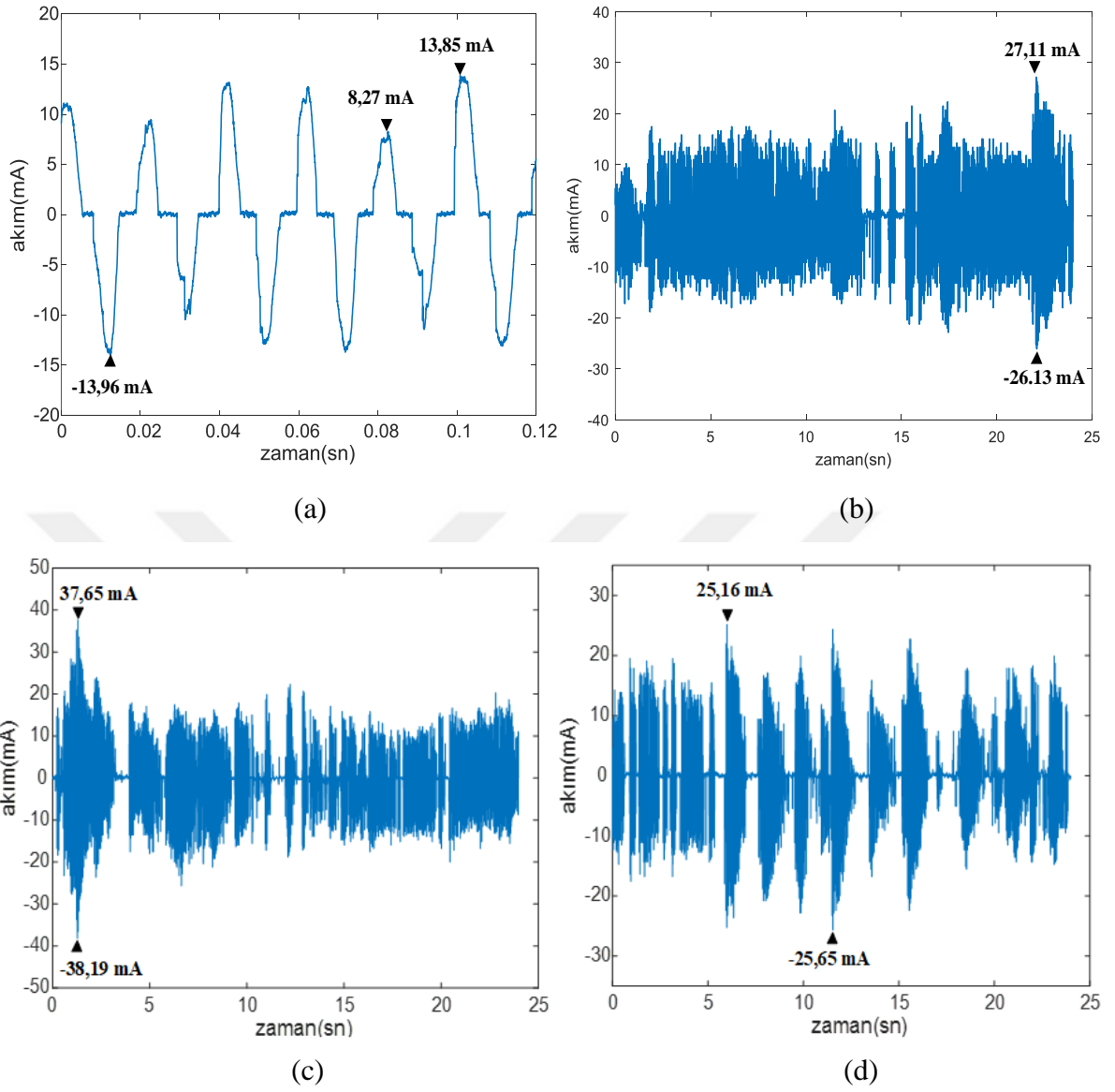


Şekil 4.6: %3 çinko oksit katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği andaki sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.

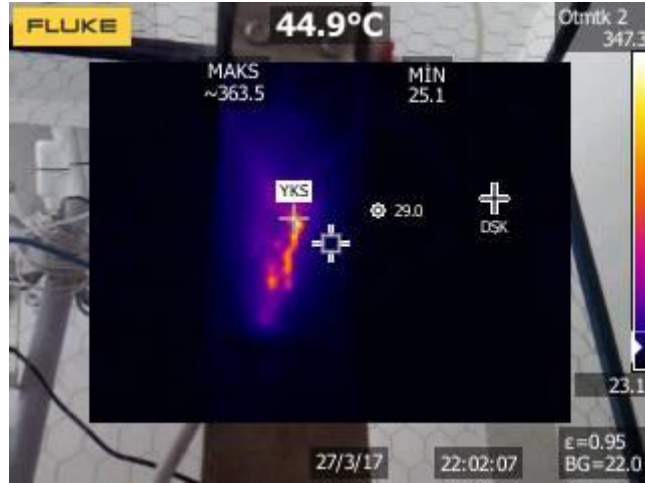
İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 kobalt katkılı polyester numune örneğinin görüntüsü ve deney sırasında farklı zamanlarda numune üzerinden akan kaçak akım işaretleri sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.9’da ise %3 kobalt katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.7: İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 kobalt katkılı polyester numune görüntüsü

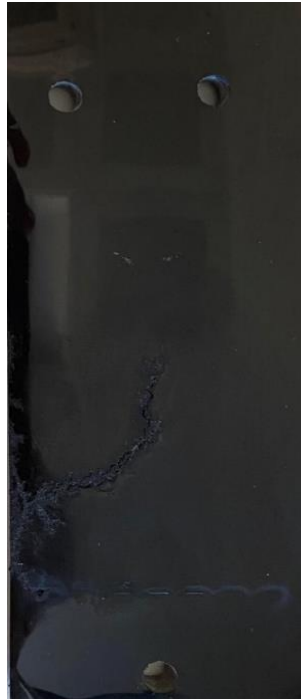


Şekil 4.8: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda farklı zaman aralıklarında %3 kobalt katkılı numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.

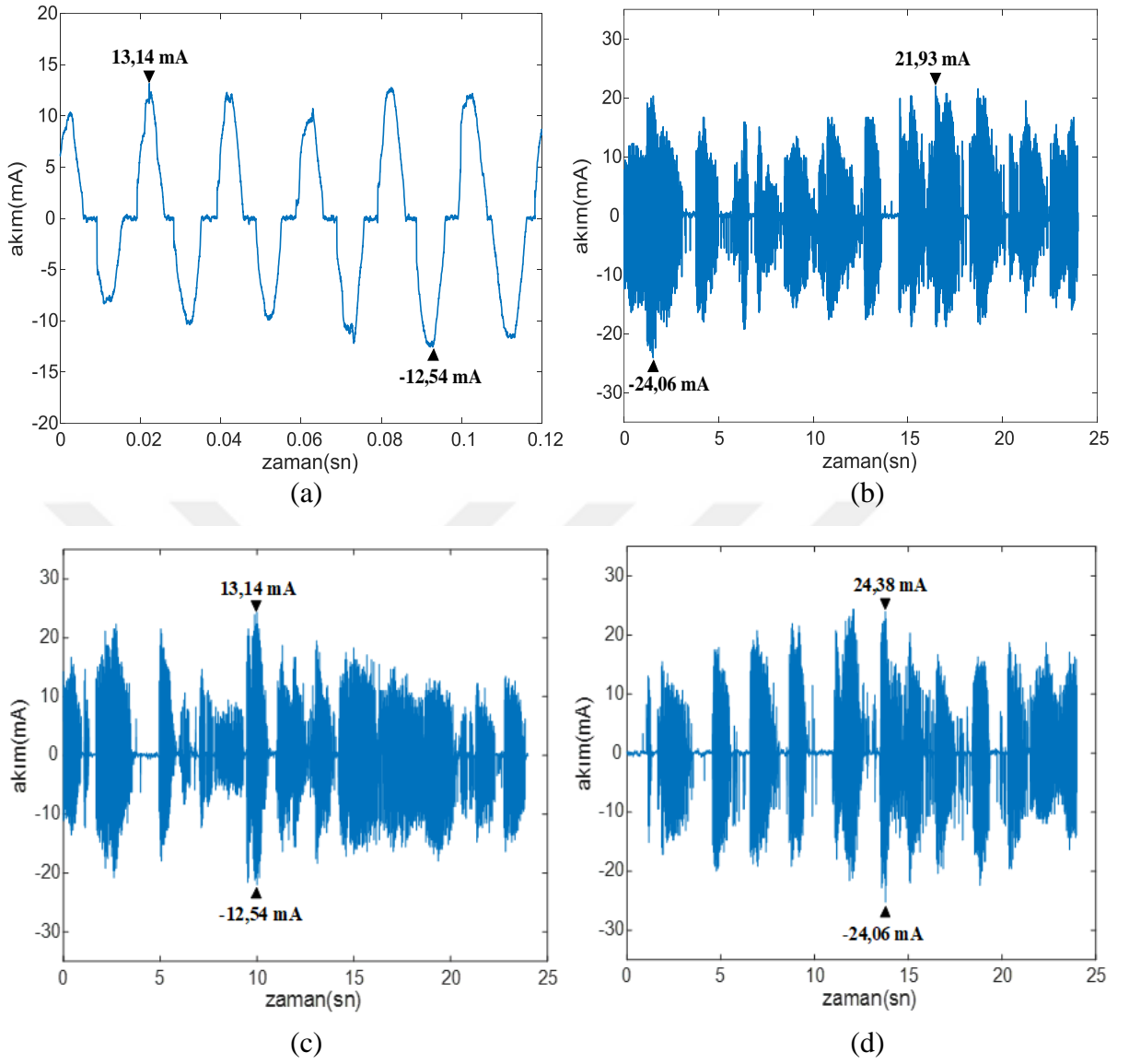


Şekil 4.9: %3 kobalt katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği andaki sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.

İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 manyetit katkılı polyester numune örneğinin görüntüsü ve deney sırasında farklı zamanlarda numune üzerinden akan kaçak akım işaretleri sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’ de verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.12’de ise %3 manyetit katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.10: İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 manyetit katkılı polyester numune görüntüsü

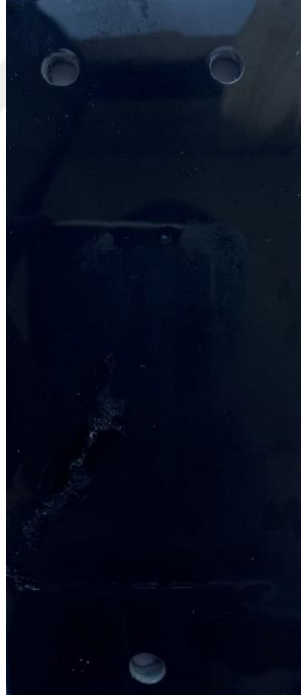


Şekil 4.11: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda farklı zaman aralıklarında %3 manyetit katkılu numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.

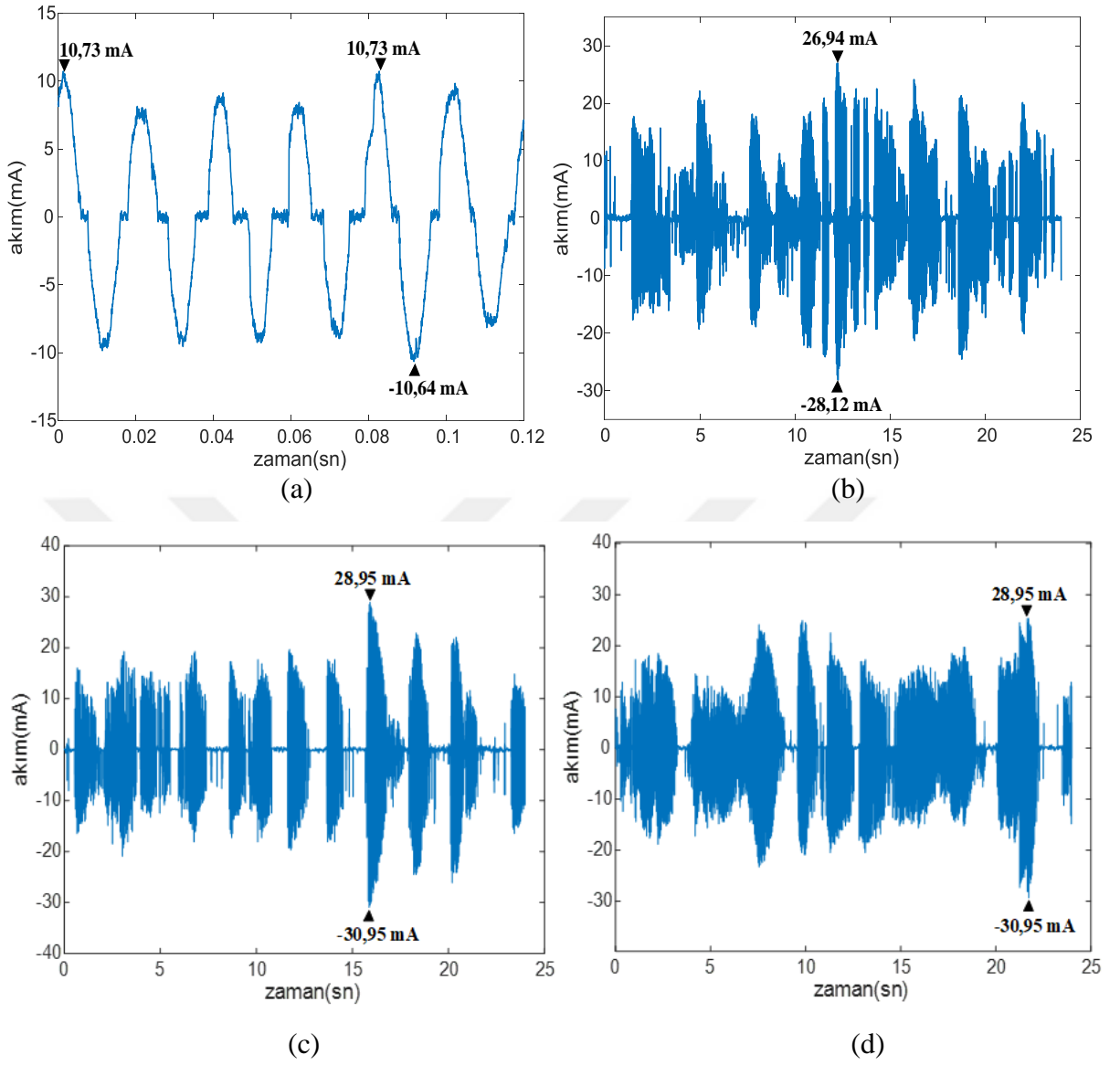


Şekil 4.12: %3 manyetit katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği andaki sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.

İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 nikel katkılı polyester numune örneğinin görüntüsü ve deney sırasında farklı zamanlarda numune üzerinden akan kaçak akım işaretleri sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.15'te ise %3 nikel katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.13: İz oluşumu deneyini tamamlamış %3 nikel katkılı polyester numune görüntüsü.



Şekil 4.14: (a, b, c, d) Deney sırasında farklı zamanlarda farklı zaman aralıklarında %3 nikel katkılı numune üzerinden akan kaçak akım işaretlerinin grafikleri.



Şekil 4.15: %3 nikel katkılı polyester numune üzerinde bozulmanın meydana geldiği anda sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüsü.

4.3. KATKI MALZEMESİ TÜRÜNÜN SAF POLYESTERİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNE ETKİSİ

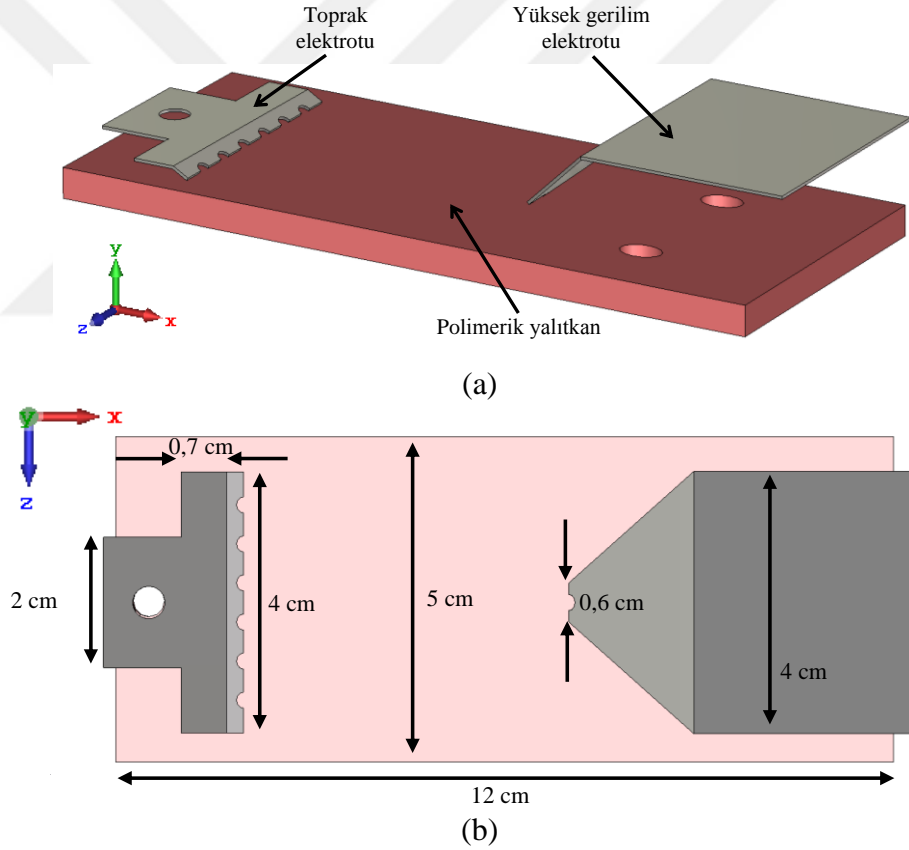
Katkı maddesi türünün polyeterin bağıl dielektrik sabitine olan etkisini incelemek amacıyla ilk olarak saf polyesterden hazırlanmış numunenin 50 Hz şebeke frekansındaki kapasitans değeri ölçülerek bağıl dielektrik sabiti değeri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir. Daha sonra hesaplanan sonuçlar analiz edildiğinde ortalamanın 4,53 ve standart sapmasının ise 0.122 olduğu bulunmuştur. Katkılı polyester numunelere ait kapasitans ölçüm sonuçları ile hesaplanan bağıl dielektrik sabiti değerleri Tablo 3.3’te, bu değerlerin ortalaması ile standart sapmasının değerleri ise Tablo 3.4’te verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında çinko oksit saf polyesterin bağıl dielektrik sabiti değerini çok fazla etkilemezken, manyetitin % 29,8 oranında, kobaltın % 39,73 oranında, nikelin ise % 25,60 oranında azalttığı görülmüştür.

Katkı maddesi türünün polyesterin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısına olan etkisini incelemek amacıyla bütün numunelerin 50 Hz şebeke frekansındaki endüktansı ölçülerek bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.6’da verilmiştir. Daha sonra hesaplanan sonuçlar analiz edildiğinde numunelerin ölçülen bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı değerlerinin ortalaması ve bu değerlere ait standart sapmaları Tablo 3.7’de verilmiştir. Ayrıca çinko oksitin saf polyesterin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı değerini %10, manyetitin % 17,17 oranında, kobaltın % 29,29 oranında, nikelin ise % 25,25 oranında artırdığı görülmüştür.

4.4. NÜMERİK ANALİZLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

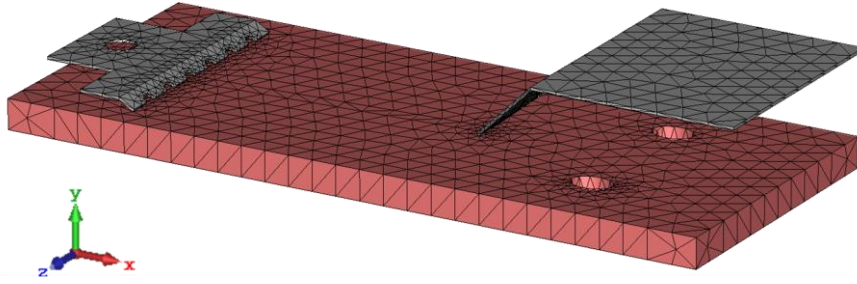
Tez çalışması kapsamında polimerik yalıtkanların elektriksel karakteristiklerinin daha iyi incelenebilmesi için ölçümlerde kullanılan numunelerin bilgisayar destekli 3D benzetim modeli oluşturularak nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerde farklı fiziksel ve elektriksel özelliklere sahip tasarımların yüksek doğrulukta, hızlı ve etkili bir şekilde analiz edilmelerine olanak sağlayan elektromanyetik yazılım paketi CST Studio Suite kullanılmıştır [13].

Şekil 4.16'da gösterildiği gibi tasarımı gerçekleştirilen model, polimerik yalıtkan numune üzerine konumlandırılmış yüksek gerilim ve toprak elektrotlarından oluşmaktadır.



Şekil 4.16: Nümerik analizler için 3D tasarımı yapılarak üzerine yüksek gerilim ve toprak elektrotu yerleştirilen numunenin (a) perspektif (b) üstten görünümü.

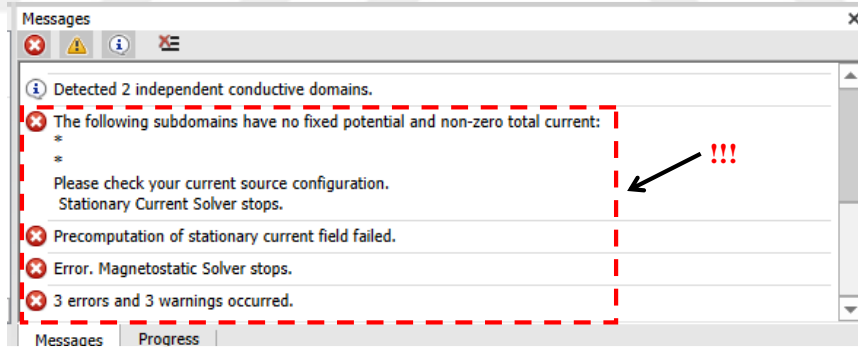
Benzetim modelinin karmaşık yüzey şekilleri içermesinden dolayı nümerik analizlerde Şekil 4.12'de gösterildiği gibi üçgensel ağ örgü (tetrahedrons mesh) yapısı tercih edilmiştir. Bu ağ yapısı maksimum 1.88 cm ve minimum 0.34 μm kenar uzunluklarına sahip toplam 42.687 hücre elemanından oluşmaktadır.



Şekil 4.17: Nümerik analizler için 3D tasarımı yapılan numunenin üçgensel ağ örgülü yapısının görüntüsü.

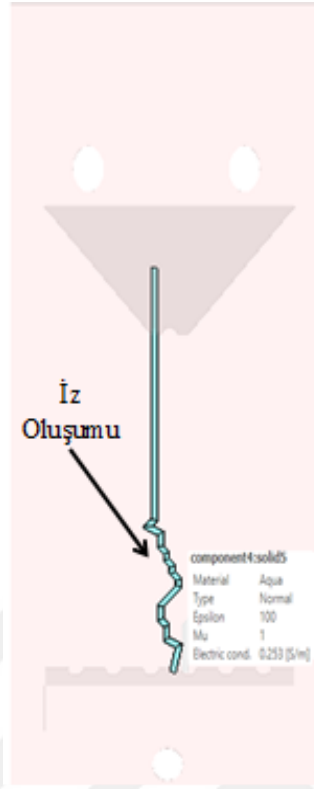
Nümerik analiz çalışmalarına başlamadan saf polsyeter numunenin bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı Bölüm 3.1.5.1 ve Bölüm 3.1.5.2’de belirtildiği gibi ölçüm değerlerinin ortalaması olarak sırasıyla 4,53 ve 0,99 olarak olarak tanımlanmıştır.

Daha sonra nümerik analizlere başlanıldığında yüksek gerilim ve toprak elektrotları arasında elektrik iletimi sağlanmadığına dair hata mesajı ile karşılaşılmış ve karşılaşılan hata mesajı Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18: Nümerik analiz sırasında karşılaşılan hata mesajı görüntüsü.

Bölüm 3.1.4’te detaylandırıldığı gibi polimerik yalıtkan malzemenin yüzey direncini azaltarak elektrotlar arasında akım akmasına olanak sağlamak için ölçümlerde kirletici sıvı kullanılmıştı. Karşılaşılan hata mesajını gidermek için benzer bir uygulamanın nümerik analizlerde de yapılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla deney sırasında numune üzerinde meydana gelen iz oluşumu yüksek gerilim ile toprak elektrodu arasına iletim hattı olarak tanımlanmıştır. İletim hattının bağıl dielektrik sabiti 100, bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı 1 ve elektriksel iletkenliği 0,253 S/m olarak numune üzerine Şekil 4.19’daki gibi tanımlanmıştır.



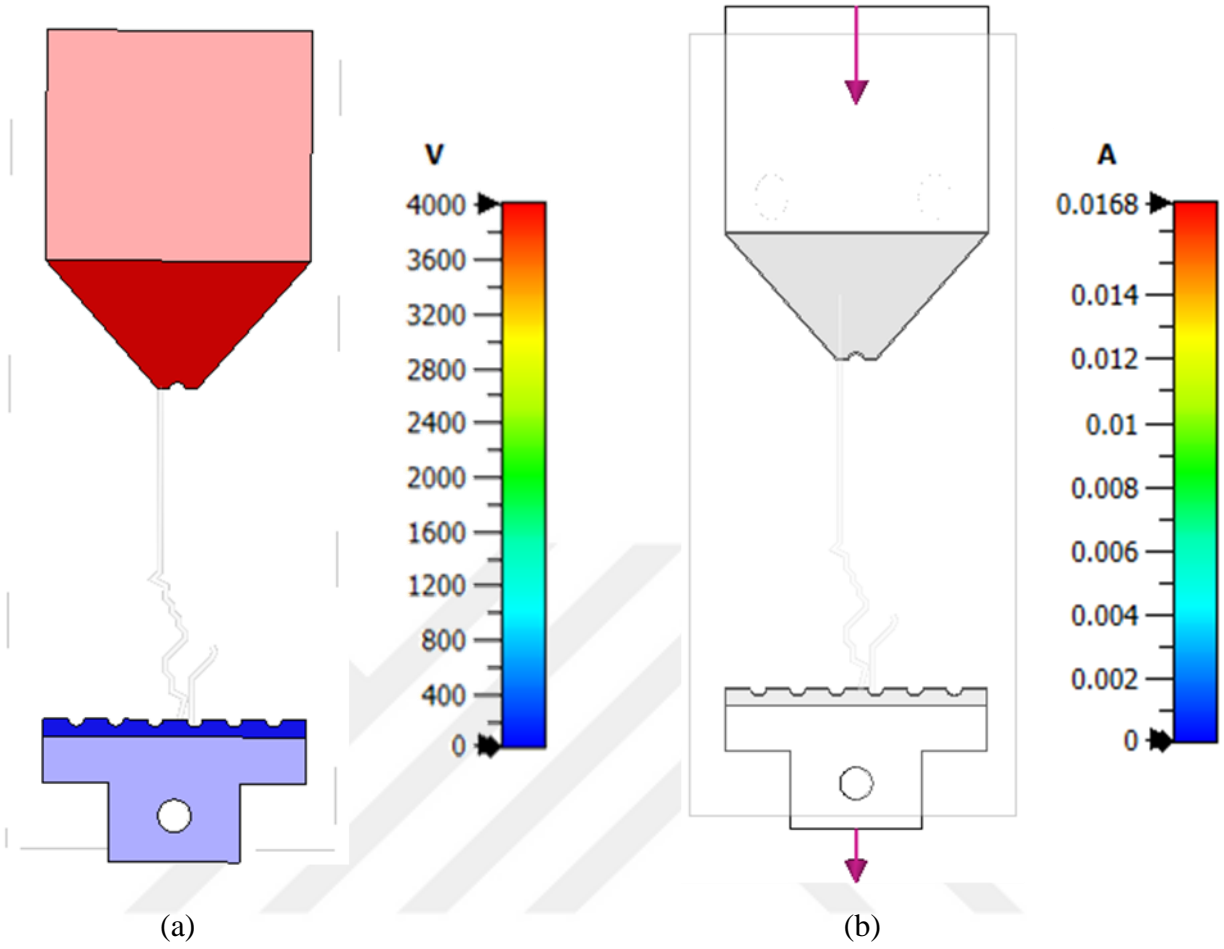
Şekil 4.19: Nümerik analizler için iz oluşumunun numune üzerine tanımlanması.

Numune üzerinde oluşan elektrik alan dağılımını incelemek amacıyla ASTM D2303 standardında belirtildiği gibi bütün numuneler için yüksek gerilim elektrodu 4 kV'luk gerilim portu ile uyarılmıştır. Manyetik alan dağılımını incelemek amacıyla her numune için yüksek gerilim elektrodu deney sırasında elektriksel boşalmanın meydana gelmediği anlarda numune üzerinden akan akım miktarının en büyük değeri ile uyarılmıştır ve her numune için yüksek gerilim elektrodunun uyarıldığı akım miktarı Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Manyetik alan dağılımı için yüksek gerilim elektrodunun uyarıldığı akım değerleri

	Saf Polyester	%3 Çinko Oksit Katkılı Saf Polyester	%3 Manyetit Katkılı Saf Polyester	%3 Nikel Katkılı Saf Polyester
Akım Miktarı (mA)	11,70	16,81	13,85	10,73

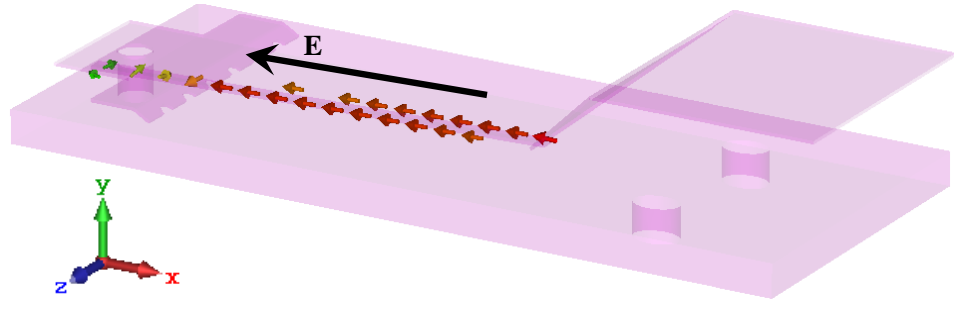
Örnek olarak %3 çinko oksit katkılı polyester numune üzerindeki elektrik alan ve manyetik alan dağılımı için benzetim modeli üzerinde gerçekleştirilen uyarılmalar sırasıyla Şekil 4.20(a) ve Şekil 4.20(b)'de verilmiştir.



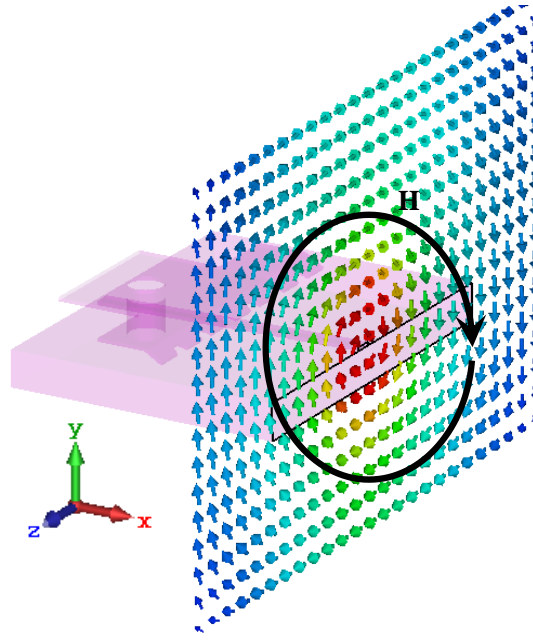
Şekil 4.20: %3 çinko oksit katkılı numunenin (a) elektrik alan dağılımı için (b) manyetik alan dağılımı için uyarılması.

Çalışma kapsamında benzetim modelinde karşılaşılan hatalar giderildikten sonra nümerik analizlere devam edilmiş olup polimerik yalıtkan malzemenin üzerinde oluşan elektrik ve manyetik alanların vektör dağılımları elde edilmiştir.

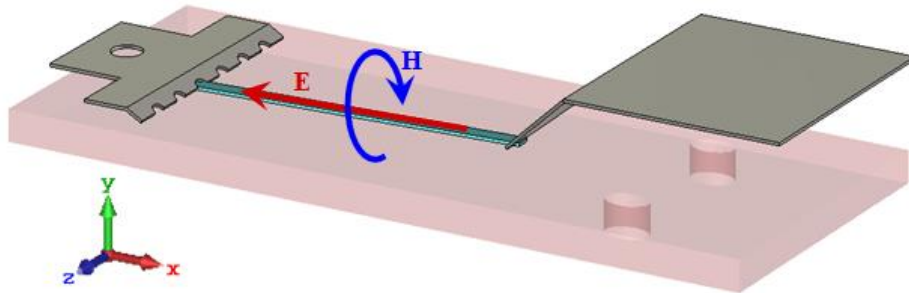
Şekil 4.21(a) ve Şekil 4.21(b)'den sırası ile elektrik alan vektörlerinin yüksek gerilim elektrotundan çıkıp toprak elektrotunda sonlandığı görülürken manyetik alan vektörlerinin elektrotlar arasına konumlandırılan iletim hattı etrafında kapalı bir döngü oluşturduğu net bir şekilde görülmektedir. Elde edilen nümerik analiz sonuçları Şekil 4.21(c)'de şematik olarak gösterilen elektrostatik ve manyetostatik teoriyle örtüşmektedir.



(a)



(b)

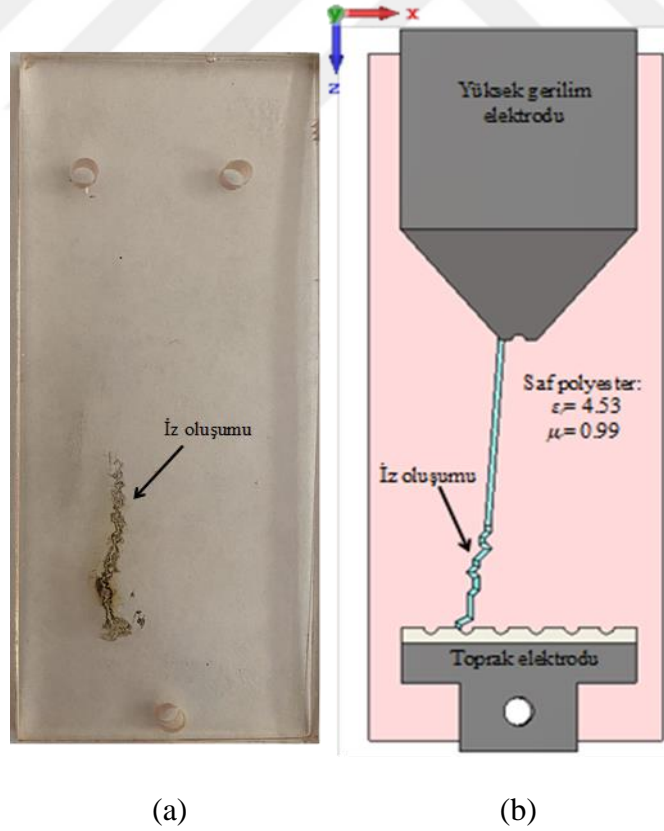


(c)

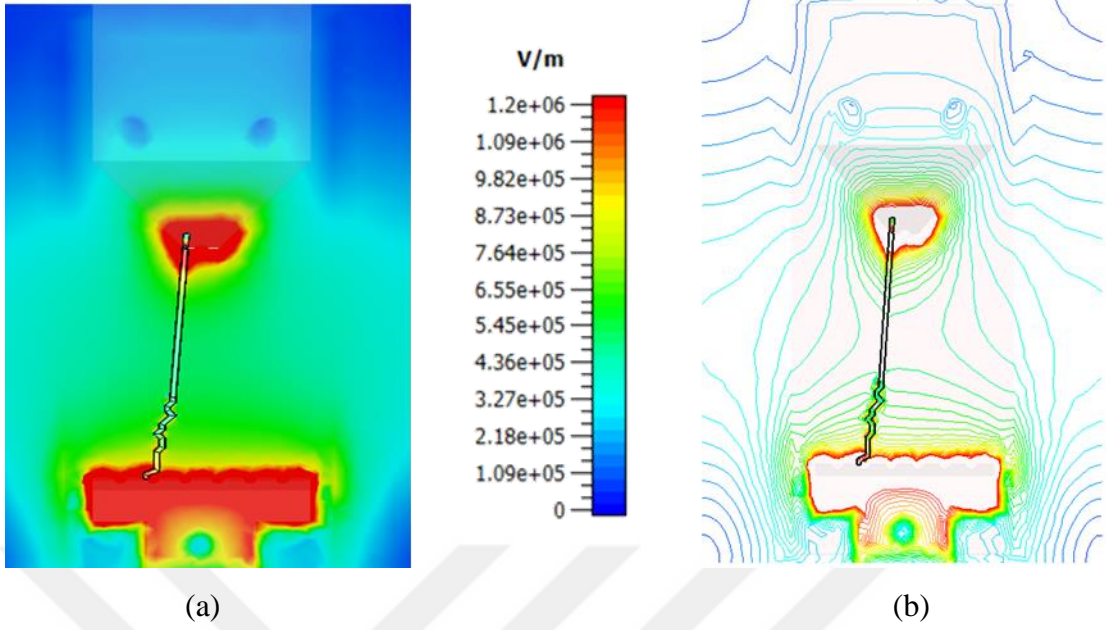
Şekil 4.21: Polimerik yalıtkan malzemenin üzerinde oluşan elektrik ve manyetik alanların vektör dağılımları (a) nümerik analiz sonucu elde edilen E dağılımı (b) nümerik analiz sonucu elde edilen H dağılımı (c) E ve H dağılımının teorik gösterimi.

Çalışmaya prototip üretimleri gerçekleştirilen numunelerin elektriksel analizleri ile devam edilmiştir. Bu amaçla prototip üretimi tamamlanan saf polyester ile birlikte çinko oksit, manyetit ve nikel katkılı polyesterlerin benzetim modelleri deneyler sonucunda meydana gelen iz oluşumları göz önüne alınarak tasarlanmış daha sonra numunelerin elektriksel parametre değerleri her bir model için ayrı ayrı tanımlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucu elde edilen alan dağılımları her bir model için aşağıda ayrı ayrı irdelenmiştir.

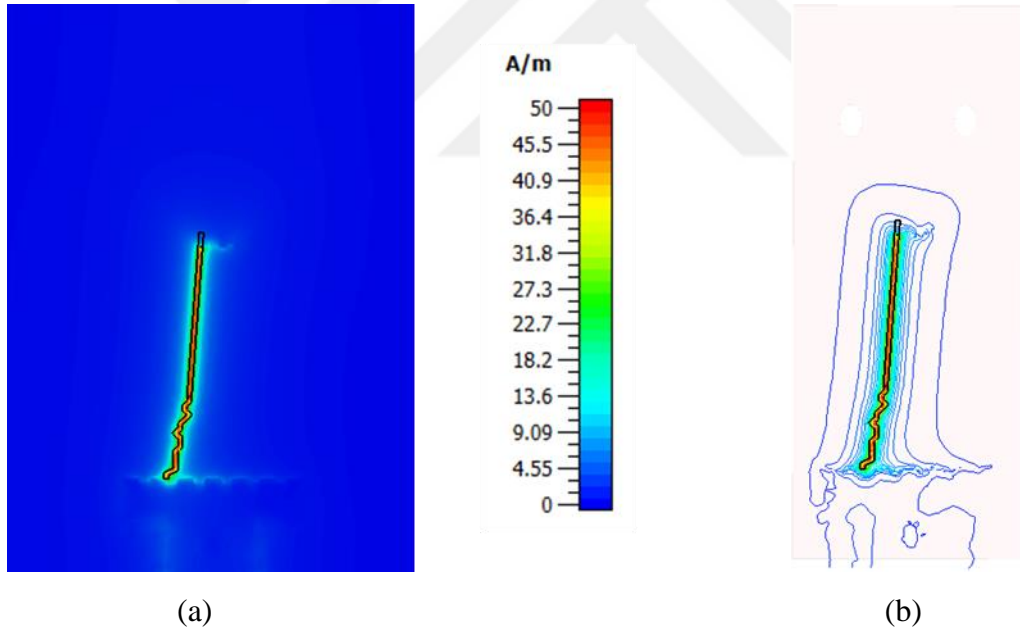
Çalışma kapsamında ilk olarak saf polyesterin elektriksel analizleri göz önüne alınmıştır. Bu amaçla Şekil 4.22’de verilen benzetim modeli oluşturulmuş ve numunenin bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı sırası ile $\epsilon_r = 4,53$ ve $\mu_r = 0,99$ olarak tanımlanmıştır. Simülasyonlar sonucu saf polyester üzerinde meydana gelen elektrik ve manyetik alan dağılımlarının 2D görseli ve isoline çizimi sırası ile Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te verilmiştir. Ayrıca elektrik ve manyetik alan dağılımlarının daha net görülebilmesi için renk skalalarının maksimum değerleri sırasıyla $1,2 \times 10^6$ V/m ve 50 A/m olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.22: Saf polyester numune yüzeyinde meydana gelen iz oluşumunun (a) görseli (b) benzetim modeli.



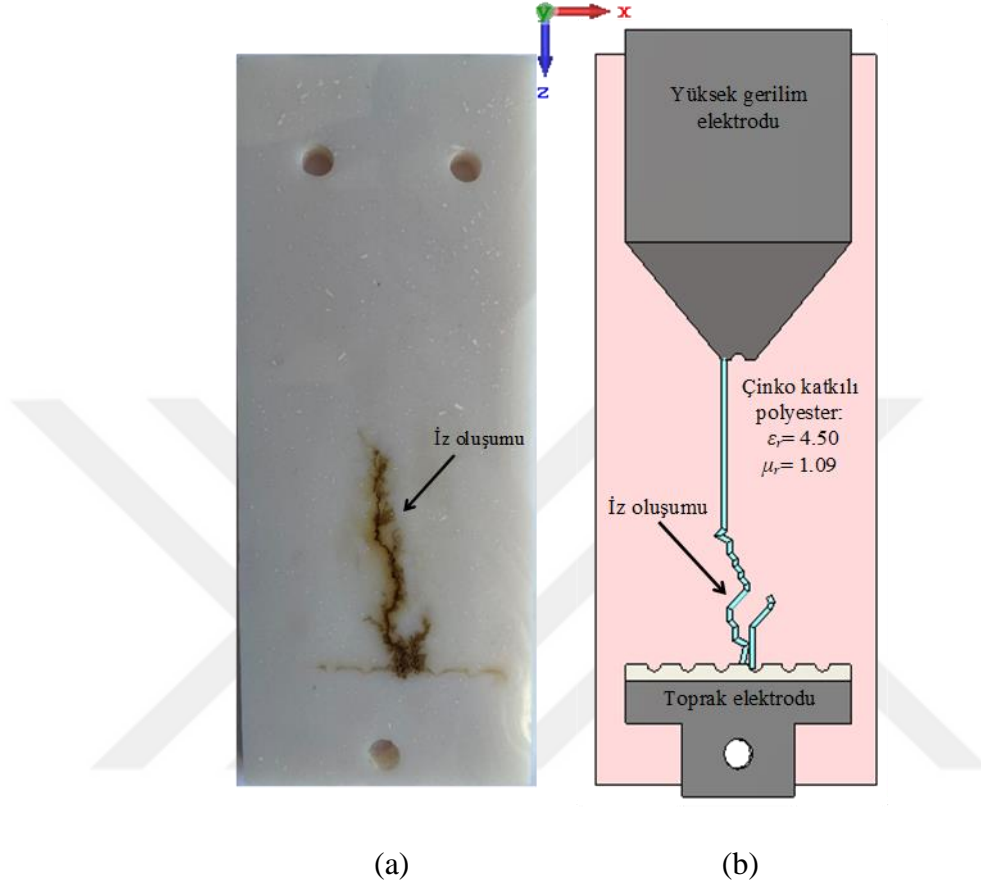
Şekil 4.23: Saf polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen elektrik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.



Şekil 4.24: Saf polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen manyetik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.

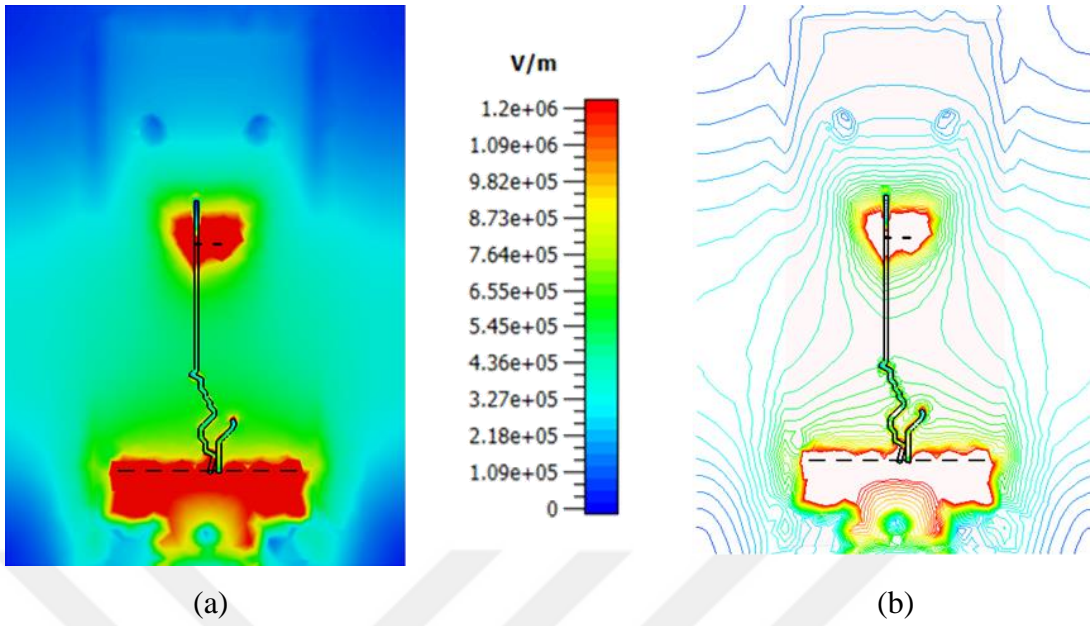
Çalışmanın devamında %3 çinko oksit katkılı polyester numune üzerinde deney sonucunda meydana gelen iz oluşumu benzetim modeli üzerinde de oluşturulmuş daha sonra numuneye ait bağlı dielektrik sabiti ve bağlı manyetik geçirgenlik katsayısı ölçüm sonuçlarının ortalaması olarak sırasıyla Tablo 3.4 ve Tablo 3.7.'de verildiği gibi $\epsilon_r = 4,50$ ve $\mu_r = 1,09$ şeklinde tanımlanmıştır. Deney sırasında numune üzerinde meydana gelen iz oluşumu ve bu iz

oluşumunun benzetim modelinin üzerinde tanımlanmış şeklinin görselleri sırasıyla Şekil 4.25(a) ve Şekil 4.25(b)'de verilmiştir.

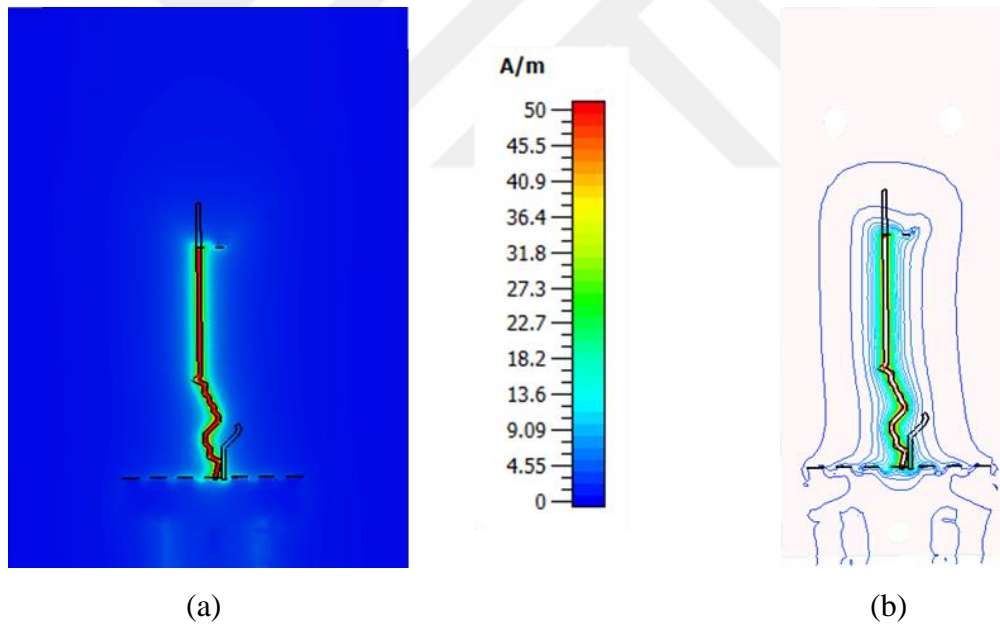


Şekil 4.25: %3 çinko oksit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen iz oluşumunun (a) görseli (b) benzetim modeli.

Elektriksel parametrelerin tanımlanmasının ardından gerçekleştirilen simülasyonlar sonucu %3 çinko oksit katkılı polyester numune üzerinde meydana gelen elektrik ve manyetik alan dağılımlarının 2D görseli ve isoline çizimi sırasıyla Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de verilmiştir.



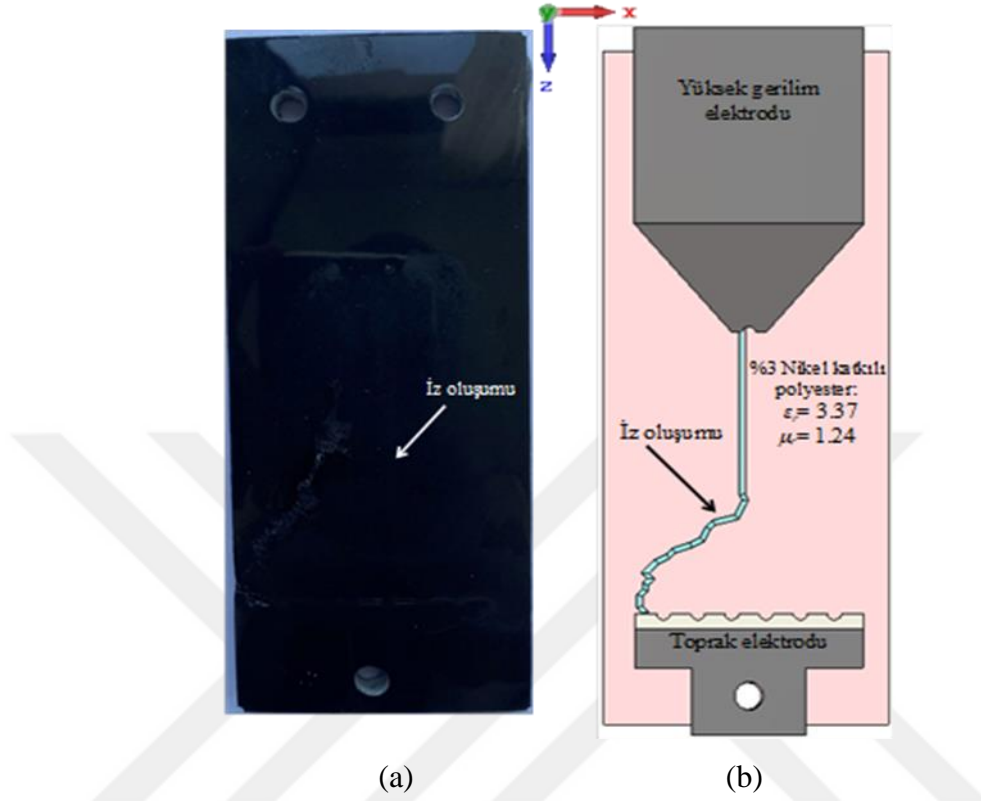
Şekil 4.26: %3 çinko oksit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen elektrik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.



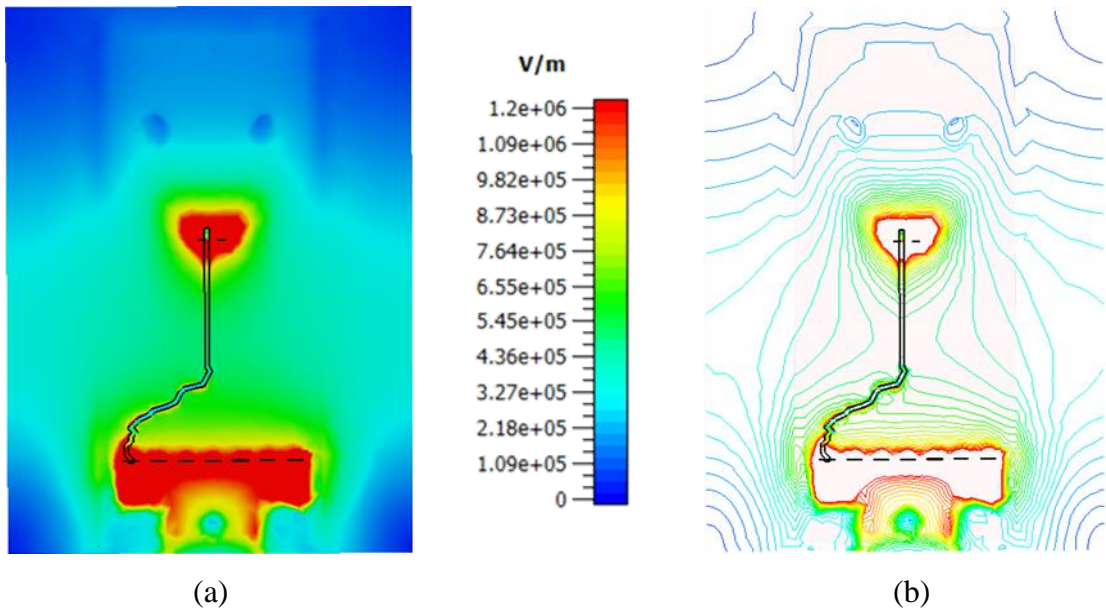
Şekil 4.27: %3 çinko oksit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen manyetik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.

Çalışmada 3. olarak Şekil 4.28 (b)'de olduğu gibi %3 nikel katkılı polyester numune üzerinde deney sırasında meydana gelen iz oluşumu benzetim modeli üzerinde oluşturulmuş ve numuneye ait bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı ölçüm sonuçlarının ortalaması olarak Tablo 3.4 ve Tablo 3.7.'de verildiği gibi sırasıyla $\epsilon_r = 3,37$ ve $\mu_r = 1,24$ şeklinde tanımlanmasının ardından simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda

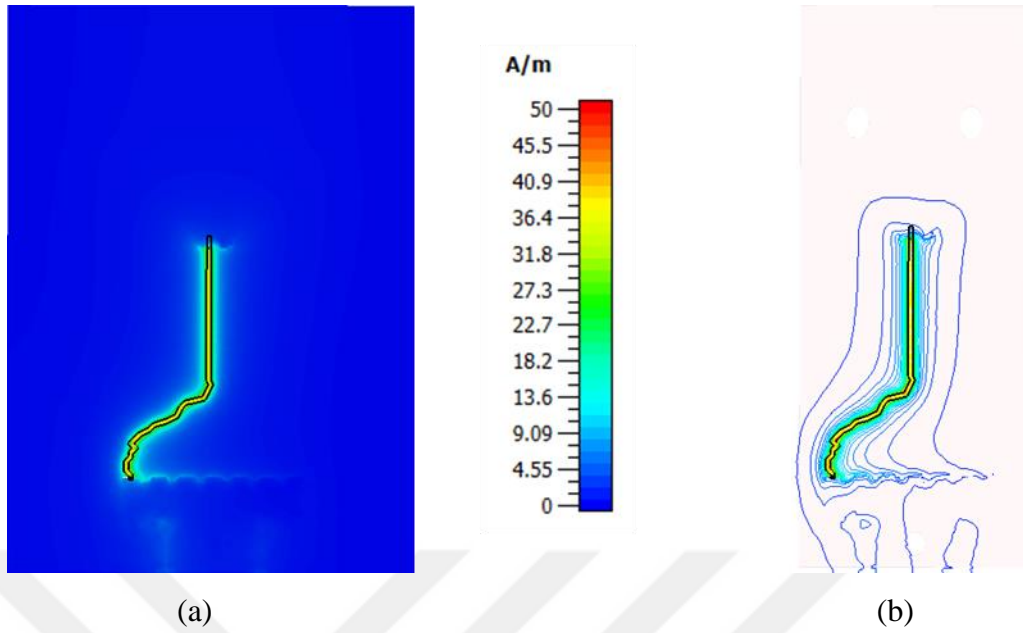
%3 nikel katkılı polyester numune üzerinde meydana gelen elektrik alan ve manyetik alan dağılımlarının 2D görseli ve isoline çizimi sırasıyla Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.28: %3 nikel katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen iz oluşumunun (a) görseli (b) benzetim modeli.

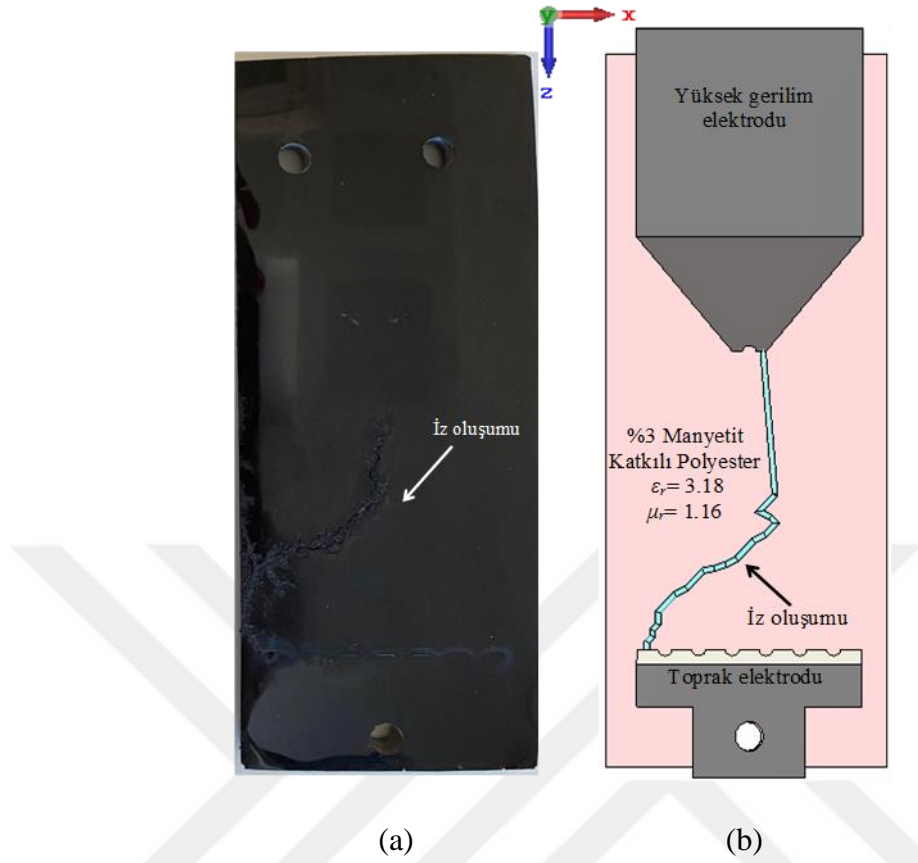


Şekil 4.29: %3 nikel katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen elektrik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.

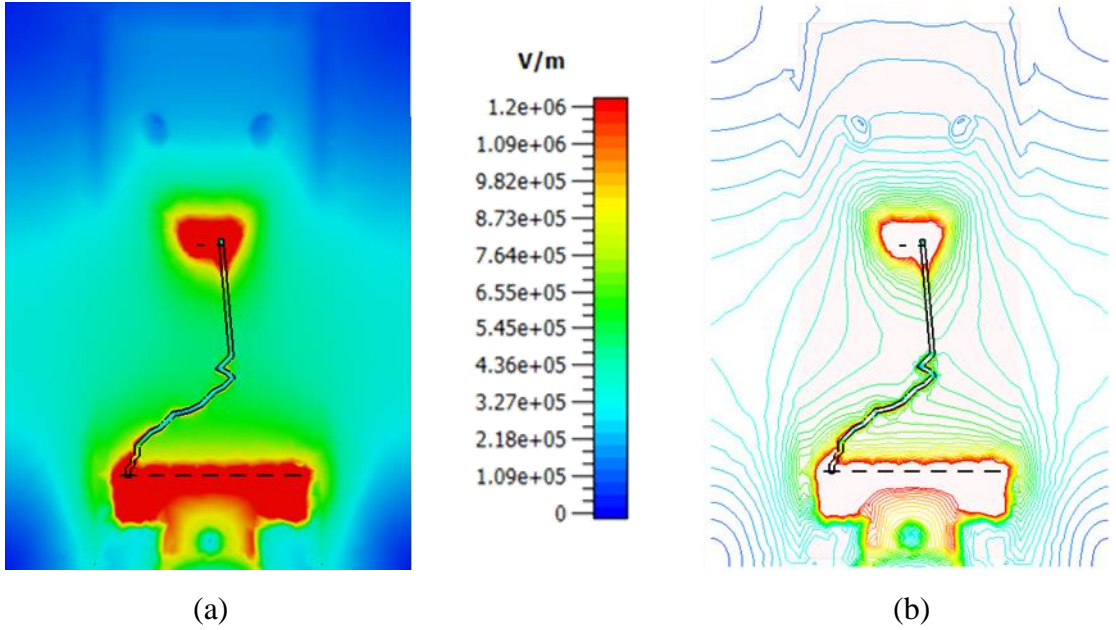


Şekil 4.30: %3 nikel katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen manyetik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi.

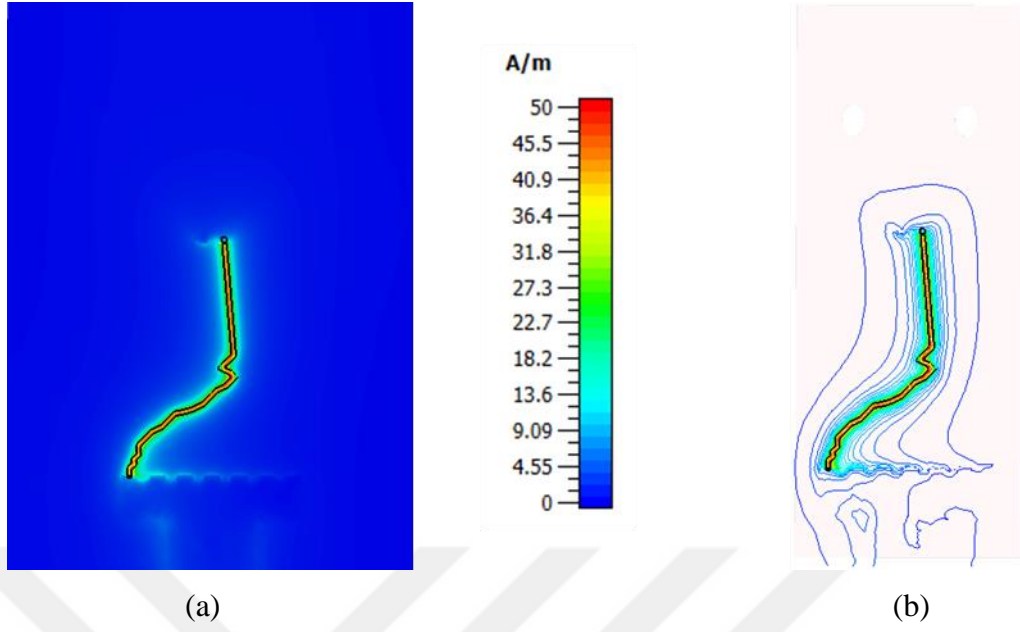
Çalışma kapsamında son olarak %3 manyetit katkılı polyester numunenin benzetim modeli üzerinde deney sırasında meydana gelen iz oluşumu oluşturulduktan sonra ölçüm sonuçlarının ortalaması olarak hesaplanan bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı tasarımı yapılan numuneye Tablo 3.4 ve Tablo 3.7’de verildiği gibi sırasıyla $\epsilon_r = 3,18$ ve $\mu_r = 1,16$ şeklinde tanımlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında numune üzerinde meydana gelen iz oluşumu ve iz oluşumunun benzetim modeli üzerinde oluşturulmuş şeklinin görselleri sırasıyla Şekil 4.31(a) ve Şekil 4.31(b)’de ve simülasyon sonucunda %3 manyetit katkılı polyester numune üzerinde meydana gelen elektrik alan ve manyetik alan dağılımının 2D görseli ve isoline çizimi sırasıyla Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’te verilmiştir.



Şekil 4.31: %3 manyetit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen iz oluşumunun (a) görseli (b) ağ yapısı



Şekil 4.32: %3 manyetit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen elektrik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi



Şekil 4.33: %3 manyetit katkılı polyester numunenin yüzeyinde meydana gelen manyetik alan dağılımının (a) 2D görseli ve (b) isoline çizimi

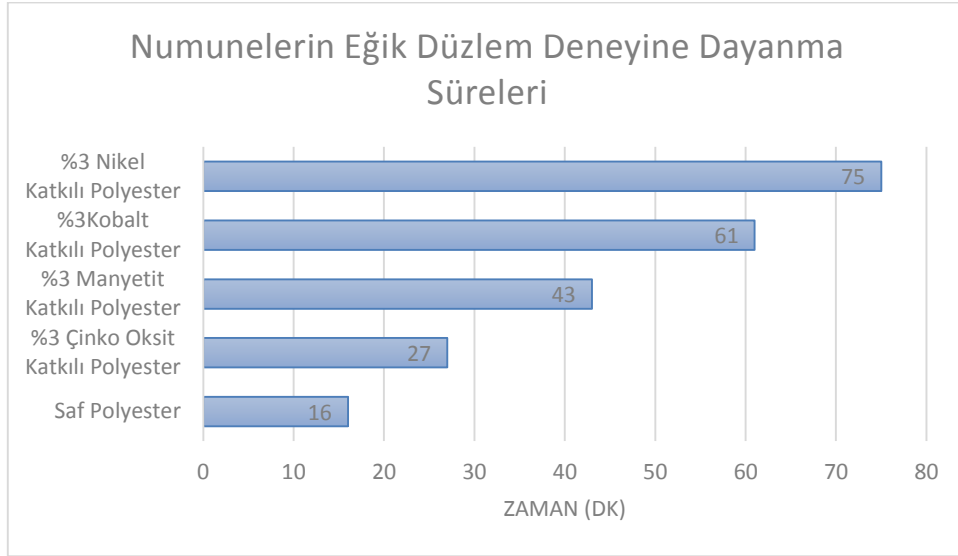
5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Elektrik endüstrisinde farklı özelliklere sahip yalıtım malzemelerine ihtiyaç duyulması yeni malzeme türleri arayışına neden olmuş daha sonra bu ihtiyacı karşılamak için tek başına kullanım alanı dar olan ancak farklı katkı maddeleri ile mevcut özellikleri değiştirilebilen polimerik yalıtkanlar tercih edilmeye başlanmıştır.

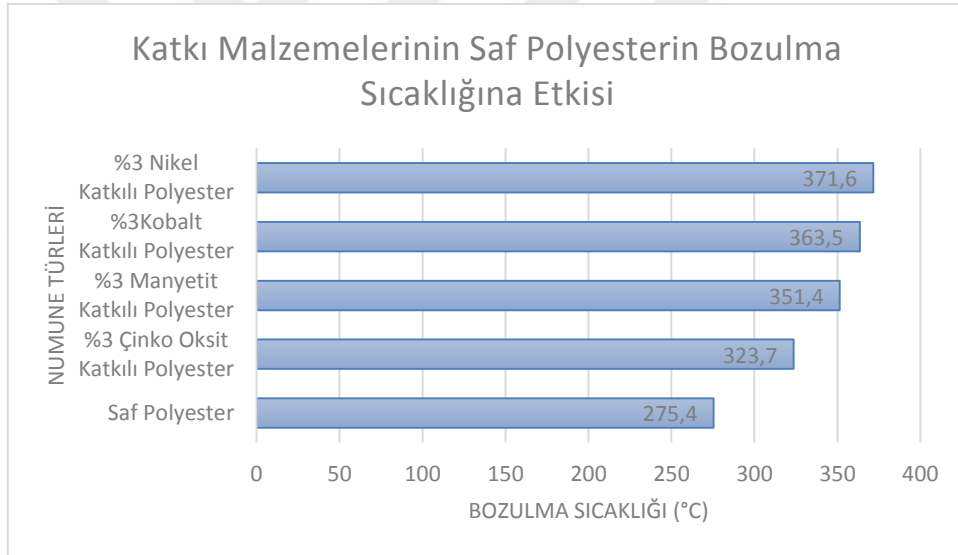
Bu tez çalışmasında çinko oksit, manyetit, kobalt ve nikel katkısının polyesterin elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Polyesterin elektriksel özelliklerinde meydana gelen değişim ASTM D2303 standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu bulunmuş ve deneysel çalışmalar sırasında numune üzerinden akan akım miktarı, direnç üzerinden gerilim seviyesi ölçülerek hesaplanmış, ayrıca katkılı polyesterlerin servis ömürleri de tespit edilmiştir.

Polyesterin içerisine her bir katkı maddesi türünden ağırlıkça %3 oranında ilave edilerek üretilen 5 numuneye eğik düzlem deneyi uygulanmış ve deneyin tamamlanmasının ardından Tablo 4.1’de her bir katkı maddesi türüne ait üretilen numunelerin bozulma sürelerinin ortalaması Şekil 5.1’de grafik haline getirilmiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi bütün katkı madde türleri saf polyesterin ömrünü artırırken nikelin, polyesterin servis ömrünü %344 artırarak en fazla etkiyi yaptığı görülmüştür.

Daha sonra üretilen beş numune arasından bir numune temsilci olarak seçilmiş ve seçilen katkısız polyester ile çinko oksit, kobalt, manyetit ve nikel katkılı polyester numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin görüntüleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.4, Şekil 4.7, Şekil 4.10 ve Şekil 4.13’te, bozulmaya başladıkları sıcaklığı gösteren termal kamera görüntüleri ise sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.6, Şekil 4.9, Şekil 4.12 ve Şekil 4.15’te verilmiştir. Numune üzerinde oluşan izler incelendiğinde oluşan izlerin derinliğinin ve genişliğinin bir birine yakın olduğu ancak termal kamera görüntüleri irdelendiğinde ilave edilen bütün katkı maddesi türlerinin saf polyesterin bozulmaya başladığı sıcaklığı artırdığı ve beklenildiği gibi en uzun sürede bozulan numunenin daha yüksek sıcaklıklarda bozulmaya başladığı görülmüştür. Numunelerin bozulmaya başladığı sıcaklığı gösteren grafik Şekil 5.2’de verilmiştir.



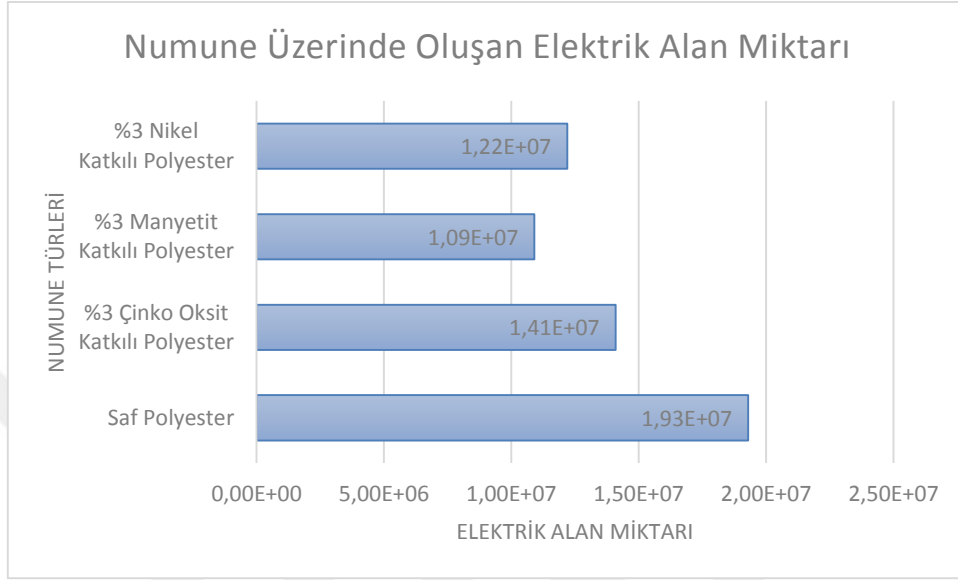
Şekil 5.1: Numunelerin eğik düzlem deneyine dayanma sürelerinin ortalaması



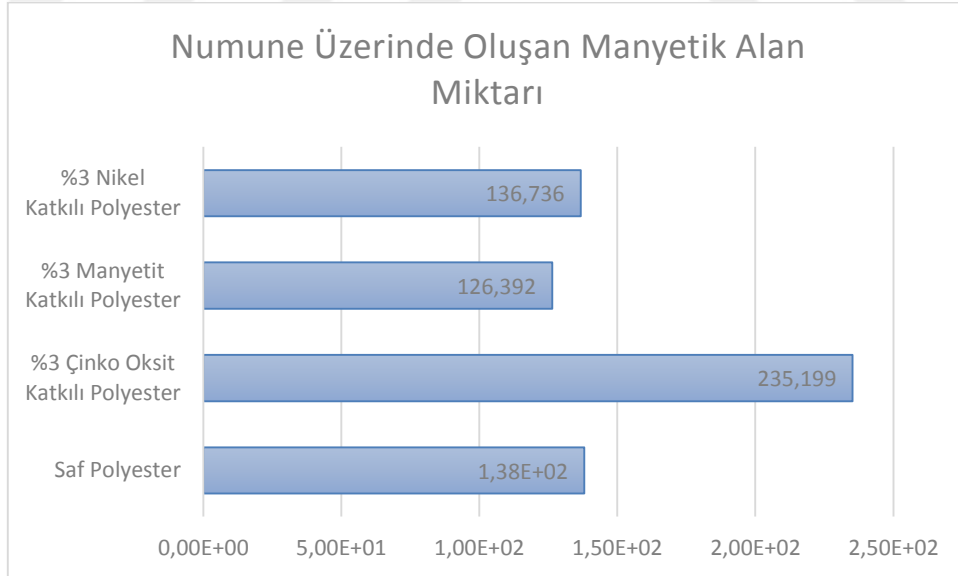
Şekil 5.2: Numunelerin bozulmaya başladığı sıcak değeri.

Deney sırasında numune üzerinde meydana gelen elektrik ve manyetik alan dağılımını CST programı ile simüle etmek amacıyla ilk olarak şebeke frekansında numunelerin bağlı dielektrik sabiti değerleri ile bağlı manyetik geçirgenlik katsayıları ölçülerek sonuçları sırasıyla Tablo 3.4 ve Tablo 3.7’de verilmiştir. Verilen tablolar analiz edildiğinde numunelerin bağlı dielektrik sabiti ve bağlı manyetik geçirgenlik katsayılarında %30’a varan değişimler meydana geldiği görülmüş ancak manyetik geçirgenlik katsayı değerlerinin küçük olması nedeniyle simülasyon sonuçlarında belirgin farklılıklar meydana gelmemiştir. Deney sırasında numune üzerinde elektrik alan en fazla elektrotların çevresinde oluşurken, manyetik alan ise en fazla elektrolit

çözeltinin izlediği yol üzerinde meydana gelmiştir. Deney sırasında numunelerin yüzeyinde oluşan elektrik ve manyetik alan dağılımlarının maksimum değerleri sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Deney sırasında V/m cinsinden numune üzerinde oluşan maksimum elektrik alan miktarı



Şekil 5.4: Deney sırasında A/m cinsinden numune üzerinde oluşan maksimum manyetik alan miktarı

Bu tez çalışmasının sonucunda elde edilen verilen daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında polyester türü ile içerisine ilave edilen hızlandırıcı ve sertleştirici miktarının katkı maddesi ile polyester arasında meydana gelen kimyasal bağı etkilediği için polyesterin

servis ömrünün değiştiği görölmüş ayrıca elektriksel iletkenliği ve manyetik geçirgenliği yüksek olan katkı maddesi türlerinin de polimerik yalıtkan yapımında kullanılabileceği öngörülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1]. Eroy, A., 2007, Elektriksel Yalıtım Sistemlerinde Kullanılan Polimerik İzolatörlere Bor Katkısı ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [2]. Gençoğlu, M. T., 2007, The Comparison of Ceramic and Non-ceramic Insulator, e-Journal of New World Sciences Academy, 2 (4), 274-294.
- [3]. Chrzan, K. L., 2009, Inclined Plane Test, Influence of Transformer Power, 24-28 August 2009 South Africa, South African Institute of Electrical Engineers
- [4]. Gubanski, S.M., (2005), Modern Outdoor Insulation—Concerns and Challenges, IEEE Electrical Insulation Magazine, 21(6) , 5-11.
- [5]. Tanaka, T., Montanari, G.C., Mühlaupt, R., 2004, Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation—Perspectives for processing technologies, material characterization and future applications, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 11(5), 763-784.
- [6]. İşlek, H. İ., 2020, Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları, <http://kompozithayalleri.com/kompozit-malzemelerin-kullanim-alanlari/>, [Ziyaret tarihi: 19.11.2020].
- [7]. Yan, W., Han, Z. J., Phung, B. T., Faupel, F., Ostrikov, K., 2014, High-Voltage Insulation Organic-Inorganic Nanocomposites by Plasma Polymerization, Materials, 7, 563-575.
- [8]. Takele, H., Schurmann, U., Greve, H., Paretkar, D., Zaporojtchenko, V., Faupel, F., 2006, Controlled growth of Au nanoparticles in co-evaporated metal/polymer composite films and their optical and electrical properties, Eur. Phys. J. Appl. Phys., 33, 83–89.
- [9]. Nelson, J.K., Hu, Y., 2005, Nanocomposite dielectrics—Properties and implications, J. Phys. D Appl. Phys., 38, 213–222.
- [10]. Gençoğlu, M. T., Cebeci, M., Halil, A., 2006, İzolatör Kaçak Akımlarının Ve Yüzeysel Atlama Gerilimlerinin Çevresel Faktörlere Bağımlılığı, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 22(1), 37-49.
- [11]. IEC 62039, 2007, Technical Report Selection guide for polymeric materials for outdoor use under HV stress.
- [12]. Standard test methods for liquid contaminant, inclined plane tracking and erosion of insulating materials, 2004, ASTM (D2303-97), 1-10.
- [13]. CST-Computer Simulation Technology, “CST Microwave Studio”, <https://www.cst.com>, [Ziyaret tarihi: 01.02.2021].

- [14]. Conductors and Insulators, <http://www.lon-capa.org/~mmp/kap18/RR440.htm> [Ziyaret tarihi: 27.12.2020]
- [15]. Electronic Projects Focus, What is an Insulating Material, Classification & Its Applications”, <https://www.elprocus.com/what-is-an-insulating-material-classification-its-applications/#:~:text=The%20solid%20insulating%20materials%20are,%2C%20nitrogen%2C%20and%20Sulphur%20hexafluoride,> [Ziyaret tarihi: 21.12.2020]
- [16]. Curtis, H. L., 1915, Insulating properties of solid dielectrics No. 234, US Government Printing Office.
- [17]. Standart test methods for DC resistance or conductance of insulating materials, 2021, ASTM (D257-14).
- [18]. Wilson, R. E., 1921, Humidity control by means of sulfuric acid solutions, with critical compilation of vapor pressure data, *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(4), 326-331.
- [19]. Hayley, K., Bentley, L. R., Gharibi, M., Nightingale, M., 2007, Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring., *Geophysical research letters*, 34(18).
- [20]. Kim, H. K., Shi, F. G., 2001, Thickness dependent dielectric strength of a low-permittivity dielectric film, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 8(2), 248-252.
- [21]. Yu, Y. P., 2012, Research Progress of Heat Hv Insulation Resistance of Macromolecular Composite Materials, In *Advanced Materials Research*, 391, 332-335.
- [22]. Groner, M. D., Elam, J.W., Fabreguette, F.H., George, S.M., 2002, Electrical characterization of thin Al₂O₃ films grown by atomic layer deposition on silicon and various metal substrates, *Elsevier*, 413, 186-197.
- [23]. The Engineering Tool Box, *Plastics - Thermal Conductivity Coefficients* https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-plastics-d_1786.html
- [24]. Hong, H., Kim, J. U., & Kim, T. I. (2017). Effective assembly of nano-ceramic materials for high and anisotropic thermal conductivity in a polymer composite. *Polymers*, 9(9), 413.
- [25]. Chaudhuria, S.P., Sarkara, P., Chakraborty A. K., 199, Electrical resistivity of porcelain in relation to constitution, *Elsevier*, 25(1), 91-99.
- [26]. Štubňa, I., Trník, A., Vozár, L., 2007, Thermomechanical analysis of quartz porcelain in temperature cycles, *Ceramics International*, 33(7), 1287-1291.
- [27]. Chaudhuri S. P., Sakar P., 1995, Constitution of porcelain before and after heat-treatment. Part I: Mineralogical composition, *Journal of the European Ceramic Society*, 15(10), 1031-1035.

- [28]. Chaudhuri S. P., Sakar P., 1996, Constitution of porcelain before and after heat-treatment. Part II: Aspect ratio and size-distribution of mullite, *Journal of the European Ceramic Society*, 16(8), 851-855.
- [29]. Dekker, M., 1991, *Ceramic Materials for Electronics; Processing, Properties, and Applications*, New York, ISBN 0-8247-8194-5
- [30]. Çetin, E., Özer, N. L., Çetin, M., 2005, Porselen izolatörlerde izolasyon problemleri, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 287-292.
- [31]. Meng, Y., Gong, G., Wu, Z., Yin, Z., Xie, Y., Liu, S., 2012, Fabrication and microstructure investigation of ultra-high-strength porcelain insulator, *Journal of the European Ceramic Society*, 32(12), 3043-3049.
- [32]. Dekker, M., 1991, *Ceramic Materials for Electronics; Processing, Properties, and Applications*, New York, ISBN 0-8247-8194-5
- [33]. Taherian, R., 2018, 7 Application of Polymer-Based Composites: Bipolar Plate of PEM Fuel Cells. *Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites: Experiments, Modelling, and Applications*, 183.
- [34]. Andersson, J., Gubanski, S.M., Hillborg, H., 2008, Properties of interfaces in silicone rubber, *IEEE Trans Dielectrics Electrical Insulation*, 14(1), 1360-1367.
- [35]. Gayar, A., Abdul-Malek, Z., El-Shami, I.F., 2014 Wind-Induced Clearances Infringement of Overhead Power Lines, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 6(4), 275-282.
- [36]. Merev, A., 1999, Polimerik Katı Yalıtkanlarda Yüzey Aşınımının Mekanik Etkenler Karşısındaki Değişimi , Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [37]. Majchrowski, R., Rozanski, L., Grochalski, K., 2015, The Surface 3d Parameters To Describe The Diffuse Reflective And Emissive Properties Of Selected Dielectrics, XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, 30 August – 4 September 2015, Prague, Czech Republic, 1268-1271.
- [38]. Nasrat, L., Ali, Z. M., Dardeer, M. M., Tawfiq, R., 2016, Mica Filler Effect on Electrical Characteristics of Polymer Insulators, *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 5(2), 168-172.
- [39]. Bram, M., Niewolak, L., Shah, N., Sebold, D., Buchkremer, H. P., 2011, Interaction of sealing material mica with interconnect steel for solid oxide fuel cells application at 600 C., *Journal of power sources*, 196(14), 5889-5896.
- [40]. Tomer, N., Maiti, N., 2010, Mechanical properties of mica-filled PBT/ABAS composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 672-681.
- [41]. Gallagher, T. J., Pearmain, A. J., 1984, *High Voltage Measurement, Testing and Design*, Wiley & Interscience, Bath, 978-0471900962

- [42]. Vahapoğlu, V., 2013, Kauçuk Türü Malzemeler: Sınıflandırma, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4 (1), 25-34.
- [43]. Özer, A., Altıncı, P., Can, G., 2010, Termoplastik Rezinler, ADO Klinik Bilimler Dergisi, 4(2), 558-563.
- [44]. Akram, M., Javed, A., Rızvi, T. Z., 2005, Dielectric Properties of Industrial Polymer Composite Materials, Turkish Journal of Physics, 29(6), 355-362.
- [45]. Ashok, J., Varaprasad, P. L. H., Birch, J. R., 1997, Polyethylene (C₂H₄)_n, In Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, 957-987.
- [46]. Raju, G. G., 2003, Dielectrics in Electric Field, 1st ed., Marcel Dekker, New York, 0-8247-0864-4.
- [47]. Malik, N. H., Al.Qureshi, A., Qureshi, M. I, 1998, Electrical Insulation in Power System, 1st ed, Marcel Dekker, New York, 0-8247-0106-2.
- [48]. Shugg, W. T., 1995, Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials, 2nd ed., IEEE Press, New York, 0-07-462286-2.
- [49]. Andjelkovic, D., & Rajakovic, N., 2001, Influence of accelerated aging on mechanical and structural properties of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, Electrical Engineering, 83(1), 83-87.
- [50]. Qiliang, Y., Dong, W., Xiaoqing, G., Yigang, L., Ping, C., 2000, Development of high voltage XLPE power cable system in China, In Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No. 00CH36347) 1, 247-253, IEEE.
- [51]. Wu, W., Steenland, K., Brown, D., Wells, V., Jones, J., Schulte, P., & Halperin, W., 1989, Cohort and case-control analyses of workers exposed to vinyl chloride: an update, Journal of occupational medicine.: official publication of the Industrial Medical Association, 31(6), 518-523.
- [52]. Kasal, A., Diler, H., Bayındır, F., Demirci, S., Kuşkun, T., 2013, Alternatif Panel Mobilya Malzemesi Olarak Polivinil Klorür (PVC) Levhaların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özellikler Açısından Geleneksel Malzemelerle Karşılaştırılması, Kastamonu Üni., Orman Fakültesi Dergisi, 13(2), 228-244.
- [53]. Ramesh, S., Arof, A. K., 2000, Electrical conductivity studies of polyvinyl chloride-based electrolytes with double salt system, Elsevier, 136, 1197-1200.
- [54]. Daware, K., Electrical Insulators - Insulating Materials And Different Types, https://www.electricaleasy.com/2016/11/electrical-insulators.html#:~:text=Some%20of%20the%20commonly%20used,glass%2C%20ceramic%2C%20porcelain%20etc.,https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/bulletin/11/nbsbulletinv11n3p359_A2b.pdf , [Ziyaret Tarihi: 03.06.2020].

- [55]. Kreuger, F. H., 1989, Partial discharge detection in high-voltage equipment, Butterworth-Heinemann.
- [56]. Min, D., Yan C., Huang Y., Li S., Ohki Y., 2017, Dielectric and Carrier Transport Properties of Silicone Rubber Degraded by Gamma Irradiation, *Polymers*, 9, 533-546.
- [57]. Wang, F. F., Yan, D. D., Su, Y., Lu, Y. F., Xia, X. F., Huang, H. M., 2017, Research on the dielectric properties of nano-zno/silicone rubber composites. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, September 2017, 231(1),
- [58]. Wu, X., Wang, Y., Xie, L., Yu, J., Liu, F., Jiang, P., 2012, Thermal and electrical properties of epoxy composites at high alumina loadings and various temperatures, *Iranian Polymer Journal*, 22(1), 61-73.
- [59]. Jilani, W., Mzabi. N., Gallot-Lavallée, O., Fourati, N., Zerrouki, R., Guermazi, H., 2015, Dielectric relaxations investigation of a synthesized epoxy resinpolymer, *The European Physical Journal Plus*, 130, 76-86.
- [60]. Milewski, J. V., 1979, *Hand book of Fibers and Reinforcement*, Van Norstrand Reinhold, New York.
- [61]. Akram, M., Javed, A., Rizvi, T. Z., 2006, Dielectric properties of industrial polymer composite materials, *Turkish Journal of Physics*, 29(6), 355-362.
- [62]. Uğur, M., 1997, *Modelling and analyss of surface tracking phenomena of solid insulating materials*, University of Manchester, Doktora Tezi.
- [63]. Sarathı, R., RAO, U. M., 2001, Investigation of surface modifications in ethylene Polypropylene Diene Monomer (EPDM Rubber due to tracking under AC and DC Voltage, *Bull. Matter. Sci. Indian Academy of Sciences*, 24(6), 587-593.
- [64]. Özkaya, M., 2008, Yüksek Gerilim Tekniği Statik Elektrik Alanı ve Boşalma Olayları, *Birsen Yayınevi, İstanbul*, 978-975-511-136-0.
- [65]. Csanyi, E., 2013, 15 hypothesis responsible for the aging of composite insulators, <https://electrical-engineering-portal.com/15-hypothesis-responsible-for-the-aging-of-composite-insulators>, [Ziyaret Tarihi: 07.07.2020]
- [66]. Danikas, M. G., 1993, The definitions used for partial discharge phenomena, *EI*, 28(6), 1075-1081.
- [67]. BSI, "IEC 60270 High voltage test techniques partial discharge measurements," 2001.
- [68]. Fidan, M., 2011, Harmoniklerden Kaynaklanan Gerilim Bozulmalarının Elektriksel Kısmi Boşalmalar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi.

- [69]. Kuffel, J., Kuffel, E., Zaengl, W. S., Yüksek Gerilim ;Mühendisliği Temelleri (Çeviri), Özşar, Ç., Bodur, A., TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Emo yayın no: EG/2008/4 348-353.
- [70]. Erdoğan, M. K., 2006, Katı Yalıtkanlarda Yüzeysel Boşalmanın İncelenmesi Ve Matematiksel Modelinin Çıkarılması, Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi.
- [71]. İlhan, S., 2005, Katı Yalıtkanlardaki Elektriksel Zorlanmalar ve Ömür Saptanması, Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi.
- [72]. Han, T., Du, B., Su, J., 2018, Electrical Tree Initiation and Growth in Silicone Rubber under Combined DC-Pulse Voltage, *Energies*, 11, 764-777.
- [73]. Benha University Faculty of Engineering at Shoubra Electrical Engineering Department 3rd year Electrical power High Voltage Engineering (1) 2014, E. M. S. <https://www.bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Electrical%20Engineering/3103/crs-8705/Files/BREAKDOWN%20in%20SOLID%20DIELECTRICS1.pdf>
- [74]. Jeon, Y., Hong, S., Kim, M., 2019, Effect of Filler Concentration on Tracking Resistance of ATH-Filled Silicone Rubber Nanocomposites, *Energies*, 12,
- [75]. Verma, A.R., Reddy, B.S., 2018, Tracking and Erosion Resistance of LSR and HTV Silicone Rubber Samples under Acid Rain Conditions, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25, 46–52.
- [76]. Powered by GlobalSpec Engineering360
<https://datasheets.globalspec.com/ps/5943/ASTMInternational/pg2+>
[ziyaret Tarihi: 02.01.2021]
- [77]. ASTM D3638-93, (Reapproved 1998). Standard Test Method for Comparative Tracking Index of Electrical Insulating Materials, American Society for Testing and Materials Standards, USA.
- [78]. Chrzan, K. L., 2009, Inclined Plane Test, Influence of Transformer Power 16th International Symposium on high Voltage Engineering, The sout African Institute Of Electrical Engineers
- [79]. Le Lay, F., & Gutierrez, J., 2000, Halogen Free Fire Retardant Composites For Naval Applications, In *FRC 2000–Composites for the Millennium*, 66-73.
- [80]. Ugur, M., Kuntman, A., Ersoy, A., 2003, A study on the ageing process for polyester resin using improved merel statistics. *Electrical Engineering*, 85(5), 283-288.
- [81]. Seifert, J. M., Bärsh, R., & Vosloo, W. L., 2008, Dimensioning of the housing profile of silicone rubber composite insulators for harsh marine pollution conditions, In *CIGRE Session*.
- [82]. Ugur, M., & Varlow, B. R., 1998, Analyzing and modeling the 2D surface tracking patterns of polymeric insulation materials, Weibul *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 5(6), 824-829.

[83]. Altan, T., 1987, Design and manufacture of dies and molds, CIRP Annals, 36(2), 455-462.

[84]. Matlab, S. (2012). Matlab. The MathWorks, Natick, MA.



EKLER

EK 1

Transformer Data Sheet		ETZU-1200 1.2kVA 230V / 60000V II0 Isolation Transformer		ELEKTRA	
Total Power (kVA)	1.20	Weight(kg)	15	Code	2204075120002
No of Phases	1	Winding Material	CU	Date	27.03.2020
Frequency(Hz)	50/60	Core Material	M330	1000-2000	2000-4000
Connection Type	II0	Standard	IEC 60076	±3	±4
Phase Shift	0	Tolerances	0.5-3	±0.2	
Voltages Primary Voltage (V) 230V Secondary Voltage (V) 6000V Secondary 2 Voltage(V) Turns Ratio 1:26.09		6-30 ±0.5 30-120 ±0.8 120-400 ±1.2 400-1000 ±2		http://www.elektra.com.tr ELEKTRA © 2020	
Primary Parameters Current (A) 5.12 No load Current (A) 0.94 Short Circuit Imp. (%) 5.42% Short Circuit Current (kA) 0.09 Inrush Current(kA/1pr) 15.39 Regulation(%) 7.80% Winding Resistance(mΩ) 1085.41		15 3-6 ±0.3 ISO 2768-c		ETZU-1200 1.2kVA 230V / 60000V II0 Isolation Transformer	
Secondary Parameters Sec1 Load Current(A) 0.19 No Load Voltage (V) 6096.00 Winding Resistance(mΩ) 946395.00		15 3-6 ±0.3 ISO 2768-c		ETZU-1200 1.2kVA 230V / 60000V II0 Isolation Transformer	
Sec2 Load Current(A) 0.19 No Load Voltage (V) 6096.00 Winding Resistance(mΩ) 946395.00		15 3-6 ±0.3 ISO 2768-c		ETZU-1200 1.2kVA 230V / 60000V II0 Isolation Transformer	
Losses No Load Losses (W) 24 Load Losses (W) 85 Losses at 25% Load (W) 30 Losses at 50% Load (W) 45 Losses at 75% Load (W) 72 Total Losses (W) 109 Efficiency (%) 90.7 Temperature Rise (K) 71		15 3-6 ±0.3 ISO 2768-c		ETZU-1200 1.2kVA 230V / 60000V II0 Isolation Transformer	
Other Parameters Isolation Class F (155°) Cooling ANAN / TA40°C / F Environmental C1/E0/F0 Protection Index IP00 Operation Mode Continuous		15 3-6 ±0.3 ISO 2768-c		ETZU-1200 1.2kVA 230V / 60000V II0 Isolation Transformer	

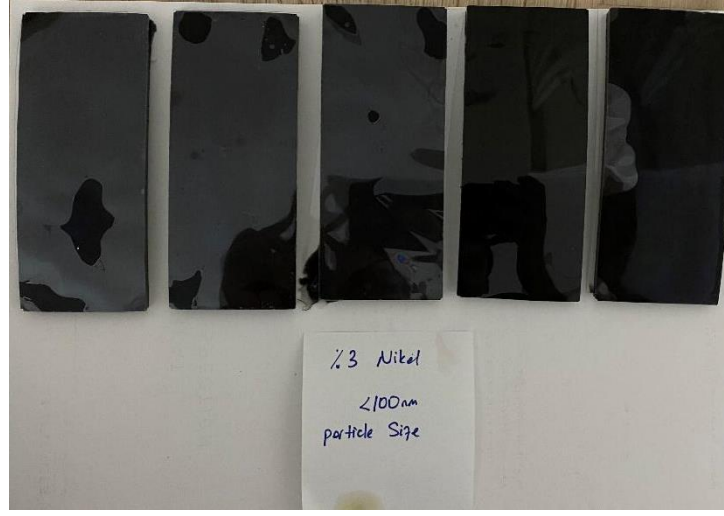
Şekil 1: Eğik Düzlem Testinde kullanılan trafonun teknik detayları



Şekil 3: Tanecik boyutu $150 \mu\text{m}$ 'den küçük olan %3 kobalt katkılı polyester numune

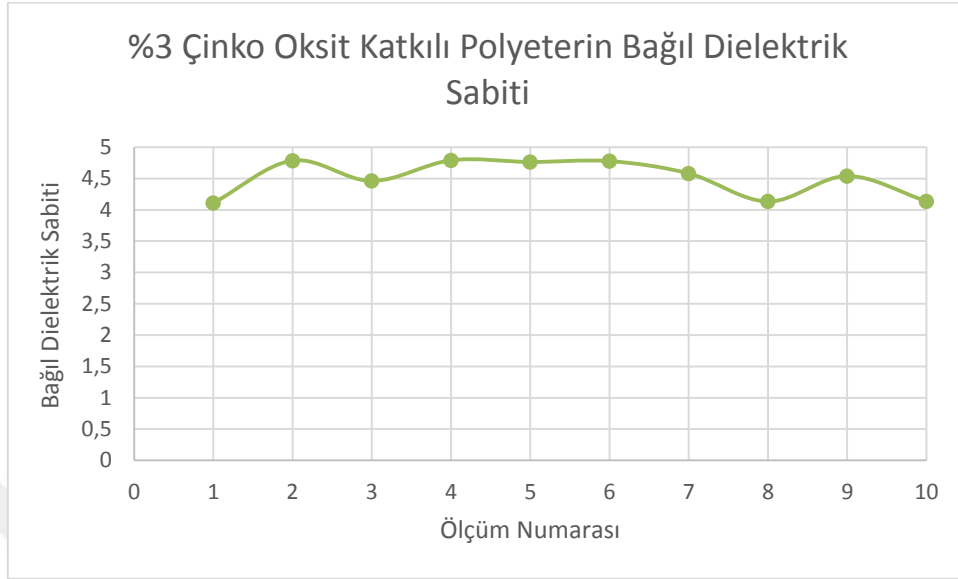


Şekil 4: Tanecik boyutu $5 \mu\text{m}$ 'den küçük olan %3 manyetit katkılı polyester numune

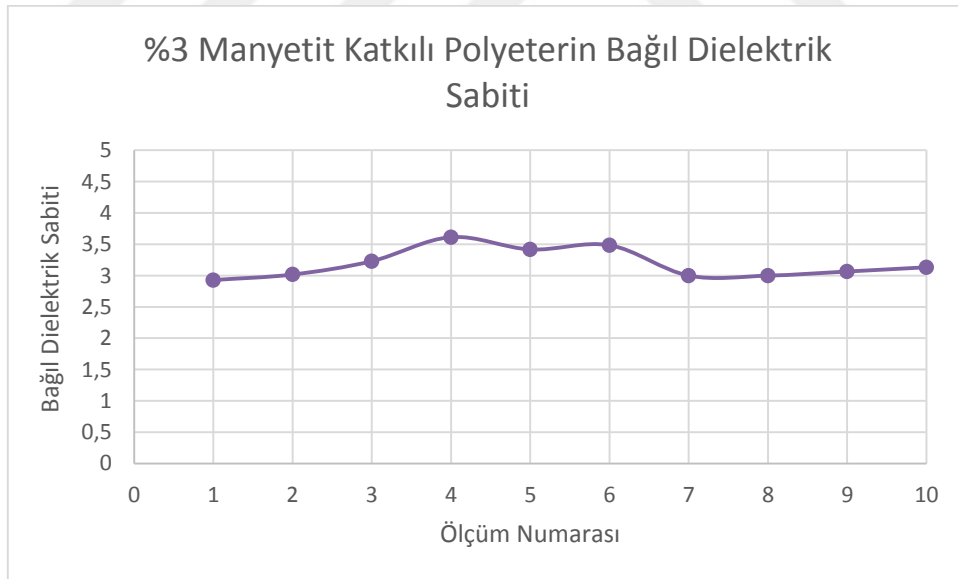


Şekil 5: Tanecik boyutu 100 nm'den küçük olan %3 nikel katkılı polyester numune

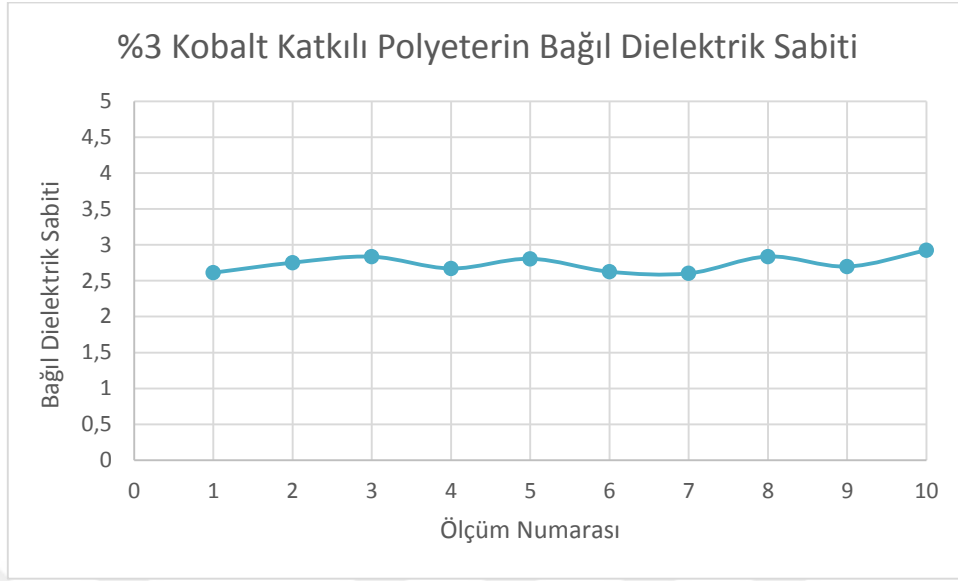
EK-3



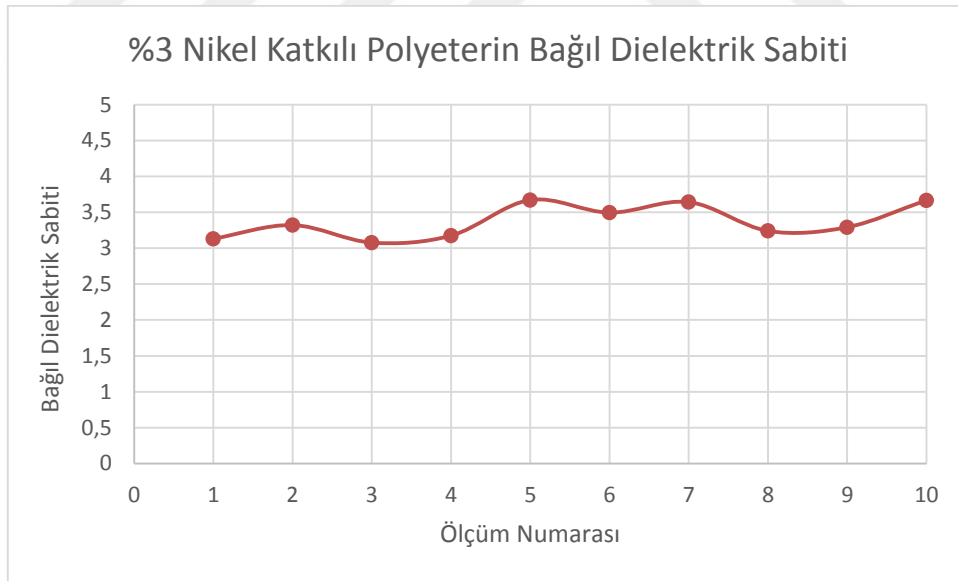
Şekil 1: %3 çinko oksit katkılı polyester numuneye ait hesaplanan bağlı dielektrik sabiti değerlerinin grafiği



Şekil 2: %3 manyetit katkılı polyester numuneye ait hesaplanan bağlı dielektrik sabiti değerlerinin grafiği



Şekil 3: %3 Kobalt katkıli polyester numuneye ait hesaplanan bağıl dielektrik sabiti değerlerinin grafiği



Şekil 4: %3 nikel katkıli polyester numuneye ait hesaplanan bağıl dielektrik sabiti değerlerinin grafiği