



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

YERALTI KABLO EKLERİNDE YÜZEYDE İZ OLUŞUMU
HATASININ İNCELENMESİ

Mehmet Murat İSPİRLİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Aysel ERSOY YILMAZ

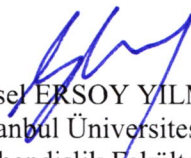
Mayıs, 2018

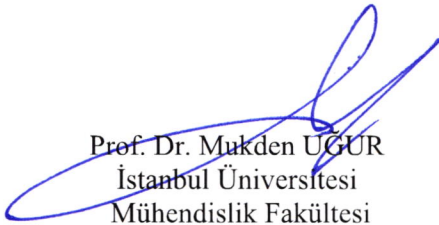
Uygundur.
[Signature]

İSTANBUL


Bu çalışma, 16.05.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Tez Jürisi


Dr. Öğr. Üyesi Aysel ERSOY YILMAZ (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Mukden UĞUR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Fırat KAÇAR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Nevra BAYHAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca gerek akademik gerekse hayat tecrübesi anlamında bana büyük katkıları olan ve hazırlamış olduğum bu tezi özen ve titizlikle takip eden saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Aysel ERSOY YILMAZ'a her şey için çok teşekkür ederim. Ayrıca bu tezin hazırlanma süresince, edinmiş olduğum bilgilere katkısı olan ve tez konum için tecrübelerini aktarmayı esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye teşekkür ederim. Bu tezin hazırlama aşamasındaki stresli ve yoğun zamanlarda bana destek olan ve hayatıma neşe katan biricik eşim Kübra İSPİRLİ'ye teşekkür ederim.

Son olarak, öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve bana her anlamda destek olan babam Abdullah İSPİRLİ ve annem Hafıza Kadriye İSPİRLİ'ye teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca, bana destek olan araştırma görevlisi olarak çalışmakta olduğum Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümündeki tüm öğretim elemanlarına ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Mayıs 2018

Mehmet Murat İSPİRLİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	4
2.1. POLİMER MALZEMELER	4
2.1.1. Poliüretan.....	6
2.1.2. Yeraltı kablo ekleri.....	8
2.2. ELEKTRİKSEL BOŞALMA.....	10
2.2.1.Elektriksel İz Oluşumu	10
2.2.2.Yüzeyde Elektriksel İz Oluşumu Mekanizması	11
2.3.YÜZEYSEL KİRLENME	13
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	17
3.1. YÜZEYDE İZ OLUŞUMU DENEY YÖNTEMLERİ.....	17
3.2. KARŞILAŞTIRMALI YÜZEYSEL BOŞALMA İNDEKSİ DENEY YÖNTEMİ	18
3.2.1. Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemi deney düzeneğinin hazırlanması	19
3.2.1.1. Elektrotlar.....	20
3.2.1.2. Deney çözeltisi ve Damlatma Cihazı	22
3.2.1.3. Deney Devresi.....	22
3.2.1.4. TPU Deney Numunelerinin hazırlanması.....	27
3.2.2. Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi Deneyinin Uygulanma Prosedürü	28
3.3. YİNELEME HARİTALARI ANALİZİ.....	30
3.3.1. Yineleme Haritalarının Nicel Analizi.....	35
3.3.2. Literatürde Kaçak Akım Verilerinin Analizinde RP Kullanımı	37
4. BULGULAR.....	40

4.1. KARŞILAŞTIRMALI YÜZEYSEL BOŞALMA İNDEKSİ (CTI) DENEY SONUÇLARI.....	40
4.2. KAÇAK AKIM VERİLERİNİN YİNELEME HARİTALARI YÖNTEMİ İLE ANALİZİ.....	56
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	67
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	78



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Üretan monomerinin kimyasal yapısı (Kind, 1985).	6
Şekil 2.2: Alçak gerilim kablolarında kullanılan ek mufları a) Düz tip (Ketenci, 2008a) b) Y tipi (Ketenci, 2008b) c) T tipi (Ketenci, 2008c).....	9
Şekil 2.3: Polimer yüzeyinde oluşan bir iz (İspirli, 2016).	11
Şekil 2.4: Yalıtım yüzeyinde iz oluşumu süreci a) Malzeme yüzeyinde iletken tabakanın oluşumu; b) Elektrolitin buharlaşmaya başlaması; c) Kuru-bant oluşumu sonucu oluşan yüzeysel boşalmalar; d) Malzeme yüzeyinin yanmanın gerçekleşmesi ve yüzeyin karbonlaşmaya başlaması; e) Karbonlaşmasının artması ve yayılması; f) Malzeme yüzeyinin delinmesi (Da Silva, 2016).	13
Şekil 2.5: Yüzeyi kirli izolatör zinciri (Çetin, 2005).	14
Şekil 3.1: Deneyde kullanılan bakır elektrotların boyutları.	20
Şekil 3.2: Deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeni.	21
Şekil 3.3: Deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeninin bir fotoğrafı.	21
Şekil 3.4: ASTM D5288 standardında verilen elektriksel deney devresi (ASTM D5288-14, 2014).....	24
Şekil 3.5: İstanbul Üniversitesi YG Laboratuvarında kurulan deney düzeneğinin blok şeması.	24
Şekil 3.6: İstanbul Üniversitesi YG Laboratuvarında kurulan CTI deney düzeneği.	25
Şekil 3.7: Enerji analizörünün deney düzeneğine bağlantısı.	26
Şekil 3.8: Deneyler sırasında alınan ölçümlerden bir fotoğraf.	26
Şekil 3.9: Laboratuvar şartlarında hazırlanan numune.	28
Şekil 3.10: Analitik terazi ile deney sonrası numune ağırlık ölçümü.	30
Şekil 3.11: a) Sinüsoidal zaman serisinin yineleme haritası b) Sinüzoidal zaman serisi.....	34
Şekil 3.12: a) Sinüsoidal zaman serisinin ortak bilgi fonksiyonu değeri b) Sinüs zaman serisinin yanlış en yakın komşular yöntemine göre hesaplanan değeri.....	35
Şekil 4.1: 600 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları a) Numune 1; b) Numune 2; c) Numune 3; d) Numune 4; e) Numune 5.....	41

Şekil 4.2: 600 V gerilim değerinde numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları.....	41
Şekil 4.3: 600 V gerilim değerinde numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları.....	42
Şekil 4.4: 600 V gerilim değerinde numune yüzeyinden 2 s boyunca 0.5 A ve üzeri akımın aktığı damla sayıları.	43
Şekil 4.5: 600 V gerilim değerinde numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları.	44
Şekil 4.6: 500 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları a) Numune 1; b) Numune 2; c) Numune 3 d) Numune 4; e) Numune 5.....	45
Şekil 4.7: 500 V gerilim değerinde numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayısı.	45
Şekil 4.8: 500 V gerilim değerinde numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları.....	46
Şekil 4.9: 500 V gerilim değerinde numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları.	47
Şekil 4.10: 400 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları a) Numune 1; b) Numune 2; c) Numune 3; d) Numune 4; e) Numune 5.....	48
Şekil 4.11: 400 V gerilim değerinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları.....	48
Şekil 4.12: 400 V gerilim değerinde numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları.....	49
Şekil 4.13: 400 V gerilim değerinde numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları.	50
Şekil 4.14: 300 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları a) Numune 1; b) Numune 2; c) Numune 3; d) Numune 4; e) Numune 5.....	51
Şekil 4.15: 300 V gerilim değerinde numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları.....	51
Şekil 4.16: 300 V gerilim değerinde numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları.....	52
Şekil 4.17: 300 V gerilim değerinde numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları.	53
Şekil 4.18: Farklı gerilim seviyeleri için karbonlaşmanın başladığı damla sayılarının ortalamaları.....	54

Şekil 4.19: Farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayılarının ortalamaları.....	55
Şekil 4.20: Farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıplarının ortalamaları.....	56
Şekil 4.21: a) Sinyalin temel bileşen çıkarılmadan önceki yineleme haritası; b) Sinyalin temel bileşen çıkarıldıktan sonraki yineleme haritası.....	58
Şekil 4.22: Numune yüzeyinde karbonlaşmanın gözlemlendiği damladan sonraki 2 saniyelik zaman aralığının kaçak akım verisi ve bu işaretin yineleme haritası a) 600 V; b) 500 V; c) 400 V; d) 300 V.....	62
Şekil 4.23: a) 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinin yineleme haritasının yineleme oranı; b) 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinin yineleme haritasının belirlenim oranı.....	63
Şekil 4.24: Numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluştuğundan 20 damla sonraki 2 saniyelik zaman aralığının kaçak akım verisi ve bu işaretin yineleme haritası a) 600 V; b) 500 V; c) 400 V; d) 300 V.....	65
Şekil 4.25: a) 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinin yineleme haritasının yineleme oranı; b) 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinin yineleme haritasının belirlenim oranı.....	66

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Poliüretanın yıllara göre başlıca kullanım alanları (ISOPA, 2017).	6
Tablo 4.1: Farklı gerilim seviyeleri için yüzeyde karbonlaşma başladıktan sonraki kaçak akımlara ait gecikme zamanı ve gömme boyutu değerleri.....	60
Tablo 4.2: Farklı gerilim seviyeleri için yüzeyde sürekli boşalmalar başladıktan sonraki kaçak akımlara ait gecikme zamanı ve gömme boyutu değerleri.....	60



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
ρ	: Özdirenç
φ	: $u(i)$, zaman serisi
τ	: Gecikme zamanı
Ψ	: $u(i+\tau)$, zaman serisinin gecikmiş hali
$p_{\varphi,\Psi}(\tau)$: Bileşik olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu
p_{φ}	: p_{u_i} , zaman serisinin olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu
p_{Ψ}	: $p_{u_{i+\tau}}$, zaman serisinin gecikmiş halinin olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu
σ	: Standart sapma
σ_1	: Birinci zaman serisinin standart sapması
σ_n	: n. zaman serisinin standart sapması
n	: Zaman serisi sayısı
ε	: Önceden tanımlanan bir eşik değeri
$\ \cdot \ $: Maksimum, Öklid ya da Manhattan normu
kV	: kiloVolt
eV	: Elektronvolt
kHz	: kiloHertz
$\mathbf{x}(i)$: Zaman serisi
$\mathbf{X}_{(i)}$: Gömme vektör
m	: Gömme boyutu
N	: Zaman serisinden oluşturulan $\mathbf{X}_{(i)}$ vektörlerinin sayısı
$I(\mathbf{x})$: Ortak bilgi fonksiyonu
$P(l)$: Diyagonal çizgilerin uzunluklarının frekans dağılımı
l	: Diyagonal çizgilerin uzunluğu
M	: Zaman serisinden oluşturulan $\mathbf{X}_{(i)}$ vektörlerinin sayısı
$\mathbf{H}(\mathbf{x})$: Birim basamak fonksiyonu (Heaviside fonksiyonu)

Kısaltmalar	Açıklama
AC	: Alternatif Akım
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
CTI	: Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi (Comparative tracking index)
DC	: Doğru Akım
DET	: Belirlenim oranı (Determinizm)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
GFRP	: Cam fiber ile desteklenmiş plastik (Glass fiber reinforced polymer)
HVDC	: Yüksek Gerilim Doğru Akım
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
MgO	: Magnezyum Oksit
NaCl	: Sodyum Klorür
NH₄Cl	: Amonyum Klorür
PA	: Poliamid (Polyamide)
PBN	: Polibütülen naftalat (Polybutylene naphthalate)
PBT	: Polibütülen tereftalat (Polybutylene terephthalate)
PE	: Polietilen (Polyethylene)
PET	: Polietilen tereftalat (Polyethylene terephthalate)
PP	: Polipropilen (Polypropylene)
PU	: Poliüretan (Polyurethane)
PVC	: Polivinil klorür (Polyvinyl chloride)
REC	: Yineleme yüzdesi (Recurrence percent)
RP	: Yineleme haritası (Recurrence plot)
RQA	: Yineleme haritasının nicel analizi (Recurrence quantification analysis)
RR	: Yineleme oranı (Recurrence rate)
TPU	: Termoplastik Poliüretan (Termoplastic polyurethane)
UPE	: Doymamış polyester (Unsaturated polyester)
XLPE	: Çapraz bağlı polietilen (Cross-linked polyethylene)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YERALTI KABLO EKLERİNDE YÜZEYDE İZ OLUŞUMU HATASININ İNCELENMESİ

Mehmet Murat İSPİRLİ

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Aysel ERSOY YILMAZ

Üretim yöntemlerinin gelişmesiyle beraber, polimerler elektriksel yalıtımı sağlamak amacıyla elektrik-elektronik sektöründe yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Elektriksel yalıtım elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinin sürekliliği için çok önemli bir role sahiptir. Polimerler, üretim, erişim ve maliyet konularında önemli bir avantaja sahip olmalarına rağmen nemli ve kirli şartlar altında yüzeyde iz oluşumuna yatkındırlar. Yalıtım sistemlerinde kullanılan polimerlerin nemli ve kirli şartlar altındaki yüzeyde iz oluşumu direncini belirlemek için bazı standartlar mevcuttur. Bunlardan birisi karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemidir. Bu deney yöntemi ASTM D5288, ASTM D3638 ve IEC 60112 standartlarında yer almaktadır.

Kablo ekleri, yalıtım malzemesi ile kablo iletkeni arasındaki ara yüzeyde bulunmasından dolayı, yeraltı enerji iletim sistemlerinin en zayıf kısmıdır. Ticari olarak üretilen enerji kablolarının sonlu uzunlukta üretilmesi sebebiyle, bir yeraltı enerji iletim hattında kablo ekleri sıklıkla kullanılmaktadır. Yeraltı kabloları ağır çalışma şartlarında (toz, kir, nem gibi) hizmet vermektedirler. Bu sebeple, yeraltı kablolarının bağlantı noktalarında kullanılan polimerlerin iz oluşumu direncinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın ilk kısmında, alçak gerilim yeraltı kablo eklerinde dolgu malzemesi olarak kullanılan PU bazlı dolgu malzemesinden laboratuvar şartlarında vakum ortamında eşdeğer numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler, İstanbul Üniversitesi Yüksek Gerilim

Laboratuvarında ASTM D5288 standardına göre kurulan CTI deney düzeneğinde denenmiştir. Hazırlanan numunelerin ağırlıkları, deneyden önce ve deneyden sonra 0.1 mg hassasiyetine sahip analog terazi ile ölçülmüştür. Numuneler hazırlanan deney düzeneğinde 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilimler altında denenmiş ve deneyin güvenilirliğinin sağlanması için her gerilim seviyesinde deneyler 5 kez tekrarlanmıştır. Numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayısı, numune yüzeyinde sürekli boşalmaların oluşmaya başladığı damla sayısı ve numune yüzeyinden 2 s boyunca 0.5 A ve üstü akımın aktığı damla sayısı deneyler sırasında not edilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında, deneyler sırasında numune yüzeyinden kaydedilen kaçak akımlar, lineer olmayan zaman serilerinin analizinde sıklıkla kullanılan yineleme haritaları yöntemi ile analiz edilmiştir. Daha sonra, bu analizler sonucunda elde edilen yineleme haritalarının nicel analizleri yapılmıştır. Bu analizler, numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damlanın buharlaşması ve numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluşmaya başladıktan sonraki 20. damlanın buharlaşması durumları için yapılmıştır. Yineleme haritaları yöntemi ve yineleme haritalarının nicel analizi ile yineleme haritaları (RP), yineleme oranı (RR) ve belirlenim oranı (DET) elde edilmiştir. Elde edilen bulgular ile numunelerin iz oluşumu performansı değerlendirilmiştir. Numunelere uygulanan gerilim seviyesinin artmasıyla yineleme nokta yoğunluğu, yineleme oranı (RR) ve belirlenim (DET) azalmıştır.

Bu çalışmada, bir yeraltı kablo eki dolgu malzemesi olan PU numunelerin yüzeyde iz oluşumu performansı değerlendirilmiştir. Deneyler sonrasında, uygulanan gerilim seviyesinin artması ile numunelerin ağırlık kaybı, numune yüzeyinde oluşan izin boyut ve derinliği artmıştır. Deneyler sırasında yalnızca 600 V gerilim altında yapılan deneylerde numune yüzeyinden 2 s boyunca 0.5 A ve üzeri akım akmıştır.

Mayıs 2018, 95 sayfa.

Anahtar kelimeler: Kablo ekleri, Yüzeyde iz oluşumu, Elektriksel bozulma, Yineleme haritaları yöntemi, Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi

SUMMARY

M.Sc. THESIS

AN INVESTIGATION OF SURFACE TRACKING FAILURE IN UNDERGROUND CABLE JOINTS

Mehmet Murat ISPIRLI

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Name of Department

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ

Polymers have started to be widely used in the electrical-electronics sector with the development of manufacturing methods in order to provide electrical insulation. Electrical insulation has a very important role for sustainability of electrical distribution and transmission systems. Even though polymers have important advantages in manufacture, access, and cost issues, they prone to surface tracking under the humid and the dirty conditions. There are standards for determining the surface tracking resistance of the polymers used in insulation systems under the humid and dirty conditions. One of them is comparative tracking index test method. This method takes places in ASTM D5288, ASTM D3638 ve IEC 60112 standards.

Cable joints are the weakest part of underground energy transmission systems, due to the presence at the interface between the insulation material and the cable conductor. Because commercial energy cables are produced in a finite length, cable joints are frequently used in an underground energy transmission line. Underground cables are served under the heavy service conditions (dust, dirt, humidity etc.). So, tracking resistance of polymers used in joint points of underground cables need to be determined.

In the first section of the study, equivalent specimens were prepared under vacuum conditions in laboratory conditions from PU based filling material used as filler material in low voltage underground cable joints. Prepared specimens were tested in established CTI test setup

according to ASTM D5288 test standard in İstanbul University High Voltage Technique Laboratory. The weights of the prepared samples were measured with an analogue balance of 0.1 mg before and after experiment. Specimens were tested in prepared test setup under 600 V, 500 V, 400 V and 300 V voltages and experiments were repeated 5 times at each voltage level for provided reliability of experiments. Number of drops the beginning of carbonization on the sample surface, number of drops the permanent discharges begin to occur on the sample surface and the number of drops current flowing 0.5 A and over for 2 s from the sample surface were noted during the experiments.

In the second section of the study, leakage currents recorded from sample surface during the experiments were analyzed with recurrence plot method, which used frequently in non-linear times series analysis. Later, quantification analysis of recurrence plots obtained as a result of these analyses was made. These analyses were performed for evaporation of drop the beginning of carbonization on the sample surface and evaporation of 20th drop after the permanent discharges begin to flow on the sample surface situations. Recurrence plots (RPs), recurrence rate (RR), determinism (DET) were obtained with recurrence plot (RP) method and recurrence quantification analysis (RQA). Tracking performance of samples was evaluated with these obtained results. Recurrence points density, recurrence rate (RR) and determinism were decreased with increasing applied voltage level to the specimens.

In this study, tracking performance of PU samples, which were used as underground cable joint filling material, was evaluated. After the experiments, weight loss of samples, tracking size, and depth on the surface of the sample was increased with increasing applied voltage level. During the experiments, 0.5 A and over for 2 s from the sample surface flowed only under the 600 V voltage.

May 2018, 95 pages.

Keywords: Cable joints, Surface tracking, Electrical degradation, Recurrence plot method, Comparative tracking index

1. GİRİŞ

Enerji iletim hatlarında yeraltı enerji iletim sistemleri, giderek popülerliğini ve yaygınlığını artırmaktadır. Bunun nedenleri arasında su altı geçişleri gibi bazı yerlerde havai hat ile enerji iletiminin yapılamaması, havai hatların görüntü kirliliği oluşturması, yüksek binaların inşa edilmesi ve yeraltı kablolarının kötü hava koşullarından daha az etkilenmesi gibi sebepler yer almaktadır. Yeraltı kabloları su ağacı oluşumu, hayvanların ısırması ve kemirmesi, döşendiği toprak üzerinden ağır taşıtların geçmesi gibi çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Ayrıca yeraltı enerji sistemlerinde kullanılan kablolar servis koşullarında nemli ve kirli şartlara maruz kalmaktadır. Kirli ve nemli koşullar altında bulunan organik yalıtım malzemelerinin elektriksel zorlanmaya maruz kalmasıyla yalıtım yüzeyinden kaçak akımlar akması sonucu yüzeysel boşalmalar meydana gelir. Bu yüzeysel boşalmalar, yalıtım yüzeyinde karbonize iletken yolların oluşmasına sebep olur. Bu olay iz oluşumu hatası olarak isimlendirilen dielektriksel bir bozulma olayıdır. Yeraltı kablolarının üretim, kurulum ve bakım maliyetleri havai hatlara göre çok daha yüksektir (Al-Saud, 2012). Bu sebeplerle yeraltı kabloları yüksek çekme dayanımına, yüksek basınca, su emmeye ve iz oluşumuna karşı dayanıklı üretilmelidir.

Don Francisco Salva 1975 yılında Barcelona Academy of Science'da sunmuş olduğu çalışmada telgraflar için yeraltı iletim kablo sistemlerinin kullanımının mümkün olabileceğini belirtmiştir. Bu çalışmanın sonucunda Madrid ile Aranjuez şehirleri arasında 26 mil uzunluğunda bir yeraltı kablo sistemi oluşturulmuştur (Black, 1983). Francis Roland'ın 1816 yılında yapmış olduğu deney, yeraltı kablosu kullanarak 152.4 m (500 feet) uzunluğa sahip bir telgraf sistemi aracılığıyla gerçekleştirilen ilk yeraltı iletim sistemi deneylerinden biridir (Thue, 2012). Amerika'nın Winconsin eyaletinde ilk olarak 1927 yılında 132 kV'luk bir yeraltı enerji iletim hattı inşa edilmiştir (Public Service Commission of Wisconsin, 2011). Günümüzde yer alan en uzun yeraltı enerji iletim sistemi 700 MW'lık 580 km uzunluktaki Norveç ile Hollanda arasında yer alan Norned HVDC'dir (Skog, 2013). En uzun yeraltı denizaltı kablo sistemi ise Güneydoğu Asya'dan başlayıp Ortadoğu üzerinden Batı Avrupa'ya uzanan 33 farklı ülkeden geçen 38.000 km uzunluğunda 2 milyardan fazla insana hizmet sağlayan SEA-ME-WE-3 fiber optik ağ iletim sistemidir (McLeod, 2013).

Kablolar sonlu uzunlukta üretilmektedir. Bu sebeple uzun bir yeraltı enerji iletim sisteminde ve denizaltı geçişlerinde kablo ekleri çok fazla kullanılmaktadır. Bu eklerin çevresel koşullara karşı dayanıklı üretilmesi hayati önem arz etmektedir. Yeraltında kullanılan kablo uçlarında ve ek yerlerinde, iletkenlerin kesintiye uğraması ve süreksizliği sebebiyle bu noktalarda elektrik alan dağılımı düzgün değildir (Bolat, 2008). Bu noktalarda elektrik alan dağılımının düzgün olmaması, kullanılan yalıtım malzemesinde elektriksel bozulma olaylarının oluşma olasılığını artırmaktadır. Bu sebeple bu noktalarda kullanılan kablo eklerinin yapıldığı polimer malzemelerinin güvenlik ve güvenilirlik deneylerinin yapılması gerekmektedir.

Kabloların birleştirilmesi için kullanılan kablo eklerinde dolgu malzemesi olarak poliüretan bazlı dolgu malzemesi sıklıkla kullanılmaktadır. Poliüretanlar genellikle düşük gerilimlerde nemli iç mekan yalıtım malzemesi olarak kullanılmasına rağmen, orta gerilimde kablo uçlarında ve ek yerlerinde kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında, kablo eklerinde ticari olarak kullanılan poliüretan bazlı dolgu malzemesinden vakum ortamında numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelerin, IEC ve ASTM kuruluşları tarafından standart haline getirilmiş karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi (Comparative Tracking Index, CTI) deney yöntemi kullanılarak yüzeyde iz oluşumu davranışları değerlendirilmiştir. IEC ve ASTM tarafından standart haline getirilen bu deneyler sırasıyla IEC 60112, ASTM D3638 ve ASTM D5288 standartlarıdır. Bu standartlar aynı amaç için hazırlanmış olmasına rağmen aralarında küçük farklılıklar mevcuttur. Bu standartlar arasındaki farklılıklar ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır. Bu doğrultuda, ASTM D5288 standardında belirtilen koşullar baz alınarak İstanbul Üniversitesi Yüksek Gerilim Laboratuvarında bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu deney düzeneğinde hazırlanan numuneler denenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak kablo eklerinde kullanılan poliüretan bazlı dolgu malzemesinin yüzeyde iz oluşumu performansı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme yapılırken deney sırasında elde edilen şu bulgular kullanılmıştır.

- Numunenin yüzeyine 50 damla düşmesiyle numunede meydana gelen ağırlık kaybı
- Numune yüzeyinde karbonlaşmanın görüldüğü damla sayısı
- Numune yüzeyinden 2 s boyunca 0.5 A ve üstü akımın aktığı damla sayısı
- Numune yüzeyinde sürekli boşalmaların başladığı damla sayısı

- Deneyleer sırasında kayıt altına alınan kaçak akım verileri

Elde edilen bu kaçak akım verileri lineer olmayan zaman serisi analizi olan yineleme haritaları yöntemi kullanılarak incelenmiştir.



2. GENEL KISIMLAR

2.1. POLİMER MALZEMELER

Yapısında serbest elektron bulundurmayan malzemeler dielektrik veya yalıtkan malzemeler olarak isimlendirilirler. Bu tip malzemelerin iletim bandı ile valans bandı arasındaki enerji aralığı 4 eV'tan büyüktür (Kuntman,2004). Dielektrik malzemeler elektriği iletmezler fakat düzgün elektrik alandan etkilenirler. Bu malzemeler, alçak gerilim uygulamalarından yüksek gerilim uygulamalarına kadar elektrik-elektronik endüstrisinin birçok uygulama alanında yalıtım amacıyla kullanılmaktadırlar.

Elektrik-elektronik endüstrisinde kullanılan dielektrik malzemeler katılar, sıvılar, gazlar, vakum ve kompozitler olmak üzere 5 sınıf altında incelenirler (Malik,1998). Gazlar ideal dielektrik özelliklere sahip malzemelerdir. Gazların bağıl dielektrik katsayıları yaklaşık olarak 1'dir ve kayıp faktörleri düşüktür. Katı ve sıvı dielektrik malzemelerin bağıl dielektrik sabitleri 2 ile 7 arasında değişkenlik göstermektedir. Dielektrik sabiti sıcaklık, elektrik alan şiddeti, frekans ve kutuplanma parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Malik, 1998).

Elektrik enerji sistemlerinde katı yalıtkan malzemeler sıklıkla tercih edilmektedirler. Katı dielektrik malzemeler sıvı ve gazlara oranla daha yüksek delinme dayanımına sahiptirler. Sıvı ve gaz dielektrik malzemelerin aksine herhangi bir katı dielektrik malzemenin elektrik, mekanik veya termik zorlanmadan dolayı zarar görmesi genellikle geri dönüşüzdür (Arora, 2011). İyi bir katı dielektrik malzemedan düşük dielektrik kayıp, yüksek mekanik dayanım ve sertliğe sahip olması, gaz katkıları ve nem içermemesi, ısıl ve kimyasal etkileşimlere dayanıklılık gibi özelliklere sahip olması beklenir. Ayrıca, iyi bir dielektrik malzeme kullanıldığı ortamdaki çevresel şartlardan etkilenmemeli, ozona, radyasyona ve su emilimine karşı dayanıklı olmalıdır (Malik, 1998).

Polimerler katı yalıtkan malzeme sınıfında yer alan yalıtkanlardır. Polimerler, monomer olarak isimlendirilen basit molekülü yapıtaşlarının birleşmesi sonucu karmaşık molekülü zincir yapılarının ortaya çıkması ile oluşurlar. Bu birleşme olayı literatürde polimerizasyon olarak isimlendirilmektedir. Polimerler uzaydaki çapraz örgü şekillerine göre termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere 3 başlıkta incelenirler (Malik, 1998).

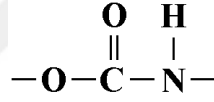
Termoplastik malzemeler oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Bu malzemeler ısıtıldıklarında yumuşar ve akışkan bir yapıya bürünürler. Bu malzemelerin, belirli sıcaklık aralıklarında özelliklerinde bir değişme olmaksızın ısıtma ve soğutma döngüsü çok kez tekrarlanabilir. Termoplastik malzemelerin sahip olduğu bu özellik dökme, üfleme, presleme ve çekme gibi termik üretim işlemlerinin kolay ve ekonomik şekilde yapılmasına imkan tanır. Termoplastiklerin sahip olduğu bu geri dönüşüm yeteneği ve belirli sıcaklık aralıklarında yeniden şekillendirebilme özellikleri sebebiyle termoplastik polimerler popülerliklerini artırmaktadırlar (Schneider, 2015; Özer, 2016). Elektrik yalıtım sistemlerinde kullanılan termoplastik polimerlere polietilen (PE), polivinilklorür (PVC), polipropilen (PP) ve poliamid (PA) örnek olarak verilebilir (Arora, 2011).

Termosetler ısınmayla birlikte erimeyen kimyasal bir yapıya sahiptirler. Nadiren van der Waals bağlarının çözünmesiyle malzemelerde yumuşamalar meydana gelebilir. Termoset malzemeler 3 boyutlu yapıya sahip olmaları nedeniyle herhangi bir erime olayı ile karşı karşıya kalmazlar. Eğer termoset bir malzemenin sıcaklığı kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkarsa, malzemede termik bozulma meydana gelir. Meydana gelen bu termik bozulma olayı geri döndürülemez bir bozulma olayıdır. Termoset malzemeler mekanik zorlanmaya karşı dayanıklı olmaları sebebiyle yüksek gerilim yalıtım sistemlerinde sabit ve oynamaz parçaların yalıtımında sıklıkla kullanılırlar. Elektrik yalıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan epoksi reçine ve yüksek gerilim güç kablolarında kullanılan çapraz bağlı polietilen (XLPE) termosetlere örnek olarak verilebilir (Arora,2011).

Polimerler dayanıklılığı, erişilebilirliği, kolay üretimi ve düşük maliyetlerinden dolayı dielektrik malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (Du, 2011). Ayrıca polimerler kompleks şekil alabilme, iyi kirlenme performansı ve hidrofobik özelliğe de sahiptirler (Aronov, 1992). Polimerler izolatörlerde, burçlarda, parafudrlarda ve kablo eklerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar (Mackevich, 1997). Polimerlerin ana bileşeni karbon olduğu için, polimer malzemelerin yüzeyinde iz oluşumu hatası olarak isimlendirilen dielektrik bozulma olayının gerçekleşmesi kaçınılmazdır (Du, 2012; Li, 2010; Kumagai, 2001). İz oluşumu hatasının gerçekleşmesi sadece elektrik ekipmanlarının zarar görmesine sebep olmaz, aynı zamanda kişisel güvenliğin tehlikeye girmesine de sebep olur (Du, 2006). Bu çalışmada, yeraltı enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde ek noktalarında dolgu malzemesi olarak kullanılan poliüretan reçine malzemenin yüzeyde iz oluşumu performansı CTI yöntemi ile incelenmiştir.

2.1.1. Poliüretan

Poliüretan Şekil 2.1’de verilen üretan monomerlerinin polimerleşmesi sonucu uzun ve zincirli bir yapıya dönüşmesiyle elde edilir. Üretan monomeri karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O) ve azot (N) elementlerinin kovalent bağ ile birleşmesiyle oluşur (Kind, 1985). Poliüretan Profesör Otto Bayer tarafından naylonla rekabet etmesi için 1937 yılında geliştirilmiştir. Otto Bayer tarafından icat edilen poliüretan polimer kimyası alanında en büyük buluşlardan biri olarak kabul edilir (Szycher, 2012). Poliüretan 1930’lu yılların sonlarında Almanya’da ortaya çıkmasına rağmen, ABD üreticileri tarafından ticari üretimi, 2. Dünya savaşı sonrasına kadar başlanmamıştır (Shugg, 1995).



Şekil 2.1: Üretan monomerinin kimyasal yapısı (Kind, 1985).

Günümüzde, poliüretanın uygulama alanına göre çok fazla biçimi bulunmaktadır. Akışkan ve sert köpükler, yapışkanlar, katı elastomerler ve iki komponentli formülasyonda olanlar bunlardan bazılarıdır (Szycher, 2012). Poliüretan icat edildikten sonra yıllar içinde birçok alanda kullanılmıştır. Poliüretanın yıllar içerisinde başlıca kullanılmaya başladığı alanlar ve yılları Tablo 2.1’de verilmiştir (ISOPA, 2017).

Tablo 2.1: Poliüretanın yıllara göre başlıca kullanım alanları (ISOPA, 2017).

Kullanıldığı tarih	Kullanıldığı alan
1940	Sert köpük olarak uçaklarda kullanılmaya başlandı.
1941	Yapıştırıcı olarak kullanılmaya başlandı.
1950’ler	Elektriksel yalıtım malzemesi olarak kullanılmaya başlandı.

Tablo 2.1 (devam): Poliüretanın yıllara göre başlıca kullanım alanları (ISOPA, 2017).

1953	Ayakkabı tabanlarında kullanılmaya başlandı.
1958	Giysi üretiminde kullanılmaya başlandı.
1959	Mercury projesinde için poliüretan astarlı uzay elbiseleri NASA tarafından geliştirildi.
1969	Güvenliği artırmak için otomobil tamponlarında kullanılmaya başlandı.
1970	Ortopedik ve medikal uygulamalarda kullanılmaya başlandı.
1989	Araba koltuklarında kullanılmaya başlandı.
2001	Otomobil lastiklerinin performansını artırmak için poliüretan içerikli malzeme kullanılmaya başlandı.
2004	Poliüretan ventriküller ile yapay kalp üretildi.
2011	Poliüretan ve fiber glass malzemeden kuş benzeri hareketler yapabilen “Smart-Bird” ismi verilen yapay bir kuş geliştirildi.

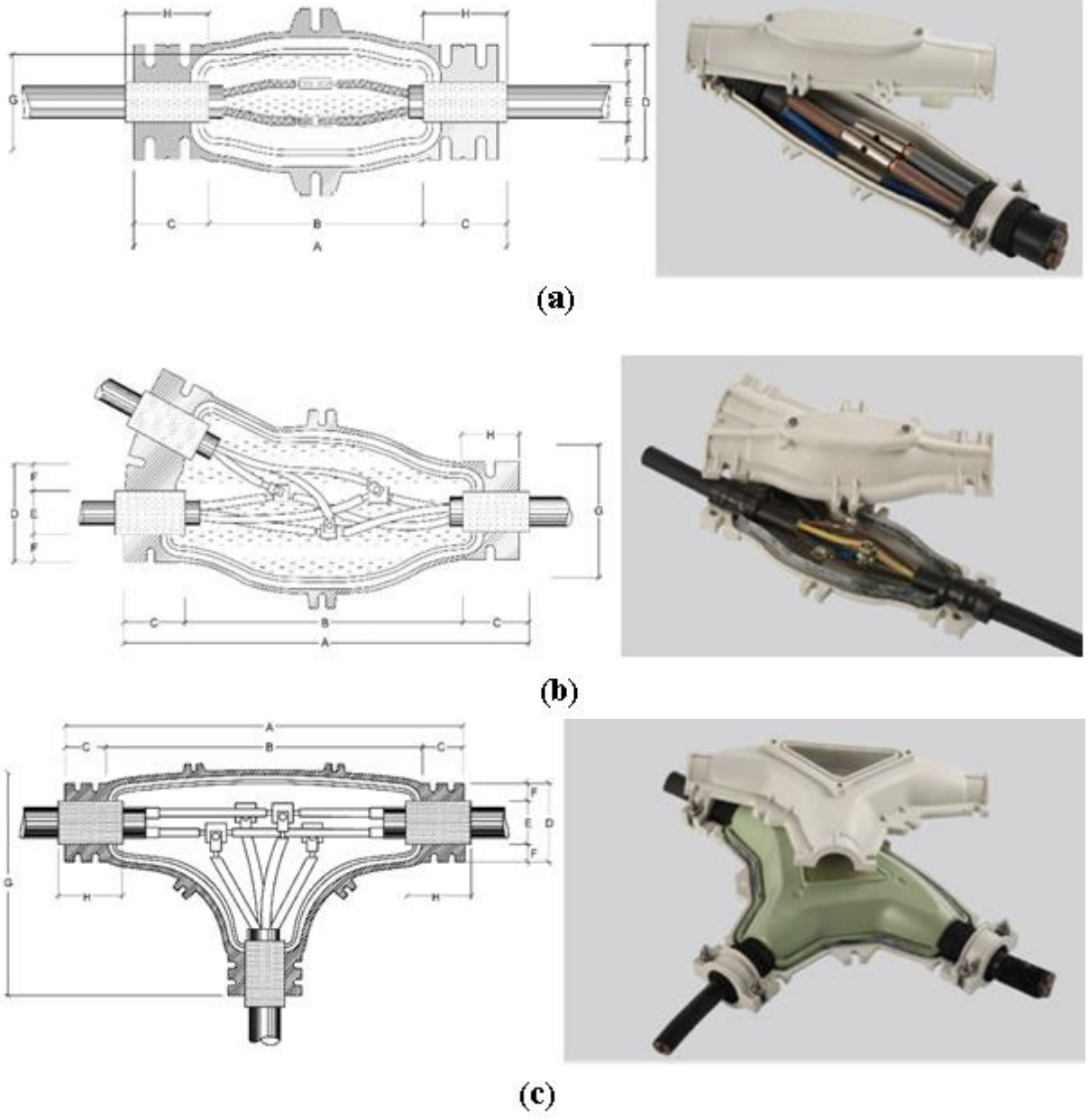
Poliüretan 1950’li yıllarda elektriksel yalıtım amacıyla kullanılmaya başlanmıştır (Boulter, 2004). Termoplastik poliüretan yüksek sertliği, aşınmaya ve kimyasallara karşı yüksek dayanım özelliğine sahiptir. Termoplastik poliüretanlar diğer dielektrik malzemelerden farklı özelliklere sahiptir. Termoplastik poliüretanlara çeşitli katkı malzemeleri katkılanarak elektriksel iletkenliği değiştirilebilir. Chwang ve arkadaşları 2004 yılında yapmış oldukları çalışmada poliüretan malzemeye %17 oranında polianilin katkılanmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda 1 kHz’de bağlı dielektrik sabiti 5,68 olarak ölçülen poliüretanın bağlı dielektrik sabiti katkılama sonrası 1120 olarak ölçülmüştür (Chwang, 2004).

Termoplastik poliüretanlar düşük güç kabloların yalıtımında kaplama malzemesi olarak ve devre kartlarının kaplamalarında kullanılmaktadır. Poliüretanların yalıtım dolgu malzemesi olarak kullanımı polyester ve epoksilere oranla daha düşüktür. Fakat poliüretanlar bu amaçla kullanım için uygun malzemelerdir (Shugg, 1995). Termoplastik poliüretanlar, kablo başlıklarında ve ek muflarında reçine formunda dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar (Kind, 1985). Bu noktalarda kullanılan malzemeler, reçine ve sertleştirici olmak üzere sıvı formda 2 bileşikten oluşmaktadırlar. Bu ürünlerin en büyük avantajı düşük sıcaklıklarda bile döküldüğü kalıbın şeklini alıp donabilmeleridir. Donma süreleri kullanıldığı ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

2.1.2. Yeraltı kablo ekleri

Ticari olarak üretilen bir yeraltı kablosunun belli bir uzunlukta üretilmesi çok maliyetli ve zordur. Örneğin, kıyı şeridinden 100 km mesafede bir adayı düşünelim. Bu adaya dönecek denizaltı enerji sisteminin kablosunun 100 km uzunlukta tek parça olarak üretilmesi, taşınması ve depolanması imkânsızdır. Bu yüzden, bir yeraltı iletim veya dağıtım sistemi kurulurken belli noktalarda ek yapılması gerekmektedir. Böylece hattın devamlılığı sağlanabilecektir.

Kabloların gerek dağıtım gerekse onarım amacıyla ek yapıldığı noktalarda ek mufları kullanılmaktadır (Bolat, 2008). Ticari olarak piyasada ihtiyaca göre farklı şekillerde üretilmiş ek mufları mevcuttur. Bunlardan en çok bilinenleri düz ek mufu, T ek mufu ve Y ek muflarıdır. Şekil 2.2’de düz, Y ve T tipi ek muflarının teknik çizimleri ve içerisine ek yapılacak kablonun yerleştirilmiş halleri gösterilmiştir. Şekilde gösterilen ek muflarının kalıpları polipropilen malzemedan yapılmıştır. Ek muflarının kalıplarının içerisinde iletkenleri birbirine bağlamak için klemensler kullanılır. Şekil-2.2(c)’de içerisine poliüretan bazlı dolgu malzemesi dökülmüş T tipi ek mufu gösterilmiştir. Ek mufları genel olarak sünger bant, civata, kelepçe, kalıp ve dolgu malzemesinden oluşmaktadır. Ek muflarının kalıpları 2 simetrik parçadan oluşmaktadır. Reçineli ek muflarının en büyük avantajı kolay ve kısa sürede uygulanabilmeleridir. Herhangi bir arıza durumunda dolgu malzemesinin bu özelliği sebebiyle kablo eklerinin onarım süreleri kısalmaktadır.



Şekil 2.2: Alçak gerilim kablolarında kullanılan ek mufları a) Düz tip (Ketenci, 2008a) b) Y tipi (Ketenci, 2008b) c) T tipi (Ketenci, 2008c).

2.2. ELEKTRİKSEL BOŞALMA

Katı, sıvı veya gaz yalıtkan malzemenin yalıtkan özelliğinin kısmen veya tamamen kaybolması ile yalıtkan madde üzerinden akım akmasına elektriksel boşalma denir. Elektriksel boşalmalar temel olarak iki grup altında sınıflandırılırlar. Bunlar kısmi boşalmalar ve tam boşalmalardır. Eğer boşalma elektrotlar arasını tamamen kısa devre etmiyorsa bu tür boşalmalar kısmi boşalmalar olarak isimlendirilirler (Sert,2010; Kreuger,1989). Elektrotlar arasındaki boşluğu tamamen köprüleyen atlama ve delinme gibi boşalmalara ise tam boşalmalar denir. Boşalma olayı, sıvı ve gaz yalıtım sistemlerinde elektriksel tersinir özelliğe sahipken, katı yalıtım sistemlerinde tersinmez bir özelliğe sahiptir (Nelson, 1979; Cygan, 1990) Yani sıvı ve gaz yalıtım sistemlerinde yalıtım özelliğinin kayıp olması geçici bir durumken, aksine katı yalıtım sistemlerinde yalıtım özelliğinin kaybolması kalıcı ve geri kurtarılamaz bir durumdur. Kısmi boşalmaların, elektrik sisteminin çalışmasına etkileri çok azdır. Fakat, kısmi boşalmalar elektrik yalıtım sisteminin yaşlanmasına ve ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır. Kısmi boşalmalar iç kısmi boşalmalar, korona boşalması, elektriksel ağaçlanma ve yüzeysel boşalmalar olmak üzere 4 başlık altında incelenmektedirler (Sert, 2010). Bu çalışmada, katı yalıtkanlarda kısmi bir boşalma türü olan yüzeysel boşalmalar yapılan deneyler ile incelenmiştir.

2.2.1.Elektriksel İz Oluşumu

Yalıtım yüzeyleri, çok yüksek gerilim seviyelerine karşı bile direnç gösterebilecek özelliğe sahiptirler. Fakat bu yalıtım yüzeylerinde zamanla tuz, toz ve atmosferik kimyasal olaylar sonucu zamanla kir tabakaları oluşur. Oluşan bu kir tabakaları nemli şartlar altında iz oluşumu olarak adlandırılan yüzey hatası aracılığıyla yalıtım malzemesinin güvenlik ve güvenilirliğini tehlikeye sokabilir (Khalifa, 2000). Elektriksel yalıtım sistemlerinde kullanılan polimerler servis şartlarında çevresel ve elektriksel kirlenmeye maruz kalabilirler. Maruz kalınan bu şartlar yalıtım sistemlerinin performansını negatif yönde etkileyebilir. Elektriksel iz oluşumu hatası, polimerlerin yüzeyinde oluşan karbonize iletken yollar içeren dielektriksel bir bozulma olayıdır (Du, 2008a; Yoshimura, 1997). Şekil 2.3'de polimer bir malzeme yüzeyinde oluşan elektriksel iz gösterilmiştir .



Şekil 2.3: Polimer yüzeyinde oluşan bir iz (İspirli, 2016).

2.2.2.Yüzeyde Elektriksel İz Oluşumu Mekanizması

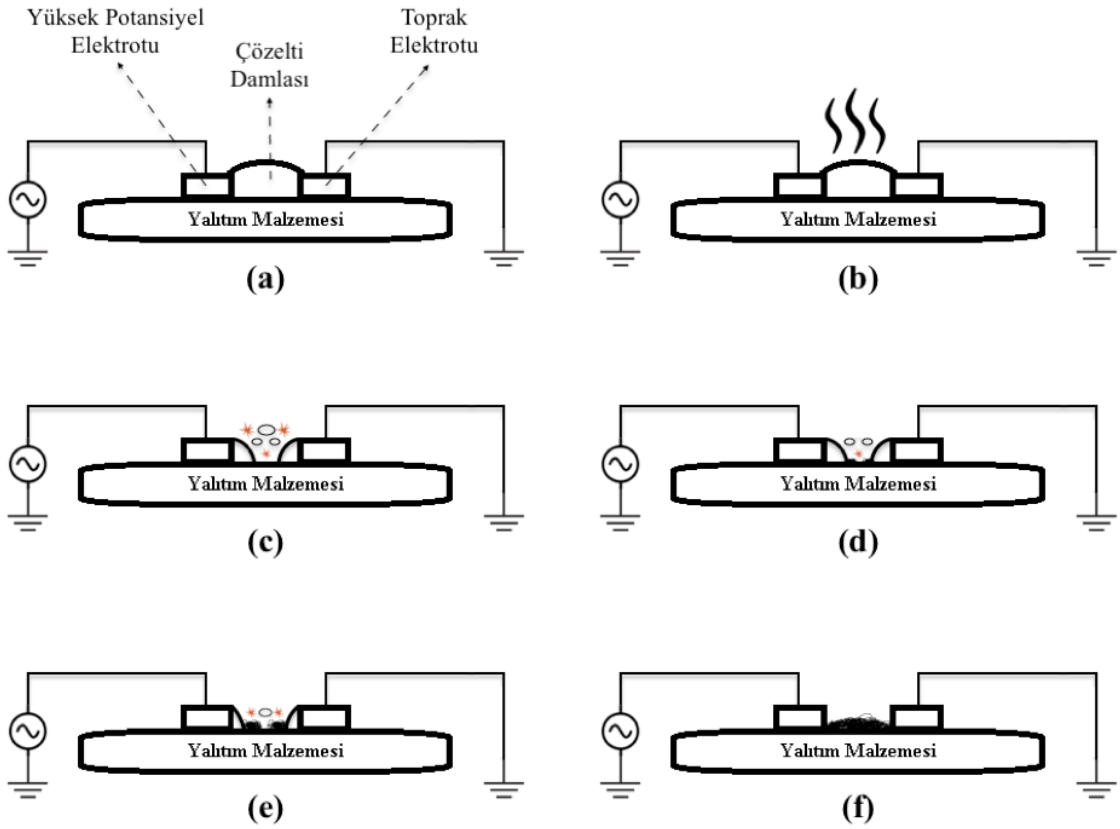
Katı yalıtkanların bozulmasında, elektriksel özelliklerinin yitirilmesine neden olan olayların başında yüzeysel elektriksel iz oluşumu mekanizması gelir. Kirli bir yüzeyde yoğunlaşma veya yağışlar sebebiyle kirli bir nem tabakasının oluşması ve oluşan bu kirli nem tabakasının üzerinden yüksek elektrik alan altında kaçak akımlar akmaya başlaması ile gözlenen bir durumdur. Bu kaçak akımların büyüklüğü kirliliğin tipine ve seviyesine bağlıdır. İz oluşumu süreci iletken bir çözelti aracılığıyla küçük elektrot aralıklarında şekil 2.4'deki gibi modellenebilir. İki elektrot arasında çözelti var olduğunda, çözelti üzerinden akım akmaya başlar ve çözeltinin içerisinde bulunan su buharlaşır. Suyun buharlaşmasıyla çözeltinin içerisinde bulunan bileşikler (Örn: NH_4Cl , NaCl vb.) numune yüzeyinde birikir. Yüzeyde kalan bu bileşikler çevresel kirleri modellemektedir. Sıvının buharlaşmaya başlaması sonucu şekil 2.4(c)'de gösterildiği gibi su damlasının orta bölgesinde ince bir kuru-bant bölgesi oluşacaktır. Elektrotların her iki tarafında yer alan damla parçacıkları, kendi tarafında yer alan elektrotun sahip olduğu potansiyele yaklaşacaktır. Oluşan bu ince kuru-bant bölgesinde elektrotlar arası mesafenin azalması sonucu kıvılcımlar meydana gelecektir. Eğer oluşan kıvılcımın enerjisi yeterliyse, yalıtımda bozulma meydana gelebilir. Katı yalıtkan malzemelerde yalıtkanın bozulma derecesi tamamen yalıtım malzemesinin yapısal özelliklerine bağlıdır. Zamanla numune yüzeyinde depolanan kirletici maddenin artmasıyla beraber karbonlaşma miktarı artacaktır.

Yalıtım malzemesinin yüzeyinde boşalmanın oluşmasıyla beraber numune yüzeyinde iz oluşur. Oluşan bu iz sonucunda yüzeyde karbon yoğunluğu artacaktır ve artan bu karbon

yoğunluğu yüzeydeki ısının daha fazla artmasına sebep olur. Isının daha fazla artması sonucu yalıtım yüzeyinde karbon yoğunluğu daha fazla artar. Artan karbon yoğunluğu bir noktadan sonra iletken bir yol oluşturur. Oluşan bu iletken yol nihayetinde yalıtım yüzeyinin delinmesine neden olacaktır (İspirli, 2016; Dong, 2006).

Da Silva ve arkadaşlarının 2016 yılında yapmış olduğu çalışmada yüzeyde iz oluşumu sürecinin nasıl gerçekleştiğini anlatmışlardır. Yüzeyde iz oluşumu süreci şekil 2.4'de şekillerle gösterilmiştir. Yüzeyde iz oluşumu süreci şu adımlardan oluşmaktadır (Da Silva, 2016; Malik, 1998; İspirli, 2018) ;

- a) Malzeme yüzeyinin kirlenmesi ve nemlenmesi sonucu iletken bir tabaka oluşur.
- b) Bu iletken tabaka boyunca akan yüzey akımları yüksek ısının üretilmesine sebep olur. Oluşan bu ısı elektrolitin buharlaşmasını ve elektrotlar arasında ince bir kuru-bant tabakasının oluşmasını sağlar.
- c) Kuru-bant'ın oluşumu sebebiyle yüzey akımları kesintiye uğrar. Bu kesinti ıslak alan ile kuru-bant alanı arasında bölgesel elektrik alanının artmasına sebep olur. Bu artışla beraber yüzey boşalmaları başlar.
- d) Yüzey boşalmaları sebebiyle, yalıtım yüzeyi yüksek sıcaklığı erişir. Yüzeyde oluşan bu yüksek sıcaklık ile beraber malzeme yüzeyinde yanma gerçekleşir ve yüzeyde karbonlaşma başlar.
- e) Yüzeyde karbonlaşma gelişir ve yayılmaya başlar.
- f) Yüzeydeki karbonlaşma miktarının artması ile yüzey boşalmaları sürekli hale gelmeye başlar. Bunun sonucunda yüzeyin yalıtım direnci düşer. Oluşan arkların sonunda öyle bir an gelir ki, malzeme yüzeyinin yalıtım direnci tamamen kaybolur ve malzeme yüzeyi delinir.



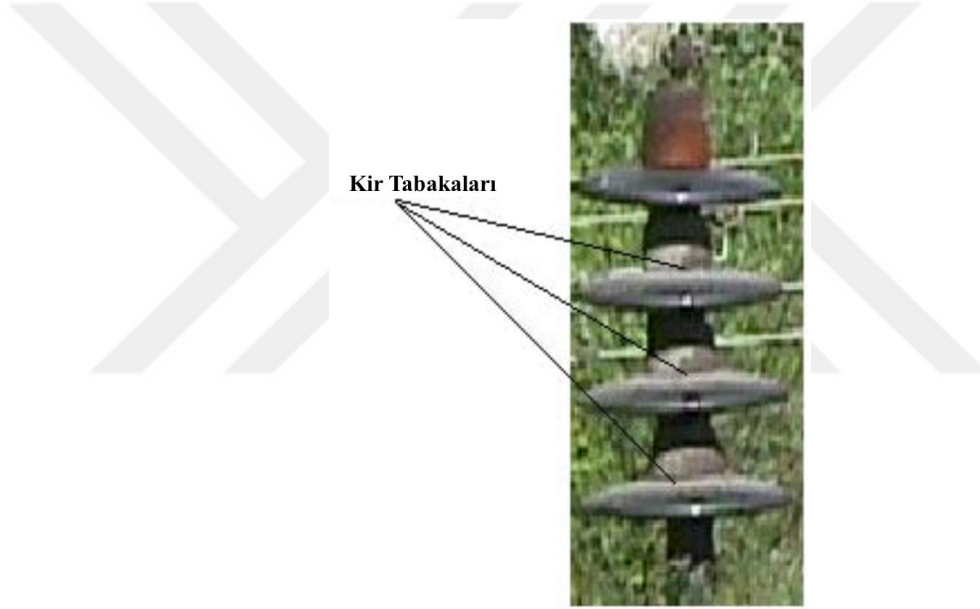
Şekil 2.4: Yalıtım yüzeyinde iz oluşumu süreci a) Malzeme yüzeyinde iletken tabakanın oluşumu; b) Elektrolitin buharlaşmaya başlaması; c) Kuru-bant oluşumu sonucu oluşan yüzeyel boşalmalar; d) Malzeme yüzeyinin yanmanın gerçekleşmesi ve yüzeyin karbonlaşmaya başlaması; e) Karbonlaşmasının artması ve yayılması; f) Malzeme yüzeyinin delinmesi (Da Silva, 2016).

2.3.YÜZEYSSEL KİRLENME

Elektriksel yalıtım sistemlerinde kullanılan yalıtkan malzemeler servis şartlarında çalışırken çevresel şartlardan etkilenirler. Kirli çevresel şartlar sebebiyle yalıtkan malzemenin yüzeyinde kirletici maddeler birikir ve yalıtım yüzeyinde kir tabakası oluşur. Oluşan bu kir tabakası nemli ve ıslak şartlar altında yalıtım yüzeyinde iletken bir tabakanın oluşmasına sebep olur. Dış ortamda kirli şartlar altında çalışan bir izolatörün yüzeyinde biriken kirletici madde sonucu oluşan kir tabakaları şekil 2.5’de gösterilmiştir. Yalıtım yüzeyinde oluşan bu iletken kir tabakasının üzerinden kaçak akımlar akmaya başlar. Akan bu kaçak akımlar elektriksel yalıtım sistemlerinin performansını olumsuz yönde etkiler. Dış ortamda hizmet veren tüm yalıtkan malzemeler çevresel kirletici maddelere maruz kalır. Yalıtım yüzeyinde oluşan kir tabakasının iletkenliği çevre şartlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Nemli ve ıslak şartların artması durumunda kir tabakasının direnci düşer. Bu nedenle, yalıtım malzemesinin yüzeyinden akan rezistif kaçak akımların genliği artar (Yağdıran, 1997). Yüksek Gerilim

Tekniği araştırmalarında kirlilik tipleri normal durumlarda 5 ana başlıkta incelenmektedir (Naidu, 1996). Normal kirlilik tipleri şunlardır (Naidu, 1996).

- i. Toz, mikroorganizmalar, kuş pislikleri ve sinekler
- ii. Duman, petrol buharları, toz gibi endüstriyel kirler
- iii. Yalıtım yüzeyinde biriken çürütücü ve higroskopik tuz tabakaları gibi sahil kirleri
- iv. Çöllerde meydana gelen kum fırtınaları sonucu yalıtım yüzeyinde oluşan toz ve kum tabakaları ise çöl kirleri olarak isimlendirilmektedir.
- v. Kutup bölgelerinde yüksek rakımlarda yalıtım yüzeyinde buz tabakaları oluşur. Ayrıca bu tip ortamlarda yalıtım yüzeyi sis bulutlarına da maruz kalabilir.



Şekil 2.5: Yüzeyi kirli izolatör zinciri (Çetin, 2005).

Bu kirler yalıtım yüzeyi boyunca korozyona ve düzgün olmayan bölgelere sebep olmaktadır. Ayrıca kirletici maddeler kısmi boşalmalara ve radyo parazitlerine de sebep olmaktadır (Naidu, 1996). Yalıtım yüzeyinin kirlenmesi sonucu oluşan kısmi boşalmalar malzemenin yaşlanmasını ve bozunmasını hızlandırması sebebiyle kirlilik deneyleri elektrik yalıtım sistemlerinin ömürleri için önem kazanmıştır. Yukarıda belirtilen normal çevresel kirler dışında, geleneksel olmayan elektrik sistemi uygulamalarında elektrik yalıtım sistemleri farklı kirletici maddelere maruz kalmaktadır. Du ve arkadaşları 2008 ve 2009 yılında yayınlamış oldukları çalışmalarda nükleer enerji santrallerinde kullanılan polimerlerin maruz kaldığı gamma-ray ışınması sonucu polimer örneklerin yüzeyde iz oluşumu performansını incelemiştir (Du, 2008a; Du, 2009). Du ve arkadaşlarının

2008 yılında yayınlamış olduğu çalışmada gamma-ray ışımasının PBT (Polibütilen Tereftalat) ve PET (Polietilen Tereftalat) örneklerin iz oluşumu direncine etkisini incelemiştir. Yapmış oldukları bu çalışma sonucunda numunelerin maruz kaldığı gamma-ray ışıma miktarının artması ile PET numunelerin yüzeyde iz oluşumu direnci artarken bu durumun tam aksine PBT numunelerin yüzeyde iz oluşumu direnci azalmıştır (Du, 2008a). 2009 yılında yayınlamış oldukları çalışmada ise %3 polietilen katkılanmış polikarbonat ve katkı yapılmamış polietilen numunelerin yüzeyde iz oluşumu direncinin gamma-ray ışıma miktarı ile değişimini incelemiştir. %3 oranında polietilen katkılanmış polikarbonat numunelerin gama-ray ışımına maruz bırakılması, iz oluşumu direncini artırmıştır. Bu çalışma sonucunda, polietilen ve modifiye edilmiş polikarbonat numunelerin maruz kaldığı gama-ray ışıma miktarının artmasıyla numunelerin yüzeyde iz oluşumu direncinin arttığını belirtmişlerdir (Du, 2009).

Chandrasekar 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada çevresel faktörlerin etkisini anlayabilmek için silikon kauçuk numuneleri 30 gün boyunca hızlandırılmış yaşlandırma testine maruz bırakmıştır. Yaşlandırma testi olarak numuneleri ultraviyole ışın ve asit yağmuru solüsyonu streslerine maruz bırakmıştır (Chandrasekar, 2010). Kumar ve arkadaşları 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada ticari olarak üretilen cam fiber ile desteklenmiş plastik (glass fiber reinforced plastics - GFPR) performansını yüzeyde iz oluşumu deney yöntemi ile incelemiştir. Yapmış oldukları bu çalışmada numune yüzeyine damlatılan çözeltinin yoğunluğu ile numunelerin yüzeyde iz oluşumu direnci arasındaki ilişkiyi de incelemiştir. Yıldırım darbe gerilimi ve anahtarlama darbe gerilimi altında numune üzerine damlatılan çözeltinin yoğunluğun artmasıyla malzemenin alevlenme (flashover) geriliminin azaldığını belirtmişlerdir (Kumar, 2014).

Sonuç olarak, dış ortamda kirli şartlar altında kullanılan yalıtım malzemelerinin kirletici maddelere maruz kalması ve kirlenen elektrik yalıtım sistemlerinde ortaya çıkan olumsuz durumlar kirlilik deneylerinin önemini artırmıştır. Aşırı yüksek gerilim havai iletim hatlarında kullanılan izolatörlerin kirlilik deneyleri için tuz-sis (salt-fog) deney yöntemi çok popüler bir deney yöntemidir (Naidu,1996). Fakat günümüzde, yeraltı enerji iletim hatlarının kullanımının zaruri olması ve polimer teknolojisindeki gelişmeler sonucu polimerlerin elektrik yalıtım sistemlerinde sıklıkla tercih edilmesi sebeplerinden dolayı dış ortamda nemli ve kirli şartlar altında yalıtım amacıyla kullanılan polimerlerin yüzeyde

iz oluşumu direncini deneyen IEC 60112, ASTM D3638 ve ASTM D5288 karşılaştırmalı yzelysel boşalma indeksi deney yzntemleri gncellik kazanmıştır.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. YÜZEYDE İZ OLUŞUMU DENEY YÖNTEMLERİ

Elektriksel yalıtım amacıyla kullanılan malzemeler kullanım ömürleri boyunca çeşitli yaşlandırma mekanizmaları ile karşılaşılırlar. Özellikle dış ortamda veya ağır kirli şartlar altında bulunan yalıtım malzemeleri ciddi streslere maruz kalmaktadırlar. Yalıtım malzemelerinin maruz kaldığı bu stresler onların dielektrik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Uzun vadede bu stresler yalıtım malzemesinin bozulmasına ve elektriksel ekipmanların zarar görmesine sebep olabilirler. Bu bozulma olayları çok uzun sürmesinden dolayı bazı kuruluşlar ve komiteler tarafından yıllar içerisinde geliştirilmiş hızlandırılmış deney yöntemleri ile yalıtım malzemelerinin kalitesi için bazı standartlar belirlenmiştir. Bu deneyler sonucunda yalıtım malzemesinin kalitesi, ömrü ve performansı hakkında öngörü sahibi olunabilmektedir.

Yalıtım malzemelerinde elektriksel iz oluşumu direncini değerlendirmek için güncel olarak kullanılan laboratuvar ortamında gerçekleştirilen 5 adet deney yöntemi mevcuttur. Bu deney yöntemleri Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi Deney Yöntemi (Comparative Tracking Index, CTI) [IEC 60112, ASTM D3638, ASTM D5288], Eğik Düzlem Deney Yöntemi (Inclined Plane Test, IPT) [IEC 60587, ASTM D2303], Kuru-Ark Deney Yöntemi (Dry Arc Test) [ASTM D495], Tozlu-Sis Deney Yöntemi (Dust-Fog Test) [ASTM D2132], Tuzlu-Sis Deney Yöntemi (Salt Spray(Fog) Test) [ASTM B117] 'dir.

Bu deneyler, elektrik–elektronik endüstrisinde farklı amaçlarla kullanılan yalıtım malzemelerinin farklı servis şartları altında göstereceği performansı değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş deney yöntemleridir. Bu deney yöntemleri farklı şartlar altında farklı nicel değerleri yalıtım malzemesinin yüzeyde iz oluşumu performansını değerlendirmek için çıktı olarak vermektedir. Bu çalışmada, kablo eklerinde kullanılan poliüretan bazlı polimer numunelere yapılan deneyler karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemi ile gerçekleştirildiği için bu deney yöntemi ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

3.2. KARŞILAŞTIRMALI YÜZEYSEL BOŞALMA İNDEKSİ DENEY YÖNTEMİ

Elektriksel ekipmanların, çeşitli kirletici ortam şartlarına maruz kalmasıyla yalıtım malzemesini yüzeyinde elektriksel iz oluşur. Oluşan bu iz sonucu elektriksel ekipmanda yalıtım hatası oluşabilir. Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM) ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından nemli ve kirli şartlar altında yalıtım malzemesinin iz oluşumu direncini karşılaştırma ile değerlendiren yöntemler geliştirmişlerdir. Bu deney yöntemleri IEC 60112, ASTM D3638 ve ASTM D5288'dir. Bu deney yöntemleri literatürde karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemleri olarak geçmektedir. Bu deneylerin uygulamasında ufak farklılıklar olmasına rağmen genel prosedürleri ve amaçları aynıdır. Bu deneyler nispeten düşük gerilimlerde uygulanan hızlandırılmış deney yöntemleridir.

Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemi (CTI) ilk olarak 1959 yılında IEC tarafından yayınlanmıştır (IEC, 1959). Bu deney standartının ikinci versiyonu 1971 yılında IEC tarafından yayınlanmıştır (Mitchell, 1974). Bu deney standardı daha sonra ASTM tarafından D3638 standardı olarak yayınlanmıştır. Bu deney standardında (ASTM D3638) kullanılan platin elektrot yerine bakır elektrot kullanılmasına imkan veren D5288 deney standardı ASTM tarafından ayrı bir deney standardı olarak yayınlanmıştır. Fakat ASTM D5288 standardında kullanılan bakır elektrotlar her deneyden önce standartta belirtilen geometrik formu sağlayacak şekilde zımparalanmalıdır (ASTM D5288-14, 2014). Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney standardı IEC ve ASTM kuruluşları tarafından sırasıyla 2003 ve 2014 yılında tekrar onaylanmıştır (IEC,2003 ; ASTM D5288-14, 2014). IEC kuruluşu 2003 yılında yayınladığı versiyonda 2009 yılında minör bir düzeltme yaparak tekrar yayınlamıştır (IEC, 2009). Bu çalışma kapsamında ASTM D5288 standardı baz alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Bu deney yönteminin amacı, nemli ve kirli ortamlarda yalıtım amacıyla kullanılan organik yalıtım malzemelerinin iz oluşumu direncini düşük gerilimlerde değerlendirmektir. Organik elektriksel yalıtım malzemelerinin yüzeyinde yer alan elektrotlar arasında iletim akımlarının akması sonucu, çoğu zaman elektrotların yakınında ağaç benzeri yollar veya izler oluşur. Bu izler rasgele doğrultudadır. Oluşan bu izler genellikle elektrotlar arasına uygulanan potansiyel farkın etkisine göre yayılır (ASTM D5288-14, 2014).

Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yönteminde deney numunesinin yüzeyi toprak ve faz elektrotları aracılığıyla elektriksel strese maruz bırakılır. Elektrotlar arasında kalan yüzey, aşırı akım rölesi devreye girene kadar veya numune yüzeyinde kalıcı bir yanma oluşana kadar birbirini izleyen elektrolit damllarına maruz kalır.

ASTM ve IEC tarafından yalıtım malzemesinin yüzeyinde oluşan olaylar için şu tanımlamalar yapılmıştır (IEC, 2003; ASTM D5288-14, 2014);

İz (Track): Yalıtım malzemesinin yüzeyinde oluşan kısmen iletken yoldur.

İz oluşumu (Tracking): Yalıtım malzemesinin yüzeyinde elektriksel boşalma olayları sonucu oluşan izlerin oluşum sürecidir.

İz oluşumu direnci (Tracking resistance): Belirli şartlar altında bir izin oluşması için gerekli zaman veya gerilim olarak belirlenen nicel değerdir.

Erozyon (Erosion): Elektriksel boşalma olayları sonucu yalıtım malzemesinde hacim olarak kayıp edilen malzeme miktarıdır.

Hava arki: Numune yüzeyi üzerinden elektrotlar arasında meydana gelen boşalma olayıdır.

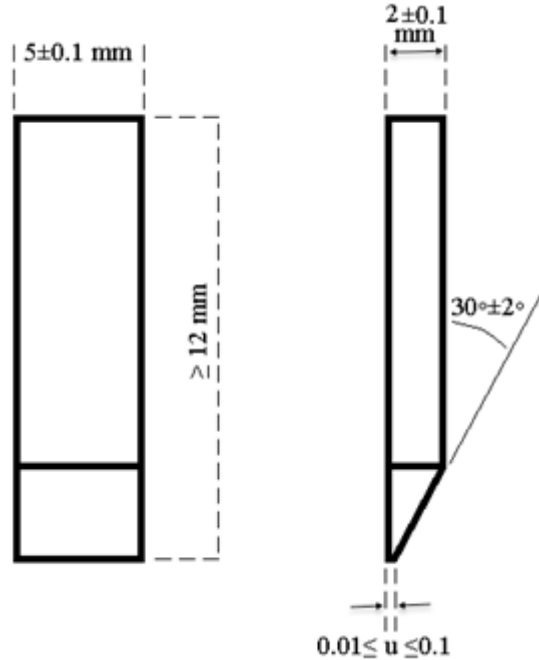
Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi (CTI): Kalıcı bir yanma ve iz oluşumu hatası şartı oluşmadan 50 damlalık deney periyoduna 5 adet deney örneğinin dayandığı maksimum gerilim değerinin nümerik değeridir.

3.2.1. Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemi deney düzeneğinin hazırlanması

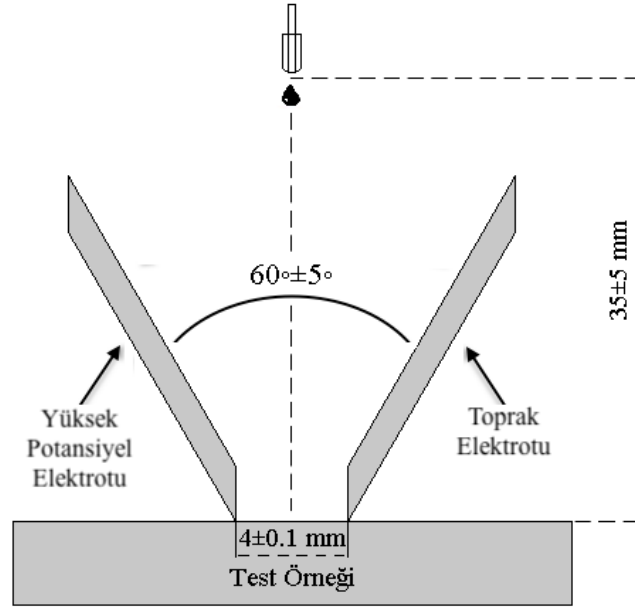
Bu tez kapsamında, kablo eklerinde kullanılan poliüretan bazlı dolgu malzemesinin yüzeyde iz oluşumu performansını değerlendirmek için literatürde sıklıkla kullanılan karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi (CTI) deney yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem uygulanırken, ASTM'nin CTI deney yöntemi için belirlemiş olduğu ASTM D5288 standardına uygun bir deney düzeneği İstanbul Üniversitesi Yüksek Gerilim Tekniği Laboratuvarında kurulmuştur. Bu deney düzeneği kurulurken kullanılan malzemelerin hazırlanma aşamaları kademe kademe aşağıda anlatılmıştır.

3.2.1.1. Elektrotlar

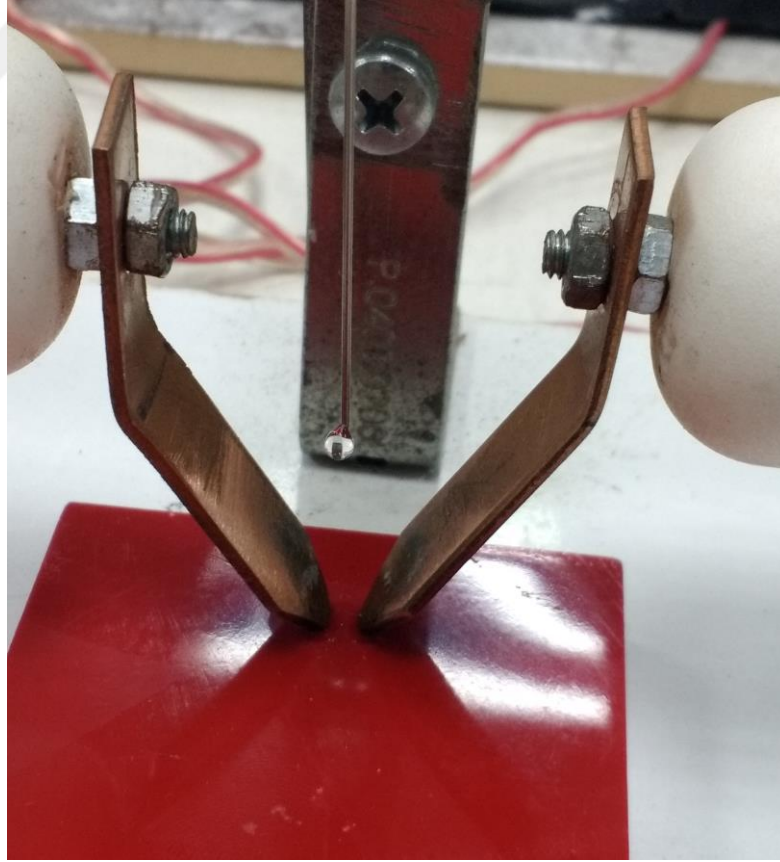
Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yönteminde şekil-3.1’de gösterildiği gibi eni $5 \pm 0,1$ mm kalınlığı $2 \pm 0,1$ mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip elektrotlar kullanılır. Elektrotlar minimum 12 mm uzunluğa sahip olmalıdır (IEC, 2009). ASTM D5288 deney standardına göre ise elektrotların uzunluğu minimum 20 mm olmalıdır (ASTM D5288-14, 2014). Elde edilen sonuçların doğruluğunu artırabilmek ve yeniden üretilebilirliğini sağlamak için kullanılan bu bakır elektrotlar her deneyden sonra istenilen geometrik şartlarını koruyacak şekilde zımparalanmalıdır (ASTM D5288-14). Elektrotlar şekil-3.2’de gösterildiği gibi deney numunesinin üzerine 100 g’lık basınç uygulayacak şekilde dikey olarak konumlandırılmalıdır. Elektrotlar numune üzerinde şekil 3.2’de gösterildiği gibi simetrik olarak aralarındaki açı $60 \pm 5^\circ$ olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu deney yönteminde elektrotlar arası mesafe $4 \pm 0,1$ mm olmalıdır. Elektrotlar arası mesafenin kayma ölçeri (slip gauges) kullanılarak ölçülmesi doğruluk payını artıracaktır. Üniversitemiz laboratuvarında kurmuş olduğumuz deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeninin bir fotoğrafı şekil 3.3’de gösterilmiştir. Bakırdan yapılmış olan bu elektrotlar simetrik olarak 30° açıyla bükülerek elektrotlar arasındaki açının yaklaşık olarak 60° olması sağlanmıştır.



Şekil 3.1: Deneyde kullanılan bakır elektrotların boyutları.



Şekil 3.2: Deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeni.



Şekil 3.3: Deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeninin bir fotoğrafı.

3.2.1.2. Deney çözeltisi ve Damlatma Cihazı

Deiyonize (distile) 1 litre suyun içerisinde 1 g reaktif sınıfı amonyum klorür (NH_4Cl) bileşiğinin çözündürülmesiyle % 0.1 yaklaşık konsantrasyona sahip amonyum klorür çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu deney çözeltisi bir gece kapalı kapta bekletilmiştir. Daha sonra deney çözeltisinin öz direnci ölçülmüştür. Deney çözeltisinin öz direnci $23.2\text{ }^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığında yaklaşık olarak $390\ \Omega\cdot\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. ASTM D5288 standardına göre deney çözeltisinin özdirencinin $23\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığında $385\pm 5\ \Omega\cdot\text{cm}$ olması gerekmektedir (ASTM D5288-14). Eğer deney çözeltisinin özdirenci belirtilen sınırların içerisinde değilse, solüsyona su veya NH_4Cl eklenerek çözeltinin özdirencinin belirtilen sınır değerler içerisinde olması sağlanır. Hazırlanan bu çözelti şekil 3.2'de gösterildiği gibi elektrotların arasında kalan numune yüzeyinin orta kısmına, ASTM D5288 standardına göre maksimum 40 mm yukarıdan, IEC 60112 standardına göre ise 35 ± 5 mm yukarıdan uygun bir düzenek ile damlatılmalıdır. Damlatma cihazı, $20\pm 5\ \text{mm}^3$ boyutuna sahip damlayı periyodik olarak 30 ± 5 saniye aralıklarla numune üzerine düşürmelidir. Hazırlanmış olduğumuz deney düzeneğinde damlaların zaman aralığını hassas bir şekilde ayarlayabilmek için Braun marka şırınga pompası kullanılmıştır. Şırınga pompası hastalara gerekli olan çözeltilerin veya ilaçların belli zaman aralıklarında belli akışkanlık hızında verilmesini sağlayan bir cihazdır. Bu çalışmada, şırınga pompasının ayarı saate 1.31 ml solüsyon verecek şekilde ayarlanmıştır. Böylece numune yüzeyine düşürülen damla süresinin aralığı 29.8 saniye ve damla boyutu $21.83\ \text{mm}^3$ olarak elde edilmiştir.

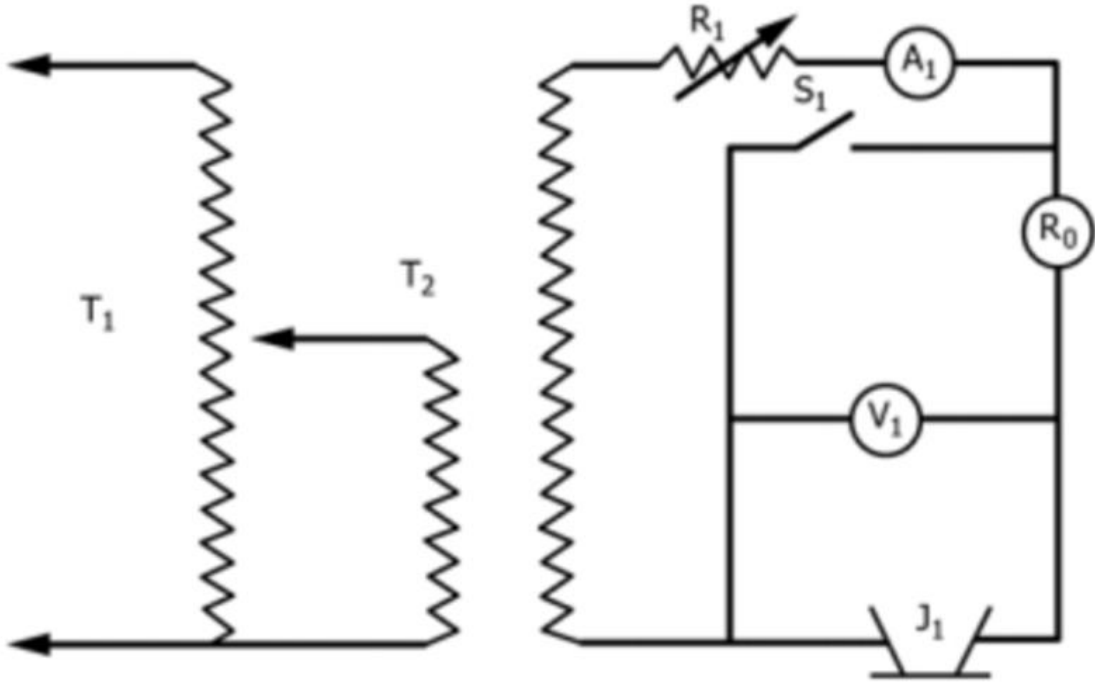
3.2.1.3. Deney Devresi

Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemi için ASTM D5288 standardının belirlemiş olduğu deney düzeneği devresine ait elektrik devre şeması Şekil 3.4'de gösterilmiştir (ASTM D5288-14, 2014). İstanbul Üniversitesi Yüksek Gerilim Laboratuvarında bu elektrik devresine uygun şekilde hazırlanmış olduğumuz deney düzeneğinin blok şeması Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Bu blok şemada yer alan devre elemanlarını açıklamak gerekirse ;

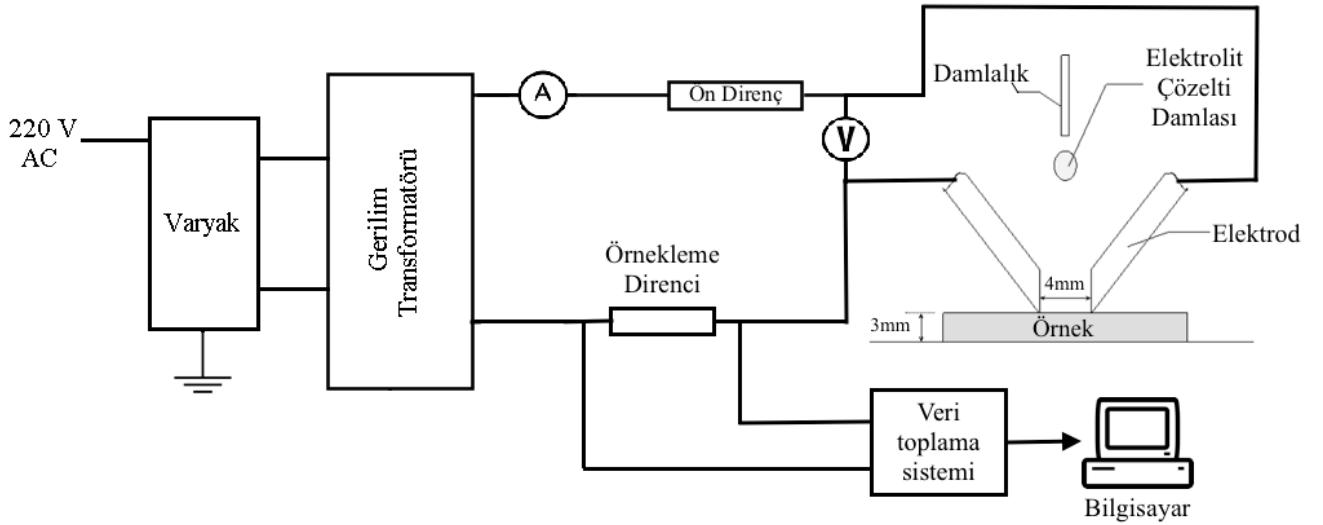
- Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yönteminde numunelere 0 - 600V arası bir gerilim uygulanmalıdır. Numunelere uygulanacak gerilimi ayarlayabilmek için 220 V AC monofaze besleme gerilimi ile çalışan bir adet varyak kullanılmıştır.

Kullanılan bu varyak üzerindeki ayar kolunun durumuna göre 0 ile 250 V arasında çıkış gerilimi vermektedir. Kullanmış olduğumuz bu varyağın gücü 1 kVA'dır.

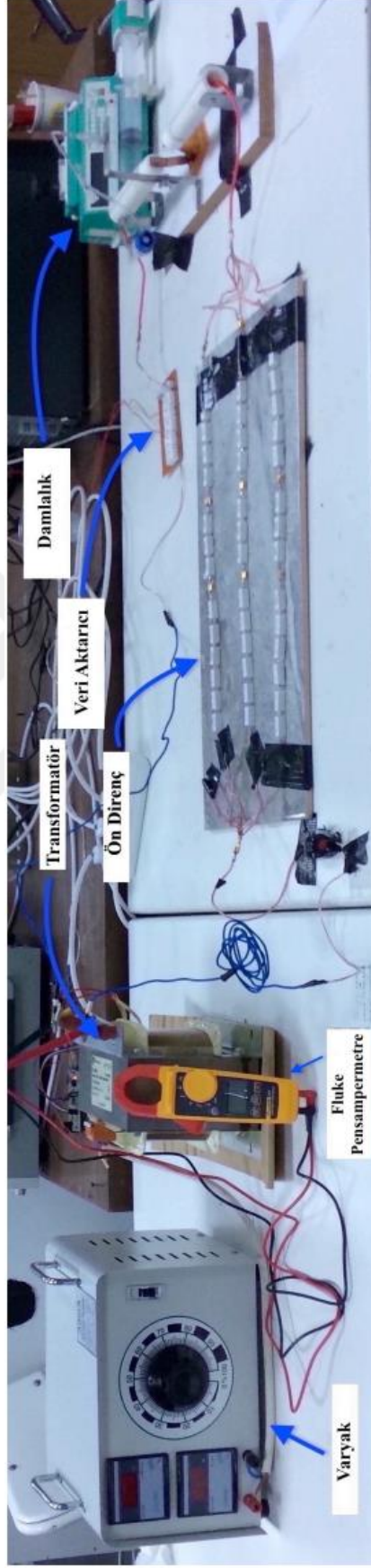
- Hazırlanan bu deney düzeneğinde 1 kVA gücünde tek fazlı transformatör kullanılmıştır. Kullanmış olduğumuz transformatör 220/1000 V dönüştürme oranına sahiptir ve varyak çıkışından aldığı gerilim düzeyini yaklaşık olarak 4.55 katına yükseltmektedir.
- Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi standardında kısa devre akımının 1 ± 0.1 A olması gerektiği belirtilmektedir. Bu koşulu sağlayabilmek için değişken dirence sahip bir ön direnç paketi oluşturulmuştur. Bu direnç paketinin değeri, numuneye uygulanan gerilime göre değiştirilerek kısa devre akımının istenilen sınırlarda olması sağlanmıştır.
- ASTM D5288 standardında güç kaynağının çıkışını ölçmek için 0-600V gerilim aralığını maksimum %0.5 hata oranı ölçebilecek özellikte bir voltmetre kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Hazırlanmış olduğumuz deney düzeneğinde varyak aracılığıyla transformatör çıkışına ayarlanan gerilim seviyesini görüntüleyebilmek için 0-600V arası gerilim ölçme yeteneğine sahip bir voltmetre kullanılmıştır. Ayrıca transformatör çıkışındaki gerilim seviyesi %0.1 hata oranı ile ölçüm yapan bir enerji analizörü ile izlenmiş ve her 2 s'de bir analizörün bellek kartına kayıt edilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.7'de enerji analizörünün deney düzeneğine bağlantısı gösterilmiştir. Burada enerji analizörünün pens probu ile deney devresinden geçen akım ölçülürken kısaçaklı problemler aracılığıyla ise transformatör çıkışındaki gerilim seviyesi ölçülmektedir. Şekil 3.8'de deney sırasında ölçüm alan enerji analizörü gösterilmiştir.
- Enerji analizörünün bellek kartına kayıt ölçüm aralığının 2 saniye olması kaçak akım verilerinin detaylı değerlendirmesi için yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, deney sırasında numune yüzeylerinden kaçak akım verileri 48000 örnek/saniye ile ölçülmüş ve bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır.



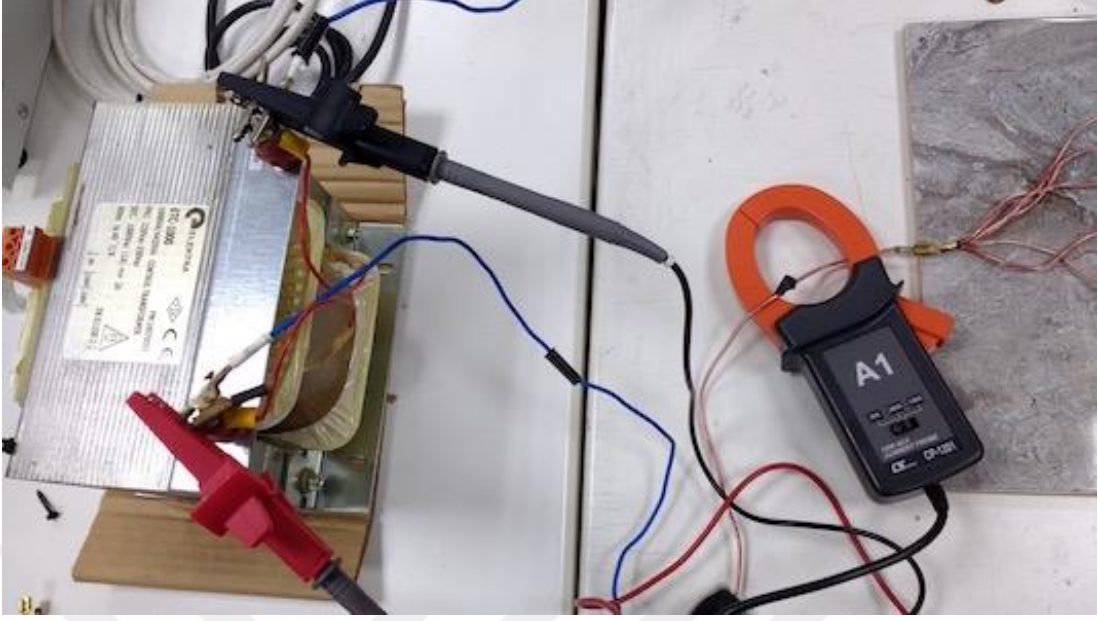
Şekil 3.4: ASTM D5288 standardında verilen elektriksel deney devresi (ASTM D5288-14, 2014).



Şekil 3.5: İstanbul Üniversitesi YG Laboratuvarında kurulan deney düzeneğinin blok şeması.



Şekil 3.6: İstanbul Üniversitesi YG Laboratuvarında kurulan CTI deney düzeniği.



Şekil 3.7: Enerji analizörünün deney düzeneğine bağlantısı.



Şekil 3.8: Deneysel sırasında alınan ölçümlerden bir fotoğraf.

3.2.1.4. TPU Deney Numunelerinin Hazırlanması

ASTM tarafından karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemi için belirlenen standartlarda tipik deney numuneleri 50 veya 100 mm çapında disk şeklinde olması önerilir (ASTM D5288-14, 2014). Fakat IEC 60112 CTI deney standardında numune yüzeyinin minimum 20x20 mm boyutlarında olması önerilir (IEC, 2009). Bu iki standart tarafından belirlenen bu kriterin temel amacı deney sırasında, numunenin kenarlarından sıvı akışını engelleyecek boyutlara sahip olmasını sağlamaktır. Her iki kuruluş tarafından numune kenarlarından elektrolit sıvı kaybı ihtimalini azaltmak için deney alanından çok daha büyük numune boyutları önerilmiştir. Deney numunelerinin kalınlığı ASTM D5288 standardında minimum 2.5 mm'ken IEC 60112 standardında minimum 3 mm'dir (ASTM D5288-14, 2014 ; IEC, 2009). IEC 60112 standardına göre eğer deney numunesinin kalınlığı 3 mm'nin altında olursa deney sonucunda elde edilen CTI değerinin kalınlığı 3 mm ve üzerinde olan numunelerle elde edilen CTI değeri ile uyumsuz olacağı belirtilmiştir. Bu uyumsuzluğun sebebi 3 mm altındaki numunelerle destekleyici cam yüzey arasındaki ısı transferinin daha fazla olacağı olarak açıklanmıştır (IEC, 2009). Deney numunelerinin yüzeyi deney sonuçlarının tekrarlanabilirliği için hayati önem arz etmektedir. Bu sebeple numuneler pürüzsüz ve dokusuz yüzeylere sahip olmalıdır. Numune yüzeyleri çizik, kir ve leke gibi kusurlar barındırmamalıdır. Aksi takdirde numune malzemesinin standardı belirlenemeyecektir. Numune yüzeyi ile ilgili belirtilen bu kusurların her biri, numune yüzeyinde farklı karakteristikler ortaya koyarak elde edilen sonuçları etkileyecektir. Bu sebeple, hazırlanan numunelerin mümkün olduğunca kusursuz ve her bir numunenin diğer numunelerle eşit olması sağlanmalıdır. Eğer deneyler aynı numune üzerinde gerçekleştirilmek isteniyorsa, önceden denenilen alandan minimum 25 mm uzaklıkta bir alana elektrotlar konumlandırılarak deney aynı numune üzerinde tekrarlanabilir. Fakat numunenin seçilen bu kısmının önceki deneyden etkilenmediğinden emin olunmalıdır (ASTM D5288-14, 2014).

Bütün numuneler aynı laboratuvar koşulları altında hazırlanmıştır. Poliüretan bazlı dolgu malzemesinin A komponenti (Reçine) ile %0.01 oranında Di butyltin dilaurate katalist eklenmiş ve 5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karışım etüvde 100 °C'ye ısıtılmış ve % 25 polimerik (methylenediphenylene diisocyanate) MDI eklenmiştir. Hazırlanan karışım 9 mm kalınlığa sahip 360 x 100 mm boyutlarında kalıba dökülmüş, kalıp mangelere vasıtasıyla 10

dakika preslenmiştir. Kalıp 5,5hp'lik vakum pompası vasıtasıyla vakumlanmış vakum odası içinde 0,01 atm vakum altında kalıp 1 saat bekletilmiştir. Kalıplanan numune 24 saat bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve 120 x 50 x 9 mm boyutlarında kesilmiştir. Şekil 3.9'da hazırlanan numenin fotoğrafı gösterilmiştir. Hazırlanan bu numunelerin yüzeyi, deneyden en az 24 saat önce etil alkol ile temizlenmiş ve etüv içerisinde oda sıcaklığında kurutulmuştur.



Şekil 3.9: Laboratuvar şartlarında hazırlanan numune.

3.2.2. Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi Deneyinin Uygulanma Prosedürü

Karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deneyleri hava akımı almayan temiz bir ortamda yapılmalıdır. Deneylerin yapıldığı ortamın sıcaklığı 25 ± 5 °C olmalıdır. Numune destek platformu üzerine konulur ve elektrotlar arası mesafe 4 ± 0.1 mm olacak şekilde ayarlanır. Elektrotların sivri ucu numune yüzeyine temas ettirilmelidir. Gerilim kaynağı ile numuneye uygulanmak istenilen gerilim değeri ayarlanır ve kısa devre anahtarı ile damlatma cihazı açılır. Damlatma cihazı numune yüzeyine 30 ± 5 saniye aralıklarla elektrolit damlası düşürecek şekilde ayarlanmış olmalıdır.

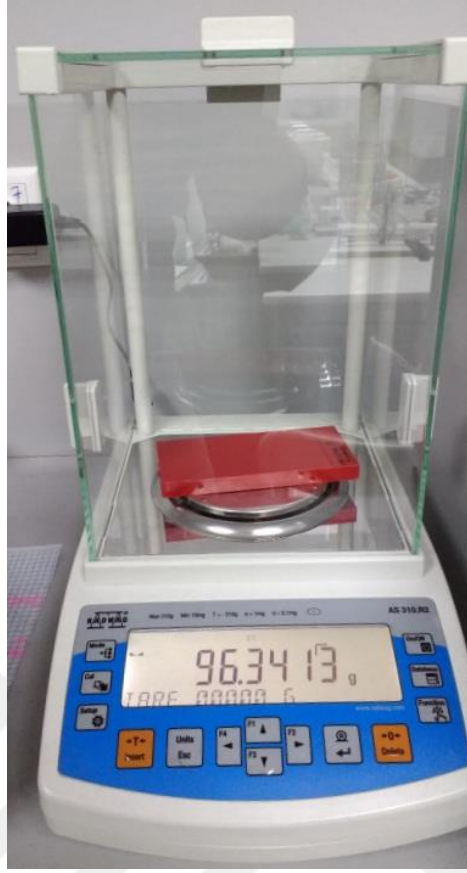
Deney iz oluşumu hatası gerçekleşene kadar veya herhangi bir hata gerçekleşmeden numune yüzeyine 50 damla düşene kadar devam ettirilir. Bu deney 600 V gerilim değerinin üzerinde uygulanmaz. 600 V gerilim değerinin üzerindeki gerilim seviyeleri çözelti ile beraber oluşan nemli şartlarında etkisiyle, elektriksel boşalmanın hava üzerinden oluşmasına sebep olacaktır ve bu durum deneyin sağlıklı sonuçlar vermesini engelleyecektir (ASTM D5288-14, 2014 ; IEC, 2009). Deneyin uygulandığı gerilim değerinin bir alt sınırı yoktur. Fakat düşük gerilim

seviyelerinin enerji miktarı gerekli sürede (iki damla arasında geçen süre) numune yüzeyindeki elektrolit çözeltiyi buharlaştırmak için yetersiz kalabilir. Yani düşük gerilim seviyeleri numune yüzeyinde çözelti birikmesine sebep olabilir. Bu durum deneyin düzgün bir şekilde uygulanmasına engel olacaktır. Eğer bu durum gerçekleşirse, deneye devam edilmez (ASTM D5288-14, 2014).

Bu deney için IEC 60112 ve ASTM D5288 standartlarında şu iki durumdan herhangi biri gerçekleşirse iz oluşumu hatası olarak kabul edilir (ASTM D5288-14, 2014 ; IEC, 2009).

- Numune yüzeyinde kalıcı bir yanmanın oluşması
- Elektrotlar arasından akan kaçak akımın 2 saniyeden kısa olmamak üzere 0.5 A veya üzerinde bir değerde akması

Fakat bazı numunelerde en yüksek gerilim değerinde bile iz oluşumu hatası meydana gelmez. Fakat elektrotlar arasında ardışık olarak tekrar eden boşalma olayları elektrotlar arasında kalan yüzeyde erozyona sebep olur. Bu oluşan erozyonun miktarının belirlenebilmesi için yüzeyde oluşan izin derinliği ve numunenin ağırlık kaybı ölçülebilir. Bu çalışmada, numunelerin ağırlığı deney öncesinde ve deney sonrasında 0.1 mg hassasiyete sahip analitik terazi ile ölçülerek numunelerin ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Şekil 3.10'da deney sonrasında analitik terazi ile numunenin ağırlık ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Analitik terazi ile deney sonrası numune ağırlık ölçümü.

3.3. YİNELEME HARİTALARI ANALİZİ

Yineleme Haritaları (Recurrence Plot-RP) analizi, zaman serilerinin aperiyojiklik derecesini tanımlamak için kullanılan bir yöntemdir (Du, 2011). Bu yöntem ile bir zaman serisindeki yinelemeli durumlar grafiksel olarak sunulabilir. Doğal olaylar belirgin yinelemeli davranışlara sahip olabilir. Periyodik özellikler gösteren yapılar en temel yinelemeli davranışlardan birisidir. Dinamik sistemlerin yapılarındaki dinamiklerdeki yinelemeler yineleme haritaları yöntemi kullanılarak basit ve kullanışlı şekilde görselleştirilebilir. Bu yöntem, dinamik bir sistemin analizi için ilk olarak Eckman ve arkadaşları tarafından 1987 yılında yapmış oldukları çalışmada sunulmuştur (Eckman, 1987).

Bu yöntemin asıl amacı yüksek boyutlu faz uzayına sahip dinamik sistemlerin içerisindeki lineer olmayan ve kaotik davranışları kolayca ortaya çıkarabilmektir. Aksi takdirde, yüksek boyutlu faz uzayında yer alan dinamikleri görselleştirmek çok karmaşıktır (Eckman 1987;

Marwan, 2008; Webber 2015). Yineleme haritaları analizi ile m -boyutlu faz uzayı içerisinde yer alan yinelemeleri, 2 boyutlu bir harita ile incelememizi sağlar.

Dinamik sistemler çok değişkenli sistemlerdir, ve bu sistemlerin tüm değişkenlerine ait bilgileri toplamak ve modellemek çok zordur. Ayrıca toplanan bu verilerin hepsinin eş zamanlı olarak kayıt edilmesi gerekmektedir. Bu durum veri toplanmasını daha da karmaşıklştırmaktadır. Bunun yanında, çok değişkenli bir dinamik sistemde, sistemin genel karakteristiğini ortaya çıkarmak için toplanması yeterli olacak değişken sayısını tahmin etmekte zordur. Dinamik sistemlerin modellenmesi aşamasında tek bir değişkene ait zaman serisinden sistemin genel karakteristiği tanımlanabilir. Tek bir değişkene ait zaman serisi kullanılarak sistemin genel karakteristiğini tanımlayan yöntem “Gömme Uzay Tekniği” denir (Çelik, 2010). Gömme uzay tekniğinde, sistemin genel karakteristiğini ortaya çıkarmak amacıyla tek bir değişkene ait zaman serisi kullanılır. Bu yöntemde, tek boyutlu tek değişkenli zaman serisi, bu zaman serisinde yer almayan diğer tüm değişkenlere ait bilgileri içerir (Çelik,2010).

Yineleme haritaları analizinin temeli Takens tarafından 1981 yılında sunulan gömme uzay tekniğine (Embedding Theorem) dayanmaktadır (Takens, 1981). Takens tarafından sunulan Gömme Teoremi baz alınarak bir zaman serisi yeniden şu şekilde oluşturulur (Du, 2011).

$$X_{(i)} = [x(i), x(i + \tau), \dots, x(i + (m - 1)\tau)], i = 1,2,3, \dots \quad (3.1)$$

Bu denklemde;

$x(i)$: Zaman serisi

$X_{(i)}$: Gömme Vektör (Embedding Vector)

m : Gömme boyutu (Embedding Dimensiom)

τ : Gecikme zamanıdır.

Bir zaman serisinin yeniden yapılandırılmasıyla gömme vektör elde edilirken m ve τ 'un seçimi çok önemlidir. Gecikme zamanı(τ) 'nın kestirimi için ortak bilgi (mutual information) fonksiyonundan faydalanırken, gömme boyutu m 'in kestirimi için yanlış en yakın komşular (false nearest neighbors) yönteminden faydalanılır (Webber, 2015).

Ortak bilgi fonksiyonu, iki zaman serisinin içermiş olduğu bilgilerin ortak kümesini hesaplar. Bu fonksiyon, faz uzayına gömülecek zaman serisinin uygun gecikme zamanının bulunması için Fraser ve arkadaşları tarafından 1986 yılında geliştirilmiştir (Fraser, 1986). Eğer bu zaman serilerinin birbirleri ile bağıntısı yok ise, yani bu iki zaman serisi bağımsız ise, ortak bilgi değeri sıfırdır. Bu çalışmada, ortak bilgi fonksiyonu hesaplanırken zaman serisi $x(t)$ ve onun geciktirilmiş hali $x(t+\tau)$ kullanılmıştır. Hesaplama yapılırken gecikme zamanı sıfırdan başlanarak birer birer artırılmış ve her gecikme zamanı için ortak bilgi fonksiyonu çizilmiştir. Gecikme zamanının artırılmasıyla fonksiyonun değeri önce azalmakta, daha sonra ise belli bir noktada artmaya başlamaktadır. Bu çizilen grafikte fonksiyonun değerinin ilk kez minimum olduğu noktadaki gecikme zamanı gömme uzayı için en uygun değerdir (Çelik, 2010). Gecikme zamanının belirlenmesi için kullanılan ortak bilgi fonksiyonu matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir (Fraser, 1986 ; Webber, 2015);

$$I(\tau) = - \sum_{\varphi, \psi} p_{\varphi, \psi}(\tau) \log \frac{p_{\varphi, \psi}(\tau)}{p_{\varphi} p_{\psi}} \quad (3.2)$$

Bu fonksiyonda;

$\varphi = u(i)$, zaman serisini,

$\psi = u(i+\tau)$, zaman serisinin gecikmiş halini

$p_{\varphi, \psi}(\tau)$ = bileşik olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonunu,

$p_{\varphi} = p_{u_i}$, zaman serisinin olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonunu,

$p_{\psi} = p_{u_{i+\tau}}$, zaman serisinin gecikmiş halinin olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonunu gösterir.

Ortak bilgi fonksiyonu kullanılarak gecikme zamanı (τ) hesaplandıktan sonra yanlış en yakın komşular yöntemi kullanılarak gömme boyutu hesaplanır. Bu yöntem 1992 yılında Kennel ve arkadaşları tarafından minimum gömme boyutunun hesaplanması için sunulmuştur (Kennel, 1992). Bu yöntem ile, ortak bilgi fonksiyonuyla belirlenen gecikme zamanı (τ) değeri için minimum gömme boyutu değeri hesaplanır. Hesaplanan bu değerden başlayarak farklı boyutlar için elde edilen değerlerde hala en yakın komşular olup olmadığını hesaplanır.

Gömme boyutu artırıldıkça hesaplanan en yakın komşuluk değerinin minimum değerini aldığı boyut değeri, gömme boyutunun değeri için en uygun olduğu değerdir.

Zaman serisinin gömme boyutu (m) ve gecikme zamanının (τ) hesaplanmasıyla Takens'ın gömme teoremine göre zaman serisi yeniden oluşturularak bir vektör elde edilir. Daha sonra, yineleme haritası matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilen matris ile çizilir.

$$R_{i,j} = H\left(\varepsilon - \|X_{(i)} - X_{(j)}\|_2\right), X_i, X_j, \in R^m, i, j \in (1, M) \quad (3.3)$$

Bu formülde;

ε : önceden tanımlanan bir eşik değeri,

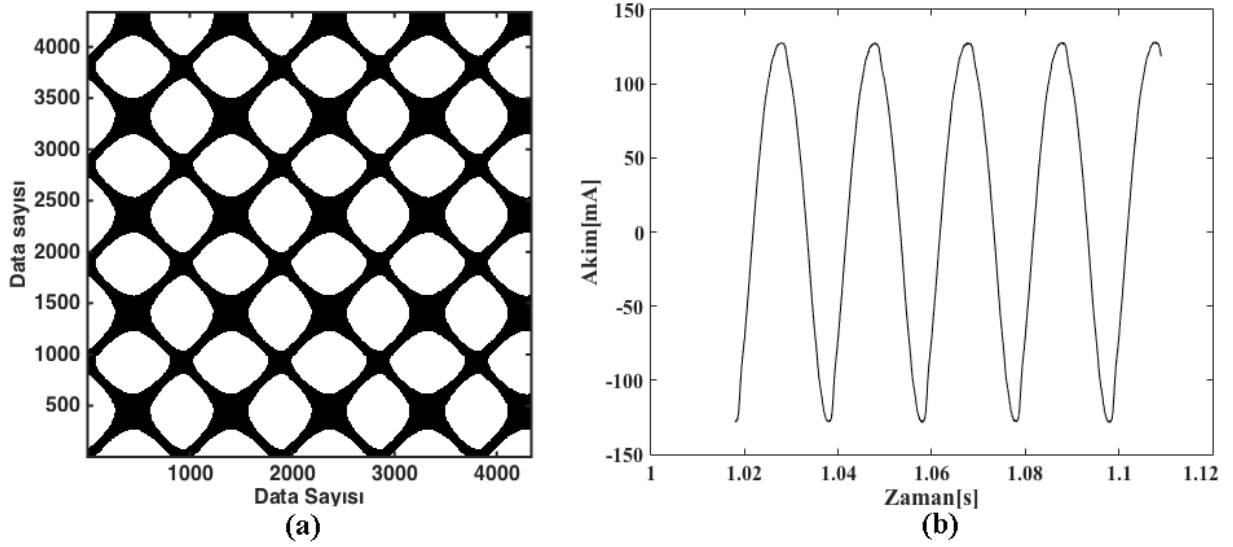
$\| \cdot \|$: maksimum, öklid yada manhattan normu,

M : zaman serisinden oluşturulan $X_{(i)}$ vektörlerinin sayısı,

$H(x)$: birim basamak fonksiyonu (Heaviside fonksiyonu)'dur.

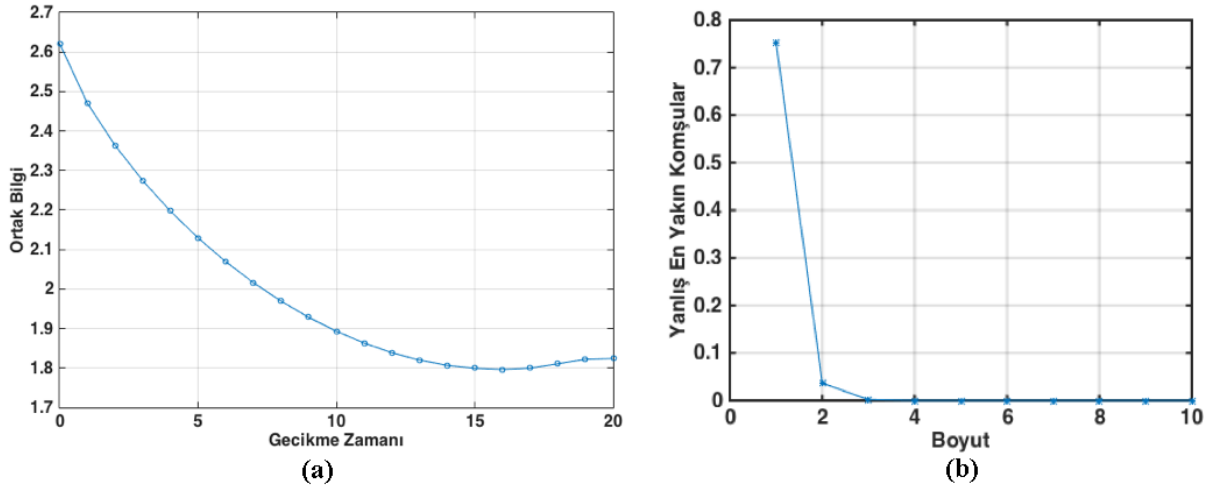
Yukarıda matematiksel olarak ifade edilen matriste, birim basamak fonksiyonu sonucunun 1 değerini aldığı nokta siyah ile işaretlenirken, bu fonksiyonun 0 değerini aldığı nokta beyaz ile işaretlenir. Yineleme haritaları analizi için eşik değerinin (ε) seçimi çok önemlidir. Eğer bu eşik değeri çok küçük seçilirse harita üzerinde alakasız noktalar oluşacaktır. Aksine eğer eşik değeri çok büyük seçilir ise bu seferde zaman serisinde yer alan işe yarar bilgiler kaybolacaktır (İspirli, 2016). Literatürde, eşik değeri (ε) seçimi üzerine bazı çalışmalar bulunmaktadır (Atay, 1999; Thiel, 2002; Thiel, 2003; Matassini, 2002). Fakat eşik değerinin seçimi için hala ortak bir kanı yoktur. Eşik değerinin seçimi deneysel şartlara ve uygulamaya bağlı olmasının yanı sıra olabildiği kadar küçük seçilmesi arzu edilir (Webber, 2015).

Sınıflandırma amacıyla ve sinyallerin arasındaki farkların algılanması için yapılan çalışmalarda sinyalin standart sapmasından faydalanılabilir. Eşik değerinin seçiminde, sinyalin standart sapmasının (σ) %20 ile %40 arasında bir değer seçilmesinin uygun olduğu belirtilmiştir (Webber, 2015). Şekil 3.11'de sinüzoidal bir zaman serisinin yineleme haritası örneği gösterilmiştir. Bu hesaplamada, eşik değeri (ε) sinüzoidal zaman serisinin standart sapmasının %40'ı olarak seçilmiştir. Aynı zamanda bu yineleme haritası periyodik yineleme haritasına iyi bir örnektir.



Şekil 3.11: a) Sinüsoidal zaman serisinin yineleme haritası b) Sinüzoidal zaman serisi.

Analizi yapılan bu sinüzoidal zaman serisi, 50 Hz frekansa ve $40 V_{rms}$ genlik değerine sahip bir gerilim kaynağı ve 400Ω rezistif yük direnci ile kurulan bir devrenin ana kolu üzerinden geçen AC akım işareti kayıt edilerek elde edilmiştir. Bu işaretin yineleme haritaları analizi yapılırken, ortak bilgi fonksiyonundan $\tau = 16$ ve yanlış en yakın komşular yönteminden $m=3$ olarak alınmıştır. Bu hesaplamalar sonucu elde edilen ortak bilgi fonksiyonu ve yanlış en yakın komşular yönteminin sonucu elde edilen değerleri gösteren grafikler şekil 3.12(a) ve şekil 3.12(b)'de sırasıyla gösterilmiştir. Bu grafiklerde açıkça görülmektedir ki, ortak bilgi fonksiyonunun ilk kez minimum olduğu noktanın değeri 16'dır. Bu değer kullanılarak hesaplanan en yakın yanlış komşular yönteminin değeri ilk kez minimum olduğu nokta 3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.12: a) Sinüsoidal zaman serisinin ortak bilgi fonksiyonu değeri b) Sinüs zaman serisinin yanlış en yakın komşular yöntemine göre hesaplanan değeri.

3.3.1. Yineleme Haritalarının Nicel Analizi

Yineleme haritaları yöntemi dinamik sistemlerin içerisinde yer alan dinamikleri ve yinelemeli durumları ifade eden kullanışlı bir yöntemdir. Bazı sistemlerde, sistemin dinamiklerini tanımlayabilmek için yineleme haritasının yineleme noktaları açık şekilde baskınken, bazı sistemlerde ise bu durum bu kadar açık olmayabilir. Bu gibi sistemler için yapılan analizlerde, araştırmacılar yineleme haritası içerisinde yer alan yapıları ve desenleri yorumlamakta zorlanabilir. Hatta aynı yineleme haritası için farklı araştırmacılar farklı değerlendirmeler yapabilirler (Webber, 2015). Metodolojinin nesnellüğünün sağlanabilmesi için, Zbilut ve Webber tarafından 1990'lı yıllarında başlarında, yineleme haritalarının dinamiklerini ölçmek için bazı prosedürler ve tanımlamalar yayınlanmıştır (Zbilut, 1992; Webber; 1994; Zbilut, 2007). Webber ve arkadaşları yapmış oldukları bu çalışmada yineleme haritalarında yer alan diyagonal çizgilere dayanan bazı parametreler tanımlamışlardır. Geliştirmiş oldukları bu yönteme, yineleme haritalarının nicel analizi (Recurrence Quantification Analysis) adını vermişlerdir (Webber, 2015).

Yineleme haritalarının nicel analizinde tanımlamış oldukları ilk parametre yinelemenin yüzdesi (percent recurrence - REC) veya yineleme oranı (recurrence rate - RR)'dır. Bu analiz farklı kaynaklarda farklı terimlerle kullanılmasına rağmen temelde aynı teoriye dayanmaktadır. Bu parametre temelde basit bir sayma işlemidir. Bu parametre, yineleme haritasındaki yineleme noktalarının yoğunluğunun oranını ifade eder. Bir yineleme haritasının yineleme oranı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir (Webber, 2015);

$$RR(\varepsilon, N) = \frac{1}{N^2 - N} \sum_{i \neq j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} \quad (3.4)$$

Burada;

ε : zaman serisinin eşik değeri

N : zaman serisinden oluşturulan $X_{(i)}$ vektörlerinin sayısıdır.

Yineleme haritalarının nicel analizinde tanımlanmış oldukları ikinci parametre belirlenim (DET) oranıdır. Yineleme haritaları analizinde determinist dinamiklere sahip sistemler yinelemeli özellikler gösteren diyagonal çizgilerle ifade edilmektedir. Periyodik özellikler gösteren bir sistem için diyagonal çizgiler uzunken, aksine kaotik özellikler gösteren bir sistem için diyagonal çizgiler kısadır. Stokastik özellikler gösteren sistemlerde ise diyagonal çizgiler bulunmaz. DET ile dinamik bir sistemin tahmin edilebilirlik oranı belirlenebilir. Eğer bir sistemin DET değeri yüksekse, bu sistem kaotik süreçlerden ziyade periyodik süreçler içerdiği yorumu yapılabilir. Fakat unutulmamalıdır ki, DET oranı bir sistemin determiniziminin tanımlanması için kesin bir anlam ifade etmemektedir (Webber, 2015). Bir yineleme haritasının belirlenim yüzdesi matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir (Marwan, 2007).

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l \cdot P(l)}{\sum_{i \neq j=1}^N R_{i,j}} \quad (3.5)$$

Burada;

$P(l)$: diyagonal çizgilerin uzunluklarının frekans dağılımını,

l : diyagonal çizgilerin uzunluğudur.

Bölüm 3.3'ün sonunda sinüzoidal bir işaretin yineleme haritaları analizini yapmıştık. Bu sinüzoidal işareti, yineleme haritalarının nicel analizi ile analiz ettiğimizde ise RR değeri 0.3462 ve DET değeri ise 0.9999 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.11'de verilen bu sinüzoidal işaretin yineleme haritasında uzun diyagonal çizgiler görülmektedir. Yineleme haritasında bu denli uzun diyagonallerin gözlenmesinin sebebi işaretin periyodik bir işaret olmasıdır. Bu işaret için, yineleme haritalarının nicel analizi ile hesaplanan belirlenim oranı 0.9999 gibi yüksek bir değer çıkmasının sebebi ise bu işaretin bir periyodik işaret olmasıdır.

3.3.2. Literatürde Kaçak Akım Verilerinin Analizinde RP Kullanımı

Yineleme haritaları analizi jeoloji, finans, sağlık, biyomedikal vb. bir çok farklı alanda lineer olmayan sistemlerin analizi için sıklıkla kullanılmaktadır. Polimerlerin yüzeyinde meydana gelen bozulma sonucu akan yüzeysel kaçak akımlar kaotik işaretlerdir. Bu yüzeysel akımlar karmaşıklık, düzensizlik ve lineer olmama gibi kaotik işaretlere özgü özelliklere sahip işaretlerdir. Son yıllarda bir çok çalışmada, iz oluşumu sürecinde polimerlerin yüzeyinden akan kaçak akımları analiz etmek için yineleme haritaları analizi kullanılmıştır (Du, 2008a; Du, 2008b; Du, 2009; Du, 2011; Du, 2012; Du, 2014; Ersoy Yılmaz, 2018; İspirli, 2016; Liu, 2010; Reddy, 2016). Bu başlık altında, literatürde yüzeysel kaçak akımları incelemek için yineleme haritaları yönteminin kullanıldığı çalışmalardan bahsedilecektir.

Du ve arkadaşları 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada PBT ve PBN numunelere gamma-ray ısınmasının etkisini incelemek için yineleme haritaları yönteminden ve yineleme haritalarının nicel analizinden yararlanmışlardır. Yapılan bu analizler sonucunda, PBT numuneden elde edilen kaçak akımların analizi sonucunda elde edilen yineleme haritalarında gamma-ray ısınmasının değerinin artması ile yineleme noktalarının yoğunluğunun azaldığını, aksine PBN numuneden elde edilen kaçak akımlardan elde edilen yineleme haritalarında ise gamma-ray ısınmasının artmasıyla yineleme noktalarının yoğunluğu arttığını belirtmişlerdir. Yineleme haritalarının nicel analizi ile elde edilen sonuçlarda ise PBT için gamma-ray ısınmasının artmasıyla RR ve DET oranlarının her ikisinde azalırken, PBN için ise gamma-ray ısınmasının artmasıyla RR ve DET oranlarının her ikisinde arttığını belirtmişlerdir. PBN'in iz oluşumu direncinin artmasını, PBN numunede radyasyonun çapraz bağlanmayı oluşturması ile açıklamışlardır (Du, 2008b).

Du ve arkadaşları 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada PBT ve PET numunelere gamma-ray ısınmasının etkisini incelemek için yineleme haritaları yönteminden ve yineleme haritalarının nicel analizinden yararlanmışlardır. Bu çalışmada, numunelere uygulanan gerilim seviyelerinden, PBT için 375 V ve PET için 450 V AC gerilim seviyelerinde numune yüzeyinden elde edilen kaçak akımları yineleme haritaları yöntemi ile incelemişlerdir. Bu çalışmada, (Du, 2008b)'de verilen çalışmadan farklı olarak uygulanan gerilimin AC olmasından dolayı, kayıt edilen kaçak akım verilerinden 50 Hz temel bileşeni ayırtmışlardır. Bu ayırttırma işlemi için dalgacık dönüşümünden yararlanmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, PBT numune için 375 V gerilim seviyesinde, gamma-ray ışına

miktarının artmasıyla yineleme noktalarının yoğunluğunun azaldığını belirtmişlerdir. Buna karşın, PET numune için 450 V gerilim seviyesinde, gamma-ray ışıma miktarının artmasıyla yineleme noktalarının yoğunluğu artmıştır (Du, 2008a).

Du ve arkadaşları 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada epoksi numunelere %5 ve %7 oranında nano boyutta MgO partikülleri katkılanmışlardır. Hazırlamış oldukları bu numunelere 600, 700 ve 800 V gerilim uygulayarak IEC 60112 standardına uygun şekilde hazırlamış oldukları deney düzeneğinde denemişlerdir. Bu deneyler sırasında numune yüzeyinden kayıt ettikleri kaçak akımları yineleme haritaları yöntemi ve yineleme haritalarının nicel analizi ile incelenmişlerdir. Yineleme haritaları yöntemi ile analiz yapılırken eşik değeri standart sapmanın 0.25'i olarak alınmıştır. Bu çalışmanın sonucunda artan gerilim ile beraber yineleme nokta yoğunluğunun azaldığını ve beyaz alan yoğunluğunun arttığını belirtmişlerdir. 600 V altında farklı katkı oranları ile yapılan çalışmalarda en yüksek yineleme nokta yoğunluğunun %5 katkılı numunede olduğunu, en yüksek beyaz alan yoğunluğunun ise katkısız numunede olduğunu belirtmişlerdir. Yineleme haritalarının nicel analizi ile elde ettikleri sonuçlarda ise, gerilim seviyesinin artması ile RR ve DET oranı artmıştır. Katkılı numunelerden elde edilen kaçak akımları yineleme haritalarının nicel analizi ile incelediklerinde ise en yüksek RR ve DET oranı %5 katkılı numuneden elde edilen kaçak akımda elde edilirken, en düşük RR ve DET oranını ise katkısız numuneden elde edilen kaçak akımların analizinde elde etmişlerdir. (Du, 2014).

Du ve arkadaşları 2009 yılında yapmış oldukları çalışmada modifiye edilmiş polikarbonat ve polietilen numunelerin iz oluşumu direncine gamma-ray ısınmasının etkisini incelemek için yineleme haritaları analizinden ve yineleme haritalarının nicel analizinden yararlanmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışmada numunelere 200 V ile 600 V arasında DC gerilim uygulamışlardır. Yapmış oldukları bu çalışmada farklı ışıma miktarlarına maruz kalmış numuneler ile 400 V DC gerilim altında yapılan deneylerde numune yüzeyinden kayıt edilen kaçak akım verileri yineleme haritaları yöntemi ve yineleme haritaları analizinin nicel analizi ile incelenmiştir. Bu analizler yapılırken eşik değeri (ϵ) $0.15 \cdot \sigma$ olarak alınmıştır. Çalışmanın sonucunda, gama-ray ısınmasına maruz kalan numuneler ile maruz kalmamış numunelerin yineleme haritalarının topolojik yapısının farklı olduğunu belirtmişlerdir. Gamma-ray ısınmasına maruz kalmamış numunelerde beyaz alan yoğunluğunun daha fazla olduğunu ve yineleme noktalarında 100 kGy'den 1000 kGy'e doğru arttığını belirtmişlerdir (Du, 2009).

Ersoy Yılmaz ve İspirli 2018 yılında yapmış oldukları çalışmada, UPE numuneleri kirli ortamı modelleyen bir çözelti içerisinde farklı sürelerde bekletmişlerdir. Hazırlamış oldukları bu numuneleri IEC 587 Eğik Düzlem Deney yöntemi ile denemişlerdir. Yapmış oldukları deneyler sırasında kayıt ettikleri kaçak akım verilerini yineleme haritaları yöntemi ile analiz etmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda, UPE numunelerin çözeltide bekleme süresinin artmasıyla yineleme haritasında bulunan yineleme nokta yoğunluğunun azaldığını ve beyaz alan yoğunluğunun arttığını yani numune yüzeyinin elektriksel dayanımının azaldığını belirtmişlerdir (Ersoy Yılmaz, 2018).

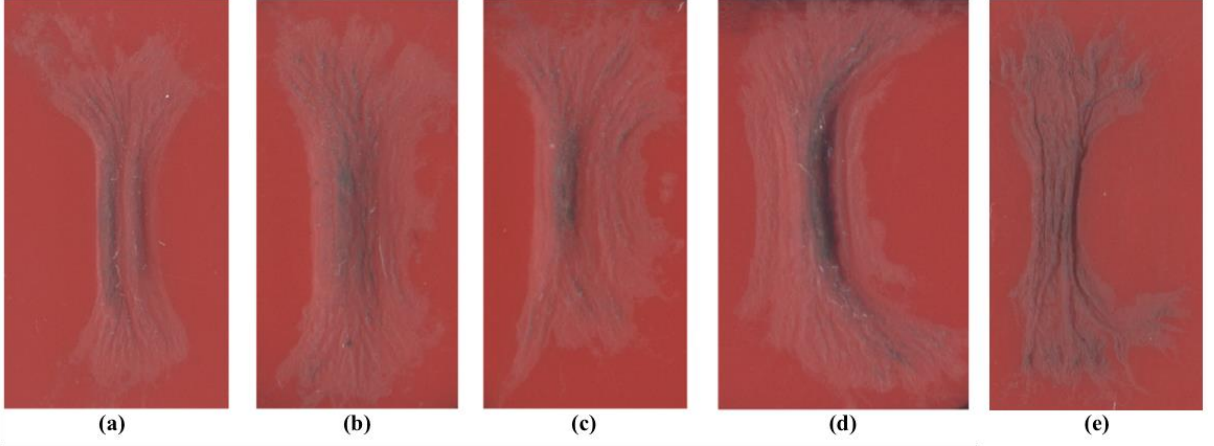
Reddy ve Rajalingam 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada, HTV ve LSR numuneleri IEC 60112 karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemi ile denemişlerdir. Tüm numunelere 600 V AC gerilim altında 120 damla NH_4Cl çözeltisi uygulamışlardır. Bu deneyler sırasında elde ettikleri kaçak akımları yineleme haritaları yöntemi ve yineleme haritalarının nicel analizi yöntemi ile incelemişlerdir. Bu inceleme yapılırken eşik değeri (ϵ) $1.5 \cdot \sigma$ olarak alınmıştır. Bu çalışmada yineleme haritaları yöntemi ile analiz yapılmadan önce, kaçak akımlardan güç frekansının temel bileşeni olan 50 Hz bileşeni ayrıştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, numune yüzeyine düşen damla sayısının artmasıyla yineleme oranının ve belirlenim oranının arttığını belirtmişlerdir. HTV örneğe kıyasla LSR örneğin yineleme oranı ve belirlenim oranı daha yüksek çıkmıştır (Reddy, 2016).

4. BULGULAR

Bu çalışmada yeraltı kablo eklerinde dolgu malzemesi olarak kullanılan PU malzemenin yüzeyde iz oluşumu direnci değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme yapılırken literatürde yalıtım malzemelerinin iz oluşumu direncini değerlendirmek için sıklıkla kullanılan ASTM D5288 CTI deney yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ticari olarak üretilen yalıtım ekipmanlarını deneyen araştırma laboratuvarları tarafından da yaygın şekilde kullanılmaktadır. İstanbul Üniversitesi Yüksek Gerilim Tekniği laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda, bölüm 4.1’de numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayısı, numune yüzeyinden 2 s boyunca 0.5 A ve üstü akımın aktığı damla sayısı, numune yüzeyinde sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayısı ve numune yüzeyine 50 damla düşmesiyle PU numunede meydana gelen ağırlık kaybı verilmiştir. Her gerilim seviyesi için deneyler aynı şartlarda 5 kez tekrarlanmıştır. Bölüm 4.2’de ise deney düzeneğinin toprak elektrotundan kayıt edilen kaçak akım verileri yineleme haritaları yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapılan deneylerde elde edilen bulgular ışığında kablo eklerinde dolgu malzemesi olarak kullanılan PU reçinenin yüzeyde iz oluşumu performansı değerlendirilmiştir.

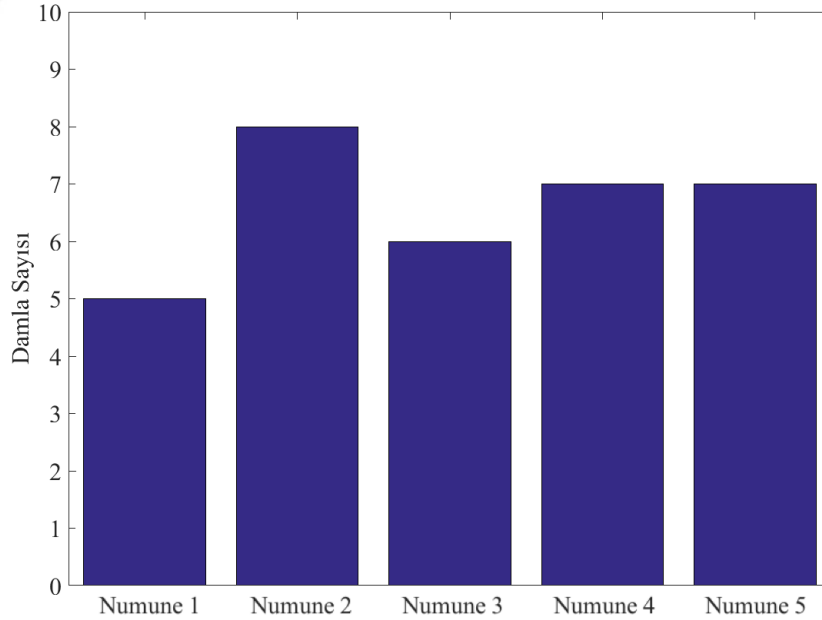
4.1. KARŞILAŞTIRMALI YÜZEYSEL BOŞALMA İNDEKSİ (CTI) DENEY SONUÇLARI

Çalışmanın bu kısmında laboratuvar şartlarında hazırlanan PU numuneler hazırlanan deney düzeneğinde 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim streslerine maruz bırakılmıştır. Standartta belirtilen kısa devre akımı şartının sağlanabilmesi için, ön direnç paketi kısa devre akımı 1 A olacak şekilde her gerilim seviyesi için uygun değere ayarlanmıştır. Şekil 4.1’de 600 V gerilim stresine maruz kalmış numunelerin, yüzeyine 50 damla düşmesi sonucu yüzeyinde oluşan karbon izler verilmiştir. Numunelerin yüzey taramalarından da görüldüğü üzere tüm PU numunelerin yüzeyinde 50 damla sonucunda iz oluşumu gözlemlenmiştir. Bu şekil 4.1’de verilen yüzey taramalarının hepsinde sol taraf yüksek potansiyel elektrotu iken sağ taraf toprak elektrotudur.



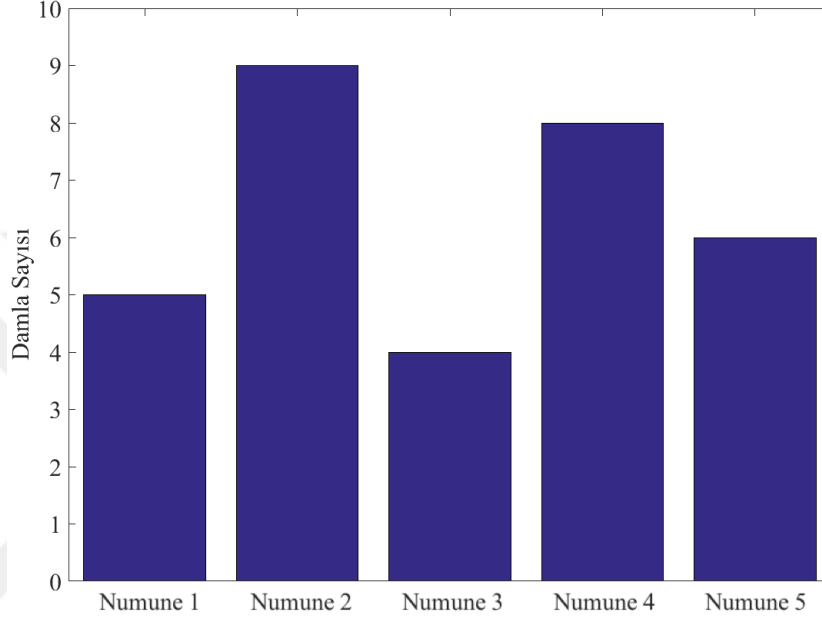
Şekil 4.1: 600 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları a) Numune 1; b) Numune 2; c) Numune 3; d) Numune 4; e) Numune 5.

600 V gerilim uygulanmış bu PU numunelerde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları şekil 4.2’de verilmiştir. Numune 1’de 5. damlanın, numune 2’de 8. damlanın, numune 3’de 6. damlanın, numune 4 ve numune 5’de 7. damlanın numune yüzeyine düşmesinin ardından PU numune yüzeyinde karbonlaşma ve iz oluşmaya başlamıştır. PU numunelere 600 V gerilim uygulanması sonucu numunelerde ilk 10 damla içerisinde karbonlaşma gözlenmiştir.



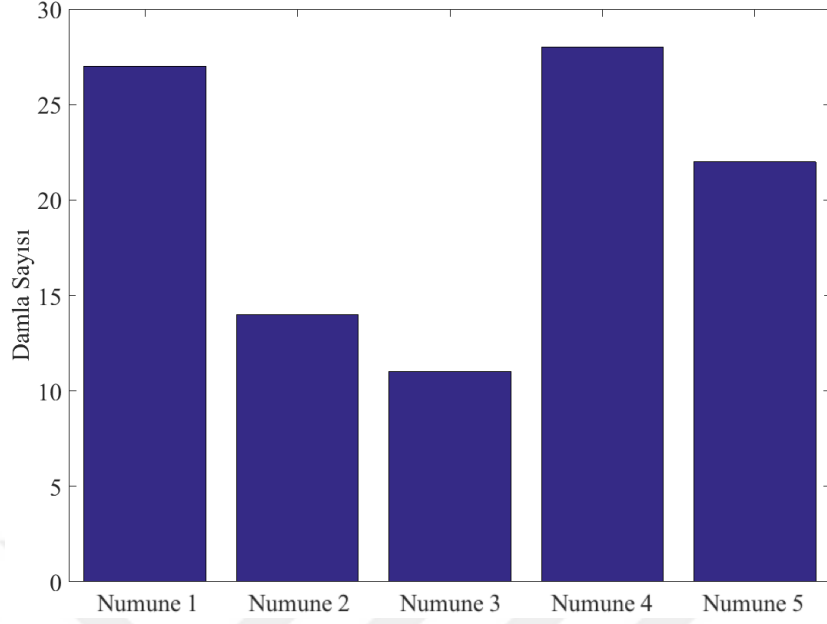
Şekil 4.2: 600 V gerilim değerinde numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları.

600 V gerilim altında numune yüzeyinin yeterli kirlilik seviyesine ulaşması sonucu numune yüzeyinden akan sürekli kaçak akımların başladığı damla sayısı Şekil 4.3’de verilmiştir. Kayıt edilen kaçak akım verilerine göre numune 1’de 5. damlanın, numune 2’de 9. damlanın, numune 3’de 4. damlanın, numune 4’te 8. damlanın ve numune 5’de 6. damlanın numune yüzeyinden buharlaşmasıyla numune yüzeyinde boşalmalar oluşmaya başlamıştır.



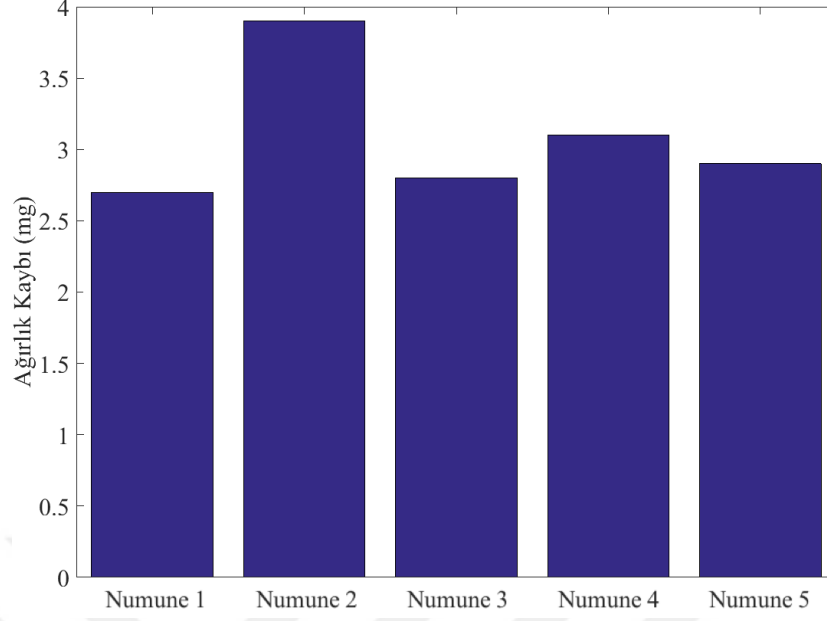
Şekil 4.3: 600 V gerilim değerinde numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları.

600 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinden ilk kez 2 s boyunca 0.5 A ve üzeri akım aktığı damla sayıları Şekil 4.4’de verilmiştir. Burada numune 1’de 27. damlanın, numune 2’de 14. damlanın, numune 3’te 11. damlanın, numune 4’de 28. damlanın ve numune 5’te ise 22. Damlanın numune yüzeyine düşmesiyle elektrotlar arasında kalan numune yüzeyinden 2 s boyunca 0.5 A ve üzeri akım akmıştır.



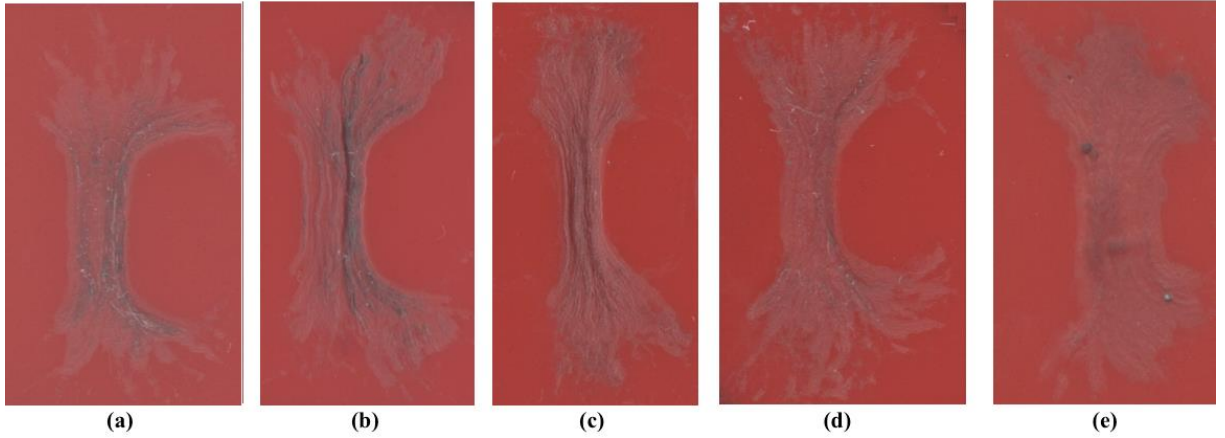
Şekil 4.4: 600 V gerilim değerinde numune yüzeyinden 2 s boyunca 0.5 A ve üzeri akımın aktığı damla sayıları.

600 V gerilim uygulanan PU numunelerin yüzeyine 50 damla düştükten sonra deney sonlandırılmıştır. Deney sonlandırılıp numune yüzeyi temizlendikten sonra bu PU numuneler tekrar analog terazi ile tartılmıştır. Şekil 4.5’de 600 V gerilim uygulanan PU numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı verilmiştir. Burada numune 1’de 2.7 mg, numune 2’de 3.9 mg, numune 3’de 2.8 mg, numune 4’de 3.1 mg, numune 5’de 2.9 mg ağırlık kaybı meydana gelmiştir. 600 V gerilim seviyesinde yapılan deneylerde PU numunelerde meydana gelen ortalama ağırlık kaybı 3.08 mg olmuştur.



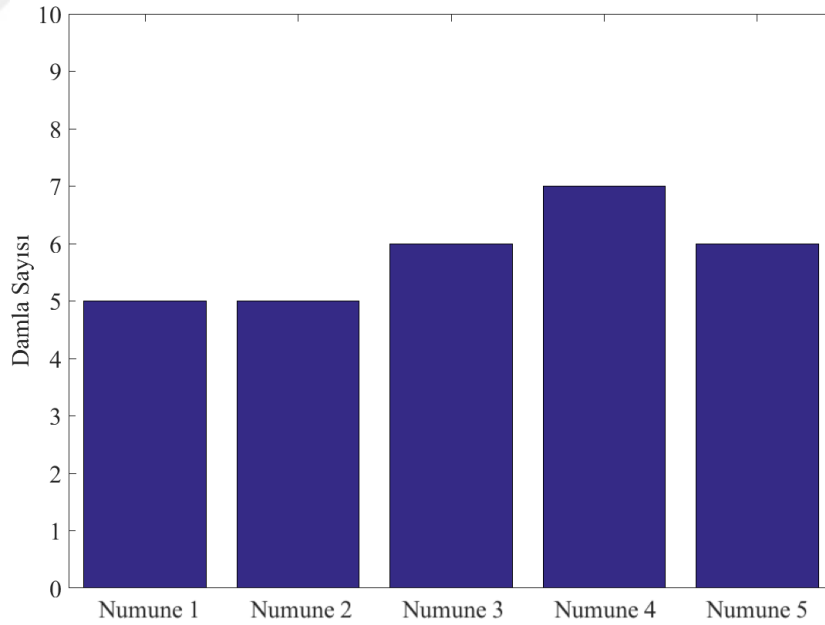
Şekil 4.5: 600 V gerilim değerinde numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları.

600 V gerilim seviyesi deneyinden sonra, aynı koşullar altında laboratuvarında hazırlanan başka bir PU numune grubu 500 V gerilimde denenmiştir. Bu gerilim seviyesi içinde deney 5 kez tekrarlanmıştır. Şekil 4.6'da 500 V gerilim seviyesinin uygulanmasıyla PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları verilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere 50 damla sonunda numune yüzeyinde iz oluşumu gözlemlenmiştir. Bu verilen yüzey taramalarının hepsinde sol taraf yüksek potansiyel elektrotu iken, sağ taraf toprak elektrotudur. Bu gerilim seviyesinde 50 damla boyunca elektrotlar arasında kalan numune yüzeyinden geçen akım 0.5 A'ya erişmemiştir.



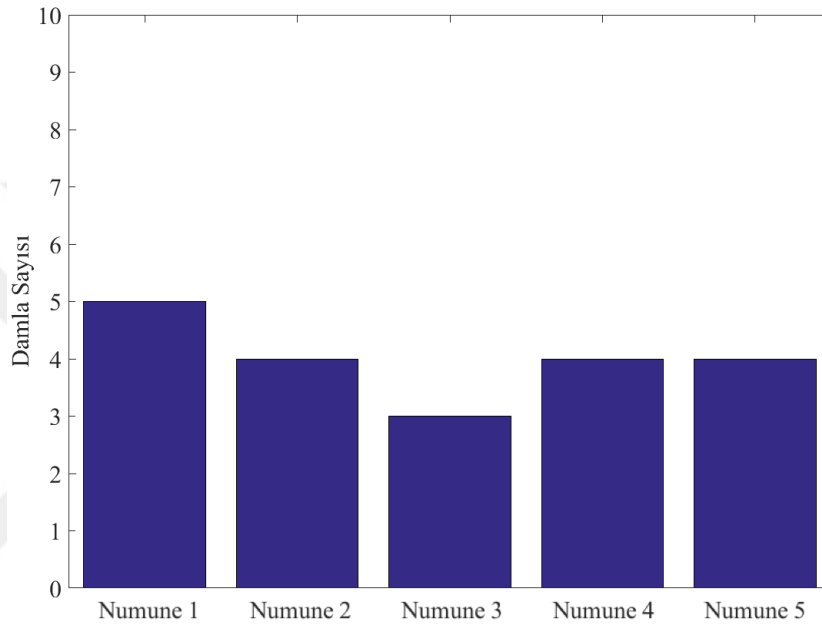
Şekil 4.6: 500 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları a) Numune 1; b) Numune 2; c) Numune 3 d) Numune 4; e) Numune 5.

500 V gerilim altında PU numunelerin yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu gerilim seviyesinde numune 1 ve numune 2’de 5. damlanın, numune 3 ve numune 5’te 6. damlanın, numune 4’de 7. damlanın numune yüzeyine düşmesinin ardından numune yüzeyinde karbonlaşma başlamıştır. 500 V gerilim seviyesinde de PU numunelerin yüzeyinde ilk 10 damla içerisinde karbonlaşma gözlenmiştir.



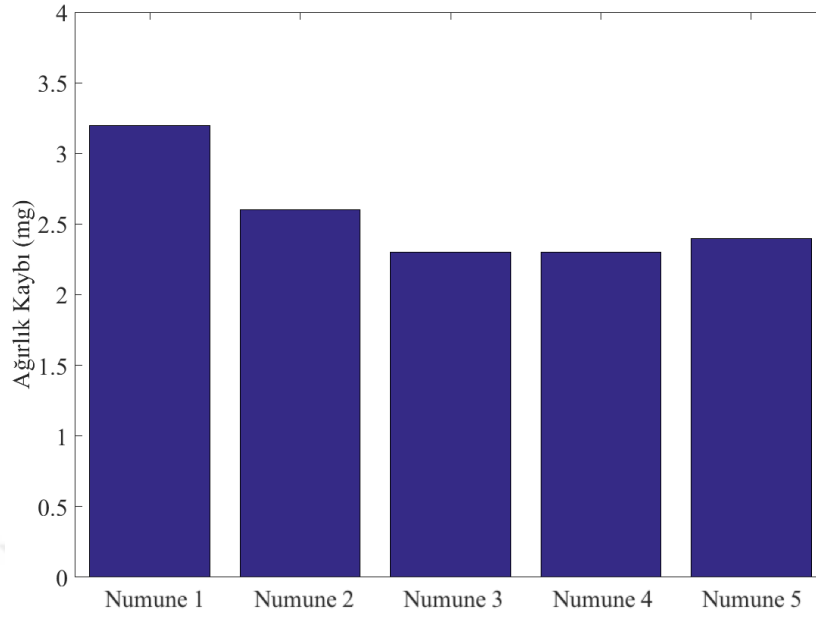
Şekil 4.7: 500 V gerilim değerinde numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayısı.

500 V gerilim altında numune yüzeyinde yeterli kirliliğin oluşması sonucu geçici olan boşalmalar belli bir damladan sonra sürekli olmaya başlamıştır. 500 V gerilim değerinde PU numunelerin yüzeyinden akan sürekli boşalma akımlarının oluşmaya başladığı damla sayıları Şekil 4.8’de verilmiştir. Burada numune 1’de 5. damlanın, numune 2, numune 4 ve numune 5’te 4. damlanın, numune 3’te ise 3. damlanın numune yüzeyinden buharlaşmasıyla geçici boşalmalar yerini sürekli boşalmalara bırakmıştır.



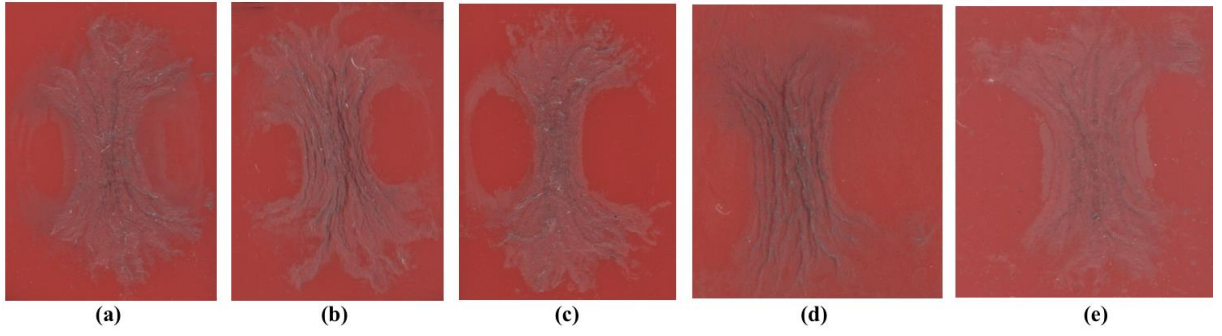
Şekil 4.8: 500 V gerilim değerinde numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları.

PU numunelerin yüzeyine, 500 V gerilim altında 50 damlanın düşmesinin ardından deney bitirilmiştir. Deney bittikten sonra numuneler analog terazi ile tartılmış ve ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. 500 V gerilim stresi altında PU örneğin yüzeyine 50 damla düşmesinin ardından numunede meydana gelen ağırlık kayıpları şekil 4.9’da verilmiştir. Bu bağlamda numune 1’de 3.2 mg, numune 2’de 2.6 mg, numune 3 ve 4’de 2.3 mg ve numune 5’te 2.4 mg ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Yapılan deneyler sonucunda 500 V gerilim altında PU numunelerde ortalama 2.56 mg ağırlık kaybı meydana gelmiştir.



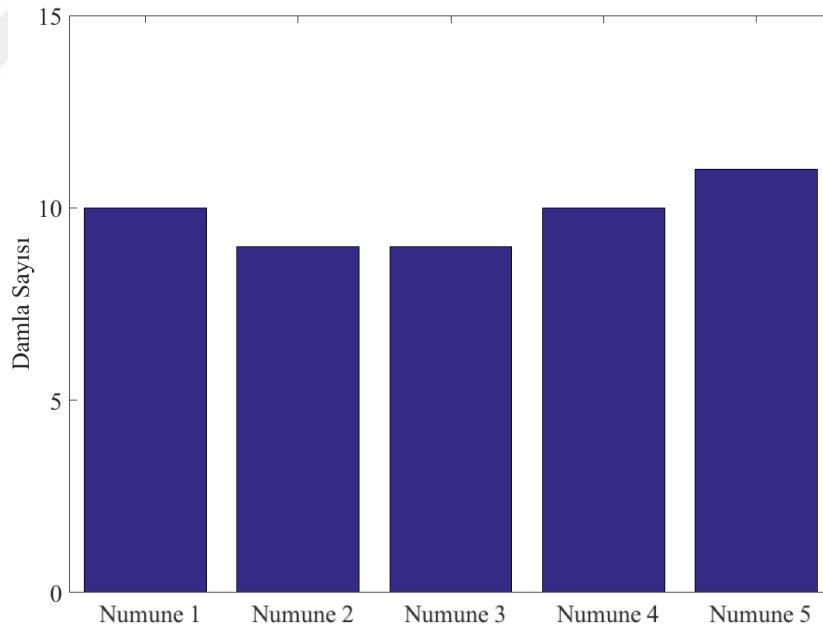
Şekil 4.9: 500 V gerilim değerinde numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları.

600 V ve 500 V gerilim değerlerinden sonra aynı koşullarda üretilen başka bir numune grubu 400 V gerilim değerinde laboratuvar koşullarında denenmiştir. Bu PU numunelerin yüzeyine 50 damla düşmesi sonucu numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu yüzey taramalarının hepsinde sol taraf yüksek potansiyel elektrotu iken, sağ taraf toprak elektrotudur. Bu şekillerde de görülmektedir ki, polimer yüzeyinde oluşan izler kısmi olarak bazı bölgelerde derinleşmektedir. Fakat bu derinlik 600 V ve 500 V gerilim seviyelerine kıyasla daha azdır. Bu gerilim seviyesinde 50 damla boyunca elektrotlar arasında kalan numune yüzeyinden geçen akım 0.5 A'ya erişmemiştir.



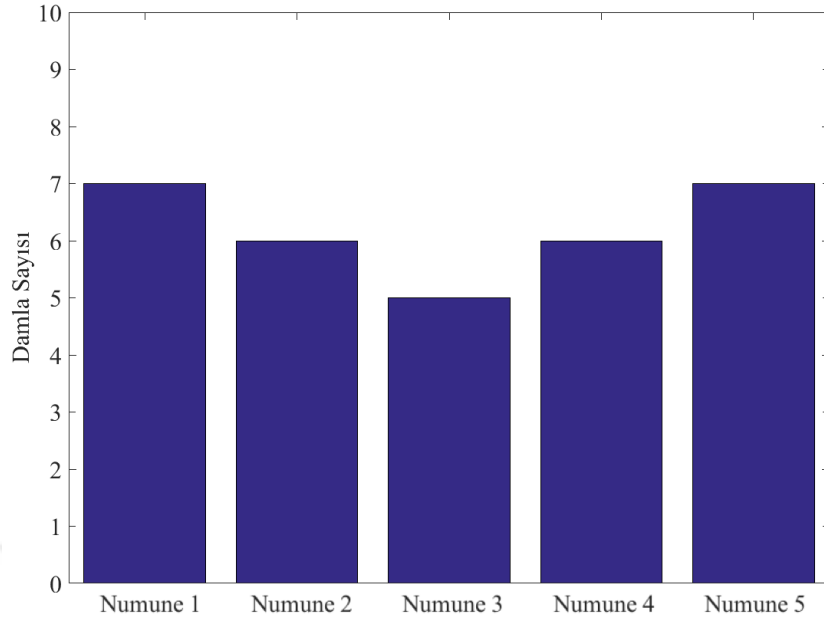
Şekil 4.10: 400 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları a) Numune 1; b) Numune 2; c) Numune 3; d) Numune 4; e) Numune 5.

400 V gerilim altında yapılan deneyler sonucunda, PU numunelerin yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları Şekil 4.11’de verilmiştir. Yapılan bu deneylerde numune 1 ve numune 4’de 10. damlanın, numune 2 ve numune 3’de 9. damlanın, numune 5’de ise 11. damlanın numune yüzeyinden buharlaşmasından sonra numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı gözlenmiştir. Burada, numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayısı 600 V ve 500 V gerilim seviyesi ile kıyaslandığında artmıştır.



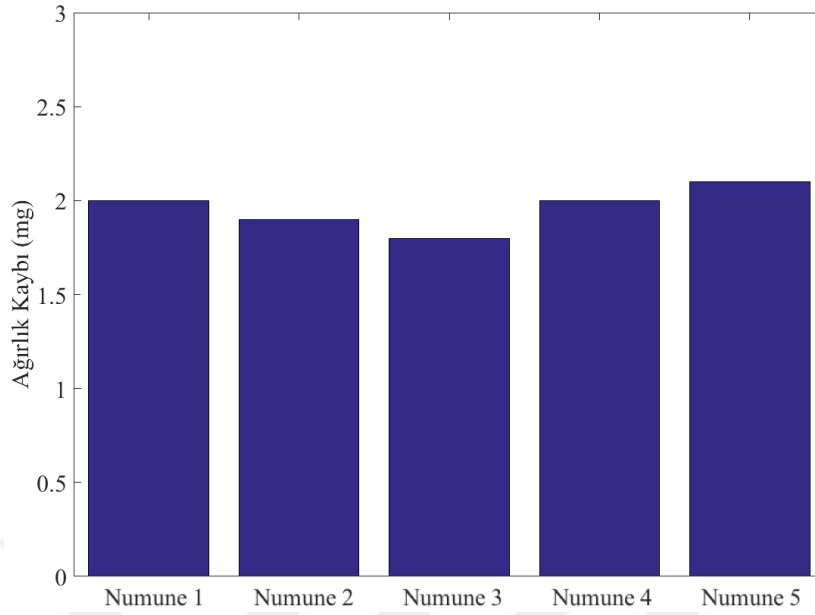
Şekil 4.11: 400 V gerilim değerinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları.

400 V gerilim altında numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları Şekil 4.12’de verilmiştir. Burada numune 1 ve numune 5’de 7. damlanın, numune 2 ve 4’de 6. damlanın, numune 3’te ise 3. damlanın buharlaşmasıyla numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluşmaya başlamıştır.



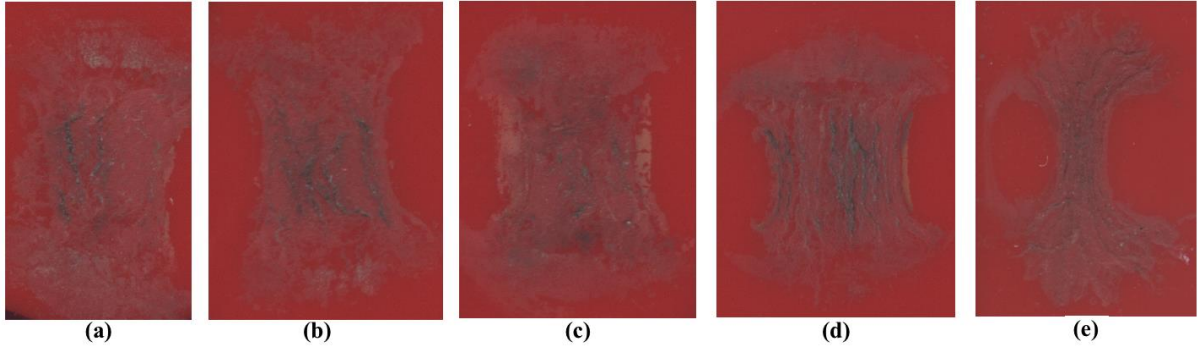
Şekil 4.12: 400 V gerilim değerinde numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları.

400 V gerilim altında yapılan bu deneyler numune yüzeyine 50 damla düşmesinin ardından sonlandırılmıştır. Deney sonlandırdıktan sonra 400 V gerilime maruz kalan PU numuneler tekrar tartılmış ve numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Şekil 4.13’de 400 V gerilime maruz kalan PU numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı verilmiştir. Burada numune 1 ve 4’de 2 mg, numune 2’de 1.9 mg, numune 3’de 1.8 mg ve numune 5’de ise 2.1 mg ağırlık kaybı oluşmuştur. 400 V gerilim altında yapılan bu deneyler sonucunda PU numunelerde ortalama 1.96 mg ağırlık kaybı meydana gelmiştir.

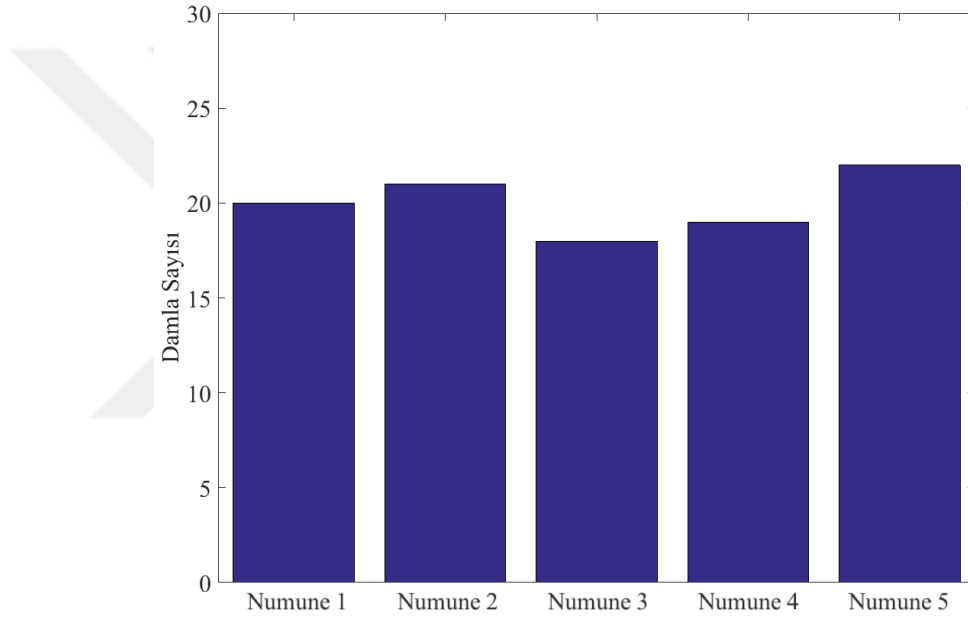


Şekil 4.13: 400 V gerilim değerinde numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları.

600 V, 500 V ve 400 V gerilimleri altında denen PU numunelerle aynı laboratuvar koşullarında hazırlanan başka bir PU numune grubu son olarak 300 V gerilim altında denenmiştir. Bu gerilim altında deney sonunda numunelerin yüzeyinde meydana gelen izlerin yüzey taramaları Şekil 4.14’de verilmiştir. Bu yüzey taramalarının hepsinde sol taraf yüksek potansiyel elektrotuyken, sağ taraf toprak elektrotudur. Şekil 4.15’de ise bu numune grubunun yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları verilmiştir. Burada numune 1’de 20. damlanın, numune 2’de 21. damlanın, numune 3’de 18. damlanın, numune 4’te 19. damlanın ve numune 5’de 22. damlanın numune yüzeyinden buharlaşmasının ardından yüzeyde karbonlaşmanın başladığı gözlenmiştir. Bu gerilim seviyesinde 50 damla boyunca elektrotlar arasında kalan numune yüzeyinden geçen akım 0.5 A’ya erişmemiştir.

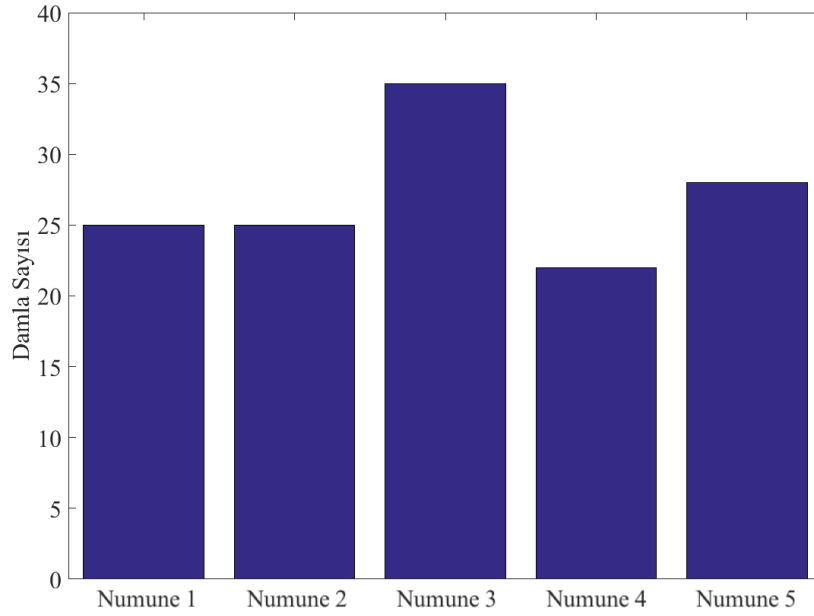


Şekil 4.14: 300 V gerilim uygulanmış PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları a) Numune 1; b) Numune 2; c) Numune 3; d) Numune 4; e) Numune 5.



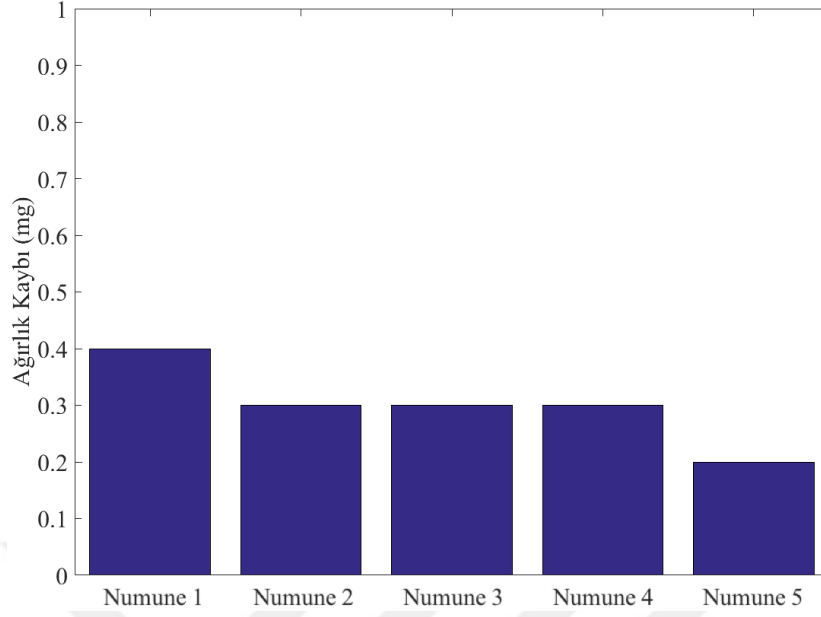
Şekil 4.15: 300 V gerilim değerinde numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları.

300 V gerilim altında numune yüzeyinde sürekli boşalmaların oluşmaya başladığı damla sayıları Şekil 4.16'da verilmiştir. 300 V gerilim altında numune 1 ve numune 2'de 25. damlanın, numune 3'de 35. damlanın, numune 4'de 22. damlanın ve numune 5'te ise 28. damlanın numune yüzeyinden buharlaşmasıyla yüzeyde sürekli boşalmalar oluşmaya başlamıştır.



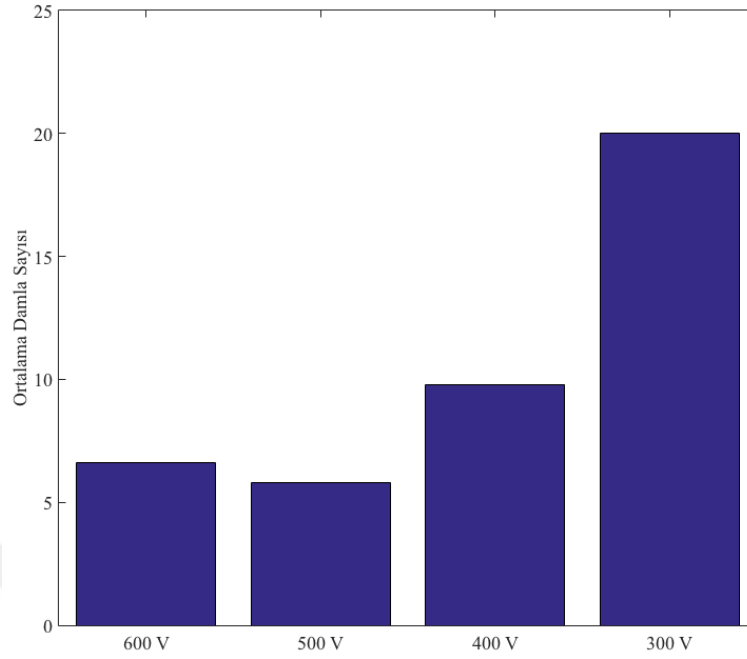
Şekil 4.16: 300 V gerilim değerinde numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları.

300 V gerilim altında tekrarlanan deneyler, numune yüzeyine 50 damla düşmesiyle sonlandırılmıştır. Deney sonlandırıldıktan sonra denenen numunelerin ağırlık kayıpları ölçülmüştür. 300 V gerilim altında denenen numunelerin ağırlık kayıpları Şekil 4.17’de verilmiştir. Bu deney sonunda, numune 1’de 0.4 mg, numune 2, numune 3 ve numune 4’de 0.3 mg ve numune 5’de 0.2 mg ağırlık kaybı meydana gelmiştir. 300 V gerilim altında denenen bu 5 örneğin ortalama ağırlık kaybı 0.3 mg’dır. Bu gerilim seviyesinde, PU numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları 600 V, 500 V ve 400 V gerilim seviyesine kıyasla çok daha azdır.



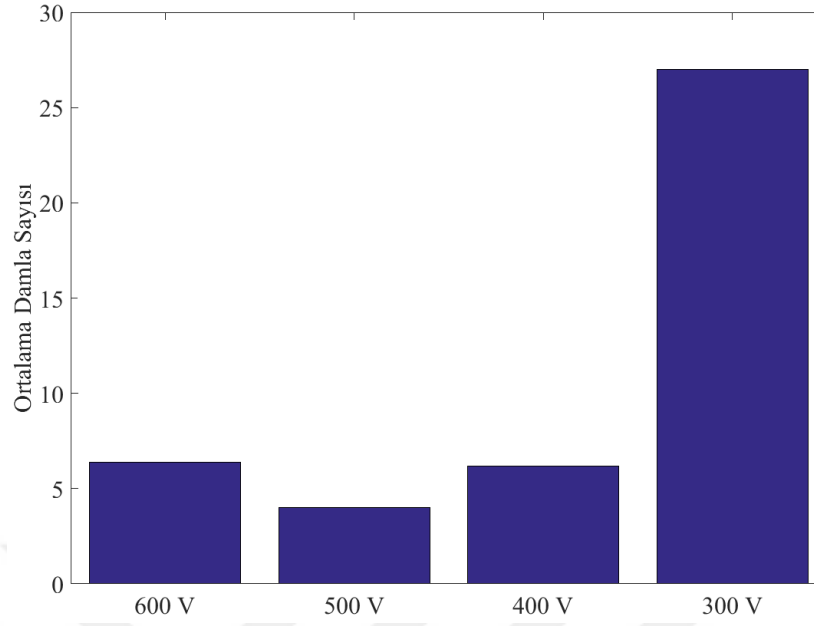
Şekil 4.17: 300 V gerilim değerinde numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları.

600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilimleri altında 5 kez tekrarlanan deneyler sonucunda, karbonlaşmanın başladığı damla sayılarının, yüzeyde sürekli boşalmaların olduğu damla sayılarının ve numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası numunelerde meydana gelen ağırlık kayıplarının her deney grubu için ortalamaları hesaplanmıştır. Şekil 4.18’de PU numunelerin yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayısının ortalamaları farklı gerilim seviyeleri için gösterilmiştir. Burada 600 V gerilim seviyesinde ortalama 6.4, 500 V gerilim seviyesinde ortalama 5.8, 400 V gerilim seviyesinde ortalama 9.8 ve 300 V gerilim seviyesinde ortalama 20 damlanın yüzeye düşmesinin ardından yüzeyde karbonlaşma başlamıştır. Burada görülmektedir ki, uygulanan gerilim seviyesi 600 volttan 500 volta düşürüldüğünde karbonlaşmanın başladığı damla sayısının ortalaması %9.375 azalmıştır. Uygulanan gerilim seviyesi 400 volta düştüğünde ise karbonlaşmanın başladığı damla sayısının ortalaması, 600 ve 500 volta oranla sırasıyla %53.125 ve %68.97 artmıştır. Uygulanan gerilim seviyesi 300 volta düşürüldüğünde ise karbonlaşmanın başladığı damla sayısının ortalaması 600, 500 ve 400 volta kıyasla sırasıyla yaklaşık 3, 3.5 ve 2 katına çıkmıştır.



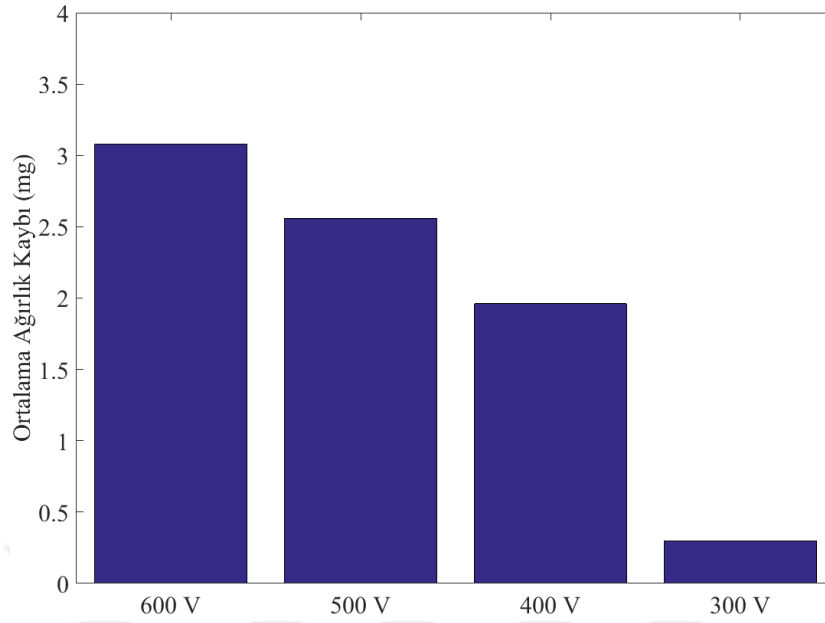
Şekil 4.18: Farklı gerilim seviyeleri için karbonlaşmanın başladığı damla sayılarının ortalamaları.

Deneyle sırasında deney düzeneğinin toprak elektrotundan kayıt edilen kaçak akım verilerinden numune yüzeyinde sürekli boşalmaların oluşmaya başladığı damla sayılarının ortalamaları hesaplanmıştır. Farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyinde sürekli boşalmaların başladığı damla sayılarının ortalamaları Şekil 4.19’da verilmiştir. Burada 600 volt gerilim seviyesinde ortalama 6.4, 500 volt gerilim seviyesinde ortalama 4, 400 volt gerilim seviyesinde ortalama 6.2 ve 300 volt gerilim seviyesinde ortalama 27 damlanın yüzeyden buharlaşmasının ardından numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluşmaya başlamıştır. Hesaplanan bu veriler yüzeyde karbonlaşmanın başladığı damla sayıları ile karşılaştırıldığında, 600 V, 500 V ve 400 V gerilim seviyelerinde yüzeyde karbonlaşma başlamadan sürekli boşalmalar oluşmaya başladığı, 300 V gerilim seviyesinde ise yüzeyde karbonlaşma başladıktan sonra numune yüzeyinde sürekli boşalmaların oluşmaya başladığı görülmüştür.



Şekil 4.19: Farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyinden sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayılarının ortalamaları.

Deney düzeneğinde denenmeden önce tüm numuneler 0.1 mg hassasiyetindeki analog terazi ile tartılmıştır. Denendikten sonra tekrar tartılan numunelerin ağırlık kayıpları hesaplanmış ve her gerilim seviyesi için ortalamaları alınmıştır. Farklı gerilim seviyeleri için 50 damla sonrası numunelerde meydana gelen ağırlık kayıplarının ortalaması Şekil 4.20’de verilmiştir. Burada 600 V gerilim seviyesinde ortalama 3.08 mg, 500 V gerilim seviyesinde ortalama 2.56 mg, 400 V gerilim seviyesinde ortalama 1.96 mg, 300 V gerilim seviyesinde ortalama 0.3 mg ağırlık kaybı meydana gelmiştir. PU numunelerde 600 V gerilim altında 50 damla sonunda meydana gelen ağırlık kaybı, 500 V gerilime kıyasla yaklaşık %20 daha fazla olmuştur. 600 V ve 500 V gerilimler altında yapılan deneyler ile 400 V gerilim stresleri altında yapılan deneyler kıyaslandığında ise PU numunede meydana gelen ortalama ağırlık kayıpları sırasıyla yaklaşık %36,36 ve %23,44 daha az olmuştur. 600 V, 500 V ve 400 V gerilimler altında yapılan deneyler ile 300 V gerilim altında yapılan deneyler kıyaslandığında, PU numunelerde meydana gelen ortalama ağırlık kayıpları sırasıyla yaklaşık 10, 8.5 ve 6.5 katıdır.

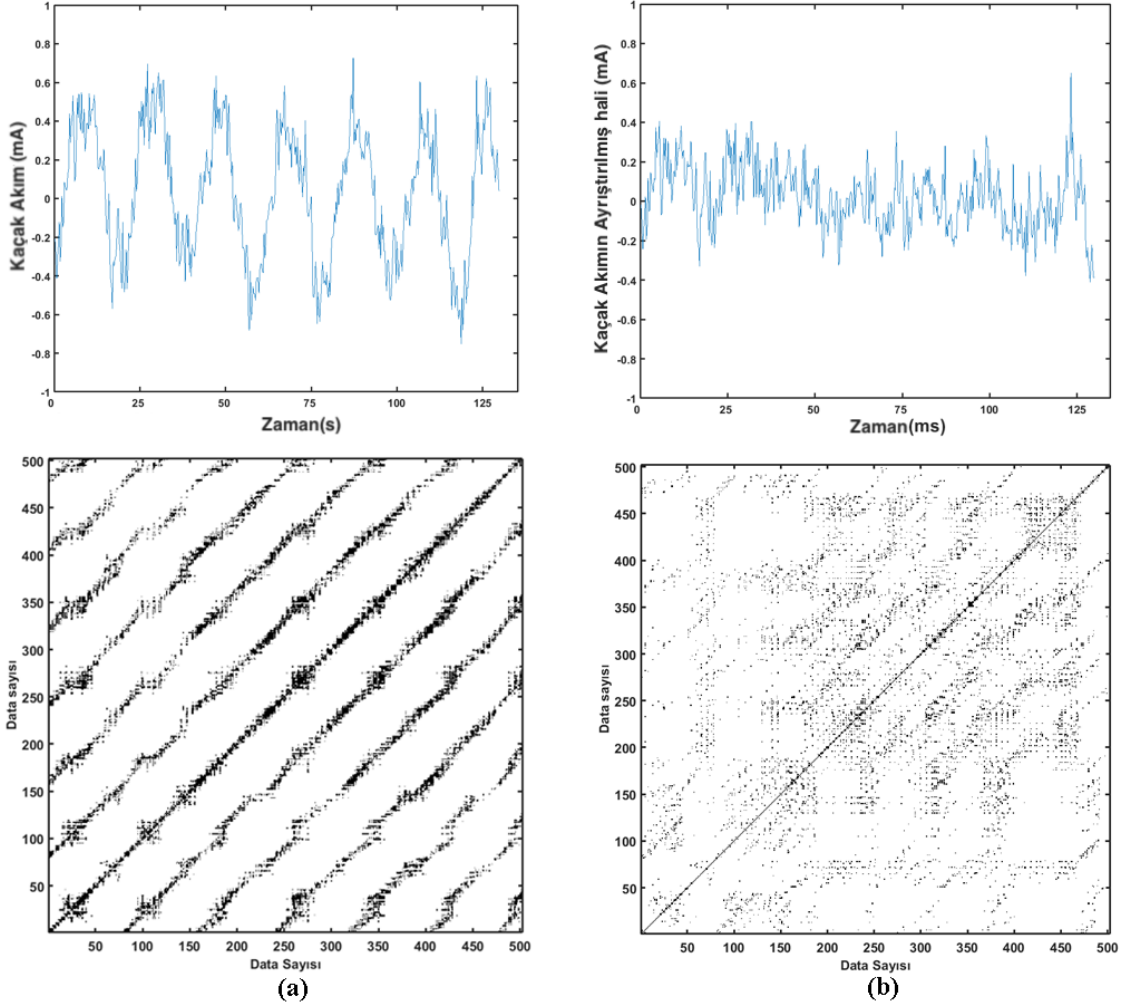


Şekil 4.20: Farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonrası meydana gelen ağırlık kayıplarının ortalamaları.

4.2. KAÇAK AKIM VERİLERİNİN YİNELEME HARİTALARI YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Deney sırasında numune yüzeyinden akan kaçak akım verileri toprak elektrotu üzerinden analog/sayısal dönüştürücü ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Kullanılan A/D çeviricinin örnekleme frekansı 48 kHz'dir. Kayıt edilen bu kaçak akım verileri yineleme haritaları yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Tüm gerilim seviyeleri için bu yöntem ile analiz yapılırken, ilk olarak numune yüzeyinde karbonlaşmanın gözlemlendiği damlanın buharlaştığı andan başlayarak 2 saniyelik zaman periyodu alınmıştır. Daha sonra, numune yüzeyinde sürekli boşalmaların karakteristiği incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken numune yüzeyinde sürekli boşalmaların olduğu damladan sonraki 20. damlanın numune yüzeyinden buharlaştığı andan başlanarak 2 saniyelik zaman periyodu alınmıştır. Deneyler sırasında kayıt edilen kaçak akım verisi güç frekansının bileşenlerini içermektedir. Bölüm 3.3'de sinüzoidal bir işaretin yineleme haritası gösterilmiştir. AC akımın dalga şeklinin içerdiği periyodik özellik doğrusal olmayan özelliklerin açığa çıkmasına engel olmaktadır (Du, 2011; Du, 2008a; Reddy, 2016; Du, 2008b). Bu sebeple, yineleme haritaları analizi ile incelenecek olan işareten temel güç bileşeninin çıkartılması daha sağlıklı sonuçlar verecektir.

Yalıtım malzemesinin yüzeyinden akan kaçak akımların lineer olmayan davranışını daha iyi anlayabilmek için, temel güç bileşeni olan 50 Hz bileşeninin kaçak akımdan ayrıştırılması gerekmektedir. Bu işlem için hızlı fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak kaçak akım verisinden 48-52 Hz frekans aralığı çıkartılmış ve daha sonra ters fourier dönüşümü alınmıştır. Böylece kaçak akımın temel bileşen dışındaki güç frekansı bileşenleri elde edilmiştir. Şekil 4.21'de bir boşalma serisinin FFT'den önceki ve sonraki yineleme haritaları gösterilmiştir. Şekil4.21(a)'da görülmektedir ki, yineleme haritasında yineleme noktalarının dağılımı birbirine paralel çapraz çizgiler oluşturmuştur. Bu çapraz çizgilerin sebebi, sinüzoidal işaretin periyodikliğinden kaynaklanmaktadır. Bu işareten FFT ile 48-52 Hz temel güç bileşeni ayrıştırıldıktan sonra oluşan yineleme haritası şekil 4.21(b)'de gösterilmiştir. Şekil 4.21(b)'de FFT'den sonra yineleme haritasında yineleme noktalarının rasgele dağıldığı ve doğrusal olmayan özelliklerinin daha net ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.21: a) Sinyalin temel bileşen çıkarılmadan önceki yineleme haritası; b) Sinyalin temel bileşen çıkarıldıktan sonraki yineleme haritası.

600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinde yapılan deneyler sırasında toprak elektrotundan bilgisayar ortamına aktarılan kaçak akım verilerinden, FFT ile temel güç bileşeni (48-52 Hz) ayrıştırılmıştır. Zaman serisinden kaçak akımların temel bileşeni ayrıştırıldıktan sonra elde edilen bu işaretler kullanılarak yineleme haritaları yöntemi için gerekli olan eşik değeri şu şekilde hesaplanmıştır;

$$e = 0.4 \frac{S_1 + \dots + S_n}{n} \quad (4.1)$$

Burada;

\mathcal{E} = eşik değeri

σ_1 = Birinci zaman serisinin standart sapması

σ_n = n. zaman serisinin standart sapması

n = zaman serisi sayısı

Eşik değeri hesaplanırken, zaman serilerinin standart sapmalarının ortalaması alınmış ve hesaplanan bu ortalama değer %40'ı eşik değeri olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada, yineleme haritaları verilirken analizi yapılan zaman serileri de yineleme haritası ile beraber verilmiştir. Zaman serileri ile yineleme haritaları sonuçlarının ilişkisinin daha net görülebilmesi için karşılaştırılan gerilim seviyelerinin kaçak akım grafiklerinin genlik eksenleri aynı aralığa ayarlanmıştır.

Bir zaman serisinin yineleme haritaları analizi yapılmadan önce, zaman serisinin gecikme zamanı (τ) ve gömme boyutu (m)'nun belirlenmesi gerektiğinden bölüm 3.3'de söz edilmişti. 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerine ait zaman serileri için sırasıyla ortak bilgi fonksiyonu ve yanlış en yakın komşular yöntemi kullanılarak hesaplanan gecikme zamanı (τ) ve gömme boyutu (m) değerleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.1'de farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyinde karbonlaşmanın gözlemlendiği damla sayısından sonraki kaçak akımlara ait gecikme zamanı ve gömme boyutu değerleri, Tablo 4.2'de ise farklı gerilim seviyeleri için yüzeyde sürekli boşalmalar oluştuğundan sonraki 20. damlanın kaçak akımlarına ait gecikme zamanı ve gömme boyutu değerleri gösterilmiştir. Burada, gerilim seviyesinin artmasıyla zaman serisinin gömme boyutunun arttığı görülmektedir. Burada Tablo-1'de 600 V ile 400 V gerilim seviyeleri arasında gerilim seviyesinin düşmesi ile zaman serisinin gömme boyut değeri azalırken, 400 V ve 300 V gerilim düzeylerinde ise aynı kalmıştır. Tablo 4.2'de ise gerilim seviyesinin düşmesi ile zaman serisinin gömme boyutu değeri azalmıştır:

Tablo 4.1: Farklı gerilim seviyeleri için yüzeyde karbonlaşma başladıktan sonraki kaçak akımlara ait gecikme zamanı ve gömme boyutu değerleri.

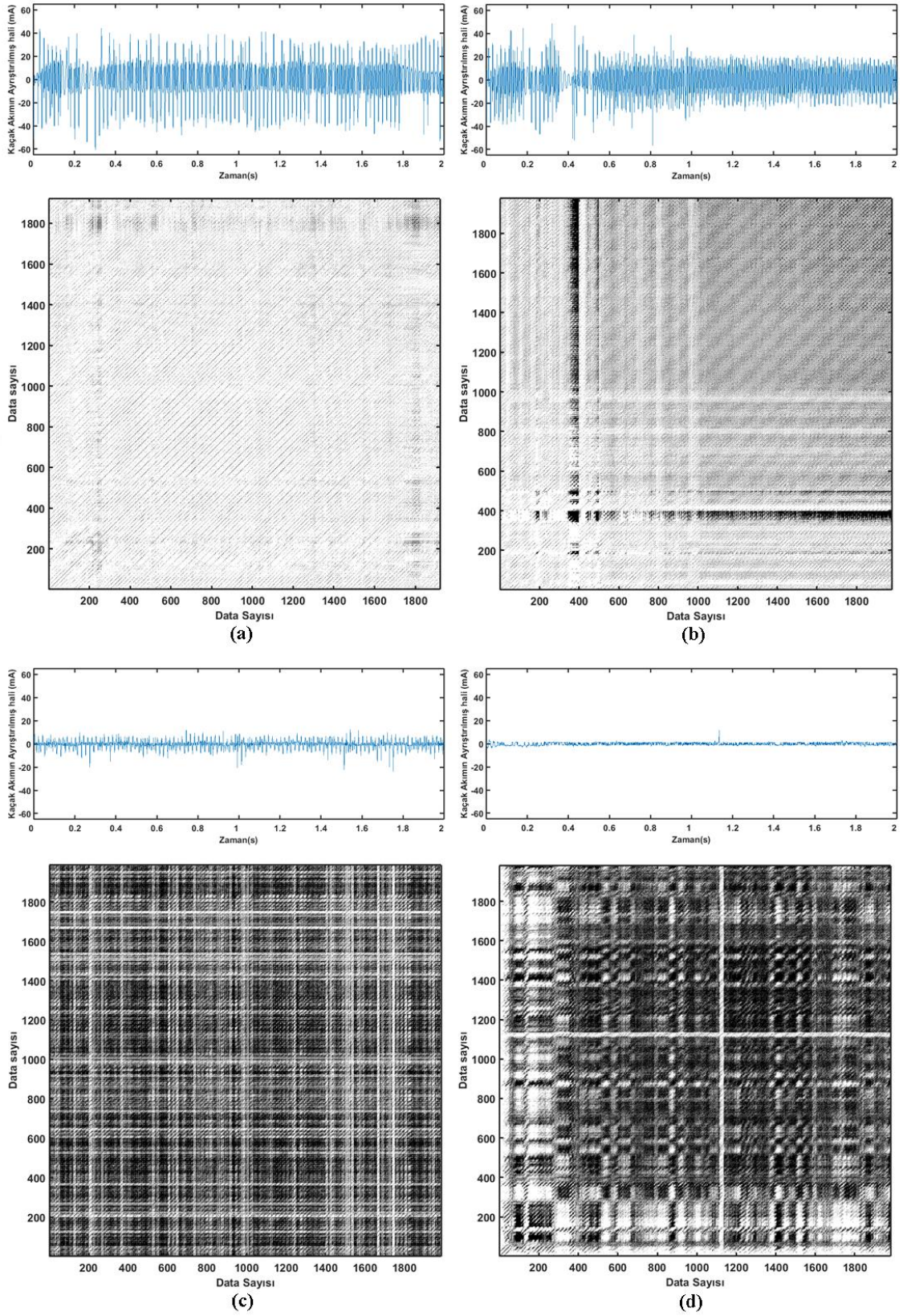
Kaçak akım verisinin kayıt edildiği gerilim düzeyi	Zaman serisi için hesaplanan gecikme zamanı(τ)	Zaman serisi için hesaplanan gömme boyutu (m)
600 V	6	14
500 V	2	12
400 V	2	7
300 V	3	7

Tablo 4.2: Farklı gerilim seviyeleri için yüzeyde sürekli boşalmalar başladıktan sonraki kaçak akımlara ait gecikme zamanı ve gömme boyutu değerleri.

Kaçak akım verisinin kayıt edildiği gerilim düzeyi	Zaman serisi için hesaplanan gecikme zamanı(τ)	Zaman serisi için hesaplanan gömme boyutu (m)
600 V	3	20
500 V	2	16
400 V	2	9
300 V	6	7

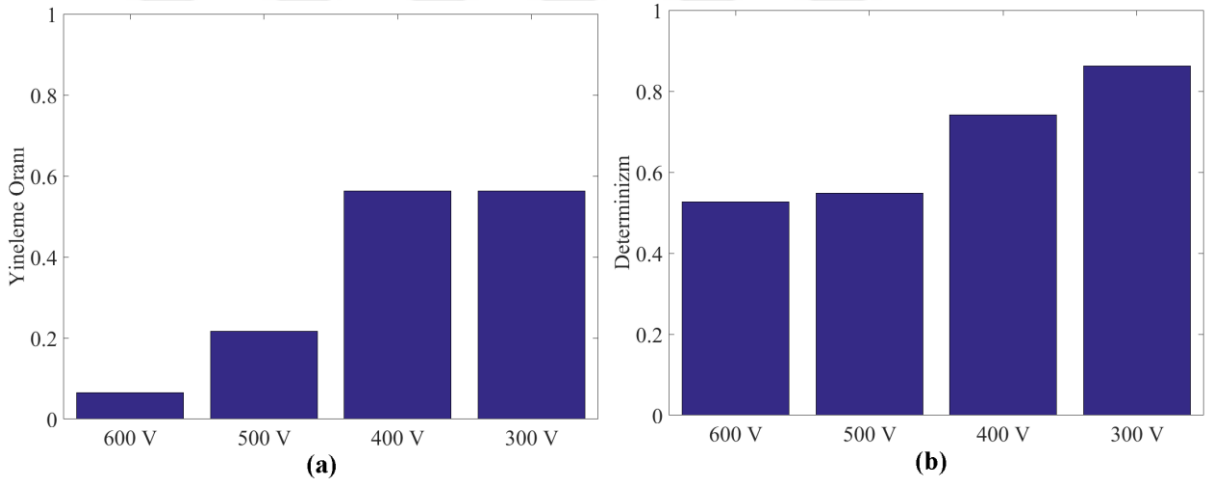
Farklı gerilim seviyelerinde yapılan deneylerde kayıt edilen kaçak akımların numune yüzeyinde karbonlaşma gözlemlendikten sonraki 2 saniyelik zaman aralığının dalga işaretleri ve bu işaretlere ait yineleme haritalarının topolojik yapıları şekil 4.22’de verilmiştir. Burada açıkça görülmektedir ki, 600 V gerilim seviyesinde 500 V, 400 V ve 300 V’ye kıyasla beyaz alan yoğunluğu daha fazladır. 600 V gerilim seviyesinde beyaz alan yoğunluğunun daha fazla olması, bu gerilim seviyesinde oluşan boşalmaların daha büyük genlik değerine sahip olduğunu göstermektedir. 600 V ve 500 V gerilim seviyelerinde ölçülen kaçak akımlar, numune yüzeyinden damlanın buharlaşmasından sonraki ilk 0.4 saniyelik zaman aralığında

yineleme haritalarına göre benzer davranışlar göstermiştir. İlk 0.4 saniyeden sonra ise 500 V gerilim seviyesinde ölçülen kaçak akımın genlik değerinin, 600 V gerilim seviyesinde ölçülen kaçak akıma kıyasla azaldığı yineleme haritalarından çıkartılabilir. Bu sebeple, 0.4 ile 2. saniye aralığında 500 V gerilim seviyesinde daha yoğun yineleme noktaları oluşmuştur. 400 V gerilim seviyesi ile 300 V gerilim seviyesinde yineleme noktalarının yoğunluğu hemen hemen aynıdır. Bu iki gerilim seviyesine ait yineleme haritalarındaki yineleme nokta yoğunluğu 500 V gerilim seviyesine kıyasla daha yoğundur. Aksine 500 V gerilim düzeyine ait yineleme haritasındaki beyaz alan yoğunluğu 400 V ve 300 V gerilim seviyelerine ait yineleme haritalarından daha fazladır. Bu durum, 500 V gerilim düzeyinde yapılan deneylerde 300 V ve 400 V'ye kıyasla daha yoğun boşalmaların oluştuğunu göstermektedir. 600 V ve 400 V gerilim seviyelerine ait yineleme haritalarında yineleme noktaları homojen dağılım göstermiştir. Bu gerilim seviyelerine ait yineleme haritalarına göre, boşalma akımları tüm zaman serisi boyunca benzer davranışlar göstermiştir. Bu gerilim seviyelerine ait yineleme haritalarına göre, 600 V gerilim düzeyinde 400 V'ye kıyasla birbirine benzer yüksek genlikli boşalma akımlarının oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.22: Numune yüzeyinde karbonlaşmanın gözlemlendiği damladan sonraki 2 saniyelik zaman aralığının kaçak akım verisi ve bu işaretin yineleme haritası a) 600 V; b) 500 V; c) 400 V; d) 300 V.

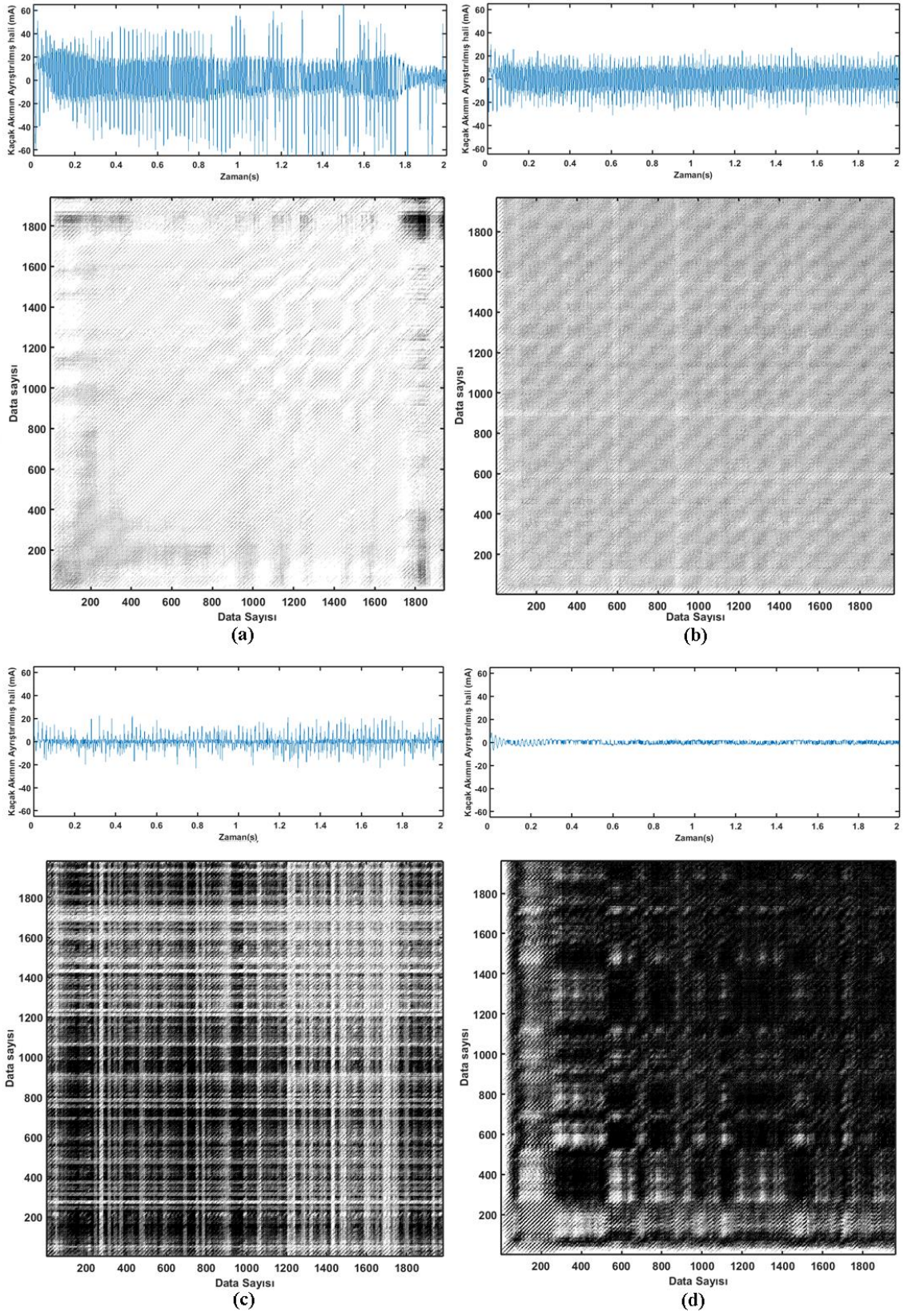
Şekil 4.22’de yineleme haritaları verilen kaçak akım verilerinin yineleme haritalarının nicel analizi sonuçları Şekil 4.23’de verilmiştir. Burada 600 V gerilim seviyesinin yineleme oranı 0.0657, belirlenim oranı 0.5264, 500 V gerilim seviyesinin yineleme oranı 0.2166, belirlenim oranı 0.5484, 400 V gerilim seviyesinin yineleme oranı 0.5631, belirlenim oranı 0.7413, 300 V gerilim seviyesinin yineleme oranı 0.5636, belirlenim oranı 0.8628 olarak hesaplanmıştır. Burada, gerilim seviyesinin azalmasıyla yineleme oranı ve belirlenim oranı artmıştır. 600 V, 500 V ve 400 V gerilim seviyelerine arasındaki yineleme oranının farkı açık şekilde görülmesine rağmen 400 ile 300 V gerilim seviyeleri arasındaki yineleme oranı farkı çok düşüktür. Aynı şekilde 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyeleri arasındaki belirlenim oranının farkı açık şekilde görülmesine rağmen, 600 V ve 500 V gerilim düzeyleri arasındaki belirlenim oranı arasındaki fark çok düşüktür.



Şekil 4.23: a) 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinin yineleme haritasının yineleme oranı; b) 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinin yineleme haritasının belirlenim oranı.

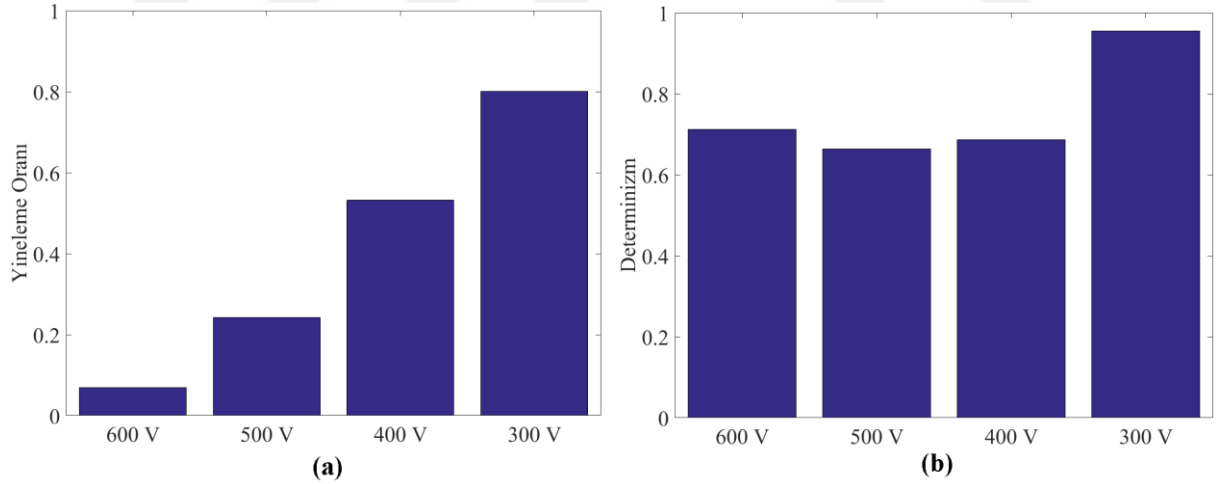
Çalışmanın bu kısmında, numune yüzeyinde sürekli boşalmaların karakteristiği yineleme haritaları analizi ile incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken numune yüzeyinde sürekli boşalmaların oluştuğu damladan sonraki 20.damlanın numune yüzeyinden buharlaştığı andan başlanarak 2 saniyelik zaman periyodu alınmıştır. Farklı gerilim seviyelerinde yapılan deneylerde numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluştuğundan 20 damla sonraki 2 saniyelik zaman aralığının dalga işaretleri ve bu işaretlere ait yineleme haritalarının topolojik yapıları Şekil 4.24’de verilmiştir. Burada 500 V gerilim seviyesine ait yineleme haritasında yineleme noktalarının dağılımı, 600 V oranla daha yoğundur. Aksine yüksek genlikli boşalmaları gösteren beyaz alan yoğunluğu 600 V gerilim seviyesinde diğer gerilim düzeylerine kıyasla

daha fazladır. Özellikle 300 V gerilim düzeyine ait yineleme haritasında oluşan yineleme noktası yoğunluğu diğer gerilim düzeylerine kıyasla daha yüksektir. Yineleme haritasında yineleme noktası yoğunluğunun yüksek olması, yeniden yapılandırılan faz uzayındaki $X_{(i)}$ ve $X_{(j)}$ vektörleri arasındaki mesafenin çok yavaş değiştiğini göstermektedir. 400 V gerilim düzeyinde yapılan deneyde kayıt edilen kaçak akımın 1.2 s ile 1.8 s zaman aralığında faz uzayındaki $X_{(i)}$ ve $X_{(j)}$ vektörleri arasındaki uzaklığın arttığı fakat daha sonra tekrar azaldığı yineleme haritasından görülmektedir. Şekil 4.24(d)'de, 300 V gerilim düzeyinde kayıt edilen zaman serisinden gömülen vektörlerin, faz uzayındaki komşu vektörlere çok benzediği görülmektedir. Ayrıca, 500 V gerilim seviyesine ait yineleme haritasındaki yineleme noktalarının dağılımının homojen olduğu görülmektedir. 400 V gerilim seviyesinde 1.2 s ile 1.8 s zaman aralığı ve 300 V gerilim düzeyinde ise ilk 0.2 s zaman aralığı haricinde yineleme noktalarının homojen dağıldığı görülmektedir.



Şekil 4.24: Numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluştuğundan 20 damla sonraki 2 saniyelik zaman aralığının kaçak akım verisi ve bu işaretin yineleme haritası a) 600 V; b) 500 V; c) 400 V; d) 300 V.

Şekil 4.24’de yineleme haritaları verilen kaçak akım verilerinin yineleme haritalarının nicel analizi sonuçları Şekil 4.25’de verilmiştir. Burada 600 V gerilim seviyesinin yineleme oranı 0.0692, belirlenim oranı 0.7125, 500 V gerilim seviyesinin yineleme oranı 0.2417, belirlenim oranı 0.6636, 400 V gerilim seviyesinin yineleme oranı 0.5317, belirlenim oranı 0.6871, 300 V gerilim seviyesinin yineleme oranı 0.8003, belirlenim oranı 0.9551 olarak hesaplanmıştır. Burada, gerilim seviyesinin artmasıyla yineleme oranının değeri azalmıştır. Benzer şekilde 500 V ile 300 V arasında gerilim düzeyinin artmasıyla belirlenim oranı azalmıştır. Fakat 400 V ve 500 V gerilim düzeyleri arasındaki fark çok düşüktür. Burada, 600 V gerilim düzeyinin belirlenim oranı 400 V ve 500 V’den büyük, fakat 300 V’den daha düşüktür. Şekil 4.22’deki sonuçlar ile 4.24’deki sonuçlar kıyaslandığında, her iki durumda da gerilim seviyesinin artmasıyla yineleme oranı azalmıştır. 4.24’deki 600 V gerilim düzeyine ait belirlenim oranı haricinde, her iki durumda da gerilim seviyesinin yükselmesiyle belirlenim oranının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, 300 V gerilim seviyesinde kayıt edilen kaçak akım serisinin yineleme haritasında yineleme oranının ve belirlenim oranının bu denli yüksek çıkması yeniden yapılandırılan faz uzayındaki $X_{(i)}$ ve $X_{(j)}$ vektörleri arasındaki değişimin yavaş olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.25: a) 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinin yineleme haritasının yineleme oranı; b) 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinin yineleme haritasının belirlenim oranı.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Günümüzde ticari olarak satılan elektriksel yalıtım malzemeleri içerisinde polimerler ciddi bir yüzdeyi oluşturmaktadırlar. Polimer malzemeler kağıt, cam ve porselen gibi yalıtım malzemelerine kıyasla bir çok avantaja sahiptir. Fakat polimer malzemelerin en önemli dezavantajlarından birisi yüzeyde iz oluşumu hatasına elverişli olmalarıdır. Elektrik yalıtım sistemlerinde kullanılan polimerlerin yüzeyde iz oluşumu hatasına karşı dirençlerinin önceden bilinmesi sistemin güvenlik ve güvenilirliği bakımından önem arz etmektedir. Yüzeyde iz oluşumu hatası kompleks bir süreçtir. Bu yüzden bir polimerin yüzeyde iz oluşumu direncini belirlemek için en etkin yöntem, belli standartlara göre malzeme üzerinde deney yapmaktır.

Bu çalışmanın ilk kısmında, kablo eklerinde dolgu malzemesi olarak kullanılan PU bazlı dolgu malzemesinden hazırlanan numuneler karşılaştırmalı yüzeysel boşalma indeksi deney yöntemi ile deneye tabii tutulmuştur. Bu amaçla hazırlanan deney düzeneği, İstanbul Üniversitesi YG Laboratuvarında ASTM D5288 standardı baz alınarak yapılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmada PU numunelerin yüzeylerine 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyeleri uygulanmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucunda numune yüzeyinde iz oluşumunun başladığı damla sayısı, numune yüzeyinde sürekli boşalmaların başladığı damla sayısı ve numune yüzeyine 50 damla düşmesi sonucu numunede meydana gelen ağırlık kaybı verileri kayıt altına alınmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda PU numunelerin yüzeyinde oluşan izlerin yüzey taramaları şekil 4.1, şekil 4.5, şekil 4.9 ve şekil 4.13'de 5'er numune için verilmiştir.

PU numunelerin yüzeyinde iz oluşumunun başladığı damla sayıları 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyeleri için sırasıyla şekil 4.2, şekil 4.6, şekil 4.10 ve şekil 4.14'de verilmiştir. Bu değerlerin ortalamaları alınarak farklı gerilim seviyeleri için yüzeyde iz oluşumunun başladığı damla sayılarının ortalamaları şekil 4.17'de verilmiştir. Burada görülmüştür ki, 600 V seviyesinde iz oluşumunun başladığı damla sayısı 500 V seviyesine göre daha fazladır. 600 V gerilim seviyesinde numune yüzeyine düşen damla nispeten daha kısa sürede (ilk 0.5 s içerisinde) buharlaşmaktadır. Bu sebeple numune yüzeyi çok kısa süre elektrik enerjisine maruz kalmaktadır. Damlanın 500 V gerilim seviyesinde 600 V gerilim seviyesine oranla daha uzun süre yüzeyde kalması sebebiyle karbonlaşma daha önce

gerçekleşmektedir. 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerinde ise azalan gerilim ile beraber numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayısı artmıştır.

Bu çalışmada yapılan deneylerde, numune yüzeyinde yer alan elektrotlar arasına 30 ± 5 s aralıklarla elektrolit çözelti damlalarının düşmesi sonucu elektrotlar arasında yer alan bölgede kirlilik seviyesi artar. Artan kirlilik sonucu yüzeyden kaçak akımlar akmaya başlar. Bu akımlar ilk zamanlarda geçici durumdadır. Bu akan geçici akımlar yüzeyde karbonlaşmanın başlamasına sebep olur. Yüzeyde karbonlaşmanın başlaması ve yüzeye düşen damla sayısının artmasıyla yüzey direnci düşer ve bunun sonucunda yüzeyden akan kaçak akımların süreleri ve genlikleri artmaya başlar. Bu kümülatif sürecin sonunda öyle bir an gelir ki, yüzey tamamen delinir ve sürekli kaçak akımlar akmaya başlar. Yapılan deneylerde, PU numunelerin yüzeyinde sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayıları 600 V, 500 V, 400 V ve 300 V gerilim seviyeleri için sırasıyla şekil 4.3, şekil 4.7, şekil 4.11 ve şekil 4.15’de verilmiştir. Bu değerlerin ortalamaları alınarak farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyinde sürekli boşalmaların oluşmaya başladığı damla sayılarının ortalamaları Şekil 4.18’de verilmiştir. Burada da numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damla sayısında olduğu gibi, uygulanan gerilim seviyesinin 600 V’den 500 V’ye düşürülmesiyle numune yüzeyinde sürekli boşalma akımlarının akmaya başladığı damla sayısı azalmıştır. 500 V, 400 ve 300 V gerilim seviyelerinde, gerilimin düşürülmesiyle sürekli boşalmaların oluştuğu damla sayısı artmıştır. Burada dikkat çeken başka bir sonuç ise, 600 V, 500 V ve 400 V gerilim seviyelerinde numune yüzeyinde karbonlaşma başlamadan önce numune yüzeyinden sürekli boşalma akımları akmaya başlarken, 300 V gerilim seviyesinde ise numune yüzeyinde karbonlaşma başladıktan sonra sürekli boşalma akımları numune yüzeyinden akmaya başlamıştır. Bu sonuç ışığında 600 V, 500 V ve 400 V gerilim düzeylerinde, sürekli boşalma akımlarının numune yüzeyinden akmaya başlaması sonucu numune yüzeyinde karbonlaşmanın başlarken, 300 V gerilim seviyesinde ise numune yüzeyinde artan karbon yoğunluğu sebebiyle numune yüzeyinde sürekli boşalmaların oluşmaya başladığı sonucuna varılabilir.

Yapılan bu deneysel çalışmada, denenmeden önce numunelerin ağırlıkları 0.1 mg hassasiyete sahip analog terazi ile ölçülmüştür. Daha sonra numuneler denenmiş ve numune yüzeyine 50 çözelti damlası düştükten sonra deney sonlandırılmıştır. Deney sonlandırıldıktan sonra, yüzeyleri karbon kalıntılarından arındırılan numunelerin ağırlıkları tekrar analog terazi ile

ölçülmüş ve deneyden sonra numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Hesaplanan ağırlık kayıpları malzemede meydana gelen erozyon miktarını hacimsel olarak belirlemek için önemli bir parametredir. Ağırlık kaybı, literatürde yapılan birçok çalışmada da polimer malzemelerin yüzeyde iz oluşumu direncini değerlendirmek için kullanılmıştır (Du, 2009; Du, 2011; Du, 2012; Du, 2014; Ersoy Yılmaz, 2018; Gorur, 1986; Kumar, 2015; İspirli, 2016). Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, 600 V, 500V, 400 V ve 300 V uygulanan gerilim değerlerinde PU numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları ile ilgili bulgular sırasıyla şekil 4.4, şekil 4.8, şekil 4.12 ve şekil 4.16'da verilmiştir. Bu değerlerin ortalamaları alınarak farklı gerilim seviyeleri için numunelerde meydana gelen ağırlık kayıplarının ortalamaları Şekil 4.19'da verilmiştir. Burada açıkça görülmektedir ki, örneğe uygulanan gerilim seviyesinin artmasıyla beraber numunede meydana gelen ağırlık kaybı artmaktadır. 600 V, 500V ve 400 V gerilim seviyesinde meydana gelen ağırlık kayıpları göz önüne alındığında, bu gerilim seviyelerinde PU numunelerde erozyon oluştuğu sonucuna varılabilir. 300 V gerilim seviyesinde ise meydana gelen ağırlık kayıplarının çok küçük olması sebebiyle PU numunede bu gerilim seviyesinde erozyon meydana gelmediği sonucuna varılabilir. 300 V gerilim seviyesinde numunede meydana gelen ağırlık kayıplarının bu denli küçük olması sebebiyle deneyler 300 V gerilim seviyesinde bitirilmiştir. 600 V gerilim seviyesinde PU numune yüzeyine ortalama 20 damla düşmesi sonucunda numune yüzeyinden 2 saniye boyunca 0.5 A ve üstü akım akmasıyla deneyin başarısız olduğu görülmüştür. 500 V, 400 V ve 300 V gerilim düzeylerinde ise numune yüzeyinden geçen akımların hiçbir zaman 0.5 A'e erişmemiştir.

Bu çalışmanın ikinci kısmında ise, deneysel çalışmalar sırasında bir veri toplama sistemi aracılığıyla deney düzeneğinin toprak elektrotundan kaçak akım verileri 48 kHz örnekleme frekansında kayıt edilmiştir. Kayıt edilen bu kaçak akım verileri doğrusal olmayan zaman serisi analizi olan yineleme haritaları yöntemi ile analiz edilmiştir. Kaçak akımdan temel harmonik bileşen (48-52 Hz) çıkarıldıktan sonra, PU numunelerin farklı gerilim stresleri altındaki davranışları yineleme haritalarının topolojik yapısı ve yineleme haritalarının nicel analizi ile incelenmiştir. Tüm bu incelemeler sonucunda, yineleme haritaları yönteminin boşalma akımlarına ait dinamik davranışları görselleştirmek ve analiz etmek için kullanışlı ve etkin bir yöntem olduğu görülmüştür. Burada numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damladan sonraki 2 saniyelik zaman aralığına ait kaçak akım ve numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluştuğundan 20 damla sonraki 2 saniyelik zaman aralığına ait kaçak akım verileri

olmak üzere iki farklı boşalma seviyesi için bu analizler yapılmıştır. Farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyinde karbonlaşma başladıktan sonraki 2 saniyelik zaman dilimine ait kaçak akım verilerinin yineleme haritalarının topolojik yapıları Şekil 4.22’de ve bu haritaların nicel analizi sonucu elde edilen RR ve DET parametrelerinin değişimi Şekil 4.23’de gösterilmiştir. Farklı gerilim seviyeleri için numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluştuktan 20 damla sonraki 2 saniyelik zaman aralığına ait kaçak akım verilerinin yineleme haritalarının topolojik yapıları Şekil 4.24’de ve bu haritaların nicel analizi sonucu elde edilen RR ve DET parametrelerinin değişimi Şekil 4.25’de gösterilmiştir.

Numune yüzeyinde karbonlaşmanın başladığı damladan sonraki 2 saniyelik zaman aralığına ait kaçak akım verileri ile farklı gerilim seviyeleri için yineleme haritaları yöntemi ve yineleme haritalarının nicel analizi ile yapılan incelemeler sonucunda;

- Gerilim seviyesinin azalmasıyla, yineleme haritasının yineleme nokta yoğunluğunun arttığı ve beyaz alan yoğunluğunun ise azaldığı görülmüştür. Beyaz alan yoğunluğunun daha fazla olması, gerilim seviyesinin artmasıyla yüksek genlikli boşalmaların daha fazla olduğunu göstermektedir.
- 600 V ve 500 V gerilim düzeylerine ait yineleme haritalarına göre, bu gerilim seviyelerinde kayıt edilen kaçak akımlar ilk 0.4 saniyelik zaman aralığında benzer davranışlar göstermiştir.
- Gerilim seviyesinin azalmasıyla, yineleme haritalarının RR ve DET oranının arttığı görülmüştür. Fakat, 400 V ve 300 V gerilim seviyelerine ait RR oranları arasındaki fark çok küçüktür. RR oranının daha düşük olması boşalma sürecinin daha karmaşık olduğunu göstermektedir. RR oranlarındaki değişime göre, gerilim seviyesinin azalmasıyla boşalma sürecinin daha normal ve tanımlanabilir olduğu görülmüştür. Fakat RR değerine göre, 300 V ve 400 V gerilim seviyelerindeki boşalma süreçlerinin birbirine benzer davranışlar sergilediği söylenebilir.
- 600 V ve 500 V gerilim seviyelerine ait RR oranı arasındaki farkın, DET oranları arasındaki farktan daha büyük olduğu görülmüştür.

Numune yüzeyinde sürekli boşalmalar oluştuktan 20 damla sonraki 2 saniyelik zaman aralığına ait kaçak akım verileri ile farklı gerilim seviyeleri için yineleme haritaları yöntemi ve yineleme haritalarının nicel analizi ile yapılan incelemeler sonucunda;

- Gerilim seviyesinin artmasıyla, yineleme haritasının yineleme nokta yoğunluğunun arttığı ve beyaz alan yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Beyaz alan yoğunluğunun daha fazla olması, gerilim seviyesinin artmasıyla yüksek genlikli boşalmaların daha fazla olduğunu göstermektedir.
- 600 V ve 500 V gerilim düzeylerinde yineleme noktalarının tüm zaman serisi boyunca homojen dağıldığı görülmüştür. 400 V gerilim seviyesinde yaklaşık 1.2 ile 1.8 saniye ve 300 V gerilim seviyesinde ise ilk 0.2 saniye aralığı dışında, bu gerilim seviyelerine ait yineleme haritalarındaki yineleme nokta yoğunluğunun homojen dağıldığı görülmüştür. Yineleme haritasındaki yineleme noktalarının homojen dağılması, zaman serinden faz uzayına gömülen vektörler arasındaki uzaklığın tüm zaman serisi boyunca benzer davranışlar gösterdiğini göstermektedir.
- Gerilim seviyesinin azalmasıyla, yineleme haritalarının RR oranı artmıştır. Tüm gerilim seviyelerine ait yineleme haritalarının RR oranları arasında bariz bir fark vardır. RR oranlarındaki değişime göre, gerilim seviyesinin artmasıyla boşalma sürecinin karmaşıklaştığı görülmüştür.
- Yineleme haritalarının DET oranı, 600 V dışında gerilim seviyesinin azalmasıyla artmıştır. Fakat, 600 V, 500 V ve 400 V gerilim seviyelerinde hesaplanan DET oranları arasındaki fark çok küçüktür.

Yineleme haritaları yöntemi ile elde edilen yineleme haritalarının topolojik yapıları ile kaçak akım verilerinin davranışları zaman alanında kıyaslandığında, yineleme haritalarının topolojik yapısının kaçak akım davranışlarını görselleştirmede kullanışlı bir yöntem olduğu görülmüştür. Yineleme haritalarının nicel analizi ile elde edilen yineleme oranı (RR) ve belirlenim (DET) parametreleri kullanılarak yineleme haritalarının nicel olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca gözle ile yapılan incelemelerde, uygulanan gerilim seviyesinin artmasıyla numune yüzeyinde oluşan izin boyutunun ve derinliğinin arttığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Al-Saud, M., 2012, Improved Assessment of Power Cable Thermal Capability in Presence of Uncertainties, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 27-29 Mart 2012 Shanghai, Xplore, IEEE, 1-4.
- Aronov M.A., Kokurkin M.P., 1992, Specific damage energy of dielectric materials as the universal characteristic of polymer insulation stability under the influence of surface partial discharges (phenomena, measurement, practical supplement), *Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications*, 7-10 September 1992 Manchester, 467-470.
- Arora, R., Mosch, W., 2011, *High voltage and electrical insulation engineering*, Wiley-IEEE Press, New Jersey, ISBN: 978-0-470-60961-3.
- ASTM D5288-14, 2014, Standard Test Method for Determining Tracking Index of Electrical Insulating Materials Using Various Electrode Materials (Excluding Platinum), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- Atay F.M., Altıntaş, Y., 1999, Recovering smooth dynamics from time series with the aid of recurrence plots, *Physical review E*, 59(6), 6593–6598.
- Black R.M., 1983, *The History of Electric Wires and Cables*, Peter Peregrinus LTD., London, ISBN: 0 863341 001 4.
- Bolat Sert, S., 2010, *Elektriksel Boşalma Sesinin Tanınması*, Doktora, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bolat, S., Kalenderli, Ö., 2008, Investigation of electric field distribution on cable joints by finite element method, *Eleco'2008 Symposium on Electrical-Electronics and Computer Engineering*, November 26-30 Bursa, 385-389.
- Boulter, E.A., Stone, G.C., 2004, Historical development of rotor and stator winding insulation materials and systems. *IEEE Electrical insulation magazine*, 20(3), 25-39.
- Chandrasekar, S., 2010, Investigations on Tracking and Erosion Resistance of Nano Silicone Composite for High Voltage Outdoor Insulation, *Journal of Energy and Power Engineering*, 4, 32-40.
- Chwang C.P. , Liu C.D., Huang S.W., Chaob D.Y., Lee S.N., 2004, Synthesis and characterization of high dielectric constant polyaniline/polyurethane blends, *Synthetic Metals*, 142, 275–281.
- Cygan, P., Laghari, J.R., 1990, Models for insulation aging under electrical and thermal multistress, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 25(5), 923-934.

- Çelik M.Y., Afşar K.E., 2010, Finansal Zaman Serilerinde Yineleme Haritaları Analizi; İMKB Örneği, *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 28, 279-288.
- Çetin, E., Özer, N.L., Çetin, M., 2005, Porselen izolatörlerde izolasyon problemleri, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 287-292.
- Da Silva, R.F., Swinka Filho, V., 2016, Analysis of electrical tracking by energy absorption during surface discharge in polymeric materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(1), 501-506.
- Dong, D.S., Du, B.X., Zhang, X., Zhu, X., 2006, Discharge Characteristic of Phenolic Resin by Using Chaos theory. *IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials*, 26-30 June 2006 Bali, Xplore, IEEE, 550-553.
- Du B.X., Yu G., Yong L., 2011, Effects of Gamma-Ray Irradiation on Tracking Failure of Polymer Insulating Materials, *Nuclear Power - Operation, Safety and Environment*, Tsvetkov, P.(ed.), Chapter 16, InTech, DOI: 10.5772/17263.
- Du, B.X., Dong, D.S., 2008a, Recurrence plot analysis of discharge currents in tracking tests of gamma-ray irradiated polymers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(4), 974-981.
- Du, B.X., Gu, L., Dong, D.S., 2006, Chaos analysis of discharge current on phenolic resin under reduced pressure, *International Symposium on In Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV'06)*, Xplore, IEEE, 1, 128-131.
- Du, B.X., Gu, L., Dong, D.S., Zheng, X.L., 2008b, Recurrent plot analysis of discharge sequences in tracking test of polybutylene polymers, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(19), 1-7.
- Du, B.X., Guo, Y.G., Liu, Y., Tian, L., 2014, Effects of adding nanofiller on DC tracking failure of epoxy/MgO nano-composites under contaminated conditions, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(5), 2146-2155.
- Du, B.X., Liu, H.J., 2009, The application of recurrence plot in DC tracking test of gamma-ray irradiated polycarbonate, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(1), 17-23.
- Du, B.X., Zhang, J.W., Liu, Y., 2012, Effect of concentration on tracking failure of epoxy/TiO₂ nanocomposites under dc voltage, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(5), 1750-1759.
- Eckmann, J.P., Kamphorst, S.O., Ruelle, D., 1987, Recurrence plots of dynamical systems, *EPL (Europhysics Letters)*, 4(9), 973-977.
- Ersoy Yılmaz A., İspirli M. M., 2018, Recurrence Plot Analysis of polyester samples under contamination effect, *Electrica*, 18(1), 13-18.
- Fraser, A.M., Harry L. S., 1986, Independent coordinates for strange attractors from mutual information, *Physical review A*, 33(2), 1134-1140.

- Gorur R. S., Cherney E. A., Hackam R., 1986, A Comparative Study of Polymer Insulating Materials Under Salt-Fog Conditions, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-21(2), 175-182.
- IEC Publication 112, 1959, Recommended Method for Determining the Comparative Tracking Index of Solid Insulating Materials under Moist Conditions, 2nd ed., Geneva, Switzerland.
- IEC Publication 60112, 2003, Method for the Determination of the Proof and the Comparative Tracking Indices of Solid Insulating Materials, 4th ed., Geneva, Switzerland.
- IEC Publication 60112:2003+AMD1:2009 CSV Consolidated version, 2009, Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials, 4.1st ed., Geneva, Switzerland.
- IEC Publication 60587:2007, 2007, Electrical insulating materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, 3rd ed., Geneva, Switzerland.
- ISOPA (The European Diisocyanate and Polyol Producers Association), 2017, <http://www.polyurethanes.org/en/what-is-it/timeline> (Ziyaret Zamanı: 18.08.2017)
- İspirli, M.M., Ersoy Yılmaz, A., 2016, Tracking failure and recurrence plot analysis for three different levels in the discharge on epoxy resin, *9th National Conference on Electrical-Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, 1-3 November 2016 Bursa, Xplore, IEEE, 349-353.
- İspirli M. M., Ersoy Yılmaz A., 2018, An investigation on characteristics of tracking failure in epoxy resin with harmonic and fractal dimension analysis, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26(1), 245-256., Doi: 10.3906/elk-1705-32
- Kennel M.B., Brown R., Abarbanel H.D.I., 1992, Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction, *Physical review A*, 45(6), 3403-3411.
- Ketenci, 2008a, <http://www.ketenci.com.tr/www/?ketenci=urun&cat=7&id=39> (Ziyaret Zamanı: 20.08.2017)
- Ketenci, 2008b, <http://www.ketenci.com.tr/www/?ketenci=urun&cat=7&id=38> (Ziyaret Zamanı: 20.08.2017)
- Ketenci, 2008c, <http://www.ketenci.com.tr/www/?ketenci=urun&cat=7&id=40> (Ziyaret Zamanı: 20.08.2017)
- Khalifa M., Anis H., 2000, Solid Insulating Materials, *High-Voltage Engineering: Theory and Practice*, In: Abdel-Salam M. (ed.), Chapter 8, Marcel Dekker Inc., New York - Basel, ISBN: 0-8247-0402-9, 235-266.

- Kind, D., Kärner, H., 1985, *High-voltage insulation technology*, Braunschweig, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN: 978-3-528-08599-5.
- Kreuger, F.H., 1990, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*, Butterworth-Heinemann, London, ISBN: 978-0408020633
- Kumagai, S., & Yoshimura, N., 2001, Tracking and erosion of HTV silicone rubber and suppression mechanism of ATH, *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, 8(2), 203-211.
- Kumar R., Gupta N., 2015, Tracking and surface degradation of barium titanate filled silicone rubber nanocomposites, *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 18-21 Ekim 2015 Ann Arbor , Xplore, IEEE, 495-498.
- Kumar, V.S., Vasa, N.J., Sarathi, R., Nakamura, D., Okada, T., 2014, Understanding the discharge activity across GFRP material due to salt deposit under transient voltages by adopting OES and LIBS technique, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(5), 2283-2292.
- Kuntman, A., 2004, *Elektriksel Malzemeler ve Uygulamaları*, İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul, ISBN: 975-404-722-7.
- Li, S., Yin, G., Chen, G., Li, J., Bai, S., Zhong, L., Lei, Q., 2010, Short-term breakdown and long-term failure in nanodielectrics: a review, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(5), 1523-1535.
- Liu, Y., Du, B.X, 2010, Recurrent plot analysis of leakage current on flashover performance of rime-iced composite insulator, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation*, 17(2), 465-472.
- Mackevich J., Shah M., 1997, Polymer outdoor insulating materials. Part I: Comparison of porcelain and polymer electrical insulation, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 13(3), 5-12.
- Malik, N.H., Al-Arainy, A.A., Qureshi, M. I., 1998, *Electrical insulation in power systems*, Marcel Dekker Inc., USA, ISBN: 0-8247-0106-2.
- Marwan, N., 2008, A historical review of recurrence plots, *The European Physical Journal-Special Topics*, 164, 3-12.
- Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., Kurths, J., 2007, Recurrence plots for the analysis of complex systems, *Physics reports*, 438(5), 237-329.
- Matassini L., Kantz H., Holyst J.A., Hegger R., 2002, Optimizing of recurrence plots for noise reduction, *Physical review E*, 65(2), 021102.1-021102.6.
- McLeod A., 2013 SEA-ME-WE 4 Fibre Optic Submarine Cable Project, *Coastal and Ocean Engineering Undergraduate Student Forum (COASTAL-13)*, Nisan 2013 Kanada, Alexander13.1-Alexander13.10.

- Mitchell, G. R., 1974, Present Status of ASTM Tracking Test Methods. *Journal of Testing and Evaluation*, *Journal of Testing and Evaluation*, 2(1), 23-31.
- Naidu, M.S., Kamarahu, V., 1996, *High Voltage Engineering*, 2nd ed., McGraw-Hill Inc., New York, ISBN:0-07-462286-2
- Nelson J.K., Breakdown Strength of Solids. In *Engineering Dielectrics Volume IIA Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular Structure and Electrical Behavior* (pp. 445-445-76), *ASTM International*, <https://doi.org/10.1520/stp37840s>
- Özer H., Can Y., Güçlü H., Karen I., Yazıcı M., 2016, Termoplastik Kompozit Malzeme ve Sentaktik Köpük Esaslı Sandviç Yapılardan Çok Hafif Tampon Kirişi ve Darbe Sönümleyici Geliştirilmesi, *8th OTEKON 2016*, 23-24 Mayıs 2016 Bursa.
- Public Service Commission of Wisconsin, 2011, Underground Electric Transmission Lines, Technical report PSC Online, May 2011, www.psc.wi.gov .
- Reddy, B. S., Rajalingam, M., 2016, Recurrence plot analysis to estimate the surface erosion on polymeric insulating materials, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(3), 1620-1626.
- Schneider, C., Velea, M.N., Kazemahvazi, S., Zenkert, 2015, Compression properties of novel thermoplastic carbon fibre and polyethylene terephthalate fibre composite lattice structures, *Materials and Design*, 65, 1110-1120.
- Shugg W. T., 1995, *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, 2nd ed., New York, IEEE Press, ISBN: 978-0-7803-1030-8.
- Skog J.E., Koreman K., Pääjärvi B., Worzyk T., Andersröd T., 2006, The NorNed HVDC cable link: a power transmission highway between Norway and the Netherlands, *Proceedings of Energex 2006*.
- Szycher, M., 2012, *Szycher's Handbook of Polyurethanes*, 2nd ed., Boca Raton, CRC Press, ISBN: 9781439839584.
- Thiel M., Romano M.C., Kurths J., 2003, Analytical Description of Recurrence Plots of white noise and chaotic processes, *Applied Nonlinear Dynamics*, 11(3), 20-30.
- Thiel M., Romano M.C., Kurths J., Meucci R., Allaria E., Arecchi F.T., 2002, Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis, *Physica D*, 171(3), 138-152.
- Thue W., 2012, *Electrical Power Cable Engineering-Third Edition*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, ISBN: 978-1-4398-5643-7.
- Türk Standartları Enstitüsü, 2008, Kompozit izolatörler - Beyan gerilimi 1000 v'dan daha büyük olan a.a hava hatları için - Terimler, deney metotları ve kabul kriterleri, <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?0531071061110650671151130491160901071000560520551080810900710860750690850471100671090750730811>

1610309008108607310806511708411910107107611805411007804707106808911008
9076052103085080082108050051 (Ziyaret Zamanı: 21.08.2017)

- Ugur, M., 1997, *Modelling and analysis of surface tracking phenomena of solid insulating materials*, Doktora Tezi, University of Manchester.
- Uzunoglu, C.P., Cekli, S., Ugur, M., 2014, Modelling of chaotic surface tracking on the polymeric insulators with Hidden Markov Models. *In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 23-25 April 2014 Trabzon, IEEE, ISBN: 978-1-4799-4874-1, 963-966.
- Webber C.L.Jr., Zbilut J.P., 1994, Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies, *Journal of Applied Physiology*, 76(2), 965–973.
- Webber J.R., Charles L., Marwan, N., 2015, *Recurrence quantification analysis theory and best practices* . Springer International Publishing, USA, ISBN: 978-3-319-07155-8.
- Yağdıran, Z., 1997, *Yüksek Gerilim İzolatörlerinin performansını belirlemede bir deneysel yöntem*, Yüksek Lisans, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Yoshimura N., Kumagai S., Du B.X., 1997, Research in Japan on the tracking phenomenon of electrical insulating materials, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 13(5), 8-19.
- Zbilut J.P., Webber C.L.Jr., 1992, Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots, *Physics Letters A*, 171(3-4), 199–203.
- Zbilut J.P., Webber C.L.Jr., 2007, Recurrence quantification analysis: Introduction and historical context, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 17(10), 3477–3481.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mehmet Murat İSPİRLİ
Doğum Yeri	Osmancık
Doğum Tarihi	14.05.1991
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0507 881 8558
E-Posta Adresi	mispirli@marmara.edu.tr
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	12.06.2015

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Tarihi	16.05.2018

Makale ve Bildiriler
Ersoy Yılmaz A., İspirli M. M., 2018, Recurrence Plot Analysis of polyester samples under contamination effect, <i>Electrica</i> , 18(1), 13-18.
İspirli M. M., Ersoy Yılmaz A., 2018, An investigation on characteristics of tracking failure in epoxy resin with harmonic and fractal dimension analysis, <i>Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences</i> , 26(1), 245-256., Doi: 10.3906/elk-1705-32.
İspirli M. M., Ersoy Yılmaz A., 2016, Tracking failure and recurrence plot analysis for three different levels in the discharge on epoxy resin, <i>9th National Conference on Electrical- Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)</i> , 1-3 November 2016, Bursa, Xplore, IEEE, 349-353.

- Ersoy Yılmaz A., İspirli, M. M., Bayhan N., 2016, Pressure Enforcement Effects On The Current Density of Pem Fuel Cells, *International Journal of Engineering, Technology and Natural Sciences*, 1(2), 6-11.
- Ersoy Yılmaz A., İspirli M. M., 2015, An Investigation on the Parameters that Affect the Performance of Hydrogen Fuel Cell, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2363-2369, Doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.204.
- Ersoy Yılmaz A., İspirli, M. M., Bayhan N., 2016, Pressure Enforcement Effects on the Current Density of PEM Fuel Cells, *Electrotech'16 International Electrical & Electronic Engineering and Technologies*, 29-30 Eylül 2016, İstanbul.
- Ersoy Yılmaz A., İspirli, M. M., 2015, A 3D Model For The Treeing Process On Polymeric Cables, *Electrotech'15 International Electrical & Electronic Engineering and Technologies*, 2-3 Ekim 2015, İstanbul.
- Ersoy Yılmaz A., İspirli M. M., 2015, An Investigation on The Parameters That Affect The Performance of Hydrogen Fuel Cell, *Istanbul University World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship*, 28-30 Mayıs 2015, İstanbul.
- İspirli M. M., Adıgüzel E., Ersoy Yılmaz A., 2015, Ortam şartlarının elektromanyetik kirlenmeye etkisinin incelenmesi, *Emanet'2015 Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri*, 13-15 Kasım, Mersin.
- Ersoy Yılmaz A., İspirli M. M., 2015, İstanbul Üniversitesi Avcılar yerleşkesi için Elektromanyetik kirlilik ölçümleri, *Emanet'2015 Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri*, 13-15 Kasım, Mersin.
- Ersoy Yılmaz A., İspirli M. M., 2015, A 3D simulation of computer aided cautery operation performance. *2015 Medical Technologies National Conference (TIPTEKNO)*, 15-18 Ekim, Muğla, Doi: 10.1109/TIPTEKNO.2015.7374109.