

**KATI YALITKANLARDA YÜZEYSEL BOŞALMANIN
İNCELENMESİ VE MATEMATİKSEL MODELİNİN
ÇIKARILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Mehmet Kazım ERDOĞAN
(504031022)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ
Prof.Dr. Celal KOCATEPE (Y.T.Ü.)**

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği yüksek lisans programı çerçevesinde hazırlanmıştır.

Tez konusunun seçiminde ve yürütülmesinde yol gösterici olan sayın hocam Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN'a, kıymetli zamanını ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, literatür taramama destek veren sayın Doç. Dr. Mukden Uğur'a ve yardımları için Ar. Gör. Aysel Ersoy'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

MAYIS 2006

Mehmet Kâzım Erdoğan

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	V
TABLO LİSTESİ	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VII
SEMBOL LİSTESİ	IX
ÖZET	X
SUMMARY	XI
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. KATI YALITKAN MALZEMELER	2
2.1 Katı Yalıtkan Malzemelerin Özellikleri	2
2.1.1 Organik Yalıtkanlar	3
2.1.2 İnorganik Yalıtkanlar	3
2.1.3 Polimer Yalıtkanlar	3
2.1.3.1 Kauçuk	5
2.1.3.2 Termoplastik Polimerler	5
2.1.3.3 Termosetting Polimerler	5
2.2 Katı Yalıtkan Malzemelerde Bozulma	6
2.2.1 Yaşlanma	6
2.2.2 Kısmi Deşarj (Korona)	6
2.2.3 Elektriksel Ağaçlanma	8
2.2.4 Termik Delinme	9
2.2.5 Elektromekaniksel Delinme	10
2.2.6 Yüzeysel Boşalma	11
2.2.7 Erozyon	13
3. YÜZEYSEL BOŞALMADA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ	14
3.1 CTI (Comparative Tracking Index) Deneyi ASTM D 3638	14
3.1.1 CTI Deneyinde Kullanılan Kirlenme Maddeleri	16
3.1.1.1 Sudaki Amonyum Klorürün Elektrolit Çözeltisi	16
3.1.2 Deney Numunelerinin Özellikleri	16
3.2 Türk Standardı- Katı Yalıtım Malzemeleri-Yüzeysel Kaçaklar ile İlgili Mukayese ve Dayanıklılık İndislerinin Tayini-Nemli Ortam Şartlarında	19
3.2.1 Konu	19
3.2.2 Tanımlar	19
3.2.2.1 Yüzeysel Kaçaklar	19
3.2.2.2 Elektriksel Aşınması (Erozyon)	19
3.2.2.3 Yüzeysel Kaçak Mukayese İndisi (CTI)	19

3.2.2.4 Yüzeysel Kaçak dayanıklılıkindisi (PTI)	19
3.2.3 Kapsam	19
3.2.4 Mukayese ve Dayanıklılık İndislerinin Tayini	20
3.2.4.1 Deney Numunesi	20
3.2.4.2 Deneyin Hazırlanması	20
3.2.5 Deneyin Yapılışı	21
3.2.5.1 Genel Şartlar	21
3.2.5.2 Yüzeysel Kaçak Mukayese İndisi (CTI)nin Tayini	22
3.2.5.3 Yüzeysel Kaçaklara Karşı Dayanıklılık İndisi (PTI) Deneyi	23
3.2.5.4 Aşınmanın (Erozyonun) Tayini	23
3.3 IP Eğik Düzlem Deneyi	24
3.3.1 Deney Numunesinin Özellikleri	26
3.3.2 Deneyin Uygulanması	26
3.4 DF Kirli Sis Deneyi	28
3.4.1 Deney Aygıtları	30
3.4.2 DF Deney Çözeltisi İçeriği	31
3.5 Kuru Ark Deneyi	33
3.5.1 Deney Aygıtları ve Deney Devresi	33
3.6 IEC 1109 Standardına Göre 1000 V'un Üzerindeki Gerilimlerdeki Havai Hatlarda Kullanılan Kompozit İzolatörlerin Deneyi	37
3.6.1 Tasarım Deneyleri	37
3.6.1.1 Gövde Deneyi: Yüzeysel Boşalma ve Erozyon Deneyi	37
3.7 MGR (Merry-Go-Round) Metodu	39
3.8 Diğer Deney Metotları	41
3.9 Sonuç	44
4. YÜZEYSEL BOŞALMA	46
4.1 Yüzeysel Boşalmanın Kapsamı	46
4.1.1 Düzgün Alanda Yüzeysel Boşalma	48
4.1.2 Düzgün Olmayan Alanda Yüzeysel Boşalma	49
4.2 Yüzeysel Boşalmaya Etki Eden Faktörler	52
4.2.1 UV Işınları	52
4.2.2 Düşük Atmosferik Basınç	53
4.2.3 Gama Işınları	54
4.2.4 Korona Zorlanmaları	54
4.2.5 Isıl Zorlanmalar	54
4.2.6 Su Emilimi Zorlanmaları	55
4.2.7 Asit Yağmuru Zorlanmaları	55
5. İ.T.Ü. YÜKSEK GERİLİM LABORATUVARINDA YAPILAN CTI DENEYİ	56
5.1 CTI Deneyinin Elektriksel Devresi	56
5.2 Deney Malzemesinin Özellikleri ve Uygulaması	57
5.2.1 Deneyde Kullanılan Elektrolit Çözeltisi	57
5.2.2 Deney Numunelerinin Özellikleri	57
5.2.3 Deneyin Yapılışı	57
5.2.3.1 170 V'da CTI Deneyi Uygulaması	

5.2.3.2 250 V’da CTI Deneyi Uygulaması	59
5.2.3.3 300 V’da CTI Deneyi Uygulaması	61
5.2.3.4 400 V’da CTI Deneyi Uygulaması	62
5.2.3.5 550 V’da CTI Deneyi Uygulaması	63
5.3 Sonuç	64
6. KATI YALITKANLARDA YÜZEYSEL BOŞALMANIN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	65
6.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanımı	65
6.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihsel Süreci	65
6.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması	66
6.3.1 Sonlu Elemanlara Ayırma (Ayrıklaştırma)	66
6.3.2 Sonlu Elemanlarda Temel Denklemleri	67
6.3.3 Sonlu Elemanların Birleştirilmesi	68
6.3.4 Elde Edilen Denklemlerin Çözümü	70
6.3.4.1 Yinelemeli(İteratif) Çözüm Yöntemi	70
6.3.4.2 Band Matris Yöntemi ile Çözüm Yöntemi	71
6.4 600 V Gerilimde CTI Deneyinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	71
6.4.1 Su Damlası Yokken Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	71
6.4.2 Su Damlası Varken Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi	74
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	76
KAYNAKLAR	78
EKLER	82
EK A İ.T.Ü. Yüksek Gerilim Laboratuvarında Yapılan CTI Deneyinde Kullanılan Cihazlar	82
EK B 590 V’da CTI Deneyi Uygulaması (1. Numune)	84
590 V’da CTI Deneyi Uygulaması (2. Numune)	85
590 V’da CTI Deneyi Uygulaması (3. Numune)	86
600 V’da CTI Deneyi Uygulaması	88
EK C Ortamda Su Damlası Yokken	90
Ortamda Su Damlası Varken	92
ÖZGEÇMİŞ	95

KISALTMALAR

TGA	:Termogravimetrik Analiz
CTI	: Comparative Tracking Index (Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi)
IP	: Inclined Plane Test (Eğik Düzlem Deneyi)
DF	: Dust and Fog Test (Toz-Sis Deneyi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials Standards
IEC	: International Electrotechnical Commission
TS	: Türk Standardı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Kirlenme Oranlarının Uygulaması.....	25
Tablo 3.2 Bir Dakikadaki Akım Adımlarının Dizimi.....	34
Tablo 3.3 Deneyde Kullanılan Üç Tür Epoksi Reçinenin Bileşimi (Sistem 1, 2, 3).....	41
Tablo 4.1 Çeşitli Çevresel Zorlanmalar ve Durumları.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Yüzeysel Boşalma Sistematiği.....	12
Şekil 2.2 : TGA Analizi.....	13
Şekil 3.1 : CTI Deney Düzenegi.....	15
Şekil 3.2 : CTI Deneyinin Elektriksel Devresi.....	15
Şekil 3.3 : Elektrotlar.....	16
Şekil 3.4 : Yüzeysel Boşalma Gerilim Eğrisi.....	17
Şekil 3.5 : Yüzeysel Boşalma İndeksi.....	18
Şekil 3.6 : Deney Cihazı Örneği.....	22
Şekil 3.7 : IP Elektrot Düzenegi.....	26
Şekil 3.8 : Deney Numunesi.....	26
Şekil 3.9 : Filtre Kağıdı.....	27
Şekil 3.10 : IP Deney Düzenegi.....	27
Şekil 3.11 : DF Elektrot Montajı.....	28
Şekil 3.12 : DF Deney Odası.....	29
Şekil 3.13 : DF Deney Devresi.....	32
Şekil 3.14 : Su ve Hava Devresi.....	32
Şekil 3.15 : Kuru Ark Deney Devresi.....	36
Şekil 3.16 : Sistem 1-3'ün Kaçak Akım Karakteristikleri.....	40
Şekil 3.17 : Noto Deney Düzenegi.....	42
Şekil 3.18 : Noto Deney Devresi.....	42
Şekil 4.1 : İzolatörlerde İletken Halkalar.....	47
Şekil 4.2 : Düzgün Alanda Yüzeysel Boşalma.....	48
Şekil 4.3 : Klidonograf.....	50
Şekil 4.4 : Lichtenberg Şekilleri.....	50
Şekil 4.5 : Basitleştirilmiş Bir Geçit İzolatörü.....	51
Şekil 5.1 : CTI Deneyinin Elektriksel Devresi.....	56
Şekil 5.2 : CTI Deneyinde Elektrot Düzenegi.....	57
Şekil 5.3 : CTI Deney Düzenegi.....	58
Şekil 5.4 : CTI Deney Düzenegi Genel Görünüşü.....	58
Şekil 5.5 : 170 V'da Damla Sayısı-Gerilim Değeri(V).....	59
Şekil 5.6 : Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	59
Şekil 5.7 : 250 V'da Damla Sayısı-Akım Değeri(A).....	60
Şekil 5.8 : 250 V'da Damla Sayısı-Gerilim Değeri(V).....	60
Şekil 5.9 : Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	60
Şekil 5.10 : 300 V'da Damla Sayısı-Gerilim Değeri(V).....	61
Şekil 5.11 : 300 V'da Damla Sayısı-Akım Değeri(A).....	61
Şekil 5.12 : Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	61
Şekil 5.13 : 400 V'da Damla Sayısı-Gerilim Değeri(V).....	62
Şekil 5.14 : 400 V'da Damla Sayısı-Akım Değeri(A).....	62
Şekil 5.15 : Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	63
Şekil 5.16 : 550 V'da Damla Sayısı-Gerilim Değeri(V).....	63
Şekil 5.17 : 550 V'da Damla Sayısı-Akım Değeri(A).....	

Şekil 5.18	: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	64
Şekil 6.1	: Sonlu Elemanları Ayırma.....	66
Şekil 6.2	: Elemanlar Ayrık Durumda İken İki Elemanlı Çözüm Bölgesi.....	68
Şekil 6.3	: İki Elemanlı Çözüm Bölgesi Birleşik Durum.....	68
Şekil 6.4	: CTI Deney Düzenğinde Elektrotların Geometrisi.....	72
Şekil 6.5	: Sonlu Elemanlar Ağı.....	72
Şekil 6.6	: Ortamdaki Potansiyel Değişimi.....	73
Şekil 6.7	: Eşpotansiyel Çizgiler.....	73
Şekil 6.8	: Elektriksel Alan Dağılımı.....	74
Şekil 6.9	: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Potansiyel Dağılım.....	75
Şekil 6.10	: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Teğetsel Elektrik Alan Bileşeni.....	75
Şekil A1	: Deneyde Kullanılan Reosta.....	83
Şekil A2	: Görüntü Büyültücü.....	83
Şekil B1	: 590 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V).....	84
Şekil B2	: 590 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri (A).....	84
Şekil B3	: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	85
Şekil B4	: 590 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V).....	85
Şekil B5	: 590 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri (A).....	86
Şekil B6	: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	86
Şekil B7	: 590 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri (A).....	87
Şekil B8	: 590 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V).....	87
Şekil B9	: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	87
Şekil B10	: 600 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V).....	88
Şekil B11	: 600 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri (A).....	88
Şekil B12	: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü.....	89
Şekil B13	: Deneylerde Kullanılan Numuneler.....	89
Şekil C1	: Elektrik Alan Dağılımı	90
Şekil C2	: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Potansiyelin Değişimi.....	90
Şekil C3	: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Teğetsel Elektrik Alan Bileşeninin Değişimi.....	91
Şekil C4	: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Elektriksel Alan Büyüklüğünün Değişimi.....	91
Şekil C5	: Eşpotansiyel Çizgiler.....	92
Şekil C6	: Elektrik Alan Dağılımı	92
Şekil C7	: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Potansiyelin Değişimi.....	93
Şekil C 8	: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Teğetsel Elektrik Alan Bileşeninin Değişimi.....	93
Şekil C9	: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Bileşke Elektrik Alan Büyüklüğünün Değişimi.....	94

SEMBOL LİSTESİ

Ω	: Ohm
A	: Amper
V	: Volt
N	: Newton
Hz	: Hertz
rms	: Etkin değer (root mean square)
[K]	: Genel Katsayılar Matrisi

ÖZET

KATI YALITKANLARDA YÜZEYSEL BOŞALMANIN İNCELENMESİ VE MATEMATİKSEL MODELİNİN ÇIKARILMASI

Bu tezde yapılan çalışmada katı yalıtkan malzemelerde bozulma şekillerinden biri olan yüzeysel boşalma üzerinde durulmuştur. Yüzeysel boşalmayı konu alan ASTM (American Society for Testing and Materials Standards), IEC (International Electrotechnical Commission) ve TS (Türk Standartları) standartları baz alınarak CTI (Comparative Tracking Index-Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi), IP (Inclined Plane Test-Eğik Düzlem Deneyi), DF (Dust and Fog Test-Toz ve Sis Deneyi), Kuru Ark Deneyi gibi deneyler incelenmiştir.

İ.T.Ü. Yüksek Gerilim Laboratuvarında CTI deneyi ele alınarak beş farklı pleksiglas numune üzerinde yüzeysel boşalma araştırılmıştır. Farklı gerilimler uygulanan numuneler deneylerden sonra görüntü büyültücü ile incelenmiştir. Laboratuvarında yapılan deney sonuçları incelenerek sonlu elemanlar yöntemiyle bilgisayar ortamında FEMM 4.0 programıyla matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu programda aynı deney düzeneğindeki gibi elektrot düzeni çizilmiş ve ortam özellikleri, gerilim değeri gibi bilgiler girilerek matematiksel model sonuçları elde edilmiştir. Bilgisayar ortamında yapılan matematiksel modelleme sonucunda elektrotların geometrisi, sonlu elemanlar ağı, ortamdaki potansiyel dağılımı, eşpotansiyel çizgiler, elektriksel alan dağılımı, iki elektrot arasındaki yüzey üzerinde potansiyel değişim, iki elektrot arasındaki yüzey üzerinde teğetsel elektrik alan bileşeni ve elektriksel alanın büyüklüğü ortaya konulmuştur.

Yüksek gerilim hatlarında kullanılan izolatörlerin dış ortam şartları; asit yağmurları, UV ışınlar, düşük atmosferik basınç, ağır kirli endüstriyel ortam, ozon ve nem-kirlenme şartlarına maruz kalmasıyla meydana gelen yüzeysel boşalma laboratuvar şartlarında amonyum klorür kirli çözeltisi uygulanarak sağlanmaya çalışılmış ve deneylerin sonunda 550 V ve 590 V gerilim uygulanan numunelerde hata gözlemlenmiştir.

SUMMARY

EXAMINING THE TRACKING ON SOLID INSULATORS AND OBTAINING THE MATHEMATICAL MODEL

In this thesis, one of the disruption types called tracking is considered. With the basis of ASTM (American Society for Testing and Materials Standards), IEC (International Electrotechnical Commission) and TS(Turkish Standard) CTI (Comparative Tracking Index), IP (Inclined Plane Test), DF (Dust and Fog Test), Dry Arc Test are examined.

In İ.T.Ü. high voltage laboratory, the CTI test is performed on five different plexiglass samples to search tracking. The samples performed with different voltages are examined with image enlarger. After the test results are examined in the laboratory, the mathematical model named Finite Element Method is used with FEMM 4.0 in the computer. In this program, the electrode design is drawn as same as CTI setup and the data like environment conditions and voltage value etc. entered and the results of mathematical model is obtained. At the end of the mathematical model in the computer, the geometry of the electrodes, the mesh, the distribution of potential, equipotential lines, the distribution of electrical field, the potential difference on the surface between the two electrodes, and the tangent of the electrical field on the surface between the two electrodes and the size of the electrical field is found out.

The outside conditions of insulators used in the high voltage transmission and distribution lines; acid rains, UV radiation, low atmospheric pressure, the heavy industrial environment, ozon and humidity-pollution cause tracking performed with ammonium chlorid in the laboratory conditions and there is no failure observed on the samples at the end of the tests.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

20. yüzyılın başında, yalıtım teknolojisinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Cam ve porselen izolatorlar yıllarca denenmiş, kullanılmış ve dünya çapında kabul görmüştür. Polimerik izolatorlar da, üretilme kolaylığı, kirli koşullarda kullanılabilir olmaları ve mekanik dayanımı gibi özelliklerinden dolayı popüler hale gelmiştir.

Kirlenme, ısı değişim, nem, ultraviyole ışınlar, güneş ışığı, mekanik zorlanmalar, uzay yükü gibi birçok iç ve dış faktör izolatorün yaşlanmasını hızlandırır. Bu faktörler yüzeyin nem tutmama özelliğini zayıflatırlar ve malzemenin bozulmasına yol açarak, karbon iz oluşumunu meydana getirir ve yüzeysel boşalma oluşumuna neden olurlar.

Bu yüzden, malzemenin yüzeysel boşalma direncini ölçen çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Burada amaç, çeşitli faktörler altında malzemede meydana gelen yüzeysel boşalmayı incelemek ve bundan yararlanarak en dayanıklı malzemenin seçilmesini sağlamaktır.

Bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konunun genel bir açıklaması yapılmıştır. İkinci bölüm iki kısımda incelenmiştir. İlk kısımda katı yalıtkan malzemelerin özellikleri, ikinci kısımda ise katı yalıtkan malzemelerde bozulmanın meydana gelişi üzerinde durulmuştur. Üçüncü bölümde ise yüzeysel boşalma direncini belirleyen deney yöntemleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde yüzeysel boşalmanın kapsamı ve yüzeysel boşalmaya etki eden faktörler üzerinde durulmuştur. Beşinci bölümde İ.T.Ü. Maslak Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda konu ile ilgili yapılan deneyler anlatılmıştır. Altıncı bölümde, karşılaştırmalı yüzey indisi (CTI) deneyinde kullanılan elektrot sisteminin sonlu elemanlar yöntemi ile elektrik alanı ve potansiyel dağılımı incelemeleri açıklanmıştır. Sonuçlar ve tartışma bölümünde ise kullanılan deney yöntemi ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. KATI YALITKAN MALZEMELER

2.1 Katı Yalıtkan Malzemelerin Özellikleri

Elektriksel yalıtım malzemelerinin tarihi 19. yüzyıla kadar uzanır. İzolatör veya dielektrik, iletken olmayan malzeme olarak tanımlanır. Varolan hiçbir malzeme mükemmel bir yalıtkan değildir. Bununla beraber, belirlenen amaçlar için izolatör, akım akışını belirli bir düşük seviyede sınırlayabilir. Yalıtım malzemeleri; ağır hava koşullarına, ultraviyole ışınlar, kaçak akım etkilerine, uygulanan 50 Hz frekanslı gerilime, yıldırım ve anahtarlama darbeleri gibi aşırı gerilimlere dayanıklı olmalıdır. İyi bir yalıtkan, bu sayılan özellikler yanında, hat iletkenlerinin karşı karşıya kaldığı yüksek seviyede rüzgar yükünü, bazen buz yükünü veya titreşimlerin neden olduğu mekanik yükleri taşıma yeteneğine sahip olmalıdır [1].

Bu yüzyılın başında başlıca kullanılan katı malzemeler; cam, porselen, cam-fiber çekirdekli kompozit izolatörler, silikon kauçuk, EPDM'dir. Cam ve porselen izolatörler uzun süre denenmiş ve bütün dünyada kabul görmüştür. Bununla beraber iletim gerilimlerinin ve demet iletkenlerdeki iletken sayısının artmasıyla mekanik yükler 40 tondan fazla taşıyabilen havai hatları zorunlu kılmıştır. Eğer hat megavolt seviyelerinde kullanılacaksa bu sayı 100 tona kadar çıkabilir. Bu durum, boyut ve ağırlık açısından yüksek oranda gerilme dayanımını sağlayan polimer malzeme olan fiber kompozit malzemelerin kullanımını öne çıkarmıştır. Kompozit izolatörler yalıtım yüzeyinin tamamen ıslanmasını engelleyen nem tutmama özelliklerinden dolayı kirli koşullarda iyi performans gösterirler [1].

İzolatörü yapmak ve hizmete sunmak için gerekli faktörler; elektriksel ve mekanik zorlanmalara dayanıklı, nakliye ve tesisat sürecinde kırılma riski az, uzun ömürlü, bakım gereksinimi az, kaçak akımı düşük, kirlenmelere ve atmosferik koşullara ve kimyasal zorlanmalara dayanıklı, radyo girişim gerilim düzeyi düşük, montajı kolay, fiyat açısından uygun olmalıdır.

2.1.1 Organik Yalıtkanlar

Bitki ve hayvan tabanlı olan organik izolatörler malzemeye kolay uygulanırlar ve iyi yalıtım özelliklerine sahiptirler. Başlıca olumsuzlukları mekanik ve elektriksel özelliklerinin 100^0C 'nin üzerinde zarar görmesidir. Organik izolatörlerin çoğu emici (yağ gibi) maddelerdir [2].

2.1.2 İnorganik Yalıtkanlar

Elektriksel porselen ve elektriksel cam bu kategoriye girer. Porselen çeşitli şekillerdeki kristalleri içeren camsı matris bileşenlerinden meydana gelir. Cam bilinen en eski yalıtım malzemesidir. Katılaştırma sırasında kristalleşmez, yüzey akımları düşüktür ve yüksek sıcaklıklarda güneş ışığını geçirdiği için ısıya karşı dayanıklıdır. Havai hat izolatörlerinde, transformatörlerde, kondansatörlerde ve devre kesicilerinde kullanılması tercih edilmektedir [2].

Porselen ve cam 250^0C sıcaklığa kadar mekanik ve kimyasal özelliklerini korur. Üretimi zordur ama genellikle iyi yalıtım özelliklerine sahiptirler. 1880'lerde porselen ilk iletim hattı izolatörünün üretilmesi için seçilen ilk malzemedir. Uzun dönem boyutsal istikrarı, yüksek elektrik-mekanik dayanımı ve kaçak akıma dayanma yeteneği gibi özellikleri sayesinde ideal bir malzeme olmuştur. Yüzeysel boşalma, delinme gibi diğer malzemeleri sınırlandıran olaylar, su buharının nüfuz etmesini engelleyen dış yalıtım malzemesi olarak kullanılan porselen ile engellenirler. Cam, mekanik olarak porselen kadar kuvvetli değildir çünkü yüzeyi mikro kırıklar içerir [1].

2.1.3 Polimer Yalıtkanlar

1960'ların başında, polimer kompozit malzemelerden üretilen izolatörler, kentsel alanlarda yaşanan sorunlarda yıkıcı yük ve gerilim artışlarına karşı daha iyi direnme ve ağırlığının azalması avantajlarının ortaya çıkmasıyla tanınmıştır. Bugün seramik olmayan veya kompozit izolatörler geleneksel seramik izolatörlere kıyasla daha karlı ve geniş pazar payına sahiptir. Seramik olmayan izolatörlerin avantajları nem ve kirlenme şartlarında da daha hafif olması ve daha düşük maliyetli olmasıdır. Seramik olmayan ve polimerik izolatörler seramik izolatörlerle kıyaslandığında yüzeysel boşalmaya ve erozyona karşı düşük dirence sahiptir. Bu yüzden bunların uzun dönem performansları

hala araştırılmaktadır [3]. Polimer izolatörler anormal uzun dönem zorlanma durumlarında ağaçlanma, yüzeysel boşalma ve erozyon gibi olaylara maruz kalır [4].

Porselen izolatörler gibi kompozit izolatörler de güvenilir uzun dönem mekanik performans, erozyona ve yüzeysel boşalmaya karşı direnç ve yalıtım kabiliyeti gibi bazı kabul edilebilir kriterler gerektirir. İlk kompozit izolatörler cam-fiber ve epoksi reçine katkılı olarak üretilmiştir. Bu izolatörlerin bazı dezavantajları vardır. Bunlar,

- 1) Hava koşullarından dolayı kompozit yüzeyin bozulması, elektriksel bozulmaya sebep olan iletken yolların artmasına yol açar,
- 2) İzolatörün bağlantı uçlarında mekanik hasar oluşması,
- 3) Üretim maliyetinin yüksek oluşu [1].

1970'lerle beraber kompozit izolatörler hemen hemen tamamıyla ortadan kalkmış ve silikon, EPDM, polyester tabanlı polimer, geliştirilmiş epoksi tabanlı kompozitler yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu yeni malzemeler iyi kirlenme performansına, yüksek mekanik mukavemete ve porselenle kıyaslandığında %90'a varan ağırlık azalmasına sahiptirler. Geliştirilmiş kompozit malzemelerin; aşınmaya karşı dirençli, bakımı kolay, üretimi kolay, aşırı zorlanmalara karşı dirençli, kırılabilirliği az ve yapımı sırasında hasara maruz kalma riski az olduğu için yapım maliyeti düşüktür. Elektriksel bakış açısıyla, daha uzun kaçak mesafesiyle üretildiklerinden ıslak ve kirli koşullar altında güç frekansında yalıtım dayanımı, porselen izolatörlerle kıyaslandığında daha gelişmiştir. Kimyasal olarak ise, dış yüzeyi hidrojen atomlarından meydana geldiği için, ıslanma ve kirlenme açısından seramik izolatörlerden daha iyi dirence sahiptirler. Bununla beraber 15 yılı geçen periyotlarda bazı sorunlarla karşılaşmıştır. Bunlar;

- 1) Kirliliğin artışına sebep olan eteklerdeki çatlaklar,
- 2) Atlamaya sebep olan çubuk etek yüzeyleri boyunca yapışma hataları,
- 3) Hattın kopmasına sebep olan mekanik ayrılmalar,
- 4) Elektriksel hataya sebep olan eteklerdeki korona boşalması [1].

2.1.3.1 Kauçuk

Kauçuk, çok yüksek uzunluklara kolayca ulaşabilen ve eski haline çabuk geri dönebilen bir yapıya sahiptir. Moleküler zorlanma olduğunda birbiri üzerine kolaylıkla kayarlar fakat karşılıklı bağlantılar sürekli bir bozulmayı engellerler. Bu yüzden moleküller, zorlanma bittiği zaman eski hallerini alırlar [1].

2.1.3.2 Termoplastik Polimerler

Termoplastik polimerler eriyebilirler [5]. Düşük erime sıcaklığına (100°C - 120°C) sahiptirler. Erime sıcaklığının altında, zorlanma sırasında başka şekiller alabilirler. Soğuma sırasında kristalize olanlar ve soğuma sırasında kristalize olmayanlar şeklinde ikiye ayrılırlar [1]. Termoplastik polimer malzemelere aşağıda sırasıyla değinilecektir.

A) Polivinilklorür (PVC)

Kayıp faktörü küçük ve maliyeti ucuz bir maddedir. Kabloların ana yalıtımında kullanılır. Kullanım gerilimleri 10 kV ile sınırlıdır [2].

B) Politetrafloroetilen-Teflon (PTFE)

Polietilen türevi bir malzemedir. Düşük dielektrik sabiti ve düşük kayıpları olan ısı kararlılığı mükemmel bir malzemedir. İzolatörler, kablolar, motor ve generatörler gibi özel yerlerde kullanılır. Özel fabrikasyon tekniği ile elde edildiğinden maliyeti yüksek bir üründür [2].

C) Polietilen (PE)

Enerji ve haberleşme kablolarında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü düşüktür. -50°C ile $+250^{\circ}\text{C}$ arası bozulmadan kullanılabilme olanağı vardır. Yanma özelliği vardır. PE kablolarının düşük ağırlıklı ve büküm çaplarının küçük olması birer avantaj, kısmi boşalmalara karşı duyarlı olması ise dezavantajdır [2].

2.1.3.3 Termoset Polimerler

Termoset polimerler erimezler ama kimyasal olarak bozunurlar [4]. Isı ile önemli mekanik dayanım ve sertlik kazanırlar. Katalizör kullanılarak istenilen geometrik

şekil verilebilir [1]. Fenolik reçine, termoset polimerlere bir örnektir. Polyester hem termoset polimerlere hem de termoplastik polimerlere örnek olarak verilebilir [5].

2.2 Katı Yalıtkan Malzemelerde Bozulma

Katı yalıtkanlarda bozulma, malzemenin moleküler yapısına ve morfolojisine bağlı olduğu kadar malzemenin geometrisine, sıcaklığına ve çeşitli çevresel faktörlere de bağlıdır. Katı yalıtkanlardaki bozulma yapıları birbiriyle ilişkilidir [2]. Katı yalıtkanlara, sıvı ve gaz yalıtkanlardan farklı olarak delinme sonrası tekrar gerilim uygulanamaz [1]. Bu bölümde sırasıyla bu yapılara değinilecektir.

2.2.1 Yaşlanma

Birçok iç ve dış faktör izolatörlere zarar verebilir. Kaçak akım ve kuru bant boşalmalarını kapsayan elektriksel yaşlanma, yüzeysel boşalma ve erozyonun meydana gelişinden doğrudan sorumludur. Nem, sıcaklık değişimi, ultraviyole ışıma, güneş ışını, mekanik zorlanmalar ve uzay yükleri gibi çevresel etkenler izolatörün yaşlanmasını hızlandırır. Rüzgar da özellikle seramik olmayan izolatörlerin tasarımında oldukça önemlidir çünkü titreşimlere sebep olur ve bu da yalıtım malzemesinde mekanik hasara yol açar. Yaşlanma, malzemenin moleküler yapısı ve bütünselliğinden etkilenebilir. Genel olarak yaşlanma, yalıtkanın ısınması, ağaçlanma, kısmi boşalma gibi etkenlerin sonucu ortaya çıkan elektriksel bozulmadır [1].

2.2.2 Kısmi Boşalma (Korona)

Korona boşalması, küçük yarıçaplı elektrotlarda görülen, tam olmayan fakat kendi kendini besleyen boşalmalara denir. Hava hatlarında gerilim yavaş yavaş yükseltirirse, gerilimin belirli bir değerinde çarpma suretiyle iyonizasyon başlar ve hattı kuşatan ince bir tabakada boşalma için gerekli koşullar sağlanmış olur. Başlangıçta ışık görülmez. Gerilim biraz daha yükseltirirse, hat parça parça, daha sonra da baştan başa ışıklı duruma gelir. Bu durumda boşalma hattın etrafında ince bir zar boyunca kendi kendini besler. Boşalmanın kendi kendini beslediği veya hattın ışıklı duruma geldiği bu gerilime korona gerilimi denir [6].

Buna ilaveten, korona, yalıtımın kısmen delinmesi olarak söylenebilir. Üç biçimde oluşmaktadır: 1) İzolatördeki sivri uçlu elektrotta oluşan elektriksel alanın yaratmış olduğu bozulma, 2) Farklı yalıtım malzemelerinden oluşmuş izolatörlerde bileşenlerden bir tanesinden meydana gelen bozulma, 3) Yüksek alanın yaratmış olduğu bozulma [2]. Peek'e göre korona kayıpları [7] r: cm, a: cm, m: pürüzlülük faktörü, $E_{0et} = 21,1.m.\delta$ kV/cm, R_K : korona direncini göstermek üzere:

$$P_{fK} = \frac{(\Delta U_f)^2}{R_K} = \frac{21,1m.r.\delta.\ln(a/r)}{R_K} \quad (2.1)$$

bağıntısıyla hesaplanır. İki iletken varsa toplam kayıp $P_K = 2 P_{fK}$, üç iletken varsa toplam kayıp $P_K = 3 P_{fK}$ olur.

Bu bağıntılarda sözü edilen korona direnci R_K teorik olarak hesaplanmasına rağmen uzun yorucu ve hassas olmayan sonuçlar verdiği için uygulamada ampirik bağıntı olan

$$R_K = \frac{\delta}{241} \frac{1}{(25 + f)} \sqrt{\frac{a}{r}} \cdot 10^5 \frac{K\Omega}{Faz.Km} \quad (2.2)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada f, Hz olarak işletme frekansını

r: cm olarak iletkenin yarıçapını

a: cm olarak iletkenler arası açıklığı

δ : bağıl hava yoğunluğunu göstermektedir.

$$\delta = \frac{T_0}{P_0} \frac{P}{T} \quad (2.3)$$

$$U_k = \sqrt{3} \cdot 21,2.m.r.\delta \ln \left| \frac{a}{r} \right| \quad (2.4)$$

Korona kayıpları işletme frekansıyla orantılı olarak artar. Yüksek gerilimde iletim hatlarında iletkenin içdirencinden dolayı meydana gelen bakır kayıplarına ek olarak korona kayıpları da ortaya çıkmaktadır [7].

Korona gerilimine etki eden birçok faktör vardır. Bunlar, hatların yarıçapı, iletkenler arası açıklık, hava koşulları, hatların pürüzlülüğüdür [6].

Bunların dışında, malzemenin içindeki hava boşluklarında oluşan kısmi boşalmalar ve yüzeyde meydana gelen boşalmalar da bu tanım içerisine katılabilir. En dikkatlice hazırlanmış malzemelerin kullanıldığı polimerik izolatorleri bile, içinde hava boşluğu olmaksızın üretmek olanaklımümkün değildir. Üretim esnasında polyesterin içinde kalan ve dielektrik sabiti polyesterden daha küçük olan hava kabarcıklarında, gaz basıncına ve diğer faktörlere bağlı olarak yüksek elektrik alanları oluşur. Bu yüksek alan boşlukta delinme meydana getirir. Bu tür boşalmalar izolatorün bozulmasına hemen etki etmezler fakat işletme ömrünü kısaltırlar [1, 2].

2.2.3 Elektriksel Ağaçlanma

Ağaçlanma elektriksel bir delinme olayıdır. Yalıtkanın yüksek gerilim etkisinde dielektrik dayanımının azalması sonucu meydana gelen bu delinme olayına görünürlük kazandırıldığında, şeklinin ağaca benzemesinden dolayı ağaçlanma adı verilmiştir. Ağaçlanma, periyodik kısmi boşalma ile yavaşça oluşup ilerleyebilir, kısmi boşalma olmadığında nemli ortamda yavaşça ya da darbe gerilimi nedeniyle aniden ortaya çıkabilir. Ağaçlanma genelde alternatif gerilim veya darbe gerilimleriyle birlikte oluşsa da, nemli deney ortamlarında yüksek doğru gerilimlerle birlikte olduğu da gözlenmiştir. İçinde olduğu kısmın tamamen elektriksel boşalmasının sonucu ortaya çıkar fakat özellikle, katı yalıtkanlarda kısmen meydana gelen ancak yalıtımı tamamen bozmayan bir delinmedir [8].

Zorlanmanın ardından, izolator üzerinde belli bir sürede herhangi bir hasar gözlenmeyebilir. Bu süre zorlanma seviyesine göre saniyeden başlayıp yıllara kadar çıkabilir. Ağaçlanmanın başlama zamanı, genellikle yalıtıkanda görülen ilk oyuk kanalın oluşması olarak kabul edilir. Malzemedeki boşluklar, malzemenin dielektrik dayanımı için oldukça önemlidir. Boşluk olmayan malzemelerde kısmi boşalma işaretleri gözlenmemesine rağmen belli bir süre gerilim uygulandıktan sonra elektriksel ağaçlanma gözlenebilir. Bu olay şunu açıklar ki ağaçlanma halen oluşmaktadır ancak büyüklükleri küçük genliklerinden ötürü kaydedilememektedir [1].

Bugüne kadar yapılan araştırmalarda katı yalıtkan malzemelerde ağaçlanma başlangıcı için birkaç mekanizma öne sürülmüştür. Bunların herbirinin tahrip mekanizmasını harekete geçirmek için gereken enerji yoğunluğunu sağlayan çok büyük alan şiddetlerine

ihtiyaçları vardır. Bunlar aşırı ısınma, ısı ayrışma, elektriksel alandan doğan mekanik kusurlar, kutup değışimleri ile doğan zayıflamalar, küçük boşluklar, yabancı parçacıklar, (sıcak) elektronların hareketi ve elektron girişı olabilir. Bunların içinde elektron girişı ve yayılımı en etkili olanıdır [8].

Elektriksel ağalanmanın büyümesi kısmi boşalma hareketiyle ilişkilidir. Boşluklar belirli bir büyüklüğe ulaştığında bozulmalar dar kanal biçimine dönüşür ve bunlar elektriksel ağaç kanallarıdır. Bazı araştırmacılar, ağaçlanma başlangıcı ve büyümesi olayını, uygulanan gerilimin kutbiyeti ile ilişkilendirmişlerdir [1].

2.2.4 Isıl Delinme

Isıl delinme, yalıtkana doğru gerilim uygulanması durumunda iletken kayıplarıyla veya alternatif gerilim uygulanması durumunda dielektrik kayıplarla malzemenin aşırı ısınması sonucu oluşur. Isınma hızı, soğuma hızını aşarsa sıcaklık artar. Sıcaklığın artmasıyla kayıplar artar böylece daha çok ısı oluşur ve kararsızlık meydana gelir. Kararsızlık durumunda malzemenin yandığı yerde sıcaklık hızla artar ve bir kanal meydana gelir [9]. Isıl delinmenin oluşması halinde aşağıdaki durumlar gözlenir [9]:

- 1) Delinmenin hemen sonrasında malzemenin delinen kısmının çevresi sıcaktır.
- 2) Delinme kanalı düz ve dallanmamıştır.
- 3) Malzemenin aşırı ısınması tipik bir yanma kokusuna sebep olur.

Alternatif gerilimde ısı delinme [9]:

U gerilimi altında $1 \times 1 \text{ mm}^2$ kesit ele alınmıştır. Dielektrik kayıp W_1

$$W_1 = U^2 \omega C \tan \delta \quad (2.5)$$

1 mm^2 alanda ve d uzunluğunda

$$W_1 = U^2 \omega \frac{1}{d} \varepsilon \tan \delta \quad (2.6)$$

olur. Bu bölümün ortasında tüm ısının üretildiği düşünülmektedir. Bu ısı yukarı ve aşağı olmak üzere iki yöne ayrılır. Isı transferi W_2

$$W_2 = \frac{T}{R} = \frac{2T}{p \frac{1}{2}d} = \frac{4T}{pd} \quad (2.7)$$

olur. Burada p: özgül ısı direnç

T: ortam sıcaklığının üzerindeki sıcaklık

Isıl delinme $W_1 > W_2$ durumunda meydana gelir. Kritik durum $W_1 = W_2$ dir.

$$U^2 \frac{\omega \varepsilon \tan \delta}{d} = \frac{4T}{pd} \quad (2.8)$$

Dielektrik delinmenin olduğu kritik U_T gerilimi:

$$U_T^2 = \frac{4T_c}{p\omega \varepsilon \tan \delta} \quad (2.9)$$

T_c malzemenin bozulduğu kritik sıcaklık değeridir. Bu gerilim düzgün alandaki malzeme için karakteristiktir. Yüksek kayıplı $\varepsilon \tan \delta$ veya yüksek ısı direnç p ye sahip malzemede delinme düşük gerilimle meydana gelir.

Doğru gerilimde ısı delinme:

$$U_T^2 = \frac{4T_c}{p\sigma} \quad (2.10)$$

σ : malzemenin elektriksel iletkenliğidir. Doğru gerilimde hesaplanan U_T alternatif gerilimden oldukça yüksektir.

2.2.5 Elektromekanik Delinme

Elektrostatik kuvvet, doğru gerilim altında elektrotlar arasındaki çekim kuvveti yüzünden dielektrik içinde gelişir. Malzeme, elektromekanik zorlanma, elastik kuvvetle dengelendiğinde denge halindedir. 1 MV/cm’lik elektriksel zorlanma birkaç N/m²’lik basınç üretir ki baskı için yeterlidir ve birçok yumuşak polimerin kalınlığının azalmasına neden olur. Kritik gerilim üzerinde malzeme delinme olana kadar inceler. Polimer malzemelerin erime noktalarının üzerindeki sıcaklıklar, malzemenin elektriksel dayanımının hızla azalmasına neden olur [10].

2.2.6 Yüzeysel Boşalma

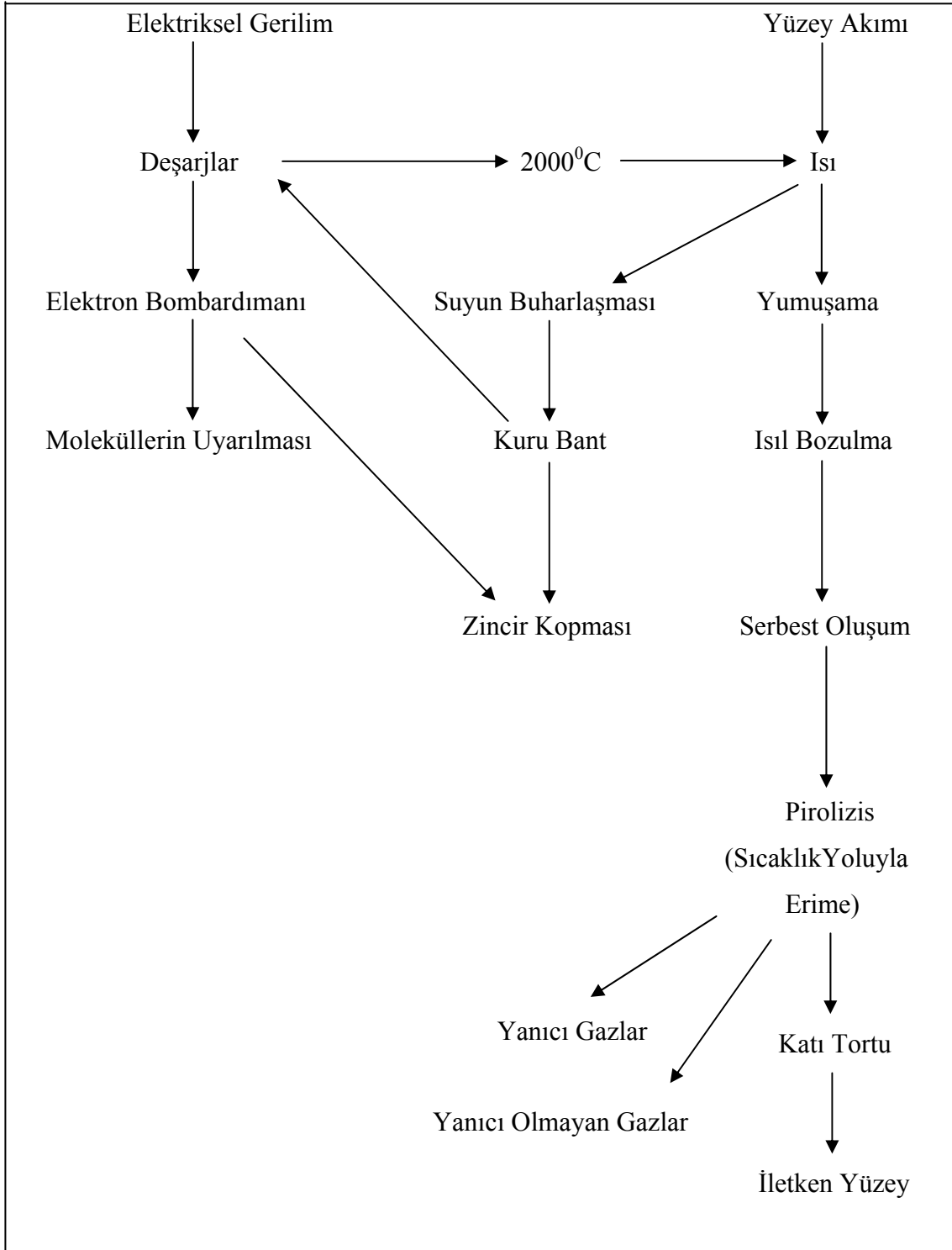
Katı yalıtkan maddelerle sıvı yalıtkan maddeler veya gaz yalıtkan maddeler arasında ve sıvı yalıtkan malzemelerle gaz yalıtkan maddeler arasında sınır yüzeyde görülen boşalmaya yüzeysel boşalma denir.

Yüzeysel boşalma, düşük kayıp özelliğine sahip yalıtkanın elektriksel zorlanmaya maruz kalması durumunda güvenli çalışmasını engelleyen ana faktördür. İşletme sırasında yalıtkanın yüzeyi artarak kirlenir. Atmosferdeki nemden oluşan kirlenme ve ıslak kir tabakası, yüksek gerilim elektroduyla toprak arasında sürekli iletken yol sağlar. Kirlilik ve nemin varlığında yüzey direnci azalır, düşük direnç daha büyük kaçak akımlara ve yüzeyde yüksek enerji yayılmalarına yol açar. Sıcaklık arttığı için yüzeydeki nem buharlaşır. Bu durum genelde düzgün olmayan şekilde gerçekleşir ve kuru bant oluşumuna yol açar. Hemen hemen tüm uygulanan gerilim kuru bant bölgelerinde yoğunlaşır [1]. Karbonlaşma meydana geldikten sonra kuru bantlarda atlamalar gözlenir. Oluşan iletken yolda yüzeysel boşalma gözlenir.

Yüksek enerjili boşalmalar erozyona ve izolatör üzerinde karbon kalıntılarına sebep olur. İletken karbon yollar genişlediğinde genellikle tam delinme gözlenir. Bu durumda geriye kalan yalıtkan malzeme uygulanan gerilime dayanamaz. Önceleri yüzeysel boşalma olayının polimerdeki karbon miktarına bağlı olduğu düşünülmüş fakat bu görüş başarılı olmamıştır. Daha sonra araştırmacılar, karbonun komşu moleküllerle tepkimeye girmesi olayının önemli olduğu fikrini kabul etmişlerdir [1].

Yoshimura yüzeysel boşalmayı (Şekil 2.1), boşalma başlangıcı, karbon oluşumu, elektrolit etkisi altında karbon yolunun yayılması, uygulanan gerilim, elektrot cinsi, boşalma yeri, boşalan enerji ve malzemenin moleküler birleşimi işlemlerinin bir bütünü olarak tanımlar [1].

Houlgate'e göre yüzeysel boşalma üç safhadan oluşur. Seramik olmayan izolatörler yeni iken yüzeyleri nem tutmama özelliğine sahiptir. Yüzeydeki kaçak akımlar sınırlanır ve izolatörler yüksek yüzey direnci sergileyerek mükemmel kirlenme performansı gösterirler [1]. Yavaşça kirlenmenin oluşması ve ıslanma yüzeysel kaçak akımın artmasına yol açar, bu da nem tutmama özelliğinin geçici veya sürekli kaybına neden olur [2]. Kuru bantlardaki atlamalar yüzeysel aşınmaya sebep olabilir [3].



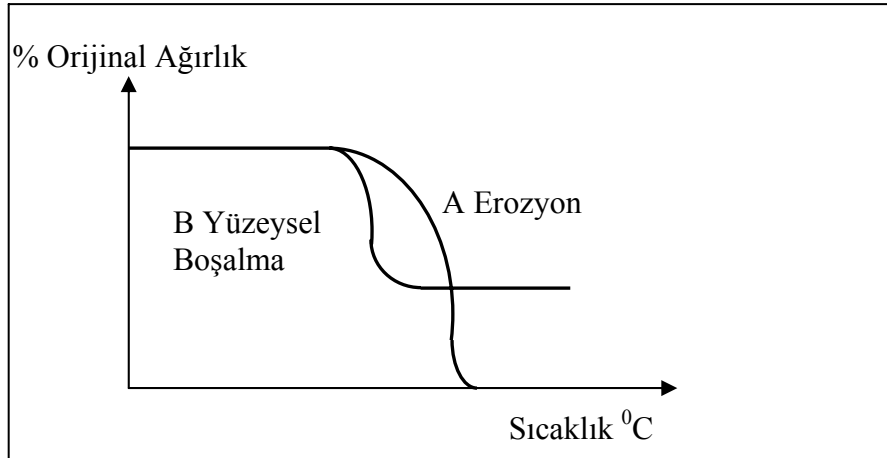
Şekil 2.1: Yüzeysel Boşalma Sistematiği

2.2.7 Erozyon

Yalıtım sistemlerinde kullanılan yalıtkanın içinde veya elektrotlarla yalıtkan arasındaki sınır yüzeyde bazı boşluklar bulunur. Bu boşluk genelde havayla doludur ve delinme dayanımı katı yalıtkindan daha düşüktür. Dolayısıyla boşluktaki elektrik alanı daha büyüktür. Sonuçta yalıtkanın zorlanması durumunda boşluğun uçlarındaki gerilim boşluğun gerilimini aşabilir ve yalıtkan erozyona uğrayıp delinebilir.

Uğur'a göre, polyester malzemedeki yüzeysel boşalmalar, malzemenin moleküler ve atomik yapısında ısı ve elektriksel değişikliklere neden olmaktadır. Bu değişiklikler malzemenin yalıtım ömrünü azaltmaktadır. Erozyon, malzemenin iç yapısındaki hatalardan (hava boşlukları vb.) ve dış etkilere oluşmaktadır [2].

Termogravimetrik analiz yöntemi ile polimerin yüzeysel boşalma veya erozyona eğilimi belirlenir. Bu yöntemle, numune belli bir seviyeye kadar ısıtılır ve ağırlığı gözlenir. Elektriksel boşalma altında erozyona uğrayan polimerlerin ağırlığında azalma olur. Yüzeysel boşalma eğilimi gösteren polimerler, en azından orta seviyede bir kısmi bozulmayı göstermektedir [1].



Şekil 2.2: TGA Analizi

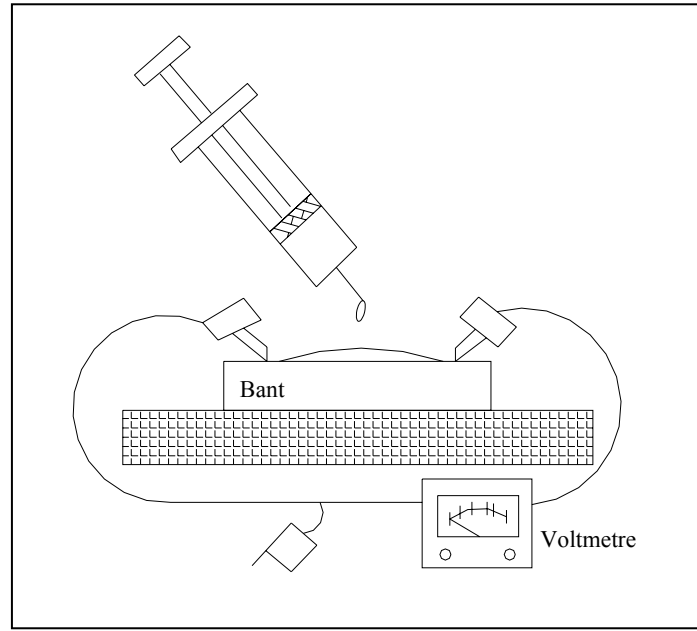
3. YÜZEYSEL BOŞALMADA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ

Katı yalıtkan malzemeler, dayanıklılığının ölçülmesi için deneylere tabi tutulurlar. Bunun için çeşitli deney yöntemleri vardır.

3.1 CTI (Comparative Tracking Index) Deneyi (ASTM D3638)

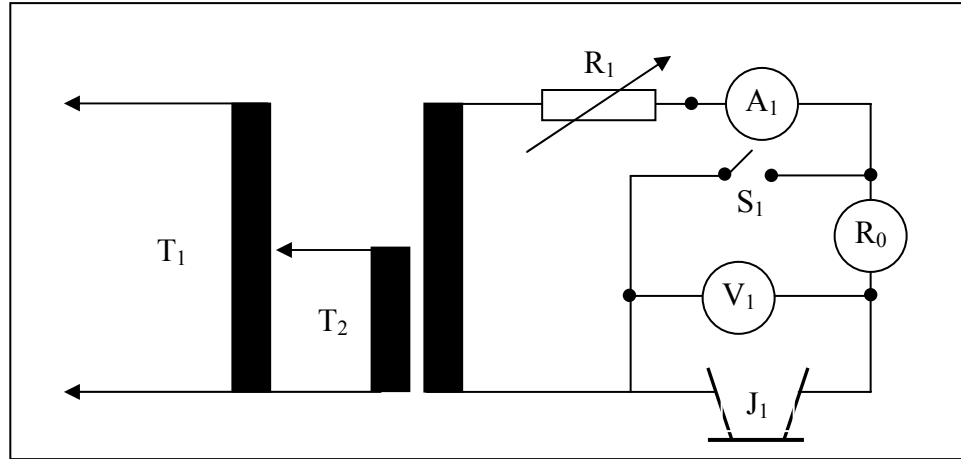
Karşılaştırmalı yüzey indisi (CTI), elektriksel zorlanma, nem ve kirlenme durumunda yalıtım malzemelerinin yüzeysel boşalma potansiyellerini belirler. Bu deney, cihazın gerçek işletme koşullarını simüle etmez fakat düşük deney gerilimlerinde ıslak ve kirli koşullar altında yalıtım malzemesinin performansının karşılaştırılmasını sağlar. Yüzeysel boşalma elektriksel zorlanma altında iletken yolların oluşumudur. Yüzeysel boşalmalar rasgele olmasına rağmen elektrotlar arasında meydana gelir ve elektrotları kısa devre ederek boşalmaya sebep olurlar. CTI deneyi yüzeysel boşalma ve numunedeki hasar durumlarının simülasyonunu sağlar. CTI gerilimi, söz konusu cihazın uygun işletme gerilimine bağlı değildir [11].

CTI deney yönteminde (Şekil 3.1) elektriksel yalıtım malzemesinin yüzeyi, her 30 saniyede bir, iki karşılıklı elektrot arasına damlatılan kirden kaynaklanan düşük akımlı düşük alternatif gerilimine maruz bırakılır [11]. Hataya sebep olacak akım değeri aşılıncaya kadar gerilim uygulanır. Diğer numuneler farklı gerilimlerde test edilir, böylece uygulanan gerilim ile düşen damla sayısı arasındaki ilişkinin grafiği elde edilir. Yalıtkan malzemeye 50 kirli su damlası uygulamasıyla hataya sebep olan gerilimin sayısal değerine CTI denir. Bu değer, malzemenin yüzeysel boşalma direncini gösterir. Organik elektriksel yalıtım malzemeleri, yüzeylerindeki elektrotları arasında kaçak akıma maruz kalırsa, elektrotların yakınında karbonize olmuş (ağaç şeklinde) yollar veya izler gelişmektedir [12].



Şekil 3.1: CTI Deney Düzeneği

Bu deneyin elektriksel devresi Şekil 3.2’de gösterilmektedir [12].



Şekil 3.2: CTI Deneyinin Elektriksel Devresi

T_1 , T_2 : 0-1000 V arasında ayarlanabilir gerilim kaynağı, 50 Hz frekanslı 1 A sürekli akım sağlamaya uygun transformatör,

V_1 : Güç kaynağının değişken çıkış gerilimini ölçer (0-600 V),

A_1 : 0-1 A alternatif akım ölçer,

R_1 : Ayarlanabilir direnç,

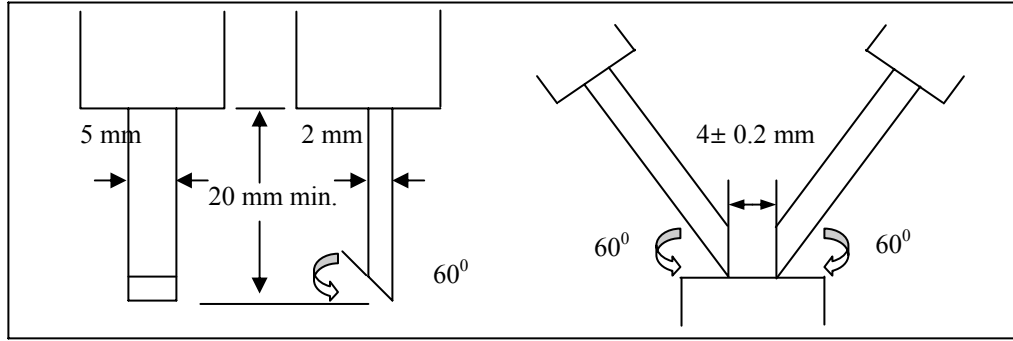
S_1 : Kısa devre anahtarı (1000 V ve 1 A’den büyük akım),

R₀: Aşırı akım rölesi (0,1 A'ye kadar),

J₁: Numune ve elektrot sisteminin kurulduğu ayarlanabilir platform

Platin elektrotlar: 5 x 2 mm (Şekil 3.3) dikdörtgen kesite ve minimum 20 mm uzunluğa sahiptir. Elektrotların uçları, elektrodun 5 mm'lik kenarı boyunca 0,05-0,1 mm yarıçapa sahip 30°'lik açıda şekillendirilmiştir.

Damlatma cihazı: Elektrolitin akmasını ve durmasını sağlar, ayrıca düşen damlanın sayılmasına yardım eder. Damla cihazının ağız çapı yaklaşık 1,5 mm'dir.



Şekil 3.3: Elektrotlar

3.1.1 CTI Deneyinde Kullanılan Kirlenme Maddeleri

3.1.1.1 Amonyum Klorürlü Sudan Oluşan Elektrolit Çözeltisi

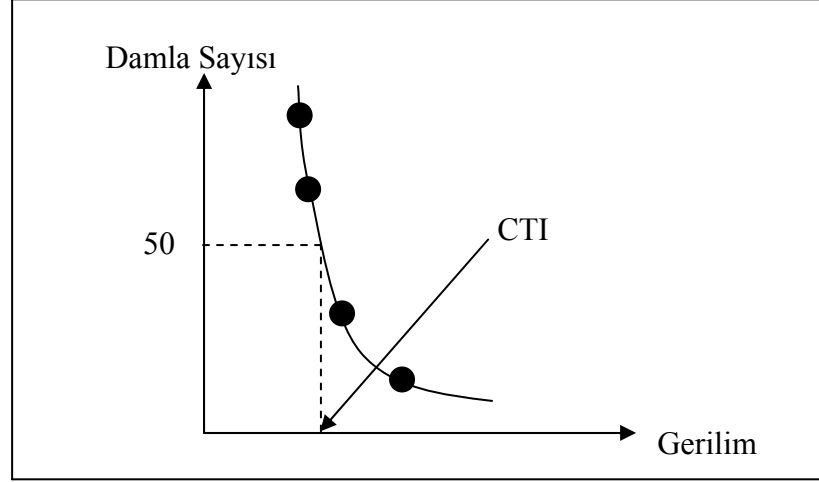
Hazırlanan çözeltide, % 0,1 oranında amonyum klorür (NH₄Cl) kullanılır. Suyun hacimsel öz direnci 23°C'de 0,5 MΩ.cm den az olmamalıdır. Eğer öz direnç 23°C (± 1/2)'de 385 ± 5 Ω.cm ise çözelti deney için hazırdır. Eğer direnç bu sınırların dışında ise bu sınırlara ulaşıncaya kadar çözelti ayarlanmalıdır. Ayarlama su veya NH₄Cl katılmasıyla gerçekteşir [12].

3.1.2 Deney Numunelerinin Özellikleri

Numuneler 50-100 mm çapında disk veya diske benzer şekilde olabilir. Kalınlığı en az 2,5 mm olmalıdır. En az 5 numune herbir deney için kullanılır. Hazırlanan numuneler mümkün olduğu kadar düzgün olmalıdır. Numuneler tozdan, kirden, yağdan ve diğer kirlenmelerden arındırılmalıdır. Yüzey düzgün ve çiziksiz olmalıdır [12].

Deneyde 600 V veya daha düşük bir gerilim uygulanır. Daha yüksek gerilim uygulanırsa yüzeyde elektriksel boşalmalar meydana gelir, bu da hatalı sonuçlara neden olur. Deney

50 damla düşene kadar veya yüzeysel boşalma olana kadar devam eder. 2 saniyeden daha uzun süreyle elektrotlar arasında 0,5 A den daha yüksek akım akarsa hata meydana geldiği kabul edilir [12]. Malzemelerin CTI indisi, gerilim-damla sayısı özelliklerinin kontrol edilmesiyle sınıflandırılır (Şekil 3.4) [1, 12]. IEC, CTI değerini 50 elektrolit damlası damlatıldığında yüzeysel boşalmanın olduğu en düşük gerilim olarak kabul etmektedir [5].



Şekil 3.4: Yüzeysel Boşalma Gerilim Eğrisi

“Çeşitli Elektrot Malzemelerinde Kullanılan Elektriksel Yalıtım Malzemelerinin Yüzeysel Boşalma İndisinin Belirlenmesi İçin Standart Deney Yöntemi” olan ASTM-D5288-97, 2004 yılında revize edilmiştir [13].

Genel olarak CTI ASTM-D3638 ile TI ASTM-D5288 aynı içeriğe sahiptirler. Ancak içerikte bazı küçük farklar göze çarpmaktadır. Örneğin CTI’da V_1 için ölçekte sapma en az $\pm 2,5$ iken, TI’da bu değer $\pm 0,5$ tir [12, 13].

Uygulamada ise CTI için verilen herhangi bir gerilimin test edilmesinde her beş numunede bir okuma yapılır. Bu prosedüre 50 damlanın altında ve 50 damlanın üzerinde en az iki noktada hata veren farklı gerilim seviyeleri belirleninceye kadar devam edilir.

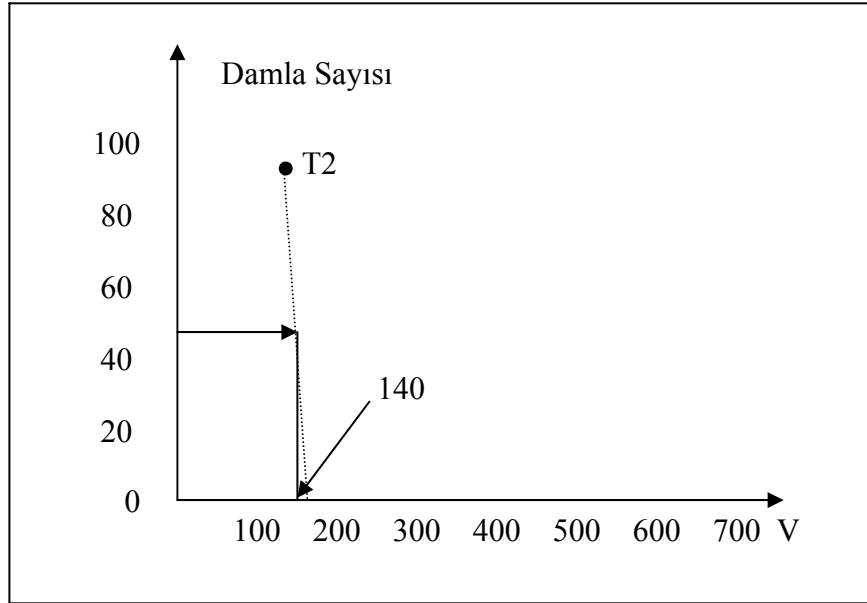
TI için prosedür şu şekildedir:

TI-Cu değerinden daha büyük bir gerilim için güç kaynağı kullanılır. Daha sonra bu güç kaynağı ile bir defa okuma yapılır. Eğer 10 damladan daha az elektrolit damlatıldığında hata meydana geliyorsa gerilim 25 V düşürülür ve deney tekrarlanır. Eğer 10 damla veya

daha fazla elektrolit damlatıldığında hata meydana geliyorsa gerilim 10 V düşürülür ve deney tekrarlanır. Eğer 75 damladan fazla elektrolit damlatılabilmesine deney izin veriyorsa deney durdurulur ve deneyi doğrulamak için aynı gerilimde tekrarlanır [13].

Bilindiği üzere CTI'da 50 damlaya tekabül eden gerilim değeri, CTI değerini vermektedir.

TI'da ise malzemenin 50 damladan az hataya uğradığı en düşük gerilimden 50 damladan fazla hata vermediği en yüksek gerilime yaklaşık dik bir çizgi çizilir. Sonra 50 damla hızasından bu çizgiyi kesen yatay çizgi çizilir. Kestiği noktadan x-eksenine dik inildiği zaman bu değer TI-Cu değeridir (Şekil 3.5) [13].



Şekil 3.5 : Yüzeysel Boşalma İndisi

3.2. Türk Standardı-Katı Yalıtım Malzemeleri-Yüzeysel Kaçaklar ile İlgili Mukayese ve Dayanıklılık İndislerinin Tayini-Nemli Ortam Şartlarında, TS 3338

3.2.1 Konu

Bu standart, yüzeyi elektrikleştirilmiş durumda iken kirle karışık suya maruz kalan katı elektriksel yalıtım malzemelerinin, gerilimi 600 V'a kadar olan yüzeysel elektrik kaçaklarına karşı bağıl dayanıklılığın tayinine dairdir [14].

3.2.2 Tanımlar

3.2.2.1. Yüzeysel Kaçaklar

Yüzeysel kaçaklar, bir katı yalıtım malzemesinin yüzeyinde, elektrik zorlaması ile kirli elektrolitik ortamın birleşik etkisi sonucu meydana gelerek gelişen iletken yollardaki kaçaklardır [14].

3.2.2.2 Elektriksel Aşınması (Erozyon)

Elektriksel aşınma, yalıtkan malzemenin elektrik boşalmalarıyla meydana gelen aşınması olayıdır [14].

3.2.2.3. Yüzeysel Kaçak Mukayese İndisi

Yüzeysel kaçak mukayese indisi, bir malzemenin yüzeysel kaçaklara maruz kalmadan 50 damlaya dayanabildiği maksimum gerilimin volt cinsinden ifade edilen sayısal değeridir [14].

3.2.2.4. Yüzeysel Kaçak Dayanıklılık İndisi

Yüzeysel kaçak dayanıklılık indisi, bir malzemenin yüzeysel kaçaklara maruz kalmadan elli damlaya dayanması gereken gerilimin volt cinsinden ifade edilen sayısal değeridir [14].

3.2.3. Kapsam

Bu standart, katı yalıtım malzemelerini kapsar.

3.2.4 Mukayese ve Dayanıklılık İndislerinin Tayini

3.2.4.1 Deney Numunesi

Deney sırasında, numune kenarlarından sıvının akmasını önleyecek yeterlilikte alanı olan herhangi bir düz yüzey kullanılabilir. Boyutu 15 mm x 15 mm'den az olmayan düz yüzeyler kullanılmalıdır. Numune kalınlığı en az 3 mm olmalı ve bu bilgi ilgili raporda belirtilmelidir [14].

3.2.4.2 Deneyin Hazırlanması

Numune yüzeyi, temiz ve deney sonuçlarını etkileyebilen tozdan, kirden, parmak izlerinden, gresden, yağdan, küf kalıntısından veya diğer kirleticilerden tamamen arınmış olmalıdır. Temizleme işleminde kasılmayı, yumuşamayı veya malzemeye zarar veren diğer hasarları önlemek için tedbir alınmalıdır. Şartlandırma ve temizleme işlemlerinin yapılış şekli ve sırası deney raporunda belirtilmelidir. Kesit alanları 5 mm x 2 mm boyutunda dikdörtgen biçimli iki platin elektrotun birer uçları, 30⁰'lık açısı olan yontma kalem ağzı biçiminde ve hafifçe yuvarlatılmış olmalıdır. Elektrotlar, aralarındaki toplam açı 60⁰ ve karşılıklı kesik yüzleri düşey düzlemde ve bu düzlemler arasındaki uzaklık $4,0 \pm 0,1$ mm olacak biçimde numunenin yatay yüzeyi üzerine simetrik olarak yerleştirilmelidir. Herbir elektrotun yüzeye uyguladığı kuvvet $1 \pm 0,05$ N olmalıdır. Elektrotlar, frekansı 48-60 Hz olan ve değeri 100 Volt ile 600 Volt arasında değişen, pratik olarak sinüs biçimli bir gerilimle beslenmelidir. Bu kaynağın gücü 0,5 kVA'dan az olmamalıdır. Devredeki değişken direnç, kısa devre durumundaki elektrotlar arasındaki akımı $1,0 \pm 0,1$ A'ya ayarlayabilmeli ve voltmetrede okunan gerilim değeri, bu akımın geçişi sırasında %10'dan daha fazla düşmemelidir. Deney devresindeki bir aşırı akım rölesi, 0,5 A veya daha büyük bir akımın 2 saniye devam etmesi durumunda devreyi açmalıdır. Elektrotlar arasında kalan yüzey, 30 ± 5 saniyelik zaman aralıklarında deney çözelti damlalarıyla ıslatılmalıdır. Damlalar, 30-40 mm yükseklikten elektrotlar arasındaki aralığın ortasına damlatılır. Damlaların hacmi 20_{-0}^{+3} mm³ olmalıdır. Her deneyden önce iğne veya damlaların çıkış ucu iyice temizlenmeli ve kullanılacak deney çözelti yoğunluğunun kıvamında olmasını sağlamak üzere yeterli miktarda damla dışarı atılmalıdır [14].

A Çözeltisi: Damıtık veya deiyonize bir suya, kütlece $0,1 \pm 0,002$ 'lik amonyum klorür çözeltisi karıştırılarak elde edilir. Bu çözeltinin özgül direnci, $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta $395 \pm 5 \Omega.\text{cm}$ 'dir [14].

B Çözeltisi: Damıtık veya deiyonize bir suya, kütlece $0,1 \pm 0,002$ 'lik amonyum klorür çözeltisi ve kütlece $0,5 \pm 0,002$ sodyum alkilnaftalen-sulfonat çözeltisi karıştırılarak elde edilir. Bu çözeltinin özgül direnci $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta $170 \pm 5 \Omega.\text{cm}$ 'dir [14].

Bunlardan A çözeltisi öncelikle kullanılır. Etkinliği fazla olan kirleticilerin giderilmesinde B çözeltisi kullanılmalıdır. B çözeltisinin kullanıldığını belirtmek için CTI veya PTI'nin sonuna bir "M" harfi getirilmelidir (Örnek CTI 250 M). A veya B çözeltileri dışında bir çözeltinin kullanılması durumunda, bu husus deney raporunda belirtilmelidir. Sonuçlar CTI veya PTI indisi olarak sayılmamalıdır [14].

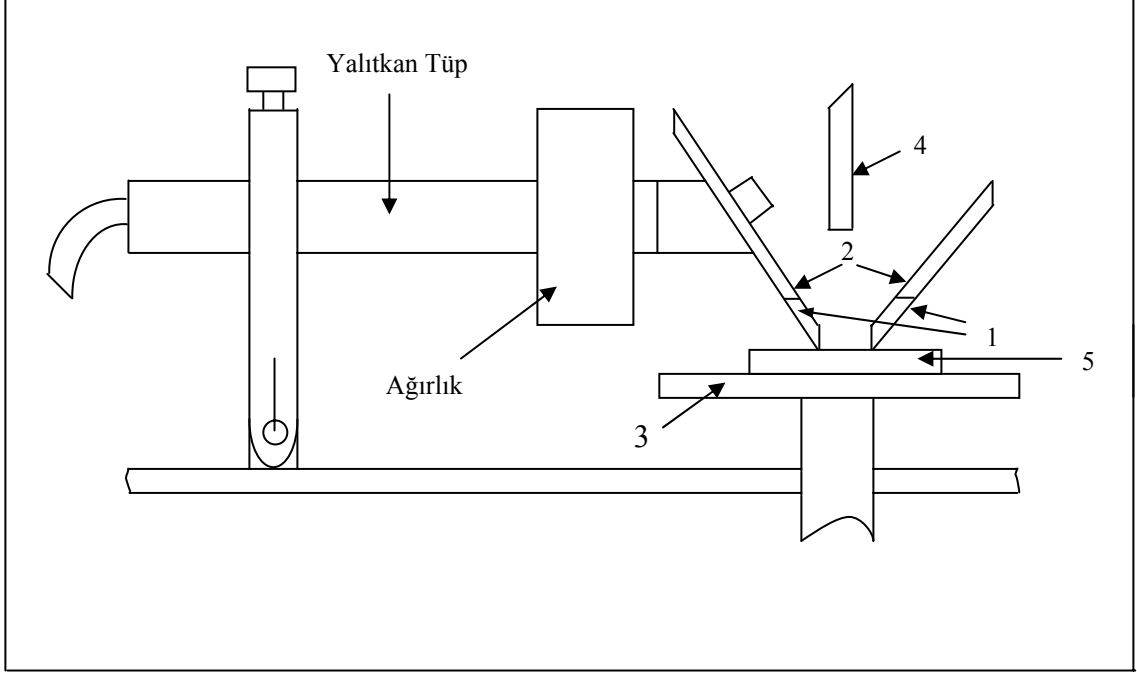
3.2.5. Deneyin Yapılışı

3.2.5.1. Genel Şartlar

Malzeme yüzeyine yerleştirilen bir elektrot sisteminin elektrotları arasına gerilim uygulandığında ve aynı yere, belli aralıklarla elektrolit damlatıldığında, bu yüzey üzerinde yüzeysel kaçak izleri meydana gelebilir. Bu tür kaçak izin belirmesi için gerekli olan damla sayısı, uygulanan gerilimin azalmasına bağlı olarak artar ve kritik bir gerilim değerinin altında kaçak izlerinin oluşumu durur. En yüksek deney geriliminde de yüzeysel kaçak izlerinin yer almadığı malzemelerdeki aşınma olayı farklı şekillerde olabilir. Aşınmanın derinliği ölçülebilir. Bazı malzemeler, deney sırasında tutuşabilir. Deney, hava akımına karşı siperle korunmuş bir numune ile $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta gerçekleştirilmelidir. Elektrotların kirlilik durumu deney sonuçları üzerinde etki yapabilir. Her deneyden önce elektrotlar temizlenmelidir. Numune, her iki elektrotun kesik uç kenarları önceden belirtilen bir kuvvetle bastırılarak numune üzerine uygulanacak biçimde, yatay bir deney yüzeyindeki metalden veya camdan bir mesnet üzerine yerleştirilmelidir (Şekil 3.6) [14].

Elektrotlar arasındaki uzaklık kontrol edilmeli ve bunlarla numune arasında iyi bir temas sağlanmalıdır. Elektrot kenarları aşınmış ise bu aşınma giderilmelidir. Gerilim 25 ile bölünebilen uygun bir değere ayarlanır ve devre direnci kısa devre akımını, belirtilen

tolerans içinde tutacak şekilde ayarlanır. Bundan sonra, deney yüzeyine elektrolit damlatılmasına başlanır. Bu damlatma işlemi yüzeysel kaçaklardan kaynaklanan arıza olayı meydana gelinceye kadar veya 50'nci damlanın sonuna kadar sürdürülür. Numune üzerinde, elektrotlar arasındaki iletken yoldan (aşırı akım rölesini çalıştıran) 0,5 A veya daha büyük bir akım en az 2 saniyelik süre boyunca geçerse veya aşırı akım rölesi çalışmadan önce numune yanar ise arıza olayı meydana gelmiş olur [14].



Şekil 3.6: Deney Cihazı Örneği

- 1: Platin Elektrot
- 2: Pirinç uzantı
- 3: Destek
- 4: Damla Cihazının Ucu
- 5: Numune

3.2.5.2. Yüzeysel Kaçak Mukayese İndisinin Tayini

Gerilim, seçilen değere ayarlanır ve deney, 50 damla işlemi sona erinceye kadar veya daha erken olabilen arıza olayına kadar sürdürülür. Bu deney, beş ayrı deney yerinde uygulanan 50 damla işlemlerinde arıza olmaksızın maksimum gerilim elde edilinceye kadar (diğer deney yerlerinde daha alçak veya daha yüksek gerilimler uygulanarak)

tekrarlanır. Bu gerilimin sayısal değeri (daha sonra gerçekleştirilen beş ayrı yerdeki deneyde bu gerilim 25 V azaltıldığında), 100 damladan önce yüzeysel kaçak olayının meydana gelmemesi şartı ile CTI olarak alınır (örnek; CTI 425). Birkaç malzeme bu son özelliği karşılamayabilir. Bu tür malzeme için, beş yerden herbirinin 100 veya daha çok damlaya dayandığı maksimum gerilim bulunur ve bu gerilimin sayısal değeri, CTI'ye eklenerek gösterilir [Örnek CTI 425 (375)] [14].

3.2.5.3 Yüzeysel Kaçaklara Karşı Dayanıklılık İndisi Deneyi

Malzeme özellikleri veya elektrik donanımı ile ilgili Türk Standardlarında, yalnızca bir dayanıklılık (koruma) deneyinin gerekli görüldüğü durumlarda, deneyler Madde 3.2.5.1.'e göre; ancak değeri önceden belirtilen tek bir gerilim uygulanarak yapılmalıdır. Gerekli sayıdaki numuneler, yüzeysel kaçak olayına meydan vermeden 50 damla işlemine dayanmalıdır. Gerekli görülen numune sayısı beştir. Gerekli görülen gerilim değerleri 175 V, 250 V, 300 V, 375 V, 500 V'dir. Kullanılan kısaltma PTI (Proof Tracking Index)'dir [14].

3.2.5.4 Aşınmanın (Erozyonun) Tayini

Üzerinde yüzeysel kaçaklar için iletken yolların bulunmadığı numuneler, herhangi bir kir kalıntısından veya gevşekçe temasta olduğu niteliği bozulmuş nesnelerden temizlenmiş olmalı ve derinlik ölçen bir cihazın levhası üzerine yerleştirilmelidir. Her bir numunedeki maksimum aşınma derinliği, ucu yarım küre biçiminde ve çapı 1 mm olan bir sonda kullanılarak 0,1 mm doğrulukla ölçülmelidir. Ölçülen beş değer en büyüğü deney raporunda belirtilmelidir.

- a) Deneylerin Madde 2.4.2'ye göre yapılması durumunda, aşınma CTI'ye karşılık olan gerilimde beş numune üzerinde ölçülmelidir.
- b) Deneylerin Madde 2.4.3'e göre yapılması durumunda, aşınma, önceden belirtilen gerilimde 50 damlaya dayanan numuneler üzerinde ölçülmelidir [14].

3.3. Eğik Düzlem Deneyi (IP, Inclined Plane Test)

IP yüzeysel boşalma ve erozyon deneyi, 1961 yılında Mathes ve McGowan'ın çalışmaları sonucunda kurulmuş, sonraları 1964 yılında ASTM olarak standartlaştırılmıştır [5]. Bu deney, dış ortam kullanımı için gerekli olan malzemelerin geliştirilmesi için kullanılır [1].

IP, sıvı kir kullanarak yalıtkan malzemenin yüzeysel boşalma ve aşınma direncini belirler. Muhtemelen IP, iki yüzeysel boşalma ve bir aşınma prosedürü ile en ayrıntılı deney yöntemidir. Katı malzemenin yüzeyi, iyonize edilebilir ve elektriksel olarak iletken sıvı kirle ıslandığı zaman, bu katı yüzeyler boyunca gerilim meydana gelir. Bu gerilime gösterdikleri dirence göre katı yalıtkan malzemeler arasındaki test yöntemleri farklılaşmaktadır [15].

Bu deney yöntemleri üçe ayrılmaktadır [15]:

- 1) Yüzeysel boşalma direncini belirleyen “değişken gerilim yöntemi”
- 2) Yüzeysel boşalma direncini belirleyen “zamana karşı yüzeysel boşalma yöntemi”
- 3) Aşınmanın sayısal belirlenmesi yöntemi

ASTM 2303 de tanımlandığı üzere, İlk Başlangıç Yüzeysel Boşalma Gerilimi Deney Yöntemi, yüzeysel boşalmanın başladığı gerilime karar vermek için kullanılır. Bu yöntemde, uygulanan gerilim toprak elektrodundan 13 mm uzaklıkta iz ilerleyinceye kadar her saatte bir 250 V arttırılır. Üçüncü adımdan önce yüzeysel boşalma meydana gelmemesi şeklinde başlangıç test gerilimi belirlenmelidir. Etkin kıvılcımlanmayı sağlamak için her dört gerilim artışında bir kir akış oranı ayarlanmalıdır (Tablo 3.1) [15]. Bu yöntem yüksek gerilimde ve dış ortamda kullanılan malzemelerin değerlendirilmesinde oldukça kullanışlı bir yöntemdir [1].

Tablo 3.1: Kirlenme Oranlarının Uygulaması

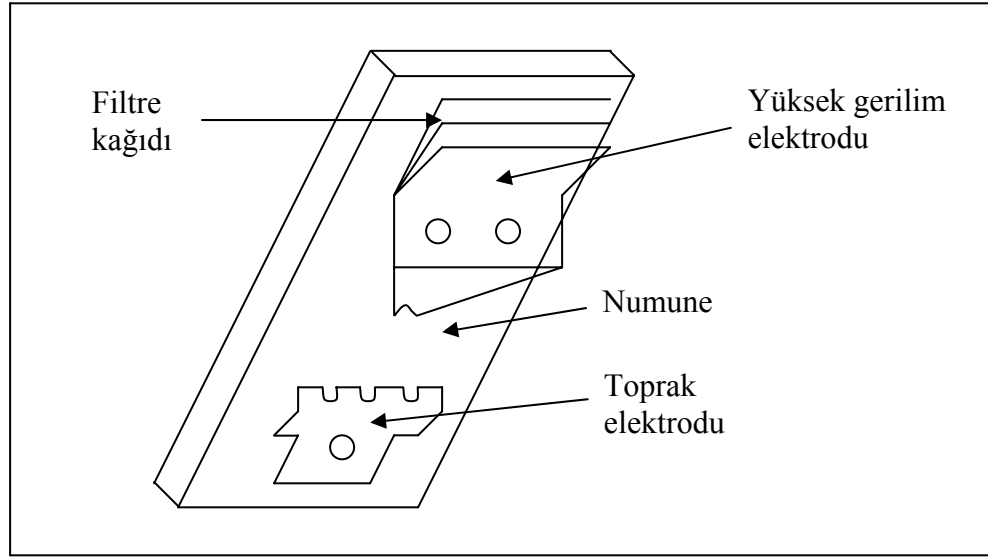
%0,1 NH ₄ Cl,%0,02 Islak Kir Oranı (ml/dak)	Gerilim Aralığı (kV)	Seri Direnç (Ω)
0,075	1-1,75	1000
0,15	2-2,75	10000
0,3	3-3,75	50000
0,6	4-4,75	50000
0,9	5-6	50000

Diğer yöntem olan Zamana Karşı Yüzeysel Boşalma Yönteminde ise malzeme, yüzeysel boşalma ve erozyon olmaksızın en fazla 15 saat boyunca 2,5, 3,5 veya 4,5 kV rms'e gösterdikleri dayanıklılığa göre sınıflandırılır. Eğer deney 10 dakikadan az sürerse, malzemenin gerilim sınıfı dışında olduğu farzedilir [1].

1) 25 mm'ye kadar uzanan sürekli yüzeysel boşalma şekli veya minimum 2 s için var olan akım değeri 60 mA dan fazla ise 2) Numunenin kalınlığında aşınma meydana gelirse deneyde hata oluşur [16].

Bu yöntem, malzemeleri iç ve korumalı dış uygulamalara yönelik kategorize etmekte kullanışlı bir yöntemdir [1].

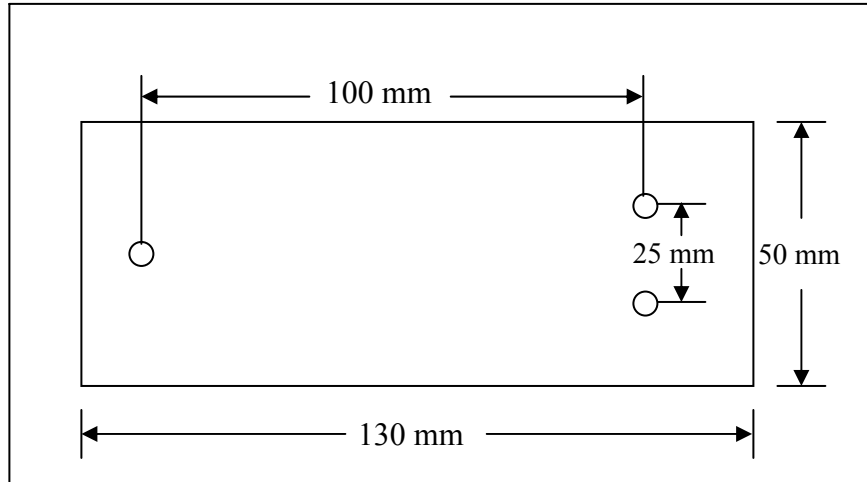
Bu deney yöntemleri malzemenin yüzeyi üzerindeki elektriksel boşalma sonucunda yalıtkan malzeme üzerinde meydana gelen etkileri kantitatif olarak hesaplar. Bu etkiler atmosferdeki nemle birleşmiş kirlenme durumundaki çalışma koşullarına benzerdir. İletken iz şeklinde meydana gelen bozulma, iletkenler arasındaki (Şekil 3.7) [1, 15] boşluğu köprüleyene kadar çok yavaş ilerler. Bu köprüleme elektriksel delinmeye yol açar. Bu deney yöntemlerinde, numunenin yüzeyine optimum kir akışı sağlanır. Kontrol edilmiş enerji ile sürekli yüzeysel boşalma üretimi, birkaç saat içinde numunede bir hata oluşumuna sebebiyet verir. Bu hata, düzensiz koşullarda uzun dönemde meydana gelen hatalara benzerdir [15]. IP deney yönteminde 50 Hz frekansta 1-7,5 kV $\pm$ %1 gerilimde ve en az 0,1 A akım sağlayan enerji kaynağı kullanılmaktadır [15].



Şekil 3.7: IP Elektrot Düzeneği

3.3.1 Deney Numunesinin Özellikleri

Numune (Şekil 3.8) [15] 50 mm x 130 mm x 6,25 mm ölçülerindedir. Numune yüzeyle 45^0 açı yapar [1].

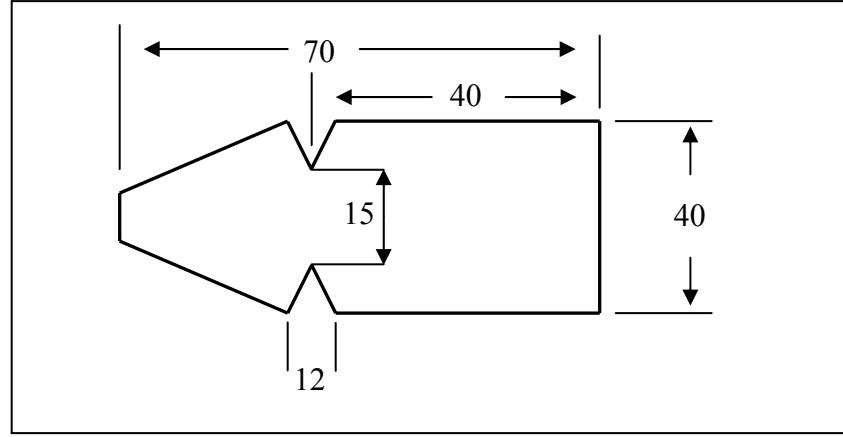


Şekil 3.8: Deney Numunesi

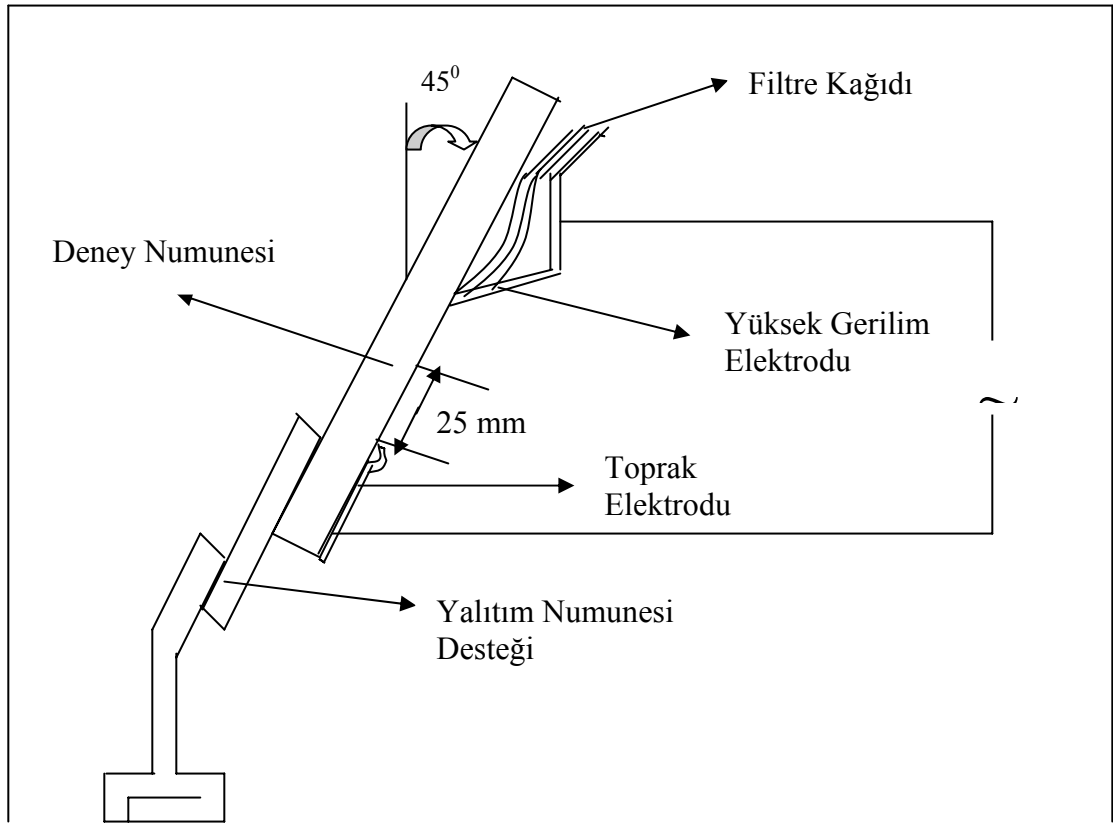
3.3.2 Deneyin Uygulanması

Yüksek gerilimle toprak elektrotları arasındaki boşluk 50 mm olarak belirlenmiştir ve deneyler $23 \pm 2^0\text{C}$ 'de gerçekleştirilmiştir [1]. Aksi belirtilmedikçe, damıtılmış suda %0,1 amonyum klorür ve %0,02 iyonik olmayan ıslak kir olması gerekir. Bu kirli çözelti

$23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta $370\text{-}400 \Omega.\text{cm}$ dirence sahip olmalıdır [15]. Sıvı kir, IEC deneyinde kullanıldığı gibi yukarıdaki yüksek gerilim elektrodu altındaki filtre kağıdından (Şekil 3.9) [1] aşağıdaki toprak elektroduna doğru akar. Akış oranı uygulanan gerilim seviyelerine göre tablo şeklinde düzenlenir ve sürekli kıvılcımlar oluşur ve bunlar toprak elektrodunun üzerindeki numunenin yüzeyinde meydana gelir [5]. Deney düzeneği Şekil 3.10 [17] da gösterilmektedir.



Şekil 3.9: Filtre Kağıdı (bütün boyutlar mm cinsindendir)

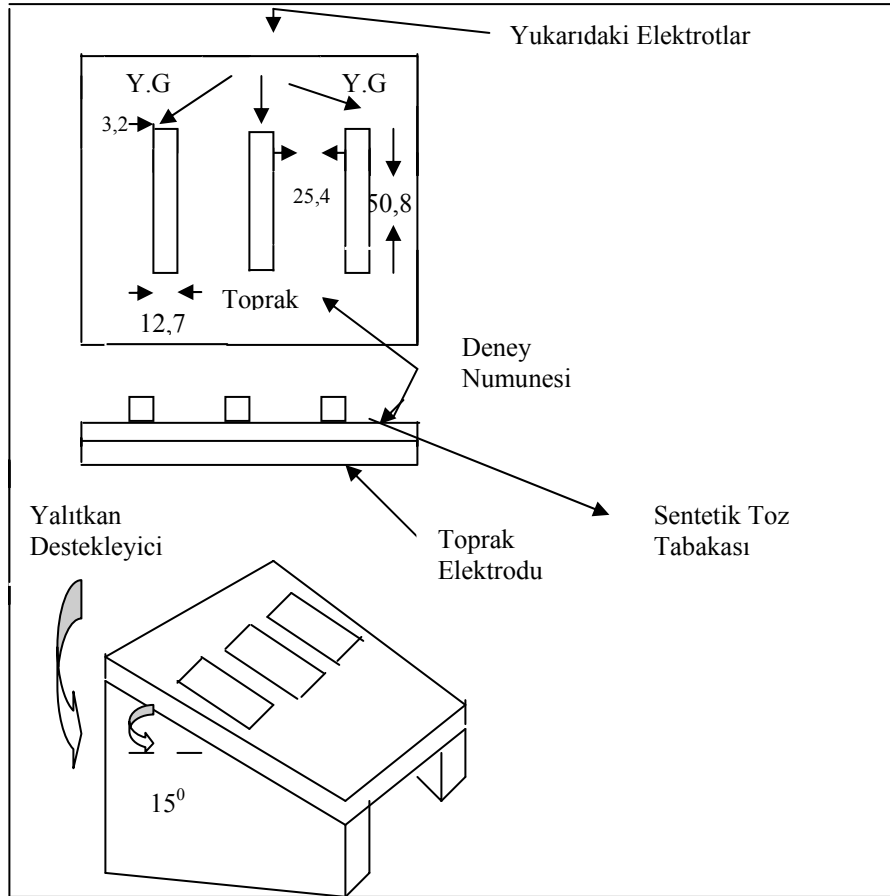


Şekil 3.10: IP Deney Düzeneği

3.4 Kirli Sis Deneyi (DF, Dust- Fog Test)

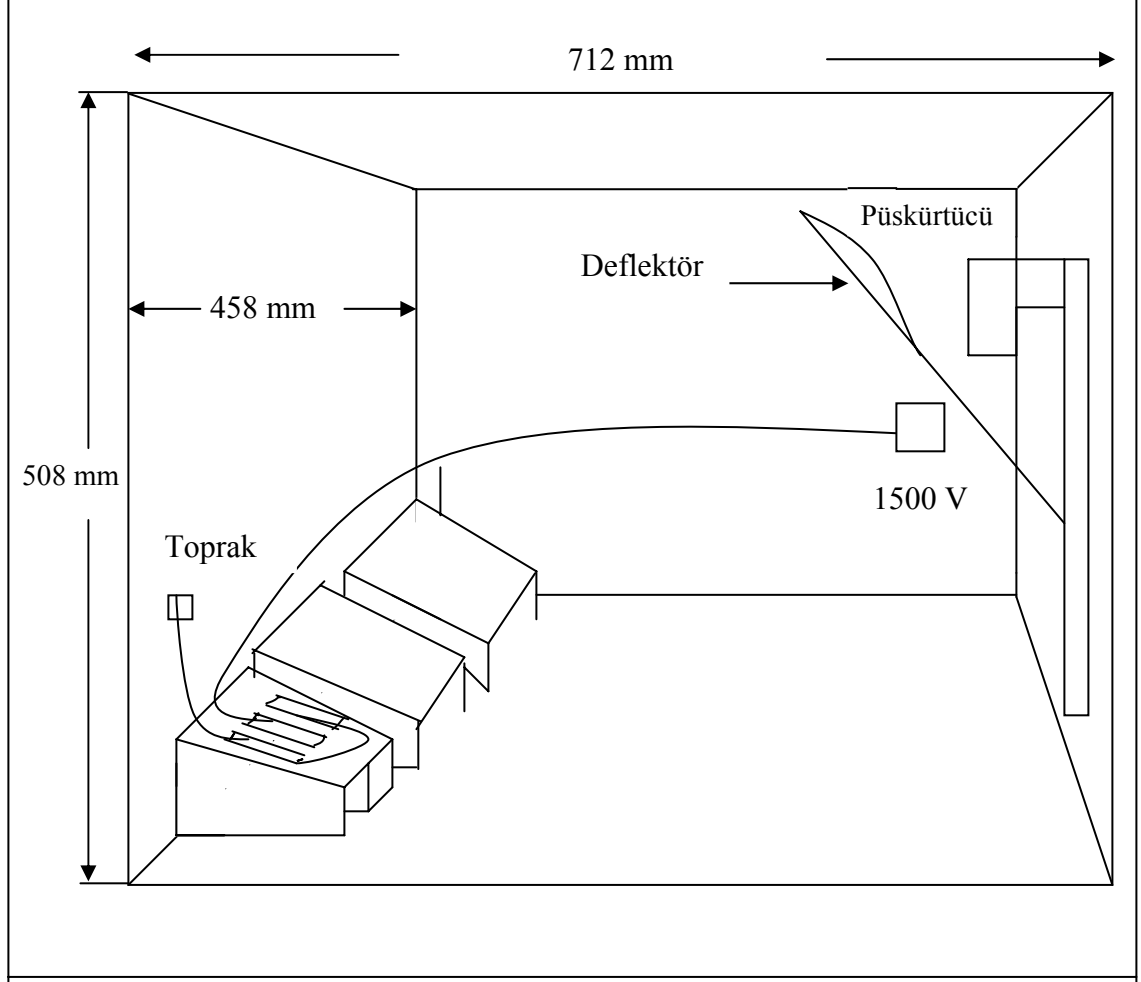
DF deneyi ilk defa 1956 yılında Allbright ve Starr tarafından tanımlanmıştır. DF deneyi katı kir kullanılan ilk deneydir [5]. 1979 yılında modifiye edilmiş ve ASTM D2132 olarak kabul edilmiştir [1].

Elektrotlar Şekil 3.11 [18]'deki gibi yerleştirilir, deney numunesinin yüzeyi sentetik tozla örtülür ve Şekil 3.12 [18]'de gösterildiği gibi odaya yerleştirilir. Deney numunesi su spreyi ile ıslatılır. Yüzey nemlendikten sonra elektrotlar arasına 50 Hz frekanslı gerilim uygulanır. Suyun buharlaşmasıyla üretilen yüksek dirençli alanlar boyunca kıvılcımlar meydana gelir. Bu kıvılcımlar yalıtkan numunede yüksek sıcaklık üretir ve karbonlaşma oluşumuna sebebiyet verir. Karbonlaşma elektriksel alanı yoğunlaştırır. Karbonlaşma alan doğrultusunda ilerler. Bazı durumlarda karbon iz elektrotlar arasında uzanır ve hataya sebep olur [18].



Şekil 3.11 : DF Elektrot Montajı

İzin meydana gelmediği malzemeler, kıvılcımlanma durumunda aşınmaya uğrayabilir. Böyle aşınmalar genellikle yüksek gerilim elektrodundan toprak elektroduna doğru malzemede derinlemesine doğru ilerler [18].



Şekil 3.12: DF Deney Odası

Bilindiği üzere, elektriksel yalıtım malzemeleri nemli ve kirli çevresel faktörlere maruz kaldığında yüzeysel boşalma, erozyon veya her ikisi birden oluşabilir.

Organik yalıtım malzemesinin yüzeyi kömür tozu veya tuz spreyi gibi nem ve kir depolayan dış ortamda bulunduğundan yukarıda sözü edilen özellik geçerli hale gelir. Bu deney yöntemi, ağır dış ortam koşullarını simüle eden hızlandırılmış deney yöntemidir [18].

DF deneyinde, numuneler %3 sodyum klorür içeren, kalınlığı 0,5 ile 0,6 mm arasında olan yapay kirlenme tabakasıyla (sis) ve su zerrecikleriyle kaplanır. Numune kalınlığı

1,6 ± 1 mm ve deney numunesinin boyutları 127 x 127 mm ve 152 x 152 mm'dir [18]. Elektrotlar üst yüzeye yerleştirilir ve toprak elektrodu alt yüzeye yerleştirilir. Şebeke frekansında 1,5 kV gerilim kullanılır. Malzemeler yüzeysel boşalma oluşması için geçen zaman veya numunedeki aşınma için gerekli zaman kaydedilerek yüzeysel boşalma veya aşınma direncine göre sınıflandırılır. Yüzeysel boşalmaya karşı direnci düşük olan malzemeler bu deneyde 5 saat içinde zarar görecektir. Öte yandan, aşınma direnci orta veya yüksek olan numuneler 300 saat dayanabilirler [16].

Bu deney yöntemi sonucunda malzemeler üç grupta sınıflandırılır:

- 1) Yüzeysel boşalmaya karşı hassas (5 saat içinde boşalma gerçekleşir)
- 2) Yüzeysel boşalmaya karşı etkili (yaklaşık 100 saatten önce boşalma gerçekleşir)
- 3) Yüzeysel boşalmaya karşı dirençli (aşınma meydana gelmezse yüzlerce saat dayanır)

Aşınma daha sonra meydana gelse de genellikle numune yüzeyine dik olarak oluşur. Bu yüzden sadece aynı kalınlıktaki numuneler, yüzeysel boşalmaya indirgenmiş erozyona direnci için kıyaslanabilir. Aşınmanın ölçüsü aşınma derinliği ölçülerek belirlenir [18].

“Yüzeysel boşalmaya karşı hassas” grubuna girmeyen malzemeler üçe ayrılırlar:

- 1) Aşınmaya karşı hassas (5-50 saat arasında hata oluşabilir)
- 2) Aşınmaya karşı etkili (50-200 saat arasında hata oluşabilir)
- 3) Aşınmaya karşı dirençli (200 saatin üzerinde hata oluşabilir)

3.4.1. Deney Aygıtları

Deney devresi Şekil 3.13 ve 3.14'de [18] gösterilmiştir.

Devre kesici (OL): Hata sırasında enerjiyi keser. Kesicinin kesme akımı, 115 V gerilim için 2-3 A civarındadır.

Transformatör: 1500 V, 50 Hz rms'lik T₂ transformatörü kullanılmıştır. 115 V gerilim beslemesinde 20:1 oranında kullanılır. Transformatörün empedansı 600-1200 Ω ve reaktansı 200-700 Ω seçilir.

Kontrol transformatörü (T₁): Gerilimi istenen seviyeye ayarlar. Değişken oranlı ototransformatör kullanılır.

Voltmetre (V): Primer tarafta deney numunesinin test gerilimini belirlemek için kullanılır.

Elektrotlar: Üç tane pirinç veya bakır elektrot kullanılır. Elektrodun kenar çapı 3,2 mm, boyu 50,8 mm, eni 12,7 mm'dir. Elektrotlar arası mesafe 25,4 mm'dir.

Deney odası: Deney odası plastik veya metalden yapılır. Ön duvar cam veya polimetil metacrylate'den yapılır. Odanın boyutları 510 x 710 x 460 mm'dir [18].

3.4.2. DF Deney Çözeltisi İçeriği

Kullanılan sentetik toz içeriği [5]:

SiO ₂	%85
Çamur	%9
NaCl	%3
Kağıt-suyla karışık toz	%3

İzleme hazırlıkları: A: Ampermetre

Normal kapalı kontakt (PB) ile Ampermetre şönt yapılır.

Kapasite C, kesme sırasında yüksek akımlardan ampermetreyi korur.

S_A: Anahtar

Kapasite ve ampermetrenin empedansı kesme periyodundan sonra akım ölçümlerinde ihmal edilebilir.

A, B ve C, D osiloskopta izleme için kullanılır.

Osiloskop, kıvılcımlanma akımı belirlenen değerin altına düşerse saati durdurur.

3.5 Kuru Ark Deneyi

1933 yılında geliştirilen bu deney yöntemi yine aynı yıl ASTM tarafından D495 adıyla standartlaştırılmıştır [1].

Bu deney yöntemi, ısı-kimyasal bozulma ve erozyondan dolayı iletken yol oluşumuna ve malzemenin iletken hale gelmesine sebep olan malzemenin yüzeyine yakın yüksek gerilimli düşük akımlı ark karşı gösterdikleri direnç göz önünde bulundurularak, benzer malzemeler arasındaki farklılığı ortaya koyar [19].

Bu deney yöntemi, yüksek gerilimde fakat miliamper seviyelerinde düşük akımda çalışan alternatif akım devrelerini simule eder. Düşük ark direncine sahip malzemeleri ayırt eden bu deney yönteminin ilk safhaları yumuşak sonraki safhaları daha serttir. Kıvılcım, deney numunesi yüzeyinde bulunan iki elektrot arasında zaman zaman durarak meydana gelir [19].

Deneyde dört şekilde hata oluşumu gözlenir [19]:

- 1) Birçok inorganik dielektrikler, akım iletkenliği olduğunda akkor haline gelir. Bununla birlikte soğumayla beraber önceki yalıtım şartlarına geri dönerler,
- 2) Bazı organik bileşimler görülebilir iletken yol olmaksızın alev alıp tutuşabilirler,
- 3) Diğerlerinde elektrotlar arasında ince hat şeklinde yüzeysel boşalma meydana gelmiştir,
- 4) Akımı taşıyacak yeterli karbon oluncaya kadar yüzeyde karbonizasyon meydana gelir.

Malzeme yumuşak safhadan zor safhaya geçtiği birkaç saniye içerisinde sıklıkla hataya uğrar.

3.5.1 Deney Aygıtları ve Deney Devresi

Birincil gerilim kontrolü ark performansı üzerindeki kanıtlanmış zararlı etkilerinden dolayı değişken indüktansdan çok değişken transformator ile yapılmıştır. Bu deney aygıtları şu şekildedir (Şekil 3.15) [19]:

Transformator, T_v : 50 Hz alternatif gerilimde 115 V girişli ve 15000 V çıkışlı kendi kendini regüle eden transformator, çıkış akımı 0,06 A.

Değişken ototransformatör, T_a : 7A veya daha fazla akım geçirip 135 V'a kadar ayarlanabilir.

V_1 : Alternatif akım voltmetresi, 90 ile 130 V arasında 1 V okuyan, birinci devreye verilen gerilimi göstermek için ototransformatörün çıkış uçlarına bağlanır.

Miliampermetre, A: 10 ile 40 mA $\pm$ %5 arasındaki değerleri okur.

Akım kontrol dirençleri, R_{10} , R_{20} , R_{30} , R_{40} : Dirençler birbirleriyle paralel, T_v ile seri bağlıdır. R_{10} her zaman devrede 10 mA kaçak akım geçmesini sağlar. Bu da 1 $\frac{1}{4}$ A akım geçerken 60 Ω luk dirence sahiptir. R_{20} , R_{10} ile paralel bağlı iken 20 mA kaçak akım geçer. Bu durumda 1 $\frac{3}{4}$ A akım geçerken 50 Ω luk dirence sahiptir. Aynı şekilde R_{30} ve R_{40} , 2 A ve 5 A akım geçerken 30 Ω ve 15 Ω 'luk dirençlere sahiptir. Bu dirençler 30 mA ve 40 mA kaçak akım geçmesini sağlar.

R_3 direnci: 15000 Ω değerinde ve 25 W güçtedir. Bu direnç ark devresindeki yüksek frekansı engeller.

İndüktörler: 1,2 ile 1,5 H arasında toplam değeri sekiz indüktans bobininden elde edilir. İndüktansın her bobini 3000 ile 5000 arasında sargı içerir.

Sürücü, I: Motor sürücü aygıtı, Tablo 3.2'ye göre ilk devreyi açıp kapayarak deneyin üç alt basamağında istenilen devir sayısını vermesi için kullanılır.

Tablo 3.2: Bir Dakikadaki Akım Adımlarının Dizimi

Adım	Akım, mA	Zaman Döngüsü	Toplam zaman, s
1/8 10	10	$\frac{1}{4}$ s açık, 1 $\frac{3}{4}$ s kapalı	60
$\frac{1}{4}$ 10	10	$\frac{1}{4}$ s açık, 2/4 s kapalı	120
$\frac{1}{2}$ 10	10	$\frac{1}{4}$ s açık, $\frac{1}{4}$ s kapalı	180
10	10	Sürekli	240
20	20	Sürekli	300
30	30	Sürekli	360
40	40	Sürekli	420

Zamanlayıcı, TT: Durdurucu veya dahili elektriksel zamanlayıcı

Gösterge lambası, IL: $2000\ \Omega$ R_L direnciyle seri 6 W ve 115 V luk lamba. Bu lamba, kullanılan döngüdeki kesintiyi gösterir ve lamba söndürüldükten sonra S1/8 kapatılarak uniform metotda her bir deneyin ilk devresini başlatmak için operatöre izin verir.

Kontrol anahtarları: Anahtarlar, 10 A gerektiren S_1 ve S_4 hariç, 3 A ve 110-125 V alternatif gerilim için uygundur.

Emniyet kontaktörü, C_S : 10 A ve 110-125 V alternatif gerilime uygundur. Bu kontaktörün yerleştirilmesi, elektrot düzeneğindeki koruyucuyu kaldırarak kontaktörün açılmasını sağlar ve böylece elektrotlardaki yüksek gerilim uzaklaştırılır.

Kesici kontaktörü: $1\ \frac{1}{4}$ A ve 125 V alternatif gerilime ayarlıdır. Bu kesici kontaktörlerle ilk devre açılıp kapanır ve Tablo 3.2’de listelenen ara sıra kesilen ark döngüsü sağlanır.

Yüksek gerilim anahtarı, S_4 : Tek kutuplu anahtar 15000 V alternatif gerilim için yalıtılmıştır.

Sargı: Ark devresindeki tüm sargılar 15 kV ve üzeri gerilime uygun olmalıdır. Enerji verildiği zaman sargı ve devre bileşenleri ulaşılmaz olmalıdır.

Elektrot montajları: Genellikle iki elektrot sistemi kullanılır. Bunlar paslanmaz çelik şerit ve tungsten çubuk elektrotdur. Düşük ark dirençli malzeme test edildiğinde değişkenliği azaltmak için paslanmaz çelik elektrotlar kullanılır. Bununla beraber yüksek ark dirençli malzemeler için paslanmaz çelik elektrotlar kullanıldığında köşelerde aşınmaya sebebiyet verir, bu yüzden tungsten çubuk elektrotların kullanılması tavsiye edilir [1].

Transformatörün düşük gerilim tarafındaki birbirine paralel bağlı 4 direnç akım seviyesini sınırlandırır. 15 k Ω luk direnç, atlama sırasında yüksek frekanslı bileşenlerin meydana gelmesini engellemek için deney devresine yerleştirilmiştir [1]. Standart bir mukayese için en az 5 numune $3,17 \pm 0,25$ mm kalınlıklı düz yüzeye sahip olmalıdır [19]. Başlangıç safhalarında yumuşak koşulları sağlamak için kesintili ark kullanılır. Bununla beraber, her dakika sonunda gerilim artar ve son dört basamakta elektrotlar arasında devamlı ark sağlanır. Malzemenin ark direncine, hata meydana gelinceye kadarki toplam test zamanının ölçülmesi yoluyla varılır. Bu deney yöntemi,

elektrotlar arasında iletken yol oluşumuna meyilli olmayan veya güçlü ark koşullarında eriyen malzemeler için uygun değildir. Aynı zamanda deney ortamındaki yüzey ve kirlilik koşulları deney sonuçlarını etkilemesi yönünden önemlidir [1].

3.6 IEC 1109 Standardına Göre 1000 V'un Üzerindeki Gerilimlerdeki Havai Hatlarda Kullanılan Kompozit İzolatörlerin Deneyi

Bu deneylerin sınıflandırılması dörde ayrılır. Bunlar [20]:

- 1) Tasarım deneyleri: İmalat malzemeleri ve yöntemleri için en uygun tasarımı gerçekleştirmek amaçlıdır.
- 2) Tip deneyleri: Şekline ve ölçüsüne göre kompozit izolatörlerin başlıca özelliklerini belirlemek amaçlıdır.
- 3) Örneklemeye deneyleri: Kullanılan malzeme ve üretim kalitesine göre kompozit izolatörlerin diğer özelliklerini belirlemek amaçlıdır.
- 4) Rutin deneyler: İmalat hatalarına göre kompozit izolatörleri elemek amaçlıdır.

3.6.1 Tasarım Deneyleri

Bu deneyler dörde ayrılır. Bunlar metal başlıkların bağlantıları ve ortak yüzeylerle ilgili deney, montajı tamamlanmış çekirdeğin yük-zaman deneyi, gövde deneyi: yüzeysel boşalma ve erozyon deneyi ve çekirdek malzemesi için deneylerdir. Bu tasarım deneyleri bir kere uygulanır ve sonuçları deney raporu şeklinde kaydedilir. Uygun olması durumunda bu deneylerin herbiri yalnız başına yeni deney numuneleriyle test edilebilir [20]. Bunlardan yüzeysel boşalma ve erozyon deneyi incelenecektir.

3.6.1.1 Gövde Deneyi: Yüzeysel Boşalma ve Erozyon Deneyi

Üretim hattından 484-693 mm'lik kaçak mesafesine sahip iki izolatör alınır. Eğer üretim hattından alınamazsa, diğer izolatörlerden alınacak özel deney numuneleri aynı kaçak mesafesi değerlerini sağlar. Bu özel deney numuneleri standart üretilen metal başlıklarla uyumlu olmalıdır [20].

Deney, 14 kV ile 20 kV arasında sabit güç frekanslı gerilimde tuzlu sis altında zaman açısından sınırlı deneydir. Kilovolt cinsinden deney gerilimi, mm cinsinden kaçak mesafesinin 34,6 ile bölünmesiyle elde edilir (20 mm/kV kaçak mesafesine eşittir).

Deney, nemli ve paslanmaya karşı dayanıklı odada gerçekleştirilir ve odanın hacmi 10 m³'ü geçmez. 80 cm²'den fazla olmayacak şekilde havanın içeri girmesini sağlayan delik vardır. Turbo sprej veya oda nemlendiricisi su atomizeri (sıvıyı buğu haline getiren bir alet, bir püskürtücü) olarak kullanılır. Oda sisle doldurulacaktır ancak numunenin üzerine direkt püskürtülmeyecektir. NaCl ile hazırlanmış tuzlu su ve iyonize olmamış su sprej aletine konulur. Güç frekanslı deney gerilimi için deney transformatörü kullanılır. Deney devresinin yüksek gerilim tarafı 250 mA (r.m.s.)lik akımla yüklendiğinde maksimum gerilim düşümü %5 olacaktır. Koruma seviyesi 1 A'e ayarlanır. Deney numuneleri deneye başlamadan önce iyonize olmamış suyla temizlenir. Bir deney numunesi yatay olarak yerleştirilirken ikincisi dikey olarak yerleştirilir. Odanın çatısıyla deney numunesi arasında 200 mm açıklık ve duvarla arasında 100 mm açıklık olacaktır [20].

Deney koşulları şu şekilde olmalıdır [20]:

Deney süresi 1000 saat

Su akış oranı $(0,4 \pm 0,1) \text{ l/(m}^3 \times \text{h)}$

Damla ölçüsü $5\mu\text{m}-10\mu\text{m}$

Sıcaklık $20^\circ\text{C} \pm 5 \text{ K}$

Sudaki NaCl içeriği $(10 \pm 0,5) \text{ kg/m}^3$

Sert koşullar (IEC 815 tarafından tanımlanan ağır veya çok ağır kirlenme, yoğunlaşma ile sık sıcaklık dönüşümleri, yoğun güneş radyasyonu) için kullanıcı ve imalatçının hemfikir olduğu iki alternatif deney vardır [20]:

- 1000 saat yerine 5000 saat süreyle yapılan deney;
- Yüksek sistem geriliminde ($U_m/\sqrt{3}$) güneş radyasyon simülasyonu, yapay yağmurlama, kuru ısı, nemli ısı, oda sıcaklığında yüksek nem, düşük konsantrasyonlu tuzlu sis gibi hava koşullarını simule eden çeşitli zorlanmaları içeren deney.

Bu deney eğer yüzeysel boşalma meydana gelmezse, erozyon fiber-cam çekirdeğe ulaşmazsa ve eteklerde delinme olmazsa, test edilen herbir numune için üçten fazla aşırı akım kesmesi meydana gelmiyorsa deney başarılıdır. Şu anda erozyon çatlaklarının

sayısını belirlemek mümkün değildir. Ayrıca bu deneyle işletme performansı uyumlu olmalıdır.

3.7. MGR (Merry-Go-Round) Yöntemi

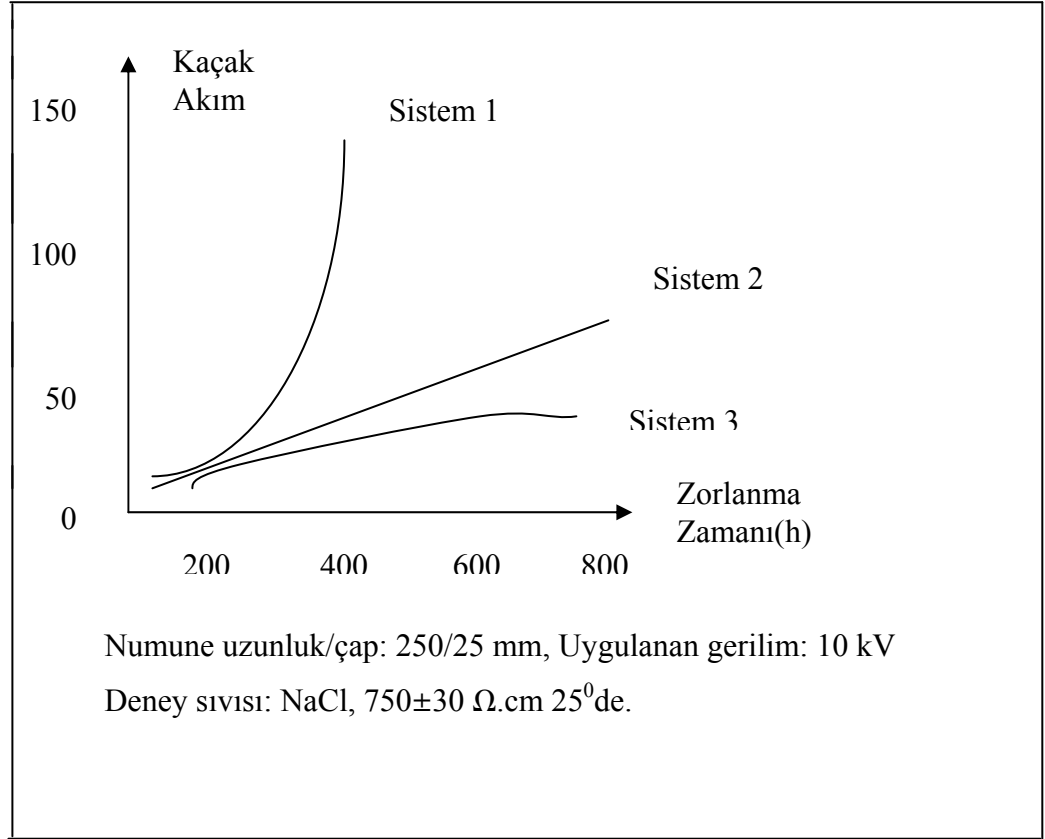
IEC Pub. 112 yüzeysel boşalma deney yöntemi tartışıldıktan sonra Japon araştırmacılar IEC ve Geniş Yüksek Gerilim Elektrik Sistemleri Üzerine Uluslararası Konferans (CIGRE) tarafından oluşturulan Merry-Go-Round (MGR) ve IEC 587 nin yeni deney yöntemlerini adapte etmeye başlamışlardır. Bazı malzemelerin yüzeysel boşalma direnci IEC Pub.112 tarafından değerlendirilememektedir. Japonya’da IEC 587’nin yeterliliği ve sorunları IEEE’de Yalıtım Malzemelerinin Deney Yöntemlerinin Araştırılması Komitesi tarafından tartışılmıştır. MGR ile kıyaslandığında IEC Pub. 587’nin kısa zamanda malzemenin izlenmesi açısından uygun olduğu ancak malzemelerin ömürlerinin belirlenmesi açısından zayıf olduğu kanaatine varılmıştır. Bu yüzden MGR yöntemi, IEC Pub. 587’ye göre daha az dağılımlı ve daha yüksek kesinliğiyle yüzeysel boşalma direncini değerlendiren bir başka deney yöntemi olarak kabul edilmiştir. MGR yöntemi üzerinde temel araştırmalar CIGRE Domestic Task Group tarafından yapılmıştır [17].

MGR yöntemi, yüzeysel boşalmayı ve yalıtkan malzemenin ömrünü kaçak akımı ölçerek ve karbonizasyon ve aşınmayı gözlemleyerek değerlendirebilir. Bu yüzden aşağıdaki karakteristiklerin gerçek zaman değişimlerini kontrol etmek önemlidir [17]:

1. Kaçak akım
2. Ağırlık kaybı
3. Aşınma derinliği
4. Yüzey direncinin iyileşme karakteristikleri
5. Atlama gerilimi
6. Su damlasının temas açısı

Şekil 3.16’da MGR yöntemi ile üç tip epoksi reçinenin kaçak akım karakteristikleri gösterilmiştir. Tablo 3.3’de gösterilen sistem 1-3 deney numuneleridir. Buna göre sistem

1 de kaçak akımın hızlı bir şekilde arttığı ve 400 saat içerisinde yüzeysel boşalmanın meydana geldiği gözlenmiştir. Sistem 2 deney süresi ile kademeli bir yükseliş gösterir. Sistem 3'deki kaçak akım artışı en küçüktür. Bu sonuca göre sistemlerin yüzeysel boşalma direnci $3 > 2 > 1$ şeklinde belirtilebilir. Bununla beraber IEC Pub. 587 bu üç epoksi reçineyi açık bir şekilde sınıflandıramıyordu. Çünkü deneyde zamana karşı yüzeysel boşalma geniş bir yayılım gösteriyordu [17].



Şekil 3.16: Sistem 1-3'ün Kaçak Akım Karakteristikleri

Tablo 3.3: Deneyde Kullanılan Üç Tür Epoksi Reçinenin Bileşimi (Sistem 1, 2, 3)

Deneyde Kullanılan Üç Tür Epoksi Reçinenin Bileşimi			
	Sistem 1	Sistem 2	Sistem 3
Reçine	Araldite CT-200 100 phr	Araldite CY-184 100 phr	Araldite CY-184 100 phr
Sertleştirici	Araldite HT-901 30 phr	Araldite HT-907 90 phr	Araldite HT-907 90 phr
Dolgu	Silikon flor HHH 200 phr	Silikon flor HHH 350 phr	Silane katkı Silikon flor HHH 200 phr
Hızlandırıcı	-	DY-065 6phr	DY-065 6phr
Renk	Doğal		
	CIBA-GEIGY Japonya tarafından yapılmıştır		

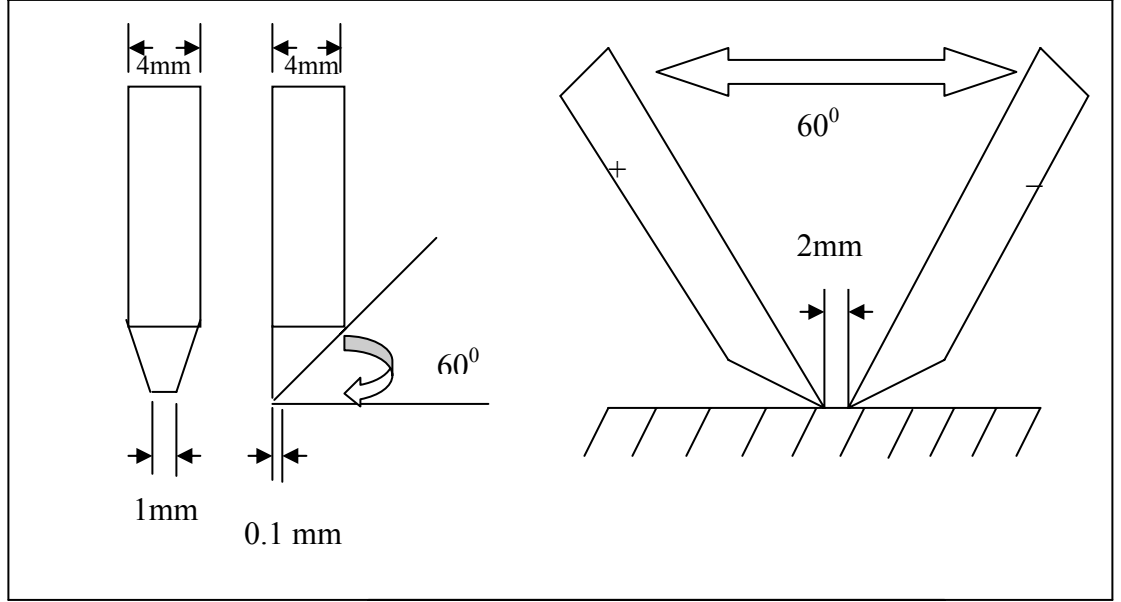
Sonuç olarak MGR yöntemi yüzeysel boşalma yöntemi olarak yüksek doğruluğa sahiptir ancak IEC Pub. 587’den daha uzun sürelidir [17].

3.8 Diğer Deney Yöntemleri

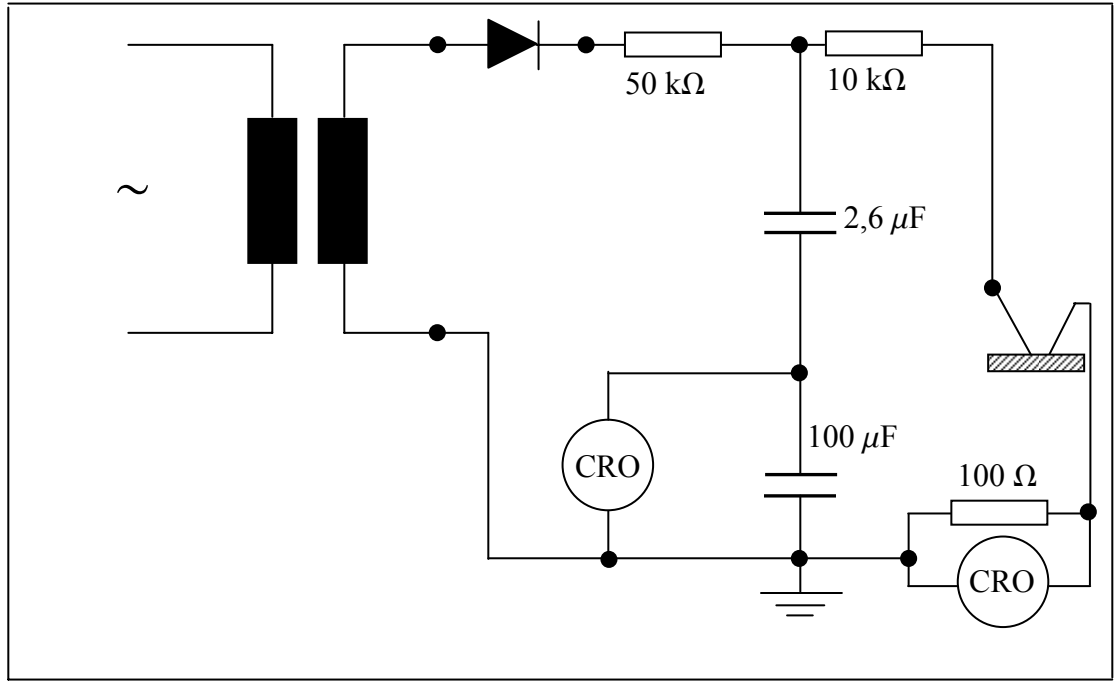
Mevcut birçok diğer deney yöntemi (örneğin “tracking wheel”) kirlenme şartlarında yüzeysel boşalmayı simüle eder fakat sonuçların tekrarlanma ve tekrar üretilebilme eksikliği temel sorundur. Kabul edilmelidir ki, kirli koşullarda hızlandırılmış laboratuvar deneyi, malzemelerin yüzeysel boşalma ve aşınmalarını belirlemede başarılıdır. Bu deney yöntemleriyle fiziksel veya kimyasal olarak, boşalma durumunda malzemenin delinme yöntemlerinin veya çalışma ömrünün belirlenmesi mümkün değildir [5].

Noto tarafından icat edilen yüzeysel boşalma deneyi 1963 yılında tanıtılmıştır. Bu deney yöntemi, yüksek dirençli malzemelerin yüzeysel boşalmasının değerlendirilmesi sorununun üzerinden gelmiştir. Boşalma kısa süreli olduğu için yüzeysel boşalma olmayan malzemelerde yüksek boşalma akımı (300 mA’e kadar) hızlandırılmış erozyon

üretmek için kullanılır. Kapasite dolma süresi boşalmalar arasında numune için soğuma periyodu üretir, ateşleme riskini azaltır. Bu deneyle ilgili bir diğer nokta boşalmaların 100 W.cm^{-2} 'ye varan yüksek yüzeysel enerji yoğunluğu üretmesidir [5]. Deneyin yüzey elektrot şekli Şekil 3.17’de ve deney devresi Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17: Noto Deney Düzenegi



Şekil 3.18: Noto Deney Devresi

Deneyin özelliği boşalma parametrelerini kontrol edebilmesi ve yüzey akı yoğunluğu için kesin değeri ortaya koymasidir. Deney sırasında kondansatörün şarj ve deşarj durumlarında genel üslü formu takip ettiği gözlenmiş ve boşalma enerjisi hesaplanmıştır. Böylece şarj sırasındaki kondansatörde depolanan enerji [5]:

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.1)$$

V: Boşluğun delinme gerilimi

Boşalma sırasında 20 kΩ dirençte yayılan enerji:

$$E_r = \int_0^t i^2 R dt \quad (3.2)$$

$$i = I e^{-t/RC} \text{ (boşluğun delinmesinden sonra)} \quad (3.3)$$

Boşalmadaki enerji $E_c - E_r$ dir. Başlangıçtaki maksimum boşalma akımı 280 mA iken boşalmada yayılan enerji 0,78 J olarak hesaplanmıştır. Yeterli aşınma üreten bu boşalma en dirençli malzemeler üzerinde 10 darbe yapıldıktan sonra ölçülür. Boşalma sırasında ortalama yüzeydeki akının tahmini küçük yüzey bölgesi üzerindeki yayılan enerji oranıyla yapılabilir. Deneysel sonuçlar gösterir ki bu bölge yaklaşık 2 mm² dir ve her darbeye bu bölgeden enerjinin dörtte biri yayılır [5].

Her darbeye yayılan ortalama enerji:

$$\sigma = \frac{Ed}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Ortalama akı yoğunluğu:

$$\frac{\sigma}{4A} = \frac{1}{4A} \frac{Ed}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Şekil 3.16’da gösterilen devre için ortalama enerji yoğunluğu 61 Wcm⁻² dir. Ortalama yüzey enerji yoğunluğundaki artış ve azalışlar boşalma devresindeki zaman sabitini değiştirerek yapılır [5].

“Tracking endurance wheel test” de numuneler 20 kV, 50 Hz kaynaktan beslenir ve her iki dakikada bir su spreysi sıkılır. Numuneler 19 cm uzunluğunda ve 2,54 cm çapındadır.

Numunedeki hata, karbonize olmuş iletken yol oluşumu yüzünden veya yüzeyin pürüzlenmesi ve erozyonu sonucunda yüzeysel kaçak akımının meydana gelmesiyle olur. Her durumda hata 15 A lik devre kesiciyle belirlenir. Birçok durumda polyester, poliüretan vb. için yüzeysel boşalma zamanı 50-100 saattir. Bununla beraber bazı epoksiler için bu süre 200-300 saate kadar çıkabilir [1].

3.9 Sonuç

1930'ların başından beri elektriksel yalıtım malzemelerinin yüzeysel boşalma ve erozyon dirençleri çeşitli deneylerle test edilmektedir.

Standart yöntemler arasında en popüler olanları: ASTM D3638 Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndisi (CTI), ASTM D2132 Tuz ve Sis Deneyi (Dust and Fog Test Method) ve ASTM D2303 Eğik Düzlem Deneyi (Inclined Plane Test Method)dir [21].

CTI deneyi düşük gerilimde (< 600 V) malzemelerin değerlendirilmesi için kullanılır. Diğer iki deney yöntemi ise yüksek gerilimde malzemelerin izlenmesi için kullanılır.

Ancak bu yöntemlerden hiçbiri gerçek işletme koşullarıyla direkt bir korelasyon içerisinde değildir [16].

IP deneyi popüler ve birçok sebepten dolayı endüstride genellikle kullanılan yöntemdir. Çok çeşitli malzemelerin test edilmesi için uygundur ve araştırma, geliştirme, üretim, ticaret ihtiyaçlarına yönelik olarak malzemelerin önemli özelliklerini belirler [16]. IP deney yöntemi nemli yüzeysel boşalma olgusunu oldukça iyi açıklar ve sonuçları dışarıda kullanılan malzemelerin performanslarıyla oldukça örtüşür. Bu deney düzeneğinin kuruluşu ve işletilmesi kolaydır. Bununla beraber tekrardan üretilebilir sonuçları başarmak zordur. Bu sebepten dolayı daha uzun süreli olan DF ve tuzlu-sis deneyleri geliştirilmiştir ve gerçeğe daha yakın çalışma şartlarına haizdir. Ancak tuzlu-sis deneyini uygulamak zordur ve devamlı dikkat gerektirir [1].

DF deneyinin başlıca avantajı değerlendirilen numunelerin gerçekçi bir yaklaşımla kirletilmiş olmasıdır. Dezavantajı ise, deney süresi uzundur ve kararsızlığı fazladır. Bu eksiklik IP deneyi ile geliştirilmiş ancak deney sonuçlarını işletme halindeki modern yalıtım malzemelerinin performansı ile kolaylıkla ilişkilendirmek mümkün değildir [21].

Örneğin, cihazların tuzlu suya maruz kaldığı birkaç sahil yeri haricinde çoğu yerde cihazlar oldukça düşük iletkenliği olan sis, yağmur, çığ ile ıslanmaya maruz kalırlar. Bu durumun yüzeyde başlayan elektriksel boşalmalara etkisi vardır [16].

4. YÜZEYSEL BOŞALMA

4.1. Yüzeysel Boşalmanın Kapsamı

Bilindiği üzere, katı ve sıvı yalıtkan maddelerle gaz yalıtkan maddeler veya katı yalıtkan maddelerle sıvı yalıtkan maddeler arasında sınır yüzeyde görülen boşalmaya yüzeysel boşalma denir. Bunların içinde en önemlisi, katı yalıtkan maddelerle hava arasındaki yüzeysel boşalmadır.

Yüzeysel boşalma yüzey direncine bağlıdır. Yüzeysel boşalma tarafından yalıtımın bozulması ve delinmesine bağlı faktörlerin bilinmesi elektrikli cihazların güvenilir ve ekonomik tasarımı ve çalışması için önemlidir [22].

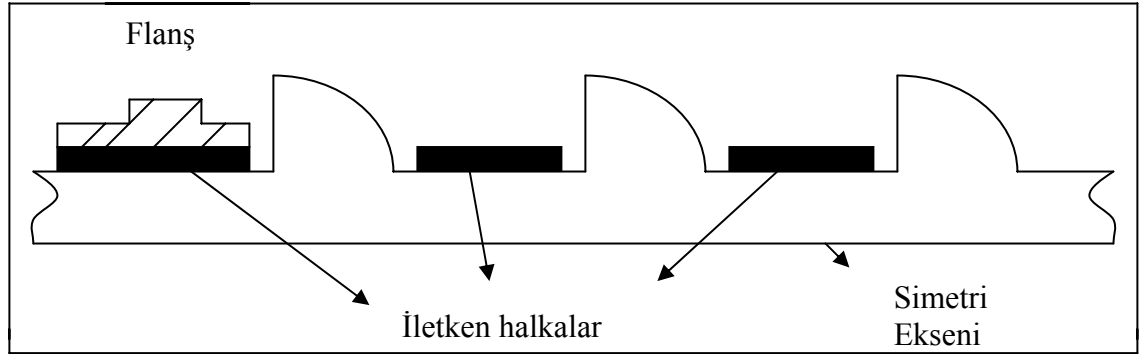
Moleküler yapılarında karbon atomları içeren polimer maddelerin bir olayı olan yüzeysel boşalma, yüzeysel kirlenme sonucu oluşan iletkenlikten dolayı yüzeyde meydana gelir. Yüzeysel boşalma yüzeysel alanla, yüzeysel akım büyüklüğüyle, boşalmaların durumuyla değişir. Bunların hepsi yüzey ıslaklığından ve kirlenme derecesinden kaynaklanır. Tuz, toz, nem ve atmosferik kimyasallar yüzeysel boşalmaya neden olan kirlenme çeşitleridir. Yüzeysel boşalma tekrar tekrar meydana geldiğinde yüzeyde elektrik yalıtımı zayıflar [17]. Nem, akış oranı, kirlenme, gerilim gibi faktörler nedeniyle yalıtkanın ömrünü tahmin etmek güçtür. Yüksek gerilim değerleri yüzeysel boşalma süresini azaltır ve böylece yüzeysel boşalmadaki dallanmalar azalır [23].

İşletme sırasında yalıtımın yüzeyi artarak kirlenir. Kirlenme, atmosferdeki nemden ve yüksek gerilim elektroduyla toprak arasında sürekli iletken yol sağlayan ıslak kir tabakasından oluşur. Kirlenme ve nem olduğunda yüzey direnci azalır. Yüzeysel elektrik boşalması ıslak, kirli durumlarda yalıtım malzemesinde oluşan kaçak akımdan kaynaklanır [22]. Düşük direnç olması durumunda yüksek kaçak akımlar ve yüksek enerji kaybı yüzeydeki nemin azalmasına sebep olur Bu kayıp her tarafta aynı değildir ve kuru bant meydana gelir. Kuru bant oluştuğunda yüzey kaçak akım akışı kesilir. Kuru bant oluşumu durumunda hemen hemen uygulanan her gerilim kuru bantlarda yoğunlaşır ve elektriksel boşalmalar meydana gelir. Elektriksel boşalmalar yalıtım

yüzeyindeki arklarda yüksek sıcaklıklara ulaşılmasına sebebiyet verir. Bu durum erozyon ve karbonlu artıkların oluşumuna yol açar [24]. İletken karbon yolu, yalıtımın işletme gerilimine dayanamayacağı noktaya ulaştığında yalıtım yüzeyi tamamen delinir. Değişik yalıtım malzemelerinin yüzeysel boşalma dirençlerini değerlendirmek için uluslararası deney yöntemleri vardır. (BS 5604;1986, IEC 587; 1984) [22].

IEEE tarafından önerilen hızlandırılmış yağmurlama deneyi ve dairesel hareketle yapılan deneyler polimer malzemenin performansını değerlendirir. Yapılan deneyler göstermiştir ki, yüzeysel boşalmanın başladığı noktayla boşalmanın yüksek gerilim elektroduyla toprak elektrodu arasında gerçekleşme zamanı arasında bir bağlantı yoktur [24].

Yüzey boşalması diğer boşalmalar gibi sıcaklığa, basınca bağlı olduğu kadar yüzey pürüzlülüğüne, yüzey direncine, yüzeysel kapasiteye, yüzeyin kirliliğine (sis, toz, buz v.s. gibi) bağlı olarak değişmektedir. Yüzeysel boşalma, sözkonusu yüzeyden başlayıp hava içerisine doğru ilerler, gerilimin şiddeti arttırıldıkça bu boşalmanın yüzey boyunca ilerlemesi ve genişlemesi artar. Yüzey boşalmasını engellemek için yüzey direncini arttırmamız gerekir. İşte bu nedenle izolatörler şapkalı bir biçimde yapılırlar. Ayrıca yüzey boşalmasını azaltmak için yüzeyin üzerine ya ince metalik bir halka geçirilir, yahutta ince bir iletken sıvı (katılaşabilen) ile sıvanır. Uygulamada kullanılan izolatörlerin yüzey boşalması bakımından zorlanan kısımları aşağıdaki şekilde (Şekil 4.1) gösterilen flanşın izolatörle temas ettiği kısım ve şapkalar arası kısımlardır [7].



Şekil 4.1: İzolatörlerde İletken Halkalar

Yüzeysel boşalma flanş altında başlayıp yalıtkan yüzeyi boyunca ilerler. İplikçik görünümünde olan ışıklı boşalma (+ polariteli) flanşın altına gelen kısımda yoğun olup bu iplikçikler, katı yüzeyin alanının zayıf olduğu noktalarda sona ererler. İşletme

gerilimi arttıkça iplikçikler sıklaşıp boyları uzar. Gerilim daha da arttırılacak olursa tüm yüzey ışıklı iplikçiklerle kaplanır [7].

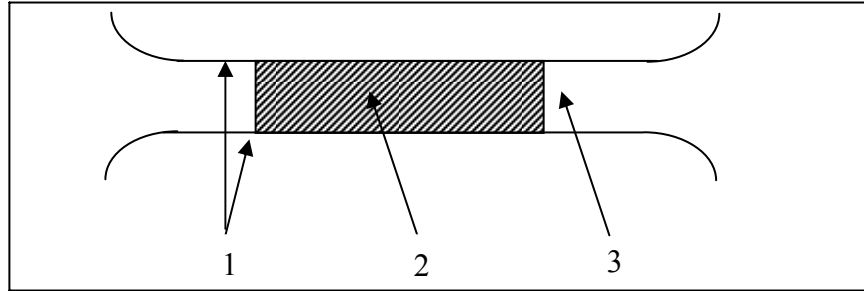
Özet olarak yüzeysel boşalmayı küçük tutmak için [7];

1. Yüzeysel direnç büyütülür. İzolatörde olduğu gibi yüzey düz yerine şapkalı yapılır.
2. Alan zayıflatılır. Bunun için de yüzeyin üzeri ince bir iletkenle kaplanır ya da izolatörler de olduğu gibi iletken halka kullanılır.

Yüzeysel boşalma korona boşalması gibi kayıplara neden olduğu için arzu edilmediği gibi katı yalıtkan malzemeyi delinmeye de zorlar. İzolatörlerde katı yalıtkan üzerindeki elektrik alanın teğetsel bileşeni yüzeysel boşalmayı oluştururken normal bileşeni delinmeye zorlar. Yüzeysel boşalma tozlu ortamlarda (çimento sanayi, azot sanayi) izolatörler üzerinde oluşan toz tabakası boşalmayı etkileyen en büyük faktördür. Bu gibi ortamlarda normal izolatörler ve geçit izolatörleri sık sık temizlenirler. Aksi halde alan dağılımı değişeceğinden, alanın delinmeyi oluşturan bileşeni katı yalıtkanı delinmeye zorlar [7].

4.1.1 Düzgün Alanda Yüzeysel Boşalma

Düzgün alanda yüzeysel boşalma için paralel elektrot sisteminde katı yalıtkan madde ile havanın sınır yüzeyi alan çizgilerine paralel alınır (Şekil 4.2) [6].



Şekil 4.2: Düzgün Alanda Yüzeysel Boşalma

- 1: Elektrotlar
- 2: Katı yalıtkan
- 3: Hava

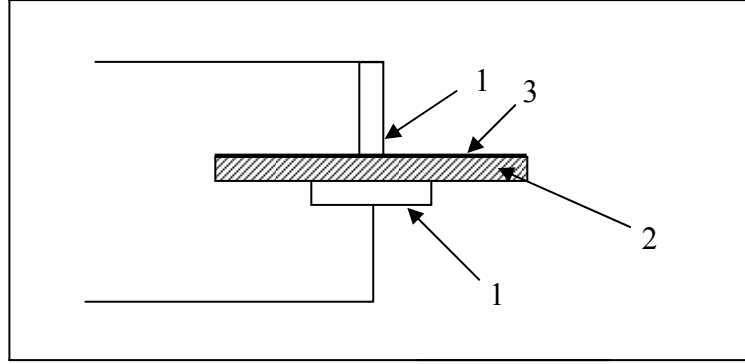
Bu durumda elektrotlara bir U gerilimi uygulandığı zaman, hava ve katı yalıtkan madde içindeki elektrik alanı her noktada aynı değerde ve sınır yüzeye teğet olur. Dolayısıyla

delinme, sistemin en zayıf bölgesinde meydana gelir. Katı yalıtkan maddelerde yapılan deneyler göstermiştir ki boşalma hava aralığında herhangi bir yerde değil, hemen hemen daima sınır yüzeyde meydana gelmektedir. Yüzeysel boşalma gerilimi, ayrıca gerilim türüne bağlıdır. Yüzeysel boşalma geriliminin havanın delinme geriliminden daha küçük olması, nem (sis, yağmur, çığ, v.b.) ve kir (is, toz, tuzlar, v.b.) dolayısı ile sınır yüzeyi boyunca direncin sabit olmaması ve gerilim dağılımını bozan küçük hatalar ve yarıklar bulunmasıyla açıklanabilir [6].

Havanın nemi hemen hemen sıfır olsa dahi yüzeysel boşalma gerilimi, aynı koşullardaki havanın delinme geriliminden daha küçüktür. Ancak parafinin yüzeysel boşalma gerilimi, parafin vakumda kurutulmak koşulu ile, havanın delinme gerilimine eşit yapılabilmektedir. Camın yüzeysel boşalma gerilimini havanın delinme gerilimine eşit yapabilmek için, camı sadece vakumda kurutmak yetmez, ayrıca 350⁰C ye kadar ısıtmak gerekir. Bütün bu nedenlerden dolayı, yüzeysel boşalma gerilimini büyütmek için katı yalıtkan maddenin yüzeyine uygun sayıda ve biçimde çıkıntılar eklenir. Böylece yüzeysel boşalma yolu büyümüş, nem ve kirin bütün yüzey boyunca bir tabaka oluşturma olasılığı azaltılmış olur [6].

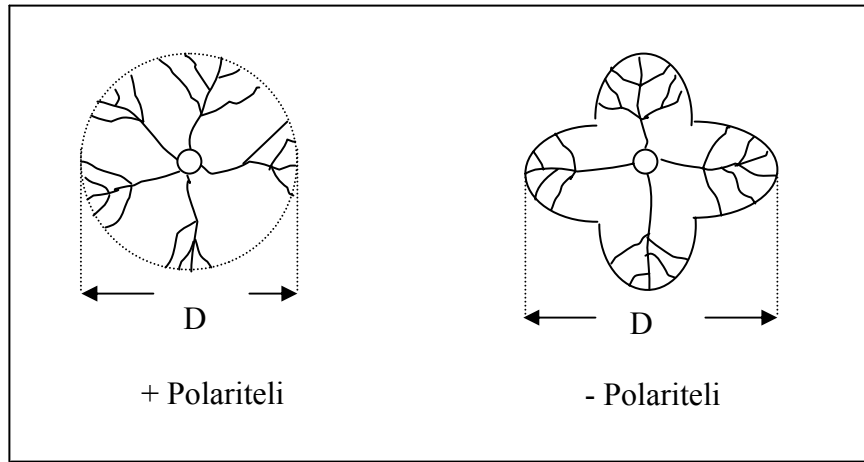
4.1.2 Düzgün Olmayan Alanda Yüzeysel Boşalma

Düzgün olmayan alanda yüzeysel boşalmaya en iyi örnek, Lichtenberg şekilleri ve geçit izolatörleridir. Klidonograf (Şekil 4.3) adı verilen ölçü aletinin çalışma ilkesi, Lichtenberg şekillerine (Şekil 4.4) dayanır [7]. Lichtenberg şekilleri pozitif ve negatif darbe gerilimlerinde meydana gelen şekillerdir. Klidonograf bir çubuk elektrotla bir düzlem elektrot arasında bulunan yalıtkan bir tabakadan oluşur. Yalıtkan tabakanın üzerine ışığa duyarlı bir film tabakası sürülmüştür [6].



Şekil 4.3: Klidonograf

- 1: Elektrotlar
- 2: Yalıtkan tabaka
- 3: Işığa duyarlı tabaka

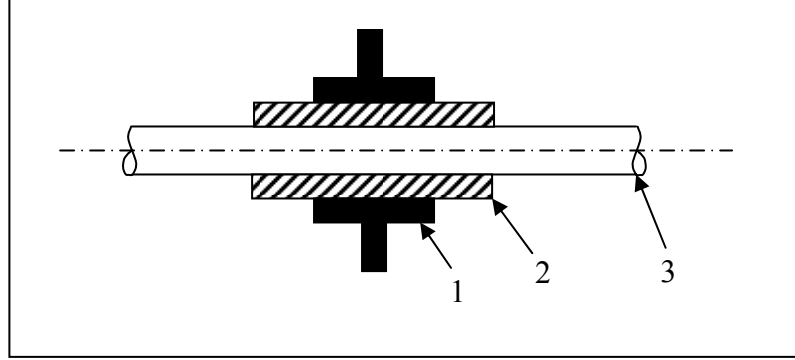


Şekil 4.4: Lichtenberg Şekilleri

Aletin elektrotlarına bir darbe gerilimi uygulandığı zaman, gerilimin tepe değerine, kutbiyetine ve şekline göre film tabakası üzerinde yüzeysel korona veya kıvılcım boşalması meydana gelir. Klidonograf, yüzeysel korona boşalmasından yararlanır ve meydana gelen Lichtenberg şekillerinin çapından ve biçiminden darbe geriliminin tepe değerini, kutbiyetini ve yaklaşık olarak da şeklini belirlemeye yarar [6].

Geçit izolatörlerine (Şekil 4.5) değinecek olursak, geçit iletkeniyle flanş arasındaki gerilim küçük olduğu sürece yalıtkan madde yüzeyinde doğru gerilimde yalıtkan maddenin yüzeysel ohmik direnciyle, alternatif gerilimde de yüzeysel ohmik ve kapasitif

dirençleriyle beliren bir elektrik alanı meydana gelir. Gerilim yavaş yavaş yükseltirse, iyonizasyon önce elektrik alanının en büyük olduğu flanş kenarında başlar. Doğru gerilimde, flanş kutbiyetindeki elektrik yükleri, flanştan itibaren yalıtkan yüzey boyunca ilerler ve alanın zayıf olduğu bölgede son bulurlar. Dolayısıyla bu yükler yüzey boyunca elektrik alanının kuvvetli olduğu bölgede alanı zayıflatırlar ve düzgün duruma getirirler [6].



Şekil 4.5: Basitleştirilmiş Bir Geçit İzolatörü

- 1: Flanş
- 2: Yalıtkan Madde
- 3: Geçit İletkeni

Oysa alternatif gerilim ve darbe gerilimde durum farklıdır çünkü yüzeysel boşalma kendini daha çok belli eder. 50 Hz frekansta alternatif gerilimde flanşın pozitif olduğu yarı dalgada yalıtkan yüzeyinde pozitif elektrik yükleri toplanır. Diğer yarı dalgada flanş negatif olduğundan başlangıçta yalıtkan yüzeyindeki pozitif elektrik yükleriyle negatif flanş arasında kuvvetli elektrik alanı meydana gelir. Dolayısıyla alternatif gerilimde yüzeysel boşalma doğru gerilimdekine göre çok daha önce başlar ve birim yüzeye düşen kapasitenin büyük olduğu ölçüde kuvvetli olur. Flanşın negatif olduğu yarı dalga süresince, flanştan çıkan negatif elektrik yükleri önce yalıtkan yüzeyindeki pozitif elektrik yüklerini nötralize ederler ve ondan sonra yalıtkan yüzeyini negatif yaparlar. Gerilimin diğer periyotlarında da olay benzer şekilde devam eder. Alternatif gerilimde elektrikli parçacıkları doğru gerilimdekini aksine yalıtkan yüzeyi boyunca bir ve diğer yönde hareket ederek iyonizasyonu kolaylaştırır. Gerilim biraz daha yükseltirse korona boşalması başlar [6].

4.2 Yüzeysel Boşalmaya Etki Eden Faktörler

Devamlı meydana gelen boşalma ve erozyondan dolayı oluşan bozulma sonucu yalıtım yüzeyinde genellikle karbon olmak suretiyle sürekli iletken yol şeklinin oluşumu olan yüzeysel boşalma, birçok çevresel etkiye maruz kalmaktadır.

Zorlu şartlar altında polimerik malzemelerin yüzeysel yaşlanmaları çevresel baskılarla yakından ilgilidir. Bu çevresel zorlanmalar yüzeysel boşalma direncini iki yoldan etkiler. Bunlardan birincisi, yüzeyin kimyasal yapısındaki değişimi direkt etkiler. Diğer ise boşalma davranışındaki değişimler ve kirlenmeden dolayı yüzeydeki nemliliğin farklılaşması gibi fiziksel davranışlarını dolaylı olarak etkiler. Daha önce de belirtildiği gibi uzun dönem kullanılarak yaşlandırılmış malzemelerle kullanılmamış malzemelerin yüzeysel boşalma dirençleri birbirinden farklıdır. Tablo 4.1’de çeşitli çevresel zorlamalar ve bunlarla ilgili şartlar gösterilmektedir. Bazı polimerik malzemelerin yüzeysel boşalma direnci üzerinde etkileri görülen ultraviyole ışınlar, düşük atmosferik basınç ve gama ışınları incelenecektir [17].

Tablo 4.1: Çeşitli Çevresel Zorlanmalar ve Durumları

Kullanılan Koşullar	Zorlanmalar
Dış Ortam	UV- Işınlar
Ağır Kirli Endüstriyel Ortam	Asit Yağmuru
Yüksek Bölge	Düşük Atmosferik Basınç
Nükleer Enerji İstasyonu	Gama Işınları
Yüksek Nemli veya Fazla Yağış Alan Bölge	Su Emilimi
Yüksek Sıcaklık Şartları	Yüksek Sıcaklık
Yüksek Gerilim Uygulaması	Ozon

4.2.1 UV- Işınları

Polimer yalıtım malzemeleri dış ortamda kullanıldığında, ultraviyole bileşenler içeren güneş ışığına maruz kalırlar. UV ışınlar polimer malzemeler için en çok yaşlandırıcı

faktörlerden biridir ve oksijenin mevcut olması durumunda malzemenin ömrü üzerinde oldukça fazla bir etkiye sahiptir. Polimer yüzeyin kimyasal yapısı ve yüzeyin fiziksel yapısı UV ışınlar maruz kalarak değişebilir. Üç çeşit epoksi reçine (1.silika flor dolgu maddeli bisfenol epoksi reçine, 2. silika flor dolgu maddeli saykılalifatik epoksi reçine ve 3. silan katkılı silika flor dolgu maddeli saykılalifatik epoksi reçine) üzerinde yapılan çalışmalar, yüzeysel boşalma direncinin UV ışınlardan etkilendiğini ve değişebildiğini göstermiştir [17].

Kirin bir fonksiyonu olan yüzey nemlenmesi su damlasının temas açısıyla ölçülür [17]. Temas açısının (θ) büyüklüğü, sıvı, katı ve hava arasındaki sınırdaki tutucu kuvvet, yapışma ve yerçekimi kuvvetleri arasındaki dengeyle belirlenir. Boşalma sırasında standart EPDM, “yüzeysel boşalmaya karşı” EPDM, poliüretan, polyester, silikon kauçukda temas açısının azaldığı ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Temas açısı ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, yüzeysel boşalmanın başlangıcını tahmin etmek için kullanılabilir [22]. Yüzeyin nemlenme derecesinin UV ışınlarıyla hızlandığı bulunmuş ve böylece kolaylıkla kaçak boşalmalar meydana geldiği anlaşılmıştır [17].

Ayrıca, yüzeyin kimyasal yapısındaki, herbir atomun bileşim oranında ve yüzeyin görünüşündeki değişiklikler analiz edilmelidir. Bu analizde kullanılan araçlar Fourier Transform kızıl ötesi spektroskopisi (FT-IR), X ışınları fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve tarayıcı elektron mikroskobu (SEM). Tablo 3.3’e göre yapılan çalışmalar sonucu sistem 3’de Si/C oranı tüm numunelerde artmıştır. Karbon atomları CH_4 , CO, CO_2 maddelerine dönüşerek kaybolur. Karbonun yokluğu yüzeyde mikro kırıklar ve polimerle dolgu arasında kırıklar oluşturur. Buna ilaveten, UV ışınlar kimyasal zincirleri kırar. FT-IR çevresel zorlanmalardan dolayı zincirlerin kesilmesini gösterir. Böylece yüzeysel boşalma UV ışınların sebep olduğu yüzeydeki değişikliklerle değişebilir [17]. UV ışınlar gerek alçak gerilimde gerekse yüksek gerilimde malzemenin ömrünü kısaltmaktadır [25].

4.2.2 Düşük Atmosferik Basınç

Polimer yalıtım malzemeleri yüksek yerlerde kullanılmaktadır. Yükseklik arttıkça atmosfer basıncı düşer ve hava yoğunluğu meydana gelir. Yapılan çalışmalarda düşük atmosferik basıncın malzemelerin yüzeysel boşalma özellikleri üzerine etkilerini

incelemek için suni atmosferik oda oluşturulmuştur (IEC Pub. 112'ye göre). 500 hPa ile 1007 hPa atmosferik basınçta polikarbonat (PC) ve polietilen tereftalat (PET) üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda atmosferik basınçlardaki azalmayla polikarbonatın yüzeysel boşalma direnci arttığı, polietilen tereftalatın ise atmosfer basıncının azalmasıyla azaldığı gözlenmiştir. Du, Suzuki, Kishi ve Kobayashi yüzeysel boşalma direncinin azalması veya artmasının, atmosferik basınçtaki artış sonucunda oksijenin azalması ile ilgili olduğunu düşünmüşlerdir [17].

4.2.3 Gama Işınları

Polimer malzemelerin uzay ve nükleer enerji santralleri gibi radyasyon içeren çevrelerde kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Polimer malzemelerin yüzey karakteristikleri üzerindeki radyasyon etkisi elektrik yalıtımının güvenilirliğini etkiler. Polibütillen naftalat (PBN) ve polibütillen tereftalat (PBT) IEC Pub.112'ye göre test edilmiştir. PBN'nin yüzeysel boşalma direnci gamma ışınlarına maruz kalma sonucu artmış ve PBT'nin ise azalmıştır. Yüzeysel boşalma direncindeki değişikliklerin direkt olarak gamma ışınlarının kimyasal yapıda oluşturduğu değişim sonucu meydana geldiği düşünülür [17].

4.2.4 Korona Zorlanmaları

Kuru bant atlamaları meydana gelmese bile yüksek gerilim uygulanan yalıtkanların kenarlarındaki yüksek elektriksel alan veya nem tutmayan gövdeler üzerindeki su damlaları arasındaki boşluklar korona boşalmalarını üretebilir. Korona boşalmaları ve ozon gelişimi yaşlanma faktörü haline gelebilir ve polimerik malzemelerin yüzeysel boşalma ve erozyon dirençlerini değiştirebilir [26].

4.2.5 Isıl Zorlanmalar

Geniş kaçak akım ile meydana gelen yoğun kuru bant atlamaları ve silikon polimerlerin ayrışma yeteneği yüzeysel boşalma ve erozyonla sonuçlanır. Düşük veya orta seviyeli kirlenmede küçük kaçak akımla düşük ısı enerjisi boşalmaları, gövdelerde düşük sıcaklıkta ısıl zorlanmalar üretir. 200⁰C ile 300⁰C arasında ısıl zorlanmalar direkt olarak

yüzeysel boşalma ve erozyona sebebiyet veremezler. Ancak gövdenin yüzeysel boşalma ve erozyon direncinin değişimine etki ederler [26].

4.2.6 Su Emilimi Zorlanmaları

Yüksek nem, yağmur ve sis şartlarındaki polimerik malzemeler su yayılımı olayına konu olurlar. Polimerik malzemelerde emilmiş su, ATH'daki kristal yapıdaki sudan dolayı farklı özelliklere sahiptir. ATH 300⁰C'de kristal yapıya sahip suyu açığa çıkarır. 300⁰C'ye yakın aralıktaki sıcaklık silikon polimerlerin ısı ayrışmalarının başlamasına neden olur. Bu yüzden karbon CO veya CO₂ gazı olarak buharlaşabilir ve iletken karbon yolu (örneğin yüzeysel boşalma gibi) engellenir. Bununla beraber suyun 100⁰C'de kaynadığı bilinir. 100⁰C silikon polimerlerin ısı ayrışması için oldukça düşük bir sıcaklıktır. Dolayısıyla bu sıcaklıkta emilmiş su yüzeysel boşalmayı desteklemez ama yayılma özelliğinden dolayı erozyon meydana getirir. Akımın artması emilmiş suyun kaynamasına bu da erozyona neden olur [26].

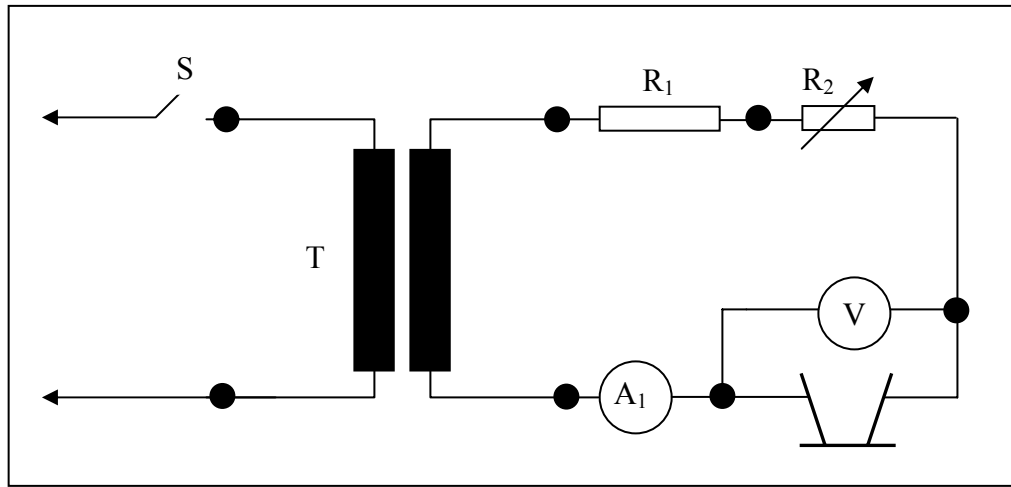
4.2.7 Asit Yağmuru Zorlanmaları

Asit yağmurlarının malzeme üzerindeki en sert etkisi erozyon etkisidir. Asit yağmurlarının bozulma ve erozyon etkileri yüzünden malzemelerin yüzeyi pürüzlenir ve yüzey katmanlarının fiziksel ve kimyasal yapısı bozulur. Dolayısıyla yüzeyin nem tutmama özelliği azalır. Ayrıca malzemenin yüzey katmanlarındaki bozulma yüzey katmanlarının ısı direncinin azalmasıyla sonuçlanır. Bu da yüzeysel boşalmayı artırır ve yüzeysel boşalma zamanını kısaltır. Dolayısıyla yapay asit yağmurlarıyla ıslatılmış malzemenin yüzeysel boşalma dirençleri azalır [27]. Sadece şiddetli asit yağmurları erozyona ve yüzeysel boşalmaya sebep olur [28].

5. İ.T.Ü MASLAK YÜKSEK GERİLİM LABORATUVARINDA YAPILAN CTI DENEYİ

ASTM D 3638 standardı baz alınarak 600 V'tan düşük gerilimlerde pleksiglas malzeme üzerinde CTI deneyi yapılarak malzemenin yüzeysel boşalma indisi belirlenmiştir.

5.1 CTI Deneyinin Elektriksel Devresi



Şekil 5.1: CTI Deneyinin Elektriksel Devresi

T: 6350/240 V çevirme oranlı, 400 VA, 50 Hz kuru tip ölçü transformatörü

V: Uygulanan gerilimi ölçmek için (0-600 V) Voltmetre

A: 0,6-6 A alternatif akım kademesi olan ampermetre

R₁: 100 Ω , ön direnç

R₂: Ayarlanabilir direnç: 40 Ω , 3,3 A

S: Sigorta

5.2 Deney Malzemesinin Özellikleri ve Uygulaması

5.2.1 Deneyde Kullanılan Elektrolit Çözeltisi

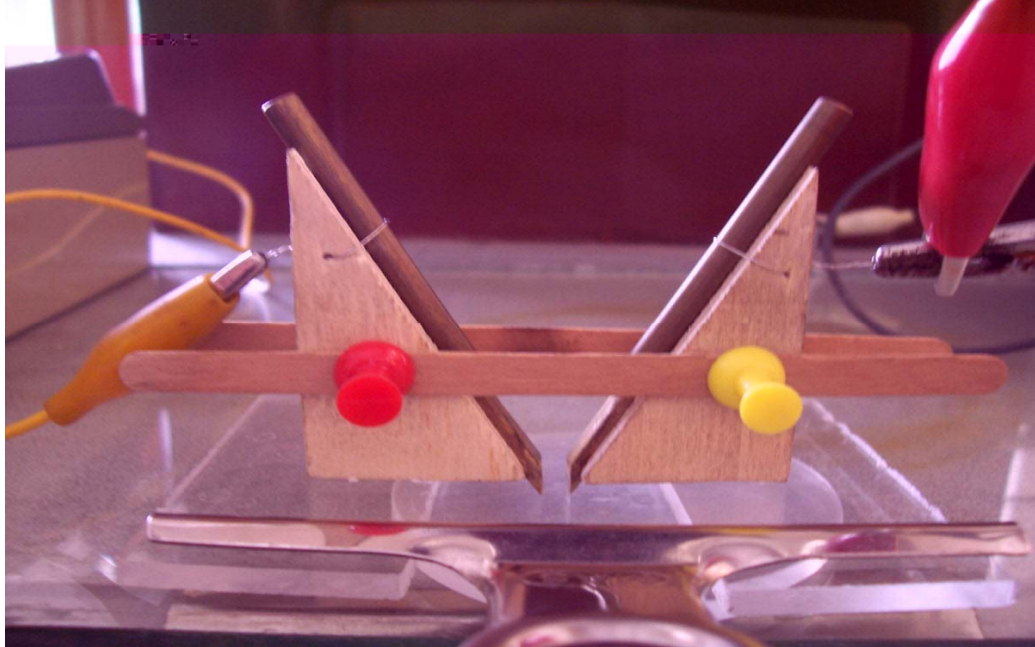
Deneyde kullanılan elektrolit çözeltisi 1 litre suya 1 gram amonyum klorür katılarak oluşturulmuştur. %0,1 oranında amonyum klorür içeren suyun iletkenliği 23°C 'de $390 (1/\Omega.\text{cm})$ dir.

5.2.2 Deney Numunelerinin Özellikleri

Deneyde 5×3 mm kalınlığında iki pirinç elektrot kullanılmıştır. Elektrotlarla temas edecek şekilde 6 cm çapında pleksiglas disk numuneleri deney ortamına yerleştirilmiştir. Numunelerin yüzeyleri düzgün ve çiziksiz seçilmiş ve ayrıca tozdan, yağdan, kirden ve diğer kirlenmelerden arındırılmıştır.

5.2.3 Deneyin Yapılışı

Deney 5 farklı pleksiglas numunesi üzerinde 30 s aralıklarla her iki elektrot arasına 50 kirli su damlası damlatılması yoluyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2, 5.3, 5.4). Gerilim değerleri 170 V, 250 V, 300 V, 400 V ve 550 V olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.2: CTI Deneyinde Elektrot Düzenegi



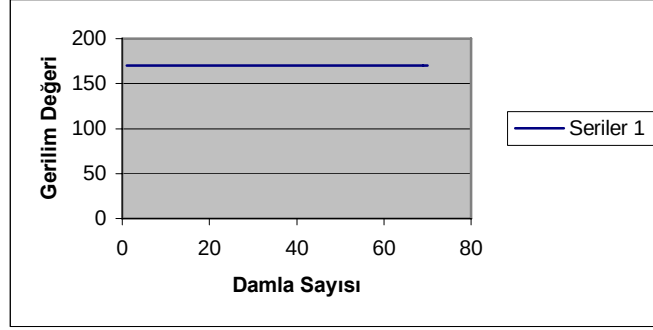
Şekil 5.3: CTI Deney Düzenegi



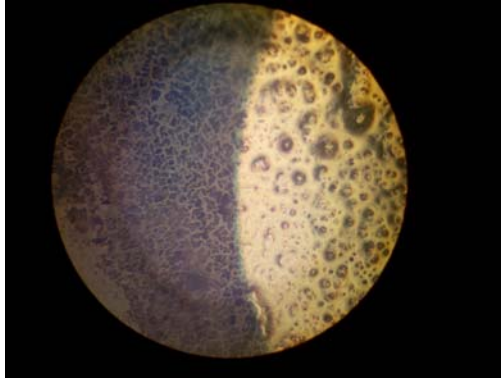
Şekil 5.4: CTI Deney Düzenegi Genel Görünüşü

5.2.3.1 170 V’da CTI Deneyi Uygulaması

Kurulan deney düzeneğinde ilk adım olarak 170 V gerilim uygulanmış olup herhangi bir kaçak akım ve ampermetrede herhangi bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 5.5). Dolayısıyla yüzeysel boşalmaya sebep olacak bir hata gerçekleşmemiştir (Şekil 5.6).



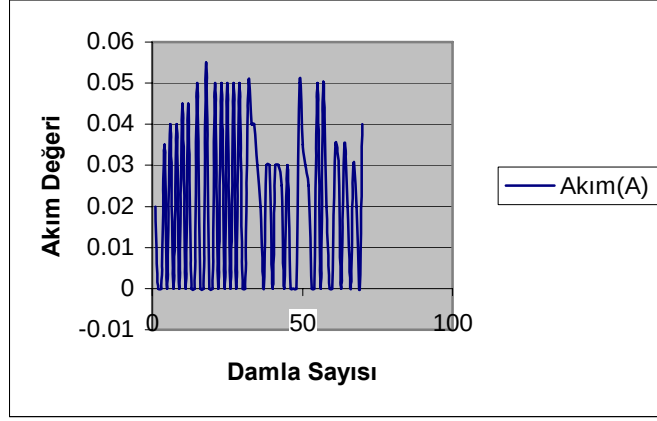
Şekil 5.5: 170 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V)



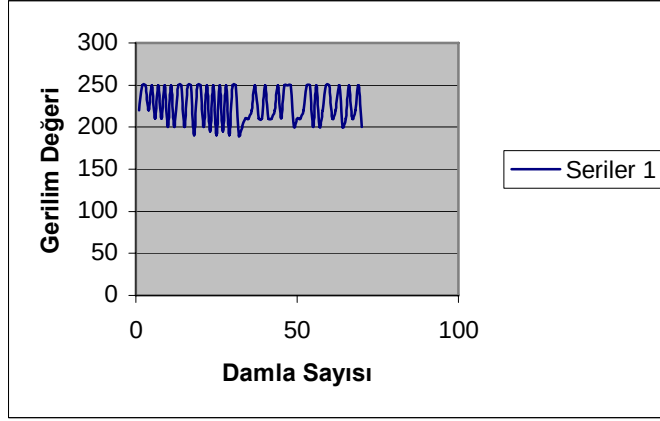
Şekil 5.6: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü

5.2.3.2 250 V’da CTI Deneyi Uygulaması

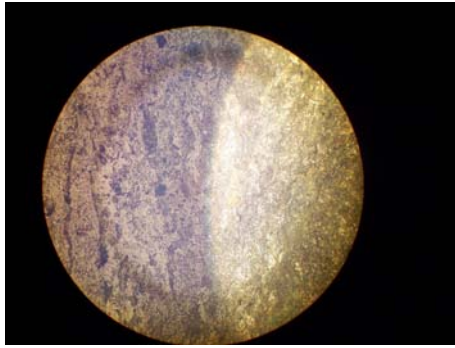
Kurulan deney düzeneğine ikinci adım olarak 250 V gerilim uygulanmış olup ampermetrede değişim 0 A ile 0,05 A arasında gözlenmiştir (Şekil 5.7, 5.8). Yüzeysel boşalmaya sebep olacak bir hata gerçekleşmemiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.7: 250 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri (A)



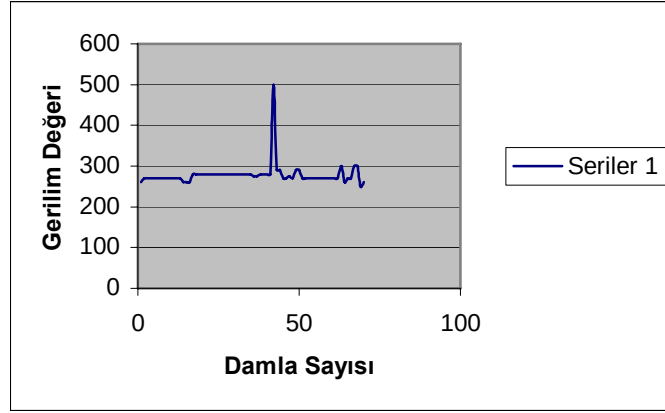
Şekil 5.8: 250 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V)



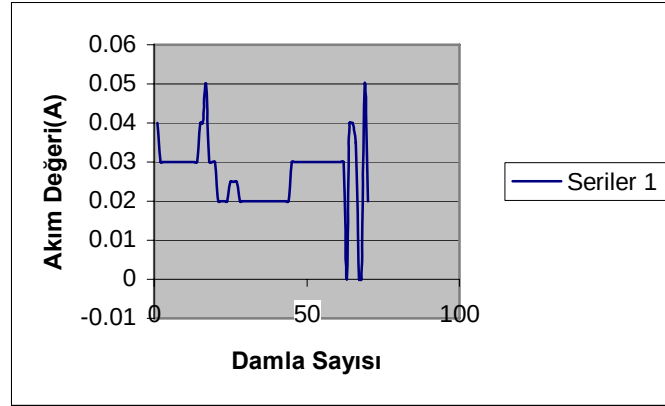
Şekil 5.9: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü

5.2.3.3 300 V’da CTI Deneyi Uygulaması

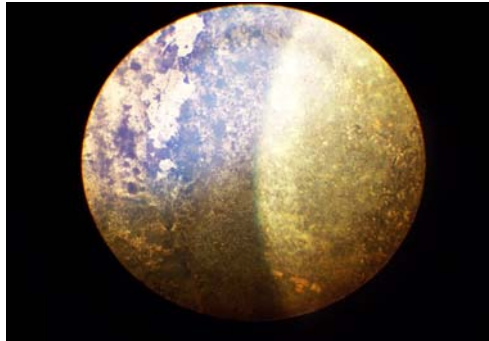
Kurulan deney düzeneğine üçüncü adım olarak 300 V gerilim uygulanmış olup ampermetrede değişim 0 A ile 0,05 A arasında gözlenmiştir (Şekil 5.10, 5.11). Yüzeysel boşalmaya sebep olacak bir hata gerçekleşmemiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.10: 300 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri



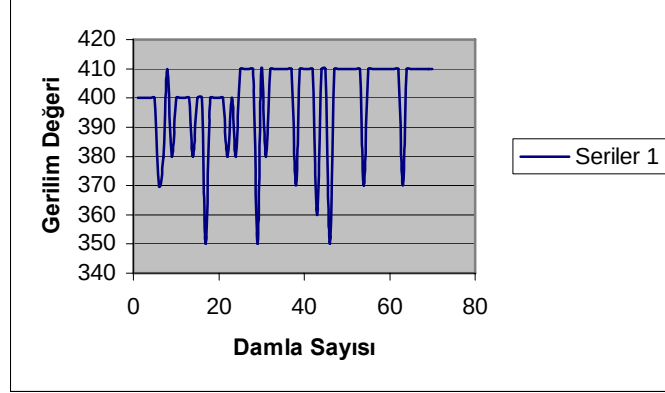
Şekil 5.11: 300 V da Damla Sayısı- Akım Değeri (A)



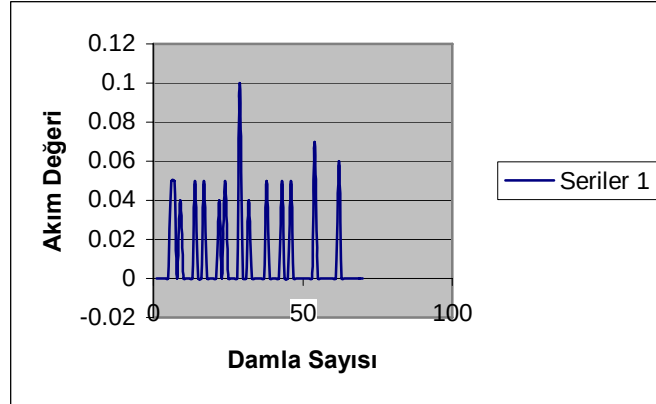
Şekil 5.12: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü

5.2.3.4 400 V’da CTI Deneyi Uygulaması

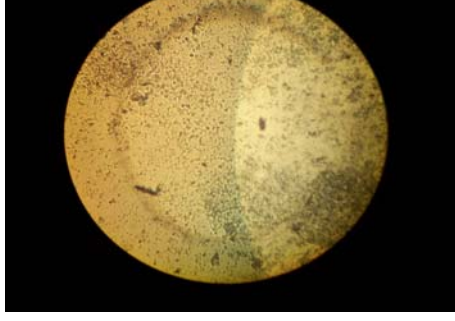
Kurulan deney düzeneğinin dördüncü adımında elektrotlar arasına 400 V gerilim uygulanmış olup ampermetrede değişim 0 A ile 0,1 A arasında gözlenmiştir (Şekil 5.13, 5.14). Yüzeyde belirsiz iz oluşumu gözlenmektedir (Şekil 5.15).



Şekil 5.13: 400 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V)



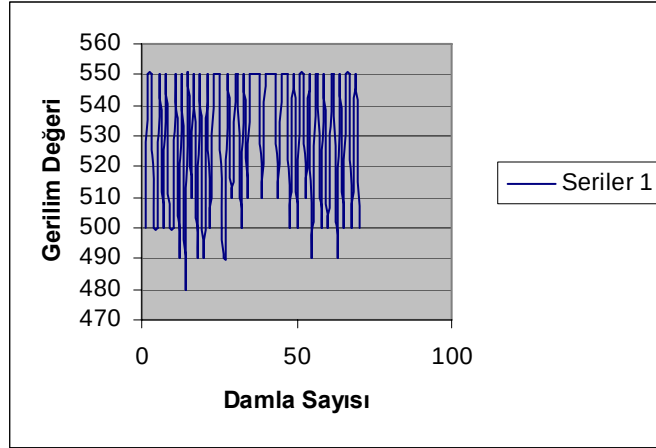
Şekil 5.14: 400 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri (A)



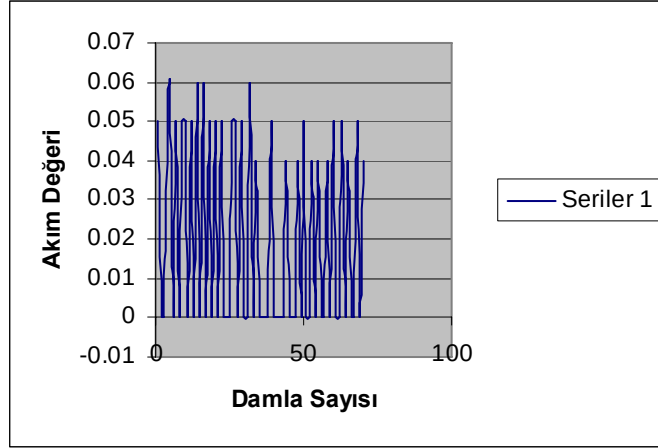
Şekil 5.15: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü

5.2.3.5 550 V’da CTI Deneyi Uygulaması

Kurulan deney düzeneğinin beşinci adımı olarak 550 V gerilim uygulanmış olup ampermetrede değişim 0 A ile 0,06 A arasında gözlenmiştir (Şekil 5.16, 5.17).Yüzeyde iz oluşumu gözlenmiştir (Şekil 5.18).



Şekil 5.16: 550 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V)



Şekil 5.17: 550 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri(A)



Şekil 5.18: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü

5.3 Sonuç

170 V, 250 V, 300 V, 400 V, 550 V’da pleksiglas malzeme üzerinde yapılan CTI deneyleri hata değeri olan 0,5 A akıma ulaşmamıştır. Ayrıca ekler kısmında 590 V’da yapılan dört deneyle ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Bu gerilim seviyesinde ampermetre 0,5 A’e kadar ulaşmadığı için teorik olarak herhangi bir hata meydana gelmemiştir. Ancak elektrotlar arasında meydana gelen kıvılcımlar, ampermetrenin akım değerini ölçmede yeteri kadar hassas olmadığını göstermektedir. Ancak bu şartlar altında kullanılan beş ayrı pleksiglas numune denenmiş 550 V ve üzerinde gerilim seviyelerinde iz oluşumu gözlenmiştir.

6. KATI YALITKANLARDA YÜZEYSEL BOŞALMANIN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Katı yalıtkanlarda yüzeysel boşalmanın matematiksel modellenmesi sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilecektir.

6.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanımı

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün değeri o elemanın düğümlerindeki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğümlerdeki potansiyel değerleridir [29].

6.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz yöntemleridir. Argyis ve Kelsey (1960) sanal çalışma prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım yöntemi geliştirmiştir. Turner ve arkadaşları (1956) bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa Clough (1960) tarafından çalışmasında telaffuz edilmiştir. Yöntemin üç- boyutlu problemlere uygulanması iki-boyutlu teoriden sonra kolayca gerçekleşmiştir (örneğin, Argyis (1964)) [29].

Yapı alanı dışındaki problemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü 1960'lı yıllarda başlamıştır. Örneğin Zienkiewicz ve Cheung (1965) sonlu elemanlar yöntemi ile Poisson denklemini çözmüştür. Doctors (1970) ise yöntemi potansiyel akışa uygulamıştır. Sonlu elemanlar yöntemi geliştirilerek ısı transferi, yeraltı sularının akışı, manyetik alan ve diğer bir çok alana uygulanmaktadır [29].

Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru ise artık paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır. 1990 yıllarının ortaları itibariyle sonlu elemanlar yöntemi ve uygulamalarıyla ilgili yaklaşık olarak 40.000 makale ve kitap yayınlanmıştır [29].

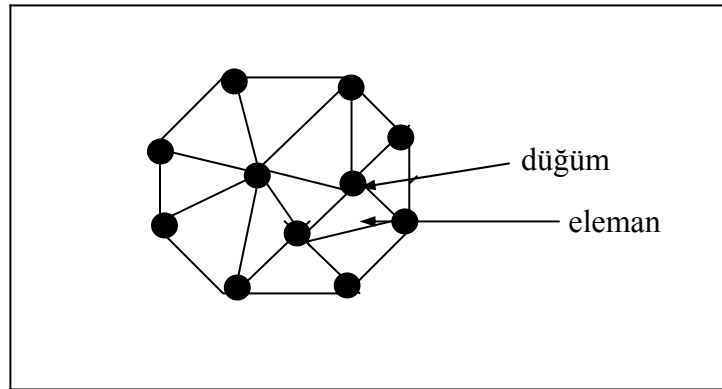
6.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulaması

Sonlu elemanlar yöntemi dört temel adımdan meydana gelmektedir [30]. Bunlar:

- 1) Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması (Ayrıklaştırma)
- 2) Herbir eleman için temel denklemin yazılması
- 3) Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi
- 4) Elde edilen denklem sisteminin çözümü

6.3.1 Sonlu Elemanları Ayırma (Ayrıklaştırma)

Bir bölgenin sonlu (üçgen) elemanlara (Şekil 6.1) bölünmesiyle [30]:



Şekil 6.1: Sonlu Elemanlara Ayırma

- 1) Düğümlere numara
- 2) Düğümlere koordinat
- 3) Elemanlara numara

- 4) Elemanların içindeki ortam özelliği
- 5) Sınır koşulları belirlenir.

6.3.2 Sonlu Elemanlarda Temel Denklemler

Çok kullanılan yaklaşım işlevleri [30];

1) Birinci dereceden yaklaşım

$$\text{Bir boyutlu } V(x) = a_1 + a_2x \quad (6.1)$$

$$\text{İki boyutlu } V(x,y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (6.2)$$

$$\text{Üç boyutlu } V(x,y,z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \quad (6.3)$$

2) İkinci dereceden yaklaşım

$$\text{Bir boyutlu } V(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 \quad (6.4)$$

$$\text{İki boyutlu } V(x,y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 \quad (6.5)$$

$$\text{Üç boyutlu } V(x,y,z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7xz + a_8x^2 + a_9y^2 + a_{10}z^2 \quad (6.6)$$

3) Üçüncü dereceden yaklaşım

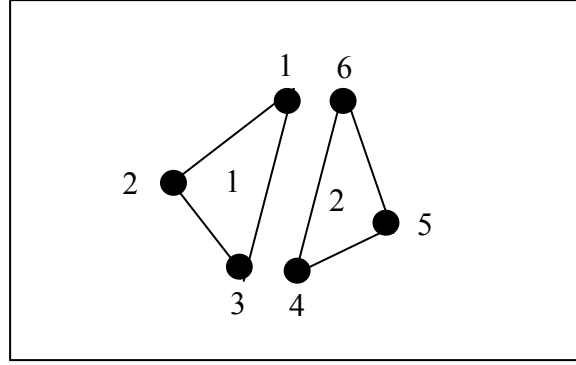
$$\text{Bir boyutlu } V(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \text{İki boyutlu } V(x,y) = & a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x^2y \\ & + a_8xy^2 + a_9x^3 + a_{10}y^3 \end{aligned} \quad (6.8)$$

Üç boyutlu $V(x,y,z)=$

$$\begin{aligned} & a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7xz + a_8x^2 + a_9y^2 + a_{10}z^2 + a_{11}x^2y + a_{12}x^2z + a_{13}xy^2 + \\ & a_{14}y^2z + a_{15}xz^2 + a_{16}yz^2 + a_{17}xyz + a_{18}x^3 + a_{19}y^3 + a_{20}z^3 \end{aligned} \quad (6.9)$$

6.3.3 Sonlu Elemanların Birleştirilmesi



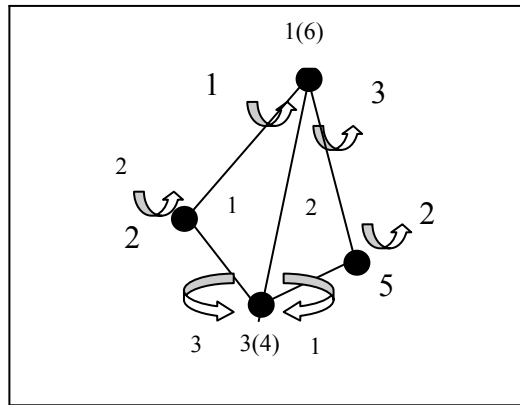
Şekil 6.2: Elemanlar Ayrık Durumda İken İki Elemanlı Çözüm Bölgesi

Elemanların düğüm potansiyelleri ve elemanların katsayılar matrisleri belirlenir [30].

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} k_{12}^{(1)} k_{13}^{(1)} \\ k_{21}^{(1)} k_{22}^{(1)} k_{23}^{(1)} \\ k_{31}^{(1)} k_{32}^{(1)} k_{33}^{(1)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11}^{(2)} k_{12}^{(2)} k_{13}^{(2)} \\ k_{21}^{(2)} k_{22}^{(2)} k_{23}^{(2)} \\ k_{31}^{(2)} k_{32}^{(2)} k_{33}^{(2)} \end{bmatrix}$$

Elemanların Düğüm Potansiyelleri Elemanların Katsayılar Matrisleri



Şekil 6.3 İki Elemanlı Çözüm Bölgesi Birleşik Durumu

Ayrık elemanlar için toplam enerji denklemi

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon [V]_a^T [K]_a [V]_a \quad (6.10)$$

Ayrık durumda potansiyel $[V]_a$ ve katsayılar matrisi $[K]_a$

$$[V]_a = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

$$[K]_a = \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} k_{12}^{(1)} k_{13}^{(1)} 0 & 0 & 0 \\ k_{21}^{(1)} k_{22}^{(1)} k_{23}^{(1)} 0 & 0 & 0 \\ k_{31}^{(1)} k_{32}^{(1)} k_{33}^{(1)} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 k_{11}^{(2)} k_{12}^{(2)} k_{13}^{(2)} \\ 0 & 0 & 0 k_{21}^{(2)} k_{22}^{(2)} k_{23}^{(2)} \\ 0 & 0 & 0 k_{31}^{(2)} k_{32}^{(2)} k_{33}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [K^{(1)}] 0 \\ 0 [K^{(2)}] \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Birleşik durumda

1 düğümü 6 ile 3 düğümü 4 ile birleşiktir. Buna göre toplam enerji

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon [V]_b^T [K]_b [V]_b \quad (6.13)$$

veya genel olarak

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon [V]^T [K] [V] \quad (6.14)$$

yazılır.

$$[V]_b = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_5 \end{bmatrix} = [V] \quad (6.15)$$

$$[K]_b = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{35} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{55} \end{bmatrix} = [K] \quad (6.16)$$

K matrisine genel katsayılar matrisi denir. Bu matris simetrik, seyrek, tekil bir matristir. Genel katsayılar matrisi düğümler arası ilişkiyi gösteren bir matristir. Eğer bir doğru parçası ile iki düğüm birbirine bağlı ise onlar arasında ilişki vardır. Tek bir doğru parçası ile bağlanmayan düğümler arasında ilişki yoktur [30].

Örnek için genel katsayılar matrisi:

$$\begin{bmatrix} k_{11} = k_{11}^{(1)} + k_{33}^{(2)} & k_{12} = k_{12}^{(1)} & k_{13} = k_{13}^{(1)} + k_{31}^{(2)} & k_{15} = k_{32}^{(2)} \\ k_{21} = k_{21}^{(1)} & k_{22} = k_{22}^{(1)} & k_{23} = k_{23}^{(1)} & k_{25} = 0 \\ k_{31} = k_{31}^{(1)} + k_{13}^{(2)} & k_{32} = k_{32}^{(1)} & k_{33} = k_{33}^{(1)} + k_{11}^{(2)} & k_{35} = k_{12}^{(2)} \\ k_{51} = k_{23}^{(2)} & k_{52} = 0 & k_{53} = k_{21}^{(2)} & k_{55} = k_{22}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

6.3.4 Elde Edilen Denklemlerin Çözümü

6.3.4.1 Yinelemeli (İteratif) Çözüm Yöntemi

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon [V_1 \ V_2 \ V_3 \ V_4 \ V_5] \cdot \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

Enerjinin minimumlaştırılması ilkesine göre bilinmeyen potansiyeller için [30]

$$\frac{dW}{dV_i} = 0 \quad (6.19)$$

Genel olarak [30],

$$V_J = -\frac{1}{k_{jj}} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_d} k_{ij} V_i \quad (6.20)$$

6.3.4.2 Band Matris Yöntemi ile Çözüm Yöntemi

Band matrisi yöntemiyle enerji formülü [30]

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \begin{bmatrix} V_s & V_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_b \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

$[V_s]$: Bilinmeyen düğümler için potansiyel matrisi

$[V_b]$: Bilinen düğümler için potansiyel matrisi

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \begin{bmatrix} V_s & V_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_b \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \begin{bmatrix} V_s & V_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{ss} V_s + K_{sb} V_b \\ K_{bs} V_s + K_{bb} V_b \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon [(K_{ss} V_s + K_{sb} V_b) V_s + (K_{bs} V_s + K_{bb} V_b) V_b] \quad (6.24)$$

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon (K_{ss} V_s^2 + 2K_{sb} V_b V_s + K_{bb} V_b^2) \quad (6.25)$$

$$\frac{dW}{dV_s} = 0 \quad (6.26)$$

$$\varepsilon (K_{ss} V_s + K_{sb} V_b) = 0 \quad (6.27)$$

$$K_{ss} V_s = -K_{sb} V_b \quad (6.28)$$

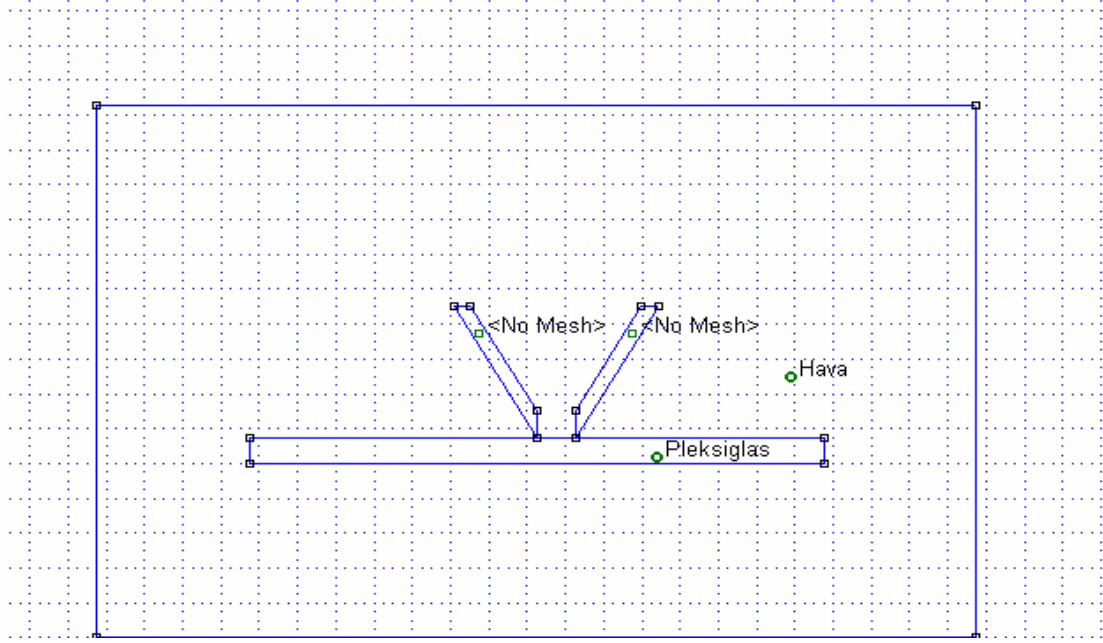
$$[K_{ss}] \cdot [V_s] = -[K_{sb}] \cdot [V_b] \quad (6.29)$$

6.4 600 V Gerilimde CTI Deneyinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

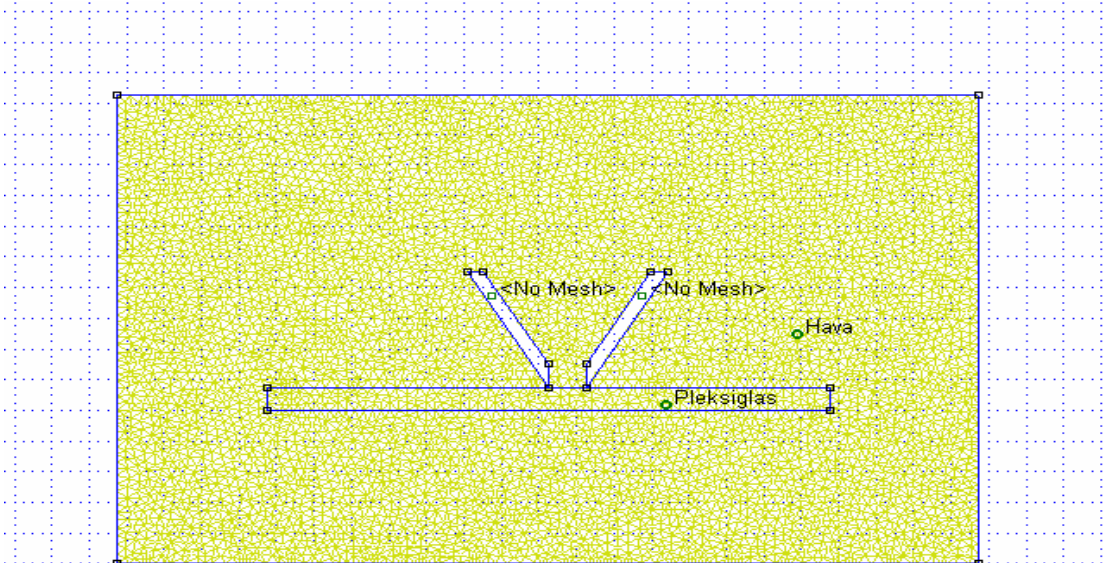
6.4.1 Su Damlası Yokken Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

5x3 mm'lik 4 mm arayla yerleştirilmiş elektrot düzeneğinin geometrisi oluşturulmuş (Şekil 6.4) ve sonra sonlu elemanlar ağı (Şekil 6.5) meydana getirilmiştir. Şekil 6.6'da toprak elektroduna bağlı kısmın sıfır olduğu ,yüksek gerilim tarafının da 600 V olduğu görülür. Şekil 6.7'de elektrotlar arasında eşpotansiyel çizgilerinin yoğunluğu, Şekil 6.8'de elektrotların uçlarında elektriksel alan dağılımının en yüksek olduğu, diğer

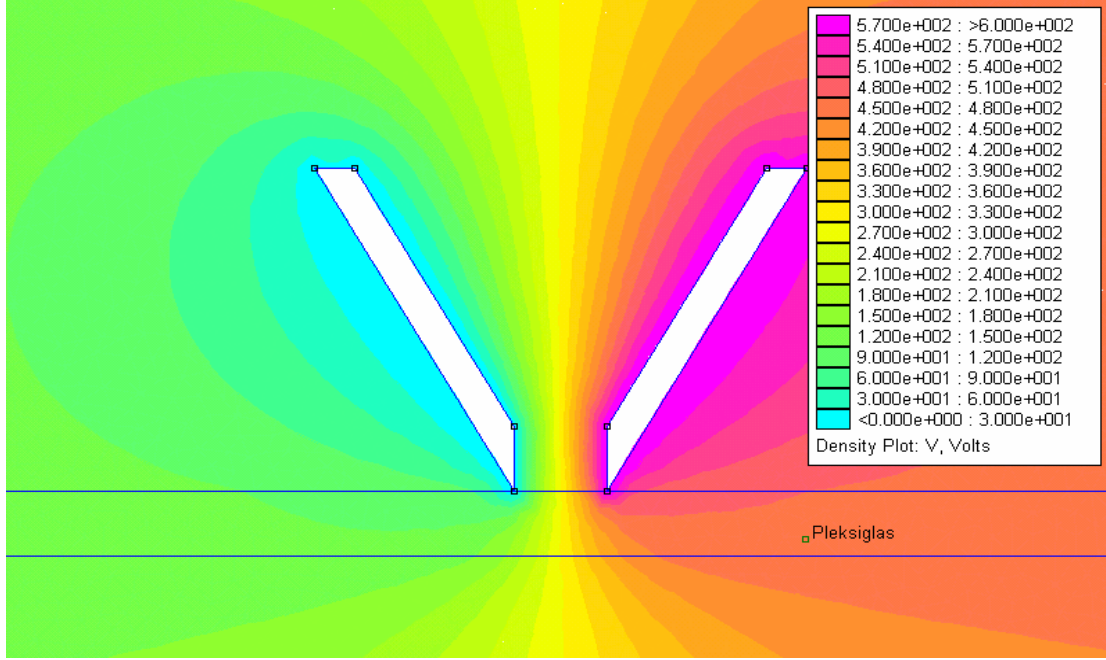
tarafllarda çok düşük olduğu gözlenmektedir. Şekil 6.9 iki elektrot arasındaki yüzeyde potansiyel değişimini, Şekil 6.10 teğetsel elektrik alanı değişimini, Şekil 6.11 elektrik alanın büyüklüğünü gösterir. Programda problem tipi düzlemsel, koordinatlar kartezyen, derinlik 5 mm, minimum açı 30^0 olarak belirlenmiştir.



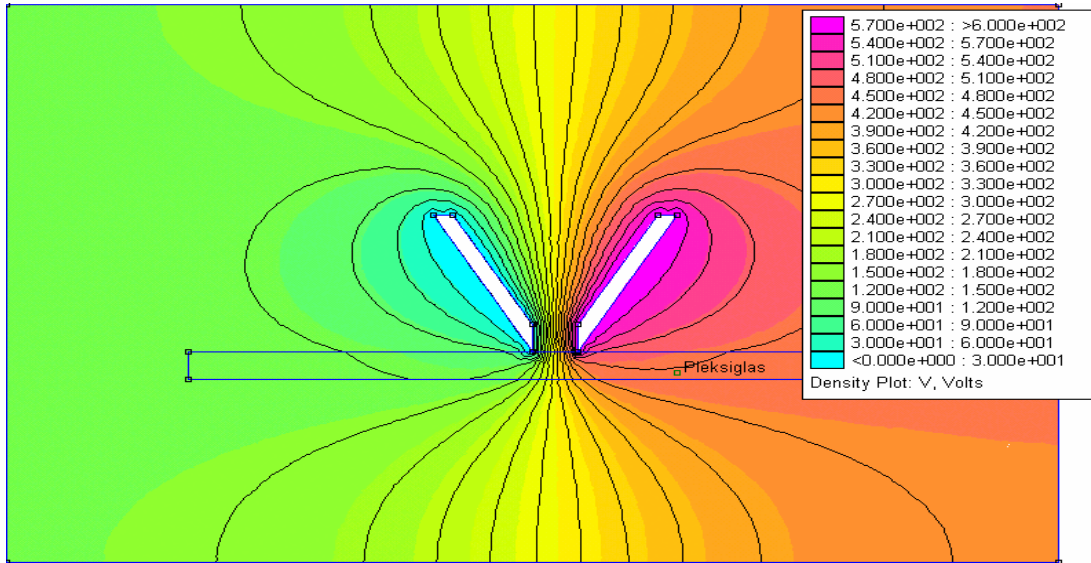
Şekil 6.4: CTI Deney Düzenesinde Elektrotların Geometrisi



Şekil 6.5: Sonlu Elemanlar Ağı



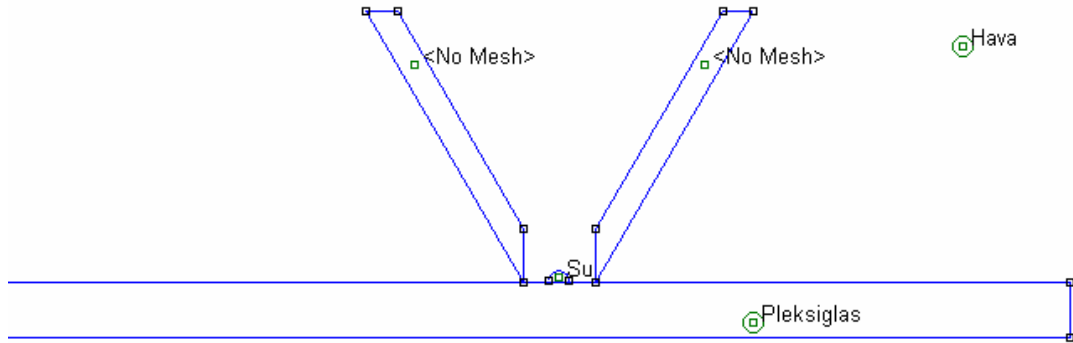
Şekil 6.6: Ortamdaki Potansiyel Dağılımı



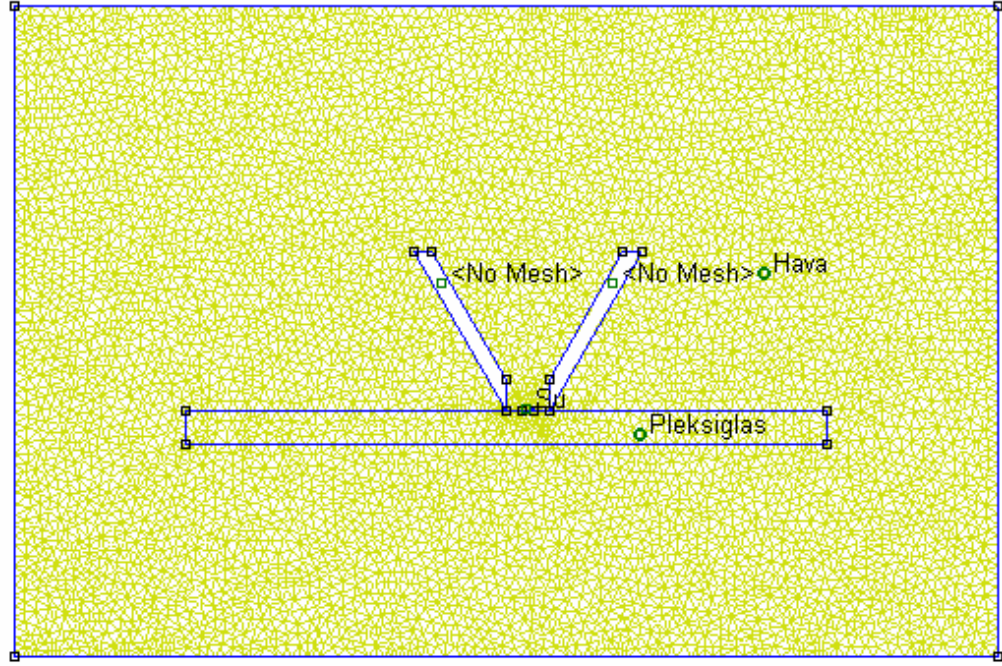
Şekil 6.7: Eşpotansiyel Çizgiler

6.4.2 Su Damlası Varken Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

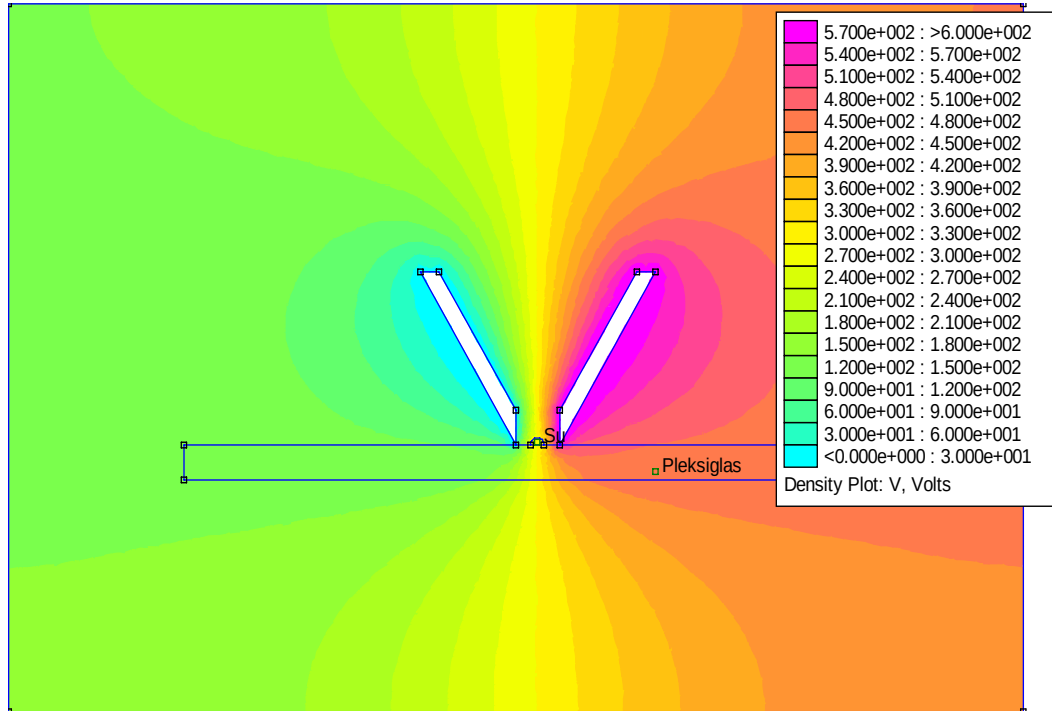
5x3 mm'lik 4 mm arayla yerleştirilmiş elektrot düzeneğine su damlası damlatıldığı haliyle geometri oluşturulmuş (Şekil 6.8) ve sonlu elemanlar ağı (Şekil 6.9) meydana getirilmiştir. Şekil 6.14'de Şekil 6.6'da olduğu gibi toprak elektroduna bağlı kısmın sıfır olduğu yüksek gerilim tarafının da 600 V olduğu görülür. Şekil C5'de ortamda kirli su damlası varken elektrotlar arasında eşpotansiyel çizgilerinin yoğunluğunun arttığı, Şekil 6.C6'da elektrotların arasında kirli su damlası varken, su damlasının olduğu noktada elektriksel alan dağılımının çok düşük olduğu, elektrot uçlarında en yüksek, diğer taraflarda yine çok düşük olduğu gözlenmektedir. Şekil C7'de iki elektrot arasındaki yüzeyde potansiyel değişiminde, Şekil C8 teğetsel elektrik alanı değişiminde ve Şekil C9 elektrik alanının büyüklüğünde farklılık gözükmemektedir.



Şekil 6.8: CTI Deney Düzeneğinde Elektrotların Geometrisi



Şekil 6.9: Sonlu ElemanlarAğı



Şekil 6.10: Ortamdaki Potansiyel Dağılımı

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yüzeysel boşalma yalıtım malzemelerinin yüzeyinde özellikle kirlenme koşullarında artarak meydana gelen bir boşalma olayıdır. Nemli ortam koşulları bu durumu daha da kötüleştirir. Kirlenmiş yüzeydeki nem tabakası kaçak akımı oluşturur. Kirlenmenin boyutu ve tipi kaçak akımın büyüklüğünü belirler. Kaçak akımın bir sonucu olarak iletken film (kir) tabakası homojen olmayan şekilde ısınır. Bu ısınma buharlaşmaya neden olur ve yüzey üzerindeki gerilim dağılımını bozar. Çok yüksek dirençli bölgede kuru bantlar oluşur. Kuru bantların uçlarında büyük potansiyel farkları görünür.

Hazırlanan bu tezde genel olarak ASTM, IEC ve Türk standartları baz alınarak CTI (Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndisi), IP (Eğik Düzlem), DF (Toz ve Sis), Kuru Ark, Noto (Yüzeysel Boşalma Direnç Testi), Merry Go Round (Hızlandırılmış Yüzeysel Boşalma Deney yöntemi) deney yöntemleri tanıtılmış ve CTI deneyi pleksiglas malzeme üzerine uygulanmıştır. CTI için gerekli deney düzeneği hazırlanmış ve İ.T.Ü. Maslak Yüksek Gerilim Laboratuvarında deneyler yapılmıştır.

23⁰C’de yapılan deneylere 170 V gerilim uygulanarak başlanmış, 250 V, 300 V, 400 V, 550 V, 590 V ve 600 V gerilim seviyelerinde tekrarlanmıştır. Düşük gerilimlerde 0,5 A’den çok daha az akım geçtiği ölçülmüş ve yüzeyde de iz oluşumunun meydana geldiği gözlenmiş, numune yüzeyleri daha sonra 20 M mertebesinde görüntü büyültücü altında incelenmiştir. Ancak 590 V ve 600 V gerilim altında şiddetli kıvılcımlanmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Çünkü içerdiği dipoller yüzünden sudaki elektrik alanı havadan daha yüksektir. Elektrik alanı arttıkça akım artmaktadır ve dolayısıyla kıvılcımlanmalar görülmektedir. Gerilim artışı yüzeysel boşalma başlangıç zamanına etki etmektedir. Çünkü kıvılcımlanmaların şiddeti artmaktadır. Bu da iz oluşumuna sebep olmaktadır. 550 V ve üzerinde iz oluşumu gözlenmiş, geniş bozulmalar saptanmıştır. Ancak ulaşılan akım seviyesinin 0,3 A’i geçmediği görülmüş ve ampermetrenin fazla hassas ölçüm yapmadığı düşünülmüştür. Nanosaniyeler mertebesinde ölçüm yapan analog-dijital çevirici kullanılsaydı daha hassas ölçüm yapılabileceği düşünülmektedir.

Deneylerin tamamlanmasından sonra FEMM 4.0 isimli paket program kullanılarak CTI deneyindeki elektrot sisteminin sonlu elemanlar yöntemiyle teorik analizi yapılmıştır. Bu programda aynı deney düzeneğindeki gibi elektrot düzeni çizilmiş ve ortam özellikleri, gerilim değeri gibi bilgiler girilerek matematiksel model sonuçları elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde CTI değeri 600 V olarak kabul edilmiştir. Bu yöntem elektrik alanı ve gerilim dağılımının teorik olarak elde edilmesini sağlamıştır. Ortamda su damlası varken elektrotlar arasındaki potansiyel değişimi ve elektrik alanı değişimi su damlası yokkenkinden oldukça farklıdır. Bunun sebebi su damlasının elektrotlar arasında bağlantıyı sağlayarak devreyi tamamlaması ve sonrasında artan gerilimle damla ve elektrotlar üzerinden geçen akımın artması ile eşpotansiyel çizgiler Şekil 6.15’de görülebileceği gibi değişmiştir. Düşük gerilimlerde kıvılcım gözlenmiştir çünkü su damlasının direnci sabit, akım artınca elektrik alanın arttığı ve kıvılcımlanmalar yüksek gerilimdeki gibi olmasa da daha az şiddette gözlenmiştir. Elektrik alanı renk spektrumundan da takip edebildiğimiz gibi maviden mora doğru ilerledikçe elektrik alanı artmakta dolayısıyla akım artmaktadır. İki elektrot arasına su damlası damlatıldığı göz önünde bulundurulduğunda, damlanın çapı 1,3 mm iken potansiyel değişim 0,16 cm’den 0,29 cm’ye kadar azalarak değişirken damlanın çapı 2,9 mm ye çıkarıldığında potansiyel değişimi 0,06 cm’den 0,35 cm’ye kadar yavaş şekilde azalmaktadır. Demek oluyor ki, su damlasının bulunduğu noktalarda gerilim değişimi sadece 300 ile 320 V arasında değişmektedir. Su damlasının çapı küçüldüğünde de bu şekilde küçük bir değişim farkı gözlenmekte ancak çap daha küçük olduğu için bu potansiyel değişim aralığı daha kısa sürmektedir. Aynı zamanda bu mesafede elektriksel alan hava ile aynı yani 30 V/m dir. Programda minimum açı 30^0 den 15^0 ye düşürüldüğünde herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre pleksiglas malzemede meydana gelen izler yüzeysel boşalmayı işaret etmektedir. Bu da analog-dijital çevirici ile 0,5 A’lık hatanın gözlenebileceği fikrini doğrumuştur. Farklı malzemeler üzerinde de aynı deneyler tekrarlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Uğur, M.**, 1997. Modelling and Analysis of Surface Tracking Phenomena of Solid Insulating Materials, *Doktora Tezi*, University of Manchester, İngiltere.
- [2] **Kuntman, A.**, 2005. Yüksek Gerilim Yalıtım Malzemeleri Ders Notları, İstanbul Üniversitesi.
- [3] **Meyer, L., Omranipour, R., Jayaram, S. ve Cherney, E.**, 2002. The Effect of ATH and Silica on Tracking and Erosion Resistance of Silicone Rubber Compounds for Outdoor Insulation, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, USA, 271-274.
- [4] **Kuntman, A., Uğur M. ve Merev, A.**, 1999, A Study on the Investigation of Surface Tracking in Polyester Insulators, International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 99), Bursa, pp. 84-87.
- [5] **Warren, L.**, 1991, Testing for Tracking (Organic Insulating Materials, Insulation Diagnostics – Methods for Determining Quality, Remnant Life and Proof Testing, IEE Colloquium, pp. 3/1-3/13.
- [6] **Özkaya, M.**, 1996. Yüksek Gerilim Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [7] **Akpınar, S.**, 1997. Yüksek Gerilim Tekniğinin Temelleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [8] **Marangoz, A. R.**, 1997. Katı Yalıtkan Malzemelerde Elektriksel ve Sulu Ağaçlanma, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **Kreuger, F. H.**, 1991. Industrial High Voltage, Delft University Press.
- [10] **Gallagher, T. J. and Pearmain, A. J.**, 1983. High Voltage Measurement, Testing and Design, John Wiley and Sons, A Wiley-Interscience Publication.

- [11] **Haldeman, M.**, 1991. Comparative Tracking Index and UL1950, <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [12] **ASTM D3638-93**, (Reapproved 1998). Standard Test Method for Comparative Tracking Index of Electrical Insulating Materials, *American Society for Testing and Materials Standards*, USA.
- [13] **ASTM D5288-97**, (Reapproved 2004). Standard Test Method for Determining the Tracking Index of Electrical Insulating Materials Using Various Electrode Materials (Excluding Platinum), *American Society for Testing and Materials Standards*, USA.
- [14] **TS 3338**, Katı Yalıtım Malzemeleri-Yüzeysel Kaçaklar ile ilgili Mukayese ve Dayanıklılık İndislerinin Tayini-Nemli Ortam Şartlarında, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [15] **ASTM D2303-97**, (Reapproved 2004). Standard Test Methods for Liquid-Contaminant Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials, *American Society for Testing and Materials Standards*, USA.
- [16] **Gorur, R. S., Montesinos, J., Varadadesikan, L., Simmons, S. ve Shah, M.**, 1997. A Laboratory Test for Tracking and Erosion Resistance of HV Outdoor Insulation, 1070-9878/97, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 767-774.
- [17] **Yoshimura, N. Kumagai, S. ve Du, B.**, 1997. Research in Japan on the Tracking Phenomenon of Electrical Insulating Materials, Akita University and Niigata College of Technology, 0883-7554/97, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 8-19.
- [18] **ASTM D2132-03**, Standard Test Method for Dust and Fog Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulating Materials, *American Society for Testing and Materials Standards*, USA.

- [19] **ASTM D495-99**, (Reapproved 2004). Standard Test Method for High Voltage, Low-Current, Dry Arc Resistance of Solid Electrical Insulation, *American Society for Testing and Materials Standards*, USA.
- [20] **IEC 1109, 1992-03**. Standard. Composite Insulators for a.c. Overhead Lines with a Nominal Voltage Greater than 1000 V, *International Electrotechnical Commission*.
- [21] **Gorur, R. S., Montesinos, J., Varadadesikan, L., Simmons, S. ve Shah, M.**, 1997. A Rapid Test Method for Evaluating the Tracking and Erosion Resistance of Polymeric Outdoor Insulating Materials, 0-7803-3851-0, IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, pp. 402-405.
- [22] **Varlow, B. R.**, 1996. Surface Insulation Testing Methods, University of Manchester.
- [23] **Auckland, D., Uğur, M. ve Varlow, B. R.**, 1995. A Surface Tracking Model for Failure Prediction, IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 503-507.
- [24] **Malik, N. H., Al-Arainy, A. A. ve Qureshi, M. I.**, 1998. “Electrical Insulation in Power Systems”, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [25] **Starr, W.**, 1990. “Polimeric Outdoor Insulation”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25 No. 1, pp. 125-136.
- [26] **Kumagai, S. ve Yoshimura, N.**, 1999. “Influence of Single and Multiple Environmental Stresses on Tracking and Erosion of RTV Silicone Rubber”, 1070-9878/99, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 2, pp. 211-224.
- [27] **Wang, X., Kumagai, S., Kobayashi, K. ve Yoshimura, N.**, 1997. Degradation of Surface Hydrophobicity of Outdoor Polymer Insulating Materials from Erosion of Acid Rain, *The 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Seoul, Kore, Mayıs 25-30.

- [28] **Wang, X., Chen, L. ve Yoshimura, N.**, 2000. Relation of Hydrophobicity of Silicon Rubber Insulation Under Various Contaminant Conditions, *The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an, Çin, Haziran 21-26, pp. 383-386.
- [29] www.biymed.com/femmuhanaliz/fem/seynedir.htm
- [30] **Kalenderli, Ö.**, 2004. “Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi” Ders Notları.

EKLER

EK A

İ.T.Ü. Maslak Laboratuvarında Yapılan CTI Deneyinde Kullanılan Cihazlar

Ampermetre: Normameter F, NORMA Nr: 68512

0,6-6 A alternatif akım; 0,6-60 mA alternatif akım

0,6-6 A doğru akım; 0,6-60 mA doğru akım ölçer.

Voltmetre: GOERZ ELECTRO YG006

Tipi: 226221

Unigor 1p

25-50-10000 Hz

0,06...1200 V, 3333 Ω /V

30...1200 V, 3333 Ω /V

Reosta: YG043

40 Ω , 3,3 A

Görüntü Büyütücü: PME Olympus, Tokyo

20 M kademesinde numuneler incelenmiştir.



Şekil A1: Deneyde Kullanılan Reosta

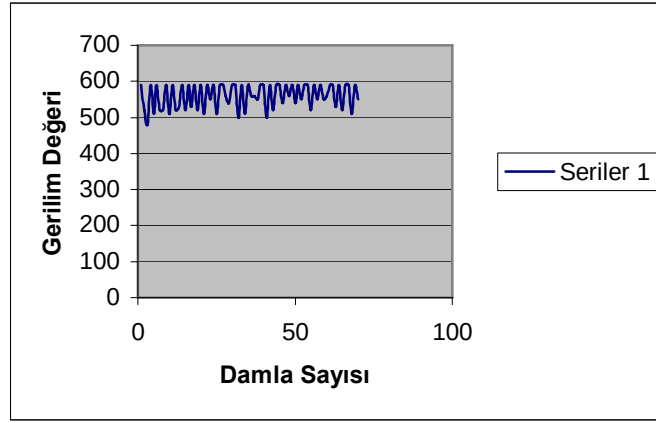


Şekil A2: Görüntü Büyütücü

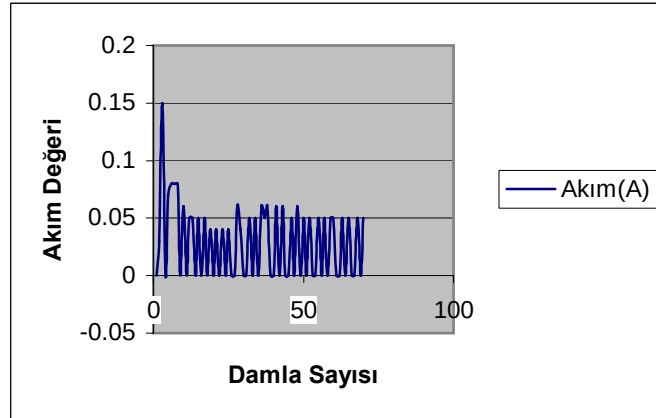
EK B

590 V'da CTI Deneyi Uygulaması (1. Numune)

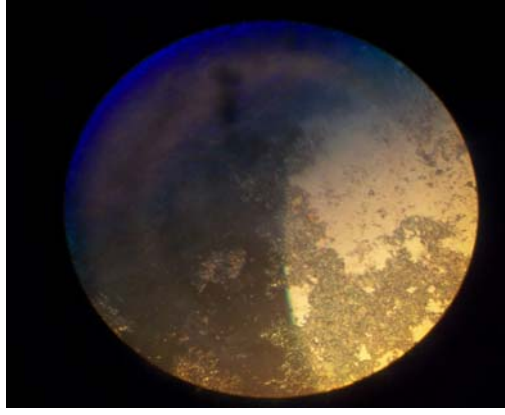
Kurulan deney düzeneğine 590 V'da gerilim uygulanmış olup ampermetrede değişim 0 A ile 0,15 A arasında gözlenmiştir (Şekil B1, B2). Yüzeyde iz oluşumu gözlenmiştir (Şekil B3).



Şekil B1: 590V'da Damla Sayısı Gerilim Değeri (V)



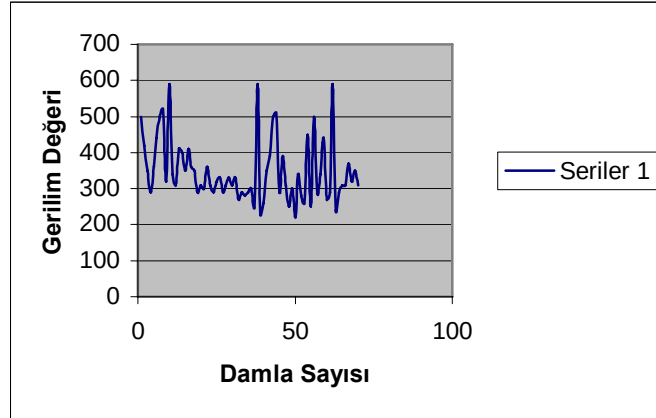
Şekil B2: 590 V'da Damla Sayısı-Akım Değeri (A)



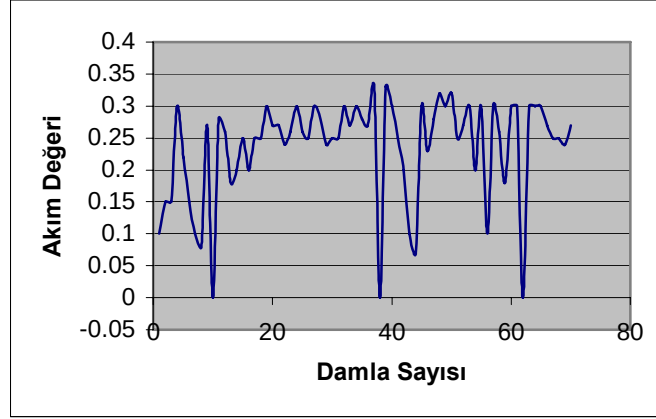
Şekil B3: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü

590 V'da CTI Deneyi Uygulaması (2. Numune)

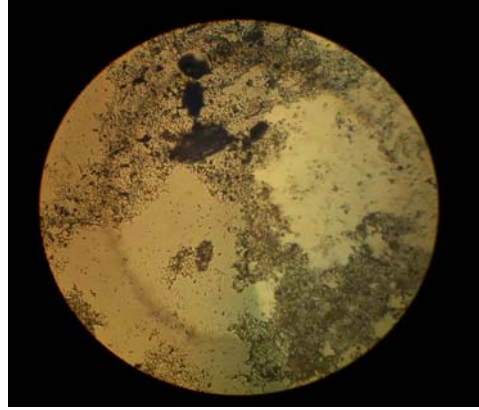
Kurulan deney düzeneğine 590 V'da gerilim uygulanmış olup ampermetrede değişim 0 A ile 0,33 A arasında gözlenmiştir (Şekil B4, B5). Numunenin mikroskopik görünümü Şekil B6'dadır. Yüzeyde iz oluşumu ve aşınma gözlenmiştir.



Şekil B4: 590 V'da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V)



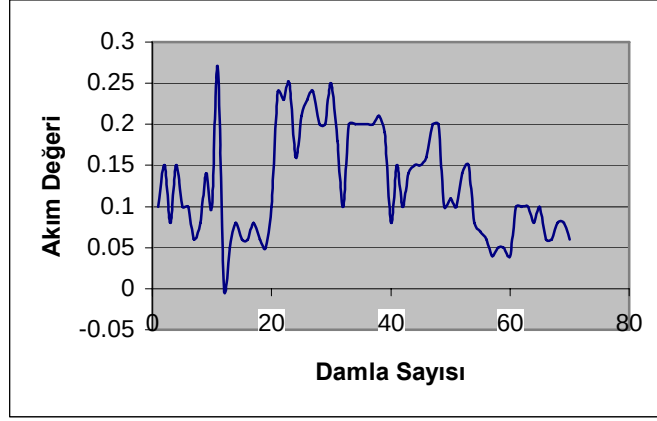
Şekil B5: 590 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri (A)



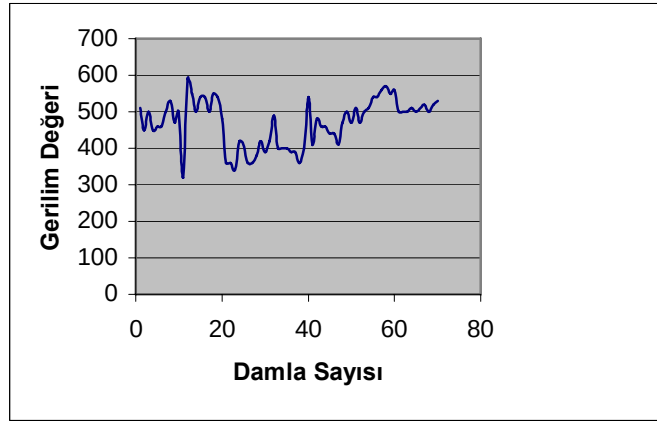
Şekil B6: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü

590 V’da CTI Deneyi Uygulaması (3. Numune)

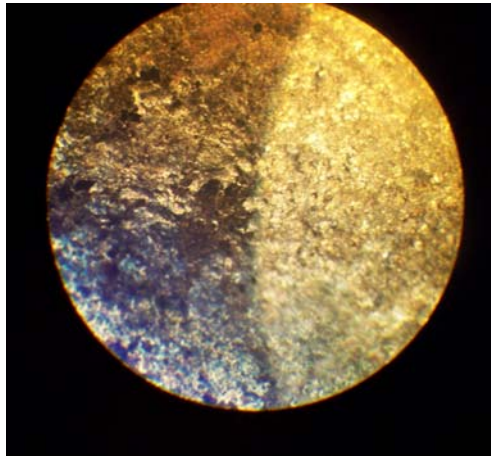
Kurulan deney düzeneğine 590 V’da gerilim uygulanmış olup ampermetrede değişim 0 A ile 0,27 A arasında gözlenmiştir (Şekil B7, B8). Numunenin mikroskopik görünümü Şekil B9’dadır. Yüzeyde iz oluşumu ve aşınma gözlenmiştir.



Şekil B7: 590 V’da Damla Sayısı-Akım Değeri (A)



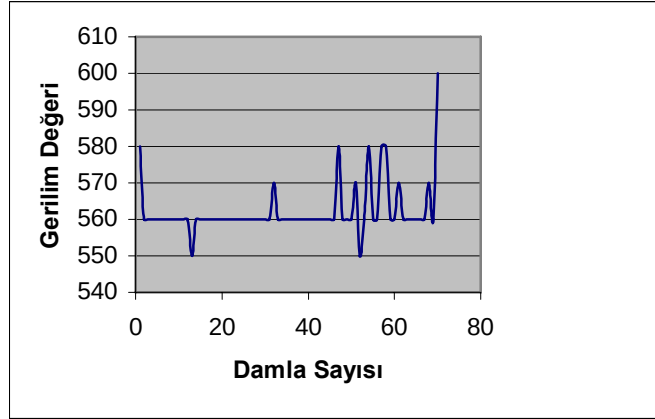
Şekil B8: 590 V’da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V)



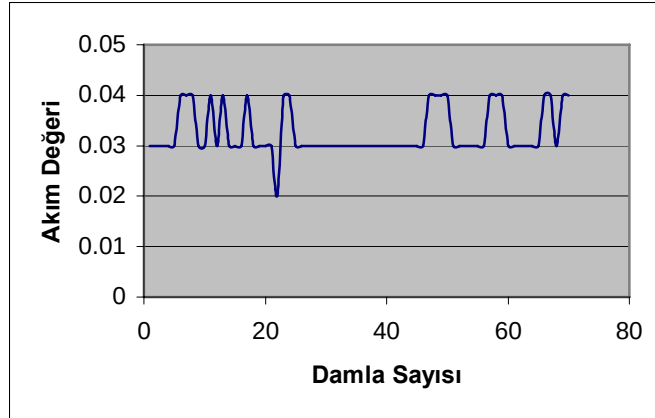
Şekil B9: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü

600 V'da CTI Deneyi Uygulaması

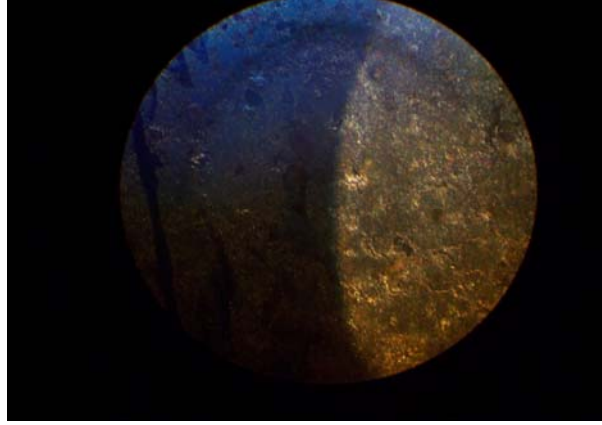
Kurulan deney düzeneğine 590 V'da gerilim uygulanmış olup ampermetrede değişim 0,02 A ile 0,1 A arasında gözlenmiştir (Şekil B10, B11). Numunenin mikroskopik görünümü Şekil B12'dedir.



Şekil B10: 600 V'da Damla Sayısı-Gerilim Değeri (V)



Şekil B11: 600 V'da Damla Sayısı- Akım Değeri (A)



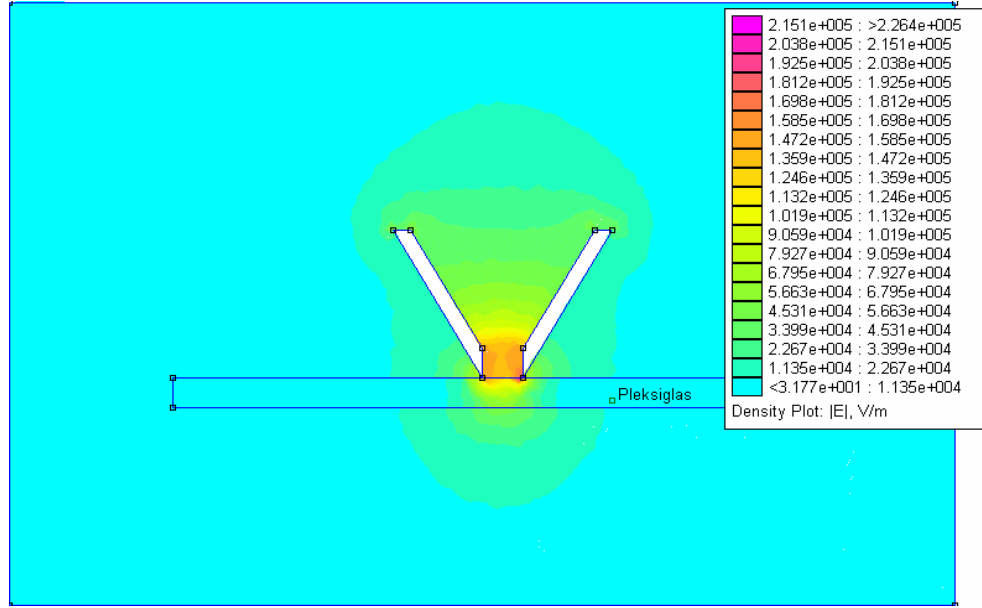
Şekil B12: Numune Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüsü



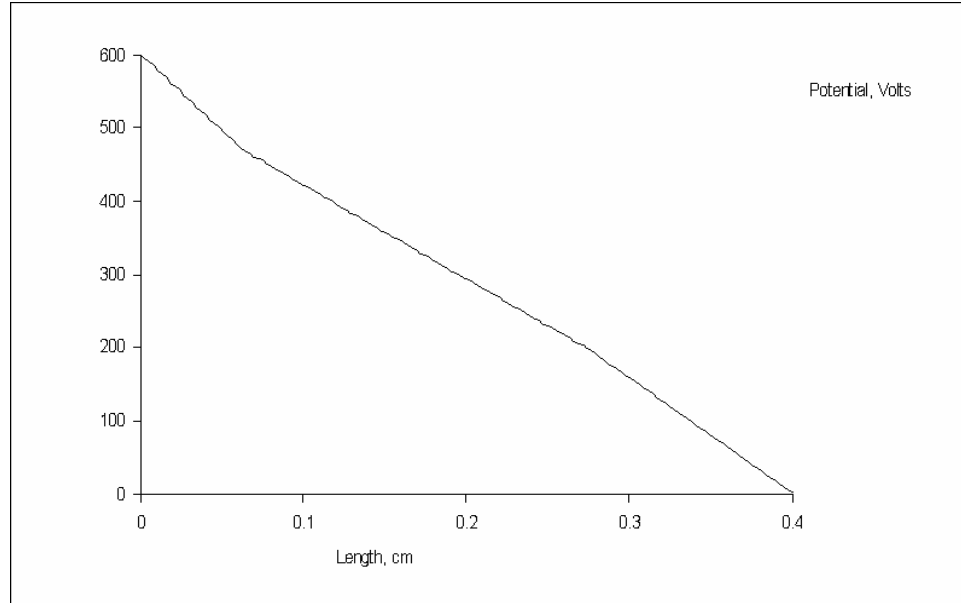
Şekil B13: Deneylerde Kullanılan Numuneler

EK C

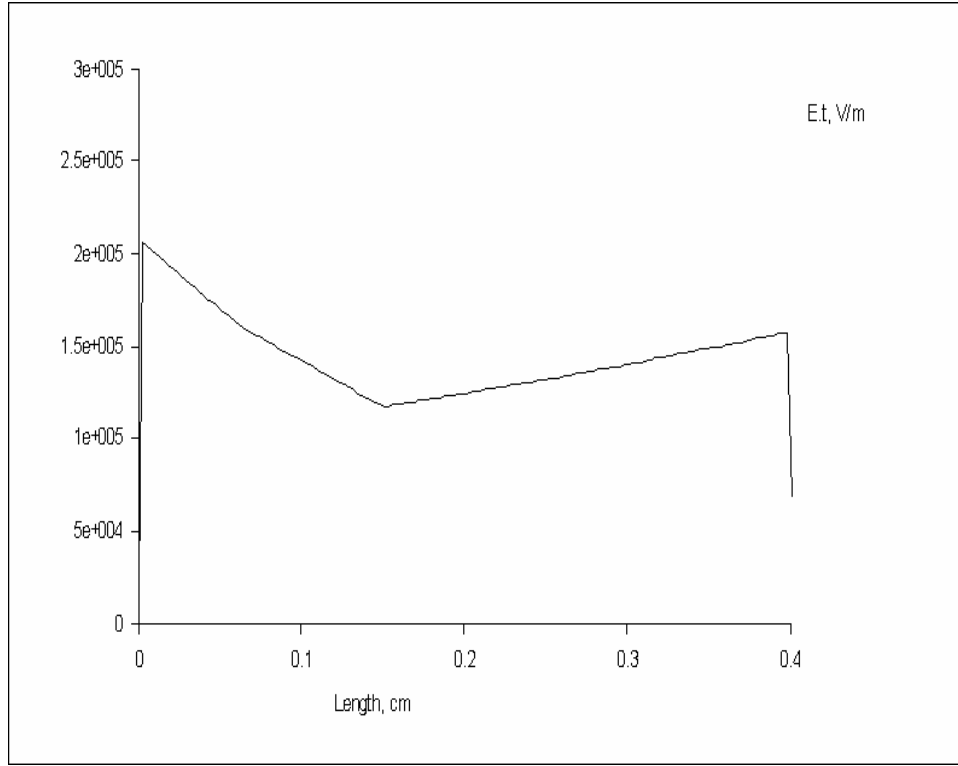
Ortamda Su Damlası Yokken



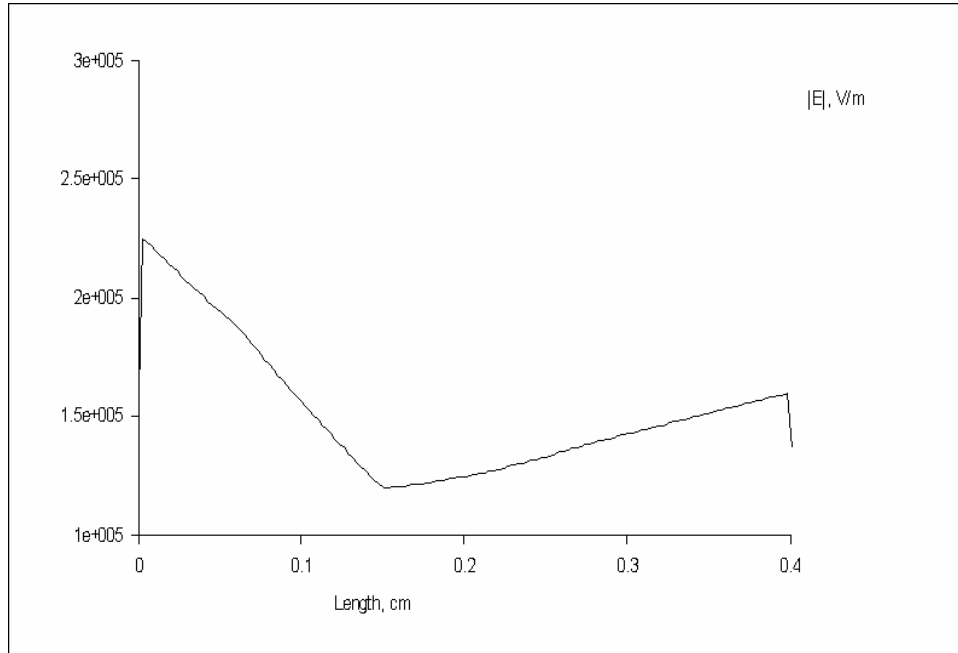
Şekil C1: Elektrik Alan Dağılımı



Şekil C2: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Potansiyelin Değişimi

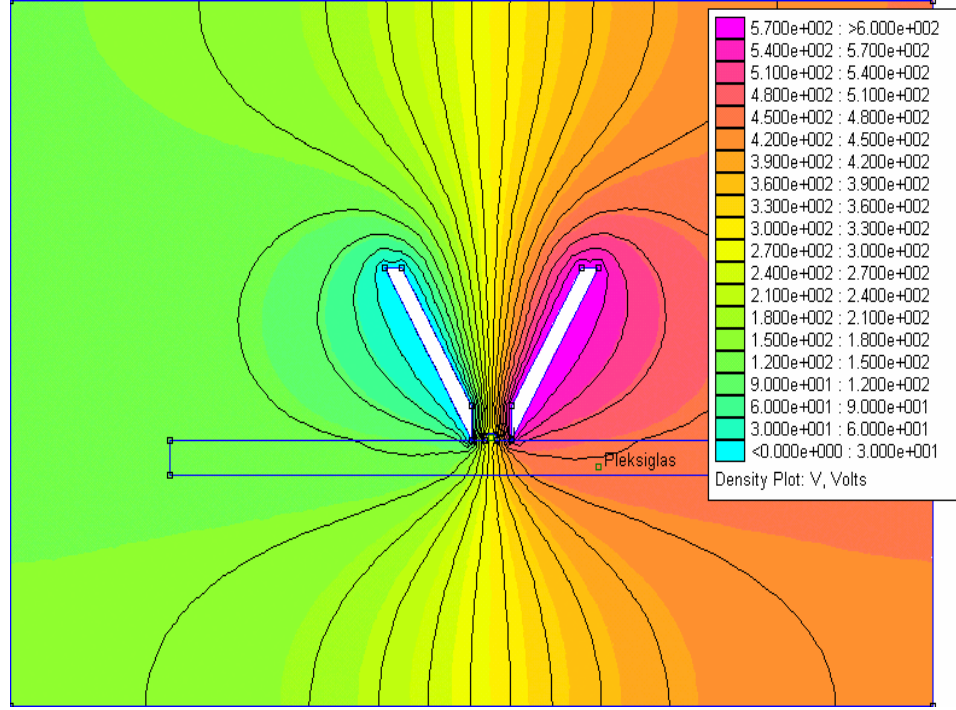


Şekil C3: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Teğetsel Elektrik Alan Bileşeninin Değişimi

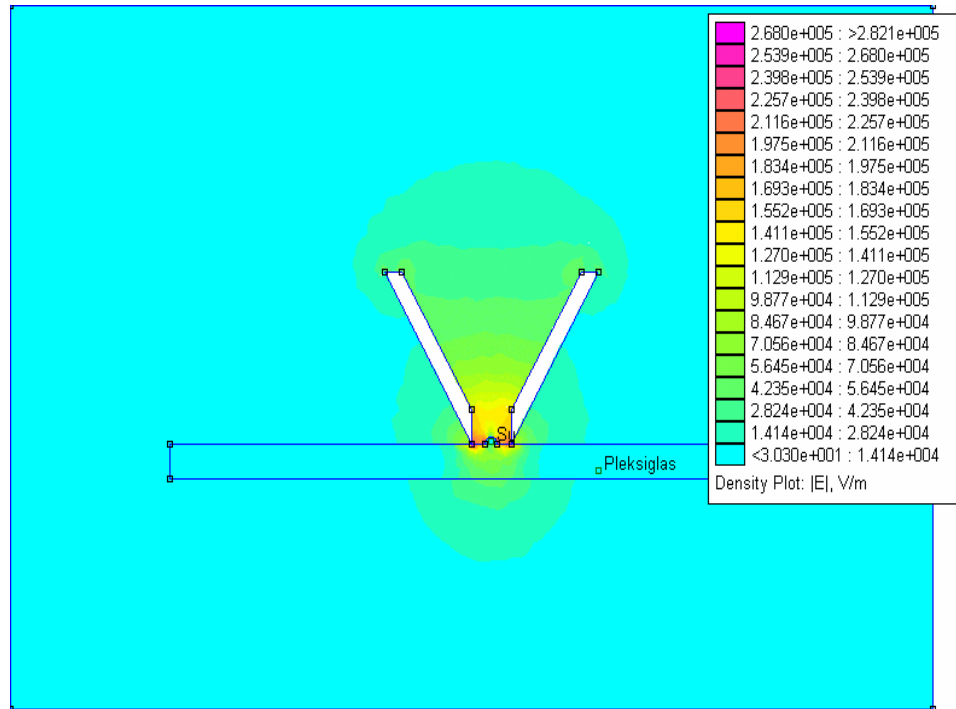


Şekil C4: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Elektrik Alan Büyüklüğünün Değişimi

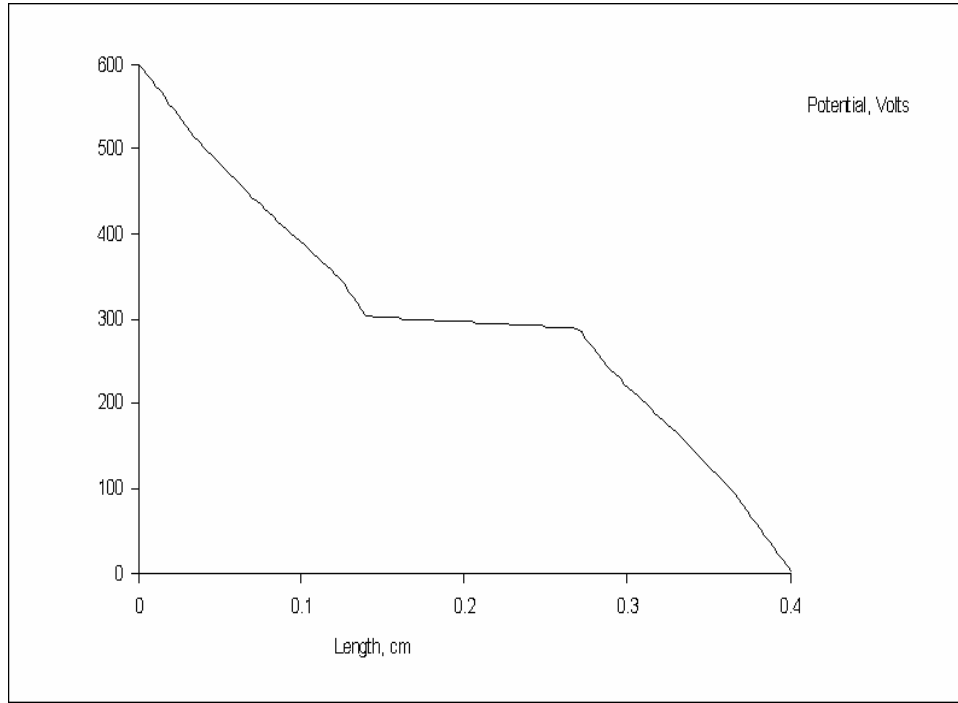
Ortamda Su Damlası Varken



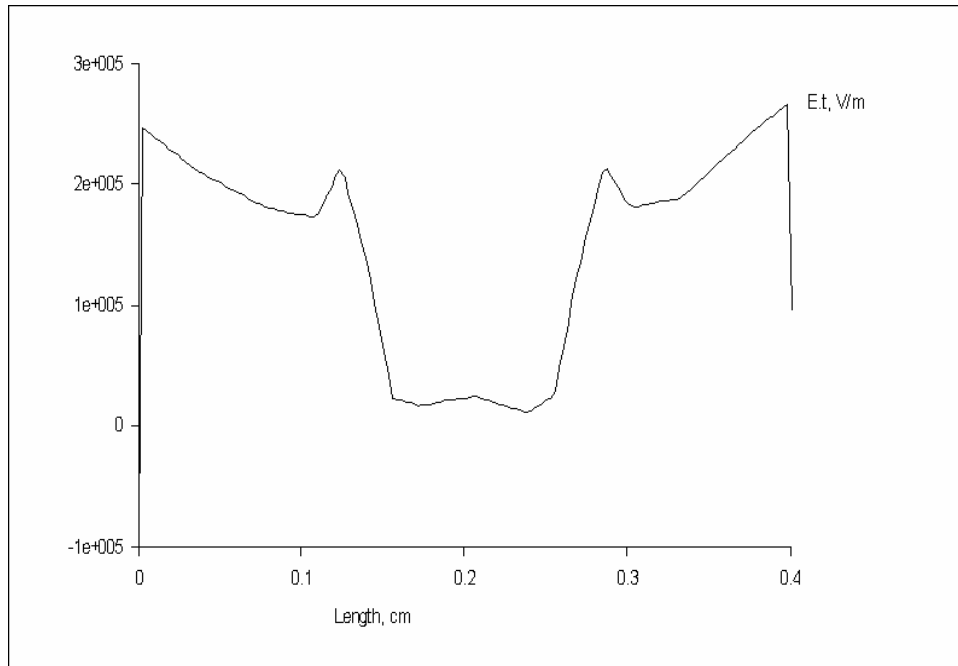
Şekil C5: Eşpotansiyel Çizgiler



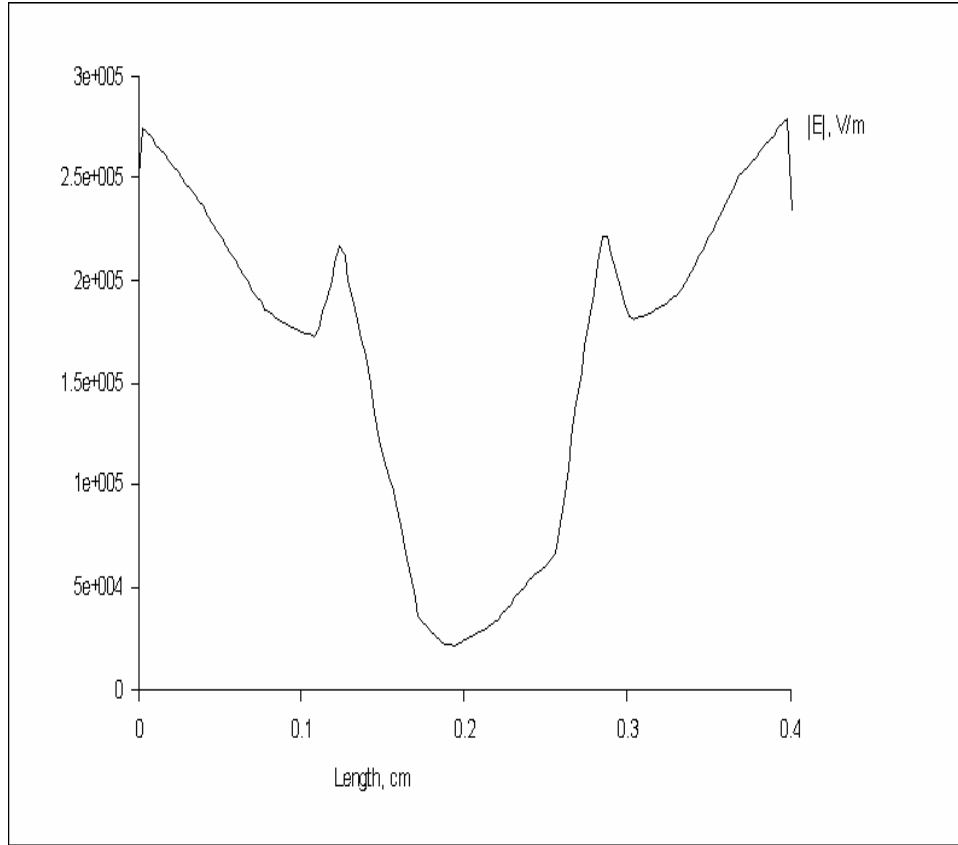
Şekil C6: Elektrik Alan Dağılımı



Şekil C7: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Potansiyelin Değişimi



Şekil C8: İki Elektrot Arasındaki Yüzey Üzerinde Teğetsel Elektrik Alan Bileşeni Değişimi



Şekil C9: İki Elektrot ArasındakiYüzey Üzerinde Bileşke Elektrik Alan Büyüklüğünün Değişimi

ÖZGEÇMİŞ

19.03.1976 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Özel Şişli Terakki Lisesi'nde tamamladı. 1993 yılında Özel Şişli Terakki Lisesi'nden mezun oldu. 1994 yılında İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 1999 yılında İ.T.Ü. Elektrik bölümünden mezun oldu. 2003 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği yüksek lisans programına kayıt yaptırdı. İngilizce bilmektedir.