**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KATI YALITKANLARDAKİ ELEKTRİKSEL ZORLANMALAR VE ÖMÜR SAPTAMASI

**YÜKSEK LİSASN TEZİ**

**Müh. Suat İLHAN**

**Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**ŞUBAT 2005**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KATI YALITKANLARDAKİ ELEKTRİKSEL ZORLANMALAR VE ÖMÜR SAPTAMASI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Müh. Suat İLHAN**
**504011040**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Aralık 2004**
**Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Ocak 2005**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR**

**Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ**

**Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU**

**ŞUBAT 2005**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında bana destek olan, çalışmalarım sırasında beni yönlendiren ve fikirlerini benimle paylaşan hocam Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca teşvik ve önerilerinden dolayı Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye de teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve desteğini sürekli hissettiğim aileme teşekkür ederim.

ARALIK 2004 Suat İLHAN

**İÇİNDEKİLER**


**ÖNSÖZ** **ii**
**KISALTMALAR** **vi**
**TABLO LİSTESİ** **vii**
**ŞEKİL LİSTESİ** **viii**
**SEMBOL LİSTESİ** **x**
**ÖZET** **xii**
**SUMMARY** **xiv**

**1. GİRİŞ** **1**

**2. KATI YALITKANLAR** **4**
2.1 Elektriksel Özellikler 4
2.1.1 Dielektrik Sabiti 4
2.1.2 Dielektrik Polarizasyon 5
2.1.3 Elektriksel İletkenlik 5
2.1.4 Dieletrik Kayıpları 6
2.1.5 Dieletrik Dayanım 6
2.2 Isıl Özellikler 7

**3. KATI YALITKANLARDA DELİNME** **8**
3.1 Öz (Ani) Delinme 9
3.1.1 Elektronik Delinme 9
3.1.2 Kanal Delinmesi 10
3.2 Elektromekanik Delinme 12
3.3 Isıl (Termik) Delinme 13
3.4 Uygulamada Katı Yalıtkanların Delinmesi 14

**4. KATI YALITKANLARDA YAŞLANMA** **18**
4.1 Yaşlanma Mekanizması 18
4.2 Etki Faktörlerine Göre Yaşlanmalar 21
4.2.1 Tek Faktöre Bağlı Yaşlanma 21
4.2.1.1 Elektriksel Yaşlanma 21
4.2.1.2 Isıl Yaşlanma 22
4.2.1.3 Mekanik Yaşlanma 23
4.2.1.4 Çevresel Yaşlanma 24
4.2.2 Çok Faktöre Bağlı Yaşlanma 24
4.3 Yaşlanmanın Hızlandırılması 26
4.3.1 Hızlandırılmış Yaşlanmada Kullanılan Veri Türleri 27
4.3.2 Hızlandırmanın Uygulanma Çeşitleri 28

**5. KISMİ BOŞALMALARIN ELEKTRİKSEL YAŞLANMA ÜZERİNE ETKİLERİ** **29**
5.1 Kısmi Boşalmaların Oluşumu 30
5.2 Kısmi Boşalmalarla İlgili Büyüklükler 32
5.2.1 Görünen Yük 32
5.2.2 Tekrarlanma Sıklığı 32
5.2.3 Kısmi Boşalmanın Enerjisi 33
5.2.4 Ortalama Boşalma Akımı 33
5.2.5 Karesel Oran 33
5.2.6 Boşalma Gücü 33
5.2.7 Kısmi Boşalma Başlangıç Gerilimi 34
5.2.8 Kısmi Boşalma Sönme Gerilimi 34
5.2.9 Kısmi Boşalma Oluşmazlık Deney Gerilimi 34
5.3 Kısmi Boşalma Ölçüm Devreleri 34
5.4 Kısmi Boşalmaların Kaynağının Belirlenmesi 36
5.4.1 Boşluklu Yalıtkandaki Kısmi Boşalma Durumları 37
5.5 Kısmi Boşalmaların Elektriksel Yaşlanma Üzerine Etkileri 40
5.5.1 Maksimum Boşalma Yükü ($q_{max}$) İle Yalıtkan Ömrü Arasındaki İlişki 42

**6. DENEY VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ** **44**
6.1 Temel İstatistiksel Tanımlar 44
6.1.1 Raslantı Değişkeni 44
6.1.2 Dağılım ve Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu 44
6.2 Ömür Analizleri İçin Olasılık Dağılım Fonksiyonları 46
6.2.1 Lognormal Olasılık Dağılımı 46
6.2.2 Weibull Olasılık Dağılımı 47
6.3 Dağılım Parametrelerinin Tahmini 48
6.3.1 Grafiksel Yolla Parametre Tahmini 49
6.3.2 Sayısal Parametre Tahmini 52
6.3.2.1 Lognormal Dağılım Parametrelerinin Sayısal Tahmini 52
6.3.2.2 Weibull Dağılım Parametrelerinin Sayısal Tahmini 52
6.3.3 Dağılım Parametreleri İçin Güven Aralıkları (Confidence Interval) 53
6.4 Elektriksel Yalıtım Sistemlerinde Kullanılan Yaşlanma Modelleri ve Model Parametrelerinin Hesaplanması 57
6.4.1 Deney Verilerinin Arıza Modellerine Uydurulması 58
6.4.1.1 Sayısal Yöntemler Kullanılarak Model Parametrelerinin Tahmini 59
6.4.1.2 Belirli Gerilim Değeri İçin Güven Aralıklarının Hesaplanması 59
6.5 Örnek Veri Analizi 61

**7. KISMİ BOŞALMA DENEYLERİ** **68**
7.1 Deney Numuneleri ve Deney Montajı 69
7.2 Kısmi Boşalma Ölçüm Devresi 71
7.3 Kısmi Boşalma Ölçümleri 72

**8. SONUÇLAR** **79**

**KAYNAKLAR** **81**

**ÖZGEÇMİŞ** **85**

**KISALTMALAR**

**KB** : Kısmi boşalma
**PD** : Partial Discharge
**EYS** : Elektriksel Yalıtım Sistemi
**IEC** : International Electrotechnical Commission
**IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineers
**MLM** : Maximum Likehood Method
**EKKY** : En Küçük Kareler Yöntemi

## TABLO LİSTESİ


| | | Sayfa No |
|---|---|---|
| **Tablo 2.1.** | Bazı yalıtım malzemelerinin elektriksel özellikleri | 6 |
| **Tablo 2.2.** | Katı yalıtım malzemelerinin ısıl sınıflandırılması | 7 |
| **Tablo 6.1.** | Yalıtım sisteminin arızalanmasına ait örnek deney verileri | 47 |
| **Tablo 6.2.** | Örnek deney verileri | 48 |
| **Tablo 6.3.** | Normal dağılım için güven aralıklarının hesabında kullanılan t-istatistiği | 60 |
| **Tablo 6.4.** | Epoksi reçine deney numunelerine ait deney verileri | 62 |
| **Tablo 6.5.** | Yaşlanma model parametrelerinin hesaplanmasında kullanılacak değerler | 63 |
| **Tablo 6.6.** | Gerilim değerlerine karşılık gelen ömür değerleri | 64 |
| **Tablo 6.7.** | Güven aralıklarının hesaplanmasında kullanılacak veriler | 65 |
| **Tablo 6.8.** | Değişik gerilim değerleri için $C(U_a)$ katsayıları | 67 |
| **Tablo 7.1.** | Deney numunesi 6; 6.5; 7; 9 ve 10 $kV_{eff}$ gerilim değerlerine 288 saat maruz bırakıldıktan sonra yapılan kısmi boşalma ölçüm sonuçları | 73 |
| **Tablo 7.2.** | Deney cismi devredeyken yapılan kalibrasyon işlemi | 74 |
| **Tablo 7.3.** | Deney odasının belirli bir gerilim değerine kadar göstermiş olduğu boşta gürültü düzeyleri | 75 |
| **Tablo 7.4.** | Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri | 76 |
| **Tablo 7.5.** | Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri (2 saat sonra) | 76 |
| **Tablo 7.6.** | Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri (4 saat sonra) | 77 |
| **Tablo 7.7.** | Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri (6 saat sonra) | 77 |
| **Tablo 7.8** | Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri (8 saat sonra) | 77 |

## ŞEKİL LİSTESİ


| | | Sayfa No |
|---|---|---|
| **Şekil 3.1** | : Zorlanma süresiyle delinme dayanımının değişimi | 6 |
| **Şekil 3.2** | : Katı yalıtkan numunenin çevre boşalması nedeniyle delinmesi | 10 |
| **Şekil 3.3** | : Perspeks içerisinde çubuk-levha elektrotlar arasında delinme kanalları | 11 |
| **Şekil 3.4** | : Elektro-mekanik delinme süreci | 12 |
| **Şekil 3.5** | : Katı yalıtkanlardaki ısıl kararsızlık | 14 |
| **Şekil 3.6** | : Boşluklu yalıtkan ve elektriksel eşdeğer devresi | 15 |
| **Şekil 3.7** | : Alternatif gerilim altında boşluğun bir dizi delinmesi | 16 |
| **Şekil 4.1** | : Elektriksel yalıtım sisteminin yaşlanması | 19 |
| **Şekil 4.2** | : Yalıtım sistemindeki olası yaşlanma mekanizmaları | 20 |
| **Şekil 4.3** | : Yaşlanmanın zamanın fonksiyonu olarak gösterilmesi | 20 |
| **Şekil 4.4** | : Yalıtım sistemine etkiyen yaşlanma faktörleri | 24 |
| **Şekil 4.5** | : Yaşlanma faktörleri arasındaki doğrudan etkileşim | 25 |
| **Şekil 4.6** | : Yaşlanma faktörleri arasındaki dolaylı etkileşim | 26 |
| **Şekil 4.7** | : Tamamlanmış deney verisi örneği | 28 |
| **Şekil 4.8** | : Tamamlanmamış deney verisi örneği | 28 |
| **Şekil 5.1** | : Kısmi boşalma için eşdeğer devre | 30 |
| **Şekil 5.2** | : Temel kısmi boşalma ölçüm devresi | 32 |
| **Şekil 5.3** | : Ölçüm cihazının kuplaj kondansatörü ile seri bağlı olması | 35 |
| **Şekil 5.4** | : Ölçüm cihazı ile deney cisminin seri bağlı olması | 35 |
| **Şekil 5.5** | : Dengelenmiş devre şeması | 35 |
| **Şekil 5.6** | : a) Sinüs dalgası b) Eliptik düzlemdeki sinüs dalgası | 36 |
| **Şekil 5.7** | : Kısmi boşalma ölçüm devresi | 37 |
| **Şekil 5.8** | : Boşalma işaretlerinin genliğinin ve fazının gösterilmesi | 37 |
| **Şekil 5.9** | : a) Boşluklu yalıtkan malzeme b) Kısmi boşalma şekli | 38 |
| **Şekil 5.10** | : a) Değişik sayıda ve boyutta boşluk içeren yalıtkan b) Kısmi boşalma şekli | 38 |
| **Şekil 5.11** | : a) Düzgün boşluk içeren bir yalıtkan b) Kısmi boşalma şekli | 38 |
| **Şekil 5.12** | : a) Yalıtkan ile elektrot arası sınır yüzeyde boşluk içeren yalıtkan b) Kısmi boşalma şekli | 39 |
| **Şekil 5.13** | : a) Ağaçlanma içeren yalıtkan, b) Kısmi boşalma şekli | 39 |
| **Şekil 5.14** | : a) Ağaçlanma içeren yalıtkan b) Kısmi boşalma şekli | 40 |
| **Şekil 5.15** | : Yaşlanma zamanı ile malzemedeki özellik değişimi arasındaki ilişki | 40 |
| **Şekil 5.16** | : Kısmi boşalma genliği ile yalıtkan ömrü arasındaki ilişki | 43 |
| **Şekil 5.17** | : Maksimum boşalma yükü ile elektriksel ağaç uzunluğu arasındaki değişim | 43 |
| **Şekil 6.1** | : F(x) ile f(x) arasındaki ilişkinin grafiksel olarak gösterilmesi | 45 |
| **Şekil 6.2** | : Olasılık yoğunluk fonksiyonu | 46 |

**Şekil 6.3** : Deney verilerinin logaritmik normal olasılık kağıdı üzerinde gösterilmesi 47
**Şekil 6.4** : Deney verilerinin weibull olasılık kağıdı üzerinde gösterilmesi 49
**Şekil 6.5** : Lognormal dağılım parametrelerinin grafik yolla tahmini 50
**Şekil 6.6** : Weibull olasılık dağılım parametrelerinin grafik yolla tahmin edilmesi 51
**Şekil 6.7** : Şekil parametresinin %90 güven aralığı için hesaplamada kullanılan W parametrelerinin değişimi 54
**Şekil 6.8** : % 90 güven aralığında ölçek parametresinin alt değerinin hesabında kullanılan $Z_l$ parametresinin değişimi 55
**Şekil 6.9** : % 90 güven aralığında ölçek parametresinin üst değerinin hesabında kullanılan $Z_u$ parametresinin numune sayısına bağlı olarak değişimi 56
**Şekil 6.10** : Deney verilerine ait logaritmik normal olasılık çizimi (%95 güven aralığı ile) 66
**Şekil 7.1** : a) Epoksi reçine deney numuneleri b) Deney numuneleri ve yağ kapları 69
**Şekil 7.2** : a) Rogowski profilli elektrot içerisinde bulunan deney cismi b) Deney setinin kısımları 70
**Şekil 7.3** : Ekranlı deney odasında kısmi boşalma ölçüm devresinin görünümü 71
**Şekil 7.4** : Kısmi boşalma ölçüm deney montajı 71
**Şekil 7.5** : a) Kısmi boşalma ölçü aleti b) Kalibrasyon aleti 72
**Şekil 7.6** : Uygulanan gerilim ile kısmi boşalma yükü arasındaki değişim 73
**Şekil 7.7** : Zaman ile kısmi boşalma miktarındaki değişimin gösterilmesi 74
**Şekil 7.8** : Boşta gürültü düzeyinin grafiksel gösterimi 75
**Şekil 7.9** : Zamana bağlı olarak ve uygulanan gerilimle kısmi boşalma yükündeki değişimler 78

## KATI YALITKANLARDAKİ ELEKTRİKSEL ZORLANMALAR VE ÖMÜR SAPTAMASI


### ÖZET

Elektrik enerjisinin kullanımındaki artış, beraberinde yükselen iletim gerilimleri ve dolayısıyla akım taşıyan iletkenleri birbirinden yalıtmak için en ekonomik ve en etkin yalıtım sisteminin kullanımını zorunlu hale getirmiştir.

Çalışma koşullarına bağlı olarak, elektriksel yalıtım sistemleri, elektriksel, mekanik, ısıl, çevresel ve ara sıra da geçici zorlanmalara maruz kalırlar. Bu zorlanmalar sonucunda yalıtım sisteminde meydana gelecek arızalar sistemin verimliliğini ve güvenilirliğini azaltacaktır. Bu sebepten, yalıtım sistemleri üzerinde yaşlanma durumunu belirleyebilmek için yapılan tanı( diagnostic) ve durum izleme çalışmaları üzerinde önemli artışlar olmuştur. Bu çalışmalar öngörülü bakım planlarının geliştirilmesi için yalıtım sistemlerinin ömür tahminleri ve performansları üzerine yoğunlaşmıştır.

Uygulamada çok farklı türde yalıtım yapılarının kullanılması ve bu yapılarda meydana gelen yaşlanma durumlarında ki karmaşıklıktan dolayı, güvenilir ve kesin tanısal planların sağlanması için bir çok elektriksel ve elektriksel olmayan işaret gereklidir. Bu işaretler genellikle üç kısma ayrılabilir:

1. Yalıtım direnci, kutuplanma indeksi ve kaçak akım değeri gibi doğru gerilim deneyleri, kısmi boşalma, radyo frekans karakteristikleri, kapasite ve kayıp faktörü (tanδ) gibi alternatif gerilim deneyleri,
2. Mekanik yorulma ve ısıl bozulma gibi fiziksel olaylar,
3. Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan yan ürünler gibi kimyasal değişimler.

Değişik ölçüm yöntemleri yardımıyla, normal çalışma koşullarında yalıtım sisteminde meydana gelen bozulmaları değerlendirebilmek için yukarıdaki parametrelerden birçoğunun davranışı üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalar sonucunda, bu parametrelerden bazılarının yalıtım sisteminin bozulma

durumunu tanımlamada kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, elektriksel deneyler içerisinde yer alan ve yalıtım kalitesini belirlemek için kullanılan kısmi boşalma ölçümlerinin yalıtım yapılarının bozulmaları ile ilgili güvenilir ölçümler sağladığı görülmüştür.

Son zamanlarda, kısmi boşalmaların oluşumu, genliği ve diğer karakteristik büyüklüklerinin yalıtım sisteminin çalışma ömrünü nasıl etkilediğini belirtmek için yapılan çalışmalarda önemli artışlar olmuştur. Kısmi boşalma ölçümleri ve ölçüm sonuçlarının yorumlanması, yüksek gerilim sistemlerinin güvenilirliliğinin geliştirilmesi için gerekli parametreler olarak düşünülebilir. Çünkü, kısmi boşalmalar neticesinde, yalıtım kusurları algılanabilir, tanımlanabilir ve arıza riskleri ölçülebilir.

Kısmi boşalma ölçümleri gibi tanısal deneyler yapılarak bir yalıtım sisteminin ömrünü tayin edebilmek için genellikle hızlandırılmış yaşlanma deneylerine başvurulur. Bu deneylerden, normal çalışma koşullarındaki ömür verilerini elde etmek için matematiksel modellere ihtiyaç duyulur. Bir yalıtım sistemi belirli bir değerden daha yüksek değerde kısmi boşalma değeri gösteriyorsa o yalıtım sistemi yaşlanmış olarak düşünülebilir.

Yaşlanma sürelerindeki istatistiksel dağılımdan dolayı, her bir zorlanma seviyesinde bir çok deney numunesi deneye tabi tutulmalıdır. Deney sonuçlarının farklılıklar göstermesi, deney verilerinin birkaç parametreye indirgenmesine imkan sağlayan istatistiksel modellerin ve istatistiksel veri analizlerinin kullanımını zorunlu kılmıştır.

Bu tez çalışmasında, epoksi reçineden imal edilmiş, birbirinin aynı deney numuneleri üzerinde yapılan kısmi boşalma temelli hızlandırılmış yaşlanma deneyleri üzerinde durulmuştur. Uygulanan gerilimlerin genlikleri ve etki süreleri değiştirilerek ölçümler tekrarlanmıştır. Belirli bir değerden daha yüksek kısmi boşalma gösteren deney numunelerine ait yaşlanma deney verileri bazı teknik problemler nedeniyle henüz tam olarak elde edilememiştir. Bu nedenle, örnek deney verileri üzerine yapılan istatistiksel veri analizi üzerinde durulmuştur. Örnek deney verilerini temsilen Lognormal olasılık dağılımı kullanılmış ve hızlandırılmış deney verilerinden deney numunelerine ait normal çalışma koşullarındaki ömürleri tayin etmek için Eksi Üs Modeli (Inverse Power Model) kullanılmıştır. Model parametrelerinin hesaplanması için En Küçük Kareler yöntemi kullanılmış ve deney numunelerine ait ömürler belirli güven aralıkları içerisinde hesaplanmıştır.

## ELECTRICAL STRESSES IN SOLID INSULATORS AND LIFE PREDICTION

## SUMMARY

Continuous increase in consumed electrical power has brought the necessity of higher transmission voltages. Consequently, implementation of economical and effective insulation systems because one of the most important issue in electrical engineering.

Depending upon the operating condition, insulation systems are subjected to electrical, thermal, mechanical, environmental contamination, and, occasionally to transient stresses. The electrical breakdown of the insulation systems under these circumstances weakens the reliability and cost effectiveness of electrical systems. Therefore, diagnostic and condition monitoring of the insulation structure has gained growing interest and has become the focus of many research programs in order to characterize the ageing processes involved. These programs are often directed toward performance and life estimation of insulation systems in order to develop condition-based maintenance schemes.

It is now recognized that because of the complexity of the ageing phenomena involved and the wide range of insulation types and structures used in practical situation, a plurality of electrical and non-electrical signatures is needed to provide a reliable and conclusive diagnostic scheme. These signatures, in general, fall into three catagories;

1. Electrical measurements such as partial discharge activity, radio frequency characteristics, DC tests (insulation resistance, polarization index, leakage current and DC dielectric absorption, AC tests (capacitance, dissipation factor (tanδ)), etc.
2. Physical phenomena such as mechanical fatigue and erosion of coating, thermal degradation,
3. Chemical agencies such as byproduct from chemical reactions.

Through on-line and off-line measurement techniques, the behavior of many of these parameters and signatures have been studied to assess the deterioration process of the insulation under operating conditions. While some of these parameters were found reliable indicators of transitions in the deterioration mechanism of the insulation material, some measurements are not proven to be sensitive or to contain a significant amount of information about the health of insulation. On the other hand, partial discharge characterization is among the electrical tests which are performed to ensure the quality are shown to provide reliable measurements to the extent of the insulation deterioration.

Over the past four decades, considerable research effort has been expended in relating the occurence, magnitude and other characteristics of partial discharge to the reduction in working life of the insulation. Partial Discharge (PD) measurements and interpretation are considered essential tools for improving the reliability of high voltage insulation systems, because of their ability to detect and identify insulation defects and assess the risk of failures involved.

In order to predict the life of insulation systems based on diagnostic tool (such as partial discharge) at normal operating stresses, generally, relatively rapid tests (accelerated testing ) performed at higher than normal operating stress. Life prediction at normal stresses requires a mathematical model to extrapolate the accelerated ageing data to lower stresses. In partial discharge test, life is defined to end when the insulation has a partial discharge magnitude above a set level.

The high variability in ageing lifetimes requires that many specimens be tested under each set of stress conditions. Since the results are so variable, statistical models and statistical data analysis are used to summarize a set of test condition into two or three parameters which are an objective indication of the average life.

In this thesis, accelerated ageing test on apparantly identical epoxy resin test specimens based on partial discharge measurement was introduced. As voltage levels increased, accelerated ageing test was performed. Partial discharge tests were repeated for different voltages and exposure times. Ageing test data for test specimes were not obtained because of some technical problems. For this reason, statistical data analysis for sample test results were given. In order to represent the sample test result, lognormal probability distribution was used and to predict the life under

normal operating conditions from accelerated ageing test data, Inverse Power Model was selected. With the help of Least Square Method, model parameters was calculated and lifetimes for test specimens was obtained in some confidence interval.

# 1. GİRİŞ

Elektriksel yalıtım sistemleri, elektriksel yalıtım, mekanik destek, ısı yayımı ve güvenlik sağlayan yapılar olarak düşünülebilir. İşletmede kullanılan bir yalıtım sisteminin arızalanması yalıtımın bağlı bulunduğu sistemlere büyük zarar verecektir. Ayrıca, yeni ve büyük yalıtım sistemlerinin inşa edilmesi çevresel ve ekonomik nedenlerden dolayı oldukça güçtür. Bu nedenle, elektrik endüstrisinde, yeni yalıtım sistemleri tasarlamanın yanı sıra, var olan sistemlerin bakımı üzerine bir çok çalışma yapmaktadırlar. Özellikle, son yıllarda yalıtım sistemleri üzerine tanı (diagnostic) ve durum izleme (condition monitoring) sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda önemli artışlar olmuştur.

Elektriksel, mekanik, ısıl ve çevresel zorlanmalara maruz kalan bir elektriksel yalıtım sistemi zamanla elektriksel ve mekanik özelliğini tamamen veya kısmen yitirebilir. Bunun sonucunda yalıtkan yapının daha da bozulmasına neden olan kusurlar, yalıtım sistemi içerisinde oluşabilirler. Yalıtım sistemi içerisinde, üretim sırasında veya çalışma koşullarına bağlı olarak meydana gelen bu kusurlar bir çok dinamik, elektriksel ve elektriksel olmayan belirtiler (işaretler) gösterirler.

Bu işaretlerin algılanması ve izlenmesi yalıtım sistemindeki yaşlanma olayının mekanizması ve gelişimi hakkında bilgi sağlayabilir. Elektriksel yalıtım sisteminin yavaş yavaş bozulması ve mekanik kararlılığını yitirmesi değişik türde kısmi boşalmaların başlamasına sebep olabilir. Bu kısmi boşalmalar sonucunda yalıtım sistemi tamamı ile arızalanabileceği gibi kısmi arızalanma durumları da meydana gelebilir. Bu tür arızalar genellikle yalıtım sisteminin dielektrik dayanımından daha düşük dayanımlara sahip bölgelerde meydana gelen kısmi boşalmaların oluşumu ve tehlikesi ile ilgilidir.

Kısmi boşalma ölçümleri, yalıtım kalitesini belirlemek için yapılan tahribatsız yüksek gerilim deneylerinden biridir. Bu ölçümler, yalıtım sisteminin yaşlanma durumu ile ilgili belirtiler ortaya koyarlar. Yalıtım sistemindeki her bir iç kusurun kendine özgü yaşlanma mekanizması vardır ve her bir kusur değişik kısmi boşalma karakteristiği göstermektedir. Elektriksel yalıtım sisteminin yaşlanma durumunu

kısmi boşalma temelli belirleyebilmek için yapılan kısmi boşalma ölçümleri; kısmi boşalmaların genliği, tekrarlanma sıklığı gibi doğrudan kısmi boşalma karakteristikleri olabileceği gibi bu büyüklüklerden türetilmiş çarpıklık (skewness), basıklık (kurtosis) gibi parametreler de olabilir.

Elektriksel yalıtım sistemlerinin kısmi boşalma temelli ömür saptaması genelde hızlandırılmış ömür deneyleri yardımıyla gerçekleştirilir. Hızlandırılmış yaşlanma deneyleri deney sürelerinin kısaltılması için başvurulan yöntemlerden birisidir ve bu deneylerde yalıtım sisteminin normal çalışma koşullarında maruz kaldığı zorlanmalardan daha büyük zorlanmalar uygulanır. Kısmi boşalma temelli yaşlanma deneylerinde, arızalanma durumu olarak genelde bir yalıtım sistemi belirli çalışma koşullarında belirli bir değerden daha yüksek değerde kısmi boşalma gösteriyor ise o yalıtım sistemi yaşlanmış olarak kabul edilebilir. Aksi taktirde, tüm deney numunelerinin tamamen bozulmasını (arızalanmasını) beklemek pek pratik bir çözüm olmayabilir.

Kısmi boşalma temelli ömür tayini deneyine tabi tutulan numunelere ait deney verileri farklılıklar göstereceğinden, bu numunelere ait ömür tayinlerini uygun bir şekilde elde etmek için bir çok deney numunesinin kullanılması gerekmektedir. Deney numunelerine ait arızalanma verilerinin birkaç parametre ile temsil edilmesini sağlamak için genelde istatistiksel yöntemlerden faydalanılır. Kullanılan istatistiksel yöntemlerin yanı sıra, hızlandırılmış ömür deneyleri verilerini deneye tabi tutulan cihaz veya numunenin normal çalışma koşullarına indirgeyebilmek için zorlanma seviyesi ile ömür arasındaki ilişkiyi gösteren matematiksel yaşlanma modellerin kullanılması gereklidir. Aynı koşullarda üretilmiş ve aynı koşullarda deneye tabi tutulmuş benzer numunelerin deney verilerindeki büyük farklılıklardan dolayı en iyi matematiksel modelin ve en iyi istatistiksel dağılımın seçilmesinde güçlükler yaşanabilir.

Bu tez çalışmasında; ikinci bölümde katı yalıtım malzemelerinin elektriksel ve ısıl özellikleri hakkında genel bilgiler verilmiş, üçüncü bölümde katı yalıtkanlarda meydana gelen ani, ısıl, elektronik, elektromekanik delinme ve kısmi boşalmalardan kaynaklanan uzun süreli delinme mekanizmaları üzerinde kısaca durulmuştur. Bölüm dörtte, genel olarak bir yalıtım sisteminin yaşlanması, yaşlanma mekanizması, yaşlanmaya etki eden faktörler üzerinde durulmuş ve hızlandırılmış yaşlanma deneyleri ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde, kısmi boşalmaların

oluşumu, büyüklükleri, ölçüm devreleri ve elektriksel yalıtım sistemlerinin yaşlanmasına kısmi boşalmaların etkisi açıklanmıştır. Bölüm altıda hızlandırılmış deney verilerini analiz etmek için kullanılan istatistiksel yöntemler üzerinde durulmuş ve genel olarak yalıtım sistemlerinin arıza durumunu temsil etmek için yaygın olarak kullanılan 2 parametreli weibull dağılımı ve lognormal dağılımı üzerinde kısaca durulmuştur. Bu dağılımlara ait olasılık grafik çizimleri ve parametre tahminlerine kısaca deyinilmiştir. Bu olasılık dağılımlarına ait olasılık çizimleri için Weibull+6 Life Data Analysis isimli istatistiksel veri analizi yapabilen programdan yararlanılmıştır.Aynı bölümde, elektriksel yalıtım sistemlerinde kullanılan yaşlanma modelleri anlatılmış ve model parametrelerinin sayısal yöntemler kullanılarak hesaplanması açıklanmıştır. Yine aynı bölümde, 25 adet deney numunesinden elde edilmiş örnek deney verilerine ait olasılık dağılımları, dağılım parametrelerinin tahmini ve yaşlanma model parametresinin hesabı üzerinde durulmuştur. Yedinci bölümde ise, epoksi reçineden imal edilmiş deney numuneleri üzerine yapılan kısmi boşalma temelli hızlandırılmış yaşlanma deneyleri anlatılmıştır. Deneylerin yapılışı, kısmi boşalma ölçmelerinin yapılışı, ölçümlerde kullanılan deney laboratuvarı ve ölçüm cihazları kısaca tanıtılmıştır.

# 2. KATI YALITKANLAR

Katı yalıtım malzemeleri, büyük ve küçük yapıdaki tüm elektrik ve elektronik donanımlarda yaygın bir şekilde kullanılırlar. İletken yapıların birbirinden yalıtılmasında ve işlevlerini kusursuz bir şekilde yerine getirmelerinde katı yalıtım malzemeleri hayati önem taşırlar. Katı yalıtkanlar, organik-inorganik, doğal-yapay, tekil veya kompozit yapıda bulunabilirler. Belirli ortam koşullarında yüksek elektriksel direnç ve yüksek mekanik dayanımlara sahiptirler. Her bir uygulama için kullanılan değişik türdeki yalıtım malzemeleri elektriksel, kimyasal ve fiziksel farklılıklar gösterirler

## 2.1 Elektriksel Özellikler

Katı yalıtkanların başlıca elektriksel özellikleri dielektrik sabitleri, elektriksel dirençleri ve elektriksel dayanımlarıdır. Dielektrik sabiti, elektriksel alan altında bulunan yalıtkan malzemenin içinde meydana gelen polarizasyon olayı tarafından belirlenebilir. Bir dielektrik malzemenin kutuplanabilirliliği malzemenin iç özelliğidir ve malzemenin moleküler yapısına bağlıdır [1].

Yalıtkan malzemenin elektriksel direnci malzemenin dielektrik kayıplarını belirler. Dielektrik dayanımı ise malzemeye, malzemenin şekline ve büyüklüğüne, ortam koşullarına, uygulanan zorlanmanın şekline ve uygulanma süresine ve diğer faktörlere bağlı olarak değişim gösterir.

### 2.1.1 Dielektrik Sabiti

Çoğu yalıtkan malzeme pozitif ve negatif iyonların kimyasal bileşiminden meydana gelmiştir. Böylelikle, elektriksel alan altında, her bir iyon zıt polariteli kutba doğru hareket etme eğiliminde olacaktır. Bu kutuplanma elektrotlarda bulunan sınır yüklerini de içermektedir. Elektriksel akı yoğunluğu ile, elektriksel alan arasında

$$D = \varepsilon.E + P \tag{2.1}$$

bağıntısı vardır. Bu ifadede P, polarizasyon sonucu yalıtkan yüzeyinde biriken yük yoğunluğunu göstermektedir. P, ayrıca dielektriğin birim hacmi başına düşen dipol momenti olarak adlandırılabilir.

### 2.1.2 Dielektrik Polarizasyon

Dielektrik malzemelerin büyük bir kısmı kutupsuzdurlar. Yani pozitif ve negatif iyon yüklerinin merkezleri çakışıktır. Elektriksel alan etkisinde, kutuplu bir dielektrik malzemenin dipolleri elektrik alan yönünde dizilecektir. Bu dizilmeye ek olarak elektriksel alan şiddeti, her bir pozitif ve negatif yük üzerine bir kuvvet uygular ve bunun sonucunda alan doğrultusunda küçük yer değiştirmeler meydana gelebilir. Yer değişim kutuplanması kutuplu ve kutupsuz tüm dielektrik malzemelerde görülür. Bununla birlikte, malzeme içerisindeki iletkenliği ve geçirgenliği farklı olan yabancı parçacıklar, alan etkisiyle elektriksel olarak yüklenecektir ve uygulanan alan yönünde ilerleme eğilimi göstereceklerdir. Dielektrik malzemenin birim hacminde $N_m$ molekülleri içerisinde $N_e$ atom ve her bir atomun $P_e$ ve $P_m$ dipol momentine sahip olduğu düşünülürse,

$$P = N_e.P_e + N_m.P_m = (N_e.\alpha_e + N_m.\alpha_m).E_t \qquad (2.2)$$

momentine sahip olacaktır. (2.2) eşitliğindeki $\alpha_e$ ve $\alpha_m$ değerleri $E_t$ alanı altında her bir atom ve molekülün kutuplanabilirliğini göstermektedir.

### 2.1.3 Elektriksel İletkenlik

Pratikte kullanılan yalıtım malzemeleri kabul edilebilir mertebelerde elektriksel dirençlere sahiptirler. Tahta ve mermer gibi malzemelerin hacimsel dirençleri $10^6$ ile $10^8 \Omega.m$ aralığında olmasına rağmen, polietilen gibi malzemelerde bu değer $10^{14}$ ile $10^{16} \Omega.m$ arasında değişim göstermektedir. İletken malzemelerde elektronlar yardımıyla sağlanan elektriksel iletim, yalıtkan malzemelerde iyonlar tarafından sağlanır.

Sıcaklığın artmasıyla birlikte, daha fazla iyon atomik kafes içerisinde hareket edecek ve elektriksel iletime katkıda bulunacaklardır. Bununla birlikte iyonların devingenliği sıcaklıkla üstel olarak artmaktadır. Bu yüzden, yalıtım malzemelerinin hacimsel dirençleri sıcaklık değerinin artmasıyla azalmaktadır.

### 2.1.4 Dieletrik Kayıpları

Normal çalışma koşullarında, yalıtım malzemelerinden çok küçük değerlerde kaçak akımlar akar. Dielektrik malzemenin kutuplanmasından kaynaklanan ilave bir enerji kaybı söz konusudur. Böylelikle alternatif gerilim altında bulunan pratikte kullanılan bir kondansatörün akımı ile gerilimi arasındaki faz farkı 90 dereceden küçük olacaktır. Bu açı farkına $\delta$ kayıp açısı adı verilir. Yalıtım malzemelerinin hacimsel dirençleri sıcaklık ve artan elektriksel zorlanma ile önemli ölçüde azalmaktadır [2].

Tablo 2.1 Bazı yalıtım malzemelerinin elektriksel özellikleri

| **Malzeme Türü** | **Dielektrik Sabiti** $\varepsilon_r$ | **Kayıp Faktörü** $\tan\delta$ **(25°C)** | **Hacimsel Öz Direnç** $\rho_v\,(\Omega.cm)$ $(25\,^{\circ}C)$ | **Delinme Dayanımı** $E_d$ **(kV / mm)** |
|---|---|---|---|---|
| Quartz camı | 3.8 | $5.10^{-4}$ | $10^{17}$ | |
| Seramik | 5-7 | 0.001-0.1 | $10^{12}$-$10^{14}$ | 20-80 |
| Porselen | 5 | 0.04 | $10^{12}$-$10^{15}$ | 20-30 |
| Zirkonium seramik | 7-12 | 0.003 | | 20-30 |
| Alumina seramik | 10 | 0.0005 | | 50 |
| Micanite | 5-11 | 0.003 | $10^{14}$-$10^{16}$ | |
| PVC | 6 | 0.1 | | |
| PE | 2.3 | 0.0001 | $10^{15}$-$10^{18}$ | 40 |
| Polyester | 2.6 | 0.0001 | $10^{16}$-$10^{18}$ | 30-40 |
| PTFE | 2 | 0.0002 | $10^{16}$-$10^{18}$ | 25 |
| Bakalit | 4.5 | 0.1 | $10^{13}$ | |

### 2.1.5 Elektriksel Dayanım

Elektriksel dayanım, düzgün elektriksel alan altında zorlanan bir dielektrik malzemenin yalıtkanlık özelliğini yitirdiği (delindiği) elektrik alan şiddeti olarak tanımlanır. Bu değer genellikle V/m cinsinden verilir. Genel olarak dielektrik malzemelerin dielektrik dayanımları, malzemenin cinsine, uygulanan gerilim türüne ve etki süresine, deneysel ve çevresel bir çok diğer parametreye bağlı olarak değişim gösterir. Verilen bir dielektrik malzemenin dielektrik dayanımını bir tek değer olarak

belirtmek zor olduğundan, uygulama amaçlarına göre bu değerler belirli aralıklarda verilir.

## 2.2 Isıl Özellikleri

Elektriksel yalıtım malzemelerinde ısı iletimi fotonlar yardımıyla gerçekleşir. Yalıtım malzemelerinin ısıl iletimi, kablolarda, kondansatörlerde ve bazı elektronik donanımlarda ısı transferini belirleyen önemli faktörlerden birisidir.

Makinelerde, transformatörlerde, kondansatörlerde ve kablolarda yaygın olarak kullanılan elektriksel yalıtım malzemeleri maksimum çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılırlar. Normal çalışma koşulları altında her bir malzemenin belirli bir süre dayanabileceği maksimum çalışma sıcaklığı vardır. Her bir ısıl sınıf için limit sıcaklık değerleri ve kod isimleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Katı yalıtım malzemelerinin ısıl sınıflandırılması

| **Sınıf İsmi** | **Y** | **A** | **E** | **B** | **F** | **H** | **200** | **220** | **250** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sürekli çalışma için izin verilen maksimum sıcaklık ($^{o}$C) | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | 200 | 220 | 250 |

Yalıtım malzemeleri genellikle kısa süreler için limit sıcaklık değerlerinden daha yüksek sıcaklıklara dayanabilirler. Çok yüksek çalışma sıcaklıklarında, yalıtım malzemeleri elektriksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde yitirirler. Elektriksel iletkenlikleri ve kayıpları artar, mekanik dayanımları ve esneklik sınırları önemli ölçüde azalır [1, 2].

## 3. KATI YALITKANLARDA DELİNME

Katı yalıtkan malzemeler, bütün elektrik devrelerinde ve malzemelerde farklı gerilim altında çalışan bir iletken kısmı diğer bir iletken kısımdan yalıtmak ve mekanik destek sağlamak için kullanılırlar. İyi bir yalıtım malzemesi düşük dielektrik kayba, yüksek mekanik dayanıma sahip olmalı, gaz boşlukları ve nemden tamamen arındırılmış, ısıl ve kimyasal bozulmalara karşı dayanıklı olmalıdır. Katı yalıtım malzemeleri sıvı ve gaz yalıtım malzemelerine göre daha yüksek delinme dayanımlarına sahiptirler.

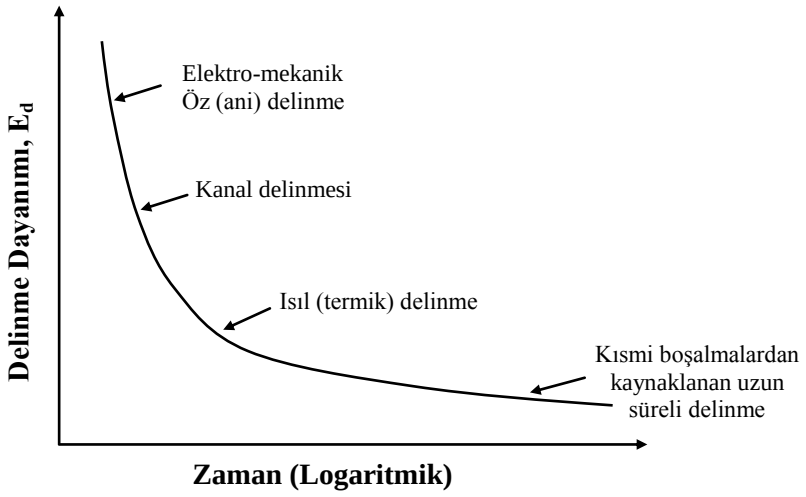
Katı yalıtkanların delinmesi üzerine yapılan çalışmalar delinme mekanizmasının anlaşılması bakımından önemli bir yere sahiptir [3]. Belirli deneysel koşullar altında katı yalıtkanlardaki delinme olayı, gazlardaki delinme mekanizmasından yola çıkılarak açıklanabilir. Deneysel olarak gözlenen delinme değerleri, ölçme koşullarına ve ölçme yöntemlerine göre değişim gösterecek ve gerçek delinme değerleri, bu özel koşullar altında gerçekleştirilen delinme işlemlerine bağlı olacaktır [2]. Katı yalıtkanlarda delinme meydana geldiğinde, yalıtkan bir daha kullanılamaz. Fakat, elektrik alanını oluşturan kaynağın kaldırılması durumunda gazlar tamamıyla ve sıvılar ise kısmen eski elektriksel dayanımlarına kavuşurlar.

Katı yalıtım malzemelerinin tamamen homojen ve kusursuz yapıya sahip olmaları durumunda delinme dayanımları 10 MV/cm mertebelerine erişebilir. Bu değer malzemenin öz (ani) delinme dayanımıdır ve sadece dikkatle kontrol edilebilen laboratuvar koşullarında elde edilebilir. Fakat, uygulamada elde edilen elektriksel dayanım değerleri bu değerin oldukça altındadır.

Katı yalıtkanlardaki delinme olayı birçok değişik mekanizmadan ileri gelebilir. Örneğin, elektriksel yalıtımın delinmesi, elektriksel zorlanmalardan ileri gelen mekanik zorlanmalardan kaynaklanabilir. Bu durum elektro-mekanik delinme olarak adlandırılır. Diğer taraftan, yalıtımın delinmesi yalıtkan malzemedeki dielektrik kayıplarının sonucu olarak ortaya çıkan ısıdan kaynaklanabilir. Bu durum ısıl delinme olarak adlandırılır. Delinme olayı, yalıtım malzemesinin yüzeyinde meydana

gelebilir. Bu durum basit bir yüzeysel boşalma olabileceği gibi yüzey üzerinde iletken bir yolun meydana gelmesi şeklinde de gerçekleşebilir. Eğer yalıtkan üzerinde iletken bir yol oluşursa, bu duruma "izlenme (tracking)" adı verilir. Yalıtım sisteminin delinmesine neden olan bir diğer etken de elektriksel kısmi boşalmalardır. Bu durum çoğunlukla kısmi boşalmaların malzemenin ömrü ile zorlanma seviyesi arasındaki karakteristiği belirlemesinden kaynaklanmaktadır [3].

Katı yalıtım sisteminin bozulma mekanizması, gerilimin uygulama süresi ile değişir. Şekil 3.1'de uygulanan gerilimin süresine bağlı olarak delinme mekanizmaları ve delinme dayanımları verilmiştir [4].




Şekil 3.1 Zorlanma süresiyle delinme dayanımının değişimi

### 3.1 Öz (Ani) Delinme

Yalıtım sistemine uygulanan gerilimin süresi çok kısa ($10^{-8}$s mertebesinde, darbe şeklinde) ise, malzemenin dielektrik dayanımı öz elektrik dayanımı adı verilen bir üst limite kadar hızla artacaktır [3]. Uygun deneysel koşullar sağlanırsa öz delinme dayanımı deneysel olarak elde edilebilir [4]. Öz delinme, dielektrik boyunca hareket edebilen serbest elektron sayısına bağlıdır. Genellikle, katı yalıtkanlar bazı yapısal kusurlar ve az miktarda yabancı parçacıklar ve az sayıda da iletim elektronları içerirler.

#### 3.1.1 Elektronik Delinme

Öz delinmenin $10^{-8}$s gibi çok kısa bir sürede gerçekleşmesi, bu delinmenin yapısal olarak elektronik olacağı düşünülmüştür. Yalıtkan içindeki elektronlar uygulanan

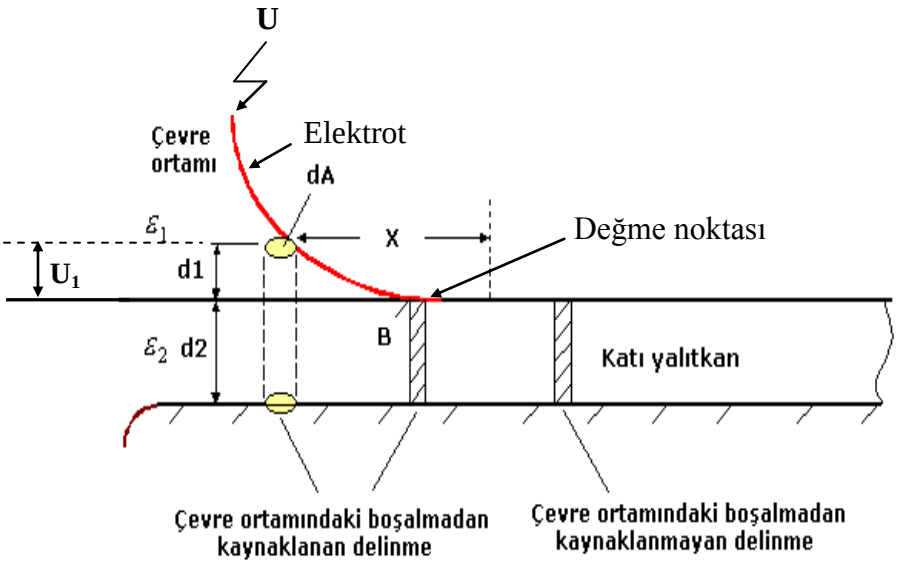
elektrik alandan yeterli miktarda enerji kazanırlarsa iletim bandına geçebilirler ve böyle bir olayın gerçekleşmesi durumunda malzemenin iç delinme dayanımına eriştiği kabul edilir [4].

### 3.1.2 Kanal Delinmesi

Katı yalıtkan içindeki iletim elektronları belirli bir elektrik alan ile birlikte yeterli enerji kazanırlar [3]. Katotta yalıtkanın iletim bandına giren bir elektron, alanın etkisi altında enerji kazanacak ve kazandığı enerjiyi çarpışmalarda kaybederek anoda doğru sürüklenecektir. Bazen elektron için serbest yol, iyonizasyon enerji engelini aşmak için yeterli uzunlukta olabilir ve çarpışmalar da yeni serbest elektronlar ortaya çıkar [4]. Bu durum elektron çığının oluşumuna kadar devam edecektir. Elektron çığı belirli kritik bir boyu aşarsa delinme meydana gelir [3].

Pratikte katı yalıtkan içine gömülmüş elektrotlu basit sistemlere rastlanabilir. Küre-düzlem elektrotlar arasında yerleştirilmiş katı yalıtkandan oluşmuş basit bir deney düzeninin kesiti şekil 3.2'de gösterilmiştir. Elektrotlar arasına bir U gerilimi uygulandığında, bu gerilimin $U_1$ kadarlık kısmı çevre ortamında görülür ve elektrodun değme noktasından bir *x* açıklığında yaklaşık olarak değeri şöyledir,

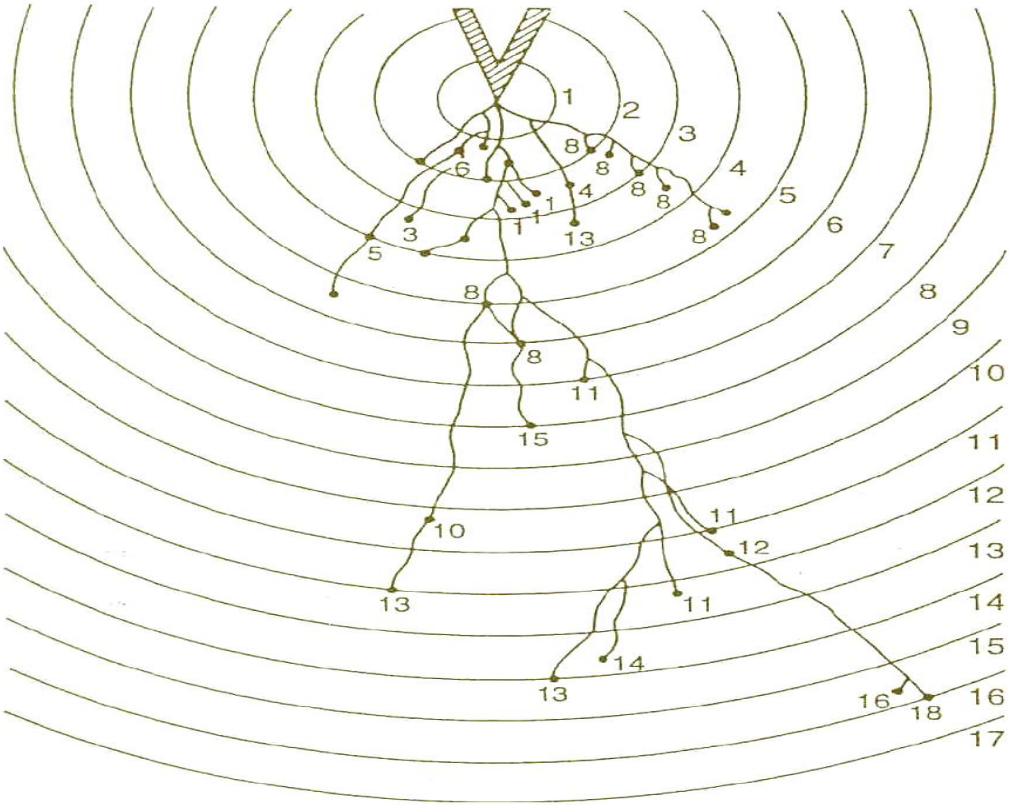
$$U_1 = \frac{U.d_1}{d_1 + (\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2})d_2} \tag{3.1}$$




Şekil 3.2 Katı yalıtkan numunenin çevre boşalması nedeniyle delinmesi

Çevre ortamının gaz olduğu düşünülecek olursa, bu ortam numuneden daha yüksek bir elektriksel zorlanmaya uğrayacaktır. Sonuç olarak katı yalıtkanın öz delinme dayanımına erişilmeden önce çevre ortamında delinme olayı meydana gelecektir. Dış ortamda meydana gelen delinme sonunda numune yüzeyinde yük birikimi olacak ve o bölgedeki elektrik alan dağılımı önemli ölçüde bozulacaktır. Yani, çevre ortamın delinmesinden ortaya çıkan yük değeri, başlangıçtaki düzgün alan koşullarını çubuk-düzlem elektrot sistemlerinde olduğu gibi düzgün olmayan bir şekle çevirecektir

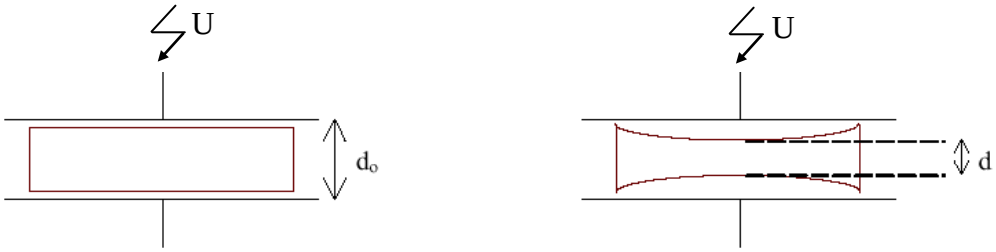
Delinme olayı genel olarak bir tek boşalma kanalının oluşumuyla gerçekleşmez [4]. Fakat, malzemenin tüm kalınlığı boyunca adım-adım genişleyen bir çok çığın oluşumu sonucu delinme olayı meydana gelir. laboratuarlarda uygun koşullar altında, sivri uç-düzlem elektrot sistemine darbe gerilimi uygulayarak bu durumun benzetimi yapılabilir [3]. Aşağıdaki şekilde görülen ağaç örneği Cooper tarafından aynı genlikli 1/30 μs'lik darbe gerilimleriyle elde edilmiştir. Her darbenin uygulanmasından sonra kanallar bir mikroskop ile incelenmiş ve şekli aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3 Çubuk-levha elektrotlar arasındaki perspeks içinde delinme kanalları [4]

### 3.2 Elektromekanik delinme

Katı yalıtkan malzemeler yüksek elektrik alanlara maruz bırakıldıklarında, elektrostatik basınç kuvvetlerinden kaynaklanan delinme olayları meydana gelebilir [3]. Basınç kuvvetleri, gerilim uygulandığı zaman ortaya çıkan yüzey yükleri arasındaki çekme kuvvetlerinden ileri gelmektedir [4]. Bu basınç kuvvetleri zaman içerisinde dielektrik malzemenin kalınlılığını azaltacak ve dielektriğin etkin zorlanmasını arttıracak yönde etkiyecektir. Bu duruma ait gerekli şekil şekil 3.4'te verilmiştir.




Şekil 3.4 Elektromekanik delinme süreci

Yalıtkanın başlangıçtaki kalınlığı $d_o$ ve U gerilimi altındaki sıkıştırılmış kalınlığı d ise etkiyen basınç aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_c = \frac{1}{2}.D.E = \frac{1}{2}.\varepsilon_o.\varepsilon_r.U^2/d^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_o.\varepsilon_r.E^2 \qquad (3.2)$$

Hooke yasasına göre (büyük zorlanmalar için) basınç kuvvetinin ifadesi,

$$P_c = Y.\ln(\frac{d_o}{d}) \qquad (3.3)$$

şeklindedir ve denge durumunda;

$$\varepsilon_o.\varepsilon_r.\frac{U^2}{2.d^2} = Y.\ln(\frac{d_o}{d}) \qquad (3.4)$$

eşitliği elde edilir ve bu durumda malzemenin mekanik basınç ile elektrik alanından kaynaklanan elektrostatik basınç dengededir [5]. Burada Y, Young modülüdür [3].

$$U^2 = d^2.(\frac{2.Y}{\varepsilon_o.\varepsilon_r}).\ln(\frac{d_o}{d}) \qquad (3.5)$$

Yukarıdaki eşitlik d'ye göre türetilirse $\ln(\frac{d_o}{d}) > \frac{1}{2}$ veya $d < 0.6d_o$ olduğunda mekanik kararsızlık meydana gelir [5]. Bu değer yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa,

$$E\,max = \frac{U}{d_o} = 0.6\left(\frac{Y}{\varepsilon_o.\varepsilon_r}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.6}$$

delinme olayından önceki en yüksek elektrik alan şiddeti elde edilir. Y değerinin malzemenin mekanik dayanımına bağlı olmasından dolayı yukarıdaki eşitlik sadece yaklaşık bir eşitliktir [3].

### 3.3 Isıl (Termik) Delinme

Genel olarak, bir yalıtkan malzemenin delinme gerilimi malzemenin kalınlığı arttıkça artar. Fakat bu durum, kaçak akımlardan kaynaklanan ısı oluşumundan dolayı belirli malzeme kalınlıklarına kadar doğrudur. Bir dielektrik malzemeye elektrik alan uygulandığında, çok küçük genlikli kaçak akımlar malzeme boyunca akar. Bu akım akışı yalıtkanın ısınmasına ve sıcaklığının artmasına sebep olacaktır. Dielektrik içerisinde üretilen ısı malzeme boyunca iletim yoluyla çevreye verilir ve radyasyon yoluyla dış yüzeylere transfer edilir. Dielektrik malzemenin sıcaklığının artmasına sebep olan ısı ile ve dışarı atılan ısının toplamının üretilen ısıya eşit olduğu durum ısıl denge durumudur. Doğru gerilim ve alternatif gerilim altında açığa çıkan ısılar,

$$Wd.c. = E^2.\sigma \quad W/cm^3 \tag{3.7}$$

$$Wa.c. = \frac{E^2.f.\varepsilon_r.\tan\delta}{1{,}8.10^{12}} \quad W/cm^3 \tag{3.8}$$

eşitlikleri yardımıyla hesaplanabilir.

Çevreye verilen ısı $W_T$ değeri ise,

$$W_T = c_V.\frac{dT}{dt} + \mathrm{div}\,(K.\mathrm{grad}T) \tag{3.9}$$

ifadesi yardımıyla hesaplanır. Bu eşitlikte,

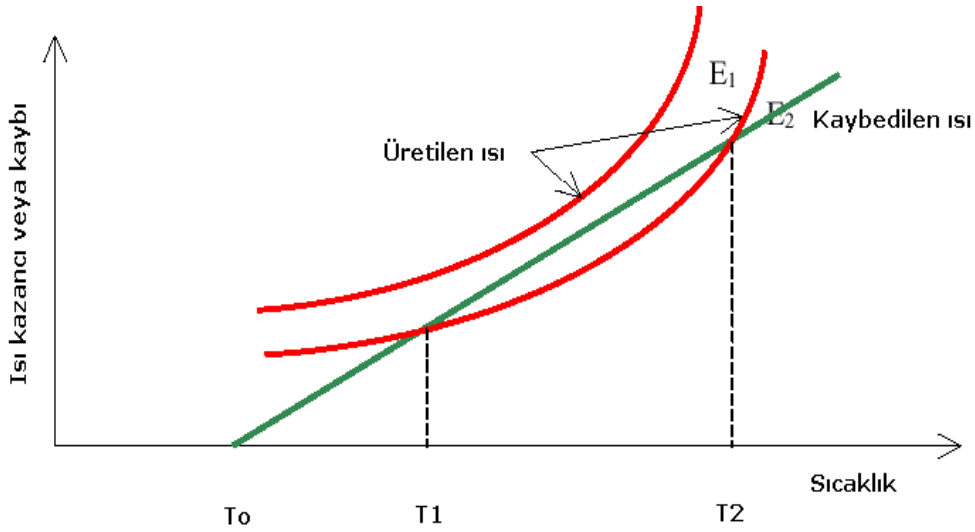
$c_v$ : Malzemenin özgül ısısı,

T : Malzemenin sıcaklığı,

K : Malzemenin ısıl iletkenliği,

t : Isının dağıtıldığı süre.

Üretilen ısının ( Wa .c. veya Wd .c. ) çevreye verilen ısıya eşit olduğu durum ısıl denge durumudur. Üretilen ısı, çevreye verilen ısıdan büyük ise malzemenin sıcaklığı sürekli artacağından ısıl delinme olayı meydana gelebilir. Isıl kararsızlık durumu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.




Şekil 3.5 Katı yalıtkanlardaki ısıl kararsızlık

Malzemenin ısı kaybı düz bir doğru ile, $E_1$ ve $E_2$ elektrik alanlarında üretilen ısılar ise ayrı ayrı eğriler ile gösterilmiştir. $E_1$ alanında hem $T_1$ hem de $T_2$ sıcaklıklarında delinme olayı meydana gelir. $E_2$ alanında ise sıcaklığın $T_1$'dan büyük ve $T_2$'den küçük olduğu durumlarda ısıl delinme meydana gelir. Yüksek gerilim güç aletlerindeki yalıtım problemlerinin büyük bir bölümü ısıl delinmeden kaynaklanmaktadır.

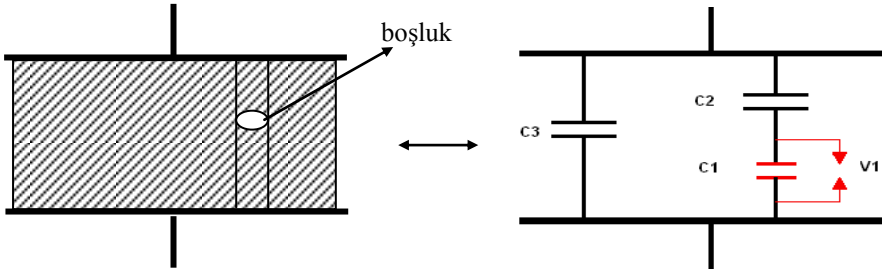
### 3.4 Uygulamada Katı Yalıtkanların Delinmesi

Katı yalıtkanlardaki bazı delinme olayları ısıl veya iç (öz) delinme gibi olaylardan kaynaklanmaz. Örneğin yüzeysel boşalmalardan dolayı yalıtkan malzemenin yüzeyinde iletken izlerin oluşumu yüzeysel delinmeye sebep olabilir. Bu gruptaki diğer bir delinme şekli ise, elektroliz ve ozon ($O_3$) oluşumu gibi kimyasal dönüşümlerden kaynaklanan elektro kimyasal delinmelerdir.

Delinmeye sebep olan diğer bir durum ise elektriksel kısmi boşalmalardan dolayı meydana gelen delinme olayıdır ve bu bölümde bu delinme olayı üzerinde durulacaktır. Dielektrik malzemenin kısmi boşalmalardan dolayı delinme süreci oldukça uzun sürebilir ve literatürde bu tür delinme olayı genellikle "uzun süreli delinme" olarak adlandırılır.

Katı yalıtım malzemeleri, içlerinde boşluklar, elektrotlar ile sınır yüzeyler arasında oyuklar veya çukurlar içerebilirler. Yalıtkan içerisinde bulunan boşluklar genellikle katı yalıtkan malzemeye göre daha düşük bir dielektrik sabitli malzeme ile doludur ve bu boşlukların dielektrik dayanımları yalıtkanın dielektrik dayanımından daha küçüktür. Bu sebepten, normal çalışma koşullarında bile boşluktaki alan şiddeti, boşluğun delinme dayanımını aşabilir ve bu ortamlarda delinme olayı meydana gelebilir.

İki elektrot arasına yerleştirilmiş bir yalıtkan malzeme olsun ve bu malzemeyi üç kısma ayıracak olursak elektriksel eşdeğer devresi aşağıdaki gibi olacaktır. $C_1$, boşluğun kapasitesini, $C_2$ boşluğa seri bağlı dielektrik malzemenin kapasitesini ve $C_3$ ise kusursuz dielektrik kısmın kapasitesini temsil edecektir.




Şekil 3.6 Boşluklu yalıtkan ve elektriksel eşdeğer devresi

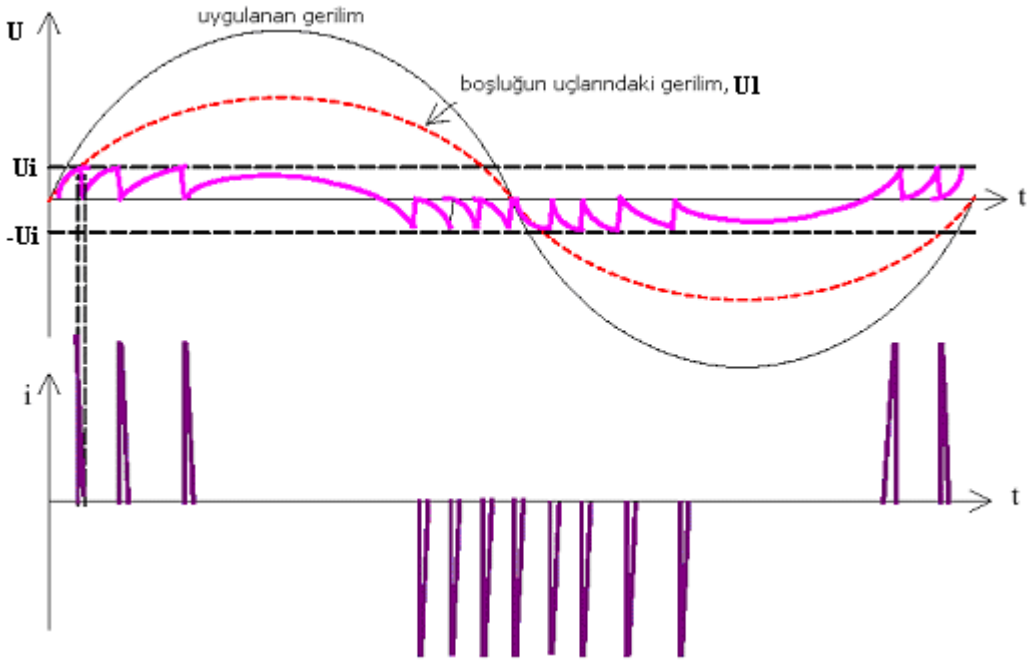
Yalıtım malzemesine V gerilimi uygulandığında, boşluk uçlarındaki gerilimin değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$U_1 = \frac{d_1}{d_1 + (\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_1}).d_2} U \tag{3.10}$$

olacaktır. Yukarıdaki eşitlikte $d_1$ ve $d_2$ sırasıyla boşluğun ve dielektrik malzemenin kalınlığını göstermektedir. Genellikle, $d_1 << d_2$ ve boşluğun ise gaz ile dolu olduğu varsayılırsa,

$$U_1 = \varepsilon_r . (\frac{d_1}{d_2}) . U \tag{3.11}$$

eşitliği yazılabilir. Dielektrik malzemeye U gerilimi uygulandığında, boşluk uçlarındaki $U_1$ gerilimi boşluğun delinme gerilimi olan $U_i$ değerine ulaştığında boşlukta boşalma olayı meydana gelecektir. $U_i$ gerilimine boşalma başlangıç gerilimi denir. Eğer yalıtkana uygulan gerilim alternatif gerilim ise , boşalma olayı gerilimin her iki kutbiyetinde meydana gelecek ve boşalmanın sayısı uygulanan gerilimin frekansına bağlı olacaktır. Boşlukta boşalma olduktan sonra boşluk uçlarındaki gerilim değeri sıfır değerine düşecek ve tekrar boşalma oluncaya kadar artacaktır. Bu işlem sürekli olarak tekrarlanacak ve boşalma sonucu meydana gelen akım darbeleri her iki yarı dalga da da görülecektir.




Şekil 3.7 Alternatif gerilim altında boşluğun bir dizi delinmesi

Bu iç boşalmalar "kısmi boşalma" olarak adlandırılır. Katı yalıtkanlardaki boşluklarda delinme (boşalma) meydana geldiğinde, elektronlar ve pozitif iyonlar meydana gelir. Bunlar yeterli enerjiye sahip olduklarında, boşluk yüzeylerindeki malzemenin kimyasal bağlarını kırabilirler. Bununla birlikte, her bir boşalma sonunda boşluğun içindeki ısı artacak ve bu ısı artışı boşluğun yüzeyini karbonlaştıracaktır. Bu durum zamanla malzemenin aşınmasına sebep olacaktır. Boşluğun kimyasal olarak bozulması, boşalma esnasında meydana gelen aktif

boşalma ürünlerinin ($O_3$, $NHO_3$, v.b.) sonucu olarak da meydana gelebilir. Kısmi boşalma (KB) sonucunda meydana gelen bu etkiler malzemenin yavaş yavaş aşınmasına ve sonunda yalıtkan malzemenin delinmesine sebep olabilirler. Kısmi boşalmalarla birlikte yalıtkanın ömrü uygulanan gerilime ve boşalma sayısına bağlı olarak değişim gösterecektir [3]. Yalıtkanın yaşlanma derecesi uygulanan zorlanma ile artar ve yapılan bir çok deney sonunda yalıtkanların ömrünün, $(U_i / U_a)^n$ ile orantılı olduğu bulunmuştur. Bu ifadede $U_a$ yalıtkana uygulanan gerilim, $U_i$ boşalma başlangıç gerilimi ve n yalıtkanın tipine ve çevre koşullarına bağlı olan 3 ile 10 arasında değişen bir katsayıdır [4, 6]. Yalıtkan malzemenin kısmi boşalmalardan kaynaklanan delinmesi birkaç gün içerisinde gerçekleşebileceği gibi birkaç yıl da sürebilir [3].

Genelde kısmi boşalmalardan kaynaklanan delinme olayı uzun süreli delinme olayıdır ve yalıtkan malzemenin "yaşlanması" olarak adlandırılabilir. Kısmi boşalmalardan kaynaklanan delinme olayları karma (kompozit) yapılarda da sık karşılaşılan bir durumdur. Kompozit malzemelerin üretimi sırasında yalıtkan içerisinde, tabakalar arasında veya yalıtkan ile iletken sınır yüzeylerde boşluklar ve oyuklar bulunabilir. Daha önce de açıklandığı gibi bu zayıf bölgelerde kısmi boşalmalar başlayacak ve yalıtkanın uzun süreli olarak yaşlanmasına, bozulmasına ve işlerliliğini yitirmesine sebep olacaktır. Kısmi boşalmalar sonucunda yalıtkan üzerinde biriken yükler de yalıtkan malzemenin yaşlanma ve delinme sürecini hızlandırıcı yönde etki edecektir.

# 4. KATI YALITKANLARDA YAŞLANMA

Sıvı ve gaz yalıtım sistemlerindeki elektriksel delinme tersinir özellikte olmasına rağmen, katılardaki durum ise tamamen tersinmezdir. Bu nedenle, yaşlanma üzerine yapılan çalışmaların büyük bir bölümü katı yalıtım sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Katı yalıtkanlar kondansatörlerde, transformatörlerde, kablolarda, iletim hatlarında, motorlarda ve diğer bir çok elektriksel alet ve donanımlarda yaygın olarak kullanılırlar [7].

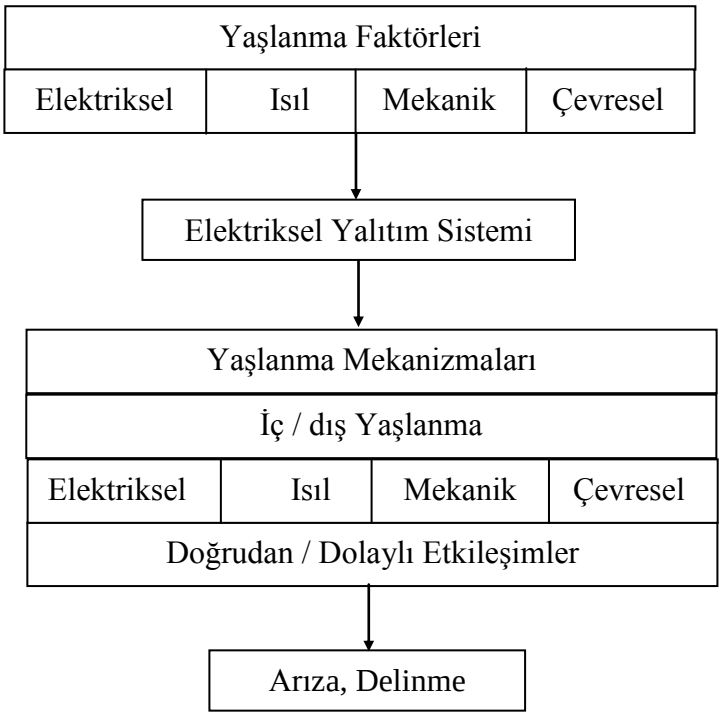
Yaşlanma, bir veya birden fazla etki faktörünün etkisi altındaki bir yalıtım sisteminin özelliklerindeki kalıcı değişimler olarak tanımlanabilir. Bir elektriksel yalıtım sisteminin (EYS) servis ömrü, sistemde kullanılan elektriksel yalıtım malzemelerinin ömrü tarafından belirlenir. Bu ömür elektriksel, ısıl, mekanik ve çevresel zorlanmalara bağlı olarak değişim gösterecektir.

Uygulamada, tahmin edilen ömür değeri, elektriksel yalıtım sistemlerinin tanımlanmasında kullanılan önemli parametrelerden biridir. Elektrik mühendisliğinin ilk yıllarında, ömür üzerine yapılan çalışmalar oldukça belirsizdi ve ısıl zorlanma durumu, yalıtım sistemlerinin ömrünü belirleyen en önemli yaşlanma faktörü olarak kabul ediliyordu.

EYS'nin tasarlanmasında ve geliştirilmesinde belirli ömür değerlerinin öngörülmesi oldukça önemlidir. Yeni üretilecek olan bir EYS için belirli bir ömrün öngörülmesi gereklidir. Bunlar, yeni bir EYS'nin üretimine başlanacağı zaman tip deneyleri, ürünün kalite garantisi ve bakım-onarım amaçları için kalan ömrün tahmini gerekli olabilir.

## 4.1 Yaşlanma Mekanizması

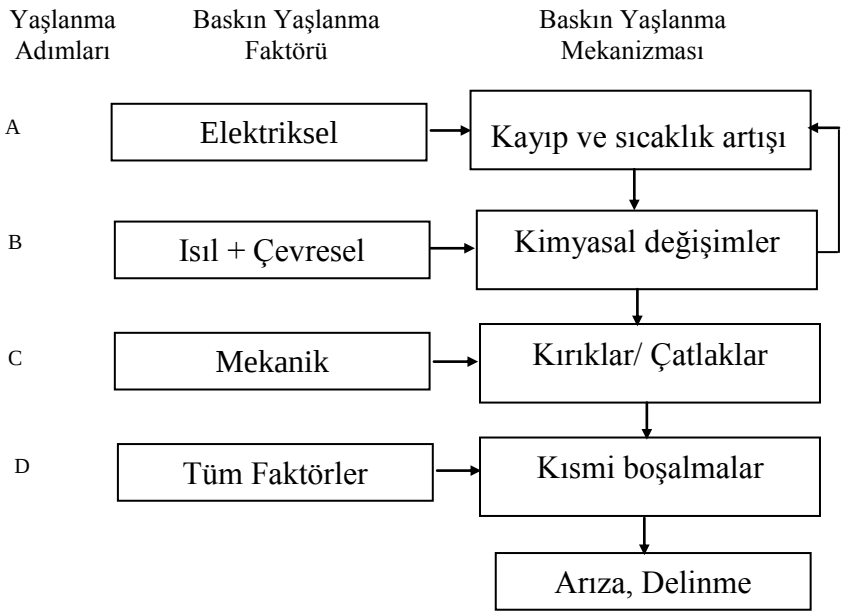
Daha önce de belirtildiği gibi, bir veya daha fazla etki faktörünün (elektriksel, mekanik v.s.) etkisi altındaki bir yalıtım sisteminin temel özelliklerinin tersinmez olarak değişmesi yalıtım sisteminin yaşlanması olarak adlandırılır. Yaşlanma zorlanmaları iç ve dış yaşlanmalara sebep olabilirler.




Şekil 4.1 Elektriksel yalıtım sisteminin yaşlanması

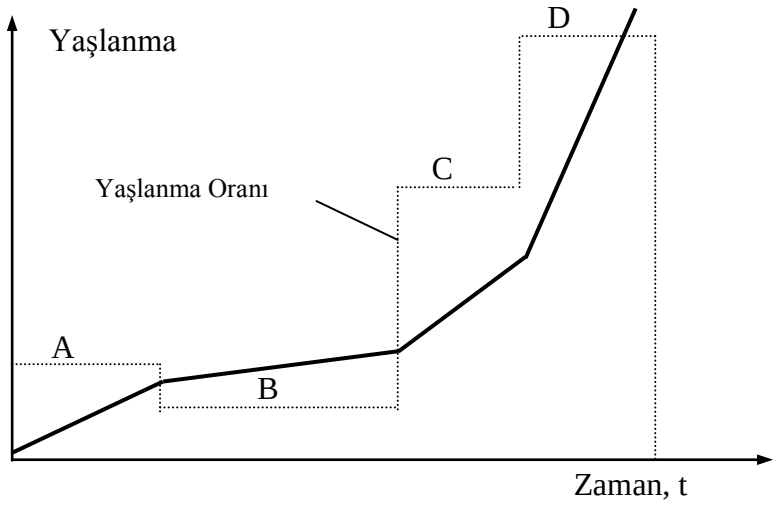
Pratikte kullanılan çoğu yalıtım sistemi çeşitli kusurlar içerdiklerinden ve kirli ortamlarda kullanıldıklarından dış yaşlanmaya maruz kalırlar [8]. Şekil 4.1'de de bir yalıtım sisteminin maruz kaldığı temel yaşlanma durumu gösterilmiştir. Yaşlanma faktörleri, sonunda yalıtımın delinmesine sebep olan elektriksel, ısıl, mekanik ve çevresel yaşlanma mekanizmalarını meydana getirirler. Yaşlanma esnasında, başlangıçta yalıtım sistemini etkilemeyen zorlanmalar zamanla yaşlanma faktörü olurlar ve yaşlanma derecesini belirlerler. Yalıtım sistemi için tipik bir yaşlanma süreci şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Elektriksel, ısıl, mekanik ve çevresel zorlanmaların etkisinde bir EYS gözönüne alalım. Başlangıçta, elektriksel yaşlanma dielektrik kayıpların artmasına ve yalıtkan içerisinde bir veya daha fazla kısımlarda yerel ısınmalar oluşmasına neden olacaktır.




Şekil 4.2 Yalıtım sistemindeki muhtemel yaşlanma mekanizmaları

Bu yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde, çevresel ve ısıl yaşlanmalar yaşlanma faktörleri olacaklar ve yalıtım sistemi içerisindeki kimyasal değişimleri hızlandıracaklardır. Kimyasal değişimler, yaşlanmanın artmasına veya azalmasına neden olabilirler. Etki altındaki yalıtım malzemesinin mekanik özellikleri




Şekil 4.3 Yaşlanmanın zamanın fonksiyonu olarak gösterilmesi

uygulanan mekanik zorlanmalar sonucu kritik seviyelere erişebilir ve kırıklar ve çatlaklar baş gösterebilir. Sonunda, bu kırıklar kritik büyüklüğe ulaştığında kısmi boşalmalar meydana gelir ve yalıtımın tam olarak bozulması şeklinde sonuçlanan delinme mekanizması meydana gelir [9].

## 4 2. Etki Faktörlerine Göre Yaşlanmalar

Yalıtkanın yaşlanmasında bir tek etki faktörü baskın ise böylesi yaşlanmalar tek faktöre bağlı yaşlanma; eğer birden fazla yaşlanma faktörü yalıtım isteminin ömrünü etkiliyor ise buna da çok faktöre bağlı yaşlanma adı verilir. Bir yalıtım sisteminin yaşlanması olayı oldukça karmaşık bir olaydır ve arıza olayı sadece bir tek baskın yaşlanma faktörünün olması durumunda bile yaşlanma mekanizmalarının kombinasyonu şeklinde etkimektedir.

### 4.2.1 Tek Faktöre Bağlı Yaşlanma

Tek faktöre bağlı yaşlanma modelleri genel olarak aşağıdaki gibi gösterilir.

$$L = f(x) \tag{4.1}$$

Burada L, yalıtkanın ömrünü ve x ise zorlanmanın türünü göstermektedir. Bu eşitliğin anlamı, yalıtkan ömrünün tamamıyla bir tek *x* faktörü zorlanmasına bağlı olduğudur. Pratikteki bir çok yalıtım sistemi için, yalıtım sisteminin ömrünü etkileyen bir tek baskın etki faktörü vardır ve diğer etki faktörlerinin etkileri sabit kabul edilebilir. Tek faktöre bağlı yaşlanma modelleri, çok faktöre bağlı yaşlanma modellerinin basit bir hali olarak da düşünülebilir [10].

#### 4.2.1.1 Elektriksel Yaşlanma

Pratikte kullanılan çoğu EYS'de, arıza ile sonuçlanan elektriksel yaşlanma mekanizması oldukça karmaşıktır. Elektriksel yaşlanma olayı aşağıdaki olayları içermektedir.

1. Kısmi boşalma etkileri,
2. Yalıtkan yüzeyinde oluşan izlerin etkileri ,
3. Ağaçlanma etkileri,
4. Sıcaklık artışının etkileri,
5. Uzay yüklerinin etkileri.

Elektriksel yalıtım sistemlerinin çoğunda arıza ile sonuçlanan elektriksel yaşlanma durumu oldukça karmaşık bir mekanizma ile gerçekleşmektedir. Henüz daha elektriksel yaşlanma faktörlerinin bir EYS'nin ömrünü nasıl etkilediğini tanımlayan kesin matematiksel modeller tam olarak geliştirilememiştir. Bununla birlikte, elektriksel zorlanma ile ömür arasındaki ilişkiyi gösteren tek faktöre bağlı bir çok

yaşlanma modeli önerilmiştir [10]. Bu modellerden en yaygın olarak kullanılanı Eksi Üs Modeli'dir. Bu modelin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$L = k.U^{-n} \tag{4.2}$$

Burada, U uygulanan gerilim, L yalıtkanın U zorlanması altındaki ömrü, k ve n ise hesaplanacak olan model parametreleridir.Bu modele alternatif olarak üstel model de önerilmiştir.

$$L = C.\exp(-D.U) \tag{4.3}$$

Yukarıdaki ifade de C ve D deney verlerinden hesaplanacak olan model parametreleridir. Üstel modelin, eşik değerlerini de içeren değişik varyasyonları da araştırmacılar tarafından önerilen modeller arasında yer almaktadır.

$$L = F.\exp(-G(U - U_e)) \tag{4.4}$$

Bu modelde $U_e$ gerilimi eşik gerilim değeridir ve bu değerin altında elektriksel yaşlanmanın meydana gelmediği varsayılır.

Hızlandırılmış yaşlanma için kabul edilen elektriksel zorlanma seviyeleri deneye tabi tutulan elektriksel yalıtım sisteminin ömrünün minimum %5'i kadar deney süresi olacak şekilde düzenlenmelidir. Örneğin yalıtım sisteminin öngörülen ömrü 10 yıl ise minimum deney süresi 6 ay olmalıdır [11].

#### 4.2.1.2 Isıl Yaşlanma

Elektriksel yalıtım sistemlerinin ısıl yaşlanmasına sebep olan olaylar;

1. Kimyasal reaksiyonlar ve difüzyonların sonucu olarak meydana gelen kimyasal ve fiziksel değişimler,
2. Isıl genleşme sonucu ortaya çıkan kuvvetlerden kaynaklanan termomekanik etkilerdir.

Isıl yaşlanma, yalıtım sistemlerindeki fiziksel ve kimyasal süreçlerin oranlarındaki artışların ana sebebi olarak düşünülebilir. Isıl zorlanma ile ömür arasındaki ilişkiyi gösteren yaşlanma modelleri literatürde bulunmaktadır ve bunlardan en yaygın kullanılanı Dakin tarafından önerilen ısıl modeldir [14]. Bu modelin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$L = A.\exp(-E/kT) \tag{4.5}$$

Yukarıdaki ifadede A model sabitini, E aktivasyon enerjisini, *k* Boltzman sabitini, T $^{o}$K olarak sıcaklığı ve L ise bu koşullardaki yalıtkan ömrünü göstermektedir.

Belirli bir sıcaklıktaki ömür değişik istatistiksel yöntemler yardımıyla belirlenebilir. Ömür değerlendirmesi yapılacak olan EYS için sıcaklık değerleri yalıtım malzemesinin ısıl sınıfı göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Hızlandırılmış yaşlanma durumunu oluşturmak için minimum üç sıcaklık değeri seçilmelidir. Minimum sıcaklık seviyesi, elektriksel yaşlanmada olduğu gibi deney süresinin numunenin tasarlanan ömrünün %5'i kadar olacak şekilde seçilmelidir. Diğer iki yüksek sıcaklık seviyesi 20$^{o}$K'lik aralıklarla seçilebilir. Eğer üç farklı sıcaklık seviyesinden daha fazla sıcaklık seviyesine ihtiyaç duyulursa, 10$^{o}$K'lik aralıklar seçilebilir [9, 12].

#### 4.2.1.3 Mekanik Yaşlanma

Mekanik yaşlanmaya sebep olan durumlar ,

1. Çok sayıda düşük zorlanma çevriminden kaynaklanan yalıtım sistemindeki bileşenlerin yorulması,
2. Termomekanik etkiler,
3. Yalıtım sisteminin donanımları arasındaki bağıl hareketten kaynaklanan aşınma şeklinde sıralanabilir.

Mekanik zorlanma ile ömür arasındaki ilişki Eksi Üs Modeli (Inverse Power Model) ile benzerlik göstermektedir.

$$L = H.S^{-j} \tag{4.6}$$

Burada *S* yer değiştirme miktarı, L arızaya kadar geçen mekanik çevrimlerin sayısını, H ve j ise deney verilerinden hesaplanacak olan model sabitlerini göstermektedir.

Mekanik zorlanma ile ömür arasındaki ilişki logaritmik kağıda çizilecek olursa lineer bir değişim ortaya çıkacaktır. Mekanik yaşlanma deneyleri minimum üç mekanik zorlanma seviyesinde yapılmalıdır ve maksimum zorlanma seviyesi, normal çalışma koşullarında karşılaşılan en yüksek zorlanma seviyesi olmalıdır [9, 13].

#### 4.2.1.4 Çevresel Yaşlanma

Çevresel yaşlanma durumu, ısıl yaşlanma altında gerçekleşen kimyasal reaksiyon süreçlerini içermektedir. Çevresel faktörler nem, sıcaklık, basınç, kir, toz, kimyasal dumanlar gibi bir çok faktörü içermektedir. Bu faktörlerin tamamı elektriksel yaşlanmada oldukça önemlidir [11].

### 4.2.2 Çok Faktöre Bağlı Yaşlanma

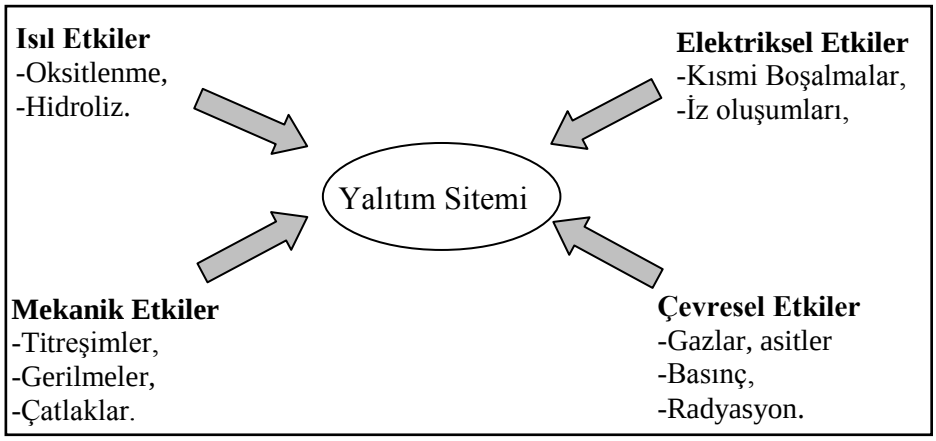
Yalıtım sisteminin ömrünü etkileyen birden fazla yaşlanma faktörü var ise böylesi durumlar çok faktöre bağlı yaşlanma olarak tanımlanır. Çok faktöre bağlı yaşlanma durumlarını temsil edebilmek için değişik matematiksel modeller önerilmiştir. Bu yaşlanma modellerinin matematiksel formu aşağıdaki gibi verilebilir.

$$L = f(x_1, x_2, ..., x_m) \tag{4.7}$$

Burada $x_i$'ler yalıtım sisteminin ömrünü etkileyen zorlanmaları, m ise yalıtkanın ömrüne etki eden toplam zorlanma sayısını göstermektedir. Örneğin, $x_1$ değeri 60 Hz frekanslı alternatif gerilim, $x_2$ darbe gerilimi ve $x_3$ ise sıcaklık olabilir. Önerilen çok faktöre bağlı yaşlanma modellerinin çoğunda elektriksel ve ısıl zorlanmalar yaşlandırıcı etken olarak yer almaktadır. Simoni'nin çok faktöre bağlı yaşlanma modeli Eksi Üs Model ile 'Dakin'in Isıl Modeli'nin doğrudan birleşimi gibi düşünülebilir [10].

$$L = K.\exp(-P.T).U^{-m} \tag{4.8}$$

Yukarıdaki ifadede K, P ve m değerleri deney verileri yardımıyla hesaplanacak model sabitlerini göstermektedir.

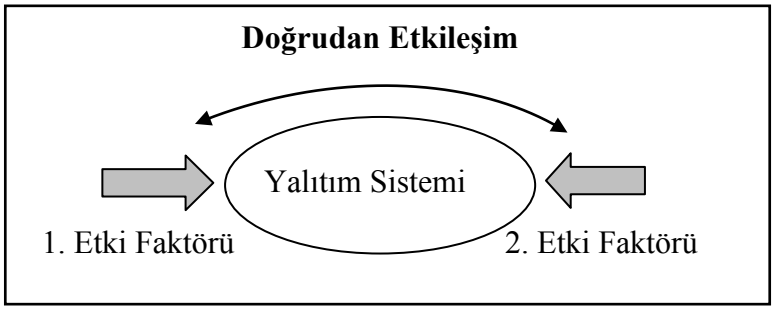



Şekil 4.4 Yalıtım sistemine etkiyen yaşlanma faktörleri

Eğer bir yalıtım sistemi hem yüksek sıcaklık hem de elektriksel zorlanmaların etkisindeyse, sistemin arızalanması bu iki zorlanmanın ayrı ayrı uygulanması durumundakinden daha kısa sürede olabilir. Sonuç olarak, yaşlanma durumunu ısıl yaşlanma ile elektriksel yaşlanmanın cebirsel toplamı olarak düşünmek doğru olmaz. Çok faktöre bağlı yaşlanma durumlarının çoğunda, tam olarak bilinemeyen yeni yaşlanma mekanizmaları meydana gelir.

Birden fazla yaşlanma faktörünün etkisindeki yalıtım sisteminde, etki faktörleri (elektriksel, ısıl v.s.) arasında doğrudan veya dolaylı etkileşimler meydana gelecektir. [10]. Etkileşim dediğimiz kavram; iki veya daha fazla etki faktörünün birleşimi tarafından meydana getirilen yaşlanma derecesi ve tipindeki değişikliktir.

Doğrudan etkileşim, eş zamanlı olarak oluşan etki faktörleri arasındaki etkileşimdir. Bu etki faktörleri yalıtım sisteminde ayrı ayrı etkin oldukları zaman daha farklı yaşlanma mekanizmaları meydana gelebilir. Doğrudan etkileşime sebep olan zorlanma faktörlerinin yaşlanma faktörleri olmaları gerekmez. Aşağıdaki şekilde doğrudan etkileşim durumu gösterilmiştir.

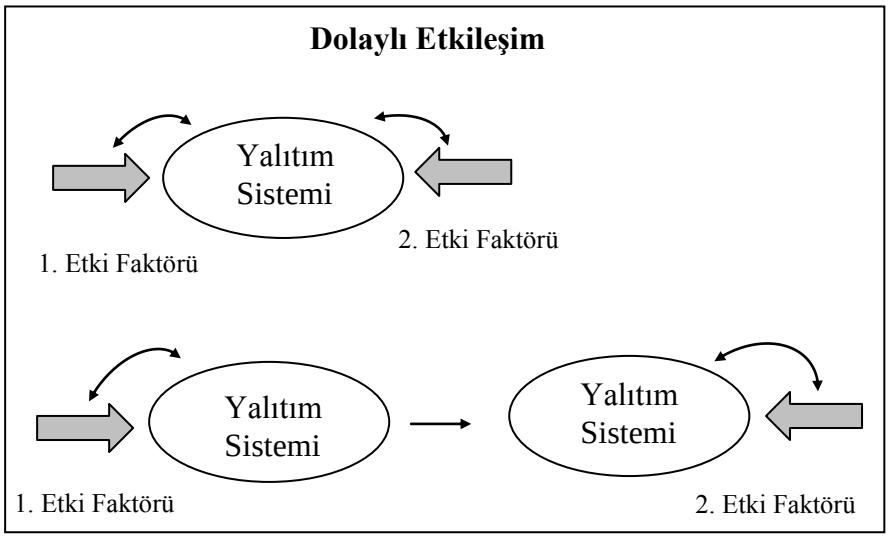



Şekil 4.5 Yaşlanma faktörleri arasındaki doğrudan etkileşim

Dolaylı etkileşim durumunda yalıtım sistemine eş zamanlı olarak birden fazla etki faktörü uygulanır ve bu durumdaki yaşlanma mekanizmaları belirlenir. Daha sonra bu etki faktörleri aynı yalıtım sistemine ayrı ayrı uygulandığında da aynı yaşlanma mekanizmaları meydana geliyor ise yaşlanma faktörleri arasında dolaylı etkileşim söz konusudur. Dolaylı etkileşim sadece tüm etki faktörlerinin yaşlanma faktörleri olması durumunda meydana gelmektedir.

Mekanik ve elektriksel zorlanmalar arasında dolaylı veya doğrudan etkileşimler meydana gelebilir. Mekanik zorlanma sonucunda meydana gelen boşluklarda ve çatlaklarda kısmi boşalmalar baş gösterebilir. Eğer boşluklar sadece mekanik

zorlanmanın bulunduğu durumda meydana geliyorsa, yaşlanma durumu elektriksel ile mekanik zorlanma arasındaki doğrudan etkileşimden ileri gelmektedir




Şekil 4.6 Yaşlanma faktörleri arasındaki dolaylı etkileşim

Mekanik ve elektriksel zorlanmalar arasında dolaylı veya doğrudan etkileşimler meydana gelebilir. Mekanik zorlanma sonucunda meydana gelen boşluklarda ve çatlaklarda kısmi boşalmalar baş gösterebilir. Eğer boşluklar sadece mekanik zorlanmanın bulunduğu durumda meydana geliyorsa, yaşlanma durumu elektriksel ile mekanik zorlanma arasındaki doğrudan etkileşimden ileri gelmektedir. Bununla birlikte, dolaylı etkileşim durumunda, yalıtım sistemi önce boşluk oluşumuna sebep olan mekanik zorlanmaya maruz bırakılır, daha sonra elektriksel zorlanma uygulanır veya iki yaşlanma faktörü aynı anda uygulanabilir [14].

### 4.3 Yaşlanmanın Hızlandırılması

Ürün güvenilirliği, ürünün kalitesi ve rekabeti için çok önemlidir. Birçok üretici firma, ürün güvenilirliği üzerine her yıl milyonlarca dolar para harcamaktadır. Yönetici ve mühendislerin çoğu güvenilirliğin değerlendirilmesi, yeni tasarımlar ve üretim değişiklikleri, meydana gelen arızaların sebeplerinin araştırılması gibi konular üzerinde çalışmalar yaparlar. Yapılan bu çalışmalardan en önemlisini birkaç ürün veya numuneden elde edilen ömür verisi üzerine dayanır. Bir çok ürün bu amaçla, arızaların daha kısa sürede meydana gelmesi için yüksek zorlanmalar altında deneylere tabi tutulurlar. Böylesi deneylerden elde edilen verilerin analiz edilmesi, numunenin normal çalışma koşullarındaki ömrünü belirlemek için kullanılır. Yapılan

hızlandırılmış deneyler sonucunda önemli ölçüde para ve zaman tasarrufu sağlanmış olur [15].

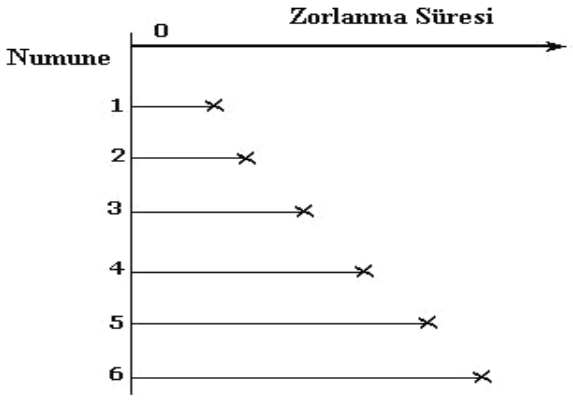
Doğrudan ömür analizleri, bir ürünün, sistemin veya cihazın normal çalışma koşulları altında elde edilen arızaya kadar geçen süre ile yapılır. Bir çok durumda, bir çok sebepten dolayı bu verilerin elde edilmesi zordur. Bu zorluğun nedeni, ürünlerin kullanım sürelerinin çok uzun olması ve ürünün tasarımı ve piyasaya çıkma süresinin çok kısa olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumlar dikkate alındığında, numunelerin ömür deneylerinin kısa sürede gerçekleştirilmesi için hızlandırılmış deneylere gereksinim duyulur [16].

Hızlandırılmış deneyler, numune ömürlerini kısaltmak veya performanslarındaki azalmayı hızlandırmak için yapılan bir çok deney yönteminden oluşur. Bu tür deneylerin esas amacı, daha çabuk sonuç elde etmek ve bu sonuçlardan ürünlerin normal kullanım koşullarındaki performansları ve ömürleri ile ilgili gerekli bilgileri sağlamaktır [15].

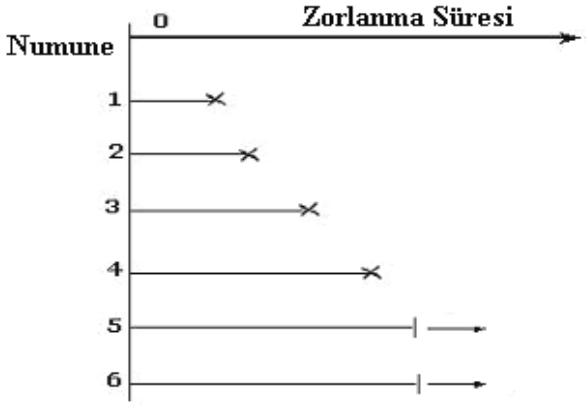
Hızlandırılmış deneyler metal, plastik, yalıtkan, seramik, kauçuk, besin ve ilaç, yapışkan, yağ, koruyucu astar ve boyalar, beton ve çimento, nükleer reaktör malzemeleri gibi birçok malzemeye uygulanabilir.

### 4.3.1 Hızlandırılmış Yaşlanmada Kullanılan Veri Türleri

Hızlandırılmış yaşlanma deneyleri sonucunda tamamlanmış (no censored) veya tamamlanmamış (censored) veriler elde edilir. Deneye tabi tutulan numunelerin tümü belirli bir süre sonunda arızalanıyor ise bu tür veriler tamamlanmış veri, belirli süre sonunda deney numunelerinin bir kısmı arızalanıp bir kısmı normal çalışmasını sürdürüyor ise bu tür deney verileri ise tamamlanmamış veri olarak adlandırılır. Aaşağıdaki şekillerde tamamlanmış ve tamamlanmamış verilere ait gerekli şekiller verilmiştir.




Şekil 4.7 Tamamlanmış deney verisi örneği




Şekil 4.8 Tamamlanmamış deney verisi örneği

### 4.3.2 Hızlandırmanın Uygulanma Çeşitleri

Numunelerin ömür sürelerini kısaltmak için kullanılan en basit yöntem, numunelere normal kullanım koşullarının üzerindeki zorlanmalar uygulanır. Böylelikle deney süresi önemli ölçüde azalacaktır. Böylesi deneylerin asıl amacı, ürünlerin normal kullanım koşullarındaki ömürlerinin dağılımını elde etmektir. En yaygın kullanılan zorlanma çeşitleri, sıcaklık, gerilim, mekanik yük, ısıl zorlanma, nem ve titreşimdir.

Hızlandırma işlemi değişik şekillerde uygulanabilir. Sabit zorlanma, adım adım artan zorlanma, lineer olarak artan zorlanma ve rasgele zorlanma durumları hızlandırılmış deneylerde kullanılırlar. Bunlar içerisinde en yaygın kullanılan zorlanma şekli sabit zorlanmadır [16]. Deney numunelerin normal çalışma koşullarında maruz kaldıkları zorlanma zamandan bağımsız ise, her bir deney numunesi sabit bir zorlanma değerine maruz bırakılır.

# 5. KISMİ BOŞALMALARIN ELEKTRİKSEL YAŞLANMA ÜZERİNE ETKİLERİ

İki elektrot arasındaki yalıtkan malzemenin yalnızca bir bölümünde meydana gelen ve elektrotları tamamen köprülemeyen yerel elektriksel boşalmalara kısmi boşalmalar denir. Kısmi boşalmaların genlikleri küçük olmasına rağmen, yalıtkan malzemelerin sürekli olarak aşınmasına ve sonunda delinmesine neden olurlar [17-19]. Kısmi boşalmalar genel olarak yalıtkan malzeme içerisindeki yerel elektriksel zorlanmaların veya yalıtkan yüzeyindeki elektriksel zorlanmaların sonucu olarak meydana gelirler.

Kısmi boşalma ölçümleri, tahribatsız yüksek gerilim deneylerinden birisidir. Bu ölçüm, yalıtkan malzemenin işletmede kullanılmaya başlamasından itibaren, yaşlanma ile işletme performansındaki azalmalar da dikkate alınarak, yalıtım sisteminin performansını belirlemede kullanılabilir. Yalıtım malzemesine bağlı olarak, belirli bir gerilimde izin verilen kısmi boşalma değerleri ilgili standartlarda verilmektedir [20].

Kısmi boşalmaların ölçülmesi belirli amaçlar için yapılır. Bu amaçlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Deney numunesinde, belirli bir gerilimde, belirli bir değerin üzerinde kısmi boşalmaların olup-olmadığının saptanması,
2. Gerilimin arttırılması ile kısmi boşalmaların başladığı ve gerilimin azaltılması ile kesildiği gerilim değerlerini belirlenmesi
3. Belirlenen bir gerilimde kısmi boşalma genliğinin belirlenmesi olarak sıralanabilir [21].

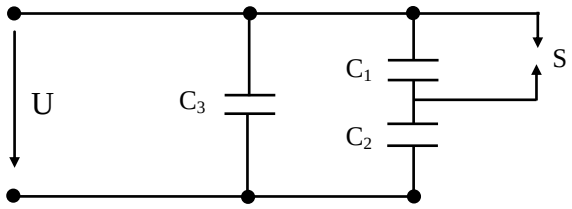
Kısmi boşalmalar, katı yalıtım sistemlerinde bulunan boşluklarda, yalıtkan sıvılardaki hava kabarcıklarında veya dielektrik yüzeyler boyunca meydana gelebilirler. Her bir boşlukta meydana gelen kısmi boşalamalar dielektrik malzemede ve dış devrede bir akım darbesinin meydana gelmesine neden olur. Bu darbeler az

miktarda enerji içermelerine rağmen yalıtkan malzemenin dielektrik özelliğinde giderek artan bir yıpranmaya neden olurlar [20].

### 5.1 Kısmi Boşalmaların Oluşumu

Elektriksel kısmi boşalmalar, dielektrik malzemedeki elektriksel zorlanmaların yalıtkan malzemenin dayanım sınırını aştığı bölgelerde oluşur. Malzemelerdeki bu dayanım sınırları; malzemenin cinsine, sıcaklığa, basınca, zorlanma süresine ve bir çok diğer parametreye bağlıdır. Herhangi bir durumda, uygulanan gerilimde kısmi boşalmaların başlaması, yerel olarak malzemenin elektriksel dayanım sınırına ulaştığını göstermektedir.

Kısmi boşalmaların algılanması ve ölçülmesi, malzeme içerisinde küçük boşlukların bulunduğu ve kısmi boşalmaların bu boşluklarda meydana geldiği varsayımı üzerinde dayanmaktadır. Kısmi boşalma sonucunda ölçülebilen darbe şekilli bir akım darbesi neticesinde tüm devrede bir yük transferi meydana gelir. Kısmi boşalma akım darbeleri ile şebeke frekanslı uygulanan gerilim arasındaki ilişki kısmi boşalma ölçümlerinde oldukça önemlidir.




Şekil 5.1 Kısmi boşalma için eşdeğer devre

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U \tag{5.1}$$

U : Uygulanan şebeke frekanslı gerilim,

$C_1$ : Yalıtkan malzeme içindeki boşluğun kapasitesi,

$C_2$ : Boşluk etrafındaki yalıtkanın kapasitesi,

$C_3$ : Kusursuz yalıtkanın kapasitesi.

$U_1$ : $C_1$ üzerindeki gerilim değeri

S uçlarındaki atlama olayı kısmi boşalmayı temsil eder ve bu durum boşluk uçlarındaki gerilimin boşalma başlama gerilimine eşit olduğu zaman meydana gelir. Boşalma sonrası $C_1$ boşluk kapasitesinin yükünün boşalmasından dolayı, $C_2$

kapasitesinin uçlarına U gerilimi gelir ve bu durum $C_2$'nin üzerindeki yük miktarında değişime sebep olur.

$$Q_2=U_2.C_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U.C_2 = \frac{C_1.C_2}{C_1 + C_2} U \tag{5.2}$$

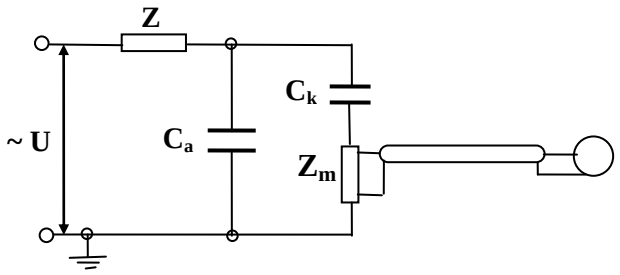
$C_1$ kapasitesinin boşalmasından sonra $C_2$ uçlarındaki yük değeri

$$Q^*_2 =U_2.C_2=U.C_2 \tag{5.3}$$

olur. Değişik zaman sabitlerinden dolayı bu yük değeri $C_3$ kapasitesi tarafından çok kısa bir akım darbesi şeklinde görülür. Bu akım darbeleri $C_2$ ve $C_3$ kapasitelerinin geriliminde bir azalmaya sebep olacak ve bunun sonunda güç kaynağı karşı etki gösterecek ve bütün kapasitelerin dolmasıyla gerilim değeri tekrar U değerine ulaşacaktır. Aynı zamanda S atlama aralığındaki boşalma sona erecek ve $C_1$ kapasitesi tekrar boşalma oluncaya kadar dolacaktır. Yük miktarındaki değişim aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta Q = Q^*_2 - Q_2 = C_2.U - \frac{C_1.C_2}{C_1 + C_2} U = \frac{C^2_2}{C_1 + C_2}.U \tag{5.4}$$

$C_1$ ve $C_2$ kapasitelerinin değerleri bilinmediğinden, sadece kuplaj aletinden veya bir empedans üzerinden geçen kısa süreli akım darbeleri ölçülebilir. Aşağıdaki şekilde de gösterildiği gibi $C_3$ kapasitesinin yerini $C_k$ ile gösterilen kuplaj kapasitesi alır ve $C_a$ kapasitesi ise deney cisminin tüm kapasitesini temsil eder. $C_1$ kapasitesinin boşalması, $C_a$ ile gösterilen deney devresi, $C_k$ ile gösterilen kuplaj kondansatörü ve ölçü empedansı üzerinden darbe akımının akmasına sebep olacaktır [20].




Şekil 5.2 Temel kısmi boşalma ölçüm devresi

U : Yüksek gerilim kaynağı

$Z_m$ : Ölçü empedansı,

$C_k$ : Kuplaj kapasitesi,

Z : Yüksek gerilim filtresi.

$C_a$ : Deney cismi kapasitesi

## 5.2 Kısmi Boşalmalarla İlgili Büyüklükler

### 5.2.1 Görünen Yük, q

Bir kısmi boşalmanın görünen yükü q, deney parçasının uçlarına birdenbire uygulandığında, bunun uçları arasında kısmi boşalma miktarı kadar, ani bir gerilim genliği değişmesi oluşturabilecek miktardaki yüktür. Görünen yük q nün genliği |q| genellikle kısmi boşalma genliği olarak adlandırılır. Görünen yük coulomb olarak ifade edilir. Bu biçimde tanımlanmış olan görünen yük q, dielektrik malzemedeki, boşalmanın oluştuğu boşluğun içinden geçen (transfer edilen) gerçek yük miktarına eşit değildir. Bunun kullanımındaki neden, bu büyüklüğün, boşalmayı ölçen aletlere etkisinin bu büyüklüğün fonksiyonu olmasıdır.

### 5.2.2 Tekrarlanma Sıklığı, n

Kısmi boşalma darbe tekrarlanma sıklığı n, bir saniyede oluşan kısmi boşalma darbe sayısının ortalamasıdır. Uygulamada sadece belirli bir genlikteki darbeler veya belirlenen bir genlik sınırları arasındaki darbeler dikkate alınır. Sonuçlar, kimi kez kısmi boşalma genliklerinin fonksiyonu olarak birikmeli frekans dağılım eğrisi ile ifade edilebilir.

### 5.2.3 Kısmi Boşalmanın Enerjisi, w

Bireysel bir kısmi boşalmanın enerjisi w, bireysel bir kısmi boşalma süresince ortaya çıkan enerjidir, ve joule ile ifade edilir.

$$w = \sqrt{2}\,\frac{1}{2} q.U_i \tag{5.5}$$

### 5.2.4 Ortalama Boşalma Akımı

Ortalama boşalma akımı I, belirli bir T zaman diliminde deney parçasının bağlantı uçlarından, kısmi boşalma nedeniyle geçen, doğrultulmuş yük mutlak değerleri toplamının, bu zaman aralığına bölümüdür ve aşağıdaki formülle gösterilir.

$$I = \frac{1}{T}[[q_1] + [q_2] + ... + [q_m]] \tag{5.6}$$

eğer bütün yük değerleri eşit ise,

$$I = n.|q| \tag{5.7}$$

ortalama boşalma akımı, coulomb/saniye olarak ifade edilir.

### 5.2.5 Karesel Oran, D

Karesel oran D, bir kısmi boşalma nedeni ile bir deney parçasının bağlantı uçlarından belirli bir T süresinde geçen yük değerleri kareleri toplamının bu zaman aralığına bölümü ile elde edilir ve aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$D = \frac{1}{T}\left[q_1^{\,2} + q^2{}_2 + ... + q^2{}_m\right] \tag{5.8}$$

eğer yükler eşit genlikte iseler,

$$D=n.q^2 \tag{5.9}$$

### 5.2.6 Boşalma Gücü, P

Boşalma gücü P, belirlenen bir zaman aralığı T süresince kısmi boşalma nedeni ile deney parçasının bağlantı uçları arasına uygulanan ortalama güçtür ve aşağıdaki formülle gösterilir.

$$P = \frac{1}{T}[q_1 U_1 + q_2 U_2 + ... + q_m U_m] \tag{5.10}$$

Burada $U_1$, $U_2$,...,$U_m$; $q_1$, $q_2$,..., $q_m$ kısmi boşalma yük değerlerinin oluştuğu anlarda deney parçasının uçları arasındaki ani gerilim değerleridir. Ortalama boşalma gücü watt cinsinden verilir.

### 5.2.7 Kısmi Boşalma Başlangıç Gerilimi, Ui

Kısmi boşalma başlama gerilimi Ui, belirlenen koşullarda ve gerilim değeri kısmi boşalmanın oluşmadığı düşük bir gerilimden başlayarak yavaş yavaş arttırıldığında, kısmi boşalmanın belirlenen bir değeri geçmesi için gerekli olan en küçük gerilim değeridir.

### 5.2.8 Kısmi Boşalma Sönme Gerilimi, Uo

Kısmi boşalma sönme gerilimi Uo, belirlenen koşullarda kısmi boşalma başlama geriliminin üstünde bir gerilim değerinden başlayarak gerilim yavaş yavaş azaltıldığında, kısmi boşalmanın belirli bir değerden geçerek son bulduğu gerilim değeridir.

### 5.2.9 Kısmi Boşalma Oluşmazlık Deney Gerilimi

Kısmi boşalma oluşmazlık deney gerilimi, belirli bir deney metodunda belirlenen ve deney parçasında kısmi boşalmanın belirli bir genliği geçmediği deney gerilimidir.

## 5.3 Kısmi Boşalma Ölçüm Devreleri

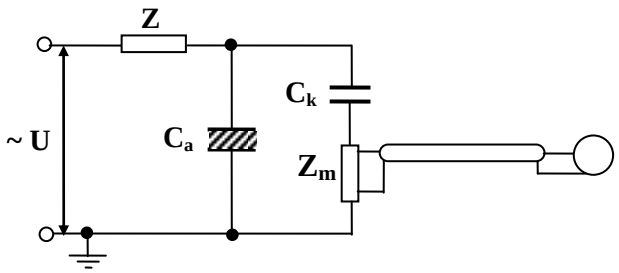
Kısmi boşalma ölçüm devreleri, deney cismi ($C_a$), kuplaj kondansatörü ($C_k$), ölçü empedansı ($Z_m$), kısmi boşalma ölçüm aleti ve besleme devresinden gelen bozucu etkenleri azaltmak için kullanılan bir filtreden (Z) oluşur.

Kuplaj kondansatörü en yüksek deney geriliminde kısmi boşalmasız olmalıdır. Bazı durumlarda, özellikle büyük bir kuplaj kondansatörüne ihtiyaç duyulduğunda veya dengeli devrelerde, kuplaj kondansatörünün yerine ikinci bir deney cismi kullanılabilir.

Ölçü empedansı genellikle bir direnç veya sönümlenmiş, ayarlı bir devreden oluşur ve genellikle 4 uçlu bir empedans gibi çalışır. Bu empedans kuplaj kondansatörü ve deney parçası ile birlikte ölçülen darbelerin süresini ve biçimini belirler.

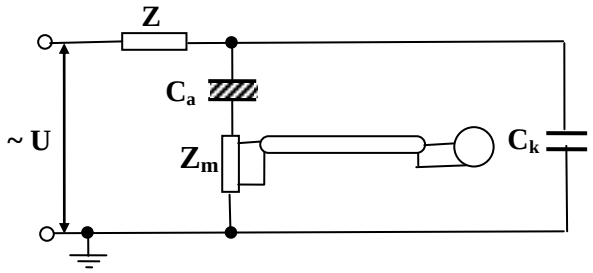
Deney parçasında meydana gelen kısmi boşalmalar, devreye yük aktarılmasına ve ölçü empedansında akım darbelerine sebep olur. Ortaya çıkan gerilim darbeleri kuvvetlendirilerek ölçüm cihazına aktarılır.

Aşağıdaki yüksek gerilim cihazlarındaki kısmi boşalma değerlerinin ölçülmesinde ve belirlenmesinde kullanılan, üç değişik temel deney devresi verilmiştir. Şekil 5.3'te gösterilen devrede, ölçüm cihazı kuplaj kondansatörünün toprak tarafına bağlanmıştır. Ölçme cihazının bant genişliği içerisindeki frekanslar için, deney parçasının yüksek gerilim kaynağından iyice ayrılması önemlidir. Aksi taktirde kısmi boşalma darbeleri kaynak empedansı yolu ile devreye geçebilir.



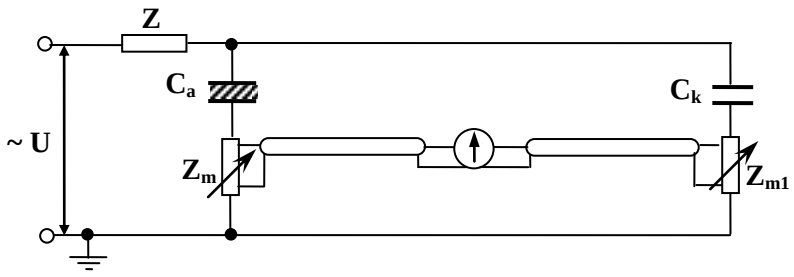

Şekil 5.3 Ölçüm empedansının kuplaj kondansatörü ile seri bağlı olması

Şekil 5.4'te gösterilen devrede, ölçüm cihazı deney cisminin toprak tarafına yerleştirilmiştir. Bu nedenle deney cisminin alçak gerilim tarafı toprağa karşı yalıtılmalıdır.




Şekil 5.4 Ölçüm empedansı ile deney cisminin seri bağlı olması

Şekil 5.5' te görülen ölçüm devresinde, ölçüm cihazının $Z_m$ ve $Z_{m1}$ dört uçlu ölçüm empedansları arasına bağlı olduğu dengelenmiş bir devre bulunmaktadır.




Şekil 5.5 Dengelenmiş devre şeması

Deney cisminin ve kuplaj kondansatörünün alçak gerilim tarafları toprağa karşı yalıtılmalıdır. Bu devrenin dış bozucu etkenleri azaltma özelliği vardır [21, 22].

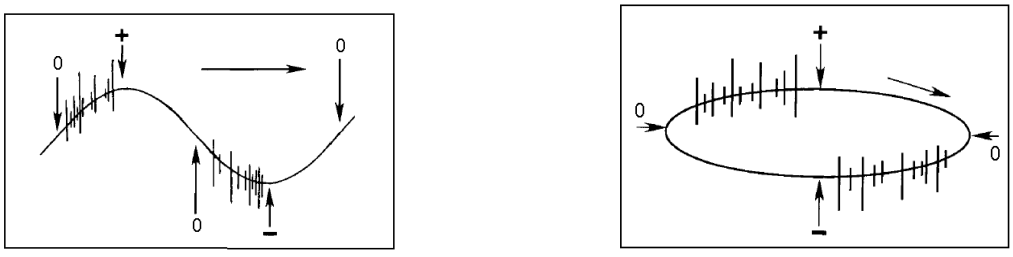
### 5.4 Kısmi Boşalmaların Kaynağının Belirlenmesi

Yalıtım malzemesinin arızalanması, işletmedeki cihazlara ve cihazın bağlı bulunduğu sistemlere büyük zarar verebilir. Katı yalıtkanlardaki arızaların büyük bir bölümünü genellikle yalıtım malzemesinin yüzeyinde veya içerisinde bulunan boşluklarda meydana gelen kısmi boşalmalardan kaynaklanır.

Yalıtım sistemlerinde veya montajlarında meydana gelen kısmi boşalmaların analizi ve ölçüm tekniği, bu yalıtkan malzemelerin ciddi arızalarından önce yalıtım malzemesinin durumu hakkında bilgi vermek için kullanılabilir.

Önceden tanı (teşhis) yöntemlerinin bazıları kısmi boşalmaların osiloskop veya başka ölçüm cihazlarında analizini içermektedir. Bu durum için genellikle bir sinüs dalgasını temsil eden eliptik bir gösterim kullanılır [23].

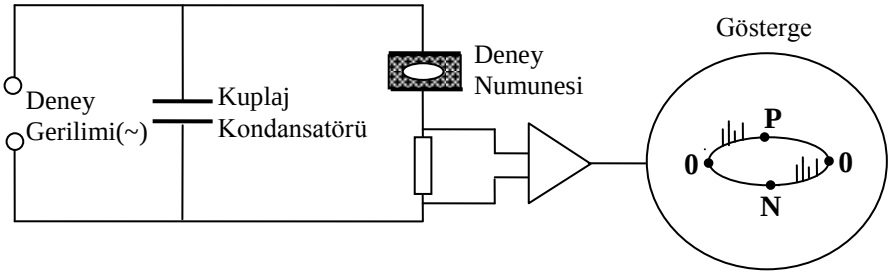
Kısmi boşalma ölçümünün yapıldığı ortamda çevre gürültüsü mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Gürültü ana güç kaynağından kaynaklanıyorsa, bu gürültüyü azaltmak için filtreler kullanılabilir. Eğer yüksek gerilim altındaki kısımlarda korona boşalması varsa, deney düzeneği, sivri uçların yok edilmesi gibi, koronayı yok edecek şekilde düzenlenmelidir. Düşük çevre gürültüsü için deney montajı üzerinde gerekli işlemler yapıldıktan sonra, kısmi boşalma ölçüm deneyine başlanabilir. Şekil 5.6'da kısmi boşalma darbelerini gözlemlediğimiz normal sinüs dalgası ve eliptik dalga gösterilmiştir.



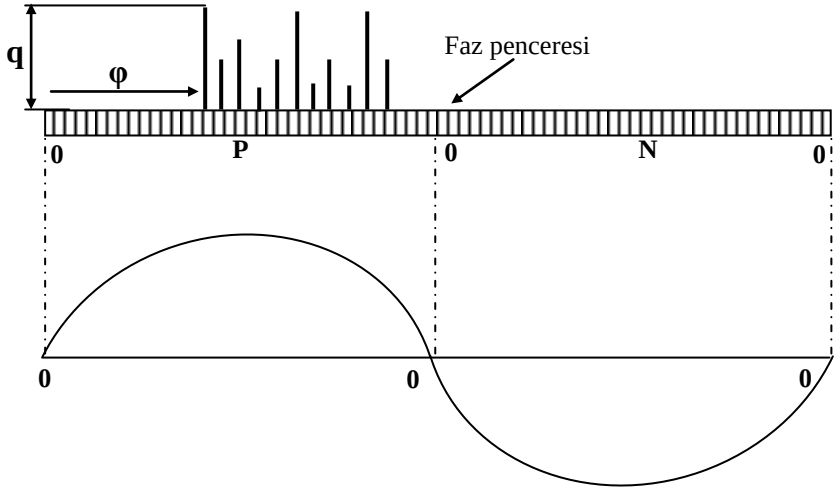

(a) (b)

Şekil 5.6 a) Sinüs dalgası
b) Eliptik gösterimli sinüs dalgası

Kısmi boşalmalar değişik sebeplerden dolayı meydana gelebilirler. İç kısmi boşalmalar, yüzeysel kısmi boşalmalar, korona boşalmaları ve ağaçlanma boşalmaları bunlara örnek olarak verilebilir [24, 25]. Her bir boşalma durumunda, kısmi boşalma ölçüm cihazındaki eliptik veya normal sinüs dalgası üzerinde değişik boşalma işaretleri görülecektir



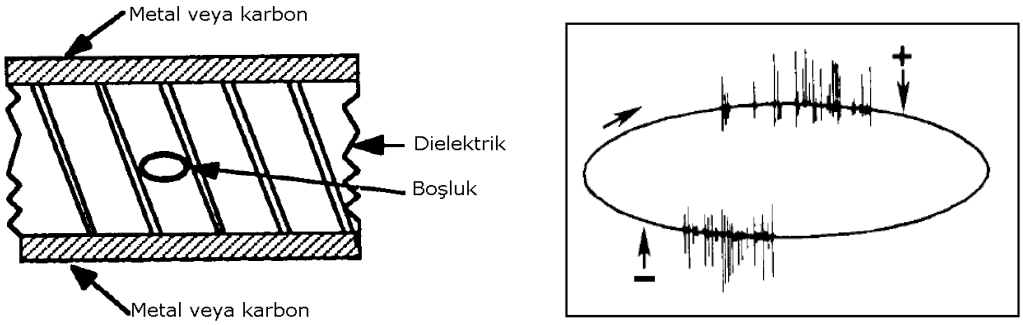

Şekil 5.7 Kısmi boşalma ölçüm devresi




Şekil 5.8 Boşalma işaretlerinin genliğinin ve fazının gösterilmesi

### 5.4.1 Boşluklu Yalıtkandaki Kısmi Boşalma Durumları

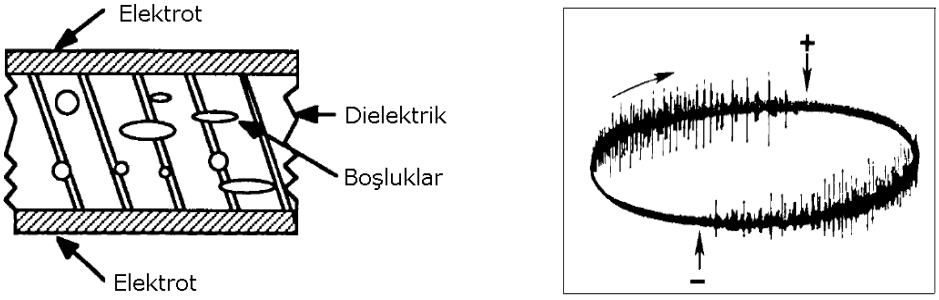
Aşağıdaki şekillerde katı yalıtkan malzemedeki çeşitli olası boşluklar ve bu boşluklarda oluşan darbe şekilleri gösterilmiştir. Bu boşluklar genellikle döküm sırasında yalıtkanda oluşan boşluklardır ve uygulamada çok sık karşılaşılır. Kısmi boşalma darbe şekilleri gerilimin sıfır geçiş noktalarında (gerilimin tepe değerinden önce) yoğunlaşır. Boşalmalar her iki yarı dalgada da aynı büyüklükte ve aynı sayıdadır. Zamanla boşalmaların yerinin ve genliğinin rasgele değişimini gözlemlemek normaldir. Boşalma başlama gerilimi belirgindir. Boşalma sönme gerilimi yaklaşık olarak boşalma başlama gerilimine eşittir veya biraz daha küçüktür.




(a) (b)

Şekil 5.9 a) Boşluklu yalıtkan malzeme
b) Kısmi boşalma şekli

Katı yalıtım malzemesi içerisinde değişik sayıda ve değişik büyüklükte boşluk bulunması durumuna ait kısmi boşalma durumu şekil 5.10'da gösterilmiştir.




(a) (b)

Şekil 5.10 a) Değişik sayıda ve boyutta boşluk içeren yalıtkan
b) Kısmi boşalma şekli

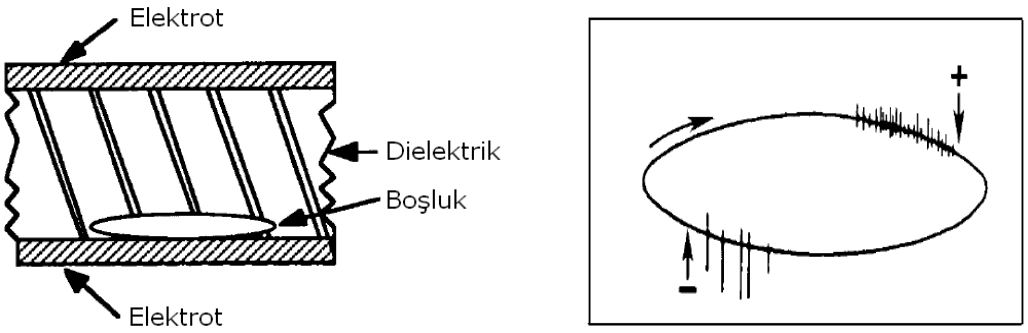
Şekil 5.11'deki boşalma şekli makine yalıtımında ve diğer tabakalı yalıtkanlarda bulunan düzgün boşluklarda meydana gelir.




(a) (b)

Şekil 5.11 a) Düzgün boşluk içeren bir yalıtkan
b) Kısmi boşalma şekli

Şekil 5.12'deki boşalma şekline elektrot ile dielektrik malzeme arasındaki sınır yüzeyde boşluk olması durumunda rastlanır. Boşalma olayı gerilimin tepe değerinden daha önce başlar ve simetrik olmayan bir yapıya sahiptir. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi pozitif yarı dalgada meydana gelen boşalma sayısı daha fazladır.




(a) (b)

Şekil 5.12 a) Yalıtkan ile elektrot arası sınır yüzeyde boşluk içeren yalıtkan
b) Kısmi boşalma şekli

Şekil 5.13'de içerisinde elektriksel ağaçlanma başlamış bir yalıtkan ve bu yalıtkana ait kısmi boşalma şekli gösterilmiştir. Kısmi boşalmalar her iki gerilim tepe değerinde de simetrik olarak bulunmaktadır. Boşalmaların yeri ve büyüklüğü kararsız olabilir.




(a) (b)

Şekil 5.13 a) Ağaçlanma içeren yalıtkan
b) Kısmi boşalma şekli

Şekil 5.14 de, kısmi boşalmaların sonucu olarak dielektrik malzemedeki boşluk içerisinden ilerleyen ağaçlanma durumu gösterilmiştir. Kısmi boşalmalar gerilimin her iki dalgasında da aynı büyüklüktedir [23].

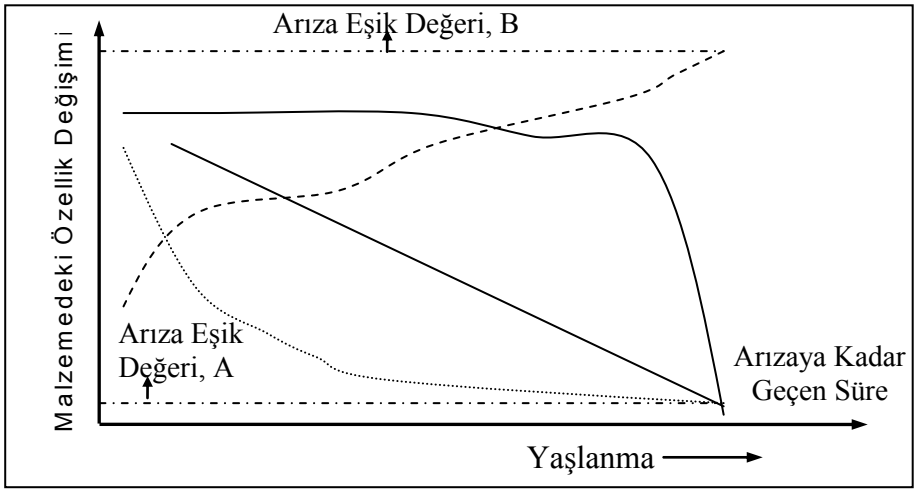



(a) (b)

Şekil 5.14 a) Ağaçlanma içeren yalıtkan
b) Kısmi boşalma şekli

### 5.5 Kısmi Boşalmaların Elektriksel Yaşlanma Üzerine Etkileri

Kısmi boşalma ölçümleri elektriksel yalıtım sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılan tanı (diagnostic) deneylerinden biridir. Tanı deneyleri, arızalanma durumunu tespit etmek ve değerlendirmek için kullanılan deneylerdir. Bu amaçla, açık deney alanlarında veya laboratuvar koşullarında tahribatlı veya tahribatsız tanı deneyleri yapılmaktadır. Tanı deneyleri yalıtım sisteminin bozulması (delinmesi) ile ilgili bir veya daha fazla özelliğin ölçülmesine veya izlenmesine olanak sağlar. Aşağıdaki şekilde yaşlanma ile birlikte yalıtım sistemindeki özellik değişimi gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, yaşlanma ile birlikte malzemedeki özellik değişiminin artış gösterebileceği gibi azalma da gösterebilmesidir. Yaşlanma zamanı ile birlikte malzemedeki özellik değişimi kritik bir değere eriştiğinde (end point criteria) deneye tabi tutulan malzeme yaşlanmış (bozulmuş) kabul edilir [26].




Şekil 5.15 Yaşlanma zamanı ile malzemedeki özellik değişimi arasındaki ilişki

Katı yalıtım sistemlerindeki üretim sırasında veya çevresel zorlanmalar sonucu meydana gelen ve genellikle içleri gaz veya sıvı gibi dielektrik dayanımları yalıtkanın dayanımından daha küçük olan boşluklarda meydana gelen kısmi boşalmalar yalıtım sisteminin yavaş yavaş aşınmasına ve sonunda tamamen bozulmasına (delinmesine) sebep olmaktadır [30]. Boşluklarda kısmi boşalmaların meydana gelmesi, boşluk içerisinde serbest elektron varlığına ve boşluktaki alan şiddetine bağlıdır. Kısmi boşalmaların başlaması ve devam etmesi serbest elektronların çarpışarak çoğalmasıyla çalışma koşullarına bağlı olarak kısmi boşalma sonrası yalıtkanda meydana gelen kimyasal değişimler hızlanabilir. Yalıtım sistemi içerisindeki boşluklarda bulunan ortamlar delindiğinde, yalıtkanın yüzeyleri bir anlık anot ve katot görevi görür. Anoda çarpan elektronlardan bazıları yalıtkan yüzeyindeki kimyasal bağları kırmaya yeterli derecede enerjiye sahiptirler. Benzer olarak katodun pozitif iyonlarla bombardımanı yüzey sıcaklığının atmasıyla bozulmaya neden olabilir ve bölgesel ısıl kararsızlık ortaya çıkabilir. Çalışma koşullarına bağlı olarak kısmi boşalma sonrası yalıtkanda meydana gelen kimyasal değişimler hızlanabilir.

Kısmi boşalmaların diektrik malzemelerdeki boşluklarda meydana getirdiği erozyon etkisinin yanında, bazı kimyasal olaylar da söz konusudur. Kısmi boşalma sonunda yalıtkan malzemenin hızlı bir şekilde ayrışmasına neden olan kimyasal ürünler ortaya çıkar. Her bir boşalma sonunda açığa çıkan enerji 1 μJ'dan daha düşük olmasına rağmen, boşalma bölgelerinde elektron etkisi ile mor ötesi radyasyon, O, OH ve $O_3$ meydana gelebilir. Bazı durumlarda, ortaya çıkan bu boşalma ürünleri, kısmi boşalmaların stokastik davranışını etkileyerek yalıtım içerisinde kimyasal dönüşümlere neden olabilirler. $O_3$ molekülü, ortamda su buharı ve nemin bulunması durumunda nitrik asit ($HNO_3$) oluşturabilir. Bu da yalıtım sisteminin bozulma sürecini hızlandıracaktır [28].

Yalıtkan içerisinde meydana gelen kısmi boşalmaların başlaması için boşluk boyutu, şekli, yeri, boşluk içerisindeki gazın türü ve boşluğun basıncı önemli rol oynamaktadır. Boşluk içerisindeki kısmi boşalma olayı boşluk çeperlerinin iletkenliğinin artmasına ve boşalmaların sona ermesine neden olurlar. Ayrıca, boşluğun aşınmasına, boşluk yüzeyinde çukurların oluşmasına ve elektriksel ağaçlanmaya sebep olan çukurların oluşmasına neden olurlar.

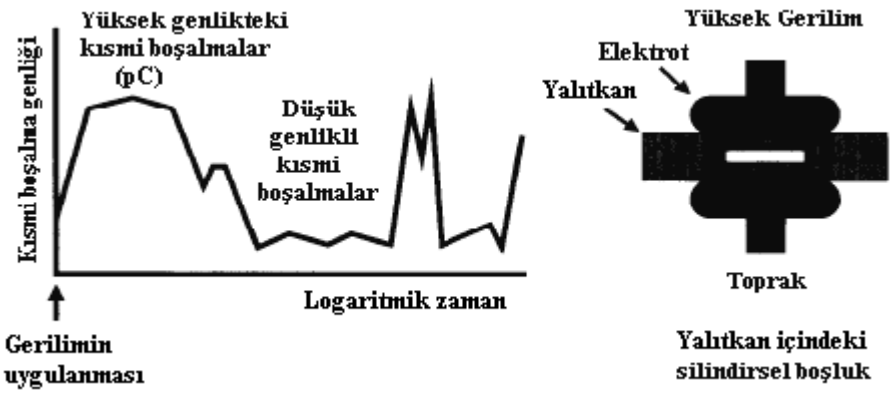
Kısmi boşalmalardan kaynaklanan arıza durumu ile kısmi boşalma arasındaki ilişki elektrik makinaları, güç kabloları, transformatörler ve diğer bir çok katı yalıtım sistemleri için kurulmuştur. Kısmi boşalmaların zararlı etkilerini açıklayan parametrelerin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalarda önemli artışlar olmuştur. IEC ve IEEE gibi bazı uluslararası organizasyonlar, kısmi boşalma zararlarını temsil eden belirli parametreler önermişlerdir. Bu parametreler;

1. Her bir periyotta kısmi boşalmadan dolayı açığa çıkan enerji,
2. Ölçüm devresinden akan karesel yük miktarı ($\sum N.q^2$, N boşalmanın frekansını ve $q$ ise görünen yük genliğini temsil etmektedir.)
3. Maksimum kısmi boşalma yük değeri, $q_{max}$,
4. Ölçüm devresindeki ortalama iyonlaşma akımı.

olarak sıralanabilir. Genellikle yalıtım sistemlerinin kısmi boşalmalar yardımı ile değerlendirilmesinde maksimum kısmi boşalma yük değeri dikkate alınmaktadır [25, 27].

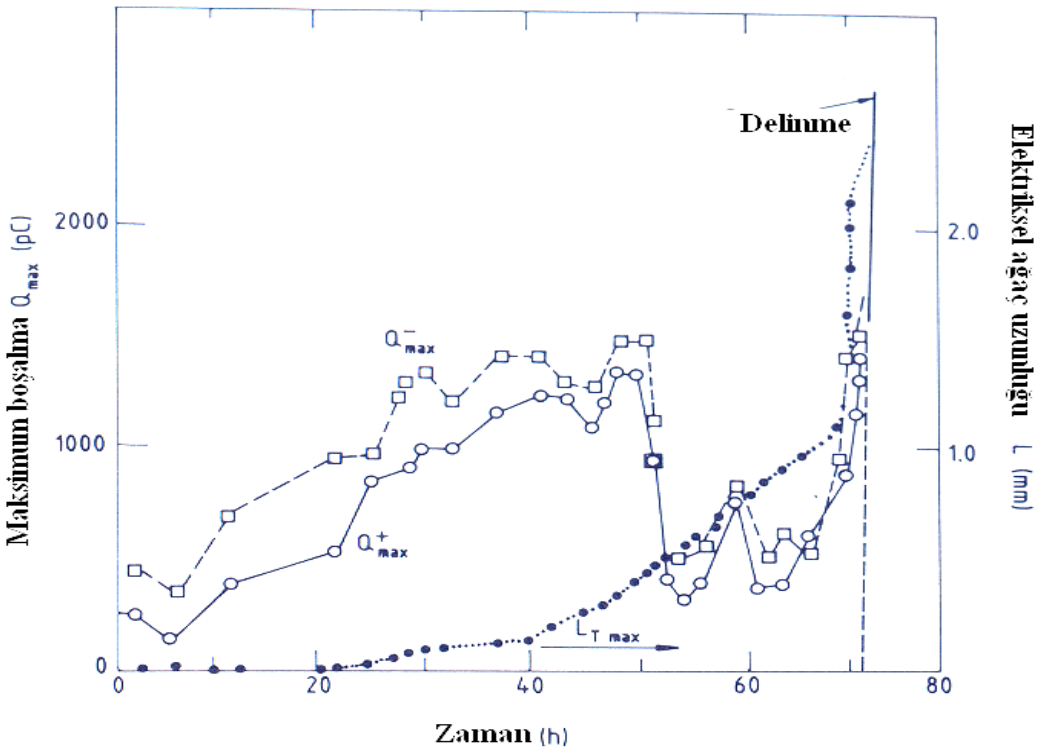
### 5.5.1 Maksimum Boşalma Yükü ($q_{max}$) İle Yalıtkan Ömrü Arasındaki İlişki

Maksimum kısmi boşalma yük değeri ile yalıtkan malzemenin ömrü arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için küresel veya silindirsel boşluklar içeren deney numuneleri üzerine birçok kısmi boşalma deneyi gerçekleştirilmiştir [27]. Bu deneyler sonucunda boşalma genliğinin zamanla değişimi şekil 5.16 ve şekil 5.17'de gösterilmiştir. Belirli bir süre sonra kısmi boşalmaların kendiliğinden yok olması boşluktaki basıncın değişmesinden ve boşluk duvarlarının iletkenliğinin artmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki faktör kısmi boşalmaların başlamasında ve zamanla çok değişik boşalma kalıplarının elde edilmesinde etkin rol oynamaktadır. Kısmi boşalma deneylerinde, hemen hemen bütün durumlarda, boşluklu bir yalıtım sistemindeki arıza olayından önce, yalıtkan içerisinde elektriksel ağaçlanmanın görüldüğü ve ilerlemeye başladığı saptanmıştır. Elektriksel ağaçlanma çok küçük boşalma kanallarıdır ve yüksek elektrik alanı ve yerel ısınma ile birlikte yalıtkan içerisinde tam bir delinme olayının gerçekleşmesine kadar ilerleme göstermektedir [27].




Şekil 5.16 Kısmi boşalma genliği ile yalıtkan ömrü arasındaki ilişki [27]

Kısmi boşalma genliği ile elektriksel ağaçlanma uzunluğu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik şekil 5.17'de verilmiştir .




Şekil 5.17 Maksimum boşalma yükü ile elektriksel ağaç uzunluğu arasındaki değişim [29].

# 6. DENEY VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Hızlandırılmış ömür deneylerinde kullanılan bir istatistiksel model, deneye tabi tutulan numunelerin ömür dağılımlarını ve numunenin ömrü ile zorlanma düzeyi arasındaki ilişkiyi gösteren bir bağıntıdan oluşur. Genellikle ortalama ömür dağılımı, hızlandırılmış ömür deneylerindeki zorlanma değerinin (gerilim, sıcaklık v.s.) fonksiyonu olarak temsil edilir. Ömür kestirimi için kullanılan en yaygın istatistiksel dağılımlar üstel, normal, lognormal ve weibull dağılımlarıdır [15].

## 6 1. Temel İstatistiksel Tanımlar

### 6.1.1 Raslantı Değişkeni

Mühendislik uygulamalarının çoğunda karşılaşılan değişkenlerin (akım, gerilim, güç v.b.) önemli bir kısmı belirgin (deterministik) büyüklükler olmayıp, belirli bir aralıkta raslantısal olarak değer alırlar. Böyle bir değişkene raslantı değişkeni adı verilir. Bir raslantı değişkenin teorik olarak değişim aralığı (-∞, +∞) olmasına karşın, çoğu kez raslantı değişkeni ( 0, +∞) veya bunun bir alt bölgesi içinde değer alır. Raslantı değişkeni sürekli veya ayrık olabilir.

### 6.1.2 Dağılım (Birikmeli Yoğunluk) ve Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu

x raslantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonunu f(x), birikmeli olasılık yoğunluk fonksiyonunu ise F(x) ile gösterilir. F(x) ve f(x) dağılımları, bir raslantı değişkeninin olasılık dağılımları ile ilgili tüm bilgileri içeren fonksiyonlardır. Sürekli bir raslantı değişkeni *x*'in dağılım fonksiyonu F(x)

$$F_x(x) = F(x) = P\{X \le x\} \quad , -\infty < x < +\infty \tag{6.1}$$

olarak tanımlanır ve aşağıdaki özellikleri sağlar.

$$F(+\infty) = P(X \le +\infty) = 1 \tag{6.2}$$

$$F(-\infty) = P(X \le -\infty) = 0 \tag{6.3}$$

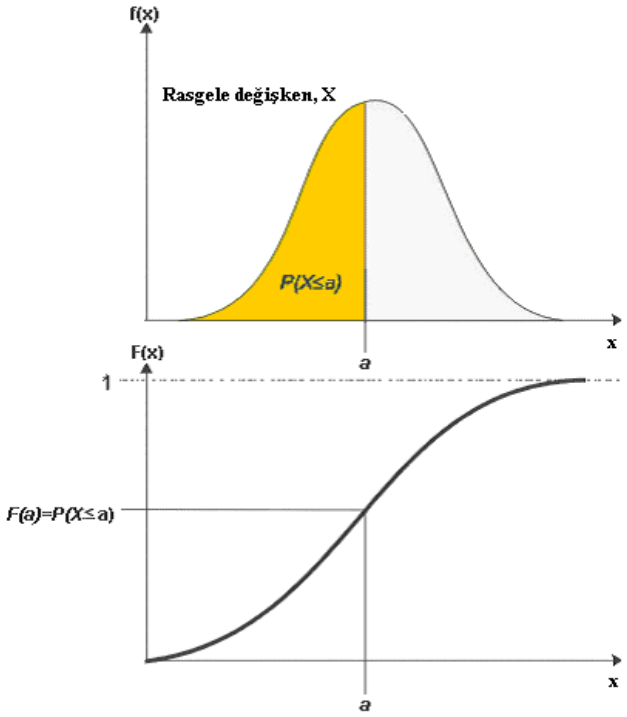
$$x_2 \ge x_1 \;\Rightarrow\; F(x_2) \ge F(x_1) \tag{6.4}$$

$$F(x^{+}) = F(x) \tag{6.5}$$

Olasılık yoğunluk fonksiyonu f(x) ise

$$f_x(x) = f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad , \quad F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(s)ds \tag{6.6}$$

olarak tanımlanır. Şekil 6.1 de tipik bir x raslantı değişkenine ilişkin dağılım ve yoğunluk fonksiyonları gösterilmiştir.

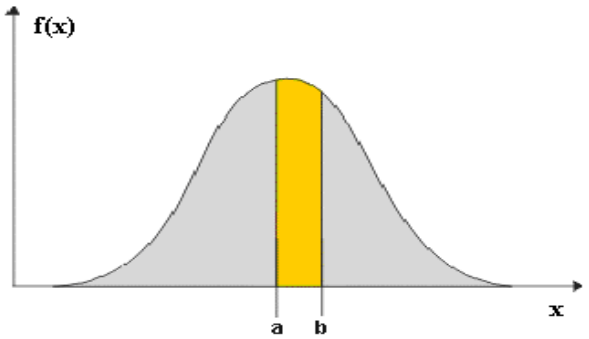



Şekil 6.1 F(x) ile f(x) arasındaki ilişkinin grafik olarak gösterilmesi

*x* raslantı değişkeninin belirli bir [a, b] aralığında bulunma olasılığı ise;

$$P\{a \le x \le b\} = P\{X \le b\} - P\{X \le a\} = F(x_2) - F(x_1) = \int_a^b f(x)\,dx \tag{6.7}$$

dir.



Şekil 6.2 Olasılık yoğunluk fonksiyonu

### 6.2. Ömür Analizleri İçin Olasılık Dağılım Fonksiyonları

Hızlandırılmış ömür verilerinin analiz edilmesinde yaygın olarak lognormal dağılım ile 2 parametreli weibull dağılımı kullanılır. Örnek hızlandırılmış yaşlanma deney verileri için, logaritmik normal ve weibull dağılım fonksiyonlarına ait olasılık çizimlerinde ve bu fonksiyonlara ait gerekli parametrelerin hesaplanmasında **Reliasoft Weibull++Version-6** isimli güvenilirlik ve istatistiksel veri analizi yapan normal lisans sürümlü paket programından yararlanılmıştır.

#### 6.2.1 Lognormal Olasılık Dağılımı

Logaritmik normal dağılım fonksiyonu yalıtım sistemlerinin arıza verilerini değerlendirmek için yaygın kullanılan dağılımlardan biridir. Bu dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$f(z) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right) \exp\left[-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \qquad (6.8)$$

bu eşitlikte,

$z$ : $\log(x)$,

$x$ : Delinmeye veya arızaya kadar geçen süre,

$\mu$: Logaritmik ortalama değer,

$\sigma$: Logaritmik standart sapma.

Biçiminde tanımlıdır.

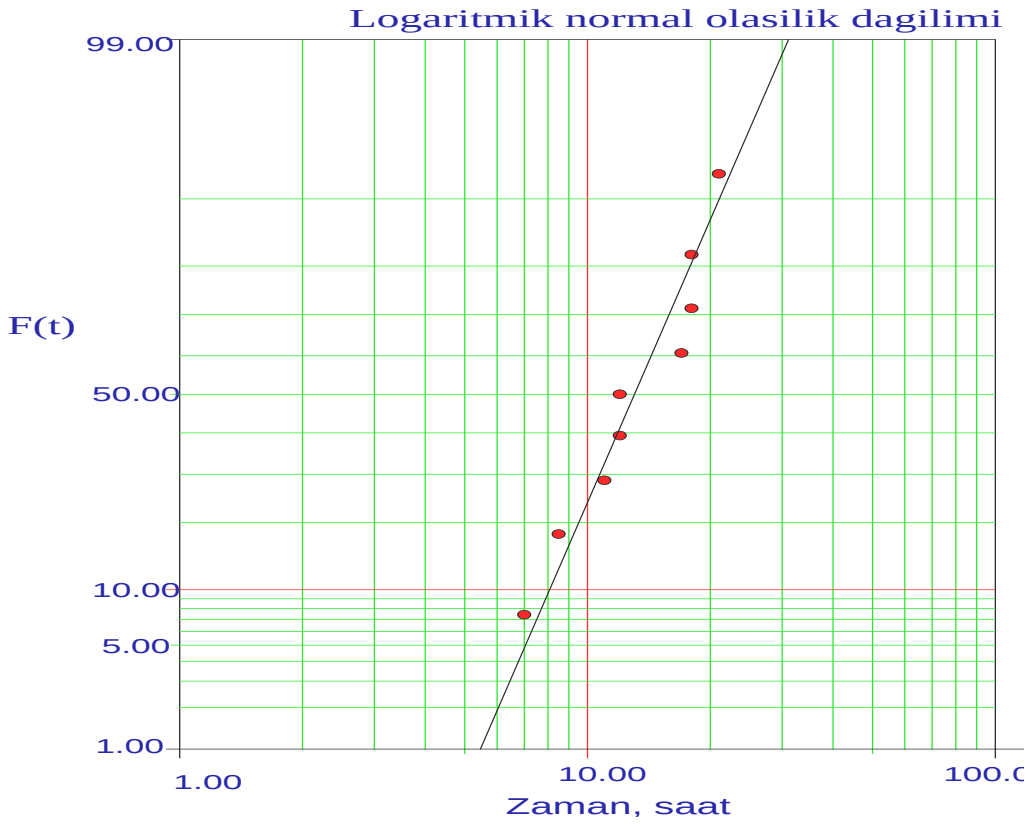
Logaritmik normal dağılım için olasılık çizimleri; $i$ deney numunesi numarasını göstermek üzere aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir.

$$F_i = \%\left(\frac{i}{n+1}\right).100 \qquad (6.9)$$

Tablo 6.1 Yalıtım sisteminin arızalanmasına ait örnek deney verileri

| Numune sırası i | $F_i$ % | Arızalanma zamanı (saat) $x_i$ | Log($x_i$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 7.0 | 0.84 |
| 2 | 20 | 8.5 | 0.93 |
| 3 | 30 | 11 | 1.04 |
| 4 | 40 | 12 | 1.08 |
| 5 | 50 | 12 | 1.08 |
| 6 | 60 | 17 | 1.23 |
| 7 | 70 | 18 | 1.25 |
| 8 | 80 | 18 | 1.25 |
| 9 | 90 | 21 | 1.32 |

Logaritmik normal grafik kağıdı üzerine çizilen deney verileri sonucu uygun bir doğru elde edilebiliyor ise deney verilerini temsil etmek için bu dağılımın kullanılması uygun olmaktadır [35].




Şekil 6.3 Deney verilerinin logaritmik normal olasılık kağıdı üzerinde gösterilmesi

### 6.2.2 Weibull Olasılık Dağılımı

Weibull olasılık dağılımı da logaritmik normal dağılım gibi katı yalıtım sistemleri üzerine yapılan arızaya kadar geçen süre ve arıza gerilimi deney verilerini temsil

etmek için yaygın bir şekilde kullanılır. 2 parametreli weibull dağılımına ait birikmeli yoğunluk fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}, x \geq 0 \qquad (6.10)$$

α: Ölçek parametresi (α>0)

β: Şekil parametresi (β>0)

x: Raslantı değişkeni

Weibull dağılımının olasılık çizimi için kulanılan en yaygın yaklaşık formül aşağıdaki gibidir.

$$F_i = \%(\frac{i}{n+1}).100 \qquad (6.11)$$

Tablo 6.2 Örnek deney verileri

| **Numune numarası i** | **$F_i$ %** | **Arızalanma zamanı (saat) $t_i$** |
|---|---|---|
| 1 | 10 | 15.3 |
| 2 | 20 | 30.3 |
| 3 | 30 | 48.5 |
| 4 | 40 | 89.4 |
| 5 | 50 | 90.4 |
| 6 | 60 | 105.7 |
| 7 | 70 | 144.9 |
| 8 | 80 | - |
| 9 | 90 | - |

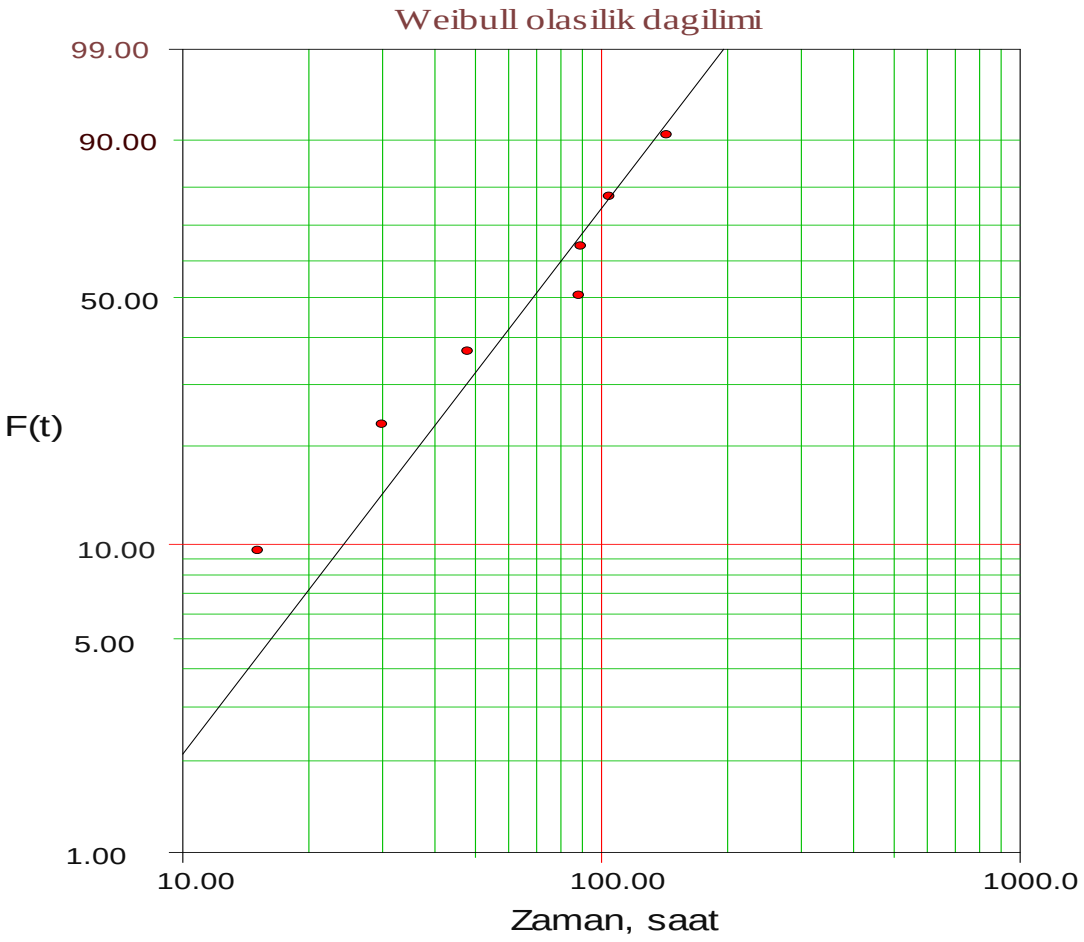
Logaritmik normal dağılımda olduğu gibi, weibull olasılık kağıdı üzerine çizilen deney verileri ile uygun düzlükte bir doğru elde edilirse, deney verilerinin weibull dağılımı ile temsil edilebileceği düşünülebilir. Şekil 6.4'te bu deney verilerine ait grafik gösterilmiştir [31,32].

### 6.3 Dağılım Parametrelerinin Tahmini

Dağılım parametrelerinin tahmininde grafiksel veya sayısal parametre tahmin yöntemleri kullanılır.

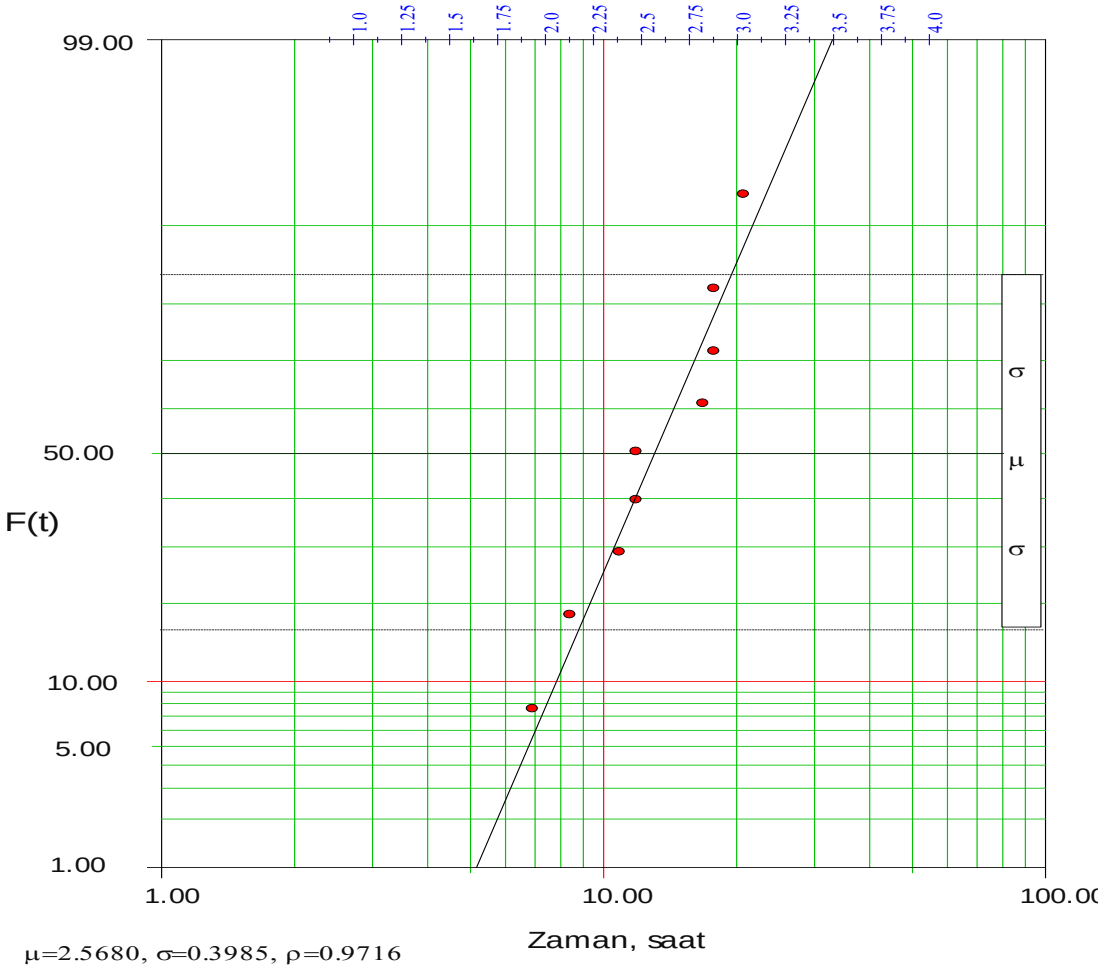
### 6.3.1 Grafiksel Yolla Parametre Tahmini

Daha önceki kısımda verilen olasılık çizim kağıtları dağılım parametrelerinin yaklaşık olarak tahmin edilmesinde kullanılabilirler. Olasılık dağılım kağıtları üzerine işaretlenen deney verilerine minimum yakınlıkta geçecek şekilde uygun bir doğrunun uydurulması işlemi grafiksel yolla parametre tahmininin prensibini oluşturmaktadır. Grafik yolla tahmin edilen dağılım parametreleri için herhangi bir güven aralığı (confidence interval) söz konusu değildir.



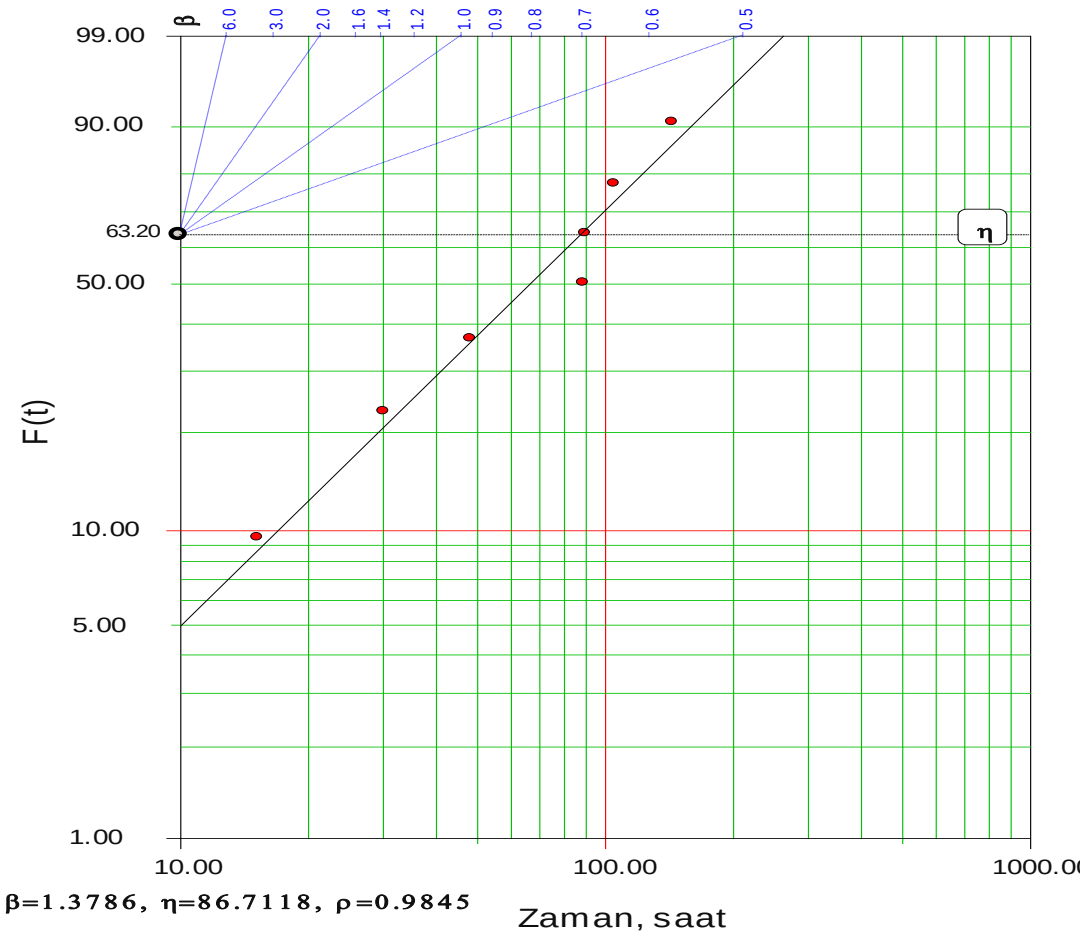

Şekil 6.4 Deney verilerinin weibull olasılık kağıdı üzerinde gösterilmesi

Logaritmik normal dağılım için grafik yolla parametre tahmininde; öncelikle deney verileri olasılık kağıdı üzerine çizilir ve bu verilere minimum yakınlıkta geçecek şekilde bir doğru uydurulur. F(x) değerinin %50 olduğu ana karşılık gelen süre logaritmik normal dağılımın ortalamasını verecektir. F(x)'in %16 ila %50 değerleri arasındaki süreye karşılık gelen değer ise dağılımın logaritmik standart sapmasını verecektir. Tablo 6.1'deki deney verileri için grafik yolla yapılan tahmine ilişkin şekil aşağıda verilmiştir.




Şekil 6.5 Lognormal dağılım parametrelerinin grafiksel yolla parametre tahmini

Weibull dağılımındaki parametrelerin belirlenmesi için grafik yol kullanılacak ise; logaritmik normal dağılımda olduğu gibi deney verileri weibull olasılık kağıdı üzerine işaretlenir ve bu noktalara minimum yakınlıkta geçecek şekilde bir doğru uydurulur. Deneye tabi tutulan numunelerin % 63.2' sinin ($1-e^{-1}$) arızalanmasına karşılık gelen zaman değeri weibull dağılımının ölçek parametresini (α) verir. Bu değer normal dağılımdaki ortalama değer ile benzerlik göstermektedir. Şekil parametresi (β) ise logaritmik arızalanma zaman dağılımının bir ölçüsüdür ve bu değer normal dağılımdaki standart sapmanın tersi ile benzerlik göstermektedir. Bu parametre büyüdükçe dağılım oranlarındaki değişim küçülecektir. Weibull olasılık kağıtları üzerinde şekil parametresinin tahminine olanak sağlayan ölçekler bulunmaktadır. Aşağıdaki şekilde, tablo 6.2'de verilen örnek deney verileri için weibull olasılık dağılım parametrelerinin grafik yolla tahmini gösterilmiştir.




Şekil 6.6 Weibull olasılık dağılım parametrelerinin grafik yolla tahmini [33].

Bununla beraber, şekil parametresinin tahmini için kullanılabilecek matematiksel formüller aşağıda verilmiştir.

$$\hat{\beta} = \frac{\ln(\ln(L_1)) - \ln(\ln(L_2))}{\ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right)} \tag{6.12}$$

burada;

$$L_1 = \frac{1}{1 - F(x_1)}$$
$$L_2 = \frac{1}{1 - F(x_2)} \tag{6.13}$$

$(x_1, F(x_1))$, $(x_2, F(x_2))$ noktaları regresyon doğrusu üzerindeki iki rasgele noktaya karşılık gelmektedir [32, 35].

### 6.3.2 Sayısal Parametre Tahmini

Bu bölümde logaritmik normal olasılık dağılımı ve weibull olasılık dağılım parametrelerinin sayısal yolla tahmin edilmesi üzerinde kısaca değinilecektir.

#### 6.3.2.1 Lognormal Dağılım Parametrelerinin Sayısal Tahmini

Hızlandırılmış yaşlanma deneyine tabi tutulan deney numuneleri için, belirli bir süre sonra tüm deney numuneleri arızalanıyorsa (no censored), normal dağılım parametreleri nümerik yolla doğru bir şekilde tahmin edilebilir. Dağılımın isminden de anlaşılacağı gibi, öncelikle arızalanma deney verilerinin doğal logaritmasının alınması gerekmektedir. Örneğin, hızlandırılmış bir ömür deneyinde n adet deney numunesi kullanıldığı ve i inci numuneye ilişkin arıza süresinin $L_i$ olduğu varsayılsın.

$$Y_i = \log(L_i) \tag{6.14}$$

Logaritmik ortalama değer, $\bar{Y}_i$ , aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i}{n} \tag{6.15}$$

Logaritmik standart sapma ise;

$$s_i = \sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y}_i)^2 / (n-1)^{0.5} \tag{6.16}$$

yardımı ile hesaplanabilir.

#### 6.3.2.2 Weibull Dağılım Parametrelerin Sayısal Tahmini

Weibull dağılım parametrelerinin tahmin edilmesinde kullanılan en yaygın sayısal yöntem En Yüksek Olabilirlik Kestirimi (Maximum Likehood Estimation) yöntemidir. Weibull dağılım parametreleri bu yolla tahmin edilecek ise iteratif çözümler gerekmektedir.

$$f(\beta) = \frac{A_2}{A_1} - \frac{1}{\hat{\beta}} - C = 0 \tag{6.17}$$

$$\hat{\alpha} = \left(\frac{A_1}{r}\right)^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \tag{6.18}$$

$$C = \left(\frac{1}{r}\right)\sum_{i=1}^{r} \ln x_i \tag{6.19}$$

$$A_K = \sum_{i=1}^{r} x_i^{\hat{\beta}} (\ln x_i)^{(k-1)} + (n-r).x_s^{\hat{\beta}} (\ln x_s)^{(k-1)} \tag{6.20}$$

yukarıdaki eşitliklerde,

$r \leq n$ : Arızalanan deney numunesi sayısı

n : Deneye tabi tutulan toplam numune sayısı

$x_s$ : En yüksek deney gerilimi

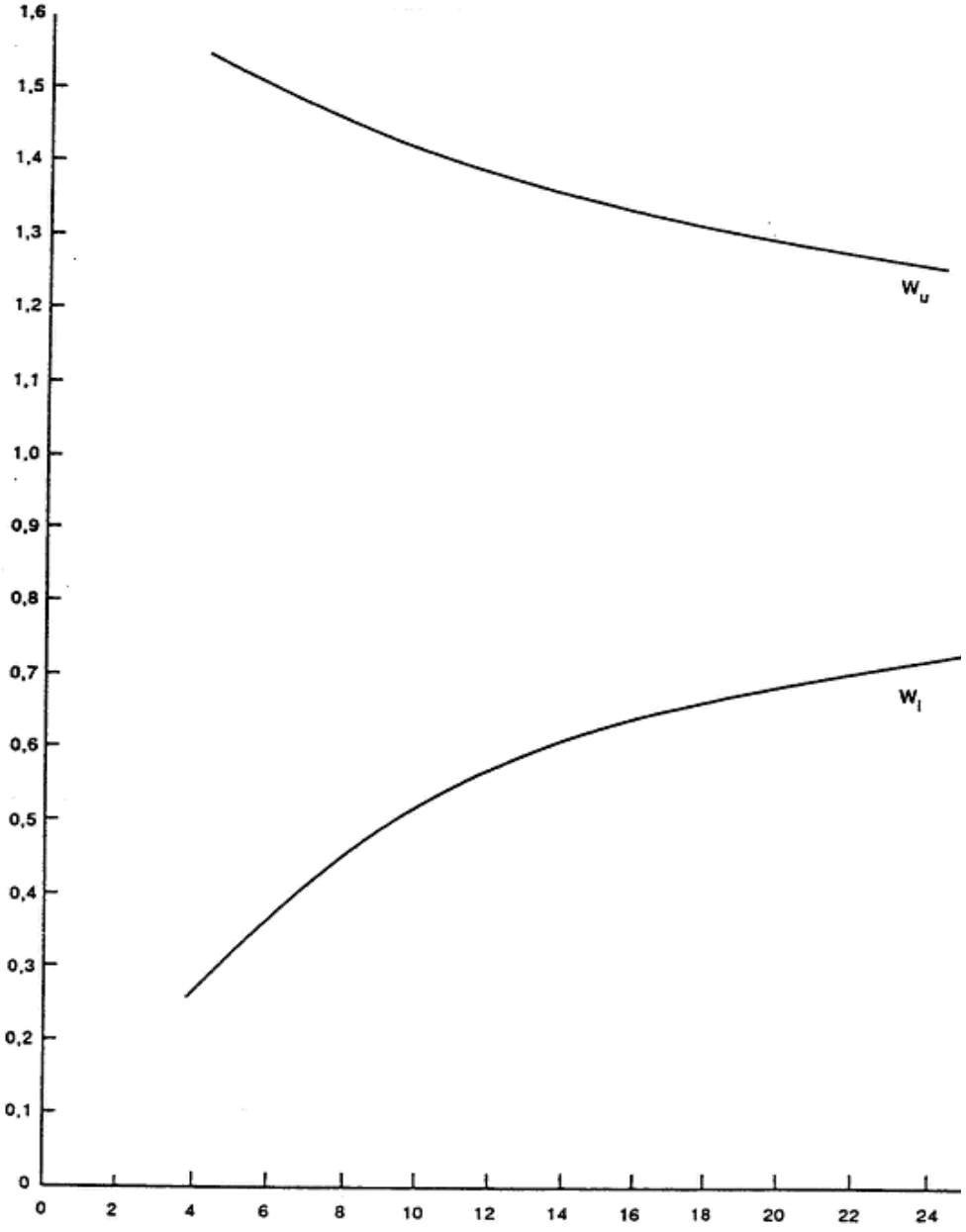
### 6.3.3 Dağılım Parametreleri İçin Güven Aralıkları (Confidence Interval)

Bir çok deney numunesi içeren bir deney, bir çok kez tekrarlanırsa tahmin edilen dağılım parametreleri $(\hat{\alpha},\hat{\beta})$ her bir deney için farklılık gösterebilir. Bu durum yalıtım sistemindeki delinme olayının istatistiksel doğasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, tahmin edilen her bir parametre için, doğru parametre tahminine referans olarak güven aralığı verilir. Güven aralığı, parametre tahmininde meydana gelen belirsizlik miktarını belirler. Genellikle, ne kadar fazla deney numunesi kullanılırsa, güven aralığı o kadar dar ve tahmin edilen parametre o kadar doğru olacaktır [35]**.**

$\alpha$ ve $\beta$ katsayıları için yaklaşık güven aralıklarının hesaplanması için değişik yöntemler vardır. Bu parametreler için güven aralıklarının hesaplanmasında kullanılan tablolar çok geniş aralıkları (verileri) kapsamaktadır. Bu yüzden tabloları daha basit bir şekilde temsil etmek için grafikler kullanılır. Genellikle 25 numuneye kadar olan deney numunesinin kullanıldığı hızlandırılmış yaşlanma deneylerinde grafikler doğru sonuçlar verirler. Şekil parametresi için güven aralığının hesaplanmasında (%90 güven aralığı) 6.21'deki eşitlikleri kullanabiliriz.

$$\begin{aligned} \beta_l &= W_l \hat{\beta} \\ \beta_u &= W_u \hat{\beta} \end{aligned} \tag{6.21}$$

yukarıdaki ifade de $\beta_l$ ve $\beta_u$ değerleri sırasıyla şekil parametresinin alacağı alt ve üst değerleri göstermektedir. Aşağıdaki şekilde %90 güven aralığının hesaplanmasında kullanılan grafik verilmiştir.

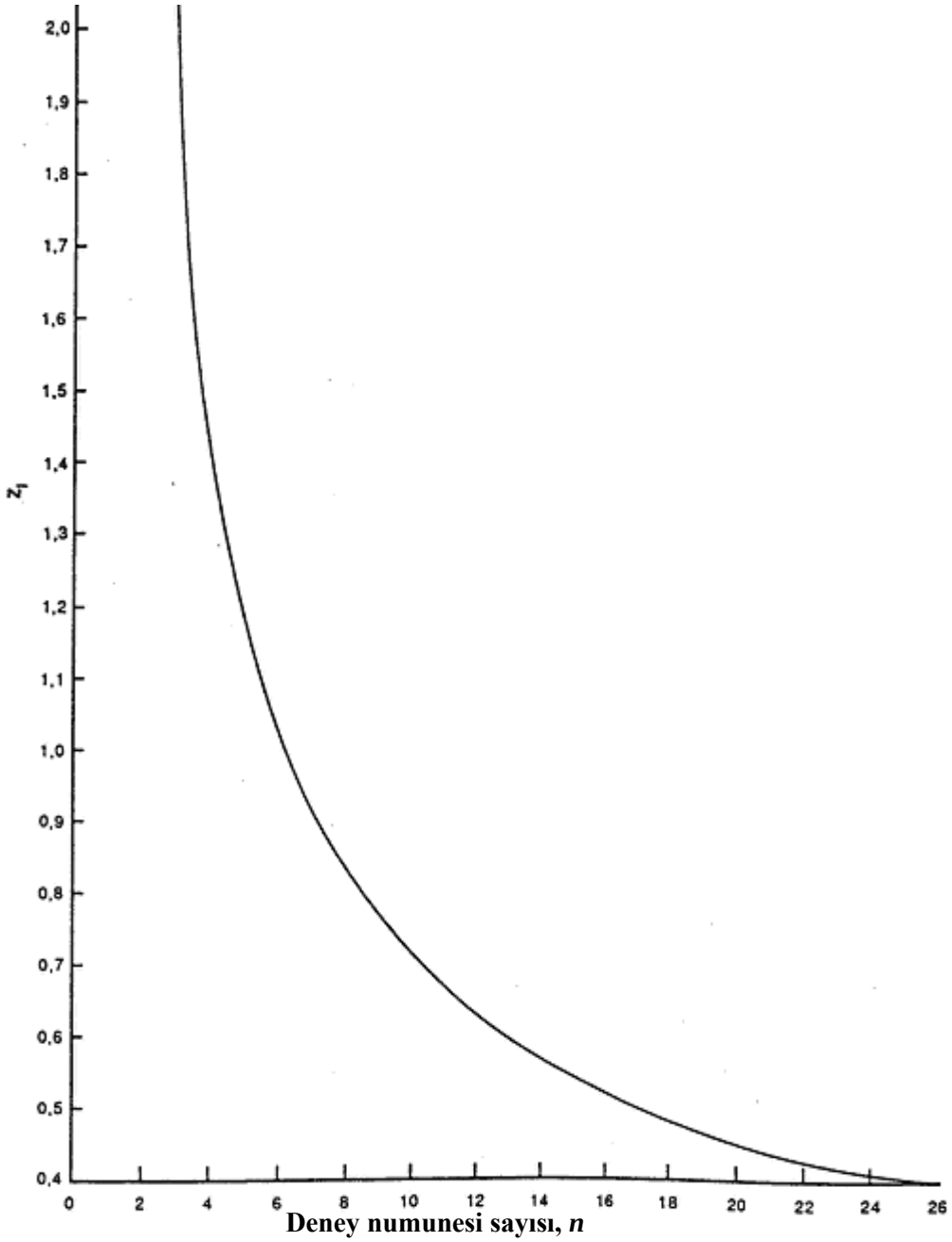



Şekil 6.7 Şekil parametresinin %90 güven aralığı için hesaplamada kullanılan *W* parametrelerinin değişimi [35].

Ölçek parametresinin %90 güven aralığı içerisinde hesaplanması için aşağıdaki bağıntılardan yararlanılır.

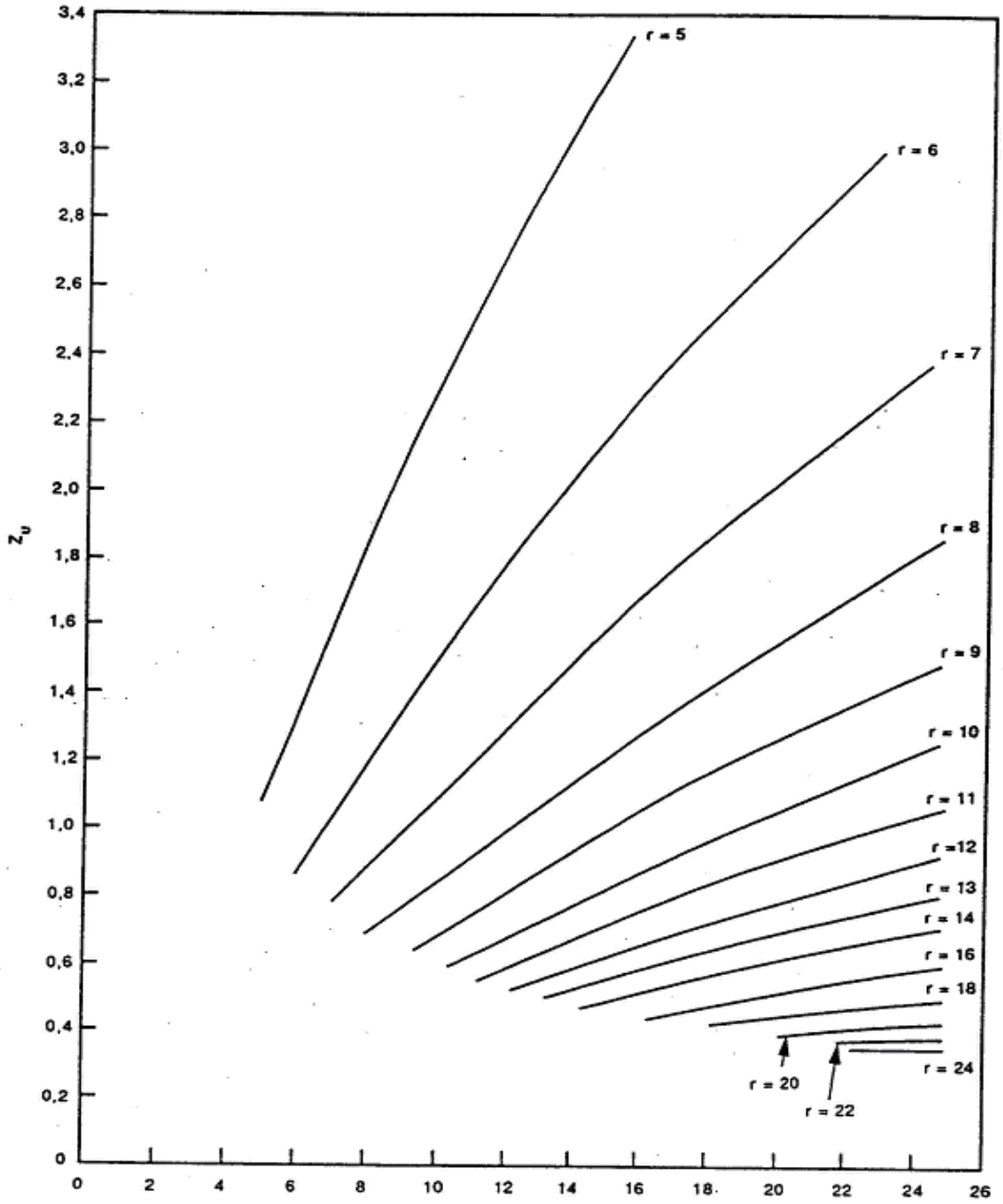
$$\alpha_l = \hat{\alpha} . \exp\left[ -\frac{Z_l}{\hat{\beta}} \right]$$
$$\alpha_u = \hat{\alpha} . \exp\left[ -\frac{Z_u}{\hat{\beta}} \right] \qquad (6.22)$$

Ölçek parametresinin alt limit, $\alpha_l$, ve üst limit, $\alpha_u$, değerlerinin hesaplanması için aşağıda verilen iki farklı grafikten yararlanılır.




Şekil 6.8 % 90 güven aralığında ölçek parametresinin alt değerinin hesabında kullanılan $Z_l$ parametresinin değişimi [35].

Ölçek parametresinin üst limitinin hesaplanmasında kullanılan $Z_u$ parametresinin deney numunesi sayısına bağlı olarak değişimi ağaşığıdaki şekilde verilmiştir [35].




Şekil 6.9 % 90 güven aralığında ölçek parametresinin üst değerinin hesabında kullanılan $Z_u$ parametresinin numune sayısına bağlı olarak değişimi [35]

## 6.4 Elektriksel Yalıtım Sistemlerinde Kullanılan Yaşlanma Modelleri ve Model Parametrelerinin Hesaplanması

Bir yaşlanma modeli (failure model), zorlanma seviyesi ile arızaya kadar geçen süre arasındaki ilişkiyi gösteren bir matematiksel ifadedir. Genel olarak gerilim seviyesi azaldıkça, arızaya kadar geçen süre artmaktadır. Yaşlanma deneylerinde birden fazla deney numunesinin kullanılması ve bu deney numunelerinin birden fazla deney gerilimine tabi tutulması temel prensip olarak düşünülebilir. Arızaya kadar geçen süreler raslantı değişkeni olarak düşünülecek olursa, bu durumu temsil edebilecek en iyi arıza modelinin bulunması oldukça güçtür. Eksi üs modeli (inverse power model) ve üstel model (exponential model) elektriksel yalıtım sistemlerinin yaşlanma değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılan tek faktöre bağlı yaşlanma modelleri arasında yer almaktadır [15].

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, eksi üs modeli aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$L = k.U^{-n} \tag{6.23}$$

burada;

L :U geriliminde arızaya kadar geçen süre,
U :Gerilim,
k :Sabit,
n :Sabit.

Üstel model ise;

$$L = c.e^{-kU} \tag{6.24}$$

burada;

L :U geriliminde arızaya kadar geçen süre,
U :Gerilim,
c :Sabit,
k :Sabit.

Yukarıda tanımlanan modellerde k, c ve n sabit değerler olup, deney verileri yardımıyla hesaplanır.

Bir elektriksel yalıtım sistemi üzerine yapılan hızlandırılmış ömür deneyi sonrası elde edilen verilerin analizinde izlenecek adımları bu bölümdeki açıklamalara dayanarak, aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1) Deney verilerini doğru bir şekilde temsil eden bir olasılık dağılımının seçilmesi gereklidir. Katı yalıtım sistemleri üzerine yapılan deneylerden elde edilen deney verileri genellikle weibull ve lognormal dağılımlar yardımıyla temsil edilirler.
2) Uygun olasılık dağılımı seçildikten sonra dağılım parametrelerinin ve bu parametrelerin güven aralıklarının tahmin edilmesi gereklidir.
3) Üçüncü ve son olarak ise hızlandırılmış deney verilerinden yararlanarak normal çalışma koşullarındaki model sabitlerinin tahmin edilmesidir [31].

Bundan sonraki kısımda yalıtım sisteminin yaşlanmasını temsil eden yaşlanma model parametrelerinin tahmin edilmesi (hesaplanması) üzerinde durulacaktır. Yalıtım sisteminin arızalanma modeli olarak eksi üs modeli seçilecek ve verilen deney sonuçlarından yararlanarak model parametreleri ve deney numunesinin belirli çalışma koşullarındaki ömrü belirli güven aralığı içerisinde hesaplanacaktır.

### 6.4.1 Deney Verilerinin Arıza Modellerine Uydurulması (Model Parametrelerinin Hesaplanması)

Arıza modelindeki sabitlerin hesaplanmasında grafiksel veya sayısal yöntemler kullanılır. Bu bölümde sadece nümerik çözümler üzerinde durulacaktır ve dağılım olarak logaritmik normal dağılım kullanılacaktır. Arıza modellerindeki model sabitlerinin tahmin edilmesi (hesaplanması) için öncelikle verilen arıza modeli lineer bir forma dönüştürülür ve daha sonra lineer regresyon yöntemleri uygulanır.

Eksi üs modelinin lineerleştirilmiş hali aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\log(L) = \log(k.U^{-N}) \rightarrow \log L = \log k - n.\log U \tag{6.25}$$

yukarıdaki ifade de,

$$\begin{aligned} M(X) &= A + BX \\ M(X) &= \log L = Y \\ X &= \log U \\ B &= -n \\ A &= \log k \end{aligned} \tag{6.26}$$

ile temsil edilebilir. Yukarıdaki model parametreleri lineer regresyon yöntemleri kullanılarak hesaplanabilir. Herhangi bir U geriliminde logL değerinin normal dağılım gösterdiği varsayılacaktır.

### 6.4.1.1 Sayısal Yöntemler Kullanılarak Model Parametrelerinin Tahmini

Elektriksel yalıtım sistemleri için kullanılan arıza model parametrelerinin tahmininde kullanılan en yaygın sayısal yöntem En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY) 'dir. Bu yöntemin yukarıdaki eşitliğe uygulanması için;

1 Her bir deney geriliminin doğal logaritması alınmalıdır,

$$X = \log U \tag{6.27}$$

2 Deneye tabi tutulan numuneler için verilen arızalanma sürelerinin doğal logaritması alınır.

$$Y = \log L \tag{6.28}$$

Her bir deney numunesi için elde edilen *X* ve *Y* değerleri kullanılarak

$$\sum X, \sum Y, \sum X^2, \sum Y^2, \sum (XY)$$

ifadeleri hesaplanır. Her bir deney geriliminde kullanılan deney numunelerinin eşit sayıda olması gerekmez.

Eksi üs modelinin lineerleştirilmiş halindeki A ve B katsayılarının hesabı için, N deney numunesi sayısını göstermek üzere, aşağıdaki bağıntılar kullanılabilir.

$$b = \frac{N.\sum (XY) - \sum (X).\sum (Y)}{N.\sum (X^2) - (\sum X)^2} \tag{6.29}$$

$$a = (\sum Y - b.\sum X) / N \tag{6.30}$$

Yukarıdaki katsayılar hesaplandıktan sonra verilen herhangi bir $V_a$ geriliminde, deney numunelerine ait ortalama logaritmik ömür değeri,

$$m(U_a) = a + b.\log(U_a) \tag{6.31}$$

yardımıyla kolaylıkla hesaplanabilir.

### 6.4.1.2 Belirli Gerilim Değeri İçin Güven Aralıklarının Hesaplanması

Normal dağılım için, model parametrelerinin güven aralıkları hesaplanırken öncelikle verilere ait standart sapma değeri hesaplanmalıdır.

$$s = \left(\sum [Y - (a + bX)]^2 / (N - 2)\right)^{0.5} \tag{6.32}$$

Verilen herhangibir $U_a$ gerilimi için, $X_a = \log U_a$ olmak üzere,

Tablo 6.3 Normal dağılım için güven aralıklarının hesabında kullanılan *t-istatistiği*

| N-2 | $t'_{N-2,90}$ | $t_{N-2,90}$ , $t'_{N-2,95}$ | $t_{N-2,95}$ | $t'_{N-2,99}$ | $t_{N-2,99}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.078 | 6.314 | 12.710 | 31.820 | 63.660 |
| 2 | 1.886 | 2.920 | 4.303 | 6.965 | 9.925 |
| 3 | 1.638 | 2.353 | 3.182 | 4.541 | 5.841 |
| 4 | 1.533 | 2.132 | 2.776 | 3.747 | 4.604 |
| 5 | 1.476 | 2.015 | 2.571 | 3.365 | 4.032 |
| 6 | 1.440 | 1.943 | 2.447 | 3.143 | 3.707 |
| 7 | 1.415 | 1.895 | 2.365 | 2.998 | 3.499 |
| 8 | 1.397 | 1.860 | 2.306 | 2.896 | 3.355 |
| 9 | 1.383 | 1.833 | 2.262 | 2.821 | 3.250 |
| 10 | 1.372 | 1.812 | 2.228 | 2.764 | 3.169 |
| 11 | 1.363 | 1.796 | 2.201 | 2.718 | 3.106 |
| 12 | 1.356 | 1.782 | 2.179 | 2.681 | 3.055 |
| 13 | 1.350 | 1.771 | 2.160 | 2.650 | 3.012 |
| 14 | 1.345 | 1.761 | 2.145 | 2.624 | 2.977 |
| 15 | 1.341 | 1.753 | 2.131 | 2.602 | 2.947 |
| 16 | 1.337 | 1.746 | 2.120 | 2.583 | 2.921 |
| 17 | 1.333 | 1.740 | 2.110 | 2.567 | 2.898 |
| 18 | 1.330 | 1.734 | 2.101 | 2.552 | 2.878 |
| 19 | 1.328 | 1.729 | 2.093 | 2.539 | 2.861 |
| 20 | 1.325 | 1.725 | 2.086 | 2.528 | 2.845 |
| 21 | 1.323 | 1.721 | 2.080 | 2.518 | 2.831 |
| 22 | 1.321 | 1.717 | 2.074 | 2.508 | 2.819 |
| 23 | 1.319 | 1.714 | 2.069 | 2.500 | 2.807 |
| 24 | 1.318 | 1.711 | 2.064 | 2.492 | 2.797 |
| 25 | 1.316 | 1.708 | 2.060 | 2.485 | 2.787 |
| 26 | 1.315 | 1.706 | 2.056 | 2.479 | 2.779 |
| 27 | 1.314 | 1.703 | 2.052 | 2.473 | 2.771 |
| 28 | 1.313 | 1.701 | 2.048 | 2.467 | 2.763 |
| 29 | 1.311 | 1.699 | 2.045 | 2.462 | 2.756 |
| 30 | 1.310 | 1.697 | 2.042 | 2.457 | 2.750 |
| 40 | 1.303 | 1.684 | 2.021 | 2.423 | 2.704 |
| 50 | 1.298 | 1.676 | 2.009 | 2.403 | 2.678 |
| 60 | 1.296 | 1.671 | 2.000 | 2.390 | 2.660 |
| 80 | 1.292 | 1.664 | 1.990 | 2.374 | 2.639 |
| 100 | 1.290 | 1.660 | 1.984 | 2.365 | 2.626 |
| 200 | 1.286 | 1.653 | 1.972 | 2.345 | 2.601 |
| 500 | 1.283 | 1.648 | 1.965 | 2.334 | 2.586 |
| $\infty$ | 1.282 | 1.645 | 1.960 | 2.326 | 2.576 |

$$C(U_a) = \frac{(X_a - (\sum X / N))^2}{\sum X^2 - (\sum X)^2 / N} \tag{6.33}$$

faktörü hesaplanır. Hangi gerilimde güven aralığının hesaplanması isteniyorsa o gerilim için yukarıdaki faktör hesaplanmalıdır.

Deney numunelerinin ortlalama logaritmik ömrüne karşılık gelen alt $m_L(U_a)$ ve üst $m_U(U_a)$ güven aralıklı ortalama ömür değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$m_U(U_a) = (a + bX_a) + t_{N-2}.s((1/N) + C(U_a))^{0.5} \tag{6.34}$$

$$m_L(U_a) = (a + bX_a) - t_{N-2}.s((1/N) + C(U_a))^{0.5} \tag{6.35}$$

şeklinde hesaplanır. Yukarıdaki ifadelerde $t_{N-2}$ değeri %90, %95, %99 güven aralığı için verilen t istatistiğidir [32].

### 6.5 Örnek Veri Analizi

Bu bölümde 25 adet aynı koşullarda üretilmiş epoksi reçine deney numuneleri üzerine yapılan hızlandırılmış ömür deneyi verilerinin istatistiksel analizi yapılacaktır. Deneylerin hızlandırılması işlemi numunelere uygulanan gerilim seviyeri değiştirilerek sağlanmıştır. Numunelere uygulanan deney gerilimleri 26, 28, 30 ve 32 kV olarak verilmiş ve Tablo 6.4'te verilen sürelerin sonunda tüm deney numunelerinin kullanılmaz duruma geldiği varsayılmıştır (no censored).

Yalıtım sistemleri üzerine uygulanan hızlandırılmış ömür deneylerinde tüm numunelerin arızalanmasını beklemek uzun sürebileceğinden pek pratik bir çözüm olmayabilir. Bu yüzden, deneye tabi tutulan numunelerin belirli aralıklarla ölçülen belirli değerleri (örnegin numunenin gösterdiği kısmi boşalma yük miktarı, kaçak akım miktarı gibi büyüklükler) yaşlanma durumu için referans olarak kabul edilebilir. Yani, ölçülen bu büyüklükler belirli değerlere eriştiğinde (end point criteria) numuneler arızalanmış kabul edilebilirler.

Deney numunelerini temsilen modeli olarak eksi üs modeli kullanılacak ve model parametrelerinin hesaplanmasında en küçük kareler yönteminden faydalanılacaktır. Model parametrelerinin hesaplanması için gerekli işlemler excell yardımıyla yapılmış ve parametre hesabında kullanılacak değerler ağağıdaki Tablo 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.4 Epoksi reçine deney numunelerine ait deney verileri [15]

| **Uygulanan Gerilim (kV)** | **Deney Numunesi Numarası** | **Arızalanma Süresi, *L* (dakika)** | **Birikmeli olasılık değeri, $P_j$** |
|---|---|---|---|
| 26 | 1 | 17561 | 0.25 |
| 26 | 2 | 73648 | 0.50 |
| 26 | 3 | 77509 | 0.75 |
| | | | |
| 28 | 1 | 42319 | 0.16 |
| 28 | 2 | 46848 | 0.33 |
| 28 | 3 | 47031 | 0.50 |
| 28 | 4 | 60516 | 0.66 |
| 28 | 5 | 69731 | 0.83 |
| | | | |
| 30 | 1 | 20464 | 0.09 |
| 30 | 2 | 28361 | 0.18 |
| 30 | 3 | 30184 | 0.27 |
| 30 | 4 | 30154 | 0.36 |
| 30 | 5 | 31206 | 0.45 |
| 30 | 6 | 37704 | 0.54 |
| 30 | 7 | 38565 | 0.64 |
| 30 | 8 | 49349 | 0.73 |
| 30 | 9 | 49706 | 0.82 |
| 30 | 10 | 51698 | 0.90 |
| | | | |
| 32 | 1 | 10116 | 0.12 |
| 32 | 2 | 13635 | 0.25 |
| 32 | 3 | 22905 | 0.37 |
| 32 | 4 | 26354 | 0.50 |
| 32 | 5 | 27682 | 0.62 |
| 32 | 6 | 33250 | 0.75 |
| 32 | 7 | 39748 | 0.87 |

Eksi üs modelinin lineer halindeki A ve B katsayılarını yukarıdaki veriler yardımıyla hesaplayabiliriz. B katsayısı ( doğrunun eğimi) aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanacak olursa;

$$b = \frac{N.\sum(XY) - \sum(X).\sum(Y)}{N.\sum(X^2) - (\sum X)^2} \tag{6.36}$$

$$b = \frac{25(507.7105116) - (111.7879726)(113.5625279)}{25(499.88282) - (111.7879726)^2} = -4.1601733$$

A katsayısı ise (doğrunun kesim noktası);

$$a = (\sum Y - b.\sum X)/N \tag{6.37}$$

Tablo 6.5 Yaşlanma model parametrelerinin hesaplanmasında kullanılacak değerler

| No | Gerilim (U) | X=log U | L (dk) | Y=logL | X*X | Y*Y | X*Y |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 26000 | 4.414973348 | 17561 | 4.244549243 | 19.49199 | 18.01619828 | 18.73957178 |
| 2 | 26000 | 4.414973348 | 73648 | 4.867160958 | 19.49199 | 23.68925579 | 21.48838591 |
| 3 | 26000 | 4.414973348 | 77509 | 4.889352134 | 19.49199 | 23.90576429 | 21.58635936 |
| TOPLAM | | 13.24492004 | 168718 | 14.00106233 | 58.475969 | 65.61121835 | 61.81431705 |
| | | | | | | | |
| 1 | 28000 | 4.447158031 | 42319 | 4.626535397 | 19.777215 | 21.40482978 | 20.57493405 |
| 2 | 28000 | 4.447158031 | 46848 | 4.670691055 | 19.777215 | 21.81535493 | 20.77130124 |
| 3 | 28000 | 4.447158031 | 47031 | 4.672384213 | 19.777215 | 21.83117423 | 20.77883098 |
| 4 | 28000 | 4.447158031 | 60516 | 4.781870214 | 19.777215 | 22.86628275 | 21.26573253 |
| 5 | 28000 | 4.447158031 | 69731 | 4.843425893 | 19.777215 | 23.45877438 | 21.53948036 |
| TOPLAM | | 22.23579016 | 266445 | 23.59490677 | 98.886073 | 111.3764161 | 104.9302792 |
| | | | | | | | |
| 1 | 30000 | 4.477121255 | 20464 | 4.310990527 | 20.044615 | 18.58463933 | 19.30082732 |
| 2 | 30000 | 4.477121255 | 28361 | 4.45272154 | 20.044615 | 19.82672911 | 19.93537425 |
| 3 | 30000 | 4.477121255 | 30184 | 4.479776792 | 20.044615 | 20.06840011 | 20.05650389 |
| 4 | 30000 | 4.477121255 | 30154 | 4.47934493 | 20.044615 | 20.06453101 | 20.0545704 |
| 5 | 30000 | 4.477121255 | 31206 | 4.494238104 | 20.044615 | 20.19817614 | 20.12124894 |
| 6 | 30000 | 4.477121255 | 37704 | 4.576387427 | 20.044615 | 20.94332188 | 20.48904142 |
| 7 | 30000 | 4.477121255 | 38565 | 4.586193336 | 20.044615 | 21.03316931 | 20.53294366 |
| 8 | 30000 | 4.477121255 | 49349 | 4.693278357 | 20.044615 | 22.02686173 | 21.01237628 |
| 9 | 30000 | 4.477121255 | 49706 | 4.696408815 | 20.044615 | 22.05625576 | 21.02639173 |
| 10 | 30000 | 4.477121255 | 51698 | 4.713473742 | 20.044615 | 22.21683472 | 21.10279347 |
| TOPLAM | | 44.77121255 | 367391 | 45.48281357 | 200.44615 | 207.0189191 | 203.6320714 |
| | | | | | | | |
| 1 | 32000 | 4.505149978 | 10116 | 4.005008821 | 20.296376 | 16.04009565 | 18.0431654 |
| 2 | 32000 | 4.505149978 | 13635 | 4.134655142 | 20.296376 | 17.09537315 | 18.62724152 |
| 3 | 32000 | 4.505149978 | 22905 | 4.359930296 | 20.296376 | 19.00899219 | 19.64213988 |
| 4 | 32000 | 4.505149978 | 26354 | 4.420846542 | 20.296376 | 19.54388414 | 19.9165767 |
| 5 | 32000 | 4.505149978 | 27682 | 4.442197464 | 20.296376 | 19.73311831 | 20.01276581 |
| 6 | 32000 | 4.505149978 | 33250 | 4.52179165 | 20.296376 | 20.44659972 | 20.37134955 |
| 7 | 32000 | 4.505149978 | 39748 | 4.599315281 | 20.296376 | 21.15370106 | 20.72060514 |
| TOPLAM | | 31.53604985 | 173690 | 30.4837452 | 142.07463 | 133.0217642 | 137.333844 |
| | | | | | | | |
| **GENEL TOPLAM** | | 111.7879726 | 976244 | 113.5625279 | 499.88282 | 517.0283177 | 507.7105116 |

yardımıyla hesaplanır.

$$a = \frac{(113.5625279 - (-4.1601733).(111.7879726)}{25} = 23.1447947$$

olarak hesaplanır.

Yukarıda hesaplanan parametreler Eksi üs modelinin lineerleştirilmiş halinde yerine yazılacak olursa aşağıda verilen gerilimle ortalama logaritmik ömür arasındaki bağıntı elde edilir.

$$m(U_a) = a + b.\log(U_a) = 23.1447947 - 4.1601733 .\log(U_a)$$

Elde edilen logaritmik ömür değerinin antilogaritması alınarak normal ömür süresi hesaplanabilir.

Örneğin 28 kV için;

$$m(28\,kV) = 23.1447947 - 4.1601733 .\log(28000) = 4.6438466$$

Bu değerin antilogaritması alınarak;

$L(28\,kV) = \log^{-1}(4.64384660 = 44039.93\,dk$ olarak hesaplanır.

Tablo 6.6 Gerilim değerlerine karşılık gelen ömür değerleri

| $U_a$(kV) | $m(U_a)$ | $Log^{-1}[m(U_a)]$, dk | L (gün) |
|---|---|---|---|
| 10 | 6.5041015 | 3.192.284 | 2217 |
| 15 | 5.7715313 | 590.923 | 410.4 |
| 20 | 5.2517645 | 178.552 | 123.9 |
| 25 | 4.8486021 | 70.567 | 49 |
| 30 | 4.5191943 | 33.051 | 23.3 |
| 35 | 4.2406841 | 17.405 | 12 |
| 40 | 3.9994275 | 9.987 | 6.9 |
| 45 | 3.7866242 | 6.118 | 4.2 |
| 50 | 3.5962651 | 3.947 | 2.7 |
| 60 | 3.2668574 | 1.849 | 1.3 |

Eksi üs modelindeki bilinmeyen parametreler aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$L = k.U^{-n}, b = -n, a = \log(k)$ olduğuna göre;

$a = \log(k) = 23.1447947 = \log(k) \rightarrow k = 1.3957087 .10^{23}$

$b = -n = -4.1601733 \rightarrow n = 4.1601733$

25 adet deney numunesi için verilen Eksi Üs Modeli aşağıdaki gibi verilebilir.

$$L = k.U^{-n} = 1,3957087 .10^{23}.U^{-4.1601733} (dk)$$

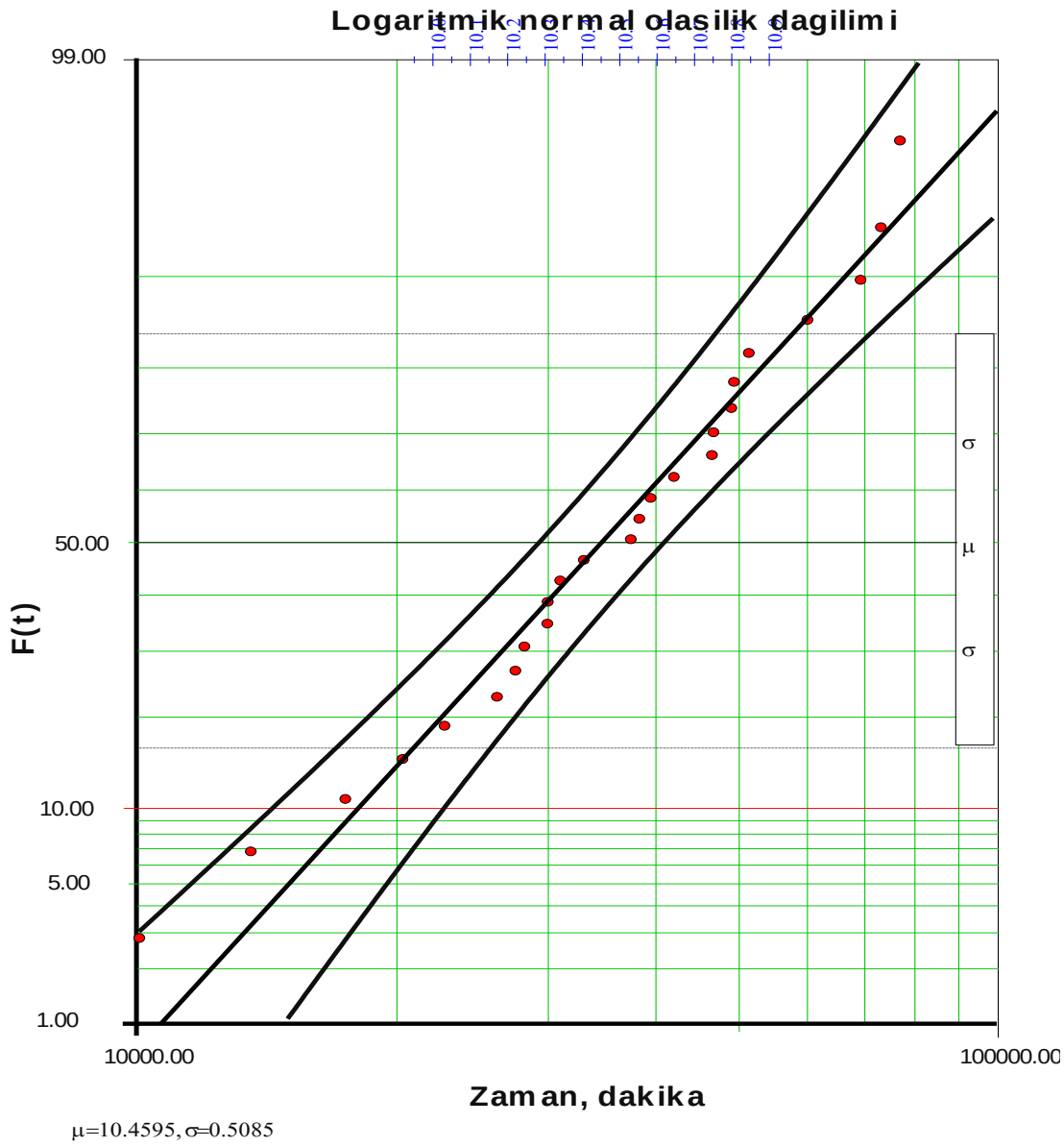
olarak hesaplanır.

Standart sapma, $C(U_a)$ katsayısı ve logatirmik ortalama ömür için güven aralıkları aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$s = \left(\sum [Y - (a + bX)]^2 /(N - 2)\right)^{0.5} \quad (6.38)$$

Tablo 6.7 Güven aralıklarının hesaplanmasında kullanılacak veriler

| **Gerilim (U)** | **L(dk)** | **Y=logL** | **m = a + b.log(U)** | **Y-m** | **(Y-m)^2** |
|---|---|---|---|---|---|
| 26000 | 17561 | 4.244549243 | 4.777740458 | -0.53319 | 0.284292871 |
| 26000 | 73648 | 4.867160958 | 4.777740458 | 0.08942 | 0.007996026 |
| 26000 | 77509 | 4.889352134 | 4.777740458 | 0.111612 | 0.012457166 |
| 28000 | 42319 | 4.626535397 | 4.643846597 | -0.01731 | 0.000299678 |
| 28000 | 46848 | 4.670691055 | 4.643846597 | 0.026844 | 0.000720625 |
| 28000 | 47031 | 4.672384213 | 4.643846597 | 0.028538 | 0.000814396 |
| 28000 | 60516 | 4.781870214 | 4.643846597 | 0.138024 | 0.019050519 |
| 28000 | 69731 | 4.843425893 | 4.643846597 | 0.199579 | 0.039831895 |
| 30000 | 20464 | 4.310990527 | 4.519194395 | -0.2082 | 0.043348851 |
| 30000 | 28361 | 4.45272154 | 4.519194395 | -0.06647 | 0.004418641 |
| 30000 | 30184 | 4.479776792 | 4.519194395 | -0.03942 | 0.001553747 |
| 30000 | 30154 | 4.47934493 | 4.519194395 | -0.03985 | 0.00158798 |
| 30000 | 31206 | 4.494238104 | 4.519194395 | -0.02496 | 0.000622816 |
| 30000 | 37704 | 4.576387427 | 4.519194395 | 0.057193 | 0.003271043 |
| 30000 | 38565 | 4.586193336 | 4.519194395 | 0.066999 | 0.004488858 |
| 30000 | 49349 | 4.693278357 | 4.519194395 | 0.174084 | 0.030305226 |
| 30000 | 49706 | 4.696408815 | 4.519194395 | 0.177214 | 0.031404951 |
| 30000 | 51698 | 4.713473742 | 4.519194395 | 0.194279 | 0.037744465 |
| 32000 | 10116 | 4.005008821 | 4.402590048 | -0.39758 | 0.158070832 |
| 32000 | 13635 | 4.134655142 | 4.402590048 | -0.26793 | 0.071789114 |
| 32000 | 22905 | 4.359930296 | 4.402590048 | -0.04266 | 0.001819854 |
| 32000 | 26354 | 4.420846542 | 4.402590048 | 0.018256 | 0.0003333 |
| 32000 | 27682 | 4.442197464 | 4.402590048 | 0.039607 | 0.001568747 |
| 32000 | 33250 | 4.52179165 | 4.402590048 | 0.119202 | 0.014209022 |
| 32000 | 39748 | 4.599315281 | 4.402590048 | 0.196725 | 0.038700817 |




Şekil 6.10 Deney verilerine ait logaritmik normal olasılık çizimi (%95 güven aralığı ile) [33].

Deney verilerine ait standart sapma değeri,

$$s = \left(\sum \left[Y - (a + bX)\right]^2 /(N - 2)\right)^{0.5} = \left((0.810701439 \quad /(25 - 2)\right)^{0.5} = 0.1877442$$

olarak hesaplanır.

Hangi gerilim değeri için güven aralığı hesaplanacak ise, o gerilime ait $C(U_a)$ katsayıları hesaplanmalıdır. Örnegin 26 kV için,

$$C(U_a) = \frac{(X_a - (\sum X / N))^2}{\sum X^2 - (\sum X)^2 / N}$$

$$C(26\,kV) = \frac{(4.414973348 - (111.7879726 / 25))^2}{499.88282 - (111.7879726)^2 / 25} = 0.1538152$$

olarak bulunur. Aşağıdaki tabloda bazı deney gerilimlerine ait $C(U_a)$ katsayıları verilmiştir.

Tablo 6.8 Değişik gerilim değerleri için $C(V_a)$ katsayıları

| $U_a$ (kV) | $C(U_a)$ |
|---|---|
| 10 | 10.695486 |
| 20 | 1.3982813 |
| 30 | 0.0015098 |
| 40 | 0.8197790 |
| 50 | 2.4887337 |

Deney numunelerinin ortalama logaritmik ömrüne karşılık gelen alt ve üst güven aralıklarının hesabı için gerekli formüller aşağıdaki gibiydi.

$$m_U(U_a) = (a + bX_a) + t_{N-2}.s((1/N) + C(U_a))^{0.5} \quad (6.39)$$

$$m_L(U_a) = (a + bX_a) - t_{N-2}.s((1/N) + C(U_a))^{0.5} \quad (6.40)$$

Örneğin 30 kV değerine karşılık gelen %95 güven aralığı değerleri;

$$m_U(30\,kV) = (23.1447947 - 4.1601733 * \log(30000) + 2.069 * 0.1877442 (1/25 + 0.0015098)^{0.5} = 4.5983355$$

$$m_L(30\,kV) = (23.1447947 - 4.1601733 * \log(30000) - 2.069 * 0.1877442 (1/25 + 0.0015098)^{0.5} = 4.4400532$$

Bu değerlerin antilogaritması alınarak 30 kV gerilimi için %95 güven aralığı hesaplanmış olur.

$$L_{0.95U} = \log^{-1}(4.5983355) = 36658.4dk$$

$$L_{0.95L} = \log^{-1}(4.4400532) = 27545.6dk$$

olarak hesaplanır.

# 7. KISMİ BOŞALMA DENEYLERİ

Yüksek gerilim sistemlerinde meydana gelen kısmi boşalmalar, bu sistemlerde kullanılan yalıtkanlarda meydana gelen yerel elektriksel boşalmalardır. Eğer yalıtım sisteminin gösterdiği kısmi boşalma değeri belirli bir değere erişirse, bu boşalmalar o sistem için sürekli hasarlara yol açabilirler. Bu yüzden, yalıtım sisteminin gösterdiği kısmi boşalma değeri ile yalıtkanın ömrü arasında bir ilişkinin kurulması oldukça önemlidir ve son yıllarda bu konu üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmalarda önemli bir artış gözlenmektedir.

Kısmi boşalmaların karakteristik büyüklükleri (genliği, tekrarlanma sıklığı, v.s.) çok hassas ölçüm cihazları yardımıyla ölçülür ve genellikle genlik ölçümleri pikokulon (pC, picocoulomb), cinsinden verilir. Bunun yanı sıra, ölçüm yapılan deney ortamının elektriksel gürültü seviyesi de oldukça önemlidir. Kısmi boşalma ölçü aleti (PD Detector), kısmi boşalma ölçüm sisteminin en önemli parçasını oluşturmaktadır.

Deneysel çalışmada, deney numunelerinin, belirli gerilim değerlerinde göstermiş oldukları kısmi boşalma yük değerlerinin ölçülmesinde HAEFELY marka kısmi boşalma ölçü aleti (Partial Discharge Detector Type 561) kullanılmıştır. Bu ölçü aleti yardımıyla, istenirse, transformatörler, elektrik makineleri, kablolar gibi aygıt ve donanımların belirli çalışma koşullarındaki kısmi boşalma değerleri belirli bir duyarlılıkla ölçülebilir. Kalibrasyon işleminin yapılmasında HAEFELY marka kalibratör (PD Calibrator Type 451) kullanılmıştır.

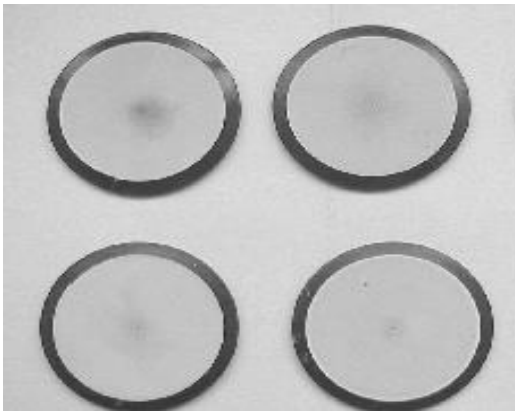
Yapılan kısmi boşalma ölçümleri, gürültü seviyesi belirli bir eşik değerin altında olan (ekranlanmış deney odası) deney ortamında yapılmıştır. Yapılan deneylerde, ekranlı deney odası içinde bulunan, özel yalıtımlı (kısmi boşalmasız 100 kV'ta 1μV'tan küçük) 100 $kV_{eff}$, 20 kVA, 50 Hz'lik bir fazlı, yağlı, yalıtkan gövdeli, geçit izolatörsüz deney transformatörü, bu transformatörün primer gerilimini ayarlayan 380 $V_{eff}$, 22,8 kVA, 50 Hz'lik ayarlı gerilim kaynağı (varyak), 100 $kV_{eff}$, 226 pF'lık ölçü kondansatörü ve 120 $kV_{eff}$, 1007 pF kapasiteli kuplaj kondansatörü kullanılmıştır.

Bu bölümde, epoksi reçineden imal edilmiş 10 cm çapında ve 6,5 mm kalınlığında, disk şeklindeki deney numuneleri üzerine yapılan kısmi boşalma ölçümleri üzerinde durulacaktır. Kısmi boşalma ölçümlerinde karakteristik büyüklük olarak boşalmaların genliği dikkate alınmıştır.

Epoksi reçine deney numunelerinin ömür tahmini için kısmi boşalma yük değerlerinden faydalanılacaktır. Deney numunesinin; belirli bir kısmi boşalma yükünden daha fazla yük değeri göstermesi arıza olarak kabul edilecektir. Bu amaçla yapılan kısmi boşalma deneyi için değişik gerilim seviyelerinde ve değişik gerilim uygulama sürelerinde numunelerin gösterdikleri kısmi boşalma yük değerleri yaşlanma durumu için referans kabul edilecektir.

## 7.1 Deney Numuneleri Ve Deney Montajı

Şekil 7.1'de deneyde kullanılan numunelere ait görüntüler bulunmaktadır.



a)



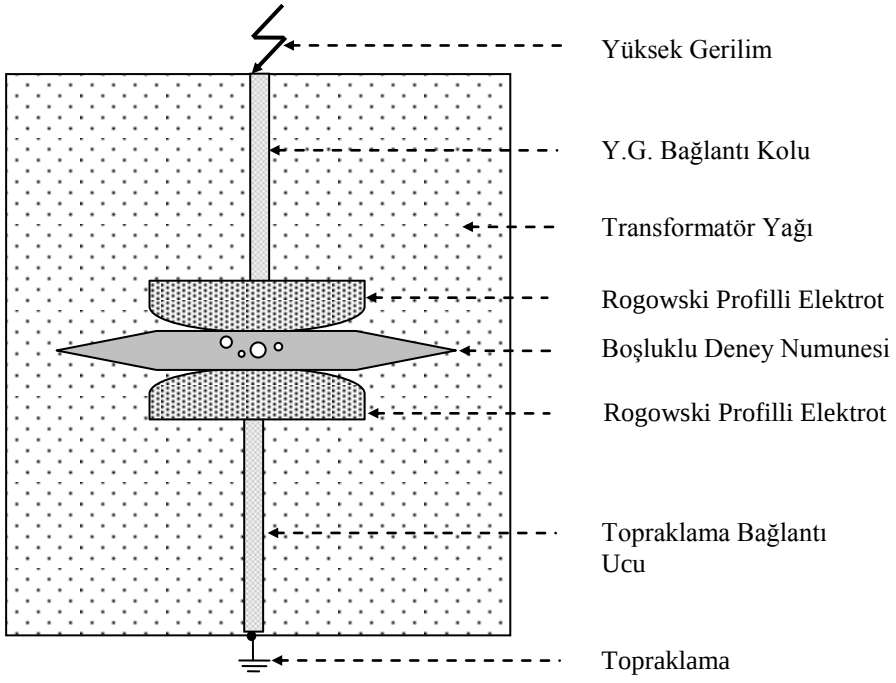
b)

Şekil 7.1 a) Epoksi reçine deney numuneleri
b) Deney numuneleri ve yağ kapları

Deney numuneleri, belirli elektrot açıklığına kadar alanı düzgün kabul edilen Rogowski profilli elektrot sistemi arasına yerleştirilmiştir. Şekil 7.2 a)'da deneyde kullanılan elektrotlar ve bu elektrotlar arasına simetrik olarak yerleştirilmiş deney numunesi görülmektedir. Deney esnasında, deney numunesindeki yüzeysel boşalmaları engellemek için elektrot sisteminin tamamı delinme dayanımı yüksek transformatör yağı içine konulmuştur. Şekil 7.2 b)'de ise deney düzenine ait kısımlar gösterilmiştir.



**a)**




**b)**

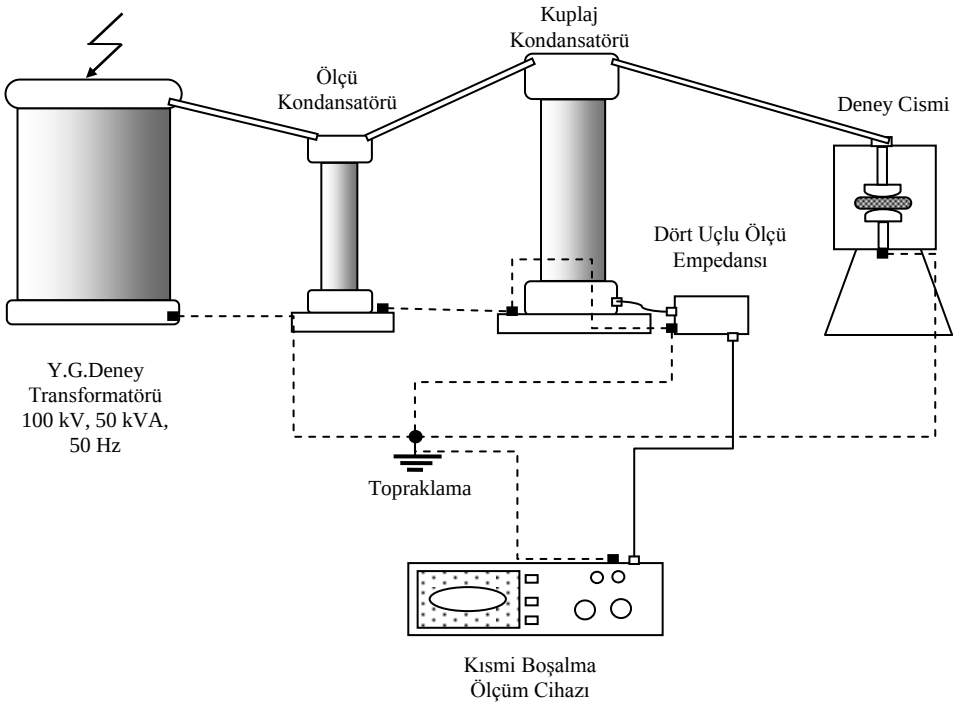
Şekil 7.2 a) Rogowski profilli elektrot içerisinde bulunan deney cismi
b) Deney setinin kısımları

## 7.2 Kısmi Boşalma Ölçüm Devresi

Kısmi boşalma ölçüm devresinde; kısmi boşalma değeri ölçülecek deney cismi, kısmi boşalma ölçü aleti, kalibrasyon aleti, kuplaj kondansatörü ve dört uçlu ölçüm empedansı bulunmaktadır.

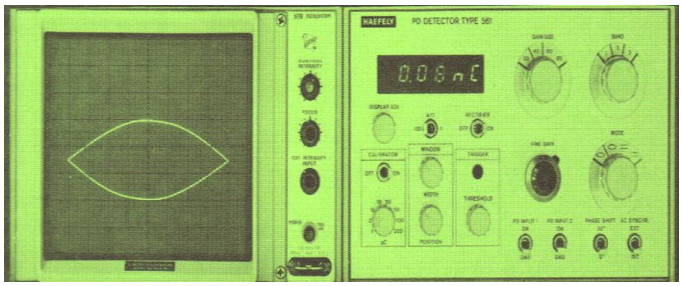


Şekil 7.3 Ekranlı deney odasında kısmi boşalma ölçüm devresinin görünümü




Şekil 7.4 Kısmi boşalma ölçüm deney montajı

Aşağıdaki şekillerde kısmi boşalma ölçü aleti ve kalibrasyon aleti verilmiştir. Kısmi boşalma ölçüm cihazı iki girişli ve 70 kHz ile 400 kHz frekans bandı aralığında ölçüm yapabilen bir alettir. Kalibratör ise 2, 5, 10, 20, 50, 100 ve 200 pC sabit yük değerleri sağlayan bir alettir.







a) b)

Şekil 7.5 a) Kısmi boşalma ölçü aleti
b) Kalibrasyon aleti

### 7.3 Kısmi Boşalma Ölçümleri

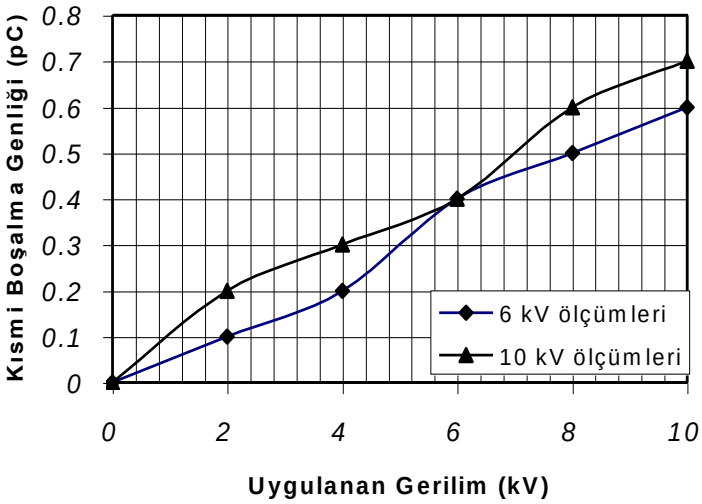
Kısmi boşalma deneyleri, Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda, kısmi boşalma ve korona deneyleri için yapılmış 100 kV'luk ekranlı deney odasında yapılmıştır. Bu odanın zemin, tavan ve duvarları 0,5 mm kalınlığında bakır levhalarla kaplanarak elektrik alanlarına karşı ekranlanmış ve odanın elektrik beslemesi şebekeden gelebilecek parazitlere karşı filtre üzerinden yapılmıştır.

Epoksi reçineden imal edilmiş deney numuneleri üzerine, belirleyici olması bakımından, 10 $kV_{eff}$ gerilim değerlerine kadar ön (başlangıç) kısmi boşalma deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde, prensip olarak, belirli bir alternatif gerilim değerinden başlanmış ve deney numunesi bu gerilime belirli bir süre maruz bırakılmıştır. Bu süre sonunda deney numunesinin belirli gerilim değerlerine kadar kısmi boşalma ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra, gerilim değeri kademeli olarak arttırılmış ve yaklaşık eşit kabul edilebilecek gerilim uygulama süreleri sonunda deney numunesi üzerine yapılan kısmi boşalma ölçümleri tekrarlanmıştır.

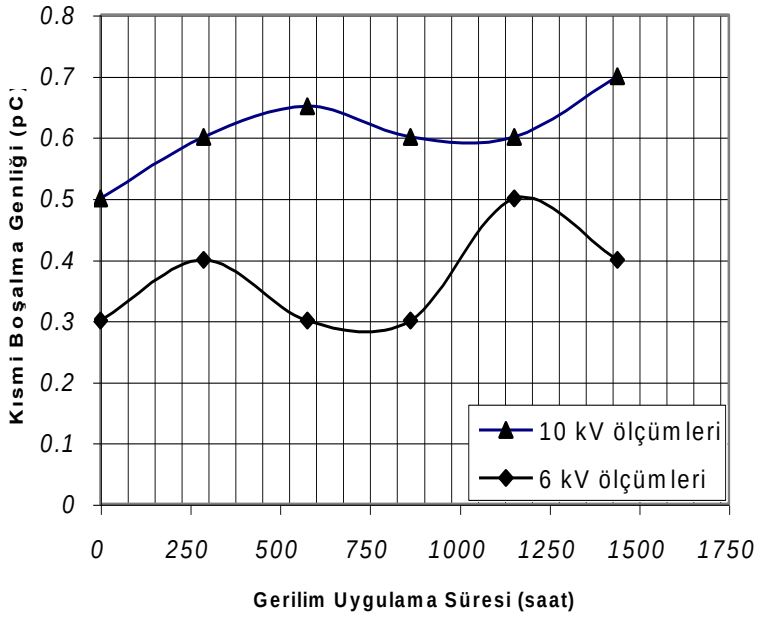
Tablo 7.1 Deney numunesi 6; 6.5; 7; 9 ve 10 $kV_{eff}$ gerilim değerlerine 288 saat maruz bırakıldıktan sonra yapılan kısmi boşalma ölçüm sonuçları

| **Ölçme gerilimi ($kV_{eff}$)** | **6 $kV_{eff}$ Ölçümleri (pC)** | **6,5 $kV_{eff}$ Ölçümleri (pC)** | **7 $kV_{eff}$ Ölçümleri (pC)** | **9 $kV_{eff}$ Ölçümleri (pC)** | **10 $kV_{eff}$ Ölçümleri (pC)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.6 | 0.7 |
| 8 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 |
| 6 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| 4 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| 2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |

Bu kısımda belirtilen ölçümlerde minimum gerilim kademesi olarak 6 $kV_{eff}$ değeri seçilmiş ve aşamalı olarak 6.5; 7; 8; 9 ve 10 $kV_{eff}$ gerilim değerlerine kadar çıkılmıştır. Deney numunesi her bir gerilim değerine yaklaşık 12'şer gün (288 saat) maruz bırakılmış ve bu sürelerin sonunda 10 $kV_{eff}$ gerilim değerine kadar kısmi boşalma ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlere ilişkin sonuçlar ve şekiller tablo 7.1'de ve şekil 7.6 ve şekil 7.7'de verilmiştir.




Şekil 7.6 Uygulanan gerilim ile kısmi boşalma yükü arasındaki değişim




Şekil 7.7 Zaman ile kısmi boşalma miktarındaki değişimin gösterilmesi

Yukarıdaki tablo 7.1'de ve şekillerde görüldüğü gibi deney numunesi (10 cm çapında ve 6,5 mm kalınlığında) üzerine yapılan ön (başlangıç) kısmi boşalma deneylerinin sonucunda daha önce bahsi geçen elektrot sistemi için, 10 $kV_{eff}$ gerilim değerine kadar ki kısmi boşalma değerleri uygulanan gerilim süresinde zamanla değişim göstermemiştir. Ölçülen kısmi boşalma değerlerindeki değişimin görülebilmesi için deney süresinin uzatılması veya daha yüksek gerilimlerde deney yapılması gerekmektedir.

Kısmi boşalma deneylerinin ikinci aşamasında deney numunelerine 10 $kV_{eff}$ gerilim değerinden daha yüksek gerilimler belirli süreler uygulanarak kısmi boşalma ölçümleri tekrarlanmıştır.

Tablo 7.2 Deney cismi devredeyken yapılan kalibrasyon işlemi

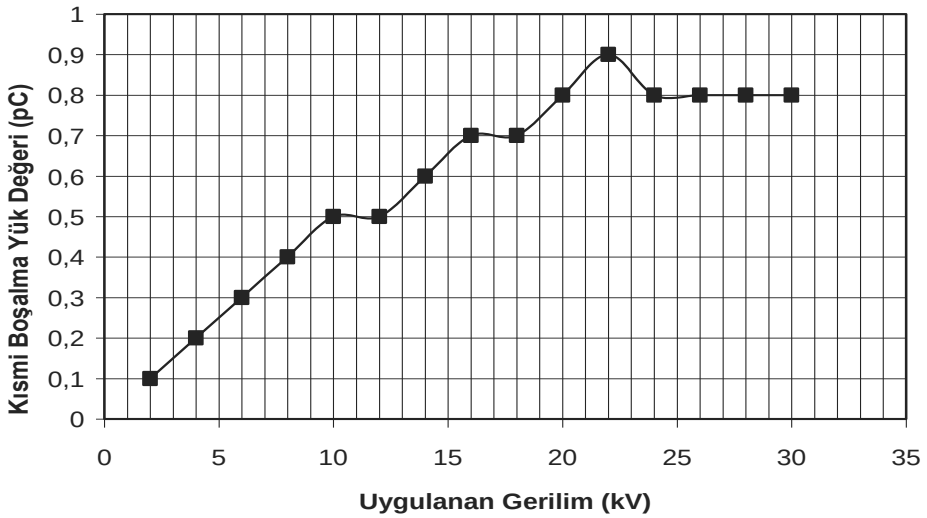
| **Kalibrasyon cihazından verilen yük miktarı (pC)** | **Kısmi boşalma ölçü aletinden okunan yük değeri (pC)** |
|---|---|
| 2 | 2 |
| 5 | 4.7 |
| 10 | 10.3 |
| 20 | 20.2 |
| 50 | 47.5 |
| 100 | 101 |
| 200 | 198 |

Her bir kısmi boşalma ölçme deneyine başlamadan önce, deney cismi devrede iken sistemin kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Kalibrasyon değerleri, ölçü aletinin kataloğunda verilen toleranslar içerisinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Yine, her bir deney öncesi, belirli gerilimlere kadar deney odasının boşta gürültü düzeylerinin belirli değeri aşmamasına dikkat edilmiştir.

Tablo 7.3 Deney odasının belirli bir gerilim değerine kadar göstermiş olduğu boşta gürültü düzeyleri

| **Uygulanan Gerilim (kV)** | **Ölçülen kısmi boşalma genliği (pC)** |
|---|---|
| 30 | 0.8 |
| 28 | 0.8 |
| 26 | 0.8 |
| 24 | 0.8 |
| 22 | 0.9 |
| 20 | 0.8 |
| 18 | 0.7 |
| 16 | 0.7 |
| 14 | 0.6 |
| 12 | 0.5 |
| 10 | 0.5 |
| 8 | 0.4 |
| 6 | 0.3 |
| 4 | 0.2 |
| 2 | 0.1 |

Yukarıdaki ölçüm sonuçlarından görüleceği gibi, deney odasının göstermiş olduğu boşta kısmi boşalma değerleri, 30 kV'a kadar olan gerilimler için, 1 pC değerin altındadır.




Şekil 7.8 Boşta gürültü düzeyinin grafik gösterimi

Kısmi boşalma ölçümlerinde, deney numunesine belirli bir süre belirli bir değerde alternatif gerilim uygulandıktan sonra belirli gerilim değerlerinde kısmi boşalma ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra, deney cismine uygulanan gerilimin uygulanma süresi arttırılarak ölçümler tekrarlanmıştır. Deney numunelerinin gösterdiği kısmi boşalma ölçümlerinde, ölçülen değerler gerilim azaltılırken yapılmıştır.

Tablo 7.4'te 25 kV'luk gerilime kadar deney numunesinin gösterdiği kısmi boşalma değerleri verilmiştir. Deney numunesi 10 $kV_{eff}$ gerilim altında belirli süreler bekletilmiş ve bu süreler sonunda ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler üçer kez tekrarlanmış ve son çevrimdeki ölçümler dikkate alınmıştır.

Tablo 7.4 Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri

| **Uygulanan Gerilim (kV)** | **1. Ölçüm (pC)** | **2. Ölçüm (pC)** | **3. Ölçüm (pC)** |
|---|---|---|---|
| 25 | 24 | 28 | 25,3 |
| 23 | 22,3 | 22,4 | 22,6 |
| 21 | 21,3 | 21,7 | 21,5 |
| 19 | 21 | 20,9 | 21,4 |
| 17 | 20,8 | 20,5 | 20,9 |
| 15 | 21,8 | 20,6 | 20,4 |
| 13 | 21,8 | 21,6 | 20,8 |
| 11 | 18,9 | 19,5 | 17,5 |
| 10 | - | 12,1, | 10,4 |
| 9 | - | - | - |

Yukarıdaki ölçümler yapıldıktan sonra deney numunesi yaklaşık 10 $kV_{eff}$ gerilim altında ve 2'şer saatlik aralıklarla kısmi boşalma değerleri ölçülmüştür.

Tablo 7.5 Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri (2 saat sonra)

| **Uygulanan Gerilim (kV)** | **1. Ölçüm (pC)** | **2. Ölçüm (pC)** | **3. Ölçüm (pC)** |
|---|---|---|---|
| 25 | 24,4 | 26,8 | 23,5 |
| 23 | 22,1 | 22,5 | 22 |
| 21 | 21,3 | 21,7 | 22,1 |
| 19 | 20,9 | 20,4 | 21,4 |
| 17 | 20,8 | 20,5 | 20,8 |
| 15 | 20,7 | 20,3 | 20,7 |
| 13 | 21,3 | 21 | 20,3 |
| 11 | 18,2 | 18,5 | 19 |
| 10 | 11,8 | 13,7 | 14,3 |
| 9 | - | - | - |

Tablo 7.6 Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri

(4 saat sonra)

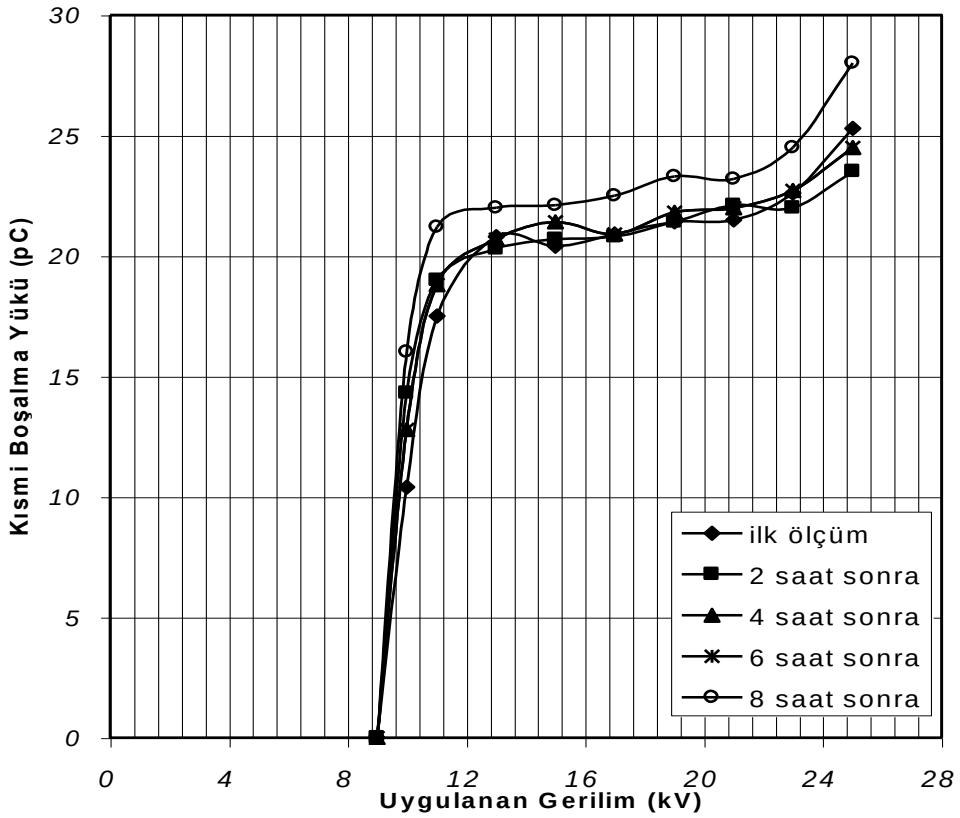
| Uygulanan Gerilim (kV) | 1. Ölçüm (pC) | 2. Ölçüm (pC) | 3. Ölçüm (pC) |
|---|---|---|---|
| 25 | 25 | 25,2 | 24,5 |
| 23 | 23,3 | 22,1 | 22,7 |
| 21 | 21,7 | 22,3 | 22 |
| 19 | 21,9 | 21,4 | 21,8 |
| 17 | 21,8 | 21,2 | 20,9 |
| 15 | 21,5 | 20,6 | 21,4 |
| 13 | 21,3 | 21,2 | 20,7 |
| 11 | 19,1 | 18,3 | 18,8 |
| 10 | 15,3 | 14,8 | 12,8 |
| 9 | - | - | - |

Tablo 7.7 Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri (6 saat sonra)

| Uygulanan Gerilim (kV) | 1. Ölçüm (pC) | 2. Ölçüm (pC) | 3. Ölçüm (pC) |
|---|---|---|---|
| 25 | 25 | 25,2 | 24,5 |
| 23 | 23,3 | 22,1 | 22,7 |
| 21 | 21,7 | 22,3 | 22 |
| 19 | 21,9 | 21,4 | 21,8 |
| 17 | 21,8 | 21,2 | 20,9 |
| 15 | 21,5 | 20,6 | 21,4 |
| 13 | 21,3 | 21,2 | 20,7 |
| 11 | 19,1 | 18,3 | 18,8 |
| 10 | 15,3 | 14,8 | 12,8 |
| 9 | - | - | - |

Tablo 7.8 Deney numunesinin 25 kV'a kadar gösterdiği kısmi boşalma değerleri (8 saat sonra)

| Uygulanan Gerilim (kV) | 1. Ölçüm (pC) | 2. Ölçüm (pC) | 3. Ölçüm (pC) |
|---|---|---|---|
| 25 | 29,8 | 26 | 28 |
| 23 | 24,4 | 23,8 | 24,5 |
| 21 | 24,2 | 23,6 | 23,2 |
| 19 | 22,9 | 23,5 | 23,3 |
| 17 | 21,8 | 21,9 | 22,5 |
| 15 | 22,1 | 22,2 | 22,1 |
| 13 | 23,1 | 22,8 | 22 |
| 11 | 22,1 | 20,6 | 21,2 |
| 10 | 18,1 | 15 | 16 |
| 9 | - | - | - |




Şekil 7.9 Zamana bağlı olarak ve uygulanan gerilimle kısmi boşalma yükündeki değişimler

# 8. SONUÇLAR

Bu çalışmada epoksi reçineden üretilmiş deney numuneleri üzerine yapılan kısmi boşalma temelli hızlandırılmış yaşlanma deneyi üzerinde durulmuştur. Önceki bölümlerde katı yalıtım sistemleri, katı yalıtkanlarda delinme ve yaşlanma, kısmi boşalmaların elektriksel yaşlanma üzerine etkileri, yaşlanma deney verilerinin analizi için gerekli olan istatistiksel dağılımlar, dağılım parametrelerinin tahmini ve katı yalıtkanlar için kullanılan yaşlanma modelleri ve model parametrelerinin hesaplanması üzerinde durulmuştur.

Yaklaşık 6.5 mm kalınlığında ve 10 cm çapındaki epoksi reçine deney numuneleri üzerine yapılan kısmi boşalma ölçümlerindeki deney gerilimleri keyfi seçilmiştir. Uygulanan gerilim ve gerilimin uygulanma süresi ile nunumenin gösterdiği kısmi boşalma yükü arasındaki değişimi görmek bakımından başlangıçta deney gerilimi olarak 10 kV'tan daha küçük gerilimler seçilmiştir. Deney numuneleri bu gerilimlerde belirli süreler bekletildikten sonra numunelere ait ölçülen kısmi boşalma yük değerlerinde bir değişim gözlememiştir (yaklaşık boşta ölçülen kısmi boşalma yük değerleriyle eşdeğer). Bu gerilimlerdeki kısmi boşalma ölçümleri de yine 10 kV'luk gerilimlere kadar yapılmıştır. Rogowski profilli elektrot sistemi arasında bulunan yalıtkana etkiyen elektrik alan dağılımının yaklaşık düzgün olduğu varsayılırsa, deney numunelerinin $10\,\mathrm{kV} / 6.5\,\mathrm{mm} \cong 1.5\,\mathrm{kV/mm}$ 'lik maksimum alan ile zorlandığını söyleyebiliriz. Deney numuneleri içerisinde bulunan olası boşlukların mikrometre boyutunda oldukları düşünülürse, bu boşluklarda kısmi boşalmaların başlayabilmesi için kısmi boşalma ölçümlerine 10 kV'tan daha büyük gerilimlerde devam ettik. Deney numunelerine 10 kV'luk gerilim belirli süreler uygulandıktan sonra, 25 kV'a kadarki ölçümlerde yaklaşık 25 pC'a kadar kısmi boşalma yükleri okunmuş ve gerilimin uygulanma süresinin arttırılması ile birlikte aynı gerilimlerde ölçülen kısmi boşalma yük miktarlarının arttığı gözlenmiştir. Çok belirgin artımları gözlemleyebilmek için uygulanan gerilimim genliğini ve etki süresini arttırmamız gerekebilir. Bu konu üzerindeki çalışmalarımız devam etmektedir.

Yaşlanma deneyini gerçekleştirmek için kullandığımız deney setinde, kısmi boşalma öçümlerini belirli gerilim değerlerine kadar yapabildik. Belirli bir gerilim değerini aştığımızda ( ki bu değer bizim deney seti için yaklaşık 30 kV idi) deney numunesi üzerinde yüzeysel boşalmalar meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra, yüzeysel boşalmaları engellemek için kullanılan transformatör yağının belirli periyotlarla yenilenmesi veya vakumlanması deney sonuçlarının doğruluğu bakımından faydalı olacaktır. Yenilenen vey avakumlanan transformatör yağı deneyden önce bir kaç saat dinlendirilmelidir.

Bu arada, deney numunesi üzerinde oluşabilecek yüzeysel boşalmaları engellemek için kullanılan transformatör yağının pleksiglas yerine cam muhafazalar içine konulmasının faydalı olduğu gözlenmiştir.

Bu tezde belirtilen yaşlanma deneyleri tam olarak neticelendirilemediğinden, deney numunelerine ait istatistiksel veri analizleri ve ömür tayinleri örnek deney verileri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Hızlandırılmış ömür deneylerinde genellikle numunelere ait arızalanma süreleri sabit zorlanmalar altında elde edilmektedir. Yaşlanma deney verilerinin değerlendirilmesini anlatan kaynaklara baktığımızda; genellikle veri analizlerinin sabit zorlanma durumuna göre yapıldığını görmekteyiz. İşletmede kullanılan yalıtım sistemlerinin sabit gerilimler altında çalıştığı düşünülecek olursa, hızlandırılmış yaşlanma deneylerinde bu duruma dikkat edilmelidir.

## KAYNAKLAR


[1] **Malik N. H., Al-Arainy A. A. and Qureshi M. I**., 1998. Electrical Insulation in Power Systems. Marcel Dekker, Inc, New York.

[2] **Khalifa M**., 1990. High Voltage Engineering: Theory and Practice. Marcel Dekker, Inc, New York.

[3] **Naidu M. S., Kamaraju V**., 1996. High Voltage Engineering, Second Edition. New Delhi : Tata McGraw-Hill.

[4] **Kuffel E. and Abdullah M.,** 1986. Yüksek Gerilim Tekniği: Çeviren: Muzaffer Özkaya. İstanbul : İTÜ.

[5] **Lucas J. R**., 2001. High Voltage Engineering.

[6] **Kuffel, E., Zaengl, W. S. and Kuffel J.**, 2000. High Voltage Engineering. Fundementals. Oxford , Boston. Butterworth-Heinemann.

[7] **Cygan, P. and Laghari, J. R**., 1990. Models for insulation aging under electrical and thermal multistress**.** *IEEE Transactions on Electrical Insulation, [see also IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,]*,Volume: 25 ,Issue: 5 ,Oct. 1990 Pages:923 - 934

[8] **Bolhuis J. P., Gulski E. and Smit J. J**., 2002. Monitoring and Diagnostic of Transformer Solid Insulation. *IEEE Transaction on Power Delivery* , Vol.17, No.2, April 2002, Pages:528-536

[9] **IEC-60505**, 1999-12. Evaluation and qualification of electrical insulation systems. *International Electrotechnical Commission,* Geneva, Switzerland.

[10] **Stone, G. C**., 1993. Ageing Models, Mechanism and Reality. *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, Vol.28 No.5, 1993.

[11] **IEC 727-1**, 1993-01. Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems. *International Electrotechnical Commission*, Geneva, Switzerland.

[12] **IEC 85**, 1984. Thermal evaluation and classification of electrical insulation. *International Electrotechnical Commission*, Geneva, Switzerland.

[13] **IEC 941**, 1988. Mechanical endurance functional tests for electrical insulation systems. *International Electrotechnical Commission*, Geneva, Switzerland.

[14] **IEC 792-1**, 1985. The multi-factor functional testing of electrical insulation systems. *International Electrotechnical Commission*, Geneva, Switzerland.

[15] **Nelson, W**., 1990. Accelerated Testing, Statistical models, Test Plans, and Data Analysis. A Wiley-Interscience Publication, New York.

[16] **ReliaSoft's Textbook**, 2001. Accelerated Life testing Reference.

[17] **Kreuger, F. H**., 1989. Partial Discharge Dedection in High Voltage Equipment, Cilt 2, Butterworth &Co.Ltd, london.

[18] **Kreuger, F. H.**, 1991. Industrial High Voltage, Cilt-I. Delft University Press, Netherlands

[19] **Kreuger, F. H**., 1992. Industrial High Voltage, Cilt-II. Delft University Press, Netherlands

[20] **Ryan, H. M**., 2002. High Voltage Engineering and Testing : Peter Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers Stevenage, Herts., U.K

[21] **TSE-2051,**1975. Elektriksel Kısmi Boşalmaların Ölçülmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

[22] **IEC-270**, 1981. Partial Discharge Measurement. I*nternational Electrotechnical Commission,* Geneva, Switzerland.

[23] **David, A. N**. ,1988. Partial Discharge Measurement and Interpretation, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May/ June 1988-Vol.4, No.3

[24] **Gjerde, A. C**., 1997. Multifactor Ageing Models-Origin and Similarities.*Electrical Insulation Magazine, IEEE* ,Volume: 13 ,Issue: 1 ,Jan.-Feb. Pages:13

[25] **Kreuger, F. H., Gulski, E. and Krivda, A**., 1993. Classification of partial discharges *Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on]*,Volume: 28 ,Issue: 6 , Dec. Pages:917 - 931

[26] **Densley, J**., 2001.Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview *Electrical Insulation Magazine, IEEE* ,Volume: 17 ,Issue: 1 ,Jan.-Feb. Pages:14 – 22

[27] **Laurent,C. and Mayoux, C**., 1992. Partial discharge. XI. Limitations to PD as a diagnostic for deterioration and remaining life *Electrical Insulation Magazine, IEEE* ,Volume: 8 ,Issue: 2 ,March-April 1992 Pages:14–17

[28] **Ghannad, A. S.,** 2000**.** Generator insulation diagnostics using acoustic and partial discharge characteristics, *PhD. Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York.

[29] **Dissado, L. A. and Fothergill J. C**., 1992. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. Redwood Press Wiltshine, England.

[30] **Fruth, B., Liptak, G., Ultrich, L, Niemeyer, L**.,1989. Ageing of rotating machines insulation, mechanism, measurement techniques. *Conduction and Breakdown in solids Dielectrics, Procedings of the 3rd International conference on*, 3-6 July. Pages:597-6

[31] **ANSI / IEEE-930,** 1987. IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Voltage Endurance Data, 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA

[32] **ANSI / IEEE-101**, 1987. IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data, 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA

[33] **Reliasoft**, Weibull++ 6 Life Data Analysis Software

[34] **Reliasoft's Textbook**, 2001. Life Data Analysis, Revised 2001, 404 Pages.

[35] **IEC 727-2**, 1993-02. Evaluation of Electrical Endurance of Electrical ınsulation Systems. Part 2: Evaluation procedures based on extreme-value distributions. *International Electrotechnical Commission,* Geneva, Switzerland

## ÖZGEÇMİŞ

3 Şubat 1979 yılında Malatya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 1996 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 1997 yılında yatay geçiş yolu ile İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine devam etti. 2001 yılında bu bölümden mezun oldu ve aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2002 yılından beri, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.