

ELEKTRİKSEL YALITIM SİSTEMLERİ'NDE YAŞLANMA, YAŞLANMA MODELLERİ VE İSTATİSTİKSEL VERİ ANALİZİ

Suat İLHAN¹

Aydoğın ÖZDEMİR²

^{1,2} Elektrik Mühendisliği Bölümü

Elektrik-Elektronik Fakültesi

İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak, İstanbul

¹e-posta: ilhan@elk.itu.edu.tr ² e-posta: ozdemir@elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Elektriksel yaşlanma, ömür tahmini, yaşlanma modelleri, istatistiksel veri analizi.

ABSTRACT

The insulation community has a great interest in predicting the life of insulation at normal operating stresses, from relatively rapid tests performed at higher than normal operating stresses. Life prediction at normal stresses requires a mathematical model to extrapolate the accelerated ageing life to lower stresses. Unfortunately, since the lifetimes of apparently identical specimens tested under the same conditions can vary by over an order of magnitude from specimens to specimens; there is considerable difficulty in selecting the best model and objectively calculating the ageing model parameters. In this study, a review of ageing phenomena in electrical insulation systems and models used in lifetime studies of solid insulators under single and multiple stress conditions are presented. The statistical methods used with this type of data are briefly described. These statistical methods include the two-parameter weibull distribution and the log-normal distribution which are the two distributions most frequently used in ageing studies.

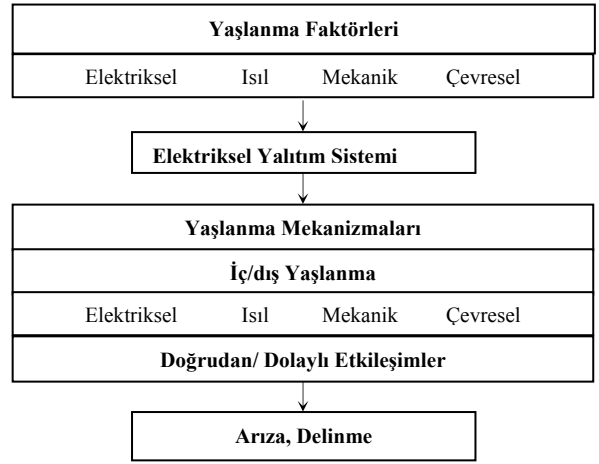
1. GİRİŞ

Elektriksel yalıtım sistemleri genel olarak elektriksel yalıtım, mekanik destek, enerji depolanması ve kişisel güvenlik gibi fonksiyonlar yerine getirmek üzere kullanılırlar. Sıvı ve gaz yalıtım sistemlerindeki elektriksel delinme tersinir özellikte olmasına rağmen, katılardaki durum tamamen tersinmezdir. Bu nedenle, yaşlanma üzerine yapılan çalışmaların büyük bir bölümü katı yalıtım sistemleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Katı yalıtkanlar kapasitelerde, transformatörlerde, kablolarda, iletim hatlarında, motorlarda ve diğer bir çok elektriksel cihaz ve donanımlarda yaygın olarak kullanılırlar[1]. Normal çalışma koşullarında, bir yalıtım sistemi elektriksel, mekanik, ısı ve çevresel yaşlanma faktörlerinden birine veya birkaçına maruz kalabilir. Bu faktörler zaman içerisinde yalıtım sisteminin yaşlanmasına ve sonunda arızalanmasına sebep olmaktadır.

2. ELEKTRİKSEL YALITIM SİSTEMLERİ'NDE YAŞLANMA

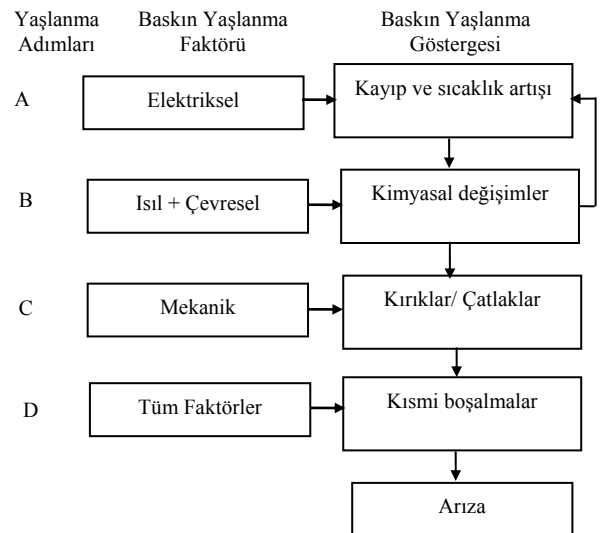
Bir veya daha fazla faktörün etkisi altındaki bir yalıtım sisteminin temel özelliklerinde meydana gelen kalıcı değişimlere, yalıtım sisteminin yaşlanması

denir. Yaşlanma zorlanmaları iç ve dış yaşlanmalara neden olabilirler.



Şekil 1. Bir yalıtım sisteminin yaşlanması

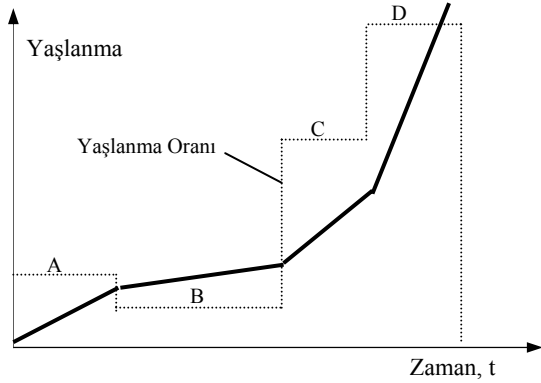
Pratikte kullanılan çoğu yalıtım sistemi çeşitli kusurlar içerdiklerinden ve kirli ortamlarda kullanıldıklarından dış yaşlanmaya maruz kalırlar[2]. Şekil.1 de bir yalıtım sisteminin maruz kaldığı temel yaşlanma durumları gösterilmiştir. Yaşlanma faktörleri, sonunda yalıtımın delinmesine sebep olan elektriksel, ısı, mekanik ve çevresel yaşlanma göstergeleri meydana



Şekil 2 Yalıtım sisteminde ki muhtemel yaşlanma göstergeleri

getirirler. Yaşlanma esnasında, başlangıçta yalıtım sistemini etkilemeyen zorlanmalar zamanla yaşlanma faktörü olurlar ve yaşlanma oranını belirlerler.

Yalıtkanın yaşlanması bir tek etki faktörü baskın ise böylesi yaşlanmalar tek faktöre bağlı yaşlanmalar, eğer birden fazla yaşlanma faktörü yalıtım isteminin ömrünü etkiliyor ise böylesi durum ise çok faktöre bağlı yaşlanmalar olarak adlandırılır [3]. Bir yalıtım sisteminin yaşlanması olayı oldukça karmaşıktır ve



Şekil 3 Yaşlanmanın zamanın fonksiyonu olarak gösterilmesi

arıza olayı sadece bir tek baskın yaşlanma faktörünün olması durumunda bile yaşlanma mekanizmalarının kombinasyonu şeklinde etkimektedir (Şekil2, şekil3).

Elektriksel Yaşlanma

Elektriksel yaşlanma da aşağıdaki olaylar etkilidir.

- Kısmi boşalma,
- Yalıtkan yüzeyinde oluşan izler,
- Ağaçlanma,
- Sıcaklık artışı,
- Uzun yükleri.

Partikte kullanılan elektriksel yalıtım sistemlerinin çoğunda arıza ile sonuçlanan elektriksel yaşlanma durumu oldukça karmaşık bir mekanizma ile gerçekleşmektedir. Yalıtım sisteminin elektriksel yaşlanmasını tamamı ile karakterize eden bir matematiksel model geliştirilememiştir.

Isıl Yaşlanma

Elektriksel yalıtım sistemlerinin ısı yaşlanmasına neden olan olaylar;

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

Mekanik Yaşlanma

- Çok sayıda düşük zorlanma çevriminden kaynaklanan yalıtım sistemindeki bileşenlerin yorulması,
- Termomekanik etkiler,
- Yalıtım sisteminin donanımları arasındaki bağli hareketten kaynaklanan aşınmalar, elektriksel yalıtım

sisteminin mekanik yaşlanmasına sebep olmaktadır [3].

Çevresel Yaşlanma

Çevresel yaşlanma durumu, ısı 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 [4].

3. YAŞLANMA MODELLERİ VE İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRME

Yalıtım sistemleri için, hızlandırılmış deneyler yardımı ile normal çalışma koşullarındaki ömrün tahmin edilmesi günümüzde oldukça önem kazanmıştır. Bu ömrün tahmini, hızlandırılmış ömür verisinin daha düşük zorlanmalara ekstrapolasyonunu mümkün kılan matematiksel modellerin kullanımını gerektirir. Fakat, aynı koşullar altında deneye tabi tutulan benzer numunelerin deney sonuçlarının farklılıklar göstermesi en iyi matematiksel modelin seçiminde ve model parametrelerinin hesaplanmasında güçlükler yaratmaktadır. Katı ve sıvı elektriksel yalıtım sistemleri, yalıtımın bozulmasına ve zamanla delinmesine kaybolmasına sebep olan bir çok zorlanmaya maruz kalırlar. Yaşlanma zorlanmaları elektriksel, ısı, mekanik veya çevresel olabilir. Bu zorlanmalar yalıtım sistemine sürekli etkiyebileceği gibi, çevrimsel veya kesikli olarak da etkiyebilir.

Hızlandırılmış yaşlanma deneyleri, yaşlanma mekanizması tam olarak bilinmese bile yalıtkan ömrünün tahmininde kullanılan pratik bir yöntemdir. Bu deneylerde, bir veya daha fazla yaşlanma faktörü, normal çalışma koşullarındaki değerlerinden daha yüksek oranlarda yalıtım sistemine uygulanırlar. Bu aşırı zorlanmalardaki yaşlanma daha fazla olacak ve arıza daha kısa sürede meydana gelecektir. Uygun zorlanma düzeylerinin seçilmesi durumunda yalıtkan ömrü günler ve haftalar mertebesine inecektir.

Hızlandırılmış ömür deneylerinde karşılaşılan problemlerden biri, yüksek zorlanma düzeyleri ile normal zorlanma seviyelerindeki ömürler arasındaki ilişkinin belirsizliğidir. Hızlandırılmış ömür verilerinin normal çalışma koşullarına indirgenmesini sağlayan tam olarak doğru bir matematiksel modelin bulunmaması, ömür verilerini temsil etmek için en iyi matematiksel modelin seçiminde ve model parametrelerinin hesaplanmasında güçlükler yaratmaktadır. Normal ve hızlandırılmış durumlardaki elektriksel yalıtımın ömrü oldukça farklılık gösterebilir. Benzer zorlanmalara maruz kalan, aynı koşullar altında üretilmiş eşdeğer deney numunelerin ömürleri oldukça farklı olabilir. Bu farklılıklar numunelerin üretimi sırasındaki kusurlardan veya mikroskopik farklılıklardan kaynaklanabilir. Numunelerin ömürleri arasındaki yüksek farklılıklar yaşlanma modellerinin geliştirilmesinde zorluklara sebep olmaktadır. Kullanılan istatistiksel yöntemlere bağlı olarak, yaşlanmanın doğasından gelen farklılık,

deneyi yapan kişilerin aynı deney verilerine rağmen değişik yaşlanma modelleri önermelerine sebep olmaktadır [5].

4. YAŞLANMA MODELLERİ

Zorlanma seviyesi ile yalıtkanın ömrü arasındaki ilişkiyi gösteren bir çok yaşlanma modeli geliştirilmiştir. Bu modeller, hızlandırılmış yaşlanma deney verilerinin normal zorlanma seviyelerine ekstrapolasyonunu mümkün kılarlar ve böylelikle normal çalışma koşullarındaki ömürler tahmin edilebilir.

Genel olarak iki temel yaşlanma modeli vardır: Tek faktöre bağlı ve çok faktöre bağlı yaşlanma modelleri. Tek faktöre bağlı yaşlanma modelleri daha yaygın olarak kullanılırlar ve yalıtkan ömrü ile bir tek zorlanma arasındaki ilişkiyi gösterirler. Bu modeller de, yalıtkan etkiden diğer tüm etki faktörlerinin etkisinin sabit kaldığı varsayılır. Çok faktöre bağlı yaşlanma modellerinde ise, yalıtkan ömrü ile birden fazla yaşlanma faktörü arasındaki ilişki temsil edilir.

Tek Faktöre Bağlı Yaşlanma Modelleri

Tek faktöre bağlı yaşlanma modelleri genel olarak aşağıdaki formda verilir.

$$L = f(x) \quad (1)$$

Burada L , x zorlanması altındaki yalıtkanın ömrünü göstermektedir. Bir çok yalıtım sistemi için, baskın olarak bir tane yaşlandırıcı etken vardır ve diğer tüm etki faktörlerinin yalıtkan etkileri sabit kabul edilebilir.

Elektriksel yalıtım sistemi için en fazla kullanılan tek faktöre bağlı yaşlanma modeli Dakin tarafından önerilen modeldir.

$$L = A \cdot \exp(-B \cdot T) \quad (2)$$

Burada, A ve B hesaplanacak olan model sabitlerini ve T ise mutlak sıcaklığı göstermektedir. Bu modelde, normal çalışma koşullarında elektriksel, mekanik ve çevresel faktörlerinin etkisinin olmadığı kabul edilir. Elektriksel zorlanma ile yalıtkan ömrü arasındaki ilişkiyi gösteren bir çok tek faktöre bağlı yaşlanma modeli önerilmiştir. Bunlar içerisinde en yaygın olarak kullanılanı ‘eksi üs modeli’dir

$$L = k \cdot V^{-n} \quad (3)$$

Burada, V uygulanan gerilim veya zorlanma, k ve n ise hesaplanacak olan model parametreleridir. Bu modele alternatif olarak üstel bir model de önerilmiştir.

$$L = C \cdot \exp(-D \cdot V) \quad (4)$$

Yine burada C ve D hesaplanacak olan model parametreleridir. Üstel modelin, eşik değerlerini de içeren değişik varyasyonları da araştırmacılar tarafından önerilmiştir.

$$L = F \cdot \exp(-G(V - V_0)) \quad (5)$$

burada F , G ve V_0 hesaplanacak olan sabitlerdir. Bu modellerin her birinde genellikle arttırılmış gerilim seviyeleri modele iyi bir şekilde uyar. Fakat, normal gerilim altındaki ömrün her bir yaşlanma modeli için farklılıklar gösterdiği unutulmamalıdır.

Çok Faktöre Bağlı Yaşlanma Modelleri

Çok faktöre bağlı yaşlanmalar konusunda son yıllarda yapılan çalışmalar önemli artış göstermektedir. Bu durum tasarımcıların cihazları maksimum potansiyellerinde kullanma istemelerinden kaynaklanmaktadır. Çok faktöre bağlı yaşlanma modellerinin fonksiyonel formu aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$L = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (7)$$

Burada X_i her bir zorlanmayı ve m ise ömür üzerine önemli etkisi olduğu kabul edilen zorlanmaları veya etki faktörlerini göstermektedir. Bu zorlanmalar sabit, sürekli veya çevrimsel olabilirler. Örneğin, X_1 50 Hz frekanslı gerilim, X_2 belirli aralıklarla etkiyen darbe gerilimi ve X_3 ise sıcaklık olabilir.

Önerilen çok faktöre bağlı yaşlanma modellerinin çoğunda elektriksel ve ısı zorlanmalar yaşlandırıcı etken olarak yer almaktadır. Simoni’nin çok faktöre bağlı yaşlanma modeli ‘eksi üs modeli’ ile ‘Dakin’in ısı modeli’nin doğrudan birleşiminden oluşmaktadır.

$$L = K \cdot \exp(-P \cdot T) \cdot V^{-m} \quad (8)$$

burada K , P ve m hesaplanacak olan sabit büyüklükleri göstermektedir.

5. İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER

Elektriksel yalıtım sisteminin ömrünün tahmininde istatistiksel yöntemler sıklıkla kullanılır. Deney verilerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için belirli adımlar gereklidir. İlk olarak doğru bir olasılık dağılımı seçilmelidir. Katı yalıtkanlar için weibull ve logaritmik-normal dağılımlar yaygın olarak kullanılan dağılımlardır [9,10].

İkinci olarak, dağılım parametreleri ve güven aralıkları tahmin edilmelidir. Yaşlanma süreleri arasındaki yüksek farklılıklardan dolayı her bir zorlanma durumu için çok sayıda deney numunesinin kullanılması gerekmektedir. İstatistiksel modeller belirli yaşlanma deney durumu için bütün deney verilerini özetleyen parametrelerin hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. Weibull ve logaritmik-normal olasılık dağılımları ömür verilerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan dağılımlardır. Bazı durumlarda parametrelere bağlı olmayan modeller de kullanılabilir [1].

Weibull Dağılımı

Weibull dağılımı, yaşlanma zorlanması olarak gerilimin kullanıldığı tek faktöre bağlı yaşlanma deneylerinde yaygın olarak kullanılır. Weibull dağılımına ait olasılık dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi verilir.

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right)^\beta, x \geq 0 \quad (9)$$

α : Ölçek parametresi ve değeri pozitif,
 β : Şekil parametresi ve değeri pozitif,
 x : Raslantı değişkeni(genelde arızaya kadar geçen süre veya arıza gerilimidir),

$F(x)$: Olasılık dağılım fonksiyonu [8].

Ölçek parametresi arızalanma olasılığının %63.2 olduğu duruma tekabül eden gerilim veya zaman değerini gösterir. Şekil parmetresi ise arıza zamanları veya gerilimlerdeki dağılımların bir ölçüsüdür. β değeri büyüdükçe arıza gerilimi veya arıza zamanlarındaki dağılım azalacaktır. Sabit zorlanma altında yürütülen ömür deneylerinde bu katsayının değeri yaklaşık olarak 2'ye eşittir. Tanı deneylerinden elde edilen β değerleri genellikle büyük olmaktadır.

Ölçek parametresi genellikle zorlanmanın bir fonksiyonudur. İki parametreye bağlı weibull fonksiyonunun değişik bir versiyonu üç parametreye bağlı olan modeldir. Bu modelde üçüncü parametre γ ile gösterilen ve belirli bir değerin altında bozulmanın olmadığını gösteren eşik parametresidir.

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta \quad t > \gamma \quad (10)$$

$t \leq \gamma$ için $F(t)=0$ 'dır.

Deney verileri weibull dağılımı kullanılarak analiz edilecekse, öncelikle büyükten küçüğe göre sıralanmalıdır. Bu dağılımda birikmeli olasılık kullanılan en yaygın yaklaşıklık aşağıda verilmiştir.

$$F_i = \% \left(\frac{i}{n+1} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

Eğer çizilen deney verileri ile uygun düzlükte bir doğru elde edilirse, deney verilerinin weibull dağılımı ile temsil edilebileceği düşünülebilir. Aşağıdaki şekilde bu deney verilerine ait grafikler gösterilmiştir.

Tablo 1 Epoksi deney numunelerine ait arızalanma süreleri

Numune Sırası i	F _i %	Arızalanma süresi(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	-

Öncelikle deney verisi weibull olasılık kağıdı üzerine çizilir, daha sonra bu deney verilerinden geçecek şekilde bir doğru uydurulur. $F(x)$ değerinin %63.2 olduğu yüzdeye karşılık gelen zaman değeri ölçek parametresi olacaktır.

Şekil parametresinin tahmini ise, A-A ile gösterilen doğrunun eğimi, deney verileri yardımı ile çizilen doğrunun eğimi ile aynı olacak şekilde ayarlanır. Bu doğrunun düşey eksenı kestiği nokta şekil parametresini verecektir. Yukarıdaki örnekte şekil parametresi 1.15 olarak bulunmuştur.

Logaritmik-normal dağılım

Logaritmik-normal dağılım çok yaygın olarak kullanılan normal dağılımın bir dönüşümüdür[6,7]. Bu dağılım genellikle normal olarak sadece ısı yaşlanma verilerinin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

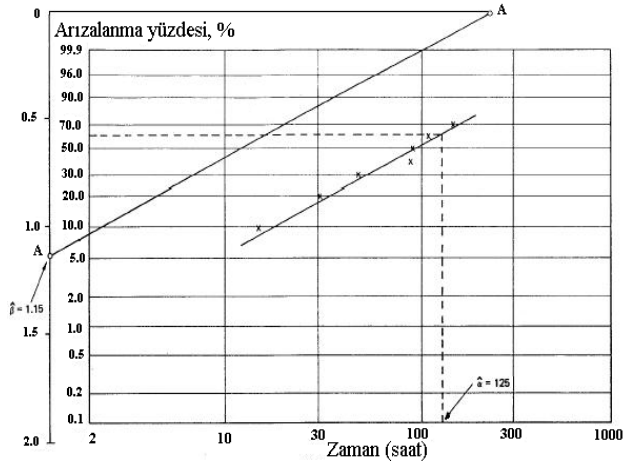
$$f(z) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right) \exp\left[-\frac{(z-u)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (12)$$

z : $\log(x)$

x : delinme gerilimi veya arızaya kadar geçen süre,

μ : logaritmik ortalama değer,

σ : logaritmik standart sapma.



Şekil 4 Epoksi reçine numunelerine ait deney verilerinin weibull dağılımı kullanılarak çizimi

Weibull dağılımında olduğu gibi logaritmik normal dağılımda da deney verileri küçükten büyüğe doğru sıralanır. Olasılık dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_i = \% \left(\frac{i}{n+1} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

Oncelikle deney verileri logaritmik-normal dağılım kağıdı üzerine çizilir. Bu noktalardan geçen uygun bir eğri uydurulur. $F(z)$ değerinin %50 olduğu ana karşılık gelen değer logaritmik ortalama değer olacaktır. Logaritmik standart sapmanın tahmini ise %16 ile %50 noktalarına karşılık gelen değerler arasındaki farka eşittir.

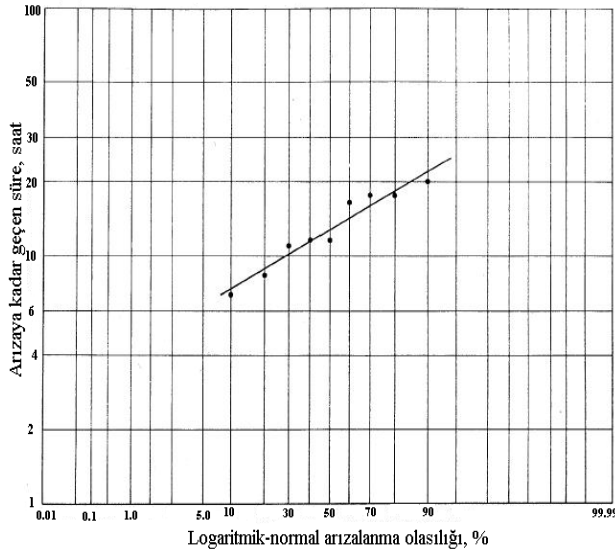
Arıza Modelleri

Bir arıza modeli zorlanma düzeyi ile arızaya kadar geçen süre arasındaki ilişkiyi gösteren bir modeldir.

Tablo 2 Log-normal dağılımları için deney verileri

Numune sırası i	F _i %	Arızalanma süresi(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

Genel olarak gerilim azaldıkça, arızaya kadar geçen süre artmaktadır. Genel olarak deneysel yöntem birden fazla deney numunesini iki veya daha fazla deney geriliminde deneye tabi tutmaktır. Arızaya kadar geçen süreler raslantı değişkeni olarak düşünülecek olursa, en iyi arıza modelinin bulunması oldukça güçtür. Eksi üs modeli ve üstel model yaygın olarak kullanılan modellerdir.

**Şekil 5.** Tablo2'deki deney verilerinin logaritmik normal dağılım kullanılarak çizilmesi**Deney verilerinin arıza modellerine uydurulması**

Bir arıza modelindeki parametrelerin hesaplanması, arıza modelinin lineer bir forma dönüştürülmesi ve lineer eğri uydurma yöntemlerinin uygulanması ile mümkündür. Alternatif bir yöntem arıza verilerinin logaritmik normal olarak dağılımını varsaymaktır. Arıza verilerinin logaritmik olarak dağılımı Eksi üs modelinin lineerleştirilmiş hali aşağıda verilmiştir.

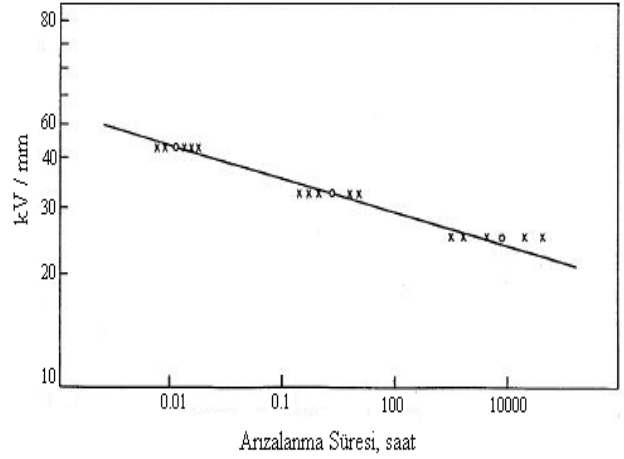
$$\log L = \log k - N \cdot \log V \quad (16)$$

$$y = mx + b$$

$$y = \log L, \quad x = \log V$$

$$m = -N, \quad b = \log k$$

Yukarıdaki bilinmeyen parametreler lineer regresyon yöntemi ile hesaplanabilir. Herhangi bir deney geriliminde $\log L$ 'nin normal olarak dağılım gösterdiği varsayımı kabul edilir.

**Şekil 6.** Eksi üs modeli kullanılarak zorlanma seviyesi ile arızaya kadar geçen sürenin çizimi**6. SONUÇLAR**

Hızlandırılmış yaşlanma deneyleri, yaşlanma sürecinin anlaşılması, en iyi özellikte yalıtın sisteminin seçilmesi ve normal çalışma koşullarında yalıtkan mrünün tahmin edilmesi için gerçekleştirilen deneylerdir. Ne yazık ki, yaşlanma deney verileri arasındaki farklılıklar, istatistiksel yöntemlerin kullanılmasını zorunlu kılmıştır ve doğru, tekrarlanabilir sonuçların elde edilebilmesi için çok sayıda deney yapılması gerektirmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Cygan,P.;Laghari,J.R.; Models for insulation aging under electrical and thermal multistress Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on] ,Volume: 25 , Issue: 5 , Oct. 1990 Pages:923 - 934
- [2] J.P. van Bolhuis, E. Gulski, and J.J. Smit, Monitoring and Diagnostic of Transformer Solid Insulation, IEEE Transaction on Power Delivery , Vol.17, No.2, April 2002, Pages:528-536
- [3]IEC Standart 60505-1999,Evaluation and Qualification of Electrical Insulation Systems,Second Edition, 1999-12
- [4] IEC Standart (727-1)-1982 Evaluation of Electrical Endurance o fElectrical Insulation Systems, Part 1: General considerations and evaluation procedures based on normal distributions, First Edition 1982
- [5] Stone, G.C.; The statistics of ageing models and practical reality, Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation,IEEE Transactions on], Volume:28 , Issue: 5 , Oct. 1993 Pages:716 – 728
- [6]IEEE Standart 101-1987, Guide for the Statistical Analysis of Thermal life Test Data, 1987
- [7]IEEE Standart 930-1987, Guide For The Statistical Analysis of Electrical Insilation Voltage Endurance Data
- [8] L.A. dissado and et al., Weibull Statistics in Dielectric Breakdown, IEEE Trans. EI, pp.227-233 June 1984.
- [9] L. Simoni, A General Approach to Endurance of Electrical Insulation Under Temperature and Voltage, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol.16, pp.277-289, 1981
- [10] G. C. Montanari and M. Cacciari, A Probabilistic Life Models for Insulating Materials Showing Electrical Thresholds, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol.24, pp.127-137, 1989