

# GELİŞTİRİLMİŞ WEİBULL İSTATİSTİĞİ İLE POLİMERİK YALITKANLARIN YAŞLANMA SÜRECİNİN İNCELENMESİ

Mukden UGUR, Ayten KUNTMAN, Aysel ERSOY  
İstanbul Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Avcılar, 34850, İstanbul

[mugur@istanbul.edu.tr](mailto:mugur@istanbul.edu.tr) [akuntman@istanbul.edu.tr](mailto:akuntman@istanbul.edu.tr) [aersoy@istanbul.edu.tr](mailto:aersoy@istanbul.edu.tr)

Anahtar Kelimeler: Weibull istatistiği, Polimerik yalıtkan, Yaşlanma

## ABSTRACT

Surface tracking on polymeric solid insulators is one of the main reasons for failure in high voltage systems. Due to various factors, such as humidity, pollution, ice load, increase in local voltage, etc., it is hard to make an estimation about the life of an insulator. Weibull statistics have been widely used and accepted as a successful mathematical method to predict the remaining lifetime of an insulating material. In this research several tests have been performed according to IEC 587 Inclined Plane Test method to investigate the breakdown times of polymeric insulation materials under various external conditions generated artificially in laboratory. A model based on Weibull statistics has been proposed for estimating the breakdown time of polymeric insulation material. By using appropriate parameters this improved model can make successful estimates within a reasonable accuracy in varying external conditions such as applied voltages, flow rates, tensile stress, etc..

## 1.GİRİŞ

Polimerik yalıtkan malzemelerin kullanım süreleri boyunca kalitelerini bozan farklı etkiler söz konusudur. Bu etkiler içinde yüzey bozulması, yalıtkanın tamamında bozulmalara neden olabilen en önemli etkiye sahip olanıdır. Yalıtkanın kullanım süresi hakkında tahminde bulunmak çeşitli faktörler nedeni ile oldukça güçtür[1]. Son 50 yıl içerisinde polimerik malzemelerin hızlandırılmış yaşlandırma yöntemleri ile yalıtkanlık yeteneğinin belirlenmesi için çok sayıda test yöntemi ve standardı ortaya konmuştur[2,3]. En genel ifade ile güvenilirlik fonksiyonu  $R(t) = e^{(-\lambda^m)}$ , burada ' $\lambda$ ' ölçek ve ' $m$ ' şekil parametresidir. Bu ifade belirli sabit koşullarda oldukça iyi sonuç verir. Fakat çok değişkenli koşullarda kullanım süresini tespit etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada laboratuvar koşullarında yapay olarak oluşturulan çeşitli dış etmenler altında polimerik yalıtkan malzemenin bozulma süresini araştırmak için Eğik Düzlem Yüzeyde İz Oluşumu Test metoduna uygun olarak çeşitli testler yapılmıştır. Her testte sadece bir dış veya iç etken değiştirilerek bu etmenin polimerik test örneği üzerindeki eskitme yeteneği etkisi incelenmiştir. Sonuçta tek bir etkenin

değişmesi ile test örneğinin bozulma süresini oldukça iyi bir yaklaşımla verebilen bir istatistik model geliştirilip elde edilmiştir.

## 2.TEST KOŞULLARI

Bütün testler laboratuvar koşullarında hazırlanan polyester izolatörler üzerinde IEC 587 test standardına göre yapılmıştır[4,5]. İlk olarak standart test koşulları için 4kV AC gerilim ve 36 ml/h sıvı akış hızı seçilmiştir. İlerleyen adımlarda uygulanan gerilim, mekanik gerilmenin ve sıvı akış hızının test örneğinin bozulma süresi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her test için minimum 5 örnek kullanılmıştır. Bütün örnekler aynı laboratuvar koşulları altında polyester reçineden hazırlanmıştır. Daha sonra hepsi 35 °C sıcaklıktaki bir fırında yarım saat süre ile pişirilmiş sıcaklık her yarım saatte 5 °C artırılarak toplam pişirme süresi 4 saat oluncaya kadar pişirme işlemine devam edilmiştir. 100mmX55mmX9mm ebatlarındaki test örnekleri, eğik düzlem test düzeneğine 45° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir[6]. Elektrolit çözelti olarak amonyum klorid (NH<sub>4</sub>Cl) çözeltisi, elektrodlar arasında akıtılmıştır. Bütün örnekler üzeri açık olup, tel kafes içinde ve minimum hava sirkülasyonunda test edilmiştir.

## 3.İSTATİSTİKSEL YAKLAŞIMLAR

Ömür modelleri, yalıtkanaya uygulanan gerilmeler ve bozulma süresi arasındaki bağlantıyı ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu modeller kullanılarak malzemeyi karakterize edebilmek için gerekli parametreler elde edilmektedir[7]. Bazı araştırmacılar elektriksel ve termal gerilmelere karşı yalıtkan malzemenin kullanım süresini olasılık yöntemleri ile hesaplayan modeller ortaya koymuşlardır. Bu modeller iki temel yaklaşımdan hareketle elde edilmiştir. Bunlardan biri bozulma etkisini inceleyen bir modeldir ve sonuçta bozulma süresi ile uygulanan gerilmeler arasında bir bağlantı olduğunu ortaya koyar. Bir diğer model ise ömür testlerinden elde edilen sonuçları uygun modellerle bağdaştırarak açıklamaya çalışan bir modeldir. Her iki durumda yalıtkan malzemenin seçilen bir stres altında gösterdiği davranışı özelleştirmek, mevcut teknolojik gelişmelere rağmen örneğin pişirme tekniği, test hücresi, test metotları ve diğer faktörlere bağlı olarak oldukça güçtür[8].

İstatistiksel bir ömür modeli deneysel sonuçlarla ne kadar çok uyuşan sonuçlar verirse o kadar çok güvenilir, değerli ve yararlı olacaktır. 1970'lerden bu yana Weibull olasılık dağılımı katı yalıtkanlarda elektriksel bozunmayı ifade eden istatistik görüşler arasında geniş bir kabul görmektedir[9-14]. Bu yöntemle çok sayıda rasgele değişkenin olasılıkları göz önüne alınarak oldukça yaklaşık sonuçlar elde etmek mümkündür. Parametreleri hesaplayabilmek için çok sayıda metod ortaya atılmıştır ve bunlardan bazıları 'Maksimum Olasılık' (Maximum Likelihood), 'Doğrusal Kestirim' (Linear Estimation), 'Grafiksel Çizim Tekniği' (Graphical Plotting Technique) gibi metotlardır[15]. Grafiksel çizim tekniği gözleme dayalı bir metod olduğundan bu çalışmada tercih edilmiştir. Kullanımı açısından son derece uygun, basit ve weibull dağılımı ile verilerin sunumunda çabuk ve geçerli bir metottur[16].

#### 4. PARAMETRELERİN HESAPLANMASI

İz oluşumu safhası, elektrolitin akış hızının, gerilimin ve iletkenliğin tipik test değerleri ile onlarca dakika sürebilir[17]. Weibull dağılımı başlıca iki parametreye dayanır, bunlar 'm' şekil ve 'λ' ölçek parametresidir. 'L' konum parametresini ifade eder ve pek çok uygulamada ihmal edilebilir. Bu değerleri tanımlayabilmek için bir dizi benzer örnek sabit gerilim ve sıvı akış hızı altında test edilmiş her bir grup için başlangıç zamanı 't' gözlemlenmiştir. Kümülatif Weibull dağılımı F(t) şu şekilde gösterilebilir,

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(t-L)^m} \quad (1)$$

$t_i$ , hatanın olduğu i.nci zamanı gösterirse, kümülatif dağılım F(t) şu şekilde ifade edilebilir :

$$F(t_i) = \frac{i}{(N+1)} \quad (2)$$

Burada 'i' örnek numarası ve 'N' toplam örnek sayısıdır. Güvenilirlik fonksiyonu R(t) şu şekilde ifade edilir:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3)$$

$$R(t) = \frac{(N+1-i)}{(N+1)} \quad (4)$$

(3) ifadesi (1)'de yerine yazılırsa, R(t) şu şekilde ifade edilebilir;

$$R(t) = e^{-\lambda t^m} \quad (5)$$

$$\ln R(t) = -\lambda t^m \quad (6)$$

(6) ifadesinin her iki tarafında logaritması alınırsa, ölçü ve şekil parametreleri şu şekilde ifade edilebilir;

$$\ln[-\ln R(t)] = m \ln t + \ln \lambda \quad (7)$$

$$\text{Buradan: } -\ln R(t) = \ln \frac{(N+1)}{(N+1-i)} \quad (8)$$

şeklinde elde edilir.

**Tablo 1 – Weibull istatistiğinde uygulanabilirliği için test edilen verilerin düzeni**

Örnek numarası (i)	Bozulma zamanı (dak.)	$\ln \frac{(N+1)}{(N+1-i)}$
1	13.00	0.054
2	15.83	0.111
3	16.00	0.171
4	17.03	0.236
5	19.20	0.305
6	21.50	0.379
7	24.88	0.459
8	25.40	0.546
9	26.75	0.641
10	28.25	0.747
11	28.83	0.865
12	29.00	0.998
13	31.33	1.152
14	31.60	1.335
15	33.00	1.558
16	33.00	1.845
17	35.86	2.251
18	45.00	2.944

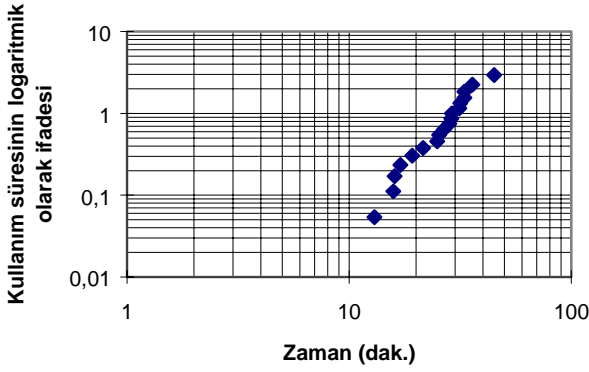
Başlangıçta i'nci sırada gözlenen bozulma süresi, R( $t_i$ ) ifadesinde  $p_{i,n}$  'e karşılık gelen bir nokta ile log-log ekseninde gösterildi(Şekil 1). Eğer Weibull modeli uygun olursa, elde edilen noktalar düz bir çizgi üzerinde elde edilir. Örneğin bir grup örnek (N=18) üzerinde, 4kV standart gerilim ve 36 ml/h sıvı akış hızı seçilerek deneyler yapıldı. Sırasıyla artan değerler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Grafikten (Şekil 1) de anlaşılacağı üzere yalnız polyester reçine kullanılarak elde edilen veriler Weibull dağılımına düzgün bir şekilde uygulanabilmektedir. Grafiksel Çizim Tekniği kullanılarak şekil ve ölçek parametreleri hesaplanabilir. Çizilen doğrunun eğiminin hesaplanması ile ( $m = \frac{\ln[\ln R(t_2)] - \ln[\ln R(t_1)]}{\ln(\frac{t_2}{t_1})}$ ), şekil

parametresi  $m = 3.3$  olarak hesaplanır. Ölçek parametresi ( $\lambda$ ) 't' değerinde yaklaşık olarak hesaplanmıştır,

Burada  $\ln \frac{(N+1)}{(N+1-i)}$  ifadesi 1'e eşit olduğunda, (7)

& (8) ifadelerinden hareketle,  $\ln[1] = 3.3 * \ln t + \ln \lambda$  ifadesi elde edilir. Ölçek parametresi  $\lambda = 1.41 * 10^{-5}$  olarak hesaplanır.



**Şekil 1 : Polyster reçine örneklerinin 4kV gerilim ve 36ml/h sıvı akış hızı çalışma şartlarında test edilmesi ile elde edilen Weibull dağılım grafiği.**

Sonuçta güvenilirlik fonksiyonu şu hale gelir,

$$R(t) = e^{-1.41 \cdot 10^{-5} \cdot t^{3.3}}$$

Parametre kestirilirken kullanılan istatistiksel metodların doğru sonuçlar verebilmesi, hesaplanan parametrelerin modele uygunluğu, doğruluğu, sayısı ve test yöntemine bağlıdır. Parametrelerin kestiriminde daha kesin sonuçlar elde etmek için kullanılan test ekipmanı ile daha çok sayıda veriye (test sayısı, örnek boyutları gibi) erişilebilmelidir. Bundan dolayı çok sayıda parametre kullanılan ömür modelleri verilerin değerlendirilmesinde daha sağlıklı sonuçlar verir. Parametrelerin kestirimi sabit bir gerilimde ve sıvı akış hızında (4 kV ve 36 ml/h)

$R(t) = e^{-\lambda t^m}$  formülü ile kullanım süresi belirlenir. Farklı koşullar altında bozulma süresinin tahmin edilebilmesi için denkleme ek parametrelerin ilave edilmesi gerekmektedir. Sıvı akış hızı (36 ml/h) sabit tutularak çeşitli gerilimler için çok sayıda deney yapılmıştır. Elde edilen verilerden yola çıkarak 3.5 kV ve altındaki gerilim seviyelerinin polyster reçine için iz oluşumuna neden olmadığı görülmüştür. Bu nedenle kritik bozulma gerilimi  $V_{cr1}$ , 3.5kV olarak seçilmiştir. Buradan hareketle düşük gerilim seviyeleri için bir değişken ( $V$ ) ve üç sabitten ( $V_{cr1}$ ,  $\lambda_{new}$  and  $\eta$ ) oluşan kolay bir geometrik fonksiyon seçilmiştir. Burada : ' $V_{cr1}$ ' kritik gerilim

' $\lambda_{new}$ ' yeni ölçek parametresi

' $\eta$ ' bozulma sabiti

$$\lambda = \lambda_{new} * \left(\frac{V}{V_{cr1}}\right)^\eta \quad (9)$$

olarak bulunur.

% 50 sorunsuz kullanım süresinin belirlenebilmesi için, üstel sabitleri kestirirken farklı bozulma zamanları kullanılır. Eşitliklerin hesaplanması sonucunda  $\lambda_{new}$ ,  $10^{-5}$  olarak seçilmesine karşın bu eşitliklerin çözülmesi için (a) gibi bir ek parametreye gerek duyulmuştur. Lisanslı bir paket program

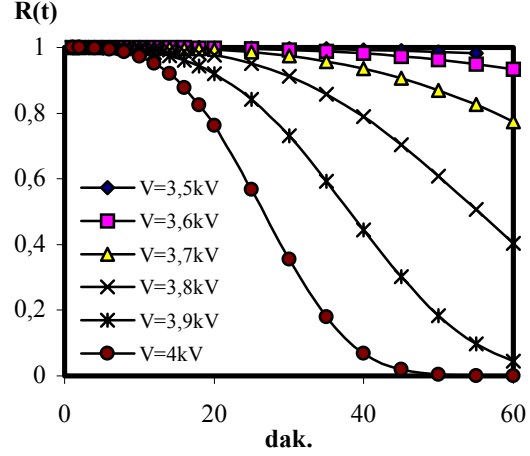
kullanılarak parametreler hesaplanmış,  $a = -0.135$  ve  $\eta = 41.5$  olarak bulunmuştur.

Bu durumda Eşitlik 10 ifadesi ile verilir:

$$R(t) = e^{-\lambda_{new} * \left(\frac{V}{V_{cr1}} + a\right)^\eta * t^m} \quad (10)$$

Bu ifadede :  $\lambda_{new} = 10^{-5}$ ,  $V_{cr1} = 3.5$ ,  $a = -0.135$ ,  $\eta = 41.5$ ,  $m = 3.3$

olarak kullanılmıştır. Eşitlik 10 kullanılarak elde edilen  $R(t)$ -t eğrisi Şekil 2'de görülmektedir.



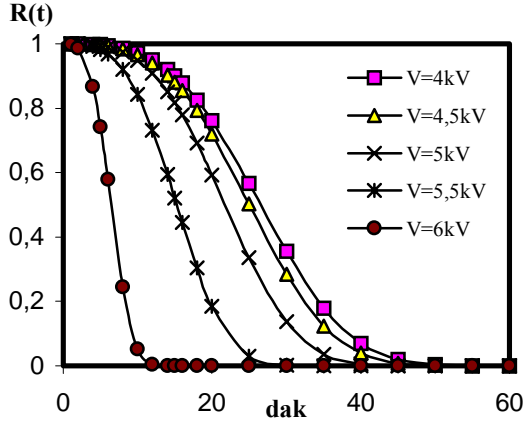
**Şekil 2: 3,5kV ile 4kV aralığındaki gerilim değerleri için güvenilirlik faktörünün, zamanla değişimi.**

4kV gerilim seviyesinden 5kV gerilim seviyelerine kadar bozulma süresi yavaş bir şekilde değişirken, bu seviyeden sonra bozulma süresi hızla azalmaya başlamaktadır. Aynı eşitlik ve parametreleri kullanarak bu eğriyi gösterebilmek mümkün olamamaktadır. Bunun içinde eşitliğin üstel kısmı değiştirilmiş ve sabit değer  $\eta$ 'nın yanına uygulanan gerilime bağlı bir değişken ilave edilmiştir. 4kV, 4.5kV, 5kV ve 6kV gerilim seviyelerinden elde edilen veriler kullanılarak aynı çözüm tekniği ile bu seviyelerde kestirim yapabilmek için daha uygun eşitlik ve parametreler elde edilmiştir. Bu durumu ifade eden güvenilirlik fonksiyonu Eşitlik 11'de görülüyor :

$$R(t) = e^{-\lambda_{new} * \left(\frac{V}{V_{cr1}} + a\right)^{\eta + \left(\frac{V}{V_{cr2}}\right)^\alpha} * t^m} \quad (11)$$

Bu ifadede:  $\lambda_{new} = 10^{-5}$ ,  $V_{cr1} = 3.5$ ,  $a = 0.35$ ,  $\eta = 0.7$ ,  $V_{cr2} = 5$ ,  $\alpha = 10$   $m = 3.3$

olarak kullanılmıştır. 4kV ve üzeri gerilimler için güvenilirlik fonksiyonunun zamanla değişimi Şekil 3'te görülmektedir.



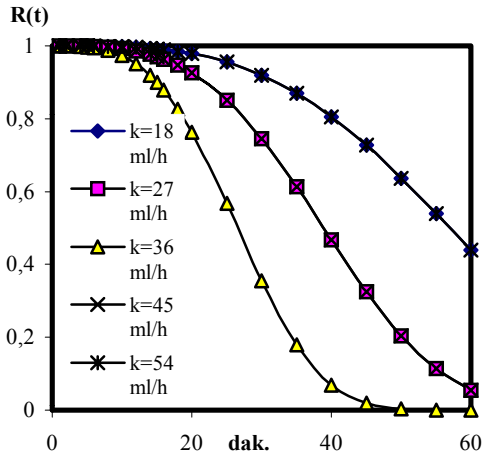
Şekil 3- 4 kV ve üzeri gerilimler için güvenilirlik faktörünün R(t), zamanla değişimi.

Deneyler göstermiştir ki 4kV gerilim altında bulunan polyester reçine için en kısa zamanda iz oluşumunun gerçekleşmesi için en uygun sıvı akış hızı 36 ml/h'tır[18]. Aşağıda yer alan formül 4kV gerilim altında farklı sıvı akış hızları için bozulma zamanı eğrisini vermektedir. Bu eşitlik sıvı akış hızı kritik değerinde olsa dahi örneğin kullanım süresi olasılığı üzerinde bir etki etmemektedir.

$V \geq 4kV$  değerleri için  $\Rightarrow$

$$R(t) = e^{-\lambda_{new} * \left( \frac{V}{V_{cr1}} + \alpha \right)^{\eta + \left( \frac{V}{V_{cr2}} \right)^\alpha} * F_1^{m * \frac{1}{|k - k_{cr}|}}} \quad (12)$$

bu ifadede :  $\lambda_{new} = 10^{-5}$ ,  $V_{cr1} = 3,5$ ,  $a = 0,35$ ,  
 $\eta = 0,7$ ,  $V_{cr2} = 5$ ,  $\alpha = 10$ ,  $m = 3,3$ ,  
 $k_{cr} = 36$  olarak kullanılmıştır.



Şekil 4- Sıvı akış hızının etkisi göz önüne alındığında güvenilirlik faktörü R(t)'nin zamanla değişimi

'F1' bir sabit ve 'k' sıvı akış hızıdır. Hesaplamalar sonucunda 'F1' sabiti '1.15' olarak bulunmuştur. Şekil 4'te farklı sıvı akış hızlarında R(t)'nin zamanla değişimi görülmektedir.

Açık havada bulunan iletim hatlarında ve yalıtkanlarında buz yükünün etkisini görebilmek için test örnekleri üzerinde çeşitli deneyler yapılarak kuvvet gerilmesinin etkisi incelenmiştir. Test sonuçları bozulma zamanının uygulanan kuvvet gerilmesi

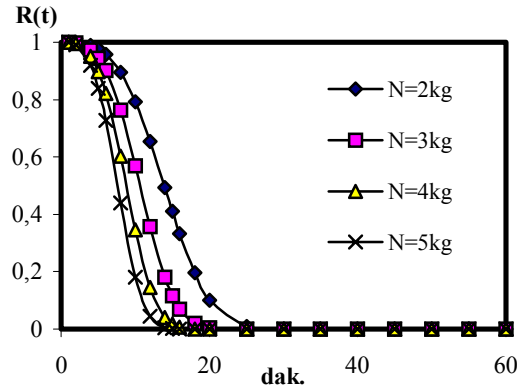
ile orantılı olarak lineer bir şekilde azaldığını ispatlamıştır. Aşağıdaki ifade kuvvet gerilmesinin etkisini göstermektedir ve eşitliğin üstel kısmına eklenmiştir. Burada 'N' uygulanan ağırlığın kütesini temsil etmektedir.

$$(N^{1.88} - 1.32 * N + 1) \quad (13)$$

Eşitliği yeniden düzenleyecek olursak son eşitlik (14) şu hale gelir;

$$R(t) = e^{-\lambda_{new} * \left( \frac{V}{V_{cr1}} + \alpha \right)^{\eta + \left( \frac{V}{V_{cr2}} \right)^\alpha} * F_1^{m * \frac{1}{|k - k_{cr}|}} * (N^{1.88} - 1.32 * N + 1)} \quad (14)$$

Kuvvet gerilmelerinin R(t)'ye etkisi Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5- Kuvvet gerilmesinin etkisi göz önüne alındığında güvenilirlik faktörü R(t)'nin zamanla değişimi

## 5.SONUÇ

Bu çalışma polyester yalıtkanlar için bozulma zamanını doğru bir yaklaşıklıkla kestirebilen bir istatistiksel model içermektedir. Bu amaçla yüzeyde iz oluşumu yöntemi ile yaşlandırılan polyester örneklerin deneysel sonuçlarından yararlanılmıştır. Bu model çeşitli gerilim, sıvı akış hızı ve uygulanan kuvvet gerilmeleri için uygun sonuçlar vermektedir. Elde edilen model ile hesaplanan bozulma süreleri deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Uygulan gerilim, sıvı akış hızı ve kuvvet gerilmelerin kritik değerlerinin üzerinde izolatorün kullanım süresinin hızla azaldığı deneysel verilerde görülmektedir. Bu çalışmada deneysel sonuçlardan yararlanılarak önerilen weibull eşitliği kullanılarak oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Watson,JF; Mason,JH; Lynch,AC (1979): 'Assessing materials for use as outdoor insulation', International Symposium on High Voltage 3, 1-4.
- [2] Mason,JH (1983): "Summary of factors which affect the results of inclined plane tests", CIGRE, 1-3.
- [3] Weller, MC: "Variation in the results of inclined plane tracking tests: some factors controlling the surface tracking activity", 282-286.
- [4] Billings,ML; Wilkings,R; Warren,L (1968): "A comparison of the IEC Dust/Fog and Inclined plane test", EI 3, 33-39.
- [5] "Standard test methods for liquid contaminant, inclined plane tracking and erosion of insulating materials", ASTM (2303), 258-270, 1983.
- [6] A.Kuntman, M.Ugur, A.Merev, "A study on the investigation of surface tracking in polyester insulators", Eleco'99 International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 84-88, December 1999.
- [7] Hagwood C., Clough, R., Fields, R., "Estimation of the stress-threshold for the Weibull inverse power law", IEEE Trans. Reliability, Vol. 48, No.2, pp. 176-181, 1999.
- [8] Wu, E.Y., Nowak, E.J., Vollersten, R.P., Han, L.-K., "Weibull breakdown characteristics and oxide thickness uniformity", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 47, No.12, pp.2301-2309, 2000.
- [9] Wang, W. Kececioglu, D.B., "Fitting the Weibull Log-Linear model to accelerated life-test data", IEEE Transactions on Reliability, Vol.49, No.2,pp. 217-223, 2000.
- [10] Watkins, A.J., ' Review: Likelihood method for fitting Weibull log-linear models to accelerated life-test data', IEEE Trans. Reliability, Vol.49, No.3, pp.361-365, 1994.
- [11] Tseng, S.T., Chyau, C.H., "A classification rule arising from accelerated life tests", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 43, pp. 247-256, 1994.
- [12] Newby, M., "Perspective on Weibull proportional-hazard models", IEEE Trans. Reliability, Vol.43, No.2, pp.217-223, 1994.
- [13] Weibull W., "Fatigue Testing and Analysis of Results", Pergamon Press 1961.
- [14] Ross R., "Comparing Linear Regression and Maximum Likelihood Methods to Estimate Weibull Distributions on Limited Data Sets: Systematic and Random Errors", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.170-173, 1999.
- [15] Stone, GC; Heeswijk, RGV. "Parameter estimation for the Weibull distribution", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 12 No.4, pp.253-261, 1977.
- [16] Chatfield,C (1991): "Statistics for technolgy", 3rd ed. Chapman & Hall, Bristol, 381 pages.
- [17] Auckland, D.W.; Ugur, M. and Varlow, B.R. "A surface tracking model for failure prediction", International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, (ICSD95), 1995, pp.503-507.
- [18] Risino,A.J. " New test methods for assessing the relative tracking performance of insulating materials". Ph.D. Dissertation, University of Manchester,1994.