



**PARÇA GÜVENİLİRLİĞİNİN DÖNEMLER
BAZINDA MODELLENMESİ, PARAMETRE
TAHMİNİ, ANALİZİ ve BİR UYGULAMA**

Yüksek Lisans Tezi

Hande SARAÇOĞLU

Eskişehir 2018

**PARÇA GÜVENİLİRLİĞİNİN DÖNEMLER BAZINDA MODELLENMESİ,
PARAMETRE TAHMİNİ, ANALİZİ ve BİR UYGULAMA**

Hande SARAÇOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Nihal ERGİNEL**

**Eskişehir
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mart 2018**

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1705F124 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Hande SARAÇOĞLU'nun "Parça Güvenilirliğinin Dönemler Bazında Modellenmesi, Parametre Tahmini, Analizi ve Bir Uygulama" başlıklı tezi 08/03/2018 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği" nin ilgili maddeleri uyarınca Endüstri Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı-Adı-Soyadı</u>	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof. Dr. Nihal ERGİNEL	
Üye :	Doç. Dr. Sevil ŞENTÜRK	
Üye :	Doç. Dr. Arzu ALTIN YAVUZ	

.....

Enstitü Müdürü

ÖZET

PARÇA GÜVENİLİRLİĞİNİN DÖNEMLER BAZINDA MODELLENMESİ, PARAMETRE TAHMİNİ, ANALİZİ ve BİR UYGULAMA

Hande SARAÇOĞLU

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 2018

Danışman: Prof. Dr. Nihal ERGİNEL

Güvenilirlik, bir cihazın, ürünün veya sistemin belirtilen çalışma koşullarında belirli bir süre boyunca arıza yapmama olasılığıdır. Ürün güvenilirliği, garanti süresinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir faktördür. Garanti tahmininde yapılan bir hatanın firmalar için çok pahalıya gelebileceği konusunda önemli bir rol oynamaktadır. Garanti süresi üzerindeki arızalar; ürün ile ilgili alınan kararlarla belirlenen ürün güvenilirliğiyle bağlantılıdır. Bu çalışmada, kompresör üretimi yapan bir işletmede bir uygulama yapılmıştır. İşletmede üretilen ürünlerin bir modeli hakkında arıza kayıtlarıyla ilgili yetkili servis verilerinden bilgiler edinilmiştir. Ürün arızalanana kadar geçen süreler, farklı dönemler halinde incelenmiştir. Bu arıza sürelerinin dağılımları ve parametreleri tahmin edilmiştir. Bunlardan hareketle ürünün güvenilirlik analizi çalışması yapılmıştır. Dönemler arasındaki farklılıklar ile ilgili analizler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ürün Güvenilirliği, Ömür Süresi Verileri, Sansürlü Veri, Garanti Süresi

ABSTRACT

MODELLING OF THE RELIABILITY OF THE COMPONENT BASED ON PERIODS, PARAMETER ESTIMATION, ANALYSIS AND AN APPLICATION

Hande SARAÇOĞLU

Department of Industrial Engineering Program
Anadolu University, Graduate School of Sciences, Mar 2018

Supervisor: Prof. Dr. Nihal ERGİNEL

Reliability is the likelihood that a device, product, or system will not fail over a specified period of time under specified operating conditions. Product reliability is an important factor in assessing the warranty period. It plays an important role in the fact that a mistake made in the warranty forecast can be very expensive for companies. The failures on the warranty period are linked to the product reliability determined by the product decisions. In this study, an application was made in a compressor production plant. Informations on the fault recordings of a model of products manufactured in operation has been obtained from the service providers. The time until the product failed was examined in different periods. The distributions and parameters of these failure time were estimated. From this point of view reliability analysis of the product was conducted. Analyzes were made about the differences between the periods.

Keywords: Product Reliability, Lifetime Data, Censored Data, Warranty Period

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimde olduğu gibi yüksek lisans eğitimim boyunca da, bilgisi ve deneyimi ile araştırmalarım ışık tutan, desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, bana yeni bakış açıları kazandıran değerli danışman hocam Prof. Dr. Nihal ERGİNEL'e,

Bu yola çıktığım günden beri, çalışmalarım da her zaman yanımda olan arkadaşım Gülay YILDIZ'a,

Bugüne kadar gerek lisans gerekse yüksek lisans eğitim hayatımda, bana gerekli bilgi ve beceriyi kazandıran tüm kıymetli hocalarıma ve bu yolda destekleri ile yanımda olan arkadaşlarıma,

Ve özellikle beni yetiştirip bugünlere getiren, aldığım her kararda bana destek olan, iyi ve kötü günlerimin yegane şahidi ve her daim destekçisi olan aileme,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hande SARAÇOĞLU

Mart 2018

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı” ile tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....

Hande SARAÇOĞLU

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜVENİLİRLİK KAVRAMLARI	7
2.1. Güvenilirlik Nedir?	7
2.2. Veri Türleri.....	8
2.2.1.Tamamlanmış veriler	8
2.2.2.Sansürlü veriler.....	9
2.2.2.1.Sağdan sansürlü veriler	9
2.2.2.2.Aralıklı sansürlü veriler	11
2.2.2.3.Soldan sansürlü veriler	11
2.3. Temel Güvenilirlik Kavramları ve Terimleri.....	12
2.3.1.Olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu.....	12
2.3.2.Güvenilirlik fonksiyonu	13
2.3.3.Tehlike fonksiyonu ve kümülatif tehlike fonksiyonu	13
2.3.4.Diğer fonksiyonlar	14
2.3.5.Arıza Oranları İçin Küvet Eğrisi	14

2.4. Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Yöntemler	16
2.4.1.Weibull dağılımı.....	17
2.4.2.Üstel dağılım.....	20
2.4.3.Normal dağılım	22
2.4.4.Lognormal dağılım	22
2.4.5.Gama dağılımı.....	24
2.5. Dağılım Karşılaştırma Teknikleri	24
3. SANSÜRLÜ VERİLERDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ	26
3.1. Weibull Dağılımında Parametre Tahmin Yöntemleri.....	26
3.1.1.En Küçük Kareler Yöntemi.....	26
3.1.2.Maksimum Olabilirlik Yöntemi	28
3.2. Sansürlü Veriler İçin Weibull Dağılımının Parametre Tahmini.....	29
4. UYGULAMA	33
4.1. Problem Tanıtımı	33
4.2. Analiz Sonuçları	34
5. SONUÇ	53
KAYNAKÇA.....	55
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Weibull dağılımının β parametresine göre özellikleri	20
Tablo 3.1. İki parametrelili Weibull dağılımında denklemler	30
Tablo 4.1. Uygulamada kullanılan ürün sayıları	33
Tablo 4.2. Dönem-1 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri	34
Tablo 4.3. Dönem-2 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri	35
Tablo 4.4. Dönem-3 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri	35
Tablo 4.5. 3 dönem için parametre, ortalama ve varyans değerleri	35
Tablo 4.6. 3 dönem için yaşam ve kümülatif arıza grafiklerine göre beklenen bozulma süreleri	42
Tablo 4.7. 3 dönem için beklenen garanti süresinde hayatta kalma olasılık değerleri	42
Tablo 4.8. Dönemlerin bozulma oranları test sonuçları	43
Tablo 4.9. 3 dönem için beklenen yaşam süresi değerleri	48
Tablo 4.10. 3 dönem için $1/\eta_c$ değerleri	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Veri türleri	8
Şekil 2.2. Tamamlanmış veri seti	8
Şekil 2.3. Tip-I sağdan sansürlü veri seti	9
Şekil 2.4. Tip-II sağdan sansürlü veri seti	10
Şekil 2.5. Rasgele sağdan sansürlü veri seti	10
Şekil 2.6. Aralıklı sansürlü veri seti	11
Şekil 2.7. Soldan sansürlü veri seti	11
Şekil 2.8. Olasılık yoğunluk fonksiyonu ile kümülatif dağılım fonksiyonu arasındaki ilişki	12
Şekil 2.9. $R(t) - F(t)$ arasındaki ilişki	13
Şekil 2.10. Ürünlerin ya da sistemlerin zamana bağlı arıza oranları	15
Şekil 2.11. Weibull dağılımının şekil parametresinin farklı değerlerine göre olasılık yoğunluk fonksiyonları	19
Şekil 2.12. Weibull dağılımının şekil parametresinin farklı değerlerine göre tehlike oranı eğrileri	19
Şekil 3.1. Doğrusal regresyon çizgisi	26
Şekil 4.1. Dönem-1 için olasılık grafiği	36
Şekil 4.2. Dönem-1 için yaşam grafiği	36
Şekil 4.3. Dönem-1 için kümülatif arıza grafiği	37
Şekil 4.4. Dönem-1 için tehlike grafiği	37

Şekil 4.5. Dönem-2 için olasılık grafiği	38
Şekil 4.6. Dönem-2 için yaşam grafiği	38
Şekil 4.7. Dönem-2 için kümülatif arıza grafiği	39
Şekil 4.8. Dönem-2 için tehlike grafiği	39
Şekil 4.9. Dönem-3 için olasılık grafiği	40
Şekil 4.10. Dönem-3 için yaşam grafiği	40
Şekil 4.11. Dönem-3 için kümülatif arıza grafiği	41
Şekil 4.12. Dönem-3 için tehlike grafiği	41
Şekil 4.13. Dönem-1 için histogram grafiği	44
Şekil 4.14. Dönem-2 için histogram grafiği	45
Şekil 4.15. Dönem-3 için histogram grafiği	45
Şekil 4.16. Dönem-1 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği	46
Şekil 4.17. Dönem-2 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği	47
Şekil 4.18. Dönem-3 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği	47
Şekil 4.19. Dönem-1 için arızalı ürünlerin histogram grafiği	48
Şekil 4.20. Dönem-2 için arızalı ürünlerin histogram grafiği	49
Şekil 4.21. Dönem-3 için arızalı ürünlerin histogram grafiği	49
Şekil 4.22. Dönem-1 için arızalı ürünlerin kümülatif arıza grafiği	50
Şekil 4.23. Dönem-2 için arızalı ürünlerin kümülatif arıza grafiği	50
Şekil 4.24. Dönem-3 için arızalı ürünlerin kümülatif arıza grafiği.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASME	: Amerikan Makine Mühendisleri Topluluğu
AGREE	: Elektronik Ekipman Güvenilirliği Danışma Grubu
ALT	: Hızlandırılmış Ömür Testi
HALT	: Yüksek Hızlandırılmış Ömür Testi
MTTF	: Başarısızlık İçin Ortalama Zaman
MTBF	: Arızalar Arasındaki Ortalama Zaman
MTTR	: Ortalama Tamir Zamanı
$f(t)$	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
$F(t)$	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
$R(t)$	: Güvenilirlik Fonksiyonu
$h(t)$	: Tehlike Fonksiyonu
$H(t)$	: Kümülatif Tehlike Fonksiyonu
x	: Rasgele Değişken
η	: Weibull Dağılımının Ölçek Parametresi
β	: Weibull Dağılımının Şekil Parametresi
δ	: Weibull Dağılımının Konum Parametresi
λ	: Üstel Dağılımının Ölçek Parametresi
μ	: Üstel, Normal, Lognormal ve Gama Dağılımlarının Konum Parametresi
σ	: Normal ve Lognormal Dağılımın Ölçek Parametresi
erf	: Hata Fonksiyonu
$\Gamma()$	: Gama Fonksiyonu
AIC	: Akaike Bilgi Kriteri

α	: Bilinmeyen Parametreler Vektörü
$L(x, \alpha)$	: Olabilirlik Fonksiyonu
$L_{\max}$	: Olabilirlik Fonksiyonunun Maksimize Edilmiş Değeri
i	: Ürün
x_i	: i Ürünün Yaşam Süresi
φ_i	: Sansür Göstergesi
η_c	: Sansürlü Verilerin Ölçek Parametresi
S_M	: Arızalanan Verilerin Arıza Süreleri Toplamı
M	: Arızalı Veri Sayısı
n	: Toplam Veri Sayısı
c	: Sansür Süresi

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte, firmalar arası şiddetli bir rekabet ortamı oluşmuş ve müşteri beklentileri buna bağlı olarak artmıştır. Müşterilerin bu bağlamda firmadan beklentilerinden birisi de ürünlerin garanti süresidir. Hem müşteriler hem de üretici firmalar açısından ürünün garanti süresi dahilinde arızalanması istenmez. Ürünlerde gerçekleşecek herhangi bir arıza, müşteriler açısından memnuniyetsizliğe ve ürüne olan güvensizliğe, üretici firmalar açısından da maliyet ve prestij kaybına neden olur. Bu nedenle garanti süresinin doğru belirlenmesi gerekir.

Garanti süresinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli faktörlerden birisi ürün güvenilirliğidir. Güvenilirlik, bir cihazın, ürünün veya sistemin belirtilen çalışma koşullarında belirli bir süre boyunca arıza yapmama olasılığıdır. Garanti tahmininde yapılan bir hatanın firmalar için çok pahalıya gelebileceği konusunda önemli bir rol oynamaktadır. Garanti süresi üzerindeki arızalar; ürün ile ilgili alınan kararlarla belirlenen ürün güvenilirliğiyle bağlantılıdır.

Güvenilirlik kelimesinin tanımının, ilk olarak 1816'da Şair Coleridge tarafından yapıldığı düşünülmektedir [1]. İkinci Dünya Savaşı'ndan önce kelime anlamı çoğunlukla Tekrar Edilebilirlik ile aynı anlamda kullanılmaktaydı. Bu aşamada, bir test (bilimin herhangi bir dalında) eğer sürekli aynı sonuçlar ile gözlemleniyor ise güvenilir olarak sayılmakta idi. 1920'ler içerisinde Bell Laboratuvarında çalışan Dr.Walter A. Shewart İstatistiksel Süreç Kontrolü uygulayarak ürün hakkında bazı iyileştirmeler yapmakta idi [2]. Buna karşın, aynı zaman diliminde Waloddi Weibull ürün yorulmaları için istatistiksel modeller üzerinde çalışmaktaydı.

İkinci Dünya Savaşı esnasında ve sonrasında elektroniklerin doğasından kaynaklanan birçok güvenilir olmama durumu ve ürün yorgunluğu gündeme gelmiştir. 1945'de M.A. Miner, ASME (Amerikan Makine Mühendisleri Topluluğu) Dergisi içerisinde "Yorulma Esnasında Birikimli Hasar" adında taslak bir yazı paylaşmıştır. Ordu için uygulanan ilk güvenilirlik hususunun, yine güvenilirlik analizi sayesinde kanıtlanmış olan, Radar Sistemleri ve diğer elektronik parçalarda kullanılan, oldukça arıza çıkarmaya yatkın ve maliyetli bir vakum silindiri olduğu görülmüştür. Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü tarafından 1948 yılında Güvenilirlik Topluluğu kurulmuştur. 1950 yılı içerisinde, asker tarafında, Elektronik Ekipman Güvenilirliği Danışma Grubu kurulmuştur. Bu grup, 3 ana çalışma yolu tavsiye etmiştir. Bunlar:

1. Parça güvenilirliğinin artırılması,
2. Tedarikçiler için kalite ve güvenilirlik gereksinimlerinin tanımlanması,
3. Saha verilerinin toplanması ve kök analiz yapılması.

1960'lar içerisinde ise güvenilirlik testleri parça ve sistem bazında daha da önem kazanmıştır [http-1].

Bu çalışmada, kompresör üretimi yapan bir işletmede bir uygulama yapılmıştır. İşletmede üretilen ürünlerin bir modelinin belirli dönemlerde üretilen bir ürün partisi hakkında arıza kayıtlarıyla ilgili yetkili servis verilerinden bilgiler edinilmiştir. Ürün arızalanana kadar geçen süreler, farklı dönemler halinde incelenmiştir. Bu farklı dönemler arasında iyileştirme çalışmaları mevcuttur. Ürün arızalanana kadar geçen sürenin dağılımları ve parametreleri tahmin edilmiştir. Bunlardan hareketle ürünün güvenilirlik analizi çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda MINITAB paket programından faydalanılmıştır. Dönemler arasındaki farklılıklar ile ilgili analizler yapılmıştır.

Bu çalışmayı desteklemek amacıyla güvenilirlik analizi ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Bu bölümün devamında, literatürdeki bu konu ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir.

Güvenilirlik günümüzün teknolojik açıdan yoğun dünyasının her alanına nüfuz eden nitel ve nicel çağrışımlarla her yerde var olan bir nitelik taşımaktadır. Saleh ve Marais (2006), çalışmalarında Güvenilirlik Mühendisliğinin teknik bir disiplin olarak geliştirilmesine yol açan fikirlerin tarihini izlemek ve ardından disiplinin gelişimine neden olan ilk 30 yıldaki birkaç önemli olayı ve katkıyı vurgulamayı amaçlamışlardır. Bu disiplinin doğuşunda istatistiğin ve seri üretimin etkili olduğundan ve bu yeni disiplinin gelişimini hızlandıranın ise vakum tüpünün güvenilmezliği olduğundan bahsetmişlerdir. 1957'de AGREE (Elektronik Ekipman Güvenilirliği Danışma Grubu) tarafından yayınlanan raporun, Güvenilirlik mühendisliğinin doğumunda temel olarak rol aldığını vurgulamışlardır [1].

Atamer ve Çavdar (2009), tek kademeli düz silindirik dişli çark mekanizmasının tasarım aşamasında hasar verilerine dayalı bir güvenilirlik analizi çalışması yapmışlardır. Hasar verilerini, eski ürün ve benzer sistemlerden elde edilmiş gibi rasgele üretmişlerdir. Mekanizmanın güvenilirlik yapısını ortaya çıkarmak için basitleştirilmiş FMEA ve blok diyagram şemaları kullanmışlardır. Verilerin analizinde maksimum benzerlik yöntemi ile yerleşik Matlab komutu “wblfit” kullanmışlardır. Elde edilen

sistem güvenilirlik grafiğini yorumlayarak, güvenilirliğin yükseltilebilmesi ve diğer konulardaki önerilerini sunmuşlardır [3].

Öztürk ve Elevli (2013), traktör ve iş makineleri kabini üreten bir işletmede kullanılmakta olan 4 adet CNC tezgahı için güvenilirlik, bakım kolaylığı ve hazır bulunma değerleri hesaplamışlardır. Öncelikle istatistiksel analiz aşamasında arıza ve tamir verilerinin olasılık dağılımlarından hangisine uyduğunu tespit edip, daha sonra verilere uyan dağılımın parametrelerini kullanmak suretiyle tezgahlar için ayrı ayrı güvenilirlik ve bakım kolaylığı fonksiyonları elde etmişlerdir. Son olarak hazır bulunma oranlarını hesaplayıp tezgahları bu üç kriter bazında karşılaştırmışlardır. Bu analiz yardımıyla hangi tezgahın en iyi durumda ya da en kötü durumda olduğu kanısına varıp bununla ilgili çıkarımlarda bulunmuşlardır [4].

Gürel ve Çakmakçı (2013), çalışmalarında ürün güvenilirliğini bileşen bazında sunmuşlar ve teknik olmayan bir husus oluşturan garanti üzerindeki olası etkileri araştırmışlardır. Veri seti olarak bir LCD TV'nin arıza verilerini kullanmışlardır. Güvenilirliği test etmek için parametrik bir Weibull modeli kullanmış ve doğrusal regresyon yöntemi ile ürünlerin tehlike hızlarını hesaplamışlardır. Verilerin hem soldan hem de sağdan sansürlü olduğunu varsaymışlardır. Bu çalışma ile şirketin, arıza bulguları temel alınarak garanti süresinin uzatılmasının uygun olup olmadığına karar vermesine yardımcı olmayı amaçlamaktadırlar [5].

Carlson ve Murphy (2003), mobil robotlardaki başarısızlık verileri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Üç üreticiyi ve yedi modeli temsil eden on üç robottan arıza tipi ve frekans verilerini toplamışlardır. Analiz sonuçlarına göre, 8 saatlik ortalama MTBF ve % 50'den az kullanılabilirlik ile mobil robotların güvenilirliğinin düşük olduğu sonucuna varmışlardır [6].

Murthy (2006), çalışmasında ürün güvenilirliğinin ürünün garantisi ile olan yakın ilişkisi üzerinde durmuştur. Murthy'e göre garanti, yeni ürün pazarlama ve satışının önemli bir parçasıdır. Ürünün güvenilirliğinin, garanti hizmet bedeli üzerinde ciddi bir etkisi vardır. Bu nedenle, ürün güvenilirliğinin etkin yönetimi, garanti ve güvenilirlik arasındaki bağlantıyı hesaba katmalıdır. Murthy bu düşünce kapsamında çalışmasında, ürün güvenilirliğinin etkin yönetimi için gerekli bir çerçeve geliştirmektedir [7].

Dehghan ve Hoseinnezhad (2009), çalışmalarında, petrokimya tesislerindeki kritik bileşenlerin güvenilirliğini tahmin etmek için yeni bir genelleştirilmiş Weibull modeli sunmaktadır. Model, birikimli başarısızlık oranlarının ampirik değerlerini kullanarak

eğitilen bir yapay sinir ağı içermektedir. Simulasyon yardımıyla, Nöral-Weibull modeli, son zamanlarda literatürde bulunan genelleştirilmiş Weibull modelleri ile karşılaştırılarak farklı petrokimyasal uygulamalardaki üç sınıf valfin güvenilirlik ve başarısızlık oranları hesaplanmıştır. Sonuçlar, mevcut modellerin aksine, önerilen Nöral-Weibull modelinin deneysel güvenilirlik grafiklerinden keyfi şekillerde öğrenebileceğini ve mevcut güvenilirlik modellerinden önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir [8].

Kalaiselvan ve Rao (2016), çalışmalarında, hızlandırılmış ömür testi kullanılarak seramik kapasitörün ömrünü değerlendirmek için parametrik ve parametrik olmayan güvenilirlik tekniklerini karşılaştırmışlardır. Kalaiselvan ve Rao'ya göre, arıza verisinin zamanı, Hızlandırılmış Ömür Testi (ALT) ve Yüksek Hızlandırılmış Ömür Testi (HALT) ile tanımlanır. Nano seramik kondansatörleri hızlandırılmış sıcaklık ve gerilim koşulları altında test etmişler ve kısa süre içerisinde daha fazla hata oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Parametrik yöntem için Weibull dağılımı tanımlanmıştır; Parametrik olmayan yöntem için Kaplan-Meier ve Basit Aktüeryal Yöntem tanımlanmıştır. Hızlanma koşullarında ortalama arıza süresinin (MTTF) tanımlanması için geçen süre, göreceli sapma ile parametrik ve parametrik olmayan metodlar için aynıdır. Analizdeki grafikleri çizmek için Reliasoft Weibull ++ yazılımını kullanmışlardır [9].

Kalaighnam, Kushwaha ve Eilert (2013), çalışmalarında, ürün geri çağırımlarının gelecekteki kazaları ve geri çağırma sayısını azaltıp azaltmamasını ve nasıl etkilediğini araştırmayı amaçlamaktadırlar. Bu kapsamda, 1995 ve 2011 yılları arasında 27 otomobil üreticisinin katıldığı 459 ürün/yıl gözleminde hipotezleri test etmişlerdir. Bulgular, geri çağırma büyüklüğündeki artışların gelecekteki kazaların ve geri çağırmanın sayısının azalmasına yol açtığını göstermektedir. Bu etkinin kısmen ürün güvenilirliğinde meydana gelecek değişikliklerden kaynaklandığını düşünmektedirler [10].

Fan ve Yu (2012), genelleştirilmiş gama ömrü dağılımındaki bir parametrenin stres seviyesinde doğrusal olduğu durumlarda, sabit stres hızlandırılmış ömür testlerinin güvenilirlik analizini tartışmışlardır. Önerilen yöntemin uygunluğunu göstermek için bir simülasyon çalışması ve gerçek bir örnek sunmuşlardır. Simülasyon çalışmasında önerilen yöntemin güvenilir olduğunu doğrulamışlar ve Arrhenius modeli altında gerçek bir örneğe başarıyla uygulamışlardır [11].

Bobrowski, Chen, Döring, Jensen ve Schinköthe (2015), parametrik, semiparametrik ve parametrik olmayan modellerin her biri için bir örnek ile çalışma yapmışlardır. İlk olarak parametrik modelde, hızlandırılmış bir başarısızlık zamanında ömür verilerinin parametrelerinin 2-parametrelili Weibull dağılıma uyduğunu düşünmüşlerdir. İkinci olarak semiparametrik modelde, Survival Analysis'de en çok kullanılan modellerden biri olan Cox Modeli'ni kullanmışlardır. Son olarak da parametrik olmayan modelde, Nadaraya-Watson çekirdek tahmincisinin değiştirilmiş bir sürümünü kullanmışlardır. Bu 3 modelden en uygun olana karar vermek içinse, her üç regresyon modelinde de uygulanabilen uyum iyiliğini (Goodness of Fit) önermişlerdir. Ayrıca, yaklaşımların performansını Monte Carlo simülasyonları ile araştırmışlardır [12].

Kleyner ve Sandborn (2008), çalışmalarında optimal bir ürün doğrulama planı geliştirerek bir ürünün yaşam döngüsü maliyetini en aza indirgeyen nicel bir çözüm sunmuşlardır. Çalışmada geliştirilen metodoloji, güvenilirlikle ilgili çeşitli faaliyetleri, ürünün yaşam döngüsü maliyetini en aza indirgeyen kapsamlı bir olasılıkçı maliyet modeline dahil etmektedir. Model, ürün doğrulama faaliyetlerinin maliyeti ile onarım ve garanti getirilerinin beklenen maliyeti arasındaki ters ilişkiyi kullanır. Model parametrelerindeki belirsizlikleri hesaba katmak için toplam stokastik maliyet modeli ve minimizasyonu, Monte Carlo simülasyonu ile yapılmıştır. Model, bir otomotiv elektronik ürünü uygulaması üzerinde gösterilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, uygulamaya özel optimal ürün doğrulama planlarını sağlamış ve bir ürün doğrulama programının verimliliğini bir yaşam döngüsü maliyeti açısından değerlendirerek doğrulama ve ürün garantileri maliyetini vurgulamıştır [13].

Kuş (2005), çalışmasında, düzgün dağılımın iki parametresinin ilerleyen tür tip-II sağdan sansürlü örnekleme dayalı jackknife tahmin edicilerini elde etmektedir. Jackknife ve jackknife uygulanmamış tahmin edicilerin beklenen değer ve varyanslarını türetmiş ve birbirleriyle karşılaştırmıştır. Tahmin edicilerin kullanımı için nümerik bir örnek vermiştir. Uygulamadaki hesaplamaları yapabilmek için Delphi 5 programlama dili ve Excel 97 paket programından faydalanmıştır. Düzgün dağılımın parametreleri için Jackknife tahmin edicilerinin kapalı formda elde edilmesinin, beklenen değer ve varyanslarının kesin olarak bulunmasına imkan vermesi açısından ve diğer tahmin edicilerin varyansı ve beklenen değeri ile karşılaştırılması açısından çok önemli olduğu sonucuna varmıştır [14].

Wu ve Kuş (2009), çalışmalarında aşamalı bir ilk arıza-sansür planı adı verilen yeni bir yaşam test planı sunmuşlardır. Yeni sansür şeması için, maksimum olasılık tahminleri, kesin ve yaklaşık güven aralıkları ve Weibull dağılım parametreleri için kesin bir güven bölgesi üzerine tartışmışlardır. Önerilen sansür şemasını göstermek için sayısal bir örnek vermişlerdir. Geliştirilen tahmin yöntemlerinin performansını değerlendirmek için ise bazı simülasyon sonuçları kullanmışlardır. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen güven aralıklarının ve bölgelerin kapsama olasılıkları istenen seviyeye yakındır. Daha sonra, önerilen yaşam test planını tamamlaması için beklenen süreyi türetmişlerdir. Son olarak, beklenen test süresi açısından farklı sansür şemaları arasında karşılaştırma yapmak için sayısal bir çalışma vermişlerdir [15].

Bu çalışmanın diğer bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde güvenilirlik ile ilgili genel kavramlar ve istatistiksel dağılımlar hakkında bilgiler verilmektedir. Üçüncü bölümde, yapılan güvenilirlik analizinde verilerin uyduğu dağılımın belirlenmesinde dağılımların karşılaştırma tekniklerinden ve dağılım parametrelerinin tahmin yöntemlerinden bahsedilmektedir. Dördüncü bölümde, bu konu kapsamında yapılan bir uygulamanın ayrıntılarından bahsedilmektedir. Son bölümde ise, çalışma ile ilgili sonuçlar hakkında bilgiler verilmektedir.

2. GÜVENİLİRLİK KAVRAMLARI

2.1. Güvenilirlik Nedir?

Güvenilirlik kavramının bir ürünün önemli bir özelliği olduğu konusunda bir fikir birliği olmasına rağmen, güvenilirliğin evrensel olarak kabul edilmiş bir tanımı yoktur. Geçmişte güvenilirlik için kullanılan bazı tanımlar şu şekildedir:

- Yanlış giden şeylerin azaltılması [16].
- Ürünün, kullanıcının istediği şeyi, kullanıcının istediği şekilde yaptığını açıklayan bir niteliği [17].
- Bir ürünün zaman içindeki performansının müşteri beklentilerini karşılama kabiliyeti [18].
- Belirtilen çalışma koşullarında belirli bir süre boyunca bir cihazın, ürünün veya sistemin arıza yapmama olasılığı [19].

Bir ürünün gelecekteki performansı ile ilgili her zaman belirsizlik olduğu için, bir ürünün gelecekteki performansı rasgele bir değişkendir ve olasılığın matematik teorisi, bir ürünün gelecekteki performansı ile ilgili belirsizliği nitelendirmek için kullanılabilir. Olasılık istatistikler kullanılarak tahmin edilebilir ve bu nedenle güvenilirlik hem olasılık hem de istatistiklere ihtiyaç duymaktadır. Bir ürün satın alındığında, ürünün belirli bir süre çalışması beklenmektedir. Genellikle bir üretici, ürünün başarısız olmaması gereken süreyi belirten bir garanti sunar ve başarısız olursa, müşteriye bir değiştirme garantisi verilmektedir [20].

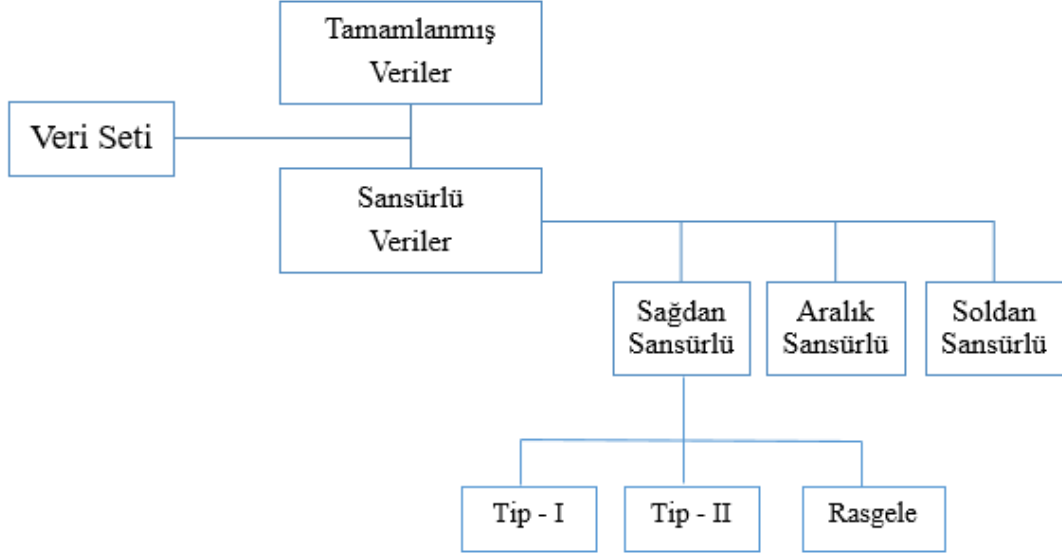
Tüm bunlar ışığında genel bir “güvenilirlik” tanımı yapılması gerekirse;

Güvenilirlik, bir ürünün veya sistemin ömrü şartlarında talep edilen süre boyunca kendisinden istenilen fonksiyonu veya görevi herhangi bir bozulma veya arıza olmadan yerine getirmesidir.

Ürün güvenilirliği, garanti süresinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir faktördür. Garanti tahmininde yapılan bir hatanın firmalar için çok pahalıya gelebileceği konusunda önemli bir rol oynamaktadır. Garanti süresince şirketler bir takım servis stratejileri uygularlar. Her servis departmanı, ürünün bakımı veya onarımı için maliyet, hizmet için personel alımı ve eğitimi, yedek parça stoklarının temin edilmesi ve tutulması anlamına gelir. Güvenilirlik, bir ürünün başarısında büyük bir ekonomik faktördür. Garanti süresi üzerindeki arızalar; tasarım, geliştirme ve imalat sırasında alınan kararlarla belirlenen ürün güvenilirliğiyle bağlantılıdır [7].

2.2. Veri Türleri

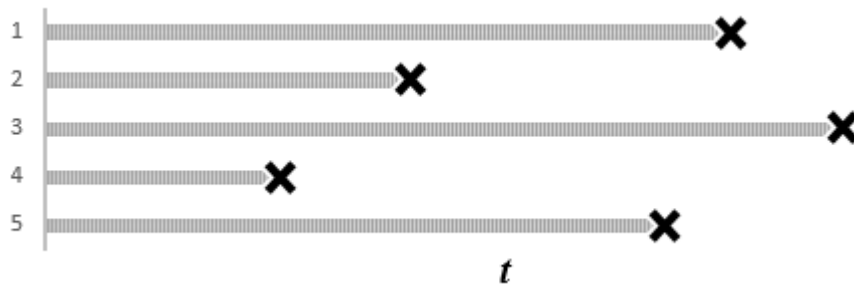
Güvenilirlik analizinde kullanılan veriler genel olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunlar tamamlanmış veriler ve sansürlü verilerdir. Verilerin genel olarak sınıflandırılması Şekil 2.1.'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Veri Türleri

2.2.1. Tamamlanmış veriler

Veri setindeki tüm bileşenler başarısız olursa ve bu başarısızlıktan sonra ömür süreleri kaydedilirse, bu şekilde elde edilen veri setinin tamamlandığı söylenmektedir. Yani veri setindeki tüm verilerin başarısızlık süreleri bilinmektedir. Bu yüzden de tamamlanmış veriler olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.2.'de tamamlanmış verilerden oluşan bir veri setine bir örnek verilmektedir. Burada “x” ile belirtilen noktalar arızaların gerçekleştiği noktalardır.



Şekil 2.2. Tamamlanmış veri seti

2.2.2. Sansürlü veriler

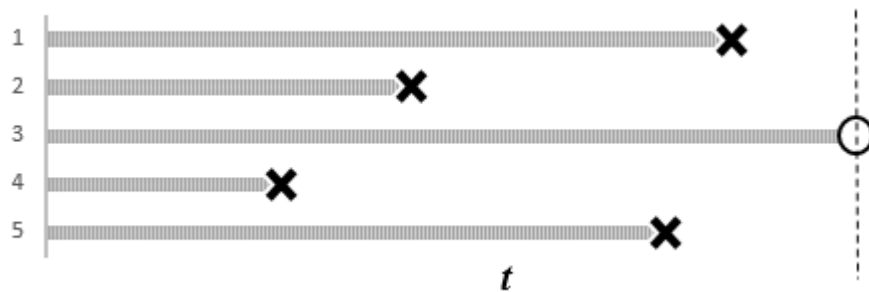
Çoğu zaman, tüm bileşenleri ömrü boyunca gözlemlemek veya başarısız oluncaya kadar beklemek pratik değildir veya pahalı olmaktadır. Bu nedenle, tüm bileşenler başarısız olmadan önce gözlem yapmak için sansür uygulanır [21]. Şekil 2.1.'de de görüldüğü gibi sansürlü veriler; sağdan sansürlü veriler, aralık sansürlü veriler ve soldan sansürlü veriler olmak üzere 3'e ayrılır.

2.2.2.1. Sağdan sansürlü veriler

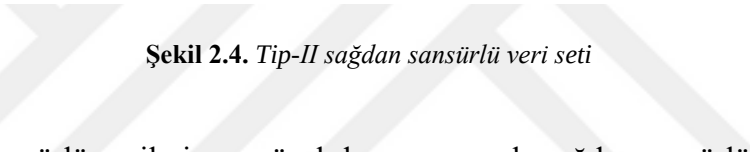
Sansürlü verilerde en sık rastlanan sansür türü sağdan sansürdür. Gözlem anında henüz arızalanmayan, çalışmaya devam eden veriler sağdan sansürlü olarak adlandırılmaktadır. Örneğin, 10 birimlik bir veri seti, belirli bir zamanda gözlemlendiyse, bu zamanda verilerden 3 tanesi arızalanmış kalan 7 tanesi çalışmaya devam ediyorsa; henüz arızalanmayan bu 7 birim için sansür vardır. Çalışmaya devam eden verilerin gözlem yapılan zamandan sonra yani o zamanın sağ tarafında bir zamanda arızalanacağı bilinmektedir. Bu yüzden bu veriler sağdan sansürlüdür denilmektedir.

Güvenilirlik analizi çalışmalarında sağdan sansürlü verilerin genel olarak 3 özel durumu görülmektedir. Bunlar, tip-I sağdan sansürlü veriler, tip-II sağdan sansürlü veriler ve rasgele sağdan sansürlü verilerdir.

Tip-I sağdan sansürlü verilere zaman sansürü de denilmektedir. Bu tür verilerle yapılan çalışma belirli bir zamana kadar sürdürülüp belirli bir zamanda sonlandırılmaktadır. Çalışma sonlandığında hala çalışmakta olan veriler tip-I sağdan sansürlü olarak adlandırılmaktadır [21]. Şekil 2.3.'te buna bir örnek verilmektedir.



Şekil 2.3. Tip-I sağdan sansürlü veri seti

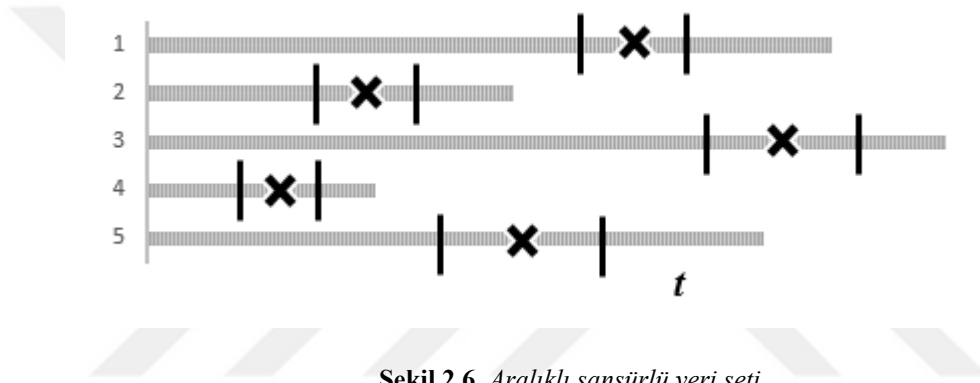


Sağdan sansürlü verilerin son özel durumu rasgele sağdan sansürlü verilerdir. Bu sansür, çalışma sırasında herhangi bir zamanda veriler çalışmadan çekildiğinde oluşmaktadır. Başka bir deyişle, rasgele sansürlenmiş bir veri kümesinde, veriler belirli bir derecede yüksek veya düşük arıza riski taşıdığı için sansürlenemez. Şekil 2'de görüldüğü gibi, bu durum, her veri için farklı sansürleme süreleri sağlamaktadır.

10

2.2.2.2.Aralıklı sansürlü veriler

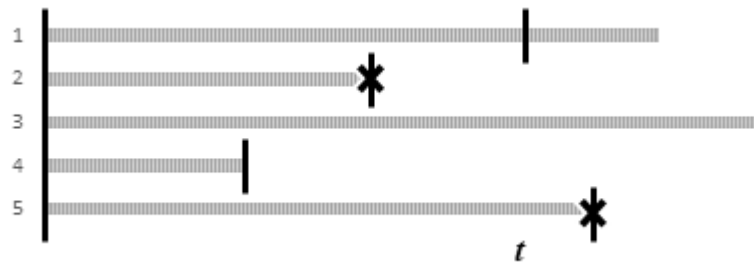
Sansürlü verilerin bir diğeri, aralıklı sansürlü verilerdir. Bu veri türünde, veri setindeki tüm arızalanan verilerin arıza durumları, belirli periyotlar arasında yapılan gözlemlerde farkedilmektedir. Arızaların kesin olarak ne zaman gerçekleştiği bilinmemektedir. Yalnızca iki gözlem arasında bir zamanda gerçekleştiği bilinmektedir. Şekil 2.6.'da aralıklı sansürlü verilerden oluşan bir veri setine bir örnek verilmektedir. Burada “x” ile belirtilen noktalar arızaların gerçekleştiği noktalardır. Şekilde de görüldüğü gibi, iki gözlem arasında bir zamanda arıza gerçekleşmiştir, ancak arızanın kesin zamanı bilinmemektedir.



Şekil 2.6. Aralıklı sansürlü veri seti

2.2.2.3.Soldan sansürlü veriler

Sansürlü verilerin son türü soldan sansürlü verilerdir. Bu veri türü, belirli bir veri için başarısız olma zamanının, başlangıç zamanı ile gözlem zamanı arasında oluştuğu bilinen aralıklı sansürlü bir verinin özel bir örneğidir. Belirli bir zamandan önce arızalar oluşur. Ancak arıza zamanı kesin olarak bilinmemektedir [21]. Şekil 2.7.'de soldan sansürlü verilere bir örnek verilmektedir.



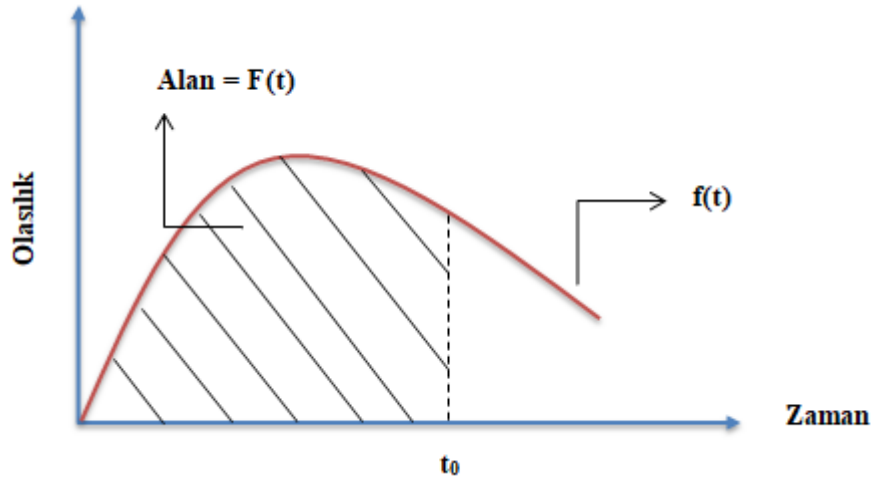
Şekil 2.7. Soldan sansürlü veri seti

2.3. Temel Güvenilirlik Kavramları ve Terimleri

Güvenilirlik bir mühendislik disiplini olduğu için istatistiksel araçlar ve yöntemler güvenilirlik çalışmalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu yüzden güvenilirliği anlayabilmek için öncelikle temel bir istatistiksel bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır [22]. Güvenilirlikte kullanılan başlıca kavramlar aşağıda açıklanmaktadır.

2.3.1. Olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu

Olasılık yoğunluk fonksiyonu, t zamanındaki başarısızlığın anlık olasılığını açıklamaktadır [24]. Bu fonksiyon $f(t)$ ile ifade edilmektedir. Kümülatif dağılım fonksiyonu ise, popülasyondan seçilen rasgele bir ürünün t zamanına kadarki başarısız olma ihtimalidir [22]. Bu fonksiyon ise $F(t)$ ile ifade edilmektedir. Şekil 2.8.'de olasılık yoğunluk fonksiyonu ile kümülatif dağılım fonksiyonu arasındaki bağlantı gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Olasılık yoğunluk fonksiyonu ile kümülatif dağılım fonksiyonu arasındaki ilişki

Olasılık yoğunluk fonksiyonu altındaki alan, kümülatif dağılım fonksiyonunu vermektedir. Bu fonksiyon aynı zamanda güvenilmezlik fonksiyonu olarak da ifade edilmektedir [22]. Şekile göre, $t = t_0$ anında grafiğin altında kalan alan, t_0 anına kadarki başarısız olma ihtimalini vermektedir.

Bir popülasyondaki bir ürünün ömür süresi T rasgele değişkeni ile ifade edilirse; ürünün t zamanından önce arızalanma olasılığı aşağıdaki gibi bulunmaktadır [25].

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(x)dx, t > 0 \quad (2.1)$$

2.3.2. Güvenilirlik fonksiyonu

Güvenilirlik fonksiyonu, bir popülasyondan seçilen rasgele bir ürünün t zamanına kadar arızalanmadan yaşamını sürdürmesi ihtimalini ifade etmektedir. Bu fonksiyon $R(t)$ ile ifade edilmektedir.

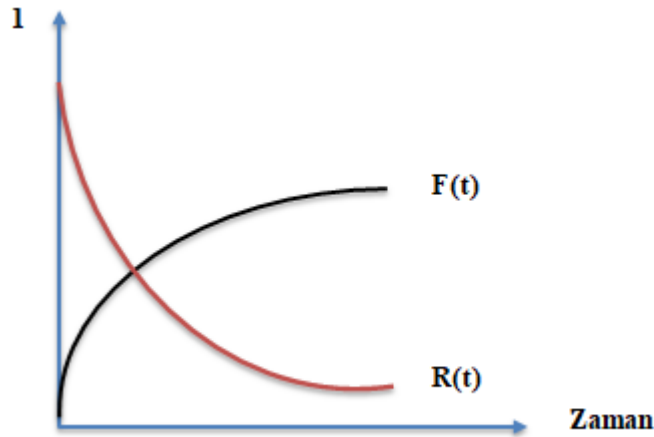
Bir popülasyondaki bir ürünün ömür süresi T rasgele değişkeni ile ifade edilirse ve ürünün t zamanına kadar arızalanmadığı biliniyorsa; bu ürünün, t zamanından sonra da arızalanmaması olasılığı aşağıdaki gibi bulunmaktadır [25].

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(x)dx, t > 0 \quad (2.2)$$

Kümülatif dağılım fonksiyonu ile güvenilirlik fonksiyonu arasında aşağıdaki gibi bir bağlantı bulunmaktadır.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.3)$$

Dolayısıyla güvenilirlik fonksiyonu ile kümülatif dağılım fonksiyonu arasındaki bağlantı Şekil 2.9.'daki gibi gösterilmektedir.



Şekil 2.9. $R(t) - F(t)$ arasındaki ilişki

2.3.3. Tehlike fonksiyonu ve kümülatif tehlike fonksiyonu

Tehlike fonksiyonu, bir popülasyonda henüz arızalanmayan, t anına kadar hayatta kalan ürünler için ondan sonraki belirli bir zaman dilimi için ani başarısızlık oramıdır. Bu fonksiyon $h(t)$ ile ifade edilmektedir.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

Kümülatif tehlike fonksiyonu ise, T zamanı içinde belirli bir t anı için hesaplanmış olan başarısızlık olasılıklarının kümülatif fonksiyonudur. Bu fonksiyon H(t) ile ifade edilmektedir.

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx \quad (2.5)$$

Bu integral kapalı bir formda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$H(t) = - \ln R(t) \quad (2.6)$$

2.3.4. Diğer fonksiyonlar

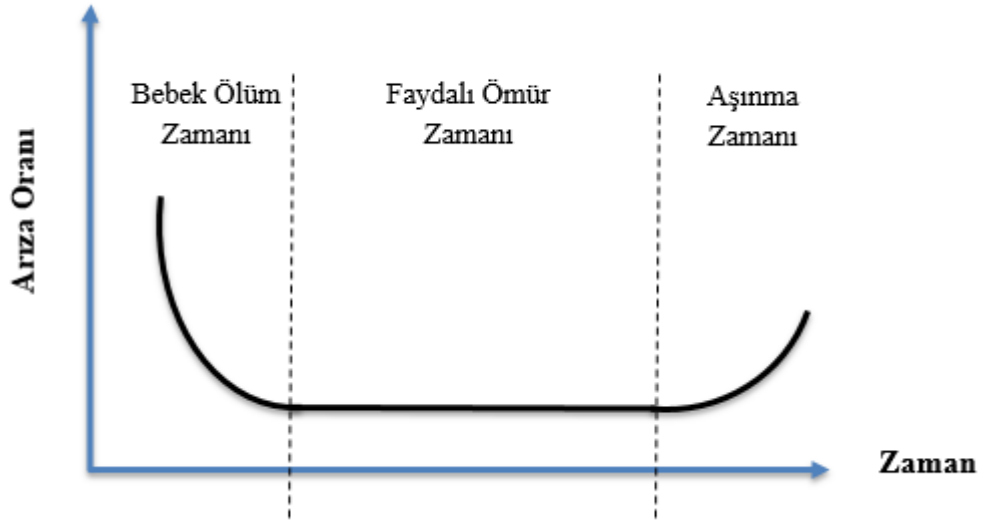
Başarısızlık için ortalama zaman (MTTF), bir ürünün başarısızlığa uğradığı ortalama zamanı tanımlar ve aşağıdaki formüller kullanılarak elde edilebilir.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$
$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.7)$$

Bazı ürünler bir kereden fazla başarısız olabilir ve tamir edildikten sonra çalışmaya devam eder. Bu tür tamir edilip yeniden kullanılabilen ürünler için MTTF yerine arızalar arasındaki ortalama zaman (MTBF) kullanılır. MTBF, başarısız olmuş bir ürünün onarılıp çalışmaya geri dönmesinden tekrar başarısız olduğu zamana kadar geçen ortalama işlem süresini temsil eder. Arızalı ürünün onarımı için gereken süreyi içermez. Burada, başarısız olmuş bir ürünün onarılması için gereken ortalama süreye ise ortalama tamir zamanı (MTTR) denmektedir [22].

2.3.5. Arıza Oranları İçin Küvet Eğrisi

Bileşen grupları olarak adlandırılabilirler birlikte çalışan çoğu ürün veya sistem, başarısızlık oranı eğrilerine sahip olma eğilimindedir. Bu eğri, bir küvet şekline benzemesi sebebiyle küvet eğrisi olarak adlandırılmaktadır. Küvet eğrisi, ürünlerin ve sistemlerin zamana bağlı arıza oranlarını göstermek için kullanılır. Genellikle Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi olmaktadır. Şekildeki gösterim bir ürünün ya da sistemin ömrü boyunca karşılaştığı başarısızlık ve arıza modlarını doğru bir şekilde ifade edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.10. Ürünlerin ya da sistemlerin zamana bağlı arıza oranları

Ürünlerin ya da sistemlerin başarısızlık zamanları 3'e ayrılır. Bunlardan ilki bebek ölüm zamanı olarak bilinen dönemdir. Bu dönemde arıza oranı yüksek bir değerle başlar ve zaman geçtikçe bu değer azalır. Bu tip arızalar beklenen arıza zamanından çok daha erken gerçekleştiği için bu dönem erken arıza dönemi olarak da bilinmektedir. Müşterilere ulaşan ürünler arızalı olduğu için ya da kullanımdan çok kısa bir zaman sonra arıza gerçekleştiği için müşteri memnuniyeti açısından göz ardı edilememektedir [22]. Bebek ölüm zamanında arızaların gerçekleşme sebeplerine; ürün kalite kontrolünün doğru ve tam olarak yapılmaması, malzemelerin yanlış kullanımı, imalat süreçlerinin zayıflığı, yanlış paketleme, kurulumun doğru yapılamaması, ürünün kurulumda ilk kez enerji verildiğinde ani elektrik dalgalanmaları nedeniyle arızalanması gibi örnekler verilebilir. İmalatta ve kurulumda gerçekleşen kusurlara ek olarak, ürünün nakliyesi sırasında özensiz davranılması sonucu arızalanması ya da zarar görmesi de imalatla erken bir arıza olmamasına rağmen ürünün müşteriye arızalı olarak ulaşmasına sebep olmaktadır.

Eğrideki ikinci dönem faydalı ömür zamanı olarak adlandırılmaktadır. Bu döneme kararlı arıza süresi veya normal dönem de denilmektedir. Bu dönemde arıza oranı en düşük seviyeye ulaşır ve sabit bir şekilde kalmaktadır. Arızalar, ürünün ya da sistemin ne kadar süre çalıştığına bağlı görünmeyen üniform veya sabit bir hızda rasgele bir şekilde ortaya çıkar [26]. Ürünlerin ya da sistemlerin müşteriye sunulmadan önce tasarlanmasında beklenen yükten daha fazla yük oluşması, insan hataları, ürünün yanlış

kullanılması, fırtına, sel ve deprem gibi doğal afetlerin verdiği zararlar ve açıklanamayan diğer nedenler bu dönemde oluşan sebepleri oluşturmaktadır [27].

Başarısızlık oranının arttığı eğrinin son dönemi, aşınma zamanı olarak tanımlanır [26]. Bu dönemde ürünün ya da sistemin yaşlanması ve yıpranmasının etkileri görülmektedir. Bu yüzden arıza oranları gittikçe artan bir hızla ortaya çıkmaktadır. Ürünlerin ya da sistemlerin ömürleri boyunca aşınma zamanında arızalanmalarına sebep olarak; yaşlanma, yorgunluk, yıpranma, mekanik, elektriksel ve kimyasal bozulma, hizmetin, bakımın ve onarımın düzgün yapılmaması gibi sebepler gösterilmektedir [22].

2.4. Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Yöntemler

Güvenilirlik analizi çalışmasında, veriler analiz edilmeden önce yapılması gereken analizin yöntemine karar vermektir. Bu anlamda analiz yöntemleri 3'e ayrılmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

- Parametrik analiz,
- Parametrik olmayan analiz,
- Yarı parametrik analiz.

Parametrik analiz, arıza verilerini bilinen bir istatistiksel dağılımla modellemeye olanak sağlayan bir yöntemdir. Gözlemlenen verilere en iyi uyan istatistiksel bir dağılım seçilerek yapılır. İstatistiksel dağılım parametreleri tahmin edildikten sonra herhangi bir zamandaki tehlike veya güvenilirliği tahmin etmek için kullanılabilir [24]. Parametrik analiz yöntemlerini kullanmak daha profesyonel sonuçlar vermektedir. Bu sebeple, güvenilirlik analizinde kullanılan önemli dağılımlarla çalışmak daha çok tercih edilen bir yol olmaktadır [25].

Parametrik olmayan analiz, verilerin uyduğu herhangi bir dağılımın olmadığı durumlarda arıza verilerini analiz etmeye olanak sağlayan bir yöntemdir. Bu durum, dağılım hakkında yanlış varsayımlar yaparak ortaya çıkabilecek muhtemel büyük hataları önlemektedir. Bununla birlikte, gözlem aralığının dışındaki tahminler parametrik olmayan analizle mümkün olmamaktadır [24]. Belli bir dağılım varsayımı gerektirmediği için pratikte daha kullanışlı olmaktadır [25]. Ancak daha profesyonel sonuçlar vermesi sebebiyle genellikle parametrik yöntem tercih edilmektedir. Parametrik olmayan analizde en yaygın yöntemler, Yaşam Tablosu Yöntemi ve Kaplan-Meier Yöntemi'dir.

Bir istatistiksel analizde araştırılan unsuru etkileyen tek bir neden var ise, neden-sonuç ilişkisinin sınanmasında tek yönlü istatistiksel analizler uygun olmaktadır. Çoğu bilimsel çalışmada olayların gelişimini etkileyen nedenler çok sayıdadır. Bu durumda tek bir neden-sonuç ilişkisinin değerlendirildiği istatistiksel analizlerin uygulanması ve yorumlanması yanlış sonuçlar elde edilmesine neden olacağından, olayların çok değişkenli istatistikler kullanılarak çözümlenmesi en uygun olan yöntem olarak kabul edilmektedir. Yarı parametrik analizde, başarısızlık zamanlarının cevap değişkeni olarak kabul edildiği ve bu değişkeni açıkladığı düşünülen diğer değişkenlerin de analizde yer aldığı regresyon modelleri kullanılmaktadır [28]. Yarı parametrik analiz yönteminde kullanılan en yaygın tür Cox Regresyon Yöntemi'dir.

Bu çalışmada parametrik bir analiz yöntemi kullanıldığı için bu yöntemden daha detaylı olarak bahsedilecektir.

Güvenilirlikte, parametrik analiz yapılırken en sık kullanılan istatistiksel dağılımlar; Weibull, Üstel, Normal, Lognormal ve Gamma dağılımlarıdır. Aşağıda bu dağılımların olasılık yoğunluk fonksiyonları, dağılım fonksiyonları, güvenilirlik fonksiyonları ve tehlike fonksiyonları verilmektedir.

2.4.1. Weibull dağılımı

Weibull dağılımı, pek çok farklı veri için esneklik özelliğine sahip olması sebebiyle güvenilirlik analizinde sıklıkla kullanılan dağılımlardan bir tanesidir. İki parametrelili ve üç parametrelili modelleri mevcuttur.

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2.8)$$

Burada, x rasgele değişkeni η ve β parametrelili Weibull dağılımına uyuyor denilmektedir. η parametresi dağılımın ölçek parametresi iken, β parametresi dağılımın şekil parametresidir.

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki dağılım fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2.9)$$

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki güvenilirlik fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$R(x) = 1 - F(x) = e^{\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}\right]} \quad (2.10)$$

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki tehlike fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.11)$$

Dağılım üç parametrelili bir Weibull dağılımı olduğunda, bir x rasgele değişkeninin üç parametrelili dağılımdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-\delta}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\left[-\left(\frac{x-\delta}{\eta}\right)^{\beta}\right]} \quad (2.12)$$

Burada, x rasgele değişkeni η , β ve δ parametrelili Weibull dağılımına uyuyor denilmektedir. η parametresi dağılımın ölçek parametresi, β parametresi dağılımın şekil parametresi ve δ parametresi dağılımın konum parametresidir.

Bir x rasgele değişkeninin üç parametrelili dağılımdaki dağılım fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(x) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{x-\delta}{\eta}\right)^{\beta}\right]} \quad (2.13)$$

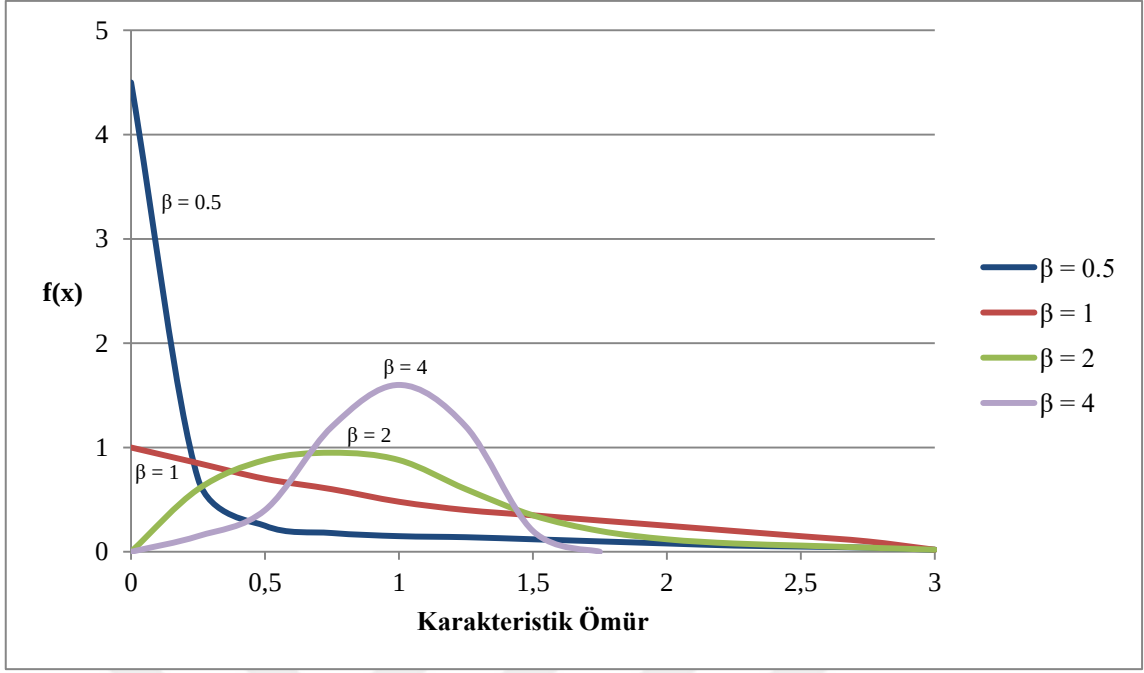
Bir x rasgele değişkeninin üç parametrelili dağılımdaki güvenilirlik fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$R(x) = 1 - F(x) = e^{\left[-\left(\frac{x-\delta}{\eta}\right)^{\beta}\right]} \quad (2.14)$$

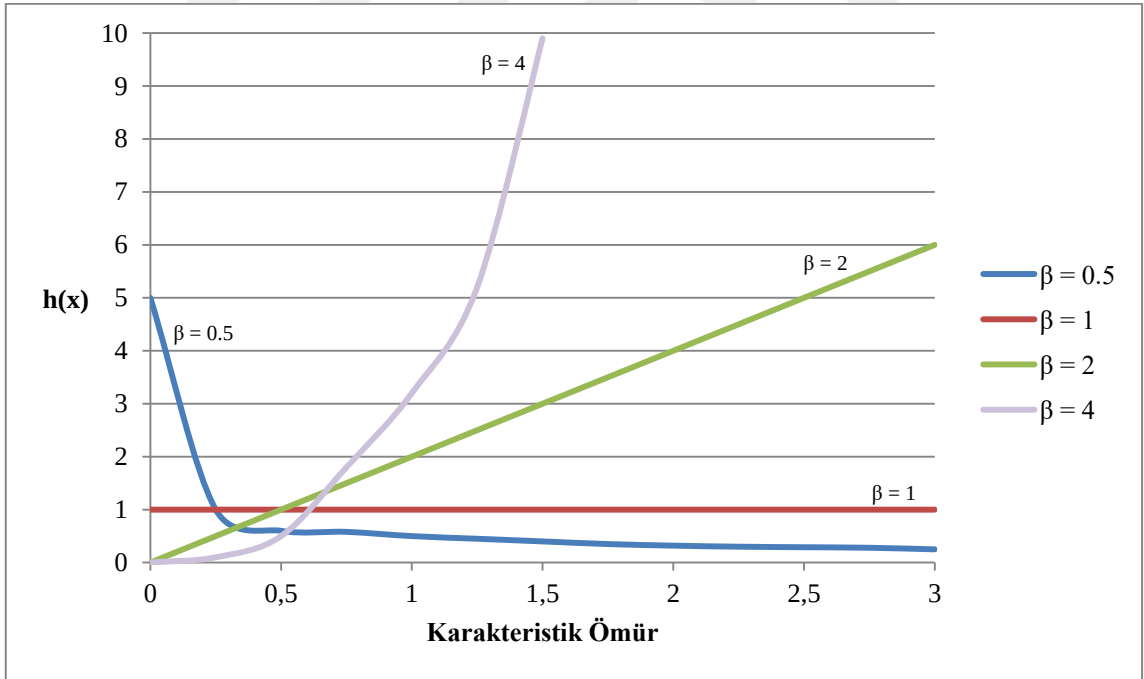
Bir x rasgele değişkeninin üç parametrelili dağılımdaki tehlike fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-\delta}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.15)$$

Şekil parametresi β , Weibull dağılımının nasıl görüneceğini belirlemekte büyük rol oynamaktadır. Şekil 2.11, Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonlarının çeşitli örneklerini göstermektedir. Şekil 2.12, Weibull dağılımının tehlike oranı eğrilerinin çeşitli örneklerini göstermektedir.



Şekil 2.11. Weibull dağılımının şekil parametresinin farklı değerlerine göre olasılık yoğunluk fonksiyonları



Şekil 2.12. Weibull dağılımının şekil parametresinin farklı değerlerine göre tehlike oranı eğrileri

$0 < \beta < 1$ değeri için, zaman sıfıra yaklaştıkça olasılık yoğunluk fonksiyonu sonsuzluğa yaklaşmakta ve zaman arttıkça daima sıfıra doğru hızla azalmaktadır. Tehlike oranı da olasılık yoğunluk fonksiyonu ile aynı şekilde davranmaktadır ve bu tür

Weibull dağılımı, kuvvet eğrisinin ilk evresine özgü erken bir arıza mekanizması için uygun bir model oluşturmaktadır.

$\beta = 1$ olduğunda, Weibull dağılımı, sabit bir tehlike oranı $\lambda = \frac{1}{\eta}$ ile standart üstel bir değere indirgenmektedir. Bu da kuvvet eğrisinin ikinci evresine özgü erken bir arıza mekanizması için uygun bir model oluşturmaktadır.

$\beta > 1$ değeri için, olasılık yoğunluk fonksiyonu sıfırdan başlayıp, $\eta \left[1 - \left(\frac{1}{\beta}\right)\right]^{\frac{1}{\beta}}$ noktasında tepe noktasına yükselmektedir. Daha sonra zaman arttıkça sıfıra doğru azalmaktadır. Tehlike oranı da sıfırdan başlamakta ancak yaşam boyunca monoton olarak artmaktadır. Artış oranı β 'nın boyutuna bağlıdır. Bu tür Weibull dağılımı, kuvvet eğrisinin son evresine özgü bir yıpranma arıza mekanizmaları için uygun bir model oluşturmaktadır [26].

Tablo 2.1., Weibull dağılımının şekil parametresi β 'nın değerine göre olasılık yoğunluk fonksiyonu ve tehlike oranının değişimlerini özetlemektedir.

Tablo 2.1. Weibull Dağılımının β Parametresine Göre Özellikleri

Şekil Parametresi (β)	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu ($f(x)$)	Tehlike Oranı ($h(x)$)
$0 < \beta < 1$	Sonsuzdan üstel azalan	Sonsuzdan üstel azalan
$\beta = 1$	$\frac{1}{\eta}$ 'dan üstel azalan	Sabit
$\beta > 1$	Tepe noktasına yükselen ve sonra azalan	Artan
$\beta = 2$	Rayleigh dağılımı	Doğrusal olarak artan
$3 \leq \beta \leq 4$	“Normal” çan şeklinde görünüm	Hızla artan

2.4.2. Üstel dağılım

Güvenilirlik analizinde kullanılan dağılımlardan bir diğeri Üstel Dağılım'dır. Bir x rasgele değişkeninin tek parametrelili dağılımdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (2.16)$$

Burada, x rasgele değişkeni λ parametrelili Üstel dağılıma uyuyor denilmektedir. λ parametresi dağılımın ölçek parametresidir.

Bir x rasgele değişkeninin tek parametrelili dağılımdaki dağılım fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (2.17)$$

Bir x rasgele değişkeninin tek parametrelili dağılımdaki güvenilirlik fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$R(x) = 1 - F(x) = e^{-\lambda x} \quad (2.18)$$

Bir x rasgele değişkeninin tek parametrelili dağılımdaki tehlike fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir. Denklemden de anlaşılacağı gibi üstel dağılımda tehlike fonksiyonu sabit olmaktadır.

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \lambda \quad (2.19)$$

Dağılım iki parametrelili bir Üstel dağılımı olduğunda, bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda(x-\mu)} \quad (2.20)$$

Burada, x rasgele değişkeni λ ve μ parametrelili Üstel dağılıma uyuyor denilmektedir. λ parametresi dağılımın ölçek parametresi iken, μ parametresi dağılımın konum parametresidir.

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki dağılım fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda(x-\mu)} \quad (2.21)$$

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki güvenilirlik fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$R(x) = 1 - F(x) = e^{-\lambda(x-\mu)} \quad (2.22)$$

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki tehlike fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \lambda \quad (2.23)$$

2.4.3. Normal dağılım

Güvenilirlik analizinde kullanılan dağılımlardan bir diğeri Normal Dağılım'dır. Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili normal dağılımdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (2.24)$$

Burada, x rasgele değişkeni μ ve σ parametrelili Normal dağılıma uyuyor denilmektedir. μ parametresi dağılımın konum parametresi iken, σ parametresi dağılımın ölçek parametresidir.

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili normal dağılımdaki dağılım fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2.25)$$

Burada erf fonksiyonu, hata fonksiyonudur.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.26)$$

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili normal dağılımdaki güvenilirlik fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$R(x) = 1 - F(x) = 1 - \left[\frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \right] \quad (2.27)$$

2.4.4. Lognormal dağılım

Güvenilirlik analizinde sıklıkla kullanılan bir diğeri Lognormal Dağılım'dır.

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (2.28)$$

Burada, x rasgele değişkeni μ ve σ parametrelili Lognormal dağılıma uyuyor denilmektedir. σ parametresi dağılımın ölçek parametresi iken, μ parametresi dağılımın konum parametresidir.

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili dağılımdaki dağılım fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \quad (2.29)$$

Burada erf fonksiyonu, hata fonksiyonudur.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.30)$$

Bir x rasgele değişkeninin iki parametrelili lognormal dağılımdaki güvenilirlik fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$R(x) = 1 - F(x) = 1 - \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \right] \quad (2.31)$$

Dağılım üç parametrelili bir Lognormal dağılım olduğunda, bir x rasgele değişkeninin üç parametrelili dağılımdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(x-\delta) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (2.32)$$

Burada, x rasgele değişkeni μ , σ ve δ parametrelili Lognormal dağılıma uyuyor denilmektedir. σ parametresi dağılımın ölçek parametresi, μ parametresi dağılımın konum parametresi ve δ parametresi dağılımın eşik parametresidir.

Bir x rasgele değişkeninin üç parametrelili dağılımdaki dağılım fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x-\delta) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \quad (2.33)$$

Burada erf fonksiyonu, hata fonksiyonudur.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.34)$$

Bir x rasgele değişkeninin üç parametrelili lognormal dağılımdaki güvenilirlik fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$R(x) = 1 - F(x) = 1 - \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x-\delta) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \right] \quad (2.35)$$

2.4.5. Gama dağılımı

Bir x rasgele değişkeninin gama dağılımındaki olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{\left(-\frac{x-\mu}{\beta}\right)}}{\beta \Gamma(\gamma)} \quad (2.36)$$

Burada, x rasgele değişkeni μ , β ve γ parametrelili Gama dağılımına uyuyor denilmektedir. β parametresi dağılımın ölçek parametresi, γ parametresi dağılımın şekil parametresi ve μ parametresi dağılımın konum parametresidir. $\Gamma()$ ise, aşağıdaki formüle sahip gama fonksiyonudur [http-2].

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (2.37)$$

2.5. Dağılım Karşılaştırma Teknikleri

Güvenilirlik analizinde, veriler kayıt altına alındıktan sonra ilk yapılması gereken, verilerin uyduğu dağılımın belirlenmesidir. Bu konuda verilerin uyduğu dağılımların karşılaştırılmasında kullanılan birtakım teknikler mevcuttur. Bu tekniklerden biri Akaike Bilgi Kriteri (AIC)'dir.

Akaike Bilgi Kriteri (AIC) ilk olarak Akaike tarafından 1974 yılında geliştirilmiştir. AIC, istatistiksel bir modelin göreceli uyum iyiliğinin bir ölçüsüdür. Model yapımında sapma ve varyans arasındaki dengeyi açıklar. Genel durumdaki AIC denklemi aşağıdaki gibidir.

$$AIC = -2 \log L_{max} + 2k \quad (2.38)$$

(2.38) numaralı denklemde L_{max} , tahmini model için olabilirlik fonksiyonunun maksimize edilmiş değeridir. k değeri ise, modelde tahmin edilen parametre sayısıdır. AIC'nin uygulanabilmesi için öncelikle her bir modelin ya da dağılımın AIC değerleri hesaplanmaktadır. Ardından minimum AIC değerine sahip olan model ya da dağılımın en uygun olduğu sonucuna varılmaktadır [29].

Bir diğer teknik ise, Anderson-Darling Test tekniğidir. Theodore Wilbur Anderson ve Donald Allan Darling 1950'lerde, önceden belirlenmiş parametrelerle bir dağılımın uygunluğunu test etmek için A^2 olarak adlandırılan Anderson-Darling test istatistiklerini kullanmıştır. Daha sonra, 1960'larda ve özellikle 1970'lerde, başta

Stephens olmak üzere bazı diğer yazarlar testi, parametrelerin bazılarının bilinmeyebileceği daha geniş bir dağılım aralığına uyarlamıştır [30].

Anderson-Darling testi, bir verinin belirli bir dağılıma sahip bir popülasyondan gelip gelmediğini sınamak için kullanılmaktadır. Anderson-Darling testine ilişkin hipotezler aşağıdaki gibi kurulabilmektedir [http-3].

H_0 : Veriler belirtilen bir dağılıma uygunluk göstermektedir.

H_a : Veriler belirtilen bir dağılıma uygunluk göstermemektedir.

Anderson-Darling test istatistiği şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$A^2 = -N - S \quad (2.39)$$

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\ln F(y_i) + \ln(1 - F(y_{N+1-i}))] \quad (2.40)$$

Burada N, örnek sayısını ifade etmektedir. (2.40) numaralı denklemde, $F(y_i)$ ve $F(y_{N+1-i})$ fonksiyonları, belirtilen dağılımın kümülatif dağılım fonksiyonudur. y_i verileri sıralı bir şekilde alınmalıdır. Hesaplanan değerler belirlenen anlamlılık seviyesinden küçükse, H_0 hipotezi reddedilmektedir.

Anderson-Darling testi, birkaç dağılımdan hangisinin en uyumlu olduğunu belirlemek amacıyla dağılımları karşılaştırılmak için de kullanılmaktadır. Bu karşılaştırmada, en iyi uyumu gösteren dağılım, Anderson-Darling test istatistiğinin diğerlerinden daha düşük değerde olan dağılımdır.

3. SANSÜRLÜ VERİLERDE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

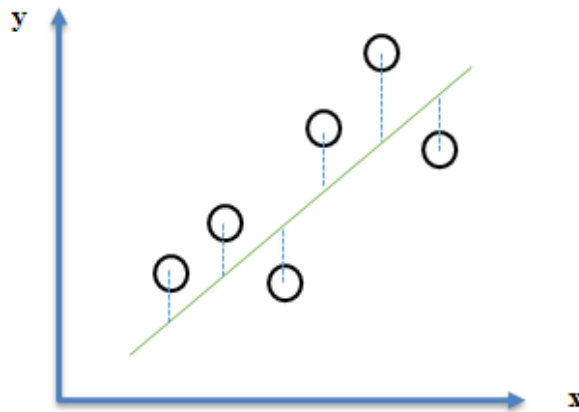
3.1. Weibull Dağılımında Parametre Tahmin Yöntemleri

Weibull dağılımı, pek çok farklı veri için esneklik özelliğine sahip olması sebebiyle güvenilirlik analizinde sıklıkla kullanılan dağılımlardan bir tanesidir. Bu çalışmada da, verilerin iki parametrelili Weibull dağılımına uygunluk gösterdiği görülmektedir. Bu sebeple parametre tahmin yöntemleri, Weibull dağılım için detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

Güvenilirlik analizinde verilerin parametrelerini tahmin edebilmek için en yaygın kullanılan tahmin yöntemleri; maksimum olabilirlik yöntemi, en küçük kareler yöntemi, ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ve moment yöntemidir. Bu anlamda literatürde de sıklıkla kullanılan En Küçük Kareler Yöntemi ve Maksimum Olabilirlik Yöntemi ile ilgili detaylı anlatım aşağıda verilmektedir.

3.1.1. En Küçük Kareler Yöntemi

En küçük kareler yöntemi, tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerden sapmalarının karelerinin toplamı minimum olacak şekilde dağılım diyagramında bir veri noktası çizgisi çizmek olarak tanımlanmaktadır. İstatistikte bu çizginin Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi regresyon çizgisi olduğu söylenmektedir. Daireler veri noktalarını temsil etmekte ve çizgiye dik gelen noktalı çizgiler ise, tahmin edilen değerlerden sapmayı göstermektedir.



Şekil 3.1. Doğrusal regresyon çizgisi

(2.10) numaralı denklemde verilen güvenilirlik fonksiyonunun denkleminin logaritmik hali aşağıdaki denklemde verilmektedir.

$$R(x) = 1 - F(x) = e^{\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (3.1)$$

$$\ln[1 - F(x)] = -\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta \quad (3.2)$$

(3.2) numaralı denklemin tekrar logaritması alınırsa, denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\ln\{-\ln[1 - F(x)]\} = \beta \ln\left(\frac{x}{\eta}\right) = \beta \ln(x) - \beta \ln(\eta) \quad (3.3)$$

Bu işlem ile Weibull dağılımının güvenilirlik fonksiyonunun dolayısıyla kümülatif dağılım fonksiyonunun doğrusal bir ifadeye dönüşümü sağlanmaktadır. (3.3) numaralı denklem, $y = a + bx$ regresyon çizgisinin parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanırsa bir regresyon çizgisi belirtmektedir [22].

$$y = \ln\{-\ln[1 - F(x)]\} \quad (3.4)$$

$$a = -\beta \ln(\eta) \quad (3.5)$$

$$b = \beta \quad (3.6)$$

$$x = \ln(x) \quad (3.7)$$

Burada y'yi tahmin edebilmek için öncelikle F(x) fonksiyonu, parametrelerden bağımsız olarak hesaplanmalıdır. Bunun için en yaygın olarak kullanılan iki denklem aşağıdaki gibidir [31].

$$F_i = \frac{i}{n+1} \quad (3.8)$$

$$F_i = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (3.9)$$

(3.8) numaralı denklem, F_i 'lerin beklenen olasılıklarından elde edilen ortalama sıra denklemdir. (3.9) numaralı denklem ise, F(x)'in en yaygın tahmini yöntemi olan, y'lerin ortanca değerlerini kullanarak elde edilen medyan sıra denklemdir. Denklemlerdeki n, örnek büyüklüğünü ifade etmektedir.

F(x) fonksiyonu hesaplandıktan ve doğrusal regresyon kurallarını uyguladıktan sonra, (3.5), (3.6) ve (3.7) numaralı denklemler vasıtasıyla, ölçek ve şekil parametrelerinin tahmincileri aşağıdaki gibi basitleştirilmektedir.

$$\hat{\eta} = e^{\frac{a}{\beta}} \quad (3.10)$$

$$\hat{\beta} = \beta \quad (3.11)$$

3.1.2. Maksimum Olabilirlik Yöntemi

Maksimum Olabilirlik Yöntemi Ronald Fisher tarafından geliştirilmiştir. Bir $L(\alpha)$ olabilirlik fonksiyonu, olasılık yoğunluğunun α parametresiyle $f(x;\alpha)$ olduğu bilinen, popülasyondan rasgele seçilmiş bir $x_1, \dots, x_n$ örnekleminin ortaya çıkma olasılığı veya olasılık yoğunluğudur [3]. Burada α , bilinmeyen parametreler vektörüdür ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p) \quad (3.12)$$

Burada p, bilinmeyen parametre sayısını ifade etmektedir.

Olabilirlik fonksiyonu aşağıdaki denklemdeki gibi üretilmektedir.

$$L(\alpha) = f(x_1, \alpha) \cdot f(x_2, \alpha) \dots f(x_n, \alpha) \quad (3.13)$$

Örneklemden alınan verilerin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı ile, olabilirlik fonksiyonu $L(x, \alpha)$, her örnek noktasında gözlemlenen olasılık yoğunluk fonksiyonlarının çarpımı ile bulunmaktadır.

$$L(x, \alpha) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \alpha) \quad (3.14)$$

Eğer $\hat{\alpha}$, α 'nın $L(x, \alpha)$ 'yı maksimum yapan değeri ise, $\hat{\alpha}$ 'ya α 'nın maksimum olabilirlik tahmincisi denilmektedir.

Geçerli olan maksimum olabilirlik tahmincilerinin vektörünü bulmak için genellikle, log olabilirlik fonksiyonunu yani $L(x, \alpha)$ 'nın logaritmik fonksiyonunu maksimize yapmak daha kolaydır [23]. Bu sebeple (3.14) numaralı denklemin logaritması alınmaktadır. Bu işlem sonucunda elde edilen denklem aşağıda verilmektedir.

$$\ln L(x, \alpha) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i, \alpha) \quad (3.15)$$

Verilerin sağdan sansürlü veriler olduğu durumlarda, olabilirlik fonksiyonu daha farklı bir formda gösterilmektedir. $t_1, t_2, \dots, t_n$, bir popülasyondan rasgele alınan ömür sürelerini belirten bağımsız gözlemler olsun. Buna karşılık sağdan sansürlü verilerin sansür süreleri ise $c_1, c_2, \dots, c_n$ olsun. Aşağıda gösterilen F kümesi, test sırasında başarısız olduğu gözlenen verileri, C kümesi ise, test sırasında henüz başarısızlık göstermeyen verileri içermektedir.

$$F = \{i | t_i \leq c_i\} \quad (3.16)$$

$$C = \{i | t_i > c_i\} \quad (3.17)$$

Güvenilirlik analizinde kullanılan sansürlü verilerin genel gösterimi x_i süresi ve φ_i sansür göstergesi şeklinde verilmiş olsun. Burada x_i ve φ_i , $i = 1, 2, \dots, n$ için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [23].

$$x_i = \min\{t_i, c_i\} \quad (3.18)$$

$$\varphi_i = \begin{cases} 0, & t_i > c_i \\ 1, & t_i \leq c_i \end{cases} \quad (3.19)$$

(3.18) ve (3.19) numaralı denklemlere göre, i ürününde başarısızlık gözlenmiş ise, $\varphi_i = 1$ ve $x_i = t_i$ yani başarısızlık süresi olmaktadır. Eğer i ürünün başarısızlığı sağdan sansürlü ise, $\varphi_i = 0$ ve $x_i = c_i$ yani sansür süresi olmaktadır. Tamamlanmış ve sansürlü verileri içeren bir veri seti için olabilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} L(x, \alpha) &= \prod_{i=1}^n f(x_i, \alpha)^{\varphi_i} R(x_i, \alpha)^{1-\varphi_i} \\ &= \prod_{i \in F} f(t_i, \alpha) \prod_{i \in C} R(c_i, \alpha) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Burada $R(c_i, \alpha)$, gözlem zamanında, ürünün hala çalışmakta olan, başarısızlık göstermemiş i verisinin güvenilirlik fonksiyonudur [21]. Logaritmik olabilirlik fonksiyonu ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\ln L(x, \alpha) = \sum_{i \in F} \ln f(t_i, \alpha) + \sum_{i \in C} \ln R(c_i, \alpha) \quad (3.21)$$

3.2. Sansürlü Veriler İçin Weibull Dağılımının Parametre Tahmini

Weibull dağılımı güvenilirlik analizinde en sık karşılaşılan dağılımların başında gelmektedir. Bu çalışmada da, verilerin iki parametrelili Weibull dağılımına uygunluk gösterdiği görülmektedir.

İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu, kümülatif dağılım fonksiyonu, güvenilirlik fonksiyonu, tehlike fonksiyonu, kümülatif tehlike fonksiyonu, beklenen değer ve varyans denklemleri aşağıdaki Tablo 3.1.'de verilmektedir. Tablodaki denklemlerde, η parametresi dağılımın ölçek parametresi iken, β parametresi dağılımın şekil parametresidir.

Tablo 3.1. İki parametrelili Weibull dağılımında denklemler

Fonksiyon	Denklem
Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu	$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}$
Kümülatif Dağılım Fonksiyonu	$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}$
Güvenilirlik Fonksiyonu	$R(x) = 1 - F(x) = e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}$
Tehlike Fonksiyonu	$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1}$
Kümülatif Tehlike Fonksiyonu	$H(x) = \left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta$
Beklenen Değer	$E(x) = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$
Varyans	$V(x) = \eta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2$

(3.21) numaralı logaritmik olabilirlik fonksiyonunda, Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu ve güvenilirlik fonksiyonu yerine yazıldığında, olabilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\ln L(x, \alpha) = \sum_{i \in F} \ln \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x_i}{\eta}\right)^\beta} \right] + \sum_{i \in C} \ln \left[e^{-\left(\frac{x_i}{\eta}\right)^\beta} \right] \quad (3.22)$$

$$\ln L(x, \alpha) = t \ln \beta - t \beta \ln \eta + (\beta - 1) \sum_{i \in F} \ln x_i - \frac{1}{\eta^\beta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \quad (3.23)$$

(3.23) numaralı denklemde, “ t ” gözlem sırasında başarısızlığa uğramış verilerin sayısını vermektedir. Ölçek ve şekil parametrelerinin maksimum olabilirlik tahminlerini elde edebilmek için öncelikle logaritmik olabilirlik fonksiyonunun, η ve β

parametresine göre birinci dereceden kısmi türevi alınıp sifira eşitlenmelidir. η parametresine göre kısmi türevi alınmış olabilirlik fonksiyonu aşağıda verilmektedir.

$$\frac{\partial L}{\partial \eta} = -t + \frac{1}{\eta^\beta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta = 0 \quad (3.24)$$

Buradan ölçek parametresi η aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$\eta = \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \right]^{1/\beta} \quad (3.25)$$

(3.25) numaralı denklemden, η parametresinin logaritması alındığında, elde edilen denklem aşağıdaki gibi olmaktadır [31].

$$\ln \eta = \frac{1}{\beta} \ln \left(\sum_{i=1}^n x_i^\beta \right) - \frac{1}{\beta} \ln t \quad (3.26)$$

Aynı işlemler β parametresine göre yapılırsa, β parametresine göre kısmi türevi alınmış olabilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = \frac{t}{\beta} - t \ln \eta + \sum_{i \in F} \ln x_i - \frac{1}{\eta^\beta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \ln x_i + \frac{1}{\eta^\beta} \ln \eta \sum_{i=1}^n x_i^\beta = 0 \quad (3.27)$$

(3.25) ve (3.26) denklemlerinde ifade edilen η ve $\ln \eta$ ifadeleri, yukarıdaki β parametresinin birinci türevindeki ilgili yerlere konularak gerekli sadeleştirmeler yapılırsa aşağıdaki gibi bir ifade elde edilmektedir.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = \frac{t}{\beta} + \sum_{i \in F} \ln x_i - t \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta \ln x_i}{\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta} = 0 \quad (3.28)$$

(3.28) numaralı denklemden β parametresi çekilirse aşağıdaki denklem elde edilmektedir [23].

$$\beta = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta \ln x_i}{\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta} - \frac{\sum_{i \in F} \ln x_i}{t} \right]^{-1} \quad (3.29)$$

(3.29) numaralı denklemde, Newton-Raphson yöntemi kullanılarak β parametresi bulunabilmektedir. Bu yöntem tekrarlı bir süreçten oluşmaktadır. Newton-Raphson yönteminin en büyük avantajı çözüme quadratik olarak yaklaşmasıdır. Bu durum iterasyon sayısını azaltarak köke daha hızlı yakınsamayı sağlamaktadır. Newton-Raphson yönteminde sürecin genel gösterimi aşağıda verilmektedir.

$$x_{k+1} = x_k - \frac{g(x_k)}{g'(x_k)} \quad (3.30)$$

Burada $g'(x_k)$ fonksiyonu, $g(x_k)$ fonksiyonunun türevidir. x , $g(x_k)=0$ eşitliğinin bir kökü iken, x_k , x 'in iyi bir tahmini olduğunda ve bir başlangıç noktası olarak kabul edildiğinde, yukarıdaki eşitlikle bir iterasyona başlanmaktadır. Bu iterasyon sonucunda bir kök değeri bulunmaktadır. Bulunan bu kök değeri, başlangıç değeri ile aynı ise iterasyon işlemi sonlandırılmaktadır. Farklı ise, aynı çıkana kadar iterasyonlara devam edilmektedir.

β parametresine göre kısmi türevi alınmış olabilirlik fonksiyonunu $g(\beta)$ fonksiyonu olarak kabul edilmektedir. Bu fonksiyon aşağıda verilmektedir.

$$g(\beta) = \frac{t}{\beta} + \sum_{i \in F} \ln x_i - \frac{t \sum_{i=1}^n (x_i)^\beta \ln x_i}{\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta} \quad (3.31)$$

(3.31) numaralı denklemindeki $g(\beta)$ fonksiyonunun türevi alındığında elde edilen $g'(\beta)$ fonksiyonu aşağıda verilmektedir.

$$g'(\beta) = -\frac{t}{\beta^2} - \frac{t}{(\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta)^2} \left[(\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta) (\sum_{i=1}^n (\ln x_i)^2 (x_i)^\beta) - (\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta \ln x_i)^2 \right] \quad (3.32)$$

Newton-Raphson yönteminde sürecin genel gösteriminde $g(\beta)$ ve $g'(\beta)$ fonksiyonları yerlerine konulduğunda elde edilen denklem aşağıda verilmektedir.

$$\beta_{k+1} = \beta_k + \frac{\frac{t}{\beta} + \sum_{i \in F} \ln x_i - \frac{t \sum_{i=1}^n (x_i)^\beta \ln x_i}{\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta}}{-\frac{t}{\beta^2} - \frac{t}{(\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta)^2} \left[(\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta) (\sum_{i=1}^n (\ln x_i)^2 (x_i)^\beta) - (\sum_{i=1}^n (x_i)^\beta \ln x_i)^2 \right]} \quad (3.33)$$

Yukarıdaki denklem kullanılarak iterasyonlar sürdürülmektedir. β_{k+1} yeterince β_k 'ya yakınsanırsa iterasyon durdurularak β şekil parametresinin gerçek değerine ulaşılmaktadır. β parametresi (3.25) numaralı denklemde yerine konularak, η parametresi bulunmaktadır [23].

4. UYGULAMA

4.1. Problem Tanıtımı

Bu çalışmada, Eskişehir’de kompresör üretimi yapan bir işletmede bir uygulama yapılmıştır. İşletmede üretilen ürünlerin bir modelinin belirli dönemlerde üretilen bir ürün partisi, müşteriye deneme ürünü olarak verilmiştir. Bu deneme ürününün çalışma süreci, 3’er aylık 3 farklı dönem bazında gözlemlenmiştir. Bu farklı dönemler arasında iyileştirme çalışmaları mevcuttur. Her bir dönemin gözlemlenmesi 240 gün boyunca sürdürülmüştür. Bu süre boyunca bu üründe herhangi bir arıza gerçekleşip gerçekleşmediği ile ilgilenilmiştir. Üründe arıza gerçekleştiyse, bu arızanın ne kadar zamanda gerçekleştiği, arızanın sebebi gibi arıza kayıtlarıyla ilgili bilgiler yetkili servislerin oluşturduğu verilerden edinilmiştir.

Yapılan gözlem süresince henüz arızalanmayan, çalışmaya devam eden ürünler sansürlü veriler olarak kabul edilmiştir. 240 günün sonunda hala çalışmaya devam ettikleri ve ileride ne zaman arızalanacakları bilinmediği için bu veriler sağdan sansürlü veriler olarak ele alınmıştır.

Dönemsel bazda ürün sayıları, arızalı ve sansürlü ürün sayıları Tablo 4.1.’de verilmiştir. Dönem-1’deki veriler örnek olarak EK-1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Uygulamada kullanılan ürün sayıları

Dönemler	Ürün Sayısı	Arızalı Ürün Sayısı	Sansürlü Ürün Sayısı
Dönem-1	121	13	108
Dönem-2	1112	22	1090
Dönem-3	4087	34	4053

Bu dönemlerden ilkinde, 121 ürün müşteriye ulaşmıştır. Bunlardan 13 tanesi arızalanmış, 108 tanesi sansürlüdür. İkinci dönemde, 1112 ürün müşteriye ulaşmıştır. Bunlardan 22 tanesi arızalanmış, 1090 tanesi sansürlüdür. Üçüncü dönemde ise, 4087 ürün müşteriye ulaşmıştır. Bunlardan 34 tanesi arızalanmış, 4053 tanesi sansürlüdür. Bu farklı 3 dönemdeki, ürün arızalanana kadar geçen sürelerin dağılımları ve parametreleri

tahmin edilmiştir. Bu tahminleme yapılırken Matlab programının R2017b versiyonundan faydalanılmıştır.

Parametre tahminleri yapıldıktan sonra bunlardan hareketle ürünün güvenilirlik analizi çalışması yapılmıştır. Ürünün beklenen garanti süresi içerisinde ne kadarının arızalanacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu kapsamda MINITAB paket programının MINITAB 17 versiyonundan faydalanılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları izleyen bölümde program çıktıları ile verilmektedir.

Her 3 dönemin ayrı ayrı güvenilirlik düzeyleri bulunduktan sonra dönemler arasındaki bozulma oranları arasında fark olup olmadığı konusunda analiz yapılmıştır. Tüm dönemlerde gözlemlenen ürünlerin histogram grafikleri çizilip yorumlanmıştır. Her 3 dönemin dağılım fonksiyonları karşılaştırılıp farklılıkları yorumlanmıştır. Gözlem anında arıza gösteren verilerin histogramları çizilip yorumlanmıştır. Tüm bu analizler için de MINITAB paket programının MINITAB 17 versiyonundan faydalanılmıştır. Son olarak da sansürlü verilerin parametrelerinin ters parametrisasyonu yapılarak bu parametre değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaların sonucu da izleyen bölümde verilmektedir.

4.2. Analiz Sonuçları

Gözlemlenen ürünün 3 dönemdeki, ürün arızalanana kadar geçen sürelerinin dağılımları ve parametreleri tahmin edilmiştir. Bu tahminleme yapılırken Matlab programının R2017b versiyonundan faydalanılmıştır. Matlab programındaki parametre tahminlemesinde incelenen başlıca dağılımların (Üstel, Gama, Lognormal, Normal ve Weibull dağılımları), Dönem-1 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri Tablo 4.2.'de, Dönem-2 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri Tablo 4.3.'te ve Dönem-3 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Tablo 4.2. Dönem-1 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri

	Dağılımlar				
	Üstel	Gama	Lognormal	Normal	Weibull
Log-Olabilirlik Değeri	-113,288	-113,14	-111,122	-118,887	-112,093
AIC Değeri	226,576	226,28	222,244	237,774	224,186

Tablo 4.3. Dönem-2 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri

	Dağılımlar				
	Üstel	Gama	Lognormal	Normal	Weibull
Log-Olabilirlik Değeri	-229,615	-229,338	-227,637	-238,263	-228,326
AIC Değeri	459,23	458,676	455,274	476,526	456,652

Tablo 4.4. Dönem-3 için Log-Olabilirlik ve AIC değerleri

	Dağılımlar				
	Üstel	Gama	Lognormal	Normal	Weibull
Log-Olabilirlik Değeri	-384,003	-382,574	-381,076	-398,511	-381,567
AIC Değeri	768,006	765,148	762,152	797,022	763,134

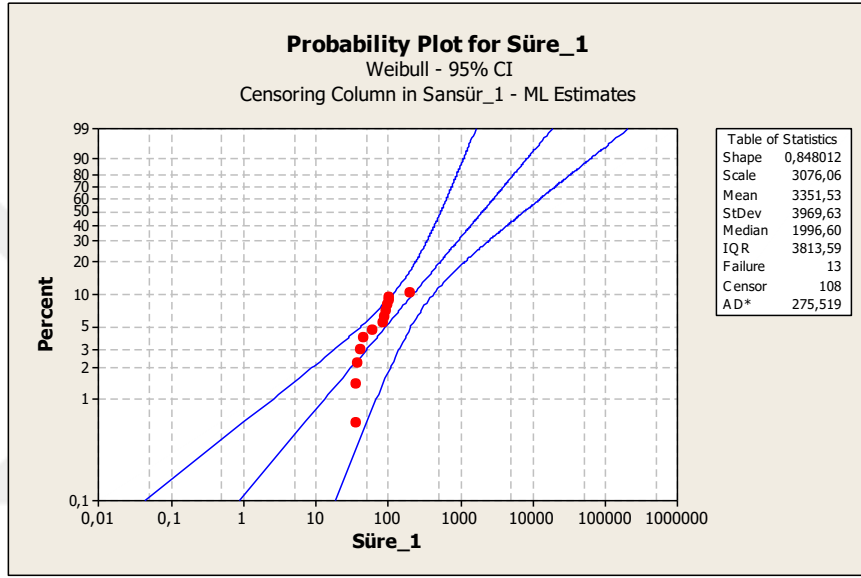
Tablo 4.2., Tablo 4.3. ve Tablo 4.4.’teki AIC değerlerine göre değeri en küçük olan Lognormal ve Weibull dağılımları birbirine yakın değerlerdedir. Bu anlamda, verilerin dağılım grafikleri de incelendiğinde daha uygun olduğu görülmesi ve güvenilirlik analizinde önemli bir yer tutarak literatürde de sıklıkla kullanılması sebebiyle, her 3 dönem için de iki parametrelili Weibull dağılımının en uygun dağılım olduğu sonucuna varılmaktadır.

Her 3 dönemin de iki parametrelili Weibull dağılımına uygunluk gösterdiği varsayımıyla verilerin parametreleri tahmin edilmiştir. Verilerin parametrelerini tahmin edebilmek için Maksimum Olabilirlik Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre, Weibull dağılımına uygunluk gösteren verilerin parametreleri, ortalama ve varyans değerleri Tablo 4.5.’te verildiği gibi bulunmaktadır.

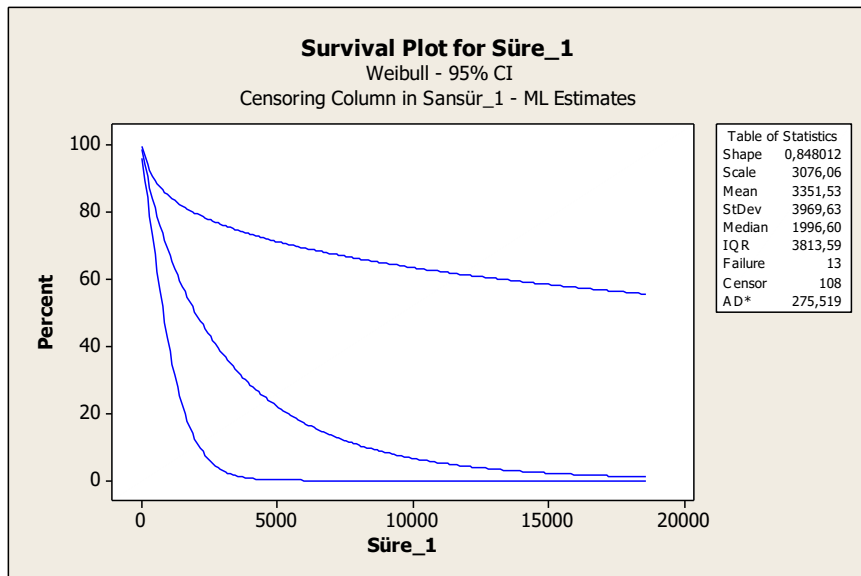
Tablo 4.5. 3 dönem için parametre, ortalama ve varyans değerleri

	η	β	Ortalama	Varyans
Dönem-1	3076,06	0,848012	3351,53	1,576E+11
Dönem-2	23357,4	0,854482	25329	8,857E+13
Dönem-3	132176	0,758136	155997	4,349E+15

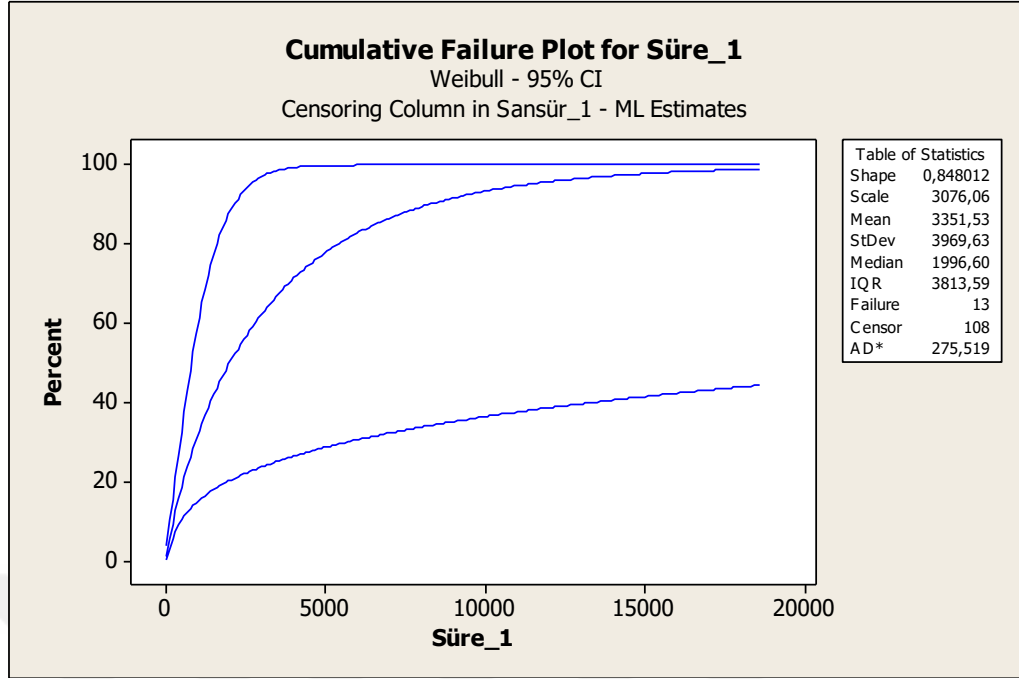
Ürüne ait verilerin uygunluk gösterdiği dağılımın belirlenip parametre tahminleri yapıldıktan sonra bunlardan hareketle ürünün güvenilirlik analizi çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda MINITAB paket programının MINITAB 17 versiyonundan faydalanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen olasılık grafiği, yaşam grafiği, kümülatif arıza grafiği ve tehlike grafiği sırasıyla, Dönem-1 için Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te, Dönem-2 için Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de, Dönem-3 için ise Şekil 4.9., Şekil 4.10., Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de verilmiştir.



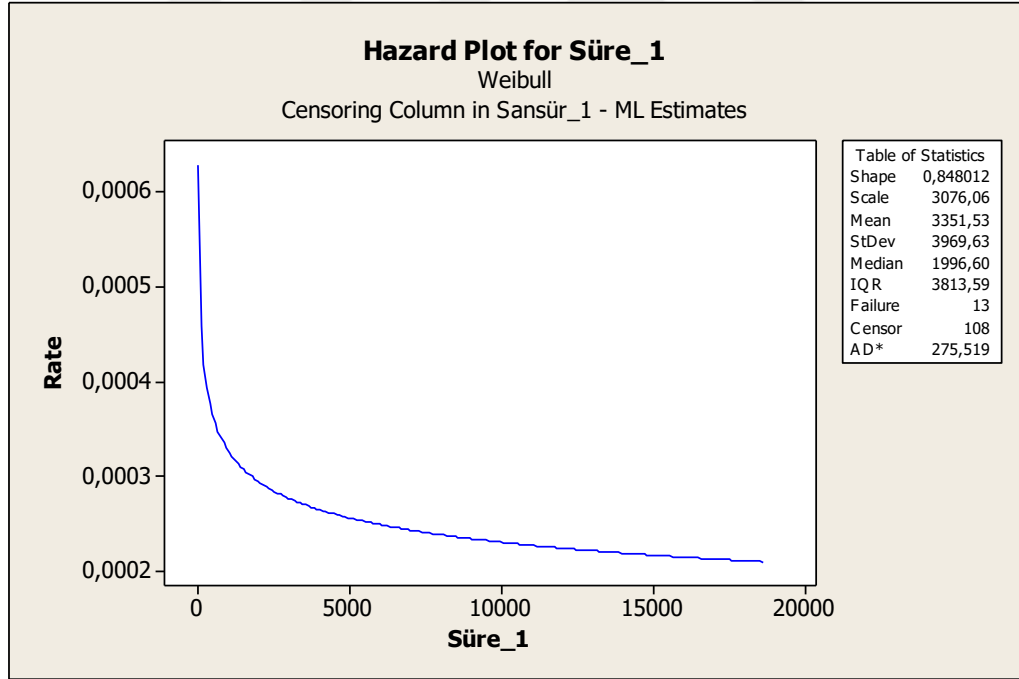
Şekil 4.1. Dönem-1 için olasılık grafiği



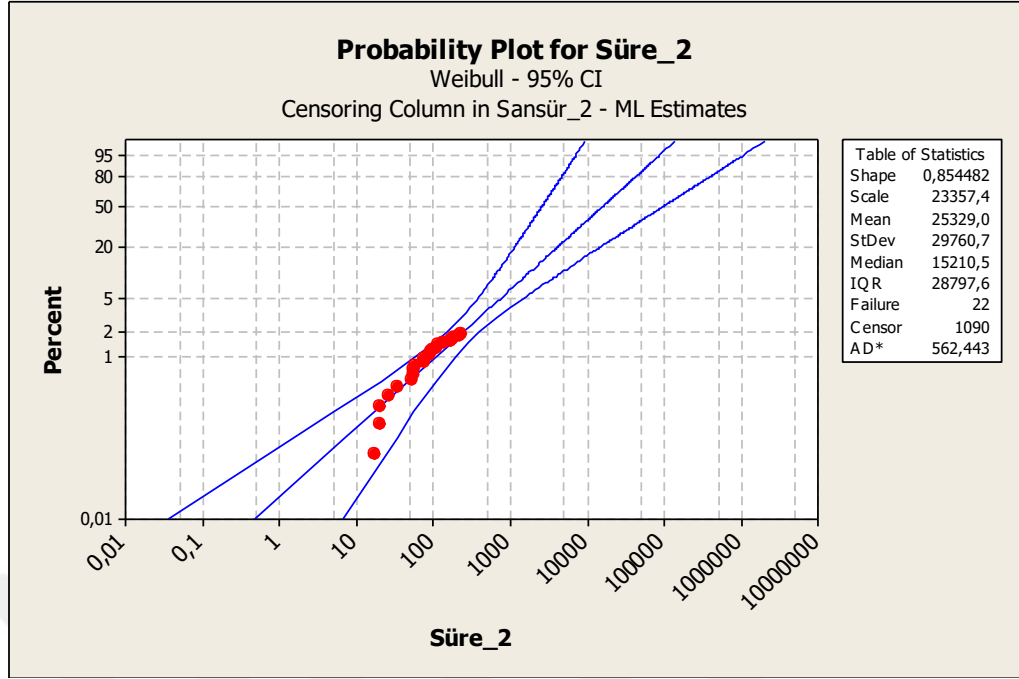
Şekil 4.2. Dönem-1 için yaşam grafiği



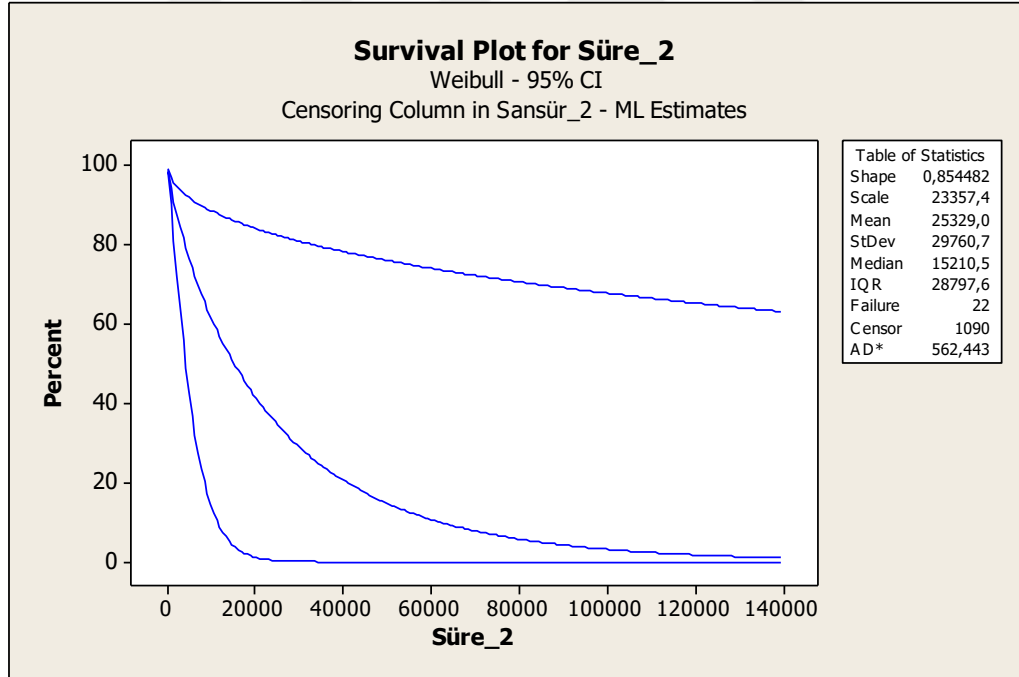
Şekil 4.3. Dönem-1 için kümülatif arıza grafiği



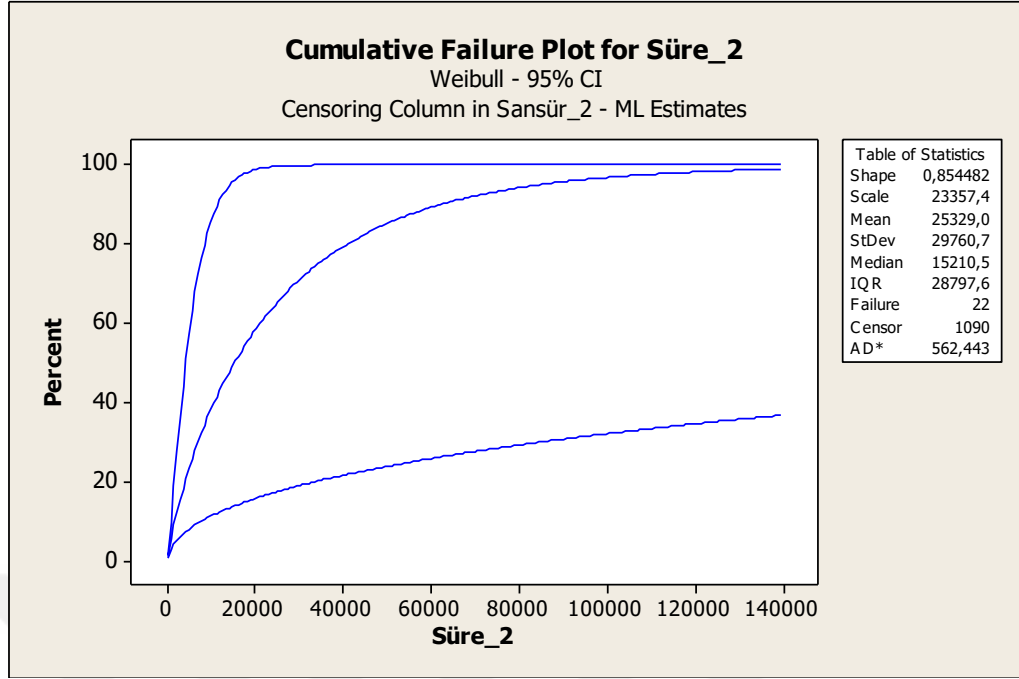
Şekil 4.4. Dönem-1 için tehlike grafiği



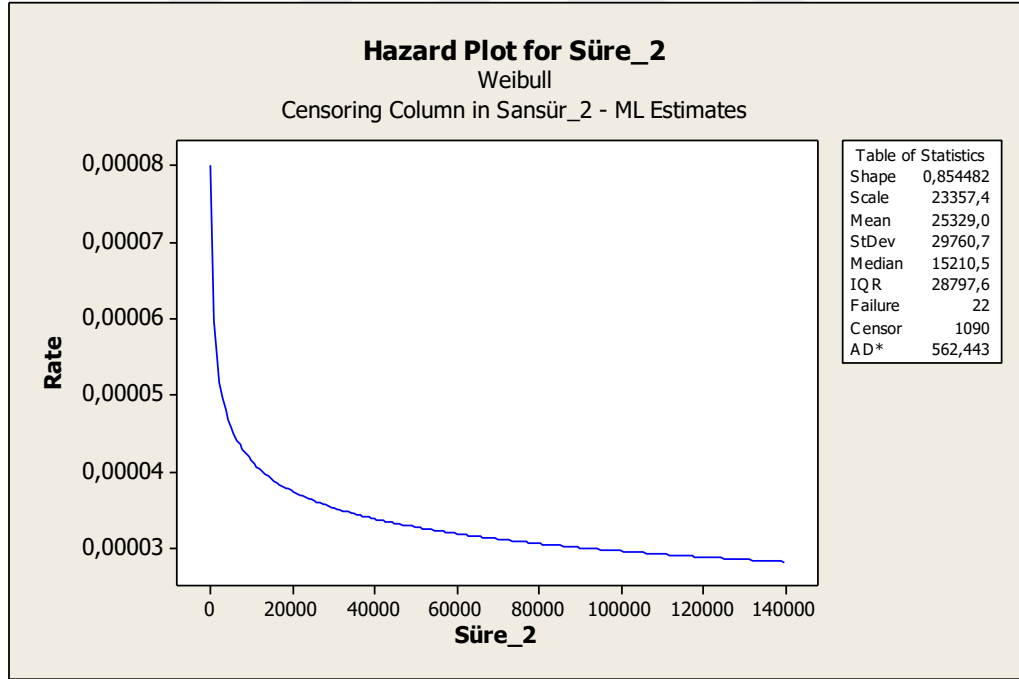
Şekil 4.5. Dönem-2 için olasılık grafiği



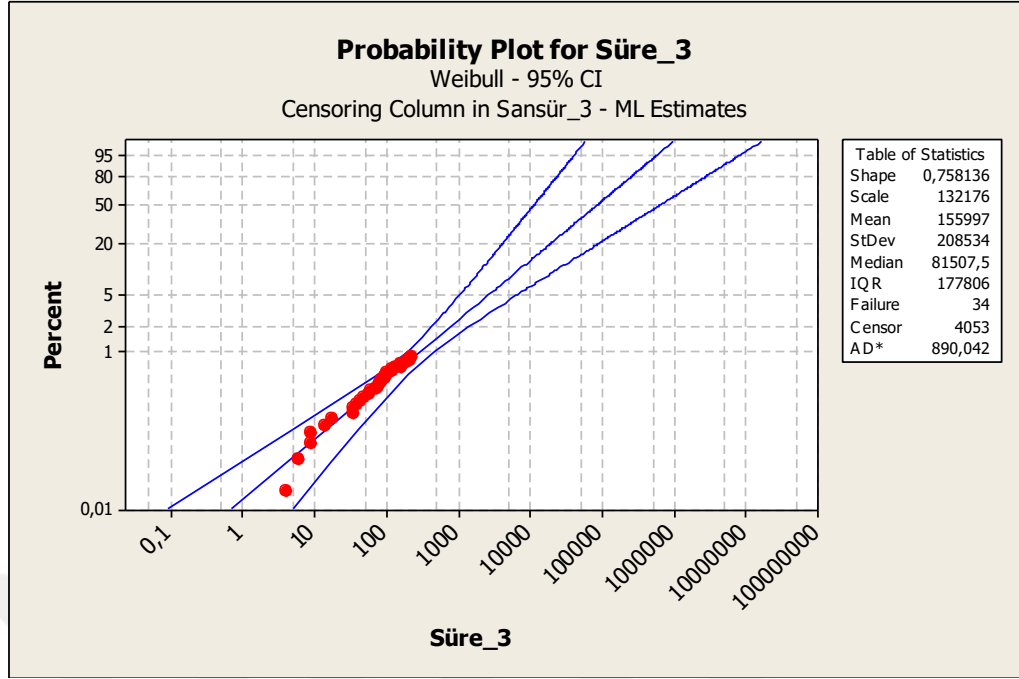
Şekil 4.6. Dönem-2 için yaşam grafiği



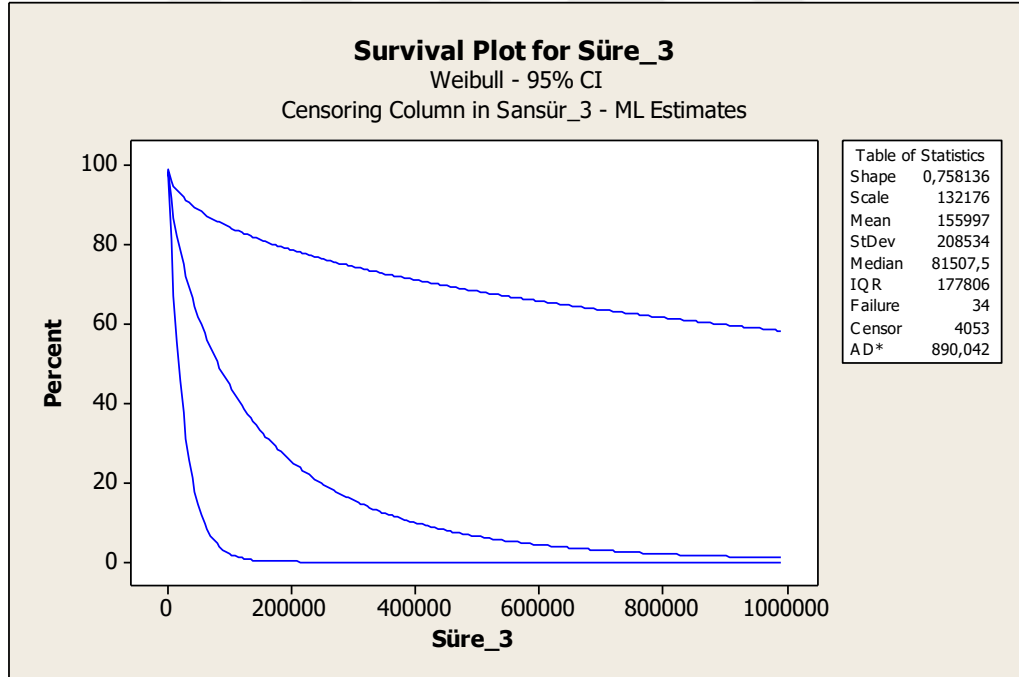
Şekil 4.7. Dönem-2 için kümülatif arıza grafiği



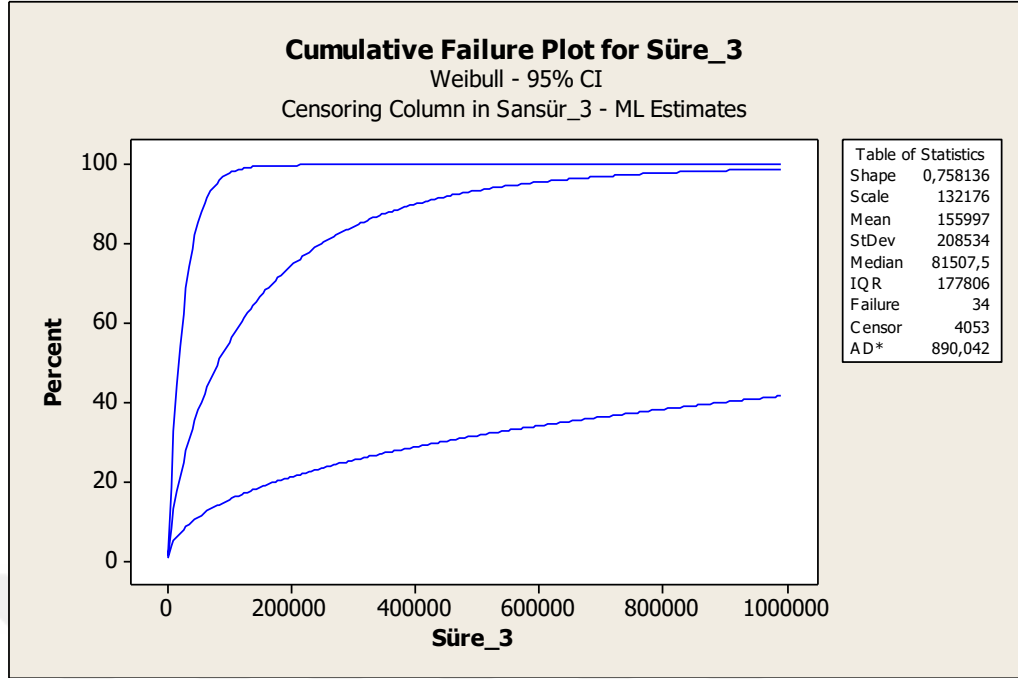
Şekil 4.8. Dönem-2 için tehlike grafiği



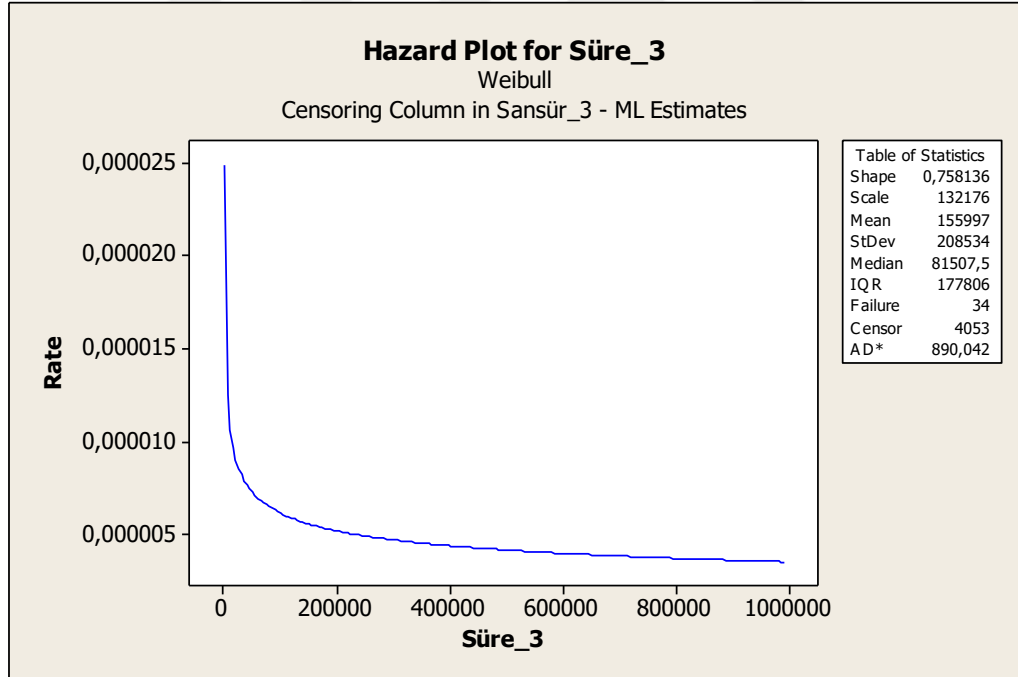
Şekil 4.9. Dönem-3 için olasılık grafiği



Şekil 4.10. Dönem-3 için yaşam grafiği



Şekil 4.11. Dönem-3 için kümülatif arıza grafiği



Şekil 4.12. Dönem-3 için tehlike grafiği

Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.6., Şekil 4.7., Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de verilen yaşam ve kümülatif arıza grafiklerine göre, her 3 dönem için bozulma süreleri gün biçiminde yaklaşık olarak Tablo 4.6.'da verilmektedir.

Tablo 4.6. 3 dönem için yaşam ve kümülatif arıza grafiklerine göre beklenen bozulma süreleri

	%20	%40	%60	%80	%100
Dönem-1	540	1400	2800	5400	18000
Dönem-2	4200	10600	21100	41200	140000
Dönem-3	20000	55000	117000	250000	990000

Şekil 4.4., Şekil 4.8. ve Şekil 4.12.’deki tehlike grafiklerine göre, azalan bir tehlike grafiği görülmektedir. Bu da ilk başlarda bozulma oranı yüksek iken zamanla, sabit hızda seyrettiğini göstermektedir.

Ürünün güvenilirlik analizi çalışması sonucunda aynı zamanda, ürünün beklenen garanti süresi içerisinde ne kadarının arızalanacağı sonucuna ulaşılmıştır. Gözlemlenen ürünün beklenen garanti süresi yaklaşık olarak 10 yıldır. Dolayısıyla yaklaşık 3650 günde, ürünün her 3 dönemdeki hayatta kalma olasılıkları, alt ve üst değerleri ile birlikte Tablo 4.7.’de verildiği gibi bulunmuştur.

Tablo 4.7. 3 dönem için beklenen garanti süresinde hayatta kalma olasılık değerleri

	Zaman (gün)	Olasılık	En Düşük	En Yüksek
Dönem-1	3650	0,314703	0,0108644	0,744110
Dönem-2	3650	0,814870	0,554694	0,931351
Dönem-3	3650	0,936326	0,867448	0,970019

Tablo 4.7.’deki hayatta kalma olasılıklarına göre, Dönem-1’deki ürünlerin beklenen garanti süresinde yaklaşık olarak % 31,5’i, Dönem-2’deki ürünlerin beklenen garanti süresinde yaklaşık olarak % 81,5’i, Dönem-3’teki ürünlerin ise beklenen garanti süresinde yaklaşık olarak % 93,6’sı hayatta kalmaktadır. Bu durum sonraki dönemlerde üretilen ürünlerin önceki dönemlerine göre daha iyi bir performans gösterdiği sonucunu vermektedir.

Ürünün gözlemlenen her 3 döneminin ayrı ayrı güvenilirlik düzeyleri bulunduktan sonra dönemler arasındaki ürünün bozulma oranları arasında fark olup olmadığı konusunda analiz yapılmıştır. Her 3 dönem arasındaki, ürünün bozulma oranları arasında fark olup olmadığına bakılırken, dönemler ikili şekilde karşılaştırılmıştır. İki dönemin bozulma oranlarının önemli ölçüde farklı olup olmadığını belirlemek için kurulan hipotez testleri aşağıda verilmektedir.

$H_0 : p_1 - p_2 = 0$ (İncelenen 1.dönemin bozulma oranı, incelenen 2.dönemin bozulma oranına eşittir.)

$H_a : p_1 - p_2 \neq 0$ (İncelenen 1.dönemin bozulma oranı, incelenen 2.dönemin bozulma oranına eşit değildir.)

Burada p_1 ve p_2 kullanılarak bulunan ve P ile ifade edilen; test istatistiği aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$P = \frac{p_1}{p_2} \quad (4.1)$$

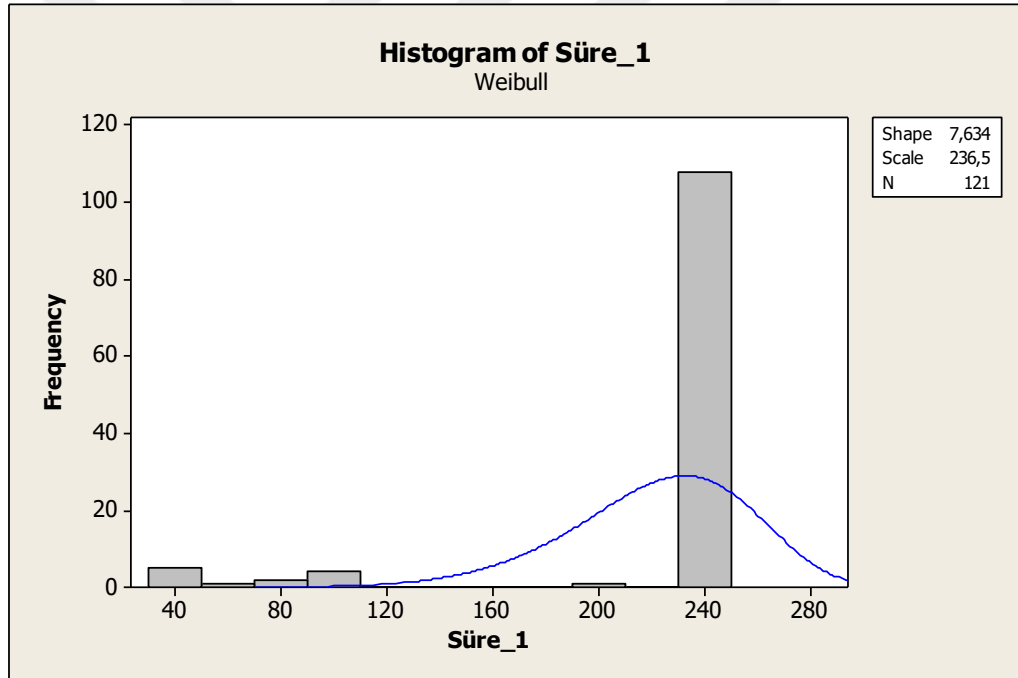
Test istatistiğinin kuralına göre, test sonucunda elde edilen P değerleri, hipotez testlerinde belirlenen ve anlamlılık seviyesi olarak adlandırılan, H_0 hipotezini reddetmek için kabul edilebilir maksimum risk seviyesi değerinden küçükse, H_0 hipotezi reddedilmektedir. Dönemlerin ikili karşılaştırmaları sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.8.'de verilmektedir.

Tablo 4.8. Dönemlerin bozulma oranları test sonuçları

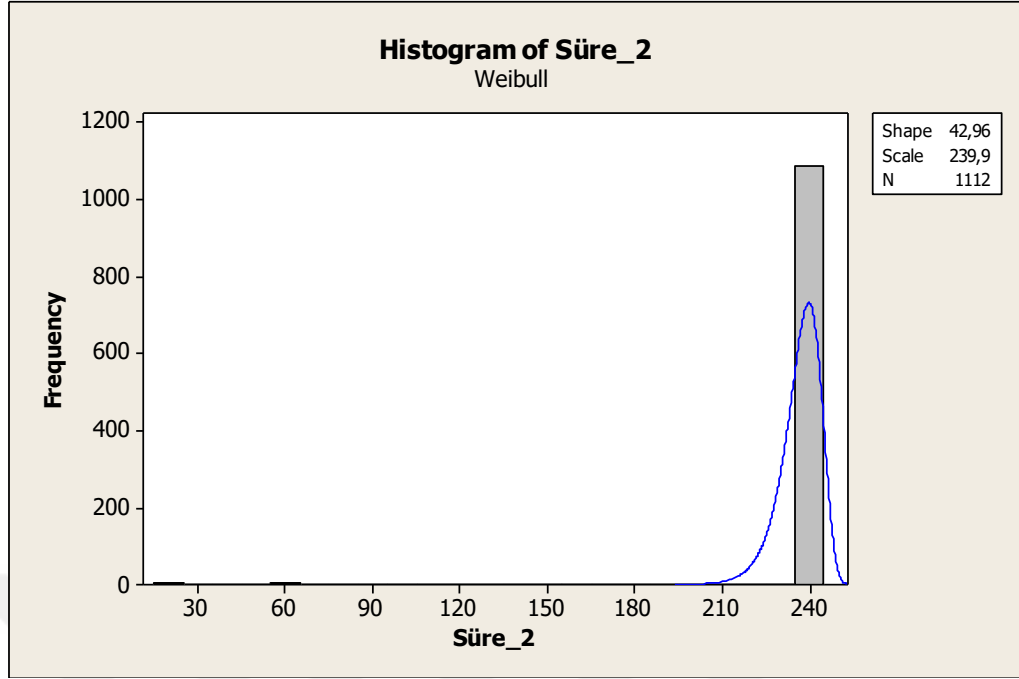
	Arızalı Veri Sayısı	Toplam Veri Sayısı	Oran (P değeri)		Farkın Tahmini	Fark Testi - P Değeri	Fisher'ın Kesin Testi - P Değeri
Dönem-1	13	121	0,107438		0,0876538	0,002	0,000
Dönem-2	22	1112	0,019784				
Dönem-1	13	121	0,107438		0,099119	0,000	0,000
Dönem-3	34	4087	0,008319				
Dönem-2	22	1112	0,019784		0,0114651	0,009	0,003
Dönem-3	34	4087	0,008319				

Tablo 4.8.'de görüldüğü gibi, her 3 dönemin ikili karşılaştırmaları sonucu elde edilen P değerleri, 0,05 anlamlılık seviyesinden küçük olduğu için H_0 hipotezi reddedilmektedir. Bu da dönemlerin bozulma oranlarının birbirinden farklılık gösterdiklerini göstermektedir. Ayrıca dönemlerin bozulma oranlarına bakıldığında, Dönem-1'in en yüksek bozulma oranına, Dönem-3'ün ise en düşük bozulma oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum ise, daha sonra üretilen ve piyasaya sürülen ürünlerin iyileştirmeler sonucu daha düşük bir bozulma oranına dolayısıyla daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

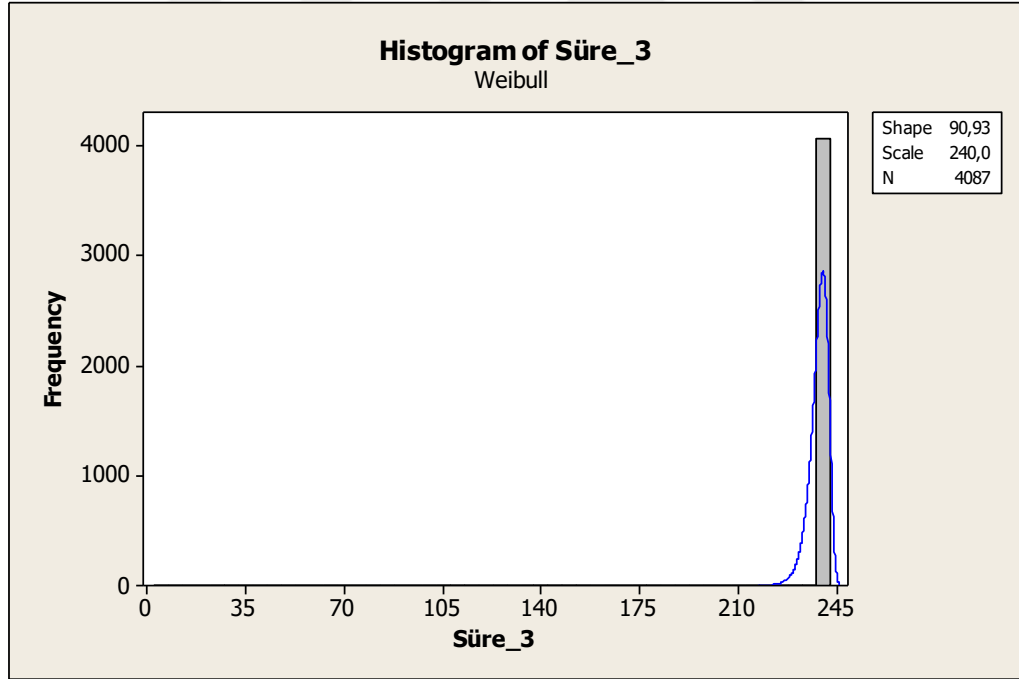
Dönem-1, Dönem-2 ve Dönem-3'te gözlemlenen ürünlerin histogram grafiklerinin gösterimleri sırasıyla, Şekil 4.13., Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'te verilmektedir.



Şekil 4.13. Dönem-1 için histogram grafiği



Şekil 4.14. Dönem-2 için histogram grafiği

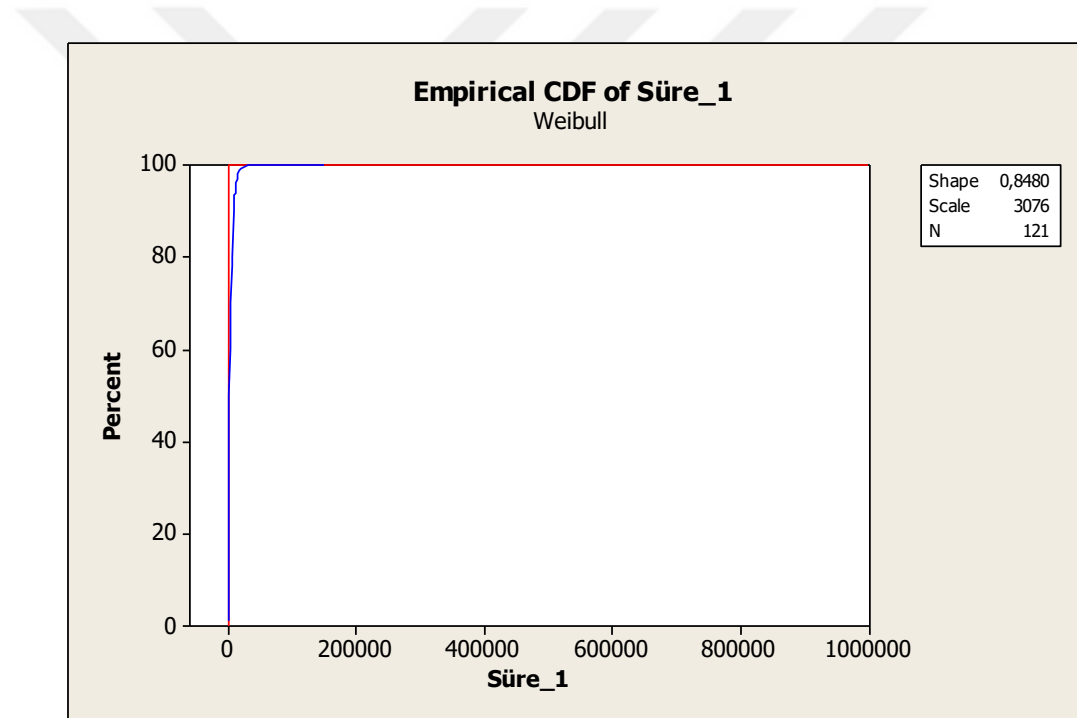


Şekil 4.15. Dönem-3 için histogram grafiği

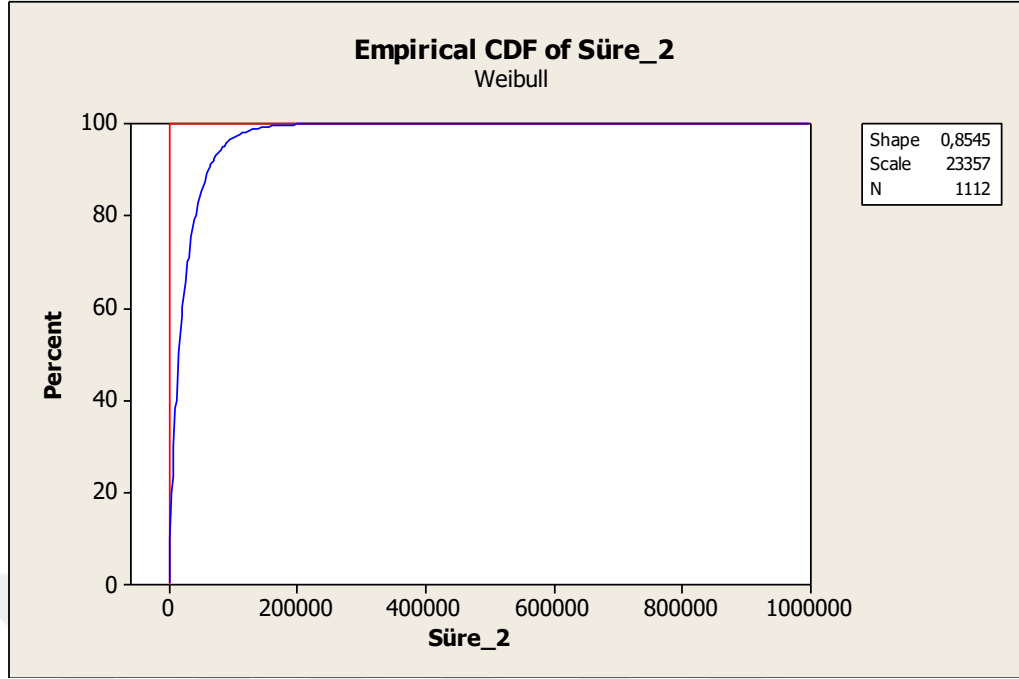
Şekil 4.13., Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'te verilen histogram grafiklerine bakıldığında, Dönem-1'deki ürünlerin oransal olarak da en yüksek bozulma oranına sahip olması ve dağılım grafiğinin daha yaygın bir şekle sahip olması sebebiyle arızalı

ürünlerin süreleri daha belirgin olarak görünmektedir. Ancak Dönem-2’de ve Dönem-3’te bu oran giderek azaldığı için ve dağılım grafiğinin frekansı X ekseninde 0’a yakın gittiği için, yani şekilsel olarak daha ince ve sık bir biçimde olduğu için arızaların daha az ve stabil olduğu sonucuna varılmaktadır.

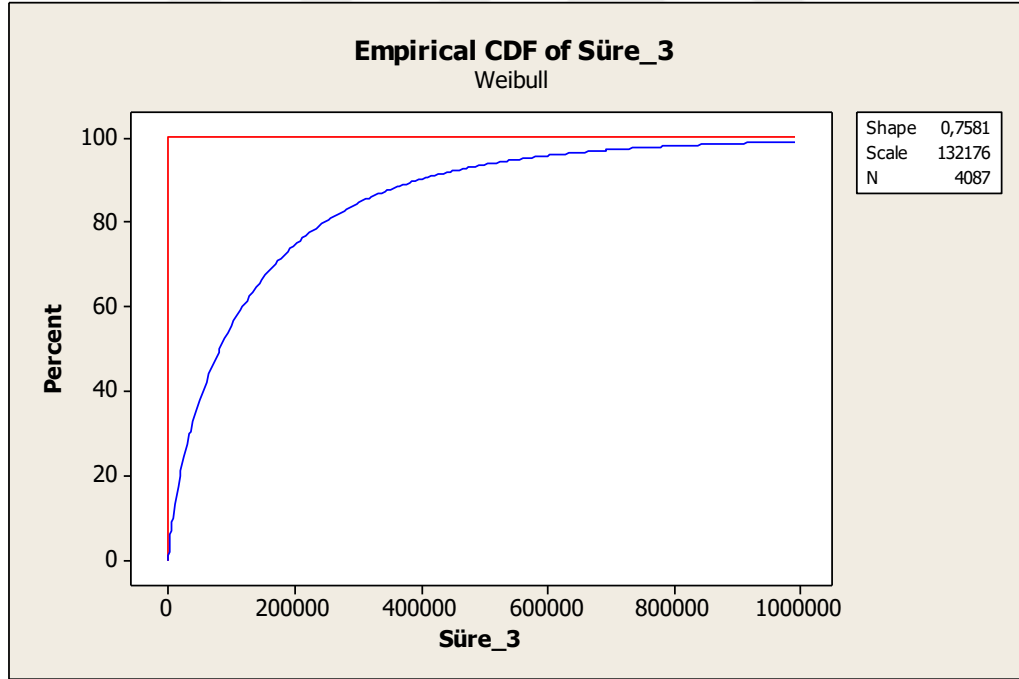
Her 3 dönemin dağılım fonksiyonları çizdirilip farklılıkları yorumlanmıştır. Dönem-1 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği Şekil 4.16.’da, Dönem-2 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği Şekil 4.17.’de ve Dönem-3 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği Şekil 4.18.’de verilmiştir. Ayrıca grafiklere göre, yorumlamayı daha kolay yapabilmek için, ürünlerin her 3 dönemde % 1’i, % 5’i, % 10’u, % 20’si ve % 30’unun beklenen yaşam sürelerinin gösterimi Tablo 4.9.’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Dönem-1 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği



Şekil 4.17. Dönem-2 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği



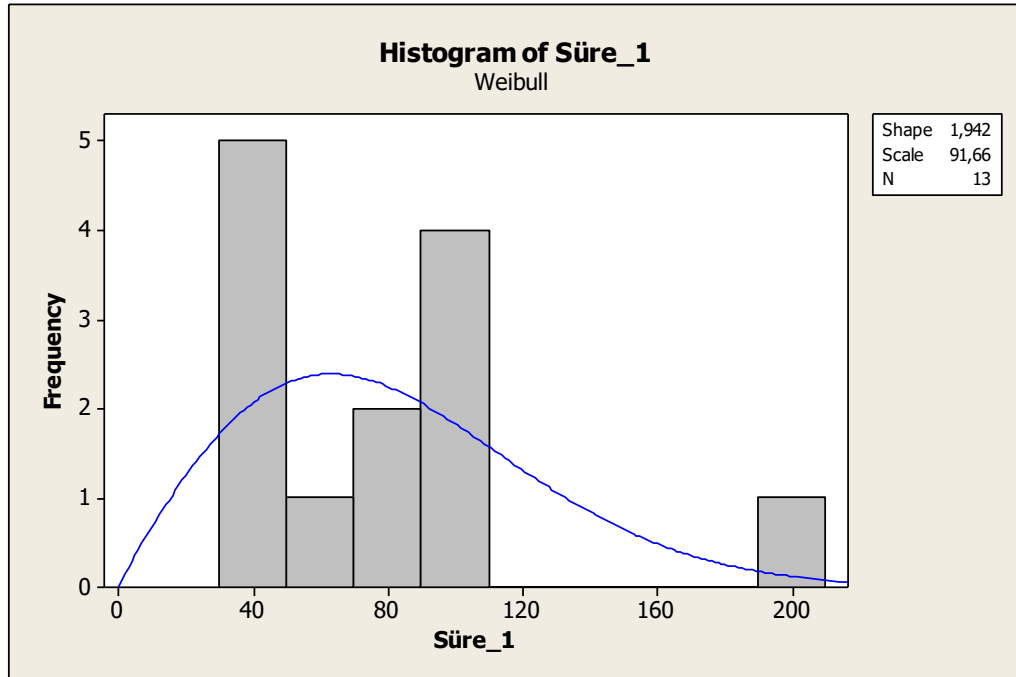
Şekil 4.18. Dönem-3 için kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği

Tablo 4.9. 3 dönem için beklenen yaşam süresi değerleri

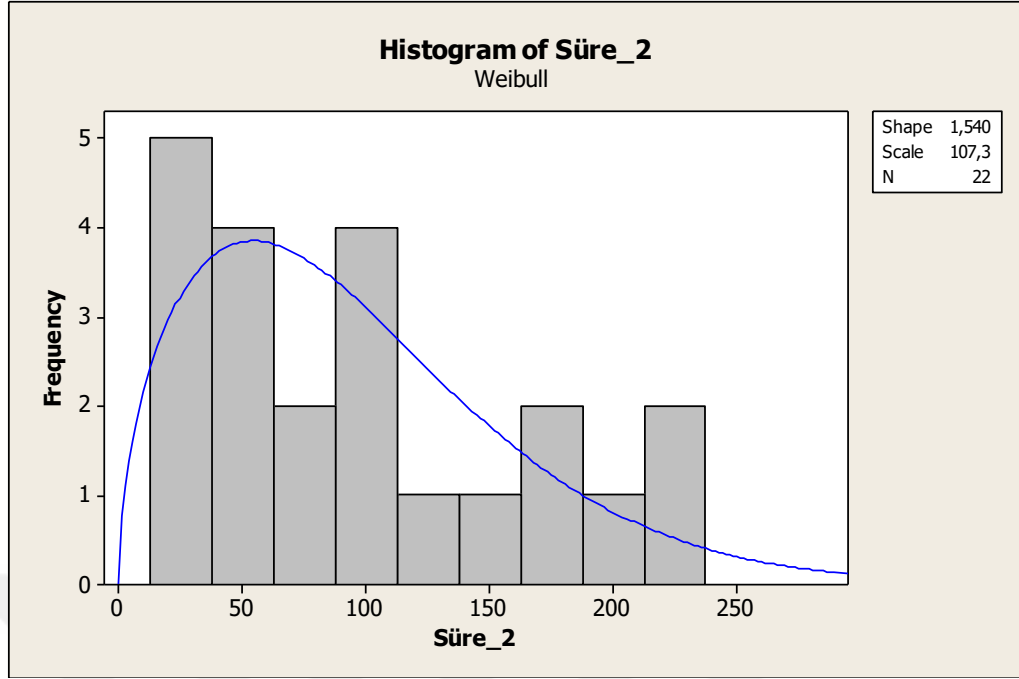
	%1	%5	%10	%20	%30
Dönem-1	13,5553	92,6534	216,525	524,598	912,057
Dönem-2	107,245	722,452	1677,51	4037,13	6989,55
Dönem-3	306,182	2628,40	6792,67	18277,6	33930,4

Tablo 4.9.'daki ürünün farklı yüzdeliklerinin yaşam sürelerine göre, en düşük yaşam süreleri Dönem-1'deki ürünlerde gözlenirken, en yüksek yaşam süreleri ise Dönem-3'te gözlenmektedir. Bu durum, gözlemlenen ilk dönemden son döneme kadar yapılan iyileştirmelerle ürünlerin daha iyi performanslar gösterdiği sonucunu vermektedir.

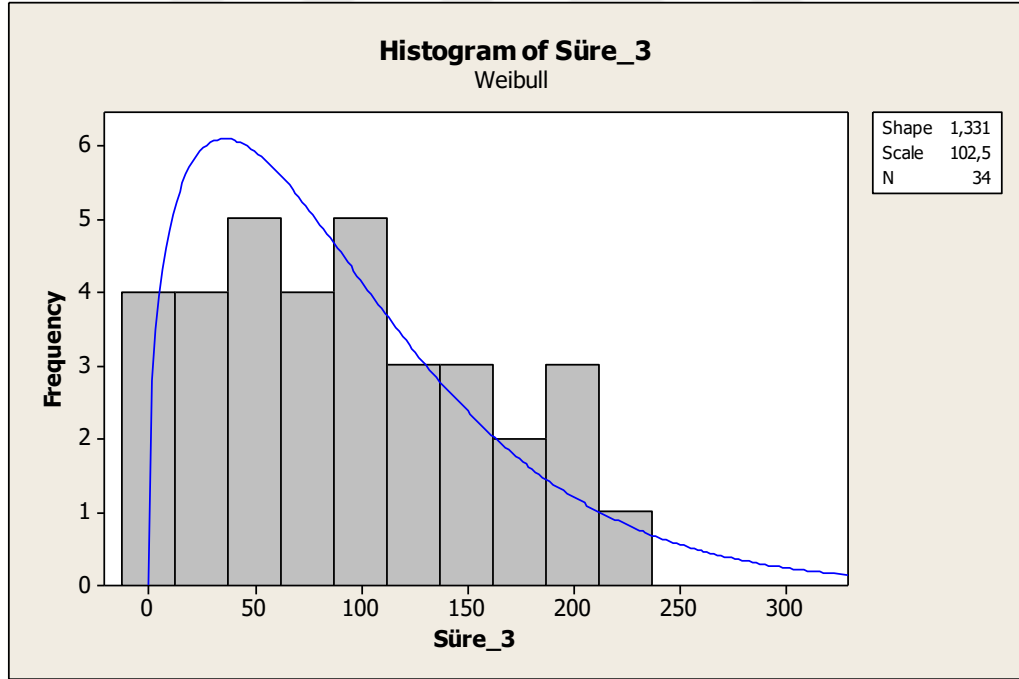
Sansürlü ve arızalı verilerin birlikte analizinden sonra sadece gözlem anında arıza gösteren verilerin de histogramları çizilip yorumlanmıştır. Dönem-1, Dönem-2 ve Dönem-3'te gözlemlenen ürünlerden arızalı ürünlerin histogram grafiklerinin gösterimleri sırasıyla, Şekil 4.19., Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'de verilmektedir.



Şekil 4.19. Dönem-1 için arızalı ürünlerin histogram grafiği



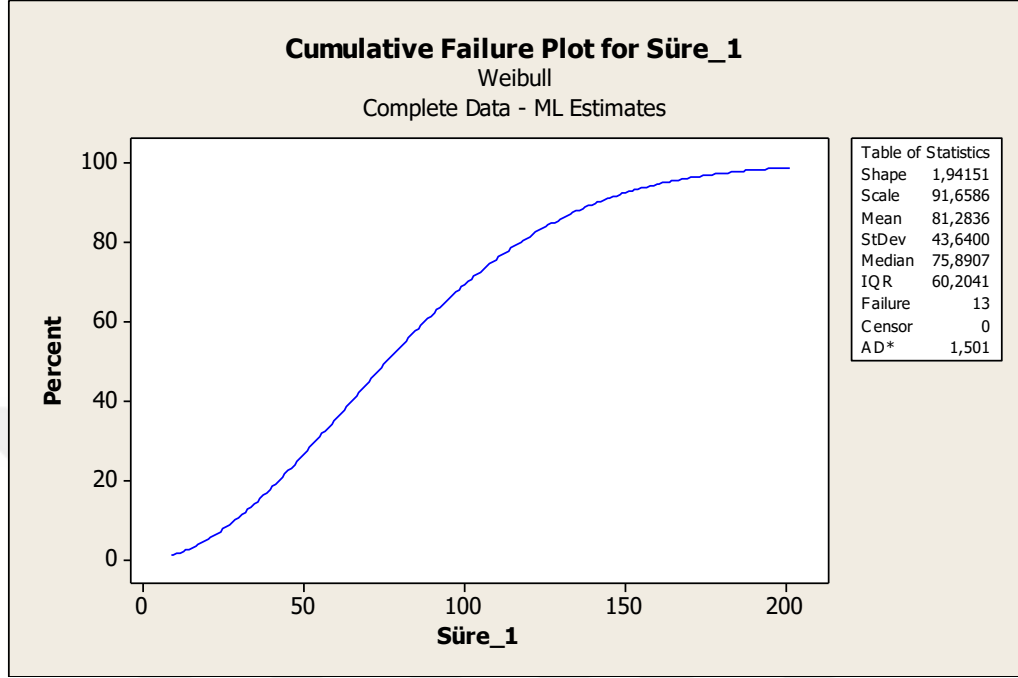
Şekil 4.20. Dönem-2 için arızalı ürünlerin histogram grafiği



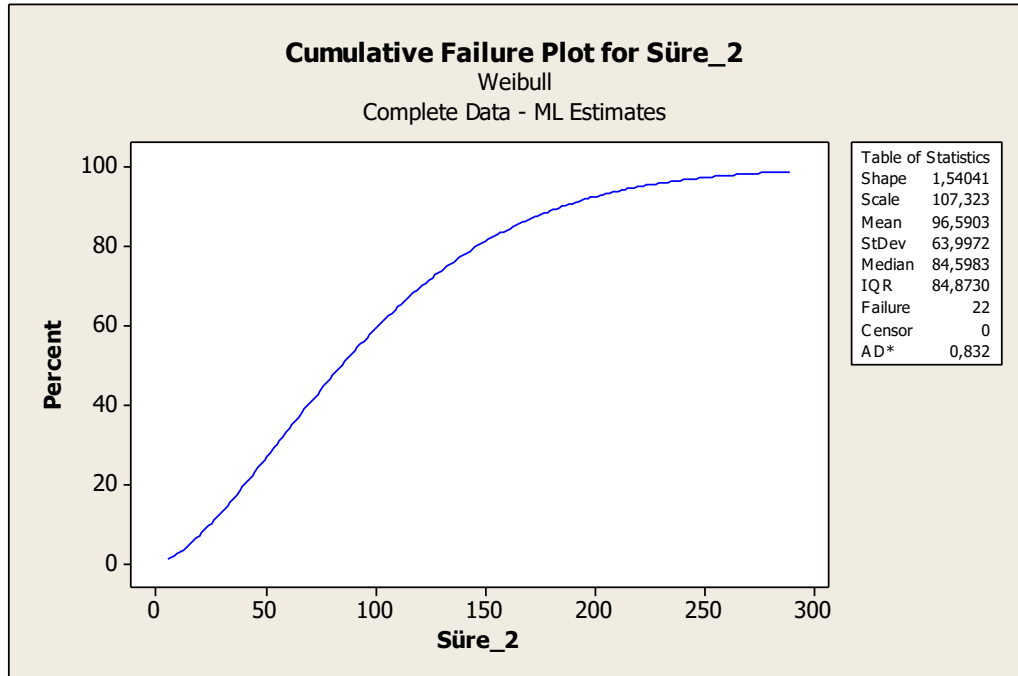
Şekil 4.21. Dönem-3 için arızalı ürünlerin histogram grafiği

Sadece arızalı ürünlerin üstel dağılıma uyduğu varsayımıyla kümülatif arıza grafikleri de çizdirilip ürünlerin % 80'inin kaç günde arızalanmasının beklendiği

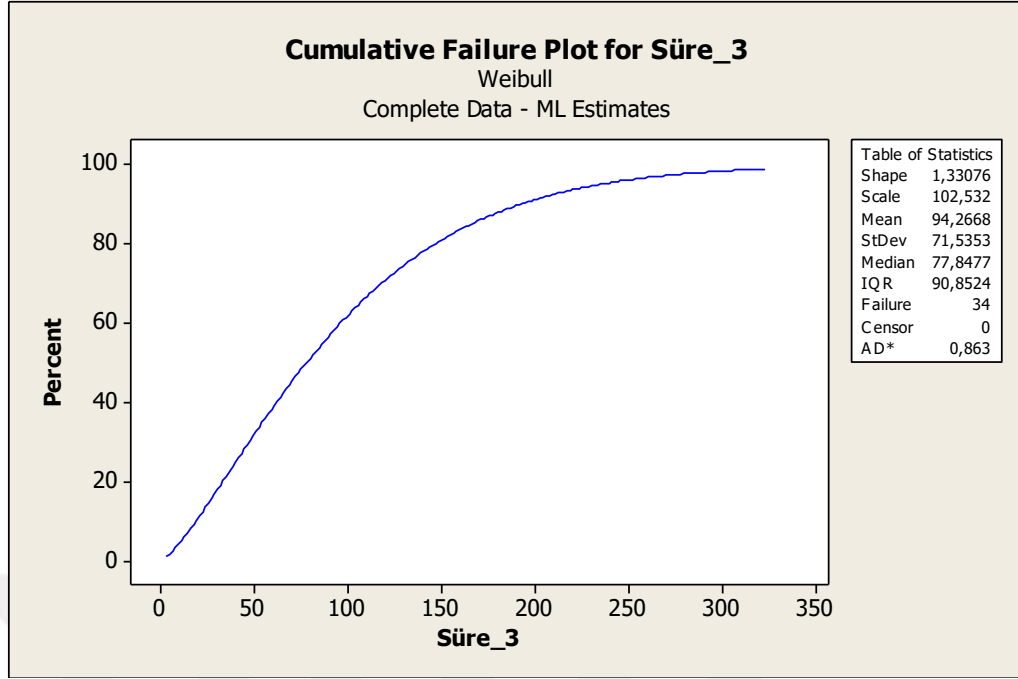
sonucuna ulaşılmıştır. Kümülatif arıza grafikleri Dönem-1 için Şekil 4.22.'de, Dönem-2 için Şekil 4.23.'te ve Dönem-3 için Şekil 4.24.'te verilmektedir.



Şekil 4.22. Dönem-1 için arızalı ürünlerin kümülatif arıza grafiği



Şekil 4.23. Dönem-2 için arızalı ürünlerin kümülatif arıza grafiği



Şekil 4.24. Dönem-3 için arızalı ürünlerin kümülatif arıza grafiği

Arızalı ürünlerin kümülatif arıza grafiklerine göre, ortalama yaşam süreleri sırasıyla, Dönem-1’de 81,3 gün, Dönem-2’de 96,6 gün ve Dönem-3’te ise 94,3 gündür. Her 3 dönem için ortalama yaşam süreleri birbirine yakın seviyelerdedir. Sadece arızalı ürünlerin % 80’inin Dönem-1’de yaklaşık 116 günde arızalanmasının beklendiği, Dönem-2’de yaklaşık 143 günde arızalanmasının beklendiği ve Dönem-3’te yaklaşık 145 günde arızalanmasının beklendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Son olarak da sansürlü verilerin ölçek parametresinin ters parametrizasyonu yapılarak bu parametre değerleri karşılaştırılmıştır. Sansürlü verilerin ölçek parametresi η_c olarak ifade edildiğinde, η_c aşağıdaki gibi bulunmaktadır [32].

$$\eta_c = \frac{M}{S_M + (n-M)c} \quad (4.2)$$

Burada M, arızalı veri sayısını, n, toplam veri sayısını, (n-M) sansürlü veri sayısını, c, sansür süresini ve S_M , arızalanan verilerin arıza süreleri toplamını ifade etmektedir. S_M aşağıdaki formülle bulunmaktadır.

$$S_M = \sum_{i=1}^M t_i \quad (4.3)$$

Bu formülde, t_i , i.verinin yaşam süresini ifade etmektedir. (4.1) numaralı denklemden bulunan η_c değerlerine ters parametrizasyon işlemi yapılarak, gün/adet oranında değerler elde edilerek bu değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Burada $1/\eta_c$,

sansürlü verilerde bir adet ürünün, ortalama bozulana kadar geçen süresinin beklenen değerini ifade etmektedir. Bulunan sonuçlar Tablo 4.10.'da verilmektedir.

Tablo 4.10. 3 dönem için $1/\eta_c$ değerleri

	c (gün)	n (adet)	M (adet)	(n-M) (adet)	S_M (gün)	η_c	$1/\eta_c$
Dönem-1	240	121	13	108	1050	0,000482	2074,62
Dönem-2	240	1112	22	1090	2119	8,342E-05	11987,2
Dönem-3	240	4087	34	4053	3226	3,484E-05	28704,3

Tablo 4.10.'da görüldüğü gibi, gün/adet formunda elde edilen $1/\eta_c$ değerleri karşılaştırıldığında, Dönem-1'in en düşük değere, Dönem-3'ün ise en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Dönemler arasındaki fark oldukça büyüktür. Bu durum, dönemden döneme yapılan iyileştirmelerle, ürünlerin adet başına daha çok gün hayatta kalabileceğini göstermektedir.

5. SONUÇ

Güvenilirlik kelimesinin tanımının, ilk olarak 1816'da Şair Coleridge tarafından yapıldığı düşünülmektedir. İkinci Dünya Savaşı'na kadar bu anlamda bir takım çalışmalar yapılsa da, bu konudaki önemli çalışmalar, İkinci Dünya Savaşı esnasında ve sonrasında elektroniklerin doğasından kaynaklanan birçok güvenilir olmama durumu ve ürün yorgunluğunun gündeme gelmesiyle şekil almıştır. Güvenilirlik analizi, günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte oluşan rekabet ortamında önemli bir çalışma haline gelmiştir. Bu rekabet ortamında müşterilerin firmalardan beklenti içinde olduğu birçok etken bulunmaktadır. Bunlardan birisi de ürünlerin garanti süresidir. Hem müşteriler hem de üretici firmalar açısından ürünün garanti süresi dahilinde arızalanması istenmeyen bir durumdur. Ürünlerde gerçekleşecek herhangi bir arıza, müşteriler açısından memnuniyetsizliğe ve ürüne olan güvensizliğe, üretici firmalar açısından da maliyet ve prestij kaybına neden olur. Bu nedenle garanti süresinin doğru belirlenmesi gerekir. Bu bağlamda da güvenilirlik önemli bir role sahiptir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen uygulama, Eskişehir'de kompresör üretimi yapan bir işletmede yapılmıştır. İşletmede üretilen ürünlerin bir modelinden bir ürün partisi, müşteriye deneme ürünü olarak verilmiştir. Bu anlamda çalışmanın süreci aşağıda verilmektedir.

- Literatürde genellikle, incelenen veri seti tek bir set halinde analiz edilmiştir. Bu çalışmada ise, deneme ürününün çalışma süreci, farklı dönemler bazında gözlemlenmiştir.

- Bu süre boyunca üründe herhangi bir arıza gerçekleşip gerçekleşmediği ile ilgilenilmiştir. Üründe arıza gerçekleştiyse, bu arızanın ne kadar zamanda gerçekleştiği, arızanın sebebi gibi arıza kayıtlarıyla ilgili bilgiler yetkili servislerin oluşturduğu verilerden edinilmiştir. Yapılan gözlem süresince henüz arızalanmayan, çalışmaya devam eden ürünler, ileride de ne zaman arızalanacakları bilinmediği için sağdan sansürlü veriler olarak kabul edilmiştir.

- Farklı 3 dönem halinde yapılan gözlemlerde, ürün arızalanana kadar geçen sürelerin dağılımları ve parametreleri tahmin edilmiştir. Tahminleme sonucunda verilerin, güvenilirlik analizinde önemli bir yer tutan ve literatürde de sıklıkla kullanılan Weibull dağılımına uygunluk gösterdiği sonucuna varılmıştır.

- Parametre tahminleri yapıldıktan sonra bunlardan hareketle, verileri gerçek hayattan elde edilen bu ürünün güvenilirlik analizi çalışması yapılmıştır. Ürünün beklenen garanti süresi içerisinde ne kadarının arızalanacağı sonucuna ulaşılmıştır.
- Literatürdeki bir çok çalışmadan farklı olarak, incelenen farklı dönemler arasındaki farklılıklar ile ilgili analizler yapılmıştır.
- Gözlemlenen ürünün beklenen garanti süresi yaklaşık olarak 10 yıldır. Dolayısıyla yaklaşık 3650 günde, ürünün her 3 dönemdeki hayatta kalma olasılıkları, Dönem-1 için yaklaşık olarak % 31,5, Dönem-2 için yaklaşık olarak % 81,5 ve Dönem-3 için yaklaşık olarak % 93,6 olarak bulunmuştur. Bu durum ilk dönemden son döneme doğru güvenilirlik seviyesinin arttığını dolayısıyla, sonraki dönemlerde üretilen ürünlerin önceki dönemlerine göre daha iyi bir performans gösterdiği sonucunu vermektedir. İşletmenin bu anlamda beklediği güvenilirlik seviyesi % 99,5'tir. Beklenen orana göre yapılan iyileştirmeler henüz yeterli olmamaktadır. Halihazırda yapılacak olan iyileştirmelerle bu orana ulaşmak hedeflenmektedir.
- Dönemler arasındaki farklılıklar ile ilgili yapılan çeşitli analizlerde de, dönemler arasında fark olduğu, ilk dönemden son döneme doğru daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu da ürün üzerinde yapılan iyileştirmelerin olumlu sonuçlar verdiği sonucunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Saleh, J.H. ve Marais, K. (2006). Highlights from the early (and pre-) history of reliability engineering. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(2), 249-256.
- [2] Juran, J. ve Gryna, F. (1988). *Quality Control Handbook*. (4.baskı). New York: McGraw-Hill.
- [3] Atamer, Ş. ve Çavdar, K. (2009). Tek kademeli dişli kutusunun güvenilirlik analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14 (1).
- [4] Öztürk, E. ve Elevli, S. (2013). Cnc tezgahlarının bakım verilerinin istatistiksel değerlendirmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*.
- [5] Gürel, U. ve Çakmakçı, M. (2013). Impact of reliability on warranty: A study of application in a large size company of electronics industry. *Measurement*, 46, 1297-1310.
- [6] Carlson, J. ve Murphy, R.R. (2003). Reliability analysis of mobile robots. International Conference on Robotics & Automation'da sunulan bildiri. Taipei, Taiwan.
- [7] Murthy, D.N.P. (2006). Product warranty and reliability, *Ann. Oper. Res.*, 143, 133-146.
- [8] Dehghan, M. ve Hoseinnezhad, R. (2009). Estimation of components reliability in petrochemical plants using a neural-weibull lifetime model. *Chemical Engineering Communications*, 196, 917-931.
- [9] Kalaiselvan, C. ve Rao, L.B. (2016). Comparison of reliability techniques of parametric and nonparametric method. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19, 691-699.
- [10] Kalaighnam, K., Kushwaha, T. ve Eilert, M. (2013). The impact of product recalls on future product reliability and future accidents: Evidence from the automobile industry. *Journal of Marketing*, 77, 41-57.
- [11] Fan, T. ve Yu, C. (2013). Statistical inference on constant stress accelerated life tests under generalized gamma lifetime distributions. *Quality Reliability Engineering International*, 29, 631-638.
- [12] Bobrowski, S., Chen, H., Döring, M., Jensen, U., Schinköthe, W. (2015). Estimation of the lifetime distribution of mechatronic systems in the presence of a

- covariate: A comparison among parametric, semiparametric and nonparametric models. *Reliability Engineering and System Safety*, 139, 105-112.
- [13] Kleyner, A. ve Sandborn, P. (2008). Minimizing life cycle cost by managing product reliability via validation plan and warranty return cost. *Int. J. Production Economics*, 112, 796-807.
- [14] Kuş, C. (2005). İlerleyen tür tip-II sağdan sansürlü örnekleme dayalı düzgün dağılımın parametrelerinin jackknife tahmin edicisi. *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi*, (2), 11-29.
- [15] Wu, S. ve Kuş, C. (2009). On estimation based on progressive first-failure-censored sampling. *Computational Statistics and Data Analysis*, 53, 3659-3670.
- [16] Johnson, M. ve Nilsson, L. (2003). The importance of reliability and customization from goods to services. *Quality Management Journal*, 10(1).
- [17] Condra, L.W. (2001). *Reliability Improvements with Design of Experiment*. (2.baskı). New York: Marcel Dekker, Inc.
- [18] Stracener, J.T. (1997). Mathematical Basis of Reliability. T.A. Cruse (Ed.), *Reliability-Based Mechanical Design* içinde (s. 91–122). New York: Marcel Dekker.
- [19] Shishko, R. (1995). *NASA Systems Engineering Handbook*. SP-6105.
- [20] Kapur, K.C. ve Pecht, M. (2014). *Reliability Engineering*. New Jersey: Wiley.
- [21] Zio, E. (2007). *An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*. (13.baskı). Singapore: World Scientific.
- [22] Gürel, U. (2008). *Product Reliability*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [23] Leemis, L. M. (2009). *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*. (2.baskı). United States of America.
- [24] Demir, A. (2015). *Reliability Analysis of Heavy Duty Vehicle Components Based On Long Term Warranty Data*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25] Tamam, D. (2008). *Tam ve Sansürlü Örneklem Durumlarında Weibull Dağılımı İçin Bazı İstatistikî Sonuç Çıkarımları*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26] Tobias, P. A. ve Trindade, D. C. (2012). *Applied Reliability*. (3.baskı). Boca Raton: CRC Press.

- [27] Keçecioğlu, D. (2002). *Reliability Engineering Handbook*. (1.baskı). Pennsylvania: DEStech Publications.
- [28] İnceoğlu, F. (2013). *Sağkalım Analiz Yöntemleri ve Karaciğer Nakli Verileri ile Bir Uygulama*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Malatya: İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- [29] Chen, B., Zhu, Y., Hu, J. ve Principe J.C. (2013). *System Parameter Identification Information Criteria and Algorithms*. (1.baskı). Birleşik Krallık, Amerika Birleşik Devletleri: Elsevier.
- [30] Dodge, Y. (2008). *The Concise Encyclopedia of Statistics*. New York: Springer.
- [31] Almalı, M.N. ve Okut, H. (2009). İki Parametrelili Weibull Dağılımında Parametre Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılmasına İlişkin Bir Simülasyon Çalışması. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10 (2), 455-465.
- [32] Peng, D. ve MacKenzie, G. (2007). On the Analysis of Censored Reliability Data.
- [http-1] https://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCvenilirlik_m%C3%BChendisli%C4%9Fi#cite_ref-4 (Erişim tarihi: 13.02.2017)
- [http-2] <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda366b.htm> (Erişim Tarihi: 13.12.2017)
- [http-3] <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35e.htm> (Erişim Tarihi: 01.02.2018)

EK-1. Dönem-1'deki Veri Seti

Veri No	Süre(Gün)	Sansür	Veri No	Süre(Gün)	Sansür	Veri No	Süre(Gün)	Sansür
1	240	0	42	240	0	83	240	0
2	240	0	43	240	0	84	240	0
3	240	0	44	240	0	85	240	0
4	240	0	45	240	0	86	240	0
5	240	0	46	37	1	87	240	0
6	240	0	47	240	0	88	240	0
7	86	1	48	96	1	89	240	0
8	47	1	49	240	0	90	240	0
9	240	0	50	240	0	91	240	0
10	240	0	51	62	1	92	240	0
11	42	1	52	240	0	93	240	0
12	240	0	53	240	0	94	240	0
13	240	0	54	240	0	95	240	0
14	240	0	55	240	0	96	240	0
15	105	1	56	240	0	97	240	0
16	105	1	57	240	0	98	240	0
17	240	0	58	240	0	99	240	0
18	240	0	59	240	0	100	240	0
19	240	0	60	240	0	101	240	0
20	240	0	61	240	0	102	240	0
21	240	0	62	206	1	103	240	0
22	240	0	63	240	0	104	240	0
23	89	1	64	240	0	105	240	0
24	37	1	65	240	0	106	240	0
25	240	0	66	240	0	107	240	0
26	240	0	67	240	0	108	240	0
27	240	0	68	240	0	109	240	0
28	240	0	69	240	0	110	240	0
29	240	0	70	240	0	111	240	0
30	39	1	71	240	0	112	240	0
31	240	0	72	240	0	113	240	0
32	240	0	73	240	0	114	240	0
33	240	0	74	240	0	115	240	0
34	240	0	75	240	0	116	240	0
35	240	0	76	240	0	117	240	0
36	240	0	77	240	0	118	240	0
37	240	0	78	240	0	119	240	0
38	99	1	79	240	0	120	240	0
39	240	0	80	240	0	121	240	0
40	240	0	81	240	0			
41	240	0	82	240	0			

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hande SARAÇOĞLU
Yabancı Dil : İngilizce
Doğum Yeri ve Yılı : Tokat/1990
E-Posta : handesaracoglu90@gmail.com

Eğitim ve Mesleki Geçmişi :

- 2015 – 2018, Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
- 2009 – 2014, Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri :

- Erginel, N., Saraçoğlu, H., Yıldız, G. ve Şentürk, S. (2017). Estimating Fuzzy Life Time with a Fuzzy Reliability Function in the Appliance Sector. *Proceedings of: EUSFLAT-2017 – The 10th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology*, (s. 689-700), Varşova, Polonya.